



ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİNDE MANTARLAR

Dr. Ozan K. BEKMEZCİ
Prof. Dr. Zehra ŞAPCI

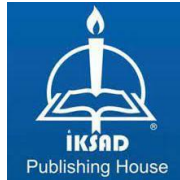


ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİNDE MANTARLAR

Dr. Ozan K. BEKMEZCİ¹

Prof. Dr. Zehra ŞAPCI²

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.15839019>



¹ ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7972-3911>

² ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7811-2235>

Copyright © 2025 by iksad publishing house
All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, distributed
or transmitted in any form or by
any means, including photocopying, recording or other electronic or
mechanical methods, without the prior written permission of the publisher,
except in the case of
brief quotations embodied in critical reviews and certain other noncommercial
uses permitted by copyright law. Institution of Economic Development and
Social
Researches Publications®
(The Licence Number of Pubicator: 2014/31220)
TÜRKİYE TR: +90 342 606 06 75
USA: +1 631 685 0 853
E mail: iksadyayinevi@gmail.com
www.iksadyayinevi.com

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

ISBN: 978-625-378-266-5

Cover Design: Ozan K. BEKMEZCİ

The cover image was created with the ChatGPT artificial intelligence tool.

July / 2025

Ankara / Türkiye

Size: 16x24cm

İÇİNDEKİLER

1. GİRİŞ	3
2. KALICI ORGANİK PESTİSİTLERİN MİKOBİYOREMEDİASYONU (DDT Örneği).....	10
3. TEKSTİL BOYALARININ MANTARLARLA GİDERİMİ.....	15
4. PATLAYICI MADDE KONTAMİNASYONUNUN MİKOBİYOBOZUNDURULMASI (TNT ÖRNEĞİ).....	21
5. ATIKSULARDAN AZOT GİDERİMİNDE MANTARLARIN ROLÜ.....	27
6. ENTOMOPATOJEN MANTARLAR VE BİYOPESTİSİT UYGULAMALARI.....	32
7. PETROL VE HİDROKARBON KİRLİLİKLERİNİN MİKOREMEDİASYONU	37
8. AĞIR METALLERİN GİDERİMİ VE MANTARLAR	43
9. PLASTİK VE SENTETİK POLİMER ATIKLARIN PARÇALANMASINDA MANTARLAR	49
10. FARMASÖTİK VE KİŞİSEL BAKIM ÜRÜNÜ KİRLETİCİLERİNİN GİDERİMİ.....	55
11. KARŞILAŞILAN ZORLUKLAR VE SINIRLILIKLAR	60
12. GELECEK PERSPEKTİFLERİ	66
13. SON SÖZ.....	72
KAYNAKLAR	78

1. GİRİŞ

Çevre kirliliği ve sürdürülebilirlik konularının önem kazandığı günümüzde, mantarların (fungi) benzersiz biyolojik özellikleriyle çevre mühendisliği uygulamalarında kullanımı giderek artan bir araştırma alanı haline gelmiştir. Mantarlar; canlı alemleri arasında kendine özgü konumu olan heterotrofik canlılardır. Tipik bitki benzeri hareketsiz yaşam tarzlarıyla tanınmalarına rağmen aslında biyokimyasal olarak hayvanlara daha yakındırlar. Örneğin mantar hücre duvarı dışarıdan bitkisel yapıda görülse de yapısındaki kimyasal bileşenler hayvansal hücrelere benzerlik gösterir. Ayrıca mantarlar, tıpkı hayvanlar gibi organik karbon kaynaklarına bağımlı yaşamalarına rağmen, diyet spektrumları çok daha geniştir. Neredeyse tüm organik maddeleri parçalayabilirler (Gadd, 2007). Bu özellik, mantarları doğada çürükçül (saprofit) ve ayrıştırıcı rolünün baş aktörleri yapmaktadır (Akpasi et al., 2023).

Mantarların lignin gibi kompleks polimerleri dahi sindirebilmesi, çevre kirliliğine neden olan pek çok dirençli organik kirleticiyi parçalayabilme potansiyeline işaret eder. Özellikle beyaz çürükçül mantarlar(white-rot fungi) selüloz ve hemiselülozun yanı sıra lignini de enzimatik olarak okside edebilen tek organizma grubudur. Lignini parçalama becerisi, lignin benzeri yapıya sahip pek çok organik kirleticinin de hedef alınabileceği anlamına gelir (Harms et al., 2011a; Strong & Claus, 2011). Örneğin bazı pestisitler, boyar maddeler ve petrol hidrokarbonları yapısal olarak kompleks aromatik halkalar içerir ve lignin parçalayan mantar enzimleri (lakkaz, mangan peroksidaz, lignin peroksidaz vb.) bu dirençli bileşikler de dönüştürebilir. Mantarlar ayrıca ağır metalleri hücre duvarlarında tutma veya metabolik yolla detoksifiye

etme kapasitesine sahiptir. Bu nedenle hem organik hem inorganik kirleticilerin biyoremediasyonunda mantarlardan yararlanma fikri, son yıllarda bilimsel ilgiyi üzerine çekmektedir.

Çevre mühendisliği disiplini uzun süredir bakteriyel proseslere dayalı çözümlere odaklanmış olsa da mantarların sunduğu bazı avantajlar belirginleşmiştir. Mantarlar genellikle daha geniş pH ve sıcaklık aralıklarına tolerans gösterebilir, düşük besin koşullarında dahi yaygın mikol kütle (miselyum) oluşturabilmeleri sayesinde kirlilik yayılmış ortamlarda büyüyerek geniş alanlara nüfuz edebilirler. Bazı durumlarda mantarlar, geleneksel bakteriyel arıtma sistemlerinin zorlandığı yüksek toksisite veya düşük besin ortamlarında hayatta kalıp aktif kalabilmektedir(Lupini et al., 2022; Serag et al., 2025). Bu yönüyle mantarlar, besin ve oksijen kısıtlı topraklarda veya atıksularda ilave bir biyolojik arıtma ajanı olarak görülebilir.

Bu kapsamlı incelemenin, çevre bilimciler, mühendisler ve akademisyenler başta olmak üzere konuya ilgi duyan tüm profesyonellere yol gösterici bir kaynak olması amaçlanmaktadır.

Bu bölümde, mantarların çevre mühendisliği alanındaki kullanımının kapsamı ve temel kavramları tanımlanacaktır. Kitap boyunca odaklanacağımız uygulama alanlarının çerçevesi çizilecek ve mantarları diğer mikroorganizmalardan ayıran özellikler vurgulanacaktır. Ayrıca, mantarların çevresel biyoteknolojide kullanılmasında rol oynayan başlıca mekanizmalar açıklanacak, böylece sonraki bölümlerde sıkça değineceğimiz terimler ve prensipler için ortak bir zemin oluşturulacaktır.

Mantarlar, doğadaki madde döngülerinin kritik aktörleridir. Ölü organik maddelerin ayrıştırılmasından toprağın verimliliğine, bitki kökleriyle kurdukları mikorizal mutualizmlerden patojenik etkilerine kadar geniş bir etki spektrumuna sahiptirler. Çevre mühendisliği perspektifinden bakıldığında ise mantarların en önemli özelliği, birçok kirletici maddeyi dönüştürebilme potansiyelleridir.

Biyolojik arıtma süreçlerinde bugüne dek bakteriler daha yaygın kullanılagelmiştir; çünkü bakteriler hızlı büyüme ve çoğalma kabiliyetleriyle reaktörlerde kontrol edilebilirlik açısından avantaj sunar. Ancak mantarlar, bazı durumlarda bakterilerden daha dirençli ve esnek metabolizmalı olabilir. Örneğin yüksek oranda toksik ağır metal içeren ortamlarda veya pH'ın oldukça düşük/yüksek olduğu ortamlarda bazı mantar türleri hayatta kalıp aktif kalabilirken, birçok bakteri türü hızla inhibe olur(Lupini et al., 2022; Rose & Devi, 2018). Ayrıca mantarlar, miselyum adı verilen ipliksi yapıları sayesinde kirleticilerin bulunduğu ortamda fiziksel olarak geniş alan kaplayabilir ve biyokütlelerini yayarak etki alanını büyütebilirler. Bu özellik, toprak veya katı atık matrikslerinde kirleticiye ulaşma açısından avantaj sağlar.

Mantarların çevresel uygulamalarındaki bir diğer anahtar kavram dış enzim üretimidir. Birçok mantar, ortamına güçlü oksidatif enzimler salgılayarak büyük organik molekülleri dışarıda parçalar. Beyaz çürükçül mantarların lignin parçalayan enzimleri bunun en bilinen örneğidir(Wong, 2009). Bu mantarlar, lignoselülozik maddeleri parçalayabilme yetenekleri sayesinde doğada en dirençli polimerlerden biri olan lignini bile ayrıştırabilirler. Salgıladıkları enzimler arasında özellikle lakkaz (EC 1.10.3.2), lignin peroksidaz (LiP, EC 1.11.1.14) ve

mangan peroksidaz (MnP, EC 1.11.1.13) öne çıkar (Rodríguez Couto & Toca Herrera, 2006). Bu enzimlerin substrat spesifikliğı düşük olduğı için, lignin benzeri yapıda olup da doğada kalıcı (persistant) olan pek çok organik kirleticiye karşı etkilidir (Bugg et al., 2011).

Örneğın fenolik yapılı pestisitler, aromatik hidrokarbonlar, boyar maddeler, bazı ilaç atıkları ve endokrin bozucular gibi bileşikler, bu ligninolitik enzimler aracılığıyla oksitlenerek daha az toksik, hatta biyolojik olarak parçalanabilir formlara dönüştürülebilmektedir (Strong & Claus, 2011). Enzimler, elektron transferiyle bu bileşiklerin aromatik halkalarını hedef alır; bu da çoğı geleneksel arıtım yönteminin başaramadığı bir yıkımı mümkün kılar. Özellikle boyar maddeler gibi azo bağları içeren moleküllerde, bu enzimlerin uygulandığı sistemlerde renk gideriminin yanında kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) ve toplam organik karbon (TOC) gibi parametrelerde de önemli düşüşler sağlandığı gösterilmiştir (Champagne & Ramsay, 2010; Soares et al., 2006).

Ayrıca, mantarların bu enzimleri dış ortamda üretme yeteneğı, onları in-situ (yerinde) uygulamalar için uygun hale getirir (Asgher et al., 2008). Toprağı veya atık suya doğrudan uygulandıklarında, enzimler mantar miselyumunun ulaşamadığı bölgelerde bile etkili olabilir. Bunun yanında, bu enzimlerin immobilize edilerek kolonlar, biyofiltreler veya reaktör sistemlerinde kullanılması da mümkündür (Durán & Esposito, 2000). Lakkaz gibi bazı enzimler, nötr pH ve ortam sıcaklığına yakın koşullarda bile aktif kalabildikleri için uygulama esnekliğı sunarlar (Rodríguez Couto & Toca Herrera, 2006).

Sonuç olarak, dış enzim üretimi mantarların çevre mühendisliği uygulamalarındaki katalitik gücünün temelini oluşturur. Bu mekanizma sayesinde, klasik mikrobiyal yollarla giderilemeyen birçok kirleticiye karşı etkili, sürdürülebilir ve doğayla uyumlu çözümler geliştirilebilmektedir. Bu nedenle ligninolitik enzim sistemi, sadece biyolojik arıtmada değil aynı zamanda çevresel toksisite kontrolü ve ekolojik restorasyon gibi alanlarda da büyük potansiyele sahiptir (Harms et al., 2011b).

Enzimatik degradasyon dışında mantarların kirletici uzaklaştırmadaki mekanizmaları arasında biyosorpsiyon ve biyokümülyasyon da önem taşır. Canlı veya ölü mantar biyokütlesi, özellikle ağır metaller gibi inorganik kirleticileri hücre duvarındaki fonksiyonel gruplar aracılığıyla yüzeyine bağlayarak ortamdan uzaklaştırabilir (biosorpsiyon) (Rajhans et al., 2021). Canlı hücreler ise bazı metalleri veya organik molekülleri metabolizma yoluyla alıp hücre içinde depolayabilir (biyokümülyasyon). Bu süreçler, mantar hücre duvarının zengin kimyasal yapısı sayesinde gerçekleşir ve mantar biyokütlesini adeta bir doğal iyon değiştirici veya adsorban haline getirir (Serag et al., 2025).

Kirleticilerin gideriminde mantarların bire bir kendilerinin kullanıldığı uygulamaların yanı sıra (canlı mantar inokulumu ile biyoremediasyon gibi), mantarlardan elde edilen enzim ve metabolitlerin kullanıldığı (arıtma reaktörlerinde fungus enzimlerinin uygulanması gibi) yaklaşımlarda mevcuttur. Örneğin bazı uygulamalarda, atık su arıtım tesislerinde mantar konsorsiyumları büyütülerek istenen arıtım sağlanırken, bazı durumlarda mantarların

salgıladığı lakkaz enzimi immobilize edilip reaktörlere konularak boyar madde veya ilaç kalıntıları giderilmektedir (Vaksmaa et al., 2023).

Mantar tabanlı teknolojiler, in-situ (kirliliğin yerinde arıtılması) veya ex-situ (kirlenmiş materyalin kazılıp/çıkarılıp başka bir yerde arıtılması) biçiminde uygulanabilir. Her bir yöntem için mantarların performansı farklılık gösterebilir ve tasarım parametreleri buna göre optimize edilmelidir.

Mikobiyoremediasyon (mycoremediation), mantarlar kullanılarak yapılan biyoremediasyon faaliyetlerini ifade eder. Bu kavram altında, mantarların yardımıyla toprak, su, çamur, hava filtresi malzemeleri gibi ortamlardan kirletici giderimi anlaşılır. Mikobiyoremediasyon, genellikle organik kirleticilerin (petrol hidrokarbonları, pestisitler, boyalar, patlayıcılar, farmasötikler vb.) mantarlar tarafından enzimatik olarak biyodegradasyonu şeklinde gerçekleşir. Ancak inorganik kirleticiler için de mantarların kullanıldığı durumlar bu başlık altında incelenir. Örneğin, ağır metal birikimi veya metallerin daha az toksik hale indirgenmesi gibi.

Önemli bir diğer terim de **mikofiltrasyon** (mycofiltration) kavramıdır. Mikofiltrasyon, mantar miselyumunun bir filtre ortamı gibi kullanılarak su veya havadaki istenmeyen partikül ve mikroorganizmaların tutulması anlamına gelir (Beltrán-Flores et al., 2022; Mnkandla et al., 2024; Sen et al., 2023). Özellikle su kaynaklarında patojen giderimi veya askıda katı madde filtrasyonu için odun parçaları üzerinde yetişen mantar miselyumunun bir biyofiltre olarak kullanıldığı deneysel çalışmalar mevcuttur (Beltrán-Flores et al.,

2022; Marco Antonio et al., 2018; Sen et al., 2023). Bu konular kitapta ayrıntılı incelenmeyecek olsa da, gelecekte mantarların çevre teknolojilerinde sadece kirletici yıkıcı değil, fiziksel filtre olarak da kullanılabileceğini not etmek gerekir.

Mantarların entegre sistemlerde kullanımıyla ilgili olarak **funga-bakteriyel konsorsiyum**ların varlığı da önemlidir. Doğada mantarlar ve bakteriler sıklıkla birlikte çalışarak organik maddeleri parçalarlar. Birçok biyoreaktörde mantarların veya bakterilerin tek başına değil beraber çalıştığını gösteren araştırmalar vardır. Örneğin bir atık su arıtımında mantar bakteriye kıyasla farklı bir ara ürünü dönüştürür veya bakterinin kullanamadığı büyük molekülü parçalayarak bakteriye daha küçük moleküller sunar. Bu **sinerjistik** etkileşimlerden yararlanmak, geleceğin biyoremediasyon stratejilerinde kritik rol oynayabilir (Vaksmas et al., 2023).

Son olarak, mantar uygulamalarının çevresel etkinliğini değerlendirirken sadece kirletici konsantrasyonlarındaki azalmaya değil, toksisite değişimine de bakmak gerektiği hatırlanmalıdır. Zira mantarlar bazı organik kirleticileri tamamen **mineralize** etmeyip daha toksik ya da daha kalıcı **ara ürün**lere dönüştürebilir. Bu nedenle laboratuvar çalışmalarında gözlenen renk giderimi, konsantrasyon düşüşü gibi metriklerin yanı sıra **ekotoksikolojik** testler de yapılarak mantar arıtımının gerçek çevresel faydası ortaya konmalıdır. Kitabın ilerleyen kısımlarında her bir uygulama alanı için mevcut literatürde bu konulara dair bilgiler verilecektir.

2. KALICI ORGANİK PESTİSİTLERİN MİKOBİYOREMEDİASYONU (DDT Örneği)

Kalıcı organik kirleticiler (POPs) arasında yer alan bazı pestisitler, çevrede uzun süre bozulmadan kalıp birikir ve hem ekosistem hem insan sağlığı için ciddi tehdit oluşturur. Bu bölümde bu tür kalıcı pestisitlerin mantarlar kullanılarak bozundurulması ele alınacaktır. Özellikle DDT (Dichlorodiphenyltrichloroethane) adlı klorlu pestisit örneği üzerinden ilerleyeceğiz. DDT, 20. yüzyıl ortalarında tarım ve halk sağlığında yaygın kullanılmış, ancak sonrasında kalıcılığı ve toksisitesi nedeniyle yasaklanmış bir insektisittir. 1940'lardan 1970'lere dek dünya çapında tonlarca DDT kullanılmış ve bu maddenin kalıntıları halen birçok toprağa ve sucul ortama yayılmış durumdadır (Mansouri et al., 2017). DDT'nin yarı ömrü, çevresel koşullara bağlı olarak 2 ila 15 yıl arasında değişmektedir (Thomas & Gohil, 2011). Buna bağlı olarak besin zincirinde biyomagnifikasyona uğradığı ve yaban hayatı ile insan üzerinde hormonal ve sinirsel zararlar oluşturduğu bilinmektedir (Mansouri et al., 2017). Stockholm Sözleşmesi ile pek çok ülkede DDT'nin tarımsal kullanımı yasaklanmıştır, ancak halen bazı tropik bölgelerde sıtma mücadelesi için sınırlı kullanımına izin verilmektedir (Mansouri et al., 2017). Dolayısıyla geçmişteki kirliliğin temizlenmesi ve mecburi kullanıldığı yerlerdeki etkilerin giderilmesi için DDT'nin etkin biçimde ortamdaki uzaklaştırılması gerekmektedir.

Mantarlar, DDT gibi klorlu organik bileşikler parçalama potansiyeline sahip organizmalar arasındadır. Hem kahverengi çürükçül mantarlar(brown-rot fungi) hem de beyaz çürükçül mantarlar(white-rot

fungi) DDT'yi dönüştürebilmektedir (Bumpus & Aust, 1987; Purnomo et al., 2008). Literatürde özellikle beyaz çürük mantar *Phanerochaete chrysosporium* ve bazı *Pleurotus* türleri ile, kahverengi çürük mantar *Gloeophyllum* türlerinin DDT'yi parçalamaya çalıştığı araştırmalar mevcuttur. Mantarlar DDT'yi doğrudan enerji kaynağı olarak kullanamazlar ancak ko-metabolizma yoluyla (bir başka besin varlığında enzimatik olarak) dönüştürebilirler. Ko-metabolizma, mikroorganizmaların esas enerji veya karbon kaynağı olmayan bir bileşiği, başka bir uygun karbon kaynağı (ko-substrat) varlığında enzimatik olarak parçalayabilmesidir. Purnomo ve arkadaşlarının çalışmaları, farklı mantar gruplarının DDT'yi farklı yollarla dönüştürdüğünü ancak sonuç ürünlerin de toksik olabildiğini göstermiştir (Purnomo et al., 2008). Örneğin DDT'nin DDE ve DDD gibi türevlerine parçalanması yaygındır fakat bu ürünler de kalıcı ve zararlı maddelerdir. Mineralizasyon, yani DDT'nin tamamen CO₂ ve H₂O gibi zararsız son ürünlere dönüşmesi ise çok sınırlı düzeydedir. Yapılan araştırmalarda beyaz çürük, kahverengi çürük ve gübre kökenli bazı mantarların DDT'yi %10'dan daha az oranda tam mineralize edebildiği görülmüştür (Huang & Wang, 2013). Bu da mantarların DDT'yi parçalasa bile geriye kalan ürünlerin ortamda kalıcı olabileceği anlamına gelir.

Mantarların DDT gideriminde kullanımı üzerine 2010'lu yıllarda yapılan laboratuvar çalışmaları umut vaat etmekle birlikte, henüz bu yöntemin yaygın bir uygulaması bulunmamaktaydı. Örneğin toprakta DDT ile kontamine bölgelerden izole edilen yerel mantar türleriyle yapılan denemelerde, bazı türlerin yüksek DDT konsantrasyonlarına

tolerans gösterip DDT'yi metabolize edebildiği raporlanmıştır (Ebsa et al., 2024). 2019 yılında Russo ve arkadaşları, DDT ile yıllarca kirlenmiş tarım topraklarından iki saprofitik mantar izole ederek bunların DDT'ye karşı davranışlarını incelemiştir(Russo et al., 2019). Bu çalışmada mantar suşlarının yüksek DDT konsantrasyonlarına alışık olduğu, DDT varlığında dahi metabolik faaliyetlerini sürdürüp büyüyebildikleri gösterilmiştir. Dahası, DDT'nin hücre içinde neden olduğu reaktif oksijen türü (ROS) stresine karşı bu mantarların savunma geliştirdiği ve işlevlerini yitirmedikleri tespit edilmiştir (Russo et al., 2019). Bu bulgular, kirlenmiş saha koşullarında uzun süre yaşamış mantarların DDT'yi tolere edip parçalama potansiyelinin laboratuvar kültür mantarlarına göre daha yüksek olabileceğini düşündürmektedir. Nitekim aynı çalışmada, söz konusu mantarların topraktaki DDT konsantrasyonlarını belirgin düzeyde azaltabildiği raporlanmıştır.

Bununla birlikte, DDT'nin mantarlar yardımıyla saha şartlarında tamamen temizlenmesi hala araştırma aşamasındadır. Ahlem Mansouri ve çalışma arkadaşlarının (2017) kapsamlı incelemesine göre, DDT kirliliğinin biyoremediasyonu önünde bazı önemli zorluklar bulunmaktadır(Mansouri et al., 2017). Birincisi, DDT dünya genelinde çok geniş alanlara yayılmıştır ve her bölgede farklı iklim/toprak koşulları vardır; dolayısıyla tek bir mantar türü veya yöntem tüm durumlara uymayabilir. İkincisi, DDT'nin yapısal kararlılığı nedeniyle mantarlar genellikle kısmi deklorinasyon yapıp tam mineralizasyonu başaramamaktadır. Üçüncüsü, mantarların DDT'yi parçalama mekanizmaları tam olarak aydınlatılamamıştır; belki de parçalanma, mantar enzimlerinin değil topraktaki ortak metabolik etkileşimlerin bir

sonucu olabilir. Bu belirsizlikler, yöntemin optimizasyonunu zorlaştırmaktadır.

Güncel araştırmalarda çözüm arayışlarından biri, mantar uygulamalarını destekleyici maddeler ve ortak bitki/mikrop sistemleriyle birleştirmektir. Örneğin bazı çalışmalar, DDT ile kirlenmiş toprağa besleyici organik atıklar veya kompost eklemenin mantar aktivitesini artırdığını, böylece DDT bozunma oranını yükselttiğini göstermiştir (Geris et al., 2024). Bunun mantığı, organik atığın mantar için ek bir karbon/enerji kaynağı sağlayıp aynı zamanda toprağın su tutma ve besin özelliklerini iyileştirerek mantarların büyümesini teşvik etmesidir. Benzer şekilde, fito-mikoremediasyon denilen entegre yaklaşımlarda, bitki kökleri ve onlarla ortak yaşayan mantarlar birlikte kullanılarak hem bitki tarafından DDT alınıp tutulması hem de mantar tarafından bozundurulması hedeflenmektedir (Sharuddin et al., 2024). Bazı bitki-mantar ortaklıklarında mantar, bitkinin kök bölgesine (rizosfere) salgıladığı enzimlerle DDT'yi daha bitki alabilsin diye parçalayabilmektedir.

Sonuç olarak, DDT örneği özelinde mantarların ciddi bir potansiyele sahip olduğu ancak halen daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulduğu söylenebilir. Beyaz çürüklük mantarlarının lignin parçalayan enzimleri DDT yapısını dönüştürebilmektedir ve ileride genetik veya süreç mühendisliği ile bu dönüşümün verimi artırılabilir. Nitekim bazı araştırmalarda, mantarların genetik yollarla veya adaptasyonla DDT'yi daha hızlı mineralize edebilecek formlarını elde etme hedefi bulunmaktadır. Gelecek perspektifi bölümünde tekrar ele alınacağı üzere, enzim mühendisliği veya sentetik biyoloji ile mantarların klorlu

organiklere özelleştirilmesi olası bir yöndür. Şu anki durumda ise, DDT ile kirlenmiş sınırlı bölgelerde mantar uygulamaları pilot ölçekli olarak test edilmiş ve karışık sonuçlar alınmıştır: DDT konsantrasyonlarında azalma gözlense bile oluşan ara ürünlerin ve toprak ekosistemine uzun vadeli etkilerin iyi izlenmesi gerekmektedir. Bu alan, çevre mühendisliğinde mantar kullanımı açısından önemli ve aktif bir araştırma konusudur.

3. TEKSTİL BOYALARININ MANTARLARLA GİDERİMİ

Tekstil endüstrisinde kullanılan sentetik boyar maddeler, atıksularda yüksek renk ve organik yük oluşturmalarının yanı sıra genellikle aromatik ve toksik yapıda oldukları için çevreye önemli zararlar verebilmektedir. Tekstil boyaları, sulara kalıcı renk vermekte, ışık geçirgenliğini azaltarak su ekosistemlerini etkilemekte ve bir kısmı canlılar üzerinde karsinojenik veya mutajenik etki yapabilmektedir. Konvansiyonel arıtma sistemlerinde (örneğin aktif çamur proseslerinde) tekstil boyalarının tam olarak giderilemediği, genellikle arıtma çıkışlarında renk ve bileşik formunda kalıntı kaldığı bilinmektedir. İşte bu noktada mantarların özellikle beyaz çürük mantar grubunun boyar madde gideriminde bir alternatif oluşturabileceği fikri doğmuştur.

Mantarların boyaları giderme mekanizmaları biyosorpsiyon, biyokümülyasyon ve biyodegradasyon olmak üzere üç ana grupta incelenir:

Biyosorpsiyonda, boyar madde molekülleri mantar biyokütlesinin (canlı veya ölü olabilir) yüzeyine adsorplanır veya mantar biyokütlesinin içindeki boşluklara girer. Dolayısıyla, metabolik enerji harcanmadan gerçekleşebilir. Bu nedenle ölü mantar hifaları bile, yüzeylerindeki fonksiyonel gruplar sayesinde boya uzaklaştırmada yüksek performans gösterebilir. Bu hifalardaki kitin, glukan ve protein bazlı yapılar, boyar maddelerle elektrostatik ve van der Waals etkileşimleri kurarak onları tutabilir.

Biyosorpsiyon süreci, özellikle düşük konsantrasyonlardaki boyar maddelerin giderilmesinde avantaj sağlar ve bu yöntemle kullanılan ölü biyokütle, reaktör sistemlerinde tekrar tekrar kullanılabilir. Ayrıca, biyosorpsiyon işleminin pH, sıcaklık ve iyonik güç gibi çevresel faktörlere duyarlılığı, bu yöntemin uygulanabilirliğini etkileyebilir. Bu nedenle, optimum şartların belirlenmesi ve biyokütlenin fiziksel-kimyasal özelliklerinin modifiye edilmesi, biyosorpsiyon verimliliğini artırmak için önemlidir. Bazı araştırmalar, mantar biyokütlesinin kimyasal modifikasyonla (örneğin aside veya alkaliye maruz bırakılarak) yüzey yükünün artırılmasının, boya bağlama kapasitesini önemli ölçüde artırabileceğini göstermektedir (Deng & Ting, 2005; Karthik et al., 2022; Puchana-Rosero et al., 2017; Shanmugam et al., 2021).

Biyoakümülyasyonda, canlı mantar hücrelerinin aktif metabolizma yoluyla boyar maddeyi hücre içine alarak depolar. Bu süreçte, boya molekülleri plazma membranından aktif taşıma mekanizmalarıyla sitoplazmaya alınır ve burada vakuoller ya da hücre içi lipofilik bölgelerde birikir. Bu durum, mantarların sadece yüzey etkileşimiyle değil, aynı zamanda hücresel düzeyde toksik bileşikler kontrol altına alma potansiyelini de gösterir. Özellikle ağır metal kompleksli boyalar gibi zor parçalanan moleküllerin biyokümülyasyon yoluyla uzaklaştırılması, mantarları klasik arıtma ajanlarından ayıran önemli bir özelliktir. Ancak bu süreç enerji gerektirdiği için sadece canlı ve aktif mantar hücrelerinde gözlenir; dolayısıyla çevresel koşulların, besin durumunun ve mantarın metabolik aktivitesinin sürdürülebilirliği kritik önemdedir.

Biyodegradasyonda ise mantarın salgıladığı enzimlerle boyarmadde molekülünü kimyasal olarak parçalayarak daha küçük yapıdaki maddelere dönüştürür.

Elbette çevre mühendisliği açısından istenen nihai çözüm biyodegradasyondur, çünkü boyanın kimyasal yapısı kırılırsa renk tamamen yok olur ve toksisite büyük ölçüde azalır. Biyosorpsiyon veya biyokümülyasyon ise sadece kirleticinin yer değiştirmesini sağlar (sudan biyokütleye geçer), sonrasında bir çamur veya biyokütle bertarafı ihtiyacı doğar. Bu nedenle bu bölümde mantarların boyaları biyokimyasal olarak parçalama kabiliyetine odaklanacağız.

Birçok çalışma göstermiştir ki, tekstil boyalarının mantarlarla bozundurulması konusunda en başarılı grup, odunsu dokuları çürüten mantarlar (özellikle beyaz çürükçüller) olmuştur. Bunun nedeni, bu mantarların lignini parçalamak için salgıladıkları güçlü oksidatif enzimlerin (lakkaz, mangan peroksidaz, lignin peroksidaz gibi) boyaların aromatik yapısını da parçalayabilmesidir. Örneğin *Trametes versicolor*, *Pleurotus ostreatus*, *Phanerochaete chrysosporium* gibi türler farklı boya tiplerini laboratuvar koşullarında yüksek oranda dekolorize etmişlerdir. Literatürde, mantar uygulamaları ile birçok azo, antrakinin, trifenilmetan boya türü çözeltide renk giderimine uğratılmıştır (Rajhans et al., 2021).

Mantarların boyaları parçalama mekanizması genellikle şu şekildedir: Mantar kolonisinin büyüdüğü besiyeri veya atıksu ortamına ekzo-enzimler salgılanır; bu enzimler (özellikle lakkaz ve peroksidazlar) boya molekülünün kromofor (renk verici) kısımlarında oksidasyon ve

parçalanma reaksiyonları gerçekleştirir; bunun sonucunda boya molekülü renkli halinden renksiz ara ürünlere dönüşür. Bazı durumlarda tam mineralizasyona kadar süreç gidebilir ancak çoğunlukla renksiz organik asitler, alifatik bileşikler gibi ara ürünler oluşur.

Mantarların bu alandaki avantajları kadar dezavantajları da tespit edilmiştir. Avantaj olarak; mantar enzimlerinin non-spesifik oluşu (farklı yapıda birçok boyayı tanıyıp saldırabilmeleri) ve ortamdaki toksik maddelere bakterilere kıyasla daha dirençli olabilmeleri sayılabilir. Örneğin yüksek tuzluluk, ağır metal veya boya konsantrasyonuna maruz kalan bazı mantarlar, hücre duvarı yapıları sayesinde bu zorlu koşullara daha dayanıklı bulunmuştur (Rajhans et al., 2021). Ayrıca mantarlar büyük filamentöz yapıları sayesinde reaktör ortamında askıda kalabilen biyokütle oluşturabilir, bu da onların atıksudaki boyaya daha fazla temas etmesini sağlar. Dezavantaj olarak ise mantar enzimlerinin optimum çalıştığı koşulların endüstriyel atıksulardan farklı olmasıdır. Örneğin lignin peroksidaz ve mangan peroksidaz gibi enzimler genellikle pH 4-5 civarında en aktiftir, halbuki birçok tekstil atıksuyu nötr veya bazik pH'tadır. Bu enzimlerin iyi çalışması için ayrıca ortamda veratryl alkol gibi bazı özgün organik bileşiklerin bulunması gerekebilir (örneğin *P. chrysosporium*'un lignin peroksidaz aktivitesi için). Bunlar tipik atıksuda bulunmayan maddelerdir ve haricen eklenmesi pratik olmayabilir. Bir diğer sorun, mantarların büyüme hızının genel olarak bakterilere kıyasla yavaş olması ve atıksu arıtma ortamında rekabette geri kalabilmeleridir. Örneğin bir sürekli akışlı reaktörde bakteri kontaminasyonu olursa mantar kültürünü baskılayabilir. Bu nedenle, mantar uygulamalarının steriliteye daha bağımlı olması, gerçek ölçek

uygulamalarda zorluk yaratır. Nitekim 2010’lu yılların başı itibariyle, literatürde mantarlarla boyar madde arıtımına dair pek çok başarılı laboratuvar çalışması raporlanmış olmasına rağmen, yazarların bildiğine göre pilot ölçekli bir uygulama henüz gerçekleştirilmemişti. Laboratuvar çalışmalarında genellikle renk giderim yüzdeleri raporlanmakta fakat gerçek parçalanma oranları net verilmemektedir. Yani çıkan renksiz ortamda boya tamamen CO₂’ye mi döndü, yoksa renksiz ara ürünler mi kaldı sorusu çoğu zaman cevapsızdır.

2020 sonrası dönemde bu alanda bazı ilerlemeler kaydedilmiştir. Özellikle mantarların boyaları parçalama yeteneğinin konsorsiyum halinde kullanımı dikkat çekmektedir. Örneğin birden fazla mantar türü veya mantar-bakteri karışımı birlikte kullanılarak, tek bir organizmanın başaramadığı tam bozunmanın başarılabileceği öne sürülmüştür (Vaksmaa et al., 2023). Ayrıca mantar enzimlerini hücreden ayırıp immobilize enzim reaktörleri içinde kullanma stratejileri geliştirilmektedir. Bir pilot çalışmada, mantarlardan elde edilen lakkaz ve peroksidaz enzimleri bir kartuş içinde immobilize edilerek gerçek tekstil atıksuyu bu kartuştan geçirilmiş ve önemli ölçüde renk ve toksisite giderimi sağlanmıştır (Soares et al., 2006). Bu tip sistemlerde mantarın kendisini büyütme yerine sadece enzimleri kullanıldığından, pH ve ortam koşulları enzim için optimize edilebilmekte, canlı kültür tutma derdi olmamaktadır. Dezavantajı ise enzim üretiminin ayrı bir aşama gerektirmesi ve enzimlerin zamanla aktivitesini kaybetmesidir. Ancak yeni araştırmalar, lakkaz gibi enzimlerin nanopartiküller veya gözenekli destekler üzerinde stabilize edilerek defalarca kullanılabileceğini gösteriyor (Vaksmaa et al., 2023).

Özetle, mantarların tekstil boyaları giderimindeki rolü bilimsel olarak kanıtlanmıştır ve özellikle laboratuvar ölçekli çalışmalar oldukça başarılı sonuçlar bildirmektedir: Birçok mantar kültürü çeşitli tekstil boyalarını %70-100 arası renk giderim oranlarıyla kısa sürede dekolorize edebilmektedir (Rajhans et al., 2021). Bunun endüstriyel uygulamaya dönüşmesi için gereken adımlar ise; mantar proseslerinin tasarım parametrelerinin optimize edilmesi, diğer arıtma adımlarıyla entegrasyonun planlanması (ör. biyolojik arıtma öncesi kimyasal oksidasyon/koagülasyon ile kombine kullanımı) ve ekonomik olarak rekabetçi hale getirilmesidir. BÖLÜM 11’de değineceğimiz genel zorluklar kısmında, bu tür mantar tabanlı arıtma proseslerinin ölçeklenmesine dair genel engeller ve çözüm önerileri tekrar ele alınacaktır.

4. PATLAYICI MADDE KONTAMİNASYONUNUN MİKOBİYOBOZUNDURULMASI (TNT ÖRNEĞİ)

Sanayi ve askeri faaliyetler sonucunda topraklarda ve sulara karışan patlayıcı kimyasalların temizlenmesi, çevre mühendisliği açısından özel bir zorluk alanıdır. Özellikle 2,4,6-trinitrotoluen (TNT) gibi yüksek patlayıcı maddeler, geçmişte mühimmat üretimi, depolanması veya savaşlar sırasında çevreye sızmış ve bazı bölgelerde ciddi kirlilik oluşturmuştur. TNT ve türevleri (ör. RDX, HMX gibi diğer patlayıcılar) toprağa karıştıklarında uzun yıllar kalabilmekte, yeraltı sularına sızarak insan ve ekosistem sağlığını tehdit edebilmektedir. Bu bölümde TNT'yi örnek vaka olarak ele alarak, mantarların patlayıcı madde kalıntılarının bozundurulmasındaki potansiyelini inceleyeceğiz.

TNT, aromatik bir halka üzerinde üç nitro grubu taşıyan oldukça kararlı bir kimyasaldır. Suda çözünürlüğü düşük, toprak partiküllerine bağlanma eğilimi yüksektir (Geris et al., 2024). Bu nedenle toprağa karıştığında genellikle yerinde kalır ve zamanla yavaş yavaş sızarak çevreye yayılır. TNT'nin kimyasal stabilitesi öyle fazladır ki, I. Dünya Savaşı sırasında toprağa karışan TNT'nin aradan 90 yıl geçmesine rağmen hâlâ yüksek konsantrasyonlarda bulunduğu rapor edilmiştir (Geris et al., 2024). Bu kalıcılık, TNT'nin mikroorganizmalar tarafından parçalanmasını da zorlaştırır. Çoğu bakteri, yüksek TNT varlığında büyüyemez; TNT onlara toksik gelir. Ayrıca, TNT'nin yapısındaki nitro gruplarının indirgenmesiyle oluşan ara ürünler (ör. aminodinitrotoluenler) de canlılar için zehirlidir ve ortamda birikebilir. Ancak bazı çalışmalarda bu türevlerin daha az kalıcı olduğu da gösterilmiştir (Van Aken et al., 2000).

Mantarlar, TNT bozunması konusunda ilk olarak 1990’larda dikkat çekmiştir. 1990’da Fernando ve arkadaşları, beyaz çürük mantar *Phanerochaete chrysosporium*’un TNT’yi tolere edebildiğini ve kısmen mineralize edebildiğini raporlamıştır. Bu çalışmada *P. chrysosporium*’un suda 100 mg/L, toprakta 10.000 mg/kg gibi yüksek TNT derişimlerinde hayatta kaldığı ve 90 gün içerisinde TNT’nin yaklaşık %18-20’sini CO₂’ye dönüştürebildiği gösterilmiştir (Fernando et al., 1990). Ancak kısa süre sonra Spiker ve ark. (1992), aynı mantarın yüksek TNT konsantrasyonlarında duyarlılık gösterdiğini ve etkinliğinin düşük olduğunu bildirmiştir (Spiker et al., 1992). Bu çelişkili bulgular araştırmacıları farklı mantar türlerine yönlendirmiştir.

Sonraki çalışmalarda *Trametes*, *Bjerkandera*, *Pleurotus* gibi diğer ligninolitik mantarların TNT’yi sıvı kültürde dönüştürebildiği gösterilmiştir (Kim & Song, 2000; Perkins et al., 2005). Bu türler, TNT’yi tam mineralize etmektense, aminodinitrotoluenler gibi ara ürünlere dönüştürmektedir ve bu metabolitlerin bazıları toksik olabilir (Van Aken et al., 2000). 1990’ların ortalarında yapılan değerlendirmelerde, mantar bazlı yöntemlerin umut vaat ettiği ancak saha uygulamalarında sınırlı başarı sağladığı görülmüştür (Donnelly et al., 1997).

TNT’nin mantarlar tarafından bozunma mekanizmasına bakıldığında, genellikle nitro gruplarının indirgenmesi şeklinde gerçekleştiği görülür. Beyaz çürükçül mantar enzimleri, TNT üzerinde doğrudan bir oksidasyon yapmaktan ziyade, TNT önce hücre içi redüktaz enzimleriyle aminotoluene dönüştürülür (Nyanhongo et al., 2005; Van Aken et al., 2000) veya *Phanerochaete chrysosporium* gibi türlerin

ekstrasellüler ligninolitik enzimleri (özellikle mangan peroksidaz ve lakkaz) TNT üzerinde dolaylı oksidatif reaksiyonlar gerçekleştirebilir (Esteve-Núñez et al., 2001). Elde edilen aminodinitrotoluen ve diaminonitrotoluen gibi ürünler mantarın metabolizmasında bağlanarak (örneğin humik madde benzeri komplekslere) ortamdan uzaklaştırılır. Bu, tam bir mineralizasyon sağlamaz ancak TNT'nin toksik formunu reaktif bir ara ürüne çevirip toprağın organik matrisine bağlamak anlamına gelir (Geris et al., 2024). Nitekim saha topraklarında TNT'nin bir kısmının mantar faaliyetleriyle çözünmez humus benzeri yapılara bağlandığı ve dolayısıyla biyoyararlılığının azaldığı tespit edilmiştir (Geris et al., 2024). Bu, bir bakıma olumlu bir etkidir; çünkü serbest TNT yerine toprağa sıkı bağlı türevler haline gelir. Ancak nihai amaç bunları da yok etmek olmalıdır.

Mantarlar ile TNT arıtımının önündeki bir diğer engel, mantarların doğal yaşam alanlarının TNT kirlenmiş ortamlardan farklı olmasıdır. Beyaz çürük mantarlar ağaç kütüklerinde, orman zemininde yetişmeye adapte olmuştur; oysa TNT genelde çıplak arazilerde, atık çamurlarda vb. bulunur. Bu ortamlardaki düşük besin düzeyi, yüksek toksisite ve rekabetçi mikroflora mantarların etkinliğini sınırlar (Geris et al., 2024). Bunu aşmak için araştırmacılar, TNT ile kirlenmiş toprağa ko-substrat veya organik katkı eklemenin mantar faaliyetini artırdığını göstermiştir. Örneğin TNT'li bir toprağa atık kanalizasyon çamuru eklemek, bol miktarda kolay parçalabilir organik madde ve besin sağladığı için mantar ve bakterilerin birlikte daha hızlı TNT bozundurmasını sağlamıştır (Geris et al., 2024). Bu tip bir kompostlama yaklaşımı, TNT kirlenmiş toprakları mantarlar ve diğer mikroplarla

havalandırılmış yığınlarda işleme prensibine dayanır. Nitekim pratikte uygulanan birkaç biyoyığın (biopile) arıtımında, TNT ve diğer patlayıcılarla kirlenmiş topraklar talaş, gübre, çamur gibi organik malzemelerle karıştırılıp üzerine ligninolitik mantar miselyumu aşılansak bir süre bekletilmiş ve önemli oranda TNT bozunumu + detoksifikasyon sağlandığı raporlanmıştır (Geris et al., 2024). Örneğin ABD’de bir pilot çalışmada, *P. chrysosporium* ile işlenen mühimmat fabrikası toprağında TNT konsantrasyonunun %85 azaldığı belirtilmiştir (Geris et al., 2024).

Son yıllarda mantarların TNT ve diğer patlayıcıları bozundurma potansiyelini artırmak için yenilikçi yöntemler de denenmektedir. Bunlardan biri, fungal enzimleri genetik olarak iyileştirme çalışmalarını içerir. Hedef, mantarların doğal ligninolitik enzimlerini biraz modifiye ederek nitro aromatlere daha yüksek aktivite göstermelerini sağlamaktır. Bu kapsamda lakkaz enzimlerinin mutant versiyonları veya bakterilerden mantarlara çeşitli gen aktarımları gibi araştırmalar sürmektedir. Bir diğer yaklaşım, mantar-bakteri ortak kültürleri ile TNT’yi birlikte parçalamaktır. Bazı bakteriler TNT’nin nitro gruplarını indirgeme konusunda iyiyken, mantarlar aromatik halkayı parçalamada iyidir. Bu sinerjiden yararlanmak üzere, deneme ölçekli reaktörlerde mantar miselyumu üzerinde biofilm oluşturan TNT-tolerant bakteriler birlikte kullanılmış ve parçalanma ürünlerinin daha ileri düzeyde mineralize olabildiği gözlenmiştir (Corredor et al., 2024; Flores et al., 2025).

Her ne kadar laboratuvar ve pilot ölçekte bazı başarılar olsa da, TNT için mantar tabanlı tam ölçek bir arıtma tesisi henüz yaygın

değildir. 2010'ların başında yayınlanan bir değerlendirmede, mantar yöntemlerinin TNT konusunda diğer teknolojilere göre halen pratik ve ekonomik açıdan geri planda kaldığı ifade edilmiştir. Örneğin TNT ile ciddi kirlenmiş sahalarda genellikle toprağın kazılıp yakma veya kimyasal yıkama gibi yöntemlerle arıtılması tercih edilmiştir. Ancak bu yöntemler pahalı ve çevresel olarak sert çözümlerdir. Mantarlar ise potansiyel olarak daha ucuz, çevre dostu bir alternatif sunabilir (Chakraborty et al., 2022). Bu nedenle araştırmalar devam etmekte ve özellikle askeri atık sahalarında mantar uygulamalarına dair denemeler yapılmaktadır. Avrupa'da bazı eski mühimmat depolama alanlarında mantar destekli fitoremediasyon uygulamalarının denenmiş olması, literatürde yer bulan ilginç örneklerdir.

Özetle, TNT ve benzeri patlayıcı maddelerin mantarlarla bozundurulması konsepti bilimsel olarak geçerli olsa da, uygulanabilirlik bakımından önemli engeller içerir: TNT'nin kimyasal yapısının inatçılığı, mantarların ortam koşullarına adaptasyon güçlüğü, ara ürünlerin potansiyel toksisitesi ve sürecin yavaşlığı bunların başında gelir. Ancak uygun koşullar sağlandığında mantarlar TNT'yi güvenli formlara dönüştürmede işe yarayabilir. Örneğin mikroaerofilik koşulların sağlandığı (kısıtlı oksijenli) reaktörlerde TNT'nin mineralizasyonunda artış görüldüğü not edilmiştir (Geris et al., 2024). Ayrıca saha toprağının kendi doğal mantarları kullanılarak, yani ortama dışarıdan yabancı tür sokmak yerine yerel türlerin etkinliğini teşvik ederek daha başarılı sonuçlar alınabileceği düşünülmektedir (Russo et al., 2019). Patlayıcı kirleticilerin mikobiyoremediasyonu, özellikle savaş sonrası arazi rehabilitasyonu, eski cephanelik alanlarının temizlenmesi

gibi spesifik uygulamalarda gelecekte daha fazla önem kazanabilir. Gelecek perspektifinde bahsedileceği üzere, bu alanda yapılacak araştırmalar mantarların mühendislik süreçlerine entegrasyonunu kolaylaştıracak yeni teknikler (ör. mantarların granül formda reaktör yatağına entegre edilmesi gibi) geliştirmeye odaklanmaktadır.

5. ATIKSULARDAN AZOT GİDERİMİNDE MANTARLARIN ROLÜ

Evsel ve endüstriyel atıksuların arıtımında azot giderimi (nitrat ve amonyum uzaklaştırılması), su kalitesi yönetimi için kritik bir adımdır. Klasik biyolojik azot giderimi, nitrifikasyon-denitrifikasyon adımlarıyla bakteriler tarafından gerçekleştirilir. Ancak bu süreçler bazen karmaşık, maliyetli ve kırılgan olabilir. Örneğin yüksek konsantrasyonda gelen atıksularda veya sıcaklık/pH dalgalanmalarında bakteriyel denitrifikasyon sistemleri verimsizleşebilir. Ayrıca bakteriyel biyofilm veya aktif çamur sistemlerinde istenmeyen yan ürünler ve çamur artıkları oluşabilir. Bu bağlamda, bazı araştırmacılar mantarların da azot döngüsünde rol alabileceğini keşfetmiş ve mantarların atıksuda azot giderimi için kullanılabileceğini öne sürmüşlerdir.

Mantarların azot döngüsündeki potansiyel rolü ilk olarak Shoun ve Tanimoto adlı araştırmacılar tarafından 1990'larda tanımlandı. Bu bilim insanları, bazı filamentöz mantarların (ör. *Fusarium* türleri gibi) nitratı nitrite, nitriti de N_2O ve N_2 gazlarına dönüştürebilen bir denitrifikasyon yolu olduğunu gösterdiler. Bu şaşırtıcı buluş, o zamana dek denitrifikasyonun sadece bakterilere özgü bir süreç olduğu düşüncesini sarstı. Ardından, mantarların bakteri denitrifikasyonuna göre bazı avantajları olabileceğini teorik olarak vurguladılar. Mantarların hem nitrifikasyon hem denitrifikasyon yapabilme potansiyeli, daha yüksek hızlarda azot dönüşümü, toksik bileşiklere karşı daha toleranslı olma, düşük çözünmüş oksijen ve organik karbonla yetinme gibi özelliklerle basitleştirilmiş süreç mühendisliği sunabileceğini belirttiler. Yani eğer mantarlar bu işi istenen ölçüde

yapabilirse, karmaşık bakteriyel tank sistemleri yerine daha basit reaktörlerle azot giderimi mümkün olabilirdi.

Bu fikirler ışığında yapılan deneysel çalışmalarda, bazı mantar türlerinin yüksek nitratlı ortamlarda nitratı gaz azota kadar dönüştürebildiği laboratuvar ölçeğinde doğrulandı. Örneğin *Penicillium* ve *Fusarium* cinsi mantarlardan oluşturulan yapay bir konsorsiyumla, çimenden elde edilen selülozik bir karbon kaynağı varlığında atıksu benzeri bir ortamda %89'a varan nitrat giderimi elde edilmiştir. Bu deney, karbon kaynağı olarak steril ot parçaları kullanarak mantarların gerçekçi koşullarda da denitrifikasyon yapabildiğini gösterdi. Mantarlar bahsedilen deneyde hem organik karbonu parçalayarak kendileri büyüdüler, hem de eş zamanlı olarak nitratı azaltıp azot gazı çıkardılar.

Ancak tüm bu olumlu bulgulara rağmen, günümüze dek mantarlara dayalı bir azot giderim tesisi kurulmadı. 2012 itibariyle yapılan bir derleme, pilot ölçekli dahi bir mantar denitrifikasyon sisteminin olmadığını, bulguların hep laboratuvar seviyesinde kaldığını belirtiyordu. Bunun muhtemel nedenleri arasında şunlar sayılabilir: (1) Mantarların bakterilere kıyasla daha yavaş büyümesi ve proses kinetiklerinin yavaş kalma riski, (2) atıksu arıtma ortamında bakteri rekabeti yüzünden mantar kültürlerinin sürekliliğini korumanın zorluğu, (3) mantarların ortama askıda olarak değil, miselyum yapılarıyla tutunarak büyüme eğiliminin klasik reaktör tasarımlarına uyumsuzluğu, (4) mantar denitrifikasyon mekanizmalarının tam anlaşılamamış olması ve kontrol parametrelerinin belirsizliği.

Yine de son yıllarda mantarların atıksu arıtımına entegre edilmesiyle ilgili çeşitli denemeler yapıldı. Bazı çalışmalar, mantar peletleri eklemenin bakteriyel denitrifikasyon performansını iyileştirdiğini göstermiştir (Sun et al., 2022). Burada mantar peletlerinin, ortamda flokülasyon ve biofilm oluşturarak bakterilere destek ortamı sağladığı düşünülmektedir. Başka bir yaklaşım, mantarları endofitik olarak bitki kök sistemine entegre etmektir. 2025 yılında yayınlanan bir çalışmada, su sümbülü gibi bir su bitkisinin kök kabuğundan izole edilen endofitik mantarların atıksu içinde hem nitrifikasyon hem denitrifikasyon yaparak suyun toplam azot içeriğini düşürdüğü raporlanmıştır (Serag et al., 2025). Bu çalışmada *Aspergillus flavus* gibi mantarların nitrata hızlıca N_2 'ye çevirebildiği ve bakteri kontrollü sistemlere kıyasla daha stabil bir çıkarım sergilediği belirtildi. Hatta yazarlar, mantarların bakterilerden daha hızlı denitrifikasyon yaptığını iddia ettiler (Serag et al., 2025). Mantarlı sistemlerde gözlenen bir diğer yarar, mantarların biyokütle üretirken sudaki fazla besinleri de alarak kütlelerine katmasıdır (azot ve fosforu hücresel yapıya bağlama). Bu sayede sadece gaz formunda N_2 salımı değil, aynı zamanda mantar biyokütle hasadı ile de azot sudan çekilmiş olur.

Mantarların azot gideriminde gelecekteki kullanım potansiyeli açısından iki senaryo düşünülebilir: Birincisi, tamamen mantarlara dayalı bir denitrifikasyon reaktörü geliştirilmesi. Bu, belki düşük yük kapasiteli ama basit işletimli küçük tesisler için uygun olabilir. İkincisi, mevcut bakteriyel arıtma proseslerini destekleyici unsurlar olarak mantarların kullanımı (örneğin aktif çamur sistemi içinde mantar tutturulmuş özel taşıyıcılar bulundurmak veya oksidasyon hendeklerine

mantar miselyumu eklemek). Her iki durumda da, mantarların proses koşullarına adaptasyonu kilit konudur. Mantarların optimum çalıştığı pH, sıcaklık, çözünmüş oksijen gibi parametreler bakterilerden farklılık gösterebilir. Örneğin bazı mantarların denitrifikasyonu mikroaerofilik (çok düşük O_2) ortamda daha iyi yapması olasıdır, bu da reaktör tasarımında farklılık demektir.

Aspergillus niger ve *A. flavus* gibi yaygın mantarların endüstriyel ve tarımsal atıksulardaki toplam azotu büyük oranda (bazı durumlarda %99'a varan oranlarda) giderdiğini göstermiştir (Serag et al., 2025). Bu tür bulgular çok dikkat çekicidir ve doğruysa bakteriyel sistemlerin çok ötesinde performansları ima eder. Ancak bu çalışmalar genellikle kontrollü laboratuvar deneyleridir. Gerçek bir atıksu arıtma tesisi karmaşık dinamiklere sahiptir: Günlük debi ve konsantrasyon değişimleri, toksik şok yükler, çok çeşitli mikrobiyal rekabet vb. Bu koşullarda mantarların kararlılığı henüz sınanmamıştır.

Dolayısıyla, mantarların azot giderimindeki rolü konusunda şimdilik ihtiyatlı bir iyimserlik söz konusudur. Kanıtlar, mantarların nitratı gaz azota dönüştürebildiğini ve bunu yaparken bazı durumlarda bakterilerden daha dirençli olduğunu gösteriyor (Serag et al., 2025). Teorik avantajlar cazip: Örneğin mantarlar heterotrof oldukları için, aynı anda organik maddeyi de parçalayıp hem karbon hem azot giderimini entegre yapabilirler. Nitekim bazı denemeler, mantarlı sistemlerde kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) ve toplam azotun birlikte düştüğünü raporlamıştır (Serag et al., 2025). Bu, tek adımda entegre bir arıtma demektir. Fakat pratiğe yansımış bir örnek bulunmadığından, bu konuyu bir nevi potansiyel olarak ele almak gerekir.

Bu kitap kapsamında, mantarların azot giderimindeki rolü daha çok bir yenilikçi araştırma konusu olarak değerlendirilmektedir. Dolayısıyla bu bölümde anlatılanlar, diğer bölümlerdeki gibi uygulanmış başarı hikâyeleri değil, laboratuvar bulguları ve geleceğe yönelik fikirlere dayanmaktadır. Yine de, mantarların çevre mühendisliğinde beklenmedik bir kullanım alanı olabileceğini göstermesi bakımından önemlidir. İleride atıksu arıtma tesislerinde “**funga bioaugmentasyon**” denen yaklaşımlarla mantarların aktif çamura takviye edilmesi ve sistem kararlılığını artırması gibi uygulamalar görülmektedir (Serag et al., 2025). Şimdilik, literatürde mantarların azot giderim performansını optimize etmek üzere devam eden araştırmaları takip etmek gerekmektedir. Zorluklar bölümünde genel olarak bahsedileceği üzere, bu gibi deneysel konseptlerin ölçeklenmesi kendi içinde teknik ve ekonomik zorluklar barındırmaktadır.

6. ENTOMOPATOJEN MANTARLAR VE BİYOPESTİSİT UYGULAMALARI

Kimyasal pestisitlerin aşırı kullanımı, tarım ve halk sağlığı alanında ciddi sorunlara yol açmaktadır: Zararlı böceklerde direnç gelişimi, hedef dışı canlıların ölümü, ekosistem dengesinin bozulması, besinlerde ve sularda kalıntı birikimi gibi. Bu nedenle, çevre dostu ve sürdürülebilir biyopestisitlere yönelim artmıştır. Entomopatojen mantarlar, yani böcek patojeni olan mantarlar, bu alanda en umut verici ajanlar arasındadır. Bu bölümde, mantarların zararlı böceklerle mücadelede kullanımı ve çevre mühendisliği açısından önemi ele alınacaktır.

Entomopatojenik mantarlar doğada pek çok böcek türünü enfekte ederek öldürme kabiliyetine sahiptir. *Beauveria bassiana*, *Metarhizium anisopliae*, *Isaria fumosorosea*, *Lecanicillium lecanii* gibi türler bunların en bilinen örnekleridir (Bamisile et al., 2021). Bu mantarların sporları hedef böcek ile temas ettiğinde, böceğin kutikulasını (dış kabuğunu) çimlenme tüpü ile delip vücut içine girer ve böcek hem miselyum gelişimi hem salgılanan toksinler nedeniyle birkaç gün içinde ölür. Doğada bu mantarlar böcek popülasyonlarını dengeleyen doğal etmenlerdir ve zaman zaman böcek salgınlarının kendi kendine çökmesinde rol oynarlar (örn. ağaçlarda görülen yaprak zararlılarının bir mevsimde mantar salgını sonucu kitlesel ölümü gibi).

Günümüzde entomopatojen mantarların ticari biyopestisit ürünler haline getirilmesi büyük bir endüstriye dönüşmeye başlamıştır. Dünya genelinde 170'in üzerinde mantar suşu formülasyonlanarak piyasaya

sürülmüştür (Bamisile et al., 2021). Bu ürünler genellikle toz, granül veya sıvı süspansiyon formunda mantar sporları içerir ve tarla koşullarında geleneksel ilaçlama ekipmanıyla uygulanır. Örneğin *B. bassiana* bazlı preparatlar sera beyaz sineği, thrips, kırmızı örümcek gibi zararlılara karşı; *M. anisopliae* bazlı preparatlar çekirge, karınca, termit, sivrisinek larvası gibi hedeflere karşı başarıyla kullanılmaktadır (Bamisile et al., 2021). Bu mantar bazlı ilaçlar, kimyasal insektisitlere kıyasla çevreye daha az zarar verir çünkü özgüllükleri daha yüksektir (belli böcek gruplarını etkiler, arılara ve diğer faydalılara genellikle zararsızdır) ve çevrede kalıcı toksik kalıntı bırakmazlar. Ayrıca entomopatojen mantarlar çoğu zaman insan ve sıcakkanlı hayvanlar için patojen değildir, bu da iş güvenliği açısından avantajdır.

Ülkemizde ve dünyada bu tür biyopestisitlerin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Örneğin A.B.D. ve Avrupa Birliği'nde *Beauveria bassiana* içeren ürünler ticari olarak mevcuttur ve organik tarımda onaylıdır. *Metarhizium anisopliae* özellikle sivrisinek mücadelesinde ve karınca kontrolünde önemli başarılar göstermiştir. Bunların bir örneği, Paul Stamets adında bir mikologun geliştirdiği “Akıllı Böcek Mantarları” yaklaşımıdır. Stamets, *M. anisopliae* mantarının spor üreten formunun (konidiosporsuz mutant) karıncalar için cazip olduğunu keşfetmiştir. Normalde karıncalar spor taşıyan mantarları algılayıp temizler veya uzak durur, çünkü sporlar tehlikenin sinyalidir. Stamets’in yaptığı, spor üretimi geciktirilmiş bir *M. anisopliae* suşu geliştirmek oldu. Bu mantarı pilav gibi bir yemle evine koydu, karıncalar spor üretmediği için mantarı algılamadan yemi yedi ve yuvalarına taşıdı. Sonuçta mantar iki hafta içinde karınca kolonisinde yayılarak tüm

koloniyi enfekte edip yok etti ve 4 yıl boyunca o evde karınca görülmedi. Bu buluş patentlendi ve ticari ürüne dönüştü. Stamets'in "karınca ilacı mantarı", şehir zararlılarıyla mücadelede devrimsel bir adım olarak görülüyor – çünkü bir defa uygulamayla uzun süreli kontrol sağlıyor ve doğaya zehirli kalıntı vermiyor. Gerçekten de bu ürünün piyasaya çıkmasıyla kent zararlılarına karşı pestisit pazarında önemli değişimler bekleniyor.

Entomopatojen mantarların çevre mühendisliği bağlamındaki önemi, kimyasal insektisit kullanımını azaltarak ekosistem ve insan sağlığını koruması yönündedir. Bu mantarlar doğal düşmanlar olduklarından, tarımsal ekosistemlerde belirli bir denge içinde çalışırlar ve hedef dışı etkileri en aza iner. Ayrıca, tarım alanlarındaki pestisit akışının sulara karışarak su kaynaklarını kirletmesi büyük bir sorundur; biyopestisit kullanımı bu kirlilik yükünü de azaltır. Çöl çekirgeleri gibi geniş alan zararlıların kontrolünde de entomopatojen mantarlar biyolojik mücadele ajanı olarak kullanılmaktadır (örneğin Afrika'da *M. anisopliae* ile havadan ilaçlama programları yapılmıştır).

Her ne kadar entomopatojen mantarlar çok yararlı olsa da, pratik kullanımlarında bazı zorluklar mevcuttur. Bunların başında ortam koşullarına duyarlılık gelir. Mantar sporları uygulandıklarında güneş ışığı (UV), yüksek sıcaklık ve düşük nemden olumsuz etkilenirler (Bamisile et al., 2021). Bu, sahada etki sürelerini kısaltır. Bu sorunu aşmak için formülasyon teknolojileri gelişmektedir: UV koruyucu maddeler, yağ bazlı taşıyıcılar, mikroenkapsülasyon vb. yöntemlerle sporların dayanıklılığı artırılmaya çalışılır. Bir diğer konu, mantarların etki süresinin kimyasallar kadar hızlı olmamasıdır. Genelde bir mantar

uygulamasıyla böcek ölümü 3-7 gün alır, oysa kimyasal spreyler saatler içinde etki eder. Bu nedenle çiftçilerin beklentisi açısından mantarlar daha “yavaş” olarak değerlendirilebilir. Ancak mantar enfeksiyonları bulaşıcıdır; bir böceğe mantar bulaştığında o böcek ölürken etrafa milyonlarca yeni spor saçar ve aynı kolonide dalga etkisi yaratabilir. Bu, uzun vadede kimyasallardan üstün olabilecek bir özelliktir, zira kimyasalın etkisi tek seferliktir ama mantar kendini yayabilir.

Güncel araştırmalar, entomopatojen mantarların başka faydalarını da ortaya koymuştur. Bu mantarlar bitkiler üzerinde endofit olarak yaşayarak, bitkiyi sadece zararlılardan değil, aynı zamanda bazı hastalıklardan da koruyabilmektedir (Bamisile et al., 2021). Örneğin *B. bassiana* pamuk bitkisinde endofit olduğunda hem yaprak bitlerini öldürür, hem de bitkide büyümeyi teşvik edici hormonlar salgılar. Bu tür bulgular, entomopatojen mantarların birer bitki büyüme destekçisi ve biyogübre olarak çift amaçlı kullanılabileceğini düşündürmektedir (Bamisile et al., 2021). Hatta bazı mantarların kök çevresinde patojen baskılayıcı etkileri saptanmıştır (toprak mantarlarına karşı antagonizma gibi).

Sürdürülebilir tarım ve entegre zararlı yönetimi yaklaşımlarında entomopatojen mantarlar kilit bir yere oturmaktadır. Çevre mühendisliği açısından bakıldığında, pestisit kaynaklı çevre kirliliğinin azaltılması bir hedef olduğundan, mantar bazlı biyopestisitler bu hedefe ulaşmada önemli bir araçtır. Özellikle tarımsal drenaj sularında pestisit kalıntılarının nehir ve göllere ulaşması ciddi bir problemdir; biyopestisit kullanımı bu noktada önleyici bir kirlilik kontrolü sağlar. Yine kentsel alanlarda kanalizasyon sistemine karışan insektisitlerin atık su arıtma

tesislerindeki mikroorganizmalara zarar vermesi veya arıtmadan geçerek doğal suya karışması gibi riskler, mantar bazlı ürünlerle minimize edilebilir.

Sonuç olarak, entomopatojen mantarların kullanımı günümüzde zaten ticari ve uygulamalı bir gerçeklik haline gelmiştir. Onlarca mantar temelli ürün dünya piyasasındadır ve her geçen yıl yenileri eklenmektedir (Bamisile et al., 2021). Bu alan, çevre teknolojilerinin belki de en somut ve hızlı hayata geçen örneğidir. Teknolojideki gelişmelerle (örneğin genom düzenleme ile daha etkili mantar ırkları elde edilmesi, kuraklığa/UV'ye dayanıklı spor üretimi, formülasyon iyileştirmeleri) mantar biyopestisitlerin geleneksel kimyasallara eşdeğer veya onlardan üstün hale geleceği öngörülmektedir (Bamisile et al., 2021; Ferreira & Soares, 2023). Bu da daha sağlıklı ekosistemler ve daha güvenli gıda üretimi demektir. Stamets'in ifadesiyle, "Mantarlar dünyayı kurtarabilir" iddiası belki abartılı bulunabilir; fakat en azından kimyasal pestisitlerle zehirlenmiş bir dünyayı iyileştirmede onların büyük bir rol oynayacağı açıktır.

7. PETROL VE HİDROKARBON KİRLİLİKLERİNİN MİKOREMEDİASYONU

Petrol ve türevleri (benzin, dizel, yağlar, poliaromatik hidrokarbonlar vb.), çevre kirliliği açısından en yaygın ve zararlı kirleticilerden biridir. Kara ve deniz ekosistemlerinde petrol sızıntıları, tank kazaları, endüstriyel atıklar gibi kaynaklarla biriken hidrokarbonlar, toprağı ve suyu kirlletmekte; uzun sürede parçalanarak toksik bileşiklere dönüşmekte; bitki, hayvan ve insan sağlığını tehdit etmektedir. Mikoremediasyon, yani mantarlarla petrol kirliliğinin temizlenmesi fikri, bu alandaki en dikkat çekici ve üzerinde en fazla çalışma yapılan konulardan biridir. Bu bölümde, mantarların petrol ve hidrokarbon türevlerini bozundurmadaki rolü incelenecek, gerçekleştirilen uygulamalar ve elde edilen çarpıcı sonuçlar ele alınacaktır.

Beyaz çürük mantarların lignin bozundurma yeteneklerinden bahsetmiştik; lignin, yapısal olarak kompleks aromatik halkalar içerdiğinden, benzer şekilde kompleks yapılı petrol hidrokarbonlarının da bu mantarlar tarafından parçalanabileceğı hipotezi ortaya atılmıştır. 1980'lerden itibaren yapılan araştırmalar, *Phanerochaete chrysosporium* başta olmak üzere çeşitli ligninolitik mantarların ham petrol, dizel yakıt, polisiklik aromatik hidrokarbon (PAH) gibi kirleticileri laboratuvar koşullarında parçalayabildiğini gösterdi. Ancak asıl çığır açan gelişmeler 2000'lerde saha denemelerinin başlamasıyla oldu. Mantarların petrol ile kirlenmiş topraklarda pratikte de çalışabileceğı, ilk defa uygulamalı projelerle ortaya kondu.

Öne çıkan projelerden biri, Amazon Mycorenewal Project olarak bilinen Ekvador Amazonlarındaki bir girişimdir. Bu projede petrol taşınması sırasında kirlenmiş yağmur ormanı topraklarını mantarlarla temizlemek hedeflendi. Yaklaşımları son derece basitti ve düşük teknolojiliydi: Petrol karışmış toprağı aldılar, içine beyaz çürüklükçü *Pleurotus ostreatus* (istiridy mantarı) miselyumu ve talaş gibi organik atıkları karıştırdılar, bunu gözenekli çuvallara doldurup petrol sızıntısının olduğu noktaların üzerine yerleştirdiler. Üzerini de talaş ve yaprak gibi malzemelerle örterek nemli kalmasını sağladılar. Bir süre sonra çuvallardaki mantar miselyumu gelişerek hem petrole hem toprağı nüfuz etti ve kayda değer bir temizleme sağladı. Bu uygulama, bireysel küçük kirlilik alanları için son derece ucuza mal olan, kolay uygulanabilir bir yöntemdi ve önemli bir başarı elde etti. Çünkü mantarlar petrolü karbon kaynağı olarak kullanıp büyürken, toprağın toksik hidrokarbon konsantrasyonunu büyük ölçüde düşürdüler.

Bir diğer dikkat çekici uygulama, ticari mantar ürünleri geliştiren Fungi Perfecti şirketinin çalışmalarıdır. Bu firma bir pilot deneme kapsamında, petrol ile kirlenmiş bir toprağı miselyum aşlamış ve 8 hafta gibi kısa bir sürede topraktaki aromatik hidrokarbon seviyesini 20.000 ppm'den 200 ppm'in altına indirmeyi başarmıştır. Bu yaklaşık %99'luk bir giderim demektir ve oldukça çarpıcıdır. Dahası, sonuçlar bununla kalmamış; mantarlar petrolden besin alarak öylesine çoğalmış ki toprak yüzeyi adeta mantar kümeleriyle kaplanmış (miselyum ve mantar meyveleri gelişmiş). Bu mantarlar spor ürettikçe, çevrelerinden böcekleri (sporlarla beslenen) çekmiş; böcekler gelince onları yemeye kuşlar gelmiş; kuşlar tohumları dışkılarıyla getirmiş ve böylece

temizlenen toprakta bitkiler çıkmaya başlamıştır. Birkaç ay içinde, önceden zehirli ve çıplak olan bir toprak parçası, mantarların arıtımından sonra yeşil bir alan haline dönüşmüştür (üzerinde bitkiler, böcekler, kuşlar ile adeta küçük bir ekosistem oluşmuştur). Bu gözlem, mikoremediasyonun yalnızca kirletici temizlemekle kalmayıp ekolojik iyileşme (ekorestorasyon) süreçlerini de tetikleyebileceğine harika bir örnektir. Temizlenen alanda yaşam geri dönmüştür ki bu, diğer birçok fiziksel/kimyasal temizleme yönteminin (örneğin toprağı yıkama veya yakma yöntemlerinin) sağlayamayacağı bir kazanımdır.

Mantarların petrol temizlemedeki başarısının en önemli göstergelerinden biri, laboratuvar deneylerinden ziyade böyle saha pilotlarından gelmesidir. Son yıllarda, farklı ülkelerde petrol sızıntıları veya eski endüstriyel sahalar üzerinde mantar uygulamaları denenmiştir. Örneğin Birleşik Krallık'ta yapılan bir çalışmada, kirli toprağı mantar miselyumu aşılanmış ve bitkilerle birlikte ekilerek 2 yıl içinde toprakta hem hidrokarbonların azaldığı hem de bitki örtüsünün iyileştiğı raporlanmıştır. Hindistan'da *Pleurotus ostreatus* mantarının gaz yağı ile kirlenmiş toprağı temizlemedeki etkisi incelenmiş ve mantarın 12 hafta içinde TPH (toplam petrol hidrokarbon) konsantrasyonunu %85 oranında azalttığı gösterilmiştir (Chaudhary et al., 2021; Mekonnen et al., 2024). Bir diğer çalışmada *Trametes versicolor* mantarının kullanıldığı biyopil yığınlarında 60 gün içinde petrol hidrokarbonlarının %99'a varan oranda mineralize olduğu belirtilmiştir (Chaudhary et al., 2021). Bu tür sonuçlar, mantarların bakteriyel petrol arıtım yöntemlerine göre yavaş kalabileceğı önyargısını da sorgulatmaya başlamıştır; zira mantar uygulamaları beklenenden hızlı olabilmektedir. Elbette her

durum aynı derecede başarılı değildir, sonuçlar kirliliğin tipine, mantar türüne, çevresel koşullara göre değişir.

Mikoremediasyonun petrol temizlemedeki sınırlamalarına değinmek gerekirse: Birincisi, mantarların etkin olabilmesi için genelde ortamın su ve oksijen miktarının yeterli olması gerekir. Çok derinlere sızmış veya oksijensiz ortamlardaki petrol için mantar uygulaması zordur. Ancak yüzey toprağında veya sığ kirlenmelerde etkili olabilir. İkincisi, tuzlu su (deniz) ortamlarında mantar kullanmak başta imkânsız gibi görülüyordu, çünkü çoğu mantar yüksek tuzluluğu sevmez ve suya doymun ortamda yaşayamaz. Fakat son yıllarda tuz tolerant *Halophytophthora* gibi denizel mantarlar veya tuza dayanıklı mutant *Pleurotus* suşları ile deniz petrol sızıntıları için de çözümler geliştirilmeye başlandı. Örneğin Fungi Perfecti, Meksika Körfezi'ndeki büyük petrol sızıntısı sonrası miselyum aşılantmış yüzen saman blokları fikrini ortaya attı. Bu yöntemde, kuru saman balyaları *Pleurotus* mantarı sporları ile aşılantıyor ve denize bırakılıyor. Saman, petrolü su üstünde emip yüzmeye devam ediyor; içinde büyüyen mantar da bu emilmiş petrolü parçalıyor. Mantarlar su içinde kalamadığından, saman onların yüzmesi için bir platform görevi görüyor. Bu düşünce deneysel olarak test edildi ve tuzlu suda mantarların hayatta kalıp petrolü degrade edebildiği, iş bitince de bu petrol yüklü saman balyalarının toplanıp kompostlanarak bertaraf edilebildiği gösterildi. Bu sayede, deniz yüzeyinden petrol temizlemek için kimyasal dispersanlar yerine biyo-döngüsel bir çözüm önerilmiş oldu.

Mantarlarla petrol temizlemede dikkat edilmesi gereken bir diğer husus, mantarların oluşturduğu ara ürünlerin takibi ve tam

mineralizasyon sağlanıp sağlanmadığıdır. Bakteriler genelde petrolü CO₂ ve suya kadar oksitler; mantarlar ise bazen kısmi oksidasyon yapıp daha polar ama hâlâ çevrede kalabilecek bileşikler üretebilir. Yapılan analizler, mantarlı sistemlerde belirli PAH bileşiklerinin halkalarının açıldığını, küçük organik asitlere dönüştüğünü, az bir kısmının mantar hişlarında birikip sonra hişlerin ölmesiyle toprağı geri dönebildiğini göstermiştir. Bu nedenle, mantar uygulaması sonrası toprak veya suyun ekotoksisite testleri yapılması önerilir. Bir çalışmada, mantarla arıtılmış petrol sızıntılı toprağın, arıtım öncesine kıyasla solucan ve bitki büyüme testlerinde çok daha az toksik olduğı saptanmıştır (Ahmad et al., 2024; Antón-Herrero et al., 2023). Bu, mantar uygulamasının net bir iyileşme yarattığını doğrular.

Günümüzde mikoremediasyon, petrol kirliliğı temizliğinde bakteriyel biyoremediasyon ve fitoremediasyon gibi yöntemlerle birlikte entegre kullanılmaya başlanmıştır. Fitomikoremediasyon konseptinde, mantarlar ve bitkiler birlikte ekilip mantar hem toprağı temizler hem bitkinin kök gelişimini destekler; bitki de kökleriyle toprağı havalandırıp mantara uygun ortam sağlar ve bazı petrol türevlerini bünyesine alır. Böyle sinerjik etkilerden faydalanan pilot projeler mevcuttur (Kowalska & Biczak, 2025; Sharuddin et al., 2024). Ayrıca mantar uygulamalarının ölçek büyütme etkinliğini araştıran derlemeler yayınlanmaktadır. Bu derlemelerde, laboratuvar ile saha arasındaki farkların altı çizilir ve ölçek büyütmede başarıyı belirleyen faktörler analiz edilir (Dasgupta et al., 2024; Roy et al., 2025). Örneğın bir incelemeye göre, mikoremediasyonun büyük ölçekli başarısı, uygun besin desteğı, yeterli havalandırma, doğru mantar türü seçimi ve uygulama metodolojisi (örn.

biyopil, toprak karıştırma, sprey vs.) gibi parametrelere bağlıdır (Ahmad et al., 2024; Antón-Herrero et al., 2023).

Sonuç olarak, petrol ve hidrokarbon kirliliğinin mantarlarla giderimi artık teoriden pratiğe geçmiş bir konudur. Bakteriyel yöntemlerle birlikte veya bazen tek başına, mantarlar petrol kalıntılarını büyük ölçüde yok edebilmektedir. Özellikle doğaya uyumlu restorasyon istenen hassas alanlarda (ormanlar, kıyı sulakalanları, tarım arazileri vb.), mantar yöntemleri diğer agresif yöntemlere göre büyük avantaj sağlar: Hem kirleticiyi temizler, hem ekosistemi canlandırır. Bu nedenle çevre mühendisleri, petrol kazaları ve toprak kirliliği durumlarında müdahale seçeneklerine mantar bazlı uygulamaları da dahil etmeye başlamıştır. Gelecekte, belki de standart bir prosedür olarak, petrol dökülmelerinde biyorem seçenekleri sunulurken mantar kullanımı hep masada olacaktır. Zorluklar kısmında tartışılacağı üzere, henüz her durumda mucizevi bir çözüm olmasa da, mikoremediasyon petrol kirliliğiyle mücadelede elimizdeki güçlü araçlardan biridir.

8. AĞIR METALLERİN GİDERİMİ VE MANTARLAR

Ağır metaller (kurşun, cıva, kadmiyum, arsenik vb.), çevrede birikme eğiliminde olan ve canlı organizmalar için toksik etkileri bulunan inorganik kirleticilerdir. Toprakta, suda ve çökeltilerde endüstriyel faaliyetler nedeniyle yüksek konsantrasyonlara ulaşabilmekte ve klasik yöntemlerle (kimyasal çöktürme, toprak yıkama, elektroliz vb.) arıtılmaları pahalı ve zor olmaktadır. Bu bölümde, mantarların ağır metal kirliliğinin giderimindeki rollerini ve potansiyellerini inceleyeceğiz. Mantarlar hem metabolik aktiviteleriyle bazı metalleri farklı forma dönüştürebilir, hem de biyokütleleriyle metalleri bağlayıp ortamdan uzaklaştırabilirler.

Mantarların ağır metallere karşı dayanıklılığı ve biriktirme yeteneği uzun zamandır bilinmektedir. Orman ekosistemlerinde yetişen bazı yenilebilir mantarların (ör. istiridye mantarı, şapkali mantarlar) ortamlarındaki cıva, kurşun gibi metalleri dokularında biriktirdiği saptanmıştır. Bu elbette besin güvenliği açısından istenmeyen bir durumdur (yüksek metal içerikli mantarlar zehirlenmeye yol açabilir). Fakat çevresel temizlik açısından bakıldığında, bu özellik biyoakümülyasyon kapasitesine işaret eder. Yani mantarlar, bulundukları ortamdaki metalleri alıp kendi biyokütlelerinde yoğunlaştırabilir. Bu prensip, “biyosorpsiyon” ve “biyofleach (biyo-liç)” teknolojilerinde kullanılmaktadır. Özellikle metal madenciliği atıklarında veya kirlenmiş sediman/çamur birikimlerinde mantarların metal ekstraksiyonu kabiliyeti araştırılmıştır.

Araştırmalar göstermiştir ki, birçok mantar türü (özellikle maya benzeri tek hücreli mantarlar ve bazı küf mantarları) çözelti halindeki metalleri hücre duvarlarındaki karboksil, amin, fosfat grupları aracılığıyla bağlayabilmektedir (Serag et al., 2025). Bu iyon değişimi benzeri etkileşim sonucunda metal iyonları çözeltiden uzaklaştırılıp mantar hücresinin yüzeyinde tutulur. Canlı hücreler ise bazı metalleri içeri alıp enzimlerle daha az toksik formlara indirgeme veya organik kompleksler (metallothionein gibi proteinler) ile bağlama yeteneğine sahiptir. Örneğin *Aspergillus niger* mantarı, metallerle temas ettiğinde hücre duvarında melanin benzeri polimerler sentezleyip metal iyonlarını bunlara bağlayabilir ve hücre içine girmelerini engelleyebilir. Bu durum, mantar için bir savunma mekanizmasıdır ama çevre mühendisi için “metali mantar biyokütlesinde toplama” fırsatı demektir.

Özellikle atık su arıtımında mantar biyosorpsiyonu ilgi çekmiştir. Endüstriyel atık sularda bulunan krom (Cr^{6+}), uranyum, nikel gibi iyonlar, ölü mantar biyokütlesi dolu kolonlardan geçirilerek tutulabilmiştir. Mantar bazlı aktif karbon veya mantar kompostu kullanılarak metallerin filtrelerde yakalandığı pilot denemeler vardır. Bu yöntem, ticari iyon değiştirici reçinelere göre çok daha ucuz bir alternatiftir; zira mantar atıkları (ör. bira mayası artıkları, mantar üretiminden kalan miselyum atıkları) bu iş için hammadde olarak kullanılabilir.

Bunun yanında, mantarların biyoliçing ile madencilik atıklarından metal geri kazanımı da çalışılan bir konudur. “Biyoliç” genelde bakteriler için kullanılır (*Thiobacillus* gibi bakteriler mineralleri oksitleyip metal iyonlarını çözer), ancak mantarların da organik asit

üretip cevherleri çözebildiği gösterilmiştir. Örneğin *Penicillium* ve *Aspergillus* cinsi mantarlar oksalik asit, sitrik asit gibi asitler salgılayarak e-scrap (elektronik atık) içindeki metallerin %50-80'ini çözünür hale getirmiş, sonra çözelti içindeki metalleri yine kendi biyokütlelerine veya çökerek ortamdan uzaklaştırmışlardır (Refaey et al., 2021; Singh & Singh, 2024). Bu, mantarların bir taraftan metalleri çözmede bir taraftan toplamda ikili rol oynayabileceğini gösterir.

Son yıllarda yapılan çarpıcı bir keşif, mantarların metal gideriminde bakterilerden daha etkili olabileceği yönündedir. 2022 yılında Dell'Anno ve arkadaşlarının bir çalışması, denizel sedimentlerde birikmiş yüksek metal kirliliğini temizlemek üzere mantar ve bakterileri karşılaştır (Dell'anno et al., 2022). Sonuçlar mantarlar lehine şaşırtıcı derecede olumludur: *Aspergillus niger* ve *Trichoderma* sp. mantarları eklendiğinde, bakır, arsenik, çinko, kadmiyum gibi metallerin çözeltiye geçerek ortamdan uzaklaştırılma oranı, sadece bakteriyel ekleme yapılan duruma göre iki kat fazla gerçekleşmiştir [pmc.ncbi.nlm.nih.gov](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/). Özellikle arsenik gibi bir metalin mantarların yardımıyla bakterilere kıyasla 8 kat daha fazla uzaklaştırıldığı raporlanmıştır (Dell'anno et al., 2022). Dahası, mantar eklenen deneylerde, normalde hareketsiz (sediemente bağlı) formda kalan Zn ve Cd gibi elementlerin de mobilize edilip çözeltiye geçtiği (yani bunların da ortamdan uzaklaştırılabildiği) belirtilmiştir (Dell'anno et al., 2022). Analizler, mantarların büyümesiyle ortam pH'ının düştüğünü (asit oluşumu), bunun da metal çözünürlüğünü arttırdığını ve mantar metabolizmasının metal kompleksleme kapasitesiyle birleşerek toplamda bir biyo-liç ve biyo-

sorpsiyon kombinasyonu yarattığını göstermiştir (Dell'anno et al., 2022). Bu çalışma, mantarların özellikle asidik metabolit üretimi ve güçlü hücre duvarı etkileşimleri sayesinde, metal bağlamada bakterileri geride bırakabileceğini ortaya koymuştur (Dell'anno et al., 2022). Sonuç olarak araştırmacılar, mantar kullanımının metal kirlenmiş dip çamurlarını temizlemede vaatkar ve etkin bir strateji olabileceğini vurgulamışlardır (Dell'anno et al., 2022).

Mantarların ağır metal giderimindeki pratik uygulamalarına bazı örnekler vermek gerekirse: İspanya'da bir grup, maden atık sularını *Aspergillus niger* ile arıtıp demir, çinko ve bakırı önemli ölçüde gidermeyi başardı. Güney Afrika'da asidik maden drenajı sularını *Penicillium simplicissimum* mantarıyla nötralize ederek mangan giderimi yapıldı. Hindistan'da arıtma çamurlarına *Trametes versicolor* aşılansak krom indirgenmesi ve çökmesi sağlandı. Bu örneklerin çoğu pilot/laboratuvar ölçekli olmakla birlikte, ortak mesaj mantarların metal tutma kapasitesinin onaylandığıdır.

Mantarların ağır metal giderimde avantajları: (1) Çok düşük maliyetli sorbent olmaları (atık mantar miselyumu vb. kullanılabilir), (2) Yüksek yüzey alanlı miselyum yapılarıyla hızlı etkileşim, (3) Birden fazla metal iyonunu aynı anda tutabilme (iyon değıştirciler genelde spesiftir, mantar hücresi farklı iyonları paralel bağlayabilir), (4) Canlı kullanıldığında kendini yenileyebilir olması (belli dozlara kadar metale maruz kalıp sonra yeniden büyüyebilir). Dezavantajları: (1) Yüksek metal konsantrasyonlarında mantarların büyümesinin inhibe olması, (2) Mantar biyokütlesinin doaygunluğa ulaşınca uzaklaştırılıp bertarafının gerekmesi (metalle yüklenmiş tehlikeli atık halini alır, çıkarıp yakmak

gerekebilir), (3) Metal iyonları için spesifik seçiciliğinin olmaması (tüm iyonları çeker, bu bazen istenmeyen iyonların da tutulması demek olabilir). Yine de, genel olarak mantarlarla metal giderimi literatürde çok umut vaat eden bir biyoteknoloji olarak anılmaktadır (Refaey et al., 2021; Singh & Singh, 2024). Özellikle geleneksel yöntemlerle temizlenemeyen yaygın metal kirlilikleri (örneğin nehir sedimentleri, eski maden atıklarıyla dolu araziler) için mantarların yeşil bir çözüm sunabileceği düşünülmektedir.

İlerleyen yıllarda, mantar bazlı malzemelerin (ör. mantar miselyumu ile güçlendirilmiş biyo-kompozit filtreler, mantar liflerinden üretilmiş nanofiber membranlar vb.) su arıtım sistemlerine entegre edilebileceği öngörülmektedir. Hatta bazı startup şirketleri şimdiden mantar kullanarak su filtreleri geliştirme çalışmalarına başlamıştır. Bu filtreler, ağır metal iyonlarını ve hatta radyoaktif metal partiküllerini dahi yakalamayı hedeflemektedir.

Bir de mantarların metaller üzerindeki dönüştürücü etkisine değinelim: Bazı mantarlar toksik metal formunu daha az toksik forma dönüştürebilir. Örneğin *Aspergillus* türlerinin zehirli cıva (Hg^{2+}) iyonlarını uçucu cıva (Hg^0) formuna indirgediği (yani metalik halde gazlaştırdığı) raporlanmıştır. Bu aslında biyobertaraf için iyi bir şey değildir, çünkü cıva bu sefer atmosfere karışır; fakat ilginç bir biyokimyasal yetenek olarak not edilmiştir. Yine *Alternaria* gibi mantarlar, arsenik iyonlarını sülfidlerle birleştirip çözünmez arsenik sülfid mineralleri (orpiment, realgar) halinde çökeltebilir. Bu, çözeltideki arsenik zehirliliğini azaltır, fakat çökelek hâlâ arsenik içerir. Bu tip

mekanizmalar, mantarların metal metabolizmasına dair bilgi dağarcığımızı genişletmektedir.

Sonuç itibariyle, mantarların ağır metal giderimindeki rolü, çevre mühendisliğinin biyoteknolojik cephaneliğinde önemli bir yer tutmaktadır. Özellikle metal kirliliğine maruz kalmış suların, toprakların ve sedimanların düşük maliyetli ve sürdürülebilir yöntemlerle temizlenmesi için mantarlar ciddi bir adaydır. Mevcut bulgular, mantarların en az bakteriler kadar (hatta bazı durumlarda daha da) etkili olabileceğini ortaya koymaktadır (Dell'anno et al., 2022). Bunun pratik yansımalarını önümüzdeki yıllarda daha somut göreceğiz. Pilot projelerin başarılı olması durumunda, örneğin bir maden bölgesi atık su arıtma tesisinde bakteri yerine mantar reaktörleri veya karma reaktörler görmek mümkün olabilir.

9. PLASTİK VE SENTETİK POLİMER ATIKLARIN PARÇALANMASINDA MANTARLAR

Modern çağın getirdiği en büyük çevre sorunlarından biri de plastik kirliliğidir. Polietilen (PE), polipropilen (PP), polistiren (PS), poliüretan (PUR) ve PET gibi sentetik polimerler doğada son derece kalıcıdır; yüzlerce yıl bozunmadan kalabilirler. Hem karasal ortamlarda hem okyanuslarda devasa boyutlara ulaşan plastik birikimi, ekosistemlere zarar vermekte ve mikroplastik formunda besin zincirine girmektedir (Vaksmaa et al., 2023). Plastik atıkların geleneksel yönetimi (geri dönüşüm, yakma, depolama) yetersiz kalmıştır ve araştırmacılar biyobozunma(biodegradation) yoluyla plastiği ortamdan kaldırmanın yollarını aramaktadır. Bu bağlamda, bazı mikroorganizmaların plastik polimerleri parçalayabildiği keşfedilmiştir. Özellikle mantarlar, kompleks karbon kaynaklarını sindirebilme yetenekleriyle burada ilgi çekici bir aday olarak öne çıkmaktadır.

Bu alanda ilk umut vadeden bulgulardan biri, 2011’de *Pestalotiopsis microspora* adlı bir mantarın poliüretan türü plastikleri anaerobik koşullarda dahi parçalayabildiğinin raporlanmasıdır (Russell et al., 2011). Bunu takiben, mantarların özellikle ester bağları içeren plastıklere (ör. polyesterler, poliüretanlar) karşı enzimatik aktivite gösterebildiği bulundu (Vaksmaa et al., 2023). Ancak en yaygın plastikler olan polietilen ve polipropilen tamamen karbon-karbon bağlarından oluşur ve bunların mikrobiyal bozunması çok daha zor ve yavaştır. Yine de, doğada plastik yüzeylerinde oluşan biyofilmlerde mantar türlerinin yer aldığı ve bazılarının bu polimerlere saldırdığı tespit edilmiştir (Vaksmaa et al., 2023).

Kara ortamlarında, çöplüklerde ve atık sahalarında plastik atıkların üzerinde mantar kolonileri izole edilmiştir. Yapılan izolasyon çalışmalarında *Aspergillus*, *Penicillium*, *Trichoderma* cinslerine ait mantarlar defalarca karşımıza çıkar (Vaksmaa et al., 2023). Bu mantarların laboratuvar testlerinde düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) üzerinde büyüebildiği, film yüzeyinde kütle kaybı, yüzeyde çukurlaşma, esneklikte azalma gibi etkiler yarattığı gösterilmiştir (Vaksmaa et al., 2023). Örneğin *Aspergillus clavatus*, bir çöplükten izole edilen mantar, polietilen film üzerinde 1-2 ay içinde kütle kaybına yol açmıştır. *Trichoderma viride* Endonezya’da bir arazi doldurma alanından izolasyon sonrası test edilmiş ve PE filmde %4-5 ağırlık kaybı ve mekanik dayanım düşüşü gözlenmiştir (Vaksmaa et al., 2023). Bu rakamlar ilk bakışta küçük görünse de, polietilen gibi inert bir materyal için anlamlıdır, çünkü mantarın polimer zincirlerini kısmen kırdığını göstermektedir. *Fusarium oxysporum* ve *Purpureocillium lilacinum* gibi mantarların da polietilen film yüzeyini pürüzlendirip biyo-kırılğan hale getirdiği raporlanmıştır (Vaksmaa et al., 2023)..

Plastik bozan mantarların mekanizmasına bakılırsa, yine dış enzim üretimi kritik görünmektedir. Bazı mantarlar alkan mono-oksijenaz, alkana hidroksilaz gibi enzimlere sahiptir (hatta *Bjerkandera* cinsi bir beyaz çürük mantarda alkane-hidroksilaz geni bulunmuştur (Vaksmaa et al., 2023).. Bu enzimler, polietilen gibi uzun zincirli alkan polimerlerin uç kısımlarını okside edip molekülü daha kısaltarak parçalara bölebilir. Mantarlar ayrıca peroksidaz ve lakkaz enzimleriyle polimerdeki potansiyel çift bağ yerlerinden saldırarak malzemeyi zayıflatılabilir (Vaksmaa et al., 2023). Ancak asıl sorun, plastiğin suyu iten (hidrofobik)

yapısı nedeniyle enzimlerin yüzeye erişimde zorlanmasıdır. Mikroorganizmalar genellikle biofilm oluşturarak bu engeli aşmaya çalışırlar. Plastik yüzeyine yapışan mantar hifleri, lokal olarak ortamı nemli ve enzimce zengin tutarak polimeri kısmen sindirebilir.

Su ekosistemlerinde durum biraz daha farklıdır. Okyanus ve göllerde mantarlar, plastik döküntüler üzerinde genellikle bakteriler kadar baskın değildir (Vaksmas et al., 2023). Ancak son çalışmalar, *Chytridiomycota* gibi sucul mantarların mikroplastik yüzeylerine yerleşebildiğini ve bunların bazılarının polimerleri bozabilecek enzimlere sahip olduğunu ortaya koymuştur (Vaksmas et al., 2023). Yine de, denizlerde plastik kirliliğinin mikrobiyal bozunması çok uzun zaman ölçeklerinde gerçekleştiğinden, mantarların bu sürece katkısı henüz net değildir. Laboratuvar deneylerinde, tatlı su kaynaklarından izole edilen *Cladosporium cladosporioides* gibi mantarların poliüretan köpükleri önemli ölçüde parçaladığı, ancak polietilen üzerinde etkili olmadığı görülmüştür (Vaksmas et al., 2023).

Yapay koşullarda mantarlar kullanarak plastik bozundurma fikrine dair bazı deneysel teknolojiler de geliştiriliyor. Örneğin *T. versicolor* gibi beyaz çürük mantarlardan elde edilen lakkaz enzimini ve mediyatör kimyasallarını kullanarak plastik katkı maddesi olan bisfenol-A ve bazı mikroplastiklerin parçaladığı bildirilmiştir (Vaksmas et al., 2023). Hatta bir çalışmada, mantar lakkazını immobilize edilmiş halde plastik atık su örneklerine koyup polistiren ve polipropilen oligomerlerinin kırıldığı gözlenmiştir. Bunun pratik bir arıtma yöntemine dönüşmesi için ölçek büyütme ve maliyet konularının çözülmesi gerekir; zira enzim üretimi pahalı olabilir.

Mantarların plastik atıklarla biyolojik olarak mücadele potansiyelini tam anlayabilmek için daha fazla araştırmaya ihtiyaç var. Şu an bildiklerimiz: Mantarlar plastiği yavaş da olsa saldırıya uğratabilir; yapısında ester veya amid bağı olan biyoplastikler ve poliüretanlar gibi polimerleri daha kolay hedef alır; saf poliolefinler (PE, PP) en zor hedeftir ama onlarda da ufak ilerlemeler mümkündür; mantarlar bakterilere kıyasla daha güçlü enzimlere sahip olsa da büyüme hızları ve çevresel adaptasyonları meselesi var. Biyoteknolojistler, genetik yöntemlerle plastik parçalayan mantarların enzim üretimini artırmaya veya yeni mutant suşlar geliştirmeye çalışıyor. 2020’lerde yayınlanan bir rapor, *Aspergillus tubingensis* mantarının PET plastik film üzerinde belirgin bozulmaya yol açtığını, yüzeyde pürüzlenme ve karbonil grup oluşumları tespit ettiklerini duyurdu. Bu mantarın genomunun incelenmesi, PET ester bağlarını kesebilecek bir cutinaz benzeri enzimi kodladığını ortaya çıkardı. Bu tip bulgular, belki de ileride mantar enzimlerini endüstriyel geri dönüşüm tesislerinde kullanabileceğimizin sinyalini vermektedir.

Şu an ufukta beliren bir gerçek, plastiklerin doğadaki “kayıp kütle”sinin belki de mikroorganizmalar tarafından kısmen yok edildiği, ve bu işte mantarların payının olabileceğidir (Vaksmaa et al., 2023). Denizlerde beklenenden az plastik bulunmasının nedenlerinden biri, UV ışığı ve mikrobiyal aktiviteyle mikroplastiklerin çok küçük boyutlara parçalanması ve sonunda belki de mineralize olması olabilir (Vaksmaa et al., 2023). Fakat bunun ispatı henüz net değildir ve mantarların rolü de tam bilinmemektedir.

Sonuç olarak, mantarların plastik ve sentetik polimer atıkları parçalama kabiliyetleri henüz emekleme aşamasında bir araştırma konusudur. Burada ihtiyatlı bir yaklaşım gerekir: Mantarlar, plastik atık krizini yakın zamanda çözecek bir mucize sunmamaktadır. Ancak belirli niş uygulamalarda (örneğin biyobozunur plastikler, ya da plastik içeren kompozit atıkların ön işlenmesi gibi) mantarlar devreye girebilir. Örneğin tarımsal malç olarak kullanılan biyoplastik filmler hasat sonrası tarlada bırakılıp mantar sporları püskürtülerek daha hızlı bozunmaları sağlanabilir. Veya evsel organik atıklarla karışmış plastik fragmentleri mantar kompost sistemlerinde kısmen ayrıştırılabilir. Bunlar üzerinde çalışılan fikirlerdir.

Güncel bir umut ışığı, entomopatojen mantar *Alternaria alternata*'nın polietilen parçalayabildiğinin raporlanmasıdır (Vaksmas et al., 2023). Bu mantar, bir laboratuvar deneyinde 3 ay sonunda polietilen film kütlesinin %11'ini tüketti. Bu alandaki en yüksek değerlerden biri olarak dikkat çekti. *Alternaria*'nın ürettiği zararlı bitki patojeni enzimlerin, polietilenin CH bağlarına saldırabildiği düşünülüyor. Tabii bu henüz laboratuvar ortamında optimize edilmiş bir durumdu; saha veya karma atık şartlarında tekrar etmek gerek.

Plastik kirliliğinin çözümünde mantarlar tek başına yeterli olamayabilir ancak döngüsel ekonomi yaklaşımı içinde yer alabilir. Örneğin geri dönüştürülemeyen veya ekonomik değeri olmayan plastik atıklar mantarlarla muamele edilip hacmi ve tehlikesi azaltılabilir, sonrasında geri kalan fraksiyon bertaraf edilebilir. Ya da mantar miselyumundan yapılan paketleme malzemeleri (mantar köpükleri gibi) kullanarak fosil plastiklerin yerini almak mümkün olabilir. Aslında bu

son söylediğimiz, doğrudan kirlilik temizliği olmasa da, plastik tüketimini azaltarak dolaylı bir çevresel fayda sağlar ve mantar teknolojilerinin plastik sorununa bir başka katkısı sayılabilir.

10. FARMASÖTİK VE KİŞİSEL BAKIM ÜRÜNÜ KİRLETİCİLERİNİN GİDERİMİ

Modern yaşamın bir sonucu olarak, sulara karışan farmasötik ve kişisel bakım ürünleri (FKÜ) kalıntıları ciddi bir çevresel endişe haline gelmiştir. Antibiyotikler, ağrı kesiciler, hormonlar, antidepresanlar, antiseptikler, kozmetik kimyasalları gibi yüzlerce aktif molekül atık su arıtma tesislerine ulaşmakta ve konvansiyonel yöntemlerle tam olarak tutulamadığı için nehir, göl ve deniz ekosistemlerine geçmektedir (Vaksmaa et al., 2023). Bu maddeler düşük konsantrasyonlarda bulunsalar dahi sürekli bir yük oluşturur ve endojen bozucu etkiler, antibiyotik direnç gelişimi, ekosistem fonksiyonlarında bozulma gibi önemli sonuçlar yaratabilir (Vaksmaa et al., 2023). Atık su arıtma tesisleri tipik olarak bu bileşikleri hedef alacak özel proseslere sahip değildir; bu yüzden literatürde “gelişen (emerging) kirleticiler” olarak anılan bu grup için yeni arıtma teknolojileri araştırılmaktadır.

Beyaz çürük mantarlar ve bazı mikrofunguslar, bu tip karmaşık organik mikrokirleticileri parçalama konusunda ümit vermektedir. Aslında mantarların bu alanda kullanımı fikri, boyar maddeler konusundaki başarılarından doğmuştur: Boyalar gibi yapısal olarak kompleks ve kararlı molekülleri parçalayan mantar enzimlerinin, ilaç etken maddelerini de benzer şekilde dönüştürebileceği düşünülmüştür. Nitekim laboratuvar çalışmalarında mantarlar pek çok farmasötik bileşiği metabolize edebilmiştir. Özellikle *Trametes versicolor* (hindiba mantarı olarak da bilinir) ve *Pleurotus ostreatus* bu konuda yoğun araştırılan türlerdir.

Çeşitli çalışmalar göstermiştir ki, mantarlar antibiyotikler (ör. tetrasiklin, oksitetrasiklin), NSAID ağrı kesiciler (diklofenak, naproksen, ibuprofen), beta-blokerler (atenolol), antiepileptikler (karbamazepin), östrojen hormonlar (17a-etinilöstradiol) gibi bileşikleri parçalayabilmektedir (Vaksmaa et al., 2023).. Beyaz çürük mantarların kullandığı ligninolitik enzimler burada da devrededir. Özellikle lakkaz enzimi, çeşitli farmasötiklerdeki halkasal yapıları okside ederek onların biyolojik etkinliğini yitirmesini sağlar. Örneğin diklofenak, *T. versicolor* lakkazı ile artırıldığında daha basit fenolik bileşenlere parçalanır ve toksisitesinin azaldığı gözlenir. Mantarların antidepresan sertralin ve fluoksetin gibi bileşikleri de dönüştürebildiği raporlanmıştır (Vaksmaa et al., 2023).

Bir çarpıcı çalışma, 2014 yılında hastane kaynaklı 51 adet farmasötik ve endokrin bozucu kimyasal içeren gerçek bir atık suyun mantar reaktöründe arıtılmasıydı (Vaksmaa et al., 2023). Bu çalışmada *T. versicolor*'un yer aldığı bir biyoreaktörde bu 51 bileşiğin 46'si tamamen veya kısmen giderilmiştir (Vaksmaa et al., 2023). Ayrıca suyun toplam toksisitesi de belirgin şekilde düşmüştür. Bu, mantar uygulamasının gerçek hayatta işe yarayabileceğine dair önemli bir kanıttır. Bir diğer araştırma, *G. applanatum* mantarı ile *L. sulphureus* yenilebilir mantarının konsorsiyum halinde üç yaygın ağrı kesiciyi (diklofenak, celekoksib, ibuprofen) %99.5 oranında sadece 3 gün içinde giderdiğini gösterdi (Vaksmaa et al., 2023). Bu inanılmaz hızlı bir değerdir ve laboratuvar koşullarında elde edilmiştir. Mantar-bakteri konsorsiyumları da denendi; bazı durumlarda mantarlar ilacı önceden

kısmen okside eder, bakteriler ara ürünleri asimile eder. Bu sinerji, birlikte kullanımla daha kapsamlı giderim sağlayabilir.

Mantarların farmasötik gideriminde kullanımı için bazı teknik geliştirmeler de çalışılmıştır. Örneğin mantarların bir taşıyıcı ortam üzerinde sabitlenip atık su ile temas halinde çalıştığı biyoreaktörler tasarlanmıştır. *Trametes versicolor*'ın inert taşıyıcılara tutunarak büyüdüğü reaktörlerde, çeşitli ilaç etkin maddelerin yarı ömürlerinin ciddi oranda düştüğü bildirilmiştir (Vaksmas et al., 2023). Ayrıca, atık suya bazı katalizör maddeler (kırmızı mediyatörler) eklendiğinde mantar enzimlerinin veriminin arttığı; ancak bunun mantar türüne göre değiştiği gözlemlenmiştir (Vaksmas et al., 2023). Örneğin *T. versicolor* en iyi acetovanillone mediyatörüyle çalışırken, *G. lucidum* için ABTS daha etkilidir gibi bulgular vardır.

Bir başka yenilikçi yaklaşım, immobilize enzim kullanımını içerir. Bu yöntemde mantarın kendisini reaktöre koymak yerine, ondan elde edilen lakkaz gibi enzimler bir taşıyıcıya bağlanır ve atık su bu enzim reaktöründen geçirilir. 2019'da bir araştırma, lakkaz enziminin hollow mesoporous carbon spheres (HMCS) denen özel gözenekli karbon küreciklere bağlanmasıyla elde edilen sistemin, serbest enzimden çok daha stabil ve tekrar kullanılabilir olduğunu gösterdi (Vaksmas et al., 2023). Bu immobilize lakkaz, 8 döngü işlemde sonra bile etkinliğini korumuş ve çeşitli ilaçları bozundurabilmiştir. Bu sonuçlar, endüstriyel anlamda mantar enzimlerini kullanarak sürekli prosesler geliştirmeyi mümkün kılar.

Mantarların farmasötik giderimindeki avantajları: Biyolojik oldukları için kalıcı toksik çamur oluşturmazlar, çeşitli yapıda bileşiklere karşı aynı anda etki edebilirler (multi-enzim sistemleri var), düşük maliyetle büyütülebilirler, patojen değildirler (çevreye salınmaları durumunda risk düşüktür). Dezavantajları: Atık sudaki değişken koşullara adaptasyon sorunu (pH, sıcaklık, kimyasal karışım), yavaş çalışma (bazen saatler yerine günler gerekebilir), diğer mikroplarla rekabet. Ayrıca mantarların çıkardığı ürünlerin tam analizi yapıp güvenilir oldukları doğrulanmalıdır; zira bazen mantarlar ilacı tam parçalamayıp farklı bir metabolite çevirir, bu metabolit de toksik olabilir. Örneğin mantar diklofenak'ı 4,5-diklorocatekol'e çevirebilir; bu ürün daha polar ama hala çevreye zararlıdır. Bu yüzden, mantar arıtımı sonrası suyun toksisite testleri muhakkak yapılmalıdır. Bazı çalışmalar mantar arıtımı sonrası suyun su pirelerine ve balıklara zarar vermediğini ya da daha az verdiğini göstermiştir, bu iyiye işarettir.

Şu anda, dünyada pilot ölçek bir “mantar bazlı ilaç arıtma tesisi” yok. Ancak laboratuvar bulguları çok ikna edici olduğundan, kimi araştırmacılar atık su arıtma tesislerinin çıkışına eklenen bir mantar modülü tasarlanmasını önermektedir. Bu modül, ikinci arıtma çıkışında kalan farmasötik ve mikro kirleticileri temizlemeyi hedefler. Örneğin ozonlama gibi ileri arıtma yöntemlerine biyolojik ve ekonomik bir alternatif olabilir. Ozon gibi yöntemler anlık yüksek giderim sağlasa da maliyeti yüksektir ve yan ürün oluşturabilir; mantarlar ise belki daha yavaş ama sürdürülebilir ve selektif arıtma yapabilir. Bunu hayata geçirmek için belki önümüzde bir 5-10 yıl daha Ar-Ge çalışması gerekmektedir.

Burada vurgulanması gereken bir nokta da antibiyotik atıkların mantarlarla giderilmesinin antibiyotik direnç genleri yayılımını azaltabileceğidir. Atık sularda antibiyotik kalırsa, arıtma tesislerinde dirençli bakteriler seçilebilir. Mantarlar devreye girip antibiyotiği parçalar ise, bu seçim baskısı ortadan kalkar veya azalır. Nitekim mantar reaktörleriyle işlenen atık sularda toplam direnç gen yükünün düştüğüne dair ön bulgular raporlanmıştır. Bu, halk sağlığı açısından da önemli bir fayda olabilir.

Sonuç olarak, farmasötik ve kişisel bakım ürünü atıklarının mantarlarla giderimi, çevre mühendisliğinin yenilikçi ve çok önem verilen bir alanıdır. 2020 sonrası literatürde bu konuda belirgin bir artış vardır, zira dünya genelinde su kaynaklarında ilaç kalıntıları saptanmakta ve düzenleyici kurumlar arıtma standartlarını bu yönde güncellemektedir. Mantar teknolojileri, belki önümüzdeki on yılda atık su arıtımının standart bir parçası haline gelebilir. Örneğin belirli büyük hastanelerin atık sularında (yüksek konsantre ilaç içeren) mantar bazlı paket arıtma sistemleri pilot olarak kurulabilir. Hatta mantarların yan ürünü olan yenilebilir mantarlar veya diğer biyokütle de ekstra bir kazanım sağlayabilir (ancak metal gibi olmayan organik kirleticilerde mantar biyokütlesi genelde kontamine olmaz, yani hasat edilip yenilebilir bile).

11. KARŞILAŞILAN ZORLUKLAR VE SINIRLILIKLAR

Mantarların çevre mühendisliği uygulamalarında sunduğu potansiyel, önceki bölümlerde ayrıntılı olarak tartışıldı. Ancak bu potansiyelin tam anlamıyla gerçeğe dönüşebilmesi için aşılması gereken çeşitli zorluklar ve sınırlılıklar vardır. Bu bölümde, genel hatlarıyla mantar tabanlı çevre teknolojilerinin uygulanmasında karşılaşılan güçlükleri ele alacağız. Bu zorlukların bir kısmı teknik, bir kısmı ekonomik, bir kısmı ise ekolojik/sağlık boyutludur.

1. Büyüme ve Hız Sınırlamaları: Mantarlar, özellikle filamentöz yapıda olanlar, bakterilere kıyasla daha yavaş büyürler ve adaptasyon süreleri daha uzundur. Bir atık su arıtma havuzunda veya kirlenmiş toprak ortamında bakteri popülasyonları saatler-günler içinde tepkime verirken, mantarların çoğalması ve etkili düzeye gelmesi günler-haftalar alabilir. Bu, hızlı aksiyon gerektiren kirlilik giderimi senaryolarında (örneğin ani bir toksik atık deşarjı) mantarların yetişemeyebileceği anlamına gelir. Ayrıca mantarların optimum çalışma koşulları (pH, sıcaklık, nem, oksijen) sağlanmazsa, büyüme hızları daha da düşer. Bu sorunu aşmak için mühendisler, mantarları biyoreaktör ortamında önceden büyütüp adapte ederek kullanmayı planlamaktadır. Örneğin atık suya vermeden önce mantarları bir yan tankta yeterli biyokütleyle ulaştırmak, veya kontamine sahaya mantar uygulamadan önce laboratuvarında o ortam kirleticisine alıştırmak gibi stratejiler geliştirilmektedir. Ancak bunlar süreci karmaşılaştırır ve potansiyel maliyeti artırır.

2. Rekabet ve Kontaminasyon: Açık çevre ortamında veya karma mikroorganizma popülasyonlarının bulunduğu bir sistemde, mantarların hakimiyeti her zaman garanti değildir. Örneğin bir aktif çamur havuzuna mantar eklediğinizi düşünelim; eğer havuz koşulları bakteriler için uygunsa, mantarlar belki hiç tutunamadan bakterilerce baskılanabilir. Mantar miselyumu yeterince gelişmeden bakteriler tüm besini kullanabilir veya mantar hiflerini parçalayan mikrobiyal rakipler (hatta mantarları yiyen amipler vs.) devreye girebilir. Bu durum laboratuvarda steril koşullarda görülmeyen ama sahada beliren bir sorundur. Dolayısıyla, mantar uygulamalarının pratikte sterilite sağlanması zor bir meydan okumadır. Bazı yaklaşımlar, mantarların “immobilize” formlarda kullanılarak rekabetten korunabileceğini öne sürer. Örneğin mantarlar gözenekli seramik kürecikler içinde büyütülür ve suya bu küreciklerle temas ettirilir; böylece mantar içerde korunurken enzimleri dışarı çıkar. Bu tip çözümler kısmen işe yarayabilir, ancak tam anlamıyla rekabeti ortadan kaldırması zordur.

3. Ölçeklenebilirlik: Laboratuvar deneylerindeki başarıyı endüstriyel veya saha ölçeğine taşıma süreci, mantar uygulamalarında özel zorluklar içerir. Küçük ölçekte bir erlenmayerde veya mini reaktörde mantar başarıyla kirletici giderir; peki bunu 1.000 metreküp hacimli bir reaktöre aktardığımızda ne olur? Bu sorunun cevabı belirsizdir. Büyük hacimlerde oksijen dağılımı, ısı dağılımı gibi faktörler farklı davranır. Mantar miselyumu büyük reaktörde bir yerde topaklanıp ölü bölgeler oluşturabilir, istenen tüm hacme eşit yayılmayabilir. Ölçek büyütme etkileri mantar proseslerinde henüz tam anlaşılmamıştır ve bu konuda metodolojik rehber eksikliği vardır (Dasgupta et al., 2024).

Biyoreaktör tasarımlarının mantarların doğal büyüme formuna uygun revize edilmesi gerekebilir (örneğin karıştırmasız reaktörler, dolgulu yatak sistemleri vb.). Ayrıca saha uygulamalarında (toprak, kompost yığını gibi) çevresel değişkenler (yağış, sıcaklık dalgalanması, yerel mikroflora, böcekler) devreye girer. Amazon Projesi gibi başarı hikayeleri olsa da, her saha benzersizdir ve mantarların orada performansı önceden öngörülemmez. Bu belirsizlik, yatırımcıların mantar teknolojilerine temkinli yaklaşmasına yol açmaktadır.

4. Enzimatik Spesifiklik ve Ara Ürünler: Mantarların en önemli avantajı enzimlerinin geniş etki spektrumudur; ancak bu bazen dezavantaja da dönüşebilir. Örneğin mantar enzimleri bir kirletici molekülü parçalayabilir ama nereye kadar? Sıklıkla, mantarlar tam mineralizasyondan ziyade kısmi bozunma yapar ve ara ürünler oluşturur. Bu ara ürünler kimi zaman başlangıç kirleticiden daha toksik veya kalıcı olabilir (daha önce tartıştığımız gibi, DDT için DDE oluşumu, boyar madde için toksik aromatik aminler oluşumu vb.). Laboratuvar çalışmalarında bu ara ürünleri tespit edip raporlamak bazen ihmal edilebiliyor (örneğin sadece renk giderimi ölçülüyor, kimyasal analiz yapılmıyor). Ancak uygulamada, herhangi bir biyoremediasyon yönteminin başarısı, kirleticinin tamamen zararsız hale getirilmesiyle ölçülmeli. Mantarlar birçok durumda kirleticiyi daha polar, suda çözünen bir forma dönüştürüyor; bu iyi, çünkü organizmaların vücudunda birikmesi azalıyor. Ama bu yeni ürünler su ekosisteminde birikebilir mi, bakterilerce kolayca parçalanabilir mi? Bu sorular açık. Dolayısıyla, mantar proseslerinin ürün stoikiyatrisi ve çevresel kaderi tam anlaşılmadan, bunları yaygın uygulamak riskli olabilir. Bunu

gidermek için, mantar arıtımı genelde diğer yöntemlerle kombine düşünülür: Mantar ilk adım dönüştürür, sonrasında bakteriyel arıtma veya kimyasal oksidasyon artık ürünleri halleder gibi entegre çözümler planlanır (Vaksmaa et al., 2023).

5. Süreklilik ve Kontrol: Mantar proseslerini canlı sistemler olduğu için ince ayar ile kontrol etmek zordur. Bakteriyel sistemlerde pH, besin, oksijen vererek istenen denitrifikasyon hızını vs. kabaca kontrol edebilirsiniz; mantar sistemlerinde ise miselyum gelişimi heterojendir ve süreçler lineer olmayabilir. Örneğin mantar büyürken önce kirleticiyi adsorplayıp sonra gecikmeli parçalayabilir, veyahut büyüme fazında etken değil de durağan faza geçtiğinde enzim üretir. Bu gibi dinamikler proses kontrolünü güçleştirir. Operatörler için de alışılmışın dışında bir ortamdır: Aktif çamur işletmecileri bakteriyel çamur parametrelerine aşinadır ancak bir mantar reaktöründe örneğin “miselyum yoğunluğu” veya “pelet boyutu” gibi parametreleri izlemek ve ayarlamak gerekebilir. Bu noktada bir bilgi ve deneyim eksikliği söz konusudur. Otomasyon sistemleri, sensörler vs. mantar reaktörlerine uyarlanmalıdır. Bunlar çözülmeyecek şeyler olmasa da, zaman ve Ar-Ge ister.

6. Sağlık ve Emniyet Konuları: Her ne kadar çoğu çevresel mantar insan patojeni olmasa da, atık su veya toprak sistemlerinde aşırı mantar sporülasyonu yaşanması ihtimali düşünülmelidir. Havaya karışan mantar sporları, tesis çalışanlarında allerjik reaksiyonlar veya solunum problemleri yaratabilir. Özellikle *Aspergillus* gibi bazı cinslerin sporları duyarlı kişilerde hassasiyet tetikleyebilir. Bu nedenle mantar bazlı sistemlerde havalandırma ve filtrasyon önlemleri almak gerekebilir.

Ayrıca, genetiği değiştirilmiş mantar suşları kullanılması durumunda (ileride verimi artırmak için bu denenebilir), bunların doğaya kaçışı engellenmelidir. Bir mantar miselyumu çevrede kontrolden çıkarsa belki istenmeyen bir ekolojik etkiye yol açabilir (ancak bu risk bakteri kaçışına göre düşüktür, çünkü mantar uygun alan bulamazsa yerleşemez). Yine de, risk analizleri ve düzenleyici onaylar mantar teknolojileri için henüz tam oluşmamıştır.

7. Ekonomi ve Yatırım: Son olarak belki de en gerçekçi sınırlayıcı, bu yöntemlerin ekonomik uygulanabilirliğinin belirsiz olmasıdır. Her ne kadar mantarlar düşük maliyetli büyüse de (talaş, saman gibi ucuz atıklarda yetişebilirler), mühendislik ve operasyon boyutunda belirsizlikler maliyet hesabını güçleştirir. Bir belediye atık su arıtma idaresi, yeni bir mantar sistemi kurmak için öncelikle bunun maliyet-fayda analizini görmek ister. Oysaki şimdiye dek tam ölçekli uygulama olmayınca, bu veriler modellemelere dayanır. Yatırımcılar genelde kanıtlanmış teknolojilere yönelir; mantarlar ise yenilikçi ancak “piyasa geçmişi olmayan” bir araç olarak temkinli karşılanabilir. Bu döngüyü kırmak için, kamu destekli pilot projeler kritik önem taşır. Eğer bir-iki pilot tesiste mantar uygulamaları ekonomik ve teknik başarı gösterirse, sektörün güveni artacaktır. Ayrıca mantarların bazen çift amaçlı faydaları ekonomik cazibeyi artırabilir: Örneğin bir mikoremediasyon işleminden elde edilen miselyum, enzim veya biyokütle satılabilir bir yan ürün olabilir. Bunun somut bir örneği henüz yok ama gelecekte mesela “kirletici yiyen mantardan üretilen biyoplastik malzeme” gibi inovatif çıktılar belki ekonomik çarkı döndürecekler.

Tüm bu zorluklar gerçek olsa da, hiçbiri aşılmaz değildir. Pek çok çevre teknolojisi benzer belirsizliklerle ilk başta karşılaşmış, zamanla Ar-Ge ve iyileştirmelerle pratik birer araç haline gelmiştir. Mantar teknolojileri için de şu an bu zorlukları saptamak, çözüm yolları araştırmak dönemindeyiz. Nitekim literatürde bu sorunlara yönelik stratejiler geliştiriliyor: Örneğin “Fungus-augmented bioreactor design”, “co-culture stability protocols”, “metabolic pathway engineering” gibi spesifik başlıklar altında mantar uygulamalarının sorunlarına çözümler aranıyor (Akpasi et al., 2023). Bilim insanları, mantarların reaksiyon hızlarını artırmak için genetik modifikasyon veya adaptif laboratuvar evrimi tekniklerini; rekabeti azaltmak için antifungal üretmeyen özel bakterilerle eşleştirme gibi yaklaşımları; proses kontrolü için yeni sensör ve izleme yöntemlerini (ör. enzim aktivitesi sensörleri) deniyor.

Sonuç olarak, mantar tabanlı çevre teknolojilerinin önünde bir takım engeller bulunsa da, bunlar üzerinde aktif şekilde çalışılmaktadır. Bu zorlukların farkında olunması, beklentilerin gerçekçi tutulması ve çözüm odaklı araştırmaların sürmesi önemlidir. Bir sonraki bölümde, bu engellerin aşılmasıyla mantar teknolojilerinin nasıl bir gelecek vaat ettiğine dair perspektif sunulacaktır.

12. GELECEK PERSPEKTİFLERİ

Mantarların çevre mühendisliğinde kullanımı, henüz gelişmekte olan bir alan olmakla birlikte son yıllarda hızla ivme kazanmıştır. Bilimsel literatürde 2020 sonrasında mantar temelli biyoremediasyon konulu yayınlarda belirgin bir artış görülmektedir. Bu bölümde, önceki bölümlerde ele alınan konular ışığında gelecek perspektifleri tartışılacak; yani mantar uygulamalarının önümüzdeki yıllarda hangi yönlere evrilebileceği, hangi yeniliklerin ufukta olduğu ve bu alanın sürdürülebilir çevre yönetiminde nasıl bir rol oynayabileceği değerlendirilecektir.

1. Enzim Teknolojilerinde Atılım: Gelecekte mantarların kendilerinden ziyade, onlardan elde edilen enzimlerin çevre arıtımında daha yaygın kullanılması olasıdır. Lakkaz, mangan peroksidaz, lignin peroksidaz gibi enzimler halihazırda laboratuvar ölçekli denemelerde çok başarılı sonuçlar vermiştir. Endüstriyel ölçekte bu enzimlerin üretimi ve stabilizasyonu üzerine yoğun Ar-Ge çalışmaları bulunmaktadır (Vaksmaa et al., 2023). Yakın gelecekte, immobilize mantar enzimleri içeren modüler ünitelerin (ör. lakkaz kartuşları) atık su arıtma tesislerinde kullanıma alınabileceği öngörülmektedir. Bu üniteler, klasik arıtma sistemlerine sonradan entegre edilerek boyar madde, farmasötik kalıntı gibi giderimi zor maddelerin parçalanmasında görev alabilir. Enzim teknolojilerinin avantajı, canlı kültürle uğraşma zorunluluğunu ortadan kaldırmasıdır. Sentetik biyoloji ve protein mühendisliği alanlarındaki ilerlemeler sayesinde, mantar enzimlerinin daha dayanıklı ve aktif versiyonları laboratuvarlarda tasarlanmaktadır. Örneğin optimum pH aralığı genişletilmiş veya inhibitörlere dirençli lakkaz

mutantları elde edilmesi mümkündür. Bu tür “akıllı enzimler”, gelecekte su ve toprak arıtım reaktörlerinin bir parçası olabilir (Akpasi et al., 2023). Ayrıca, enzime dayalı süreçler genellikle daha kolay otomasyona bağlanabilir ve gerektiğinde kimyasal olarak durdurulup yeniden başlatılabilir; bu da operasyon esnekliği sağlar.

2. Konsorsiyal ve Hibrit Sistemler: Gelecekte saf mantar kültürleri yerine, mantar-bakteri konsorsiyumlarının veya mantar-bitki ortaklıklarının kullanımı daha yaygın hale gelebilir. Doğadaki biyobozunma süreçleri genellikle mikroorganizma topluluklarının işbirliğiyle yürüdüğü için, mühendislik sistemlerinde de bu yaklaşım verimi artırabilir. Örneğin fungal bioaugmentation adı verilen konsept, mevcut arıtma çamuru veya kompost sistemine uygun bir mantar eklenerek sürecin iyileştirilmesini amaçlar (Serag et al., 2025). Yakın gelecekte atık su arıtma tesislerinde mantar aşılmasıyla hem organik madde parçalanmasının hızlandırılması hem de yeni kirleticilerin giderilmesi mümkün olabilir. Buna dair pilot çalışmalar, mantar eklenen aktif çamur sistemlerinde toplam azot ve BOD gideriminde iyileşme gözlemlendiğini bildiriyor. Aynı şekilde fitoremediasyon sahalarında bitkilerle birlikte mantar uygulamak, bitkinin kök salgılarıyla mantarın enzimleri arasında sinerji yaratarak temizliği hızlandırabilir (Kowalska & Biczak, 2025; Sharuddin et al., 2024). Bu tür hibrit sistemler, tekil yöntemlerin sınırlamalarını kapatıp birden fazla mekanizmayı aynı anda devreye sokabilir. Örneğin bir hibrit sistemde bakteri, mantarın parçalayamadığı bir kısım ara ürünü metabolize ederken; mantar da bakterinin baş edemediği büyük molekülleri küçültebilir. Gelecekte, her kirletici veya ortam türü için en uygun mikroorganizma

kombinasyonunu belirlemek üzere yapay zeka destekli modellemeler bile kullanılabilir.

3. Genetik ve Metabolik Mühendislik: Mantarların doğada var olan türleriyle sınırlı kalmak zorunda değiliz. Gelişen CRISPR/Cas9 gen düzenleme teknolojisi ve diğer moleküler biyoloji araçları sayesinde, mantarların metabolik yollarını daha verimli hale getirmek veya yeni yetiler kazandırmak ufukta belirmektedir. Örneğin, bir beyaz çürük mantarın lakkaz gen sayısını artırıp daha fazla enzim üretmesini sağlamak; ya da bir endüstriyel maya cinsine (ör. *Yarrowia lipolytica*) lignin peroksidaz aktivitesi kazandırmak mümkün olabilir. Böylece hızlı büyüyen bir organizmaya mantar enzim kabiliyeti eklenmiş olur. 2020’lerde yayınlanan bazı çalışmalarda, mantar denitrifikasyonunda rol oynayan genlerin belirlenip fazla ifade ettirilmesiyle (overexpression) denitrifikasyon hızının arttığı gösterilmiştir (Serag et al., 2025). Bu tür manipülasyonlar, mantarların verim sorununa çözüm getirebilir. Elbette GDO (genetiği değiştirilmiş organizma) kullanımı regülasyon gerektirir; ancak kapalı reaktör sistemlerinde bu daha yönetilebilir olabilir. Ayrıca sentetik biyoloji ile tamamen yeni “tasarım organizmalar” oluşturmak da bir ihtimaldir: Örneğin mantar ve bakteriden gelen enzimleri tek bir şasi hücrede toplayarak “her şeyi yiyen” bir mikrop geliştirme hayali vardır. Bu şu an teorik görünse de, ilerleyen on yıllarda mümkün olabilir.

4. Ölçek ve Uygulama Alanı Genişlemesi: Mantar teknolojileri küçük pilotlardan öğrenildikçe, ölçek büyümesi kaçınılmaz olacaktır. Gelecekte, bir belediye atık su arıtma tesisinin tüm çıkış debisini (örneğin saniyede 500 litre gibi) işlemiden geçirebilecek mantar tabanlı ileri arıtma üniteleri tasarlanabilir. Hatta atık suyun deşarj noktasına

yakın doğal alanlarda (yapay sulakalan gibi) mantarların desteklediği sistemler kurulabilir. Aynı şekilde, petrol sızıntıları için mikoremediasyon şu an daha çok ufak çaplı uygulanıyor; ileride büyük bir petrol kaza sahasında (örneğin bir tanker sızıntısında kıyı şeridinde) mantar uygulamalarının kitlesel olarak devreye girdiğini görebiliriz. Bu kapsamda, dronlar ve otomasyon da devreye girebilir: Örneğin dronlar aracılığıyla ulaşılması zor petrol sızıntı bölgelerine mantar sporları ve besin maddeleri püskürtülebilir. Ya da insansız araçlarla bataklık benzeri alanlara mantar miselyum dozlanabilir. Bir diğer potansiyel, acil müdahale kitleri geliştirilmesidir. Nasıl ki kimyasal döküntülerde absorban kullanılır, belki mantar sporları içeren paketler de kaza durumlarında serpilerek ilk etapta kirliliği yatıştırmak üzere kullanılabilir. Bu tabii spesifik koşullar ister (mantarın hızla faaliyete geçebileceği ortam gibi) ama üzerine düşünülmektedir.

5. Ekonomik Entegrasyon ve Yan Ürün Değerlendirmesi:

Gelecekte mantar bazlı proseslerin ekonomik çekiciliğini artırmak için entegre yaklaşımlar geliştirilebilir. Örneğin mantarların arıtma yaptığı bir prosesin çıktısı olarak elde edilen mantar biyokütlesi, başka bir amaçla kullanılabilir. Bu biyokütle eğer zararlı maddelerle yüklenmemişse, hayvan yemi, kompost katkısı veya biyogaz üretimi girdisi olabilir. Hatta bazı mantar türlerinin meyve gövdeleri (mantarın kendisi) yenilebilir veya tıbbi değere sahip olabilir. Böyle durumlarda bir atık arıtım süreci yan ürün olarak gelir de getirebilir. Örneğin *Pleurotus ostreatus* ile petrol arıtılan bir toprak projesinde, hasat edilen mantarların kimyasal analizinde yenilebilecek düzeyde temiz olduğu saptanırsa, bu mantarlar pazarlanabilir (gerçi bu spekülatif bir örnek;

genelde kirlilik altındaki mantarı yeme riskine girilmez). Daha pratik bir yan ürün, mantarların oluşturduğu enzimlerin ekstrakte edilerek satılması olabilir. Yani bir kompost yığnında mantar ile atık arıtımı yaparken, kompost sızıntı suyundan lakkaz enzimi toplayıp endüstriyel enzim pazarına satmak gibi bir senaryo mümkündür.

6. Farkındalık ve Eğitim: Teknik konuların yanı sıra, gelecek perspektifinde toplumsal farkındalık boyutuna da değinmek gerekir. Mantarlar genelde halk arasında marjinal veya gizemli bir grup organizma olarak görülür. Onların çevre temizliğinde kullanılabileceği fikrinin yaygınlaşması, eğitim ve tanıtım çabalarına bağlıdır. Gelecekte, “biyoremediasyon bahçeleri” gibi konseptlerle hem farkındalık yaratıp hem de kentsel kirleticileri azaltan sistemler kurulabilir. Örneğin belediyelerin parklarında, kirli su yollarını temizlemek için mycofiltration düzenekleri kurması ve bunun eğitim panolarıyla halka anlatılması gibi. Bu, teknolojiye toplumsal kabulü artıracaktır.

7. Politikalar ve Teşvikler: Çevre mevzuatları eğer mantar teknolojilerinin önünü açacak şekilde güncellenirse, yaygınlaşmaları hızlanacaktır. Örneğin atık su arıtma tesislerinde çıkan suda ilaç kalıntıları için yeni sınır değerler getirilirse (ki AB’de bu yönde adımlar vardır), tesis işletmecileri bu standartları sağlamak için mantar gibi yeni yöntemlere yönelebilir. Devlet destekli AR-GE programları, pilot tesis fonlamaları vb. de kritik önemdedir. 2025 sonrası çevre politikalarında doğa-temelli çözümlere (nature-based solutions) vurgunun arttığını görüyoruz. Mantarlar, doğa-temelli çözümlerin bir parçası olarak kabul görmeye başlamıştır. Bu trend devam ederse, ileride yeşil altyapı planlarında mantarlar kendine yer bulabilir.

Tüm bu öngörüler ışığında, mantarların çevre mühendisliğinde kullanımının önünde parlak bir ufuk belirmektedir. Mevcut bilgi birikimi ve teknolojik gelişmeler, mantar tabanlı uygulamaların “niş” bir alternatif olmaktan çıkıp, belirli sorunlar için “tercih edilen” çözümler arasına girebileceğine işaret ediyor (Akpasi et al., 2023). Elbette bu, kademeli bir süreç olacaktır; bir gecede devrim beklenmemelidir. Ancak belki 2030'lara geldiğimizde, özellikle zorlu organik kirleticiler ve düşük konsantrasyonlu atıklar konusunda mantar proseslerinin standart mühendislik seçenekleri listesinde yer aldığını göreceğiz. Belki bir belediye ihalesinde “ileri arıtma (mantarlı sistem veya ozonlama)” gibi ibareler belirecek.

Özetle, geleceğin sürdürülebilir çevre yönetiminde mantarların rolü büyüyecektir. İnsanlık, doğanın bu usta ayrıştırıcılarını teknolojik ortaklar haline getirmenin eşiğindedir. Mantarların dünyasını ne kadar iyi anlarsak ve onlarla çalışma yöntemlerimizi ne kadar geliştirirsek, suyumuzu, toprağımızı o kadar etkili ve doğayla uyumlu bir şekilde temizleyebiliriz.

13. SON SÖZ

Bu kitap boyunca “Çevre Mühendisliğinde Mantarlar” konusunu çok yönlü bir biçimde ele alındı. Giriş bölümünden itibaren mantarların temel özelliklerini ve neden çevresel uygulamalarda cazip bir seçenek olduğunu gösterildi. Ardından, spesifik uygulama alanlarına dair altı çizilmesi gereken noktalar incelendi:

- Mantarlar, kalıcı organik kirleticiler (ör. DDT gibi pestisitler) üzerinde kısmi bozundurma kabiliyetine sahiptir. Beyaz çürük ve kahverengi çürük mantarlar DDT’yi parçalayabilir ancak tam mineralizasyonu sağlamak zordur; yine de mantar uygulamaları bu tür kirleticilerin toksisitesini azaltmada umut vadeder. 2010’lar ve sonrasında yapılan çalışmalar, DDT ile kirlenmiş topraklardan izole edilen yerel mantarların DDT’yi tolere edip metabolize edebildiğini göstererek, saha bazlı uygulamaların mümkün olabileceğini ortaya koymuştur (Russo et al., 2019).
- Tekstil boyalarının mantarlarla giderimi konusunda geniş kapsamlı araştırmalar bulunmakta ve laboratuvar ölçeğinde çok başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Mantarlar lakkaz, peroksidaz gibi enzimleriyle birçok sentetik boyayı renk giderimine uğratarak daha basit bileşiklere parçalayabilmektedir. Ancak henüz endüstriyel ölçekli bir mantar bazlı boya arıtımı uygulaması rapor edilmemiştir; temel kısıtlar optimum koşul gereksinimi ve süreç kontrol zorluklarıdır. Gelecekte immobilize mantar enzimlerine dayalı reaktörler bu alanda kullanılabilir.

- TNT ve diğer patlayıcı kalıntılarının mikobiyoremediasyonu, mantarların biyoteknolojik kullanımındaki en zorlu alanlardan biridir. Mantarlar TNT'yi tolere edebilmekte ve kimyasal yapısını değiştirebilmektedir; ancak tam parçalama genellikle gerçekleşmez ve önemli oranda humik benzeri bağlanmış artık kalır (Geris et al., 2024). Pilot uygulamalarda mantar destekli kompostlama ile TNT'li toprakların detoksifikasyonu başarıyla gösterilmiştir. Yine de, mantar yöntemleri şu an için patlayıcı kirliliğinde yan destek rolündedir; örneğin kimyasal-indirgeyici yöntemlerle birlikte entegre edilmektedir.
- Atıksularda azot (nitrata-amonyum) gideriminde mantarların kullanımı yenilikçi bir konsept olarak belirmiştir. Bazı mantarlar hem nitrifikasyon hem denitrifikasyon yapabilecek enzim setine sahiptir ve laboratuvar çalışmalarında yüksek oranda nitrat giderimi kaydedilmiştir. Henüz tam ölçekli bir uygulama olmasa da, mantarların bakterilere kıyasla daha basit şartlarda denitrifikasyon yapabileceği ve karma proses mühendisliğini sadeleştirebileceği öne sürülmektedir. Bu alan, ileri araştırmalara açıktır ve başarılı olursa atık su arıtımında paradigma değişimi yaratabilir.
- Entomopatojen mantarlar halihazırda tarım ve halk sağlığında kimyasal insektisitlere alternatif olarak kullanılmaktadır. *Beauveria*, *Metarhizium* gibi mantarların ticari biyopestisit formülasyonları mevcuttur ve çevreye dost zararlı kontrolü sağlamaktadır (Bamisile et al., 2021). Bu, mantarların çevre mühendisliğine dolaylı bir katkısıdır: Pestisit kaynaklı kirliliği ve ekolojik tahribatı azaltırlar. Yeni geliştirilen ürünler (örneğin spor

üretimi geciktirilmiş mantar formülasyonları) ile entomopatojen mantarların etkinliği ve kullanım alanı artmaktadır. Önümüzdeki dönemde, şehir zararlılarından tarla zararlılarına kadar geniş yelpazede mantar bazlı biyopestisitlerin pazar payını büyütmesi beklenir.

- Petrol ve hidrokarbon kirliliklerinin mikoremediasyonu, mantar uygulamaları içinde en pratik başarı öykülerine sahip alandır. Gerek Amazon yağmur ormanlarında gerek Kuzey Amerika’da yapılan pilot denemeler, mantarların (özellikle beyaz çürükçü *Pleurotus türlerinin*) petrol ile kirlenmiş toprakları büyük oranda temizleyebildiğini göstermiştir. Üstelik mantar uygulamaları temizlenen alanlarda ekolojik iyileşmeyi de beraberinde getirmiştir (bitki ve hayvanların geri gelmesi). Denizel ortamdaki petrol sızıntıları için dahi mantar tabanlı yaklaşımlar (miselyum yüklü yüzen bariyerler gibi) test edilmekte ve başarılı sonuçlar alınmaktadır. Mikoremediasyon, özellikle düşük maliyetli ve yerinde uygulama avantajıyla, petrol kirliliği ile mücadelede önemli bir alternatif haline gelmiştir.
- Ağır metal gideriminde mantarların rolü, belki organik kirleticiler kadar popüler olmasa da bir o kadar kritiktir. Mantarların hücre duvarları metal iyonlarını güçlü biçimde bağlayabilir (biyosorpsiyon) ve bazı mantarlar metal toleransı sayesinde yüksek konsantrasyonlarda büyüyüp metalleri biyokütlelerinde biriktirebilir (Serag et al., 2025). Yapılan çalışmalar, mantarlarla muamele edilen metal kirlilikli sediman ve suların bakterilerle yapılan muameleye göre daha yüksek metal uzaklaştırma verimi gösterdiğini ortaya koymuştur (Dell’anno et al., 2022). Bu,

mantarların ileride maden atık sularının arıtımı veya metal kirliliği rehabilitasyonunda kilit rol oynayabileceğini düşündürmektedir. Mantar temelli filtrasyon üniteleri veya kompostlama süreçleriyle ağır metal kirliliğinin azaltılması yönünde somut adımlar beklenmektedir.

- Plastik ve sentetik polimer atıkların biyobozundurulması, çağımızın en zorlu çevre sorunlarından biridir. Mantarlar bu alanda da araştırılmakta olup, özellikle poliüretan, polilaktik asit gibi bazı polimerlerde kaydadeğer bozunma sağladıkları gösterilmiştir (Vaksmaa et al., 2023). Polietilen gibi en dirençli plastiklerde ise mantarlar yavaş da olsa yapısal hasar oluşturarak malzemeyi zayıflatabilmektedir. Bu alanda mantarların yardımcı rol oynayacağı, örneğin geleneksel geri dönüşümle parçalara ayrılmış plastik artıklarını mikrobiyal olarak “mineralleştirme” süreçlerinde mantarların devreye girebileceği tahmin edilmektedir. Henüz pratik uygulamaya uzak olsa da, laboratuvar bulguları mantarların plastik kirliliğiyle mücadelede potansiyel bir aktör olduğunu ortaya koymuştur.
- Farmasötik ve kişisel bakım ürünü kirleticilerinin giderilmesi, modern atık sularda ortaya çıkan yeni bir gereksinimdir ve mantarlar bu konuda belki de en ümit verici biyolojik ajanlardır. Beyaz çürük mantarlar, ilaç etken maddelerini parçalayarak toksisitelerini azaltmada çok etkilidir (Vaksmaa et al., 2023). Hastane atık sularında ve arıtma tesisi çıkışlarında yapılan testler, mantar reaktörleri ile bir dizi farmasötik bileşiğin yüksek oranda giderilebildiğini göstermiştir (Vaksmaa et al., 2023). Bu, geleneksel arıtmanın erişemediği mikro kirleticileri yakalamak

için mantar tabanlı ileri arıtma süreçlerinin gündeme gelmesini sağlamıştır. Muhtemelen önümüzdeki birkaç yıl içinde pilot ölçekli mantar ileri arıtma üniteleri devreye alınacak ve başarılı olursa yaygınlaşacaktır.

Kitabın “Zorluklar” bölümünde tartışıldığı gibi, mantar uygulamalarının da kendine özgü sınırlılıkları vardır: Yavaş büyüme, diğer organizmalarla rekabet, süreç kontrol zorlukları, ara ürün oluşumu, ölçeklendirme belirsizlikleri ve ekonomik/lojistik engeller gibi. Ancak bu engeller, yapılan araştırmalarla giderek aşılmaktadır. Özellikle 2020 sonrası literatürde mantar biyoremediasyonunun hızını artırma, dayanıklılığını yükseltme ve entegrasyonunu kolaylaştırma yönünde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Mantarların enzimlerinin daha iyi anlaşılması, bu enzimlerin immobilize veya serbest halde kullanılmasıyla ilgili yenilikler, genetik iyileştirmeler ve proses optimizasyon çalışmaları, önceki bölümlerde vurgulanan birçok soruna çözüm getirmeyi hedeflemektedir (Akpasi et al., 2023).

Sonuç itibarıyla, mantarların çevre mühendisliğinde kullanımı bilimsel temelleri sağlam bir alan haline gelmiştir. Artık bu konsept “fütüristik bir fikir” olmaktan çıkmış, laboratuvarından sahaya geçiş sürecine girmiştir. Belirli uygulamalarda (örneğin toprak mikoremediasyonu, biyopestisitler) zaten fiilen kullanılmakta; diğer alanlarda ise (ör. atık su ileri arıtımı) pilot denemelerle pratik altyapı oluşturulmaktadır. Mantarlar, doğanın milyarlarca yıllık ayrıştırma becerisini insanlığın hizmetine sunan muazzam biyolojik araçlardır. Onları daha yakından tanıdıkça ve onlarla çalışma yöntemlerimizi geliştirdikçe, kimyasal ve fiziksel yöntemlerle çözmekte zorlandığımız

birçok çevre problemini mantarların yardımıyla çözebileceğimizi görmekteyiz.

Bu kitabın amacı, mantarların çevre mühendisliğindeki mevcut ve potansiyel rollerini kapsamlı bir şekilde ortaya koyarak, araştırmacılara, mühendislere ve karar vericilere yol gösterici bir kaynak sunmaktır. Anlatılanlar ışığında diyebiliriz ki: Mantarlar, çevre sorunlarına “doğal” bir çözüm yaklaşımıdır. Onlar karmaşık kirlilikleri basit bileşenlere ayırma konusunda ustadırlar; işimiz, bu ustalığı doğru yerde ve doğru biçimde uygulamaktır. Gelecekte daha temiz ve sağlıklı bir çevre için, mantarların yenilikçi uygulamalarının önemli bir payı olacağına dair inancımız tamdır. Bu alandaki çalışmalar ilerledikçe, doğanın bu mütevazı ama güçlü mucizelerinden daha çok fayda sağlayacağız. Unutmamak gerekir ki, çevre mühendisliğinin nihai hedefi insanlık ve doğa arasındaki dengeyi korumaktır; mantarlar da bu dengenin kilit aktörlerinden biri olmaya adaydır.

KAYNAKLAR

- Ahmad, J., Marsidi, N., Sheikh Abdullah, S. R., Hasan, H. A., Othman, A. R., Ismail, N. I., & Kurniawan, S. B. (2024). Integrating phytoremediation and mycoremediation with biosurfactant-producing fungi for hydrocarbon removal and the potential production of secondary resources. *Chemosphere*, 349, 140881. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2023.140881>
- Akpasi, S. O., Anekwe, I. M. S., Tetteh, E. K., Amune, U. O., Shoyiga, H. O., Mahlangu, T. P., & Kiambi, S. L. (2023). Mycoremediation as a Potentially Promising Technology: Current Status and Prospects—A Review. *Applied Sciences* 2023, Vol. 13, Page 4978, 13(8), 4978. <https://doi.org/10.3390/APP13084978>
- Antón-Herrero, R., Chicca, I., García-Delgado, C., Crognale, S., Lelli, D., Gargarello, R. M., Herrero, J., Fischer, A., Thannberger, L., Eymar, E., Petruccioli, M., & D'Annibale, A. (2023). Main Factors Determining the Scale-Up Effectiveness of Mycoremediation for the Decontamination of Aliphatic Hydrocarbons in Soil. *Journal of Fungi*, 9(12), 1205. <https://doi.org/10.3390/jof9121205>
- Asgher, M., Bhatti, H. N., Ashraf, M., & Legge, R. L. (2008). Recent developments in biodegradation of industrial pollutants by white rot fungi and their enzyme system. *Biodegradation*, 19(6), 771–783. <https://doi.org/10.1007/S10532-008-9185-3>
- Bamisile, B. S., Akutse, K. S., Siddiqui, J. A., & Xu, Y. (2021). Model Application of Entomopathogenic Fungi as Alternatives to Chemical Pesticides: Prospects, Challenges, and Insights for Next-Generation Sustainable Agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 12, 741804.

<https://doi.org/10.3389/FPLS.2021.741804>

Beltrán-Flores, E., Pla-Ferriol, M., Martínez-Alonso, M., Gaju, N., Blánquez, P., & Sarrà, M. (2022). Fungal bioremediation of agricultural wastewater in a long-term treatment: biomass stabilization by immobilization strategy. *Journal of Hazardous Materials*, 439, 129614. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2022.129614>

Bugg, T. D. H., Ahmad, M., Hardiman, E. M., & Singh, R. (2011). The emerging role for bacteria in lignin degradation and bio-product formation. *Current Opinion in Biotechnology*, 22(3), 394–400. <https://doi.org/10.1016/J.COPBIO.2010.10.009>

Bumpus, J. A., & Aust, S. D. (1987). Biodegradation of DDT [1,1,1-trichloro-2,2-bis(4-chlorophenyl)ethane] by the white rot fungus *Phanerochaete chrysosporium*. *Applied and Environmental Microbiology*, 53(9), 2001–2008. <https://doi.org/10.1128/AEM.53.9.2001-2008.1987>

Chakraborty, N., Begum, P., & Patel, B. K. (2022). Counterbalancing common explosive pollutants (TNT, RDX, and HMX) in the environment by microbial degradation. *Development in Wastewater Treatment Research and Processes: Microbial Degradation of Xenobiotics through Bacterial and Fungal Approach*, 263–310. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85839-7.00012-8>

Champagne, P. P., & Ramsay, J. A. (2010). Dye decolorization and detoxification by laccase immobilized on porous glass beads. *Bioresource Technology*, 101(7), 2230–2235. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2009.11.066>

Chaudhary, D. K., Bajagain, R., Jeong, S. W., & Kim, J. (2021). Effect of

- consortium bioaugmentation and biostimulation on remediation efficiency and bacterial diversity of diesel-contaminated aged soil. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 37(3), 1–12. <https://doi.org/10.1007/S11274-021-02999-3>
- Corredor, D., Duchicela, J., Flores, F. J., Maya, M., & Guerron, E. (2024). Review of Explosive Contamination and Bioremediation: Insights from Microbial and Bio-Omic Approaches. *Toxics*, 12(4), 249. <https://doi.org/10.3390/TOXICS12040249>
- Dasgupta, D., Barman, S., Sarkar, J., Mridha, D., Labrousse, P., Roychowdhury, T., Acharya, K., Sarkar, J., & Chakraborty, N. (2024). Mycoremediation of different wastewater toxicants and its prospects in developing value-added products: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 58, 104747. <https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2023.104747>
- Dell'anno, F., Rastelli, E., Buschi, E., Barone, G., Beolchini, F., & Dell'anno, A. (2022). Fungi Can Be More Effective Than Bacteria for the Bioremediation of Marine Sediments Highly Contaminated with Heavy Metals. *Microorganisms*, 10(5), 993. <https://doi.org/10.3390/MICROORGANISMS10050993>
- Deng, S., & Ting, Y. P. (2005). Polyethylenimine-Modified Fungal Biomass as a High-Capacity Biosorbent for Cr(VI) Anions: Sorption Capacity and Uptake Mechanisms. *Environmental Science & Technology*, 39(21), 8490–8496. <https://doi.org/10.1021/es050697u>
- Donnelly, K. C., Chen, J. C., Huebner, H. J., Brown, K. W., Autenrieth, R. L., & Bonner, J. S. (1997). Utility of four strains of white-rot fungi for the detoxification of 2,4,6-trinitrotoluene in liquid culture. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 16(6), 1105–1110.

<https://doi.org/10.1002/ETC.5620160603>

Durán, N., & Esposito, E. (2000). Potential applications of oxidative enzymes and phenoloxidase-like compounds in wastewater and soil treatment: a review. *Applied Catalysis B: Environmental*, 28(2), 83–99. [https://doi.org/10.1016/S0926-3373\(00\)00168-5](https://doi.org/10.1016/S0926-3373(00)00168-5)

Ebsa, G., Gizaw, B., & Alemu, T. (2024). Screening, characterization and optimization for synergistic interaction of potential dichlorodiphenyltrichloroethane degrading fungi isolated from agro-industrial effluent and farm soil. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 57, 103063. <https://doi.org/10.1016/J.BCAB.2024.103063>

Esteve-Núñez, A., Caballero, A., & Ramos, J. L. (2001). Biological Degradation of 2,4,6-Trinitrotoluene. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 65(3), 335–352. <https://doi.org/10.1128/MMBR.65.3.335-352.2001>

Fernando, T., Bumpus, J. A., & Aust, S. D. (1990). Biodegradation of TNT (2,4,6-trinitrotoluene) by *Phanerochaete chrysosporium*. *Applied and Environmental Microbiology*, 56(6), 1666–1771. <https://doi.org/10.1128/AEM.56.6.1666-1671.1990>

Ferreira, J. M., & Soares, F. E. de F. (2023). Entomopathogenic fungi hydrolytic enzymes: A new approach to biocontrol? *Journal of Natural Pesticide Research*, 3, 100020. <https://doi.org/10.1016/J.NAPER.2023.100020>

Flores, F. J., Mena, E., Granda, S., & Duchicela, J. (2025). Microbial Community Composition of Explosive-Contaminated Soils: A

- Metataxonomic Analysis. *Microorganisms*, 13(2), 453.
<https://doi.org/10.3390/MICROORGANISMS13020453>
- Gadd, G. M. (2007). Geomycology: biogeochemical transformations of rocks, minerals, metals and radionuclides by fungi, bioweathering and bioremediation. *Mycological Research*, 111(1), 3–49.
<https://doi.org/10.1016/j.mycres.2006.12.001>
- Geris, R., Malta, M., Soares, L. A., de Souza Neta, L. C., Pereira, N. S., Soares, M., Reis, V. da S., & Pereira, M. de G. (2024). A Review about the Mycoremediation of Soil Impacted by War-like Activities: Challenges and Gaps. *Journal of Fungi*, 10(2), 94.
<https://doi.org/10.3390/JOF10020094>
- Harms, H., Schlosser, D., & Wick, L. Y. (2011a). Untapped potential: exploiting fungi in bioremediation of hazardous chemicals. *Nature Reviews Microbiology*, 9(3), 177–192.
<https://doi.org/10.1038/nrmicro2519>
- Harms, H., Schlosser, D., & Wick, L. Y. (2011b). Untapped potential: exploiting fungi in bioremediation of hazardous chemicals. *Nature Reviews Microbiology* 2011 9:3, 9(3), 177–192.
<https://doi.org/10.1038/nrmicro2519>
- Huang, Y., & Wang, J. (2013). Degradation and mineralization of DDT by the ectomycorrhizal fungi, *Xerocomus chrysenteron*. *Chemosphere*, 92(7), 760–764. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2013.04.002>
- Karthik, V., Kumar, P. S., Harsha Vardhan, K., Saravanan, K., & Nithyakala, N. (2022). Adsorptive behaviour of surface tailored fungal biomass for the elimination of toxic dye from wastewater. *International Journal of*

- Environmental Analytical Chemistry*, 102(16), 4710–4725.
<https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1787400>
- Kim, H. Y., & Song, H. G. (2000). Comparison of 2,4,6-trinitrotoluene degradation by seven strains of white rot fungi. *Current Microbiology*, 41(5), 317–320. <https://doi.org/10.1007/S002840010142>
- Kowalska, A., & Biczak, R. (2025). Phytoremediation and Environmental Law: Harnessing Biomass and Microbes to Restore Soils and Advance Biofuel Innovation. *Energies* 2025, Vol. 18, Page 1860, 18(7), 1860. <https://doi.org/10.3390/EN18071860>
- Lupini, S., Peña-Bahamonde, J., Bonito, G., & Rodrigues, D. F. (2022). Effect of Endosymbiotic Bacteria on Fungal Resistance Toward Heavy Metals. *Frontiers in Microbiology*, 13, 822541. <https://doi.org/10.3389/FMICB.2022.822541>
- Mansouri, A., Cregut, M., Abbes, C., Durand, M. J., Landoulsi, A., & Thouand, G. (2017). The Environmental Issues of DDT Pollution and Bioremediation: a Multidisciplinary Review. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 181(1), 309–339. <https://doi.org/10.1007/S12010-016-2214-5>
- Marco Antonio, G. Z., Julieta, A. R. A., Esperanza, R. C., Baltazar, E. A. E., Gerardo, B., & Gerardo, D. G. (2018). Evaluation of *Ficus benjamina* wood chip-based fungal biofiltration for the treatment of Tequila vinasses. *Water Science and Technology*, 77(5), 1449–1459. <https://doi.org/10.2166/WST.2018.023>
- Mekonnen, B. A., Aragaw, T. A., & Genet, M. B. (2024). Bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil: a review on principles,

- degradation mechanisms, and advancements. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1354422. <https://doi.org/10.3389/FENVS.2024.1354422>
- Mnkandla, S. M., Mosoabisane, M. F. T., Basopo, N., & Otomo, P. V. (2024). Mycofiltration of Aqueous Iron (III) and Imidacloprid Solutions, and the Effects of the Filtrates on Selected Biomarkers of the Freshwater Snail *Helisoma duryi*. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 86(2), 187–197. <https://doi.org/10.1007/S00244-023-01049-3>
- Nyanhongo, G. S., Schroeder, M., Steiner, W., & Gübitz, G. M. (2005). Biodegradation of 2,4,6-trinitrotoluene (TNT): An enzymatic perspective. *Biocatalysis and Biotransformation*, 23(2), 53–69. <https://doi.org/10.1080/10242420500090169>
- Perkins, M. W., De, S., Frederick, L., & Dutta, S. K. (2005). Ligninolytic and Nonligninolytic mineralization of trinitrotoluene by several white rot basidiomycetes. *Bioremediation Journal*, 9(2), 77–85. <https://doi.org/10.1080/10889860500276391>
- Puchana-Rosero, M. J., Lima, E. C., Ortiz-Monsalve, S., Mella, B., da Costa, D., Poll, E., & Gutterres, M. (2017). Fungal biomass as biosorbent for the removal of Acid Blue 161 dye in aqueous solution. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(4), 4200–4209. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8153-4>
- Purnomo, A. S., Kamei, I., & Kondo, R. (2008). Degradation of 1,1,1-trichloro-2,2-bis (4-chlorophenyl) ethane (DDT) by brown-rot fungi. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 105(6), 614–621. <https://doi.org/10.1263/JBB.105.614>

- Rajhans, G., Barik, A., Sen, S. K., & Raut, S. (2021). Degradation of dyes by fungi: an insight into mycoremediation. *Biotechnologia*, 102(4), 445–455. <https://doi.org/10.5114/BTA.2021.111109>
- Refaey, M., Abdel-Azeem, A. M., Abo Nahas, H. H., Abdel-Azeem, M. A., & El-Saharty, A. A. (2021). *Role of Fungi in Bioremediation of Soil Contaminated with Heavy Metals*. 509–540. https://doi.org/10.1007/978-3-030-67561-5_16
- Rodríguez Couto, S., & Toca Herrera, J. L. (2006). Industrial and biotechnological applications of laccases: A review. *Biotechnology Advances*, 24(5), 500–513. <https://doi.org/10.1016/J.BIOTECHADV.2006.04.003>
- Rose, P. K., & Devi, R. (2018). Heavy metal tolerance and adaptability assessment of indigenous filamentous fungi isolated from industrial wastewater and sludge samples. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 7(4), 688–694. <https://doi.org/10.1016/J.BJBAS.2018.08.001>
- Roy, A., Gogoi, N., Haider, F. U., & Farooq, M. (2025). Mycoremediation for sustainable remediation of environmental pollutants. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 64, 103526. <https://doi.org/10.1016/J.BCAB.2025.103526>
- Russell, J. R., Huang, J., Anand, P., Kucera, K., Sandoval, A. G., Dantzler, K. W., Hickman, D. S., Jee, J., Kimovec, F. M., Koppstein, D., Marks, D. H., Mittermiller, P. A., Núñez, S. J., Santiago, M., Townes, M. A., Vishnevetsky, M., Williams, N. E., Vargas, M. P. N., Boulanger, L. A., ... Strobel, S. A. (2011). Biodegradation of polyester polyurethane by endophytic fungi. *Applied and Environmental Microbiology*, 77(17),

6076–6084. <https://doi.org/10.1128/AEM.00521-11/ASSET/3E608CC4-2167-4E37-BEFD-C8E50DE870E9>

Russo, F., Ceci, A., Pinzari, F., Siciliano, A., Guida, M., Malusà, E., Tartanus, M., Miszczak, A., Maggi, O., & Persiani, A. M. (2019). Bioremediation of dichlorodiphenyltrichloroethane (DDT)- contaminated agricultural soils: Potential of two autochthonous saprotrophic fungal strains. *Applied and Environmental Microbiology*, 85(21). <https://doi.org/10.1128/AEM.01720-19/ASSET/8555F956-6F5>

Sen, K., Llewellyn, M., Taheri, B., Turner, R. J., Berglund, T., & Maloney, K. (2023). Mechanism of fungal remediation of wetland water: *Stropharia rugosoannulata* as promising fungal species for the development of biofilters to remove clinically important pathogenic and antibiotic resistant bacteria in contaminated water. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1234586. <https://doi.org/10.3389/FMICB.2023.1234586>

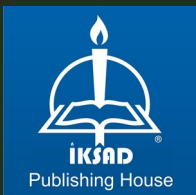
Serag, M. S., Mohesien, M. T., & Hasballah, A. F. (2025). Optimizing Wastewater Treatment Using Endophytic Fungi Isolated from *Acacia saligna* L. Bark. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 14(1), 1–11. <https://doi.org/10.1186/S43088-025-00605-1>

Shanmugam, S., Karthik, K., Veerabagu, U., Hari, A., Swaminathan, K., Al-Kheraif, A. A., & Whangchai, K. (2021). Bi-model cationic dye adsorption by native and surface-modified *Trichoderma asperellum* BPL MBT1 biomass: From fermentation waste to value-added biosorbent. *Chemosphere*, 277, 130311. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130311>

Sharuddin, S. S. N., Abdullah, S. R. S., Hasan, H. A., Othman, A. R., & Ismail, N. I. (2024). Rhizobacterial-assisted phytoremediation for accelerated

- petroleum-hydrocarbon removal in crude-oil sludge. *Science of The Total Environment*, 954, 176189.
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2024.176189>
- Singh, V. K., & Singh, R. (2024). Role of white rot fungi in sustainable remediation of heavy metals from the contaminated environment. *Mycology*, 15(4), 585–601.
<https://doi.org/10.1080/21501203.2024.2389290>
- Soares, G. M. B., Teresa, M., Amorim, P., Lageiro, M., & Costa-Ferreira, M. (2006). Pilot-scale Enzymatic Decolorization of Industrial Dyeing Process Wastewater. *Textile Research Journal*, 76(1), 4–11.
<https://doi.org/10.1177/0040517506053901>
- Spiker, J. K., Crawford, D. L., & Crawford, R. L. (1992). Influence of 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) concentration on the degradation of TNT in explosive-contaminated soils by the white rot fungus *Phanerochaete chrysosporium*. *Applied and Environmental Microbiology*, 58(9), 3199–3202. <https://doi.org/10.1128/AEM.58.9.3199-3202.1992>
- Strong, P. J., & Claus, H. (2011). Laccase: A review of its past and its future in bioremediation. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 41(4), 373–434.
<https://doi.org/10.1080/10643380902945706>
- Sun, Y., Su, J., Ali, A., Zhang, S., Zheng, Z., & Min, Y. (2022). Effect of fungal pellets on denitrifying bacteria at low carbon to nitrogen ratio: Nitrate removal, extracellular polymeric substances, and potential functions. *Science of The Total Environment*, 847, 157591.
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.157591>

- Thomas, J. E., & Gohil, H. (2011). Microcosm studies on the degradation of o,p'- and p,p'-DDT, DDE, and DDD in a muck soil. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 27(3), 619–625. <https://doi.org/10.1007/S11274-010-0497-1>
- Vaksmas, A., Guerrero-Cruz, S., Ghosh, P., Zeghal, E., Hernando-Morales, V., & Niemann, H. (2023). Role of fungi in bioremediation of emerging pollutants. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1070905. <https://doi.org/10.3389/FMARS.2023.1070905>
- Van Aken, B., Stahl, J. D., Naveau, H., Agathos, S. N., & Aust, S. D. (2000). Transformation of 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) reduction products by lignin peroxidase (H8) from the white-rot basidiomycete *Phanerochaete chrysosporium*. *Bioremediation Journal*, 4(2), 135–145. <https://doi.org/10.1080/10889860091114194>
- Wong, D. W. S. (2009). Structure and action mechanism of ligninolytic enzymes. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 157(2), 174–209. <https://doi.org/10.1007/S12010-008-8279-Z>



ISBN: 978-625-378-266-5