

Ağır Metallerle Bulaşık Topraklarda Endofitlerle Fitoremediasyon

Utku TUNALI¹, Bayram KANSU², Berna TUNALI^{3*}

¹Padova University, Schools of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine, Department of Agronomy Food, Natural Resources, Animals and Environment, Legnaro, ITALY

²Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, Samsun, TÜRKİYE

³Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bitki Koruma Bölümü, Samsun, TÜRKİYE

Geliş Tarihi/Received: 10.11.2024

Kabul Tarihi/Accepted: 27.02.2025

ORCID ID (Yazar sırasına göre / by author order)

 orcid.org/0000-0001-9037-8581  orcid.org/0000-0001-5663-0528  orcid.org/0000-0003-2798-0777

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: btunali@omu.edu.tr

Öz: Fitoremediasyon, bitkilerin; sudan, topraktan ve havadan kimyasalları çıkarma konusundaki doğal yeteneğine dayanmakta olup, uygulanması geleneksel arındırma teknolojilerinden çok daha ekonomiktir. Fitoremediasyonun etkisini artıran endofitler ise sağlıklı bitki dokularından elde edilen, konukçuda herhangi bir hastalık belirtisi göstermeyen ve bitki ile simbiyotik olarak yaşayan mikroorganizmalardır. Son zamanlarda yapılan çalışmalar birçok endofitin metale dirençli olduğunu ve bitki büyümesini arttırmak ve/veya organik maddeleri ayrıştırmak için fitoremediasyonda başarıyla kullanılabildiğini göstermiştir. Bitkiler kendi başlarına kök ve sürgünlerinde uranyum ve kurşun gibi metalleri biriktirme potansiyeli gösterse de endofitik bakteri konsorsiyumları metal alım kapasitesini daha da artırmaktadır. Çeşitli bitkilerden birçok siderofor üreten endofit varlığı rapor edilmiş; bunların, fakir ortamlarda bitki büyümesini arttırdığı bildirilmiştir. Sideroforum bir metale bağlanmasının, çözünebilir metal konsantrasyonunu arttırdığı belirlenmiştir. Ayrıca endofitler, metan ve karbondioksit gibi sera gazlarının biyoremediasyonuna da yardımcı olabilmektedir. Endofitik funguslardan özellikle *Neotyphodium coenophialum* ve *Neotyphodium uncinatum* bitkilerin rizosferinde ağır metal kirliliğine karşı başarı gösterdiği belirtilmiştir. Bu derlemenin amacı, günümüzün en önemli problemlerinden olan çevresel kirlilik nedeniyle bitkisel üretimin temel unsuru olan toprağın ağır metaller gibi kalıcılığı yüksek ve sürdürülebilir çevreyi sınırlandıran maddelerden fiteromediasyon olarak isimlendirilen yeni bir bakış açısı içinde özellikle endofit mikroorganizmalar marifetiyle kontrol edilebilmesine yönelik çalışmalarını özetlemek ve bilgiler vermektir.

Anahtar Kelimeler: Endofitik mikroorganizmalar, fitostabilizasyon, fitoekstraksiyon, fitovolatilizasyon, fitofiltrasyon

Phytoremediation with Endophytes in Heavy Metal Contaminated Soils

Abstract: Phytoremediation is based on the natural ability of plants to remove chemicals from water, soil and air and is much more economical to implement than conventional decontamination technologies. Endophytes, which enhance the effect of phytoremediation, are microorganisms obtained from healthy plant tissues, do not show any disease symptoms in the host and live symbiotically with the plant. Recent studies have shown that many endophytes are metal resistant and can be successfully used in phytoremediation to enhance plant growth and/or decompose organic matter. While plants on their own have the potential to accumulate metals such as uranium and lead in their roots and shoots, bacterial consortia further enhance metal uptake capacity. Many siderophore-producing endophytes have been reported from various plants and have been reported by researchers to enhance plant growth in poor environments. The binding of siderophore to a metal has been found to increase the soluble metal concentration. Endophytes can also help with the bioremediation of greenhouse gases such as methane and carbon dioxide. It has been reported that the endophytic fungi such as *Neotyphodium coenophialum* and *Neotyphodium uncinatum*, were successive to reducing of heavy metal pollution. The aim of this review is to summarize the studies and provide information about the control of the soil by endophytes, which is the basic element of plant production due to environmental pollution, which is one of the most important problems of today, from substances such as heavy metals that are highly persistent and limit the sustainable environment, within a new perspective called phytoremediation.

Keywords: Endophytic microorganisms, phytostabilization, phytoextraction, phytovolatilization, phytofiltration

1. Giriş

Sanayileşme ve kentleşmenin gelişmesiyle birlikte, ekosistemde ağır metal kirliliği son on yılda büyük ölçüde artmış ve bu durum dünya çapında önemli endişelere yol açmıştır. Ağır metaller herhangi bir biyolojik veya fiziksel süreçle parçalanamaz ve toprakta uzun süre kalıcı olur; bu da, çevre için uzun vadeli bir tehdit oluşturmaktadır (Suman ve ark., 2018; Ashraf ve ark., 2019). Bu nedenle, ağır metallerin karasal düzeyde, atmosferde ve su ortamlarında girişini önlemek ve kirlenmiş alanları azaltmak için iyileştirme tedbirlerinin alınması gerekmektedir (Gerhardt ve ark., 2017; Hasan ve ark., 2019).

Fitoremediasyon, bitkilerin sudan, topraktan ve havadan kimyasalları çıkarma konusundaki doğal yeteneğine dayanmakta olup, uygulanması geleneksel arıtma teknolojilerinden çok daha ekonomiktir (Khan ve Doty, 2011). Fitoremediasyon metaller, organikler, fazla besin maddeleri ve radyoaktif izotoplar veya radyoizotoplar olarak adlandırılan radyonüklidler dâhil olmak üzere çok çeşitli kimyasalların arıtılmasında kullanılmıştır. Metallerin ve diğer inorganik bileşiklerin fitoremediasyonu; fitoekstraksiyon, rizofiltrasyon, fitostabilizasyon ve fitovolatilizasyon gibi çeşitli şekillerde yapılabilmektedir (Glick, 2003, 2010).

Fitoremediasyonun başarısı, mevcut bitki biyokütlesinin miktarı ve bitki dokularındaki ağır metallerin konsantrasyonu ile belirlenir. Ağır metallerin yüksek miktarda kökten sürgüne taşınma sistemi, gelişmiş metal toleransı ile donatılmış olup, hiperakümülatörlere (ağır metallerce kirlenmiş alanların temizlenmesinde kullanılan bitkiler) yüksek detoksifikasyon potansiyeli sağlamaktadır. Hiperakümülatör özellik gösteren bitkilerin çoğunlukla “Brassicaceae, Asteraceae, Cyperaceae, Caryophyllaceae, Lamiaceae, Fabaceae, Violaceae, Poaceae ve Euphorbiaceae” gibi familyalara ait olduğu tespit edilmiştir (Öztürk, 2003; LeDuc, 2006; Özbolat ve Tuli, 2016).

Endofitler, sağlıklı bitki dokularından elde edilen, konukçuda herhangi bir hastalık belirtisi göstermeyen ve bitki ile simbiyotik olarak yaşayan mikroorganizmalardır. Endofitler üzerinde yapılan araştırmalar, endofitlerin abiyotik ve biyotik stres koşullarına karşı direnci arttırdığını bulmuştur. Ayrıca, son araştırmalar birçok endofitin metale dirençli olduğunu, bitki büyümesini artırdığını ve/veya organik kirlenici maddeleri parçalayabildiğini göstermiş olup, endofitlerin fitoremediasyonda başarıyla kullanıldığı bildirilmiştir (Chen ve ark., 2010; Luo ve ark., 2011; Shin ve ark., 2011).

Günümüzün en büyük problemlerinden biri olan çevresel kirlilik, pek çok farklı yol ve bileşenle insan yaşamı başta olmak üzere bitki ve hayvan popülasyonlarının yaşamını ve yayılımını tehlikeye sokmaktadır. Ağır metaller ile çevrenin kirlenmesi hem bölgesel hem de küresel düzeyde canlı yaşamını tehdit eden önemli bir sorundur. Ayrıca bu bileşikler ile bulaşan başta toprak olmak üzere flora ve fauna, gıda zinciri yoluyla insan sağlığı üzerinde önemli ölçüde olumsuz etki gösterebilmektedir. Ağır metal bileşikler, biyolojik parçalanması düşük, doku ve organlarda birikebilen ve besinler yoluyla biyolojik büyüme sürecine dahil olmaları yanında çok düşük seviyelerde bile tehlikeli olan maddelerdir (Gray, 2002; Wuana ve Okieimen, 2011; Kapahi ve Sachdeva, 2019). Bu özellikleri nedeniyle, fiteromediasyon gibi çevresel ve sürdürülebilir yöntemler ile ağır metal bileşiklerinin ekosistemin en önemli unsurlarından biri olan topraktan uzaklaştırılması ya da parçalanması önemli bir konudur. Günümüzde çevre dostu bir yaklaşım olarak üzerinde durulmaya başlanan fiteromediasyon yönteminde endofitlerin kullanımına yönelik uygulamalar, bunların sonuçları ve yapılan bilimsel çalışmalar, bu derleme makalenin temel amacını oluşturmaktadır.

2. Ağır Metallerin Bitkilerde Alınması ve Translokasyonu

Bitkilerde ağır metalin birikmesiyle ilgili ağır metal mobilizasyonu, kök alımı, ksilem yükleme, kökten gövdeye taşıma, hücrel bölümlendirme ve tecrit dâhil olmak üzere bir dizi süreç vardır. Ağır metaller çoğunlukla toprakta çözünmeyen formda bulunur ve bitkiler tarafından biyoyararlanımı yoktur. Bitkiler, rizosfer pH'sını değiştirebilen ve ağır metal çözünürlüğünü artırabilen çeşitli kök sızıntılarını serbest bırakarak biyoyararlanımlarını artırabilir (Dalvi ve Bhalerao, 2013).

3. Fitoremediasyon Sistemi

Ağır metal detoksifikasyonu fitoremediasyonun uygulanması için önemli bir ön koşuldur (Thakur ve ark., 2016). Genel olarak ağır metallerin toksisitesiyle başa çıkmak için bitkiler tarafından benimsenen iki savunma stratejisi vardır: Kaçınma ve tolerans. Bu iki mekanizma sayesinde bitkiler, ağır metallerin hücrel konsantrasyonlarını toksite eşik seviyelerinin altında tutmayı başarmaktadır (Hall, 2002).

Ağır metalle kirlenmiş toprakların ıslahı için uygulanabilir bir dizi fitoremediasyon stratejisi vardır; bunlar arasında (i) fitostabilizasyon, (ii) fitoekstraksiyon, (iii) fitovolatilizasyon ve (iv) fitofiltrasyon ile bitkilerin kullanımı yer alır.

3.1. Fitostabilizasyon

Bu yöntem ile bitkiler, kökler vasıtası ile ağır metalleri fiziksel ve kimyasal olarak sabitleyiciler (Berti ve Cunningham, 2000). Bu yöntem için ağır metallerle kirlenmiş topraklarda büyüyen ve toksik metalleri daha az toksik formlarına dönüştürebilmek için toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini değiştirebilen bitkilere ihtiyaç duyulmaktadır (Rizzi ve ark., 2004). Bitkilerin ve bakterilerin birlikte kullanımı, kirlenmiş toprakların iyileştirilmesi için umut verici bir yaklaşımdır. Bir çalışmada, uranyum (U) ve kurşun (Pb) ile kirlenmiş toprağın iyileştirilmesi için *Leptochloa fusca* (L.) ile ortaklaşa bakteriyel endofitlerin potansiyeli değerlendirilmiştir. *Leptochloa fusca* kirlenmiş toprakta vejetasyona tabi tutulmuş ve üç farklı endofitik bakteri suşu olan *Pantoea stewartii* ASI11, *Enterobacter* sp. HU38 ve *Microbacterium arborescens* HU33 ile hem tek tek hem de kombinasyon halinde aşılanmıştır. Bakteriyel aşılama, *L. fusca*'nın bitki büyümesini ve fitoremediasyon kapasitesini geliştirmiştir. Bu, bakteriyel aşılama yapılmayan bitkilere kıyasla U ve Pb ile kirlenmiş topraklarda kök uzunluğunda % 22-51, sürgün yüksekliğinde % 25-62, klorofil içeriğinde % 10-21 artış ve % 17-59 daha fazla bitki biyokütlesi şeklinde ortaya çıkmıştır. *Leptochloa fusca* bitkileri kendi başlarına kök ve sürgünlerinde U ve Pb biriktirme potansiyeli gösterse de bakteri konsorsiyumları metal alım kapasitesini U için % 53-88 ve Pb için % 58-97 oranında daha da artırmıştır. Sonuçların, *L. fusca* ve endofitik bakteri konsorsiyumlarının kombinasyonunun hem U hem de Pb ile kirlenmiş toprakların fitostabilizasyonu için etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir (Ahsan ve ark., 2017).

3.2. Fitoekstraksiyon

Ağır metalleri topraktan çıkarmak için bitkilerin kullanılması işlemidir. Bitki kökleri tarafından kirleticilerin alımı sonrasında toprak üstü organlarda biriktirilmesini takiben bitkilerin hasat edilerek yok edilmesini içermektedir. Bitkilerle ilişkili bakteriler, organik asit üretimi, şelatör salınımı veya redoks değişiklikleri yoluyla ağır metal ve besin maddelerinin çözünürlüğünü, kullanılabilirliğini ve taşınmasını değiştirerek fitoekstraksiyonu potansiyel olarak geliştirebilir (Li ve ark., 2012). Demir (Fe), birçok enzimatik reaksiyon için gerekli bir kofaktördür; bu nedenle, neredeyse tüm organizmalar için temel bir besin maddesidir. Aerobik koşullarda Fe ağırlıklı olarak ferrik halde (Fe^{3+}) bulunmaktadır. Sideroforlar, demiri kompleksleştirmek için yüksek birleşme sabitlerine sahip düşük moleküler kütleli Fe şelatörleridir (Miethke ve Marahiel, 2007). Şelatlar, demir azlığında etkili alımı artırmak için

minerallerden veya organik bileşiklerden demiri çözündürücü maddeler olarak işlev görmektedir. Demirin yanı sıra sideroforlar, alüminyum (Al), kadmiyum (Cd), bakır (Cu), galyum (Ga), indiyum (In), Pb ve çinko (Zn) gibi diğer metallerle de kararlı kompleksler oluşturabilir. Sideroforun bir metale bağlanması, çözünabilir metal konsantrasyonunu artırır (Rajkumar ve ark., 2010). Çeşitli bitkilerden birçok siderofor üreten endofit varlığı rapor edilmiş olup, bunların fakir ortamlarda endofitin bitki büyümesini artırdığı araştırmacılarca bildirilmiştir (Idris ve ark., 2004; Barzanti ve ark., 2007; Sheng ve ark., 2008; Chen ve ark., 2010; Ma ve ark., 2011; Shin ve ark., 2011; Zhang ve ark., 2011).

3.3. Fitovolatilizasyon

Toprakta ağır metali absorbe etmek ve uçucu bileşikler olarak atmosfere salmak için bitkilerin kullanılması durumudur. Bitkisel buharlaştırma olayı, organik kirleticiler ve ağır metal içeren suyun büyük bir miktarını kökler vasıtası ile bünyesine alan ağaçlarda meydana gelir. Fitovolatilizasyon yöntemi ile bitkiler tarafından tutulan kirleticiler daha az uçucu formlara dönüştürülerek transpirasyon yolu ile doğaya salınmaktadır. Civa (Hg) ve selenyum (Se) gibi bazı ağır metaller çevrede gaz halinde bulunabilmektedir (Chandra ve ark., 2015). Bitki büyümesini destekleyen endofit *Stenotrophomonas maltophilia* ve *Agrobacterium* spp. ile birlikte bitkiler, başlangıçtaki arsenik (As) miktarının (20 mg L^{-1}) yaklaşık % 75'ini uçurabilmektedir. Yapılan incelemelerde, arseniğin yaklaşık % 25'inin kumda kaldığı ve sadece yaklaşık % 0.15'inin bitkide biriktiği bildirilmiştir (Guarino ve ark., 2020). Yapılan bir başka çalışma, mono ve dimetillenmiş veya inorganik formdan uçucu trimetillenmiş As türevlerinin metilasyonunda bitkinin herhangi bir dahli olmadığını, ancak bu uçucu türlerin bitki kökleri tarafından topraktan alındığının kanıtlandığı bildirilmektedir (Jia ve ark., 2012).

3.4. Fitofiltrasyon

Yer altı suyundan ve sulu atıklardan ağır metal iyonlarını absorbe etmek veya adsorbe etmek için hidroponik olarak kültür bitkileri kullanmak fitofiltrasyon olarak adlandırılmaktadır (Salt ve ark., 1998; Marques ve ark., 2009). Diğer fitoremediasyon stratejileri arasında organik kirleticilerin parçalanması için kullanılan fitodegradasyon ve rizodegradasyon da yer almaktadır. Endofitik bakterilerin polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH'lar), uçucu ve monosiklik organik bileşikler ve pestisitler gibi çeşitli organik bileşik sınıflarını bozduğu, yani degrades ettiği bilinmektedir. Ayrıca metan

ve karbondioksit gibi sera gazlarının biyoremediasyonuna da yardımcı olabildikleri bildirilmiştir (Chlebek ve Hupert-Kocurek, 2019). Farklı endofitik bakteri suşları ile yapılan bir çalışmada, *Rhodococcus erythropolis* 5WK ve *Rhizobium* sp. 10WK, hem tek tek hem de kombinasyon halinde uygulanmıştır. Aşılama yöntemine bağlı olarak, petrol hidrokarbonu (PHC) parçalanma potansiyeli önemli ölçüde farklı olmuştur. En yüksek PHC giderimi, çavdar karyopslarının her iki bakteri suşundan oluşan bir konsorsiyum ile ön aşılamasından sonra elde edilmiştir. Ayrıca, her iki suş da kirli toprakta yerleşmiş ve *Lolium perenne*'nin kök ve sürgünlerinde kolonize olabildiği bildirilmiştir (Pawlik ve ark., 2020).

4. Endofitler ve Bitki Etkileşimi

Endofitik mikroorganizmalar (bakteri ve funguslar dâhil) bitki dokusu içinde çoğalabildiğinden, konukçuları ile yakın etkileşime girme olasılıkları yüksektir. Bundan dolayı besin maddeleri için daha az rekabetle karşı karşıya kalırlar ve rizosfer ve filozfer ortamlarındaki olumsuz değişikliklerden daha az etkilenmektedir. Bitki köklerindeki mikrobiyom, rizosferdeki mikrobiyomdan önemli ölçüde farklılık gösterebilir (Gaiero ve ark., 2013; Kristin ve Miranda, 2013).

Endofit içeren bitkiler, özellikle düşük gübreleme ve sulama koşullarında bile nispeten güçlü büyüme eğilimi göstermektedir. Bazı araştırmalar, endofit içeren bitkilerin hem daha güçlü toprak üstü aksamına, hem de güçlü bir kök sistemine sahip olduğunu; kuraklığa daha dayanıklı, yabancı otlara karşı daha rekabetçi, az ve sık biçmeye daha dayanıklı ve genellikle daha uzun ömürlü olduğunu göstermiştir (Arachevaleta ve ark., 1989; Funk ve ark., 1993; Latch, 1993).

Bitki-endofit simbiyozunda endofitler karbonhidratları bitkilerden alır; karşılığında bitkilerin biyotik ve abiyotik streslere karşı direncini artırabilir (Hamilton ve ark., 2012; Hamilton ve Bauerle, 2012). Örneğin, endofitik funguslardan *Phomopsis liquidambari*'nin, topraktaki bitkilerin ve mikroorganizmaların büyümesi üzerinde olumsuz etkileri olan, ayrışan yapraklar tarafından salınan fenolik asit allelokimyasallarını parçalayacak enzimler üretebildiği, dolayısıyla ekolojik baskının etkilerini potansiyel olarak hafifletebildiği bulunmuştur (Chen ve ark., 2011). Bir diğer örnek ise topraktaki serbest nitrojeni sabitleyerek bitki büyümesine yardımcı olan *Rhizobium* bakterileridir.

Endofit organizmalar geniş takson yelpazesi içinde yer almakta ve mikroorganizmalardan bakteriler ve onlara *Arthrobacter* de dâhildir.

Bakterilerden, *Bacillus*, *Clostridium*, *Curvobacterium*, *Enterobacter*, *Leifsonia*, *Mikrobakteri*, *Paenibacillus*, *Pseudomonas*, *Xanthomonadaceae*, *Stafilokoklar*, *Stenotrophomonas* ve *Sanguibacte* ile funguslardan *Microsphaeropsis*, *Mucor*, *Phoma*, *Alternaria*, *Peyronellaea*, *Steganosporium* ve *Aspergillus* başlıcaları olarak sayılabilir. Li ve ark. (2012), izolatların farklı özelliklere sahip olduğunu öne sürmekte, farklı konsantrasyonlarda ağır maddeler içeren bitki dokularında metallerle karşı mikroorganizmaların uzun süreli adaptasyonu nedeniyle metal toleransları değiştiğini ortaya koymuşlardır. Ayrıca, son zamanlarda yapılan çalışmalar birçok endofitin metale dirençli olduğunu (Rajkumar ve ark., 2013) ve bitki büyümesini arttırmak ve/veya organik maddeleri ayrıştırmak için ve fitoremediasyonda başarıyla kullanılabildiğini bildirmektedir (Read ve Perez-Moreno, 2003; Li ve ark., 2012; Feng ve ark., 2017).

Araştırmalar, endofitlerin özellikle kuraklık, azot eksikliği, tuzluluk ve metal fitotoksitesine maruz kalma gibi aşırı koşullar altında bitki performansını artırdığını göstermiştir. Endofit aşılması, bitki büyümesini teşvik etme potansiyeli göstermiş; kirlenmiş ve doğal olarak metal bakımından zengin topraklardan kaynaklanan stresleri azalttığı bildirilmiştir (Durand ve ark., 2021).

5. Organik Kirleticileri Parçalayan Endofitlerin Çeşitliliği

Çoğu organik kirletici madde fitotoksik olup, bitkiler ototrofik olduğundan yalnızca bitkiler tarafından parçalanmaktadır. Çeşitli organik kirleticiler sorunu endofitlerle etkileşim yoluyla parçalanarak bir dereceye kadar çözülebilir. Örneğin, Yousaf ve ark. (2010) tarafından İtalyan çimi (*Lolium multiflorum* var. *taurus*)'nde ve gazal boynuzu (*Lotus corniculatus* var. *leo*)'nda yüksek sayıda endofitik bakteri bulunduğunu tespit edilmiş ve izole edilen bakterilerin sadece yarısı bilinen alkan hidroksilaz genlerini (alkB ve sitokrom P153 benzeri) barındırdığı belirlenmiştir. Bozunmada görevli bu genler hem plazmidlerde hem de kromozomda bulunmuştur. Kirleticilerin etkili bir şekilde parçalanması için çok sayıda parçalayıcı bakterinin desteğinin gerekli olduğu rizodegradasyon için bitkilerin uygulanmasıyla ilgili olarak, İtalyan çimi, gazal boynuzundan daha uygun görünmektedir. Soleimani ve ark. (2010)'nın yaptığı çalışmada, endofitik funguslar (sırasıyla, *Neotyphodium coenophialum* ve *Neotyphodium uncinatum*) tarafından enfekte edilmiş (E+) ve edilmemiş (E-) iki çim türünün (*Festuca arundinacea* Schreb. ve *Festuca pratensis* Huds.)

petrolle kirlenmiş bir topraktaki petrol hidrokarbonlarının parçalanması üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bitkiler toprakta yedi ay boyunca yetiştirilmiş ve ekilmemiş toprak kontrol olarak kabul edilmiştir. Endofit enfeksiyonundan bağımsız olarak, bitkilerin rizosferindeki polisiklik aromatik hidrokarbonlar ve petrol hidrokarbonlarının giderimi sırasıyla % 80-84 ve % 64-72 iken, kontrollerdeki giderimler sırasıyla % 56 ve % 31'de kalmıştır. Ayrıca, endofitik organizmalarla enfekte olmuş bitkilerin petrolle kirlenmiş topraklardan petrol hidrokarbonlarının uzaklaştırılmasında daha etkili olabileceği sonucuna varılmıştır.

Benzer şekilde diğer trikloretilen gibi organik kirleticiler, naftalin, benzen, toluen, etil benzen ve ksilen (BTEX), katekol ve fenol gibi bozulabilir kirleticilerin fitotoksitesini azaltan endofitlerin aynı zamanda bitki büyümesini iyileştirdiği yapılan bazı çalışmalarda ortaya konulmuştur (Germaine ve ark., 2009; Ho ve ark., 2009; Weyens ve ark., 2010, 2011).

6. Fitoremediasyonda Endofitlerin Rolü

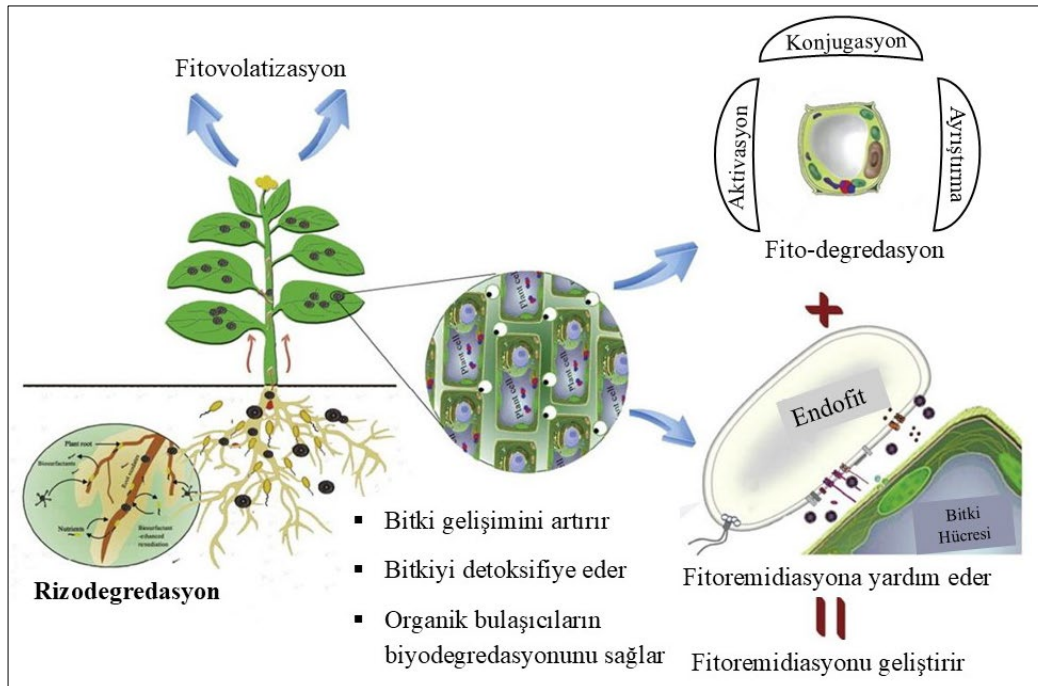
Endofitlerin konukçu bitkinin kirli ortamlara adaptasyonunda anahtar bir rol oynadığı ve topraktaki kirleticileri harekete geçirerek/bozundurarak veya hareketsiz hale getirerek, bitki büyümesini teşvik ederek,

fitotoksitesiteyi azaltarak ve bitkilerin metal toleransını geliştirerek fitoremediasyonu geliştirebildikleri gösterilmiştir (Germaine ve ark., 2009; Weyens ve ark., 2010; Chen ve ark., 2010; Zhang ve ark., 2011) (Şekil 1).

7. Endofitlerle Yapılan Diğer Bazı Çalışmalar

Neotyphodium endofitlerinin büyüme parametreleri ve Zn toleransı ve alımı üzerindeki etkisi iki çim türünde (*Festuca arundinacea* ve *Lolium perenne*) incelenmiştir. Bitkiler farklı Zn konsantrasyonları altında (kontrol, 200, 400, 800 ve 1800 mg kg⁻¹) saksı toprağında 5 ay boyunca yetiştirilmiştir. Sonuçlar, endofitle enfekte olmuş *Festuca* (FaEI) ve *Lolium*'da (LpEI) bitki kardeş sayısının, endofit içermeyen (EF) bitkilerle karşılaştırıldığında, sırasıyla % 85 ve % 51 daha fazla olduğunu gösterilmiştir. Ayrıca, endofit enfeksiyonu *Festuca*'da sürgünlere Zn transferini artırmış ve Zn taşıma indeksi (Tİ), enfekte *Festuca*'da endofit içermeyen *Festuca*'ya göre % 43.4 daha fazla bulunmuştur. Ancak ortamdaki yüksek Zn miktarları olduğunda endofit içeren *Lolium* bitkilerinde Zn alımının azaldığı gözlenmiştir (Zamani ve ark., 2015).

Bazı endofitlerin ağır metallerin bitkiler tarafından alımını azalttığına dair çalışmalar da



Şekil 1. Endofitik mikroorganizmaların ağır metaller ve organik bulaşıcıların fitoremediasyonu etkiler (Feng ve ark., 2017)

Figure 1. Endophytic microorganisms affect phytoremediation of heavy metals and organic contaminants (Feng et al., 2017)

bulunmaktadır. Bazı karşıt sonuçları olan araştırmalarda metale dirençli endofitlerin varlığının metal alımı ve birikimini azalttığı ortaya koymuştur. Örneğin, Lodewyckx ve ark. (2001) tarafından, azot sabitleyici ilişkiler oluşturan bir betaproteobakteri nikel (Ni) dirençli *Herbaspirillum seropedicae*'nin aşılmasının *Lolium perenne*'de köklerde ve sürgünlerde Ni konsantrasyonunda sırasıyla % 11 ve % 14 oranında önemli bir azalmaya yol açtığı bulunmuştur. Benzer şekilde Madhaiyan ve ark. (2007), bakteriyel endofitlerden *Metilobacterium oryzae* ve *Burkholderia* sp. ile aşılamanın Ni ve kadmiyumun domates bitkilerinin sürgünleri ve köklerinde alımı ve birikmesi azaltılmış; bakıra dirençli endofitik bakteri *Pantoea* sp. ile aşılama Gine otunda (*Megathyrus maximus*) Jp3-3 Cu emilimini önemli ölçüde azaltmıştır (Huo ve ark., 2012).

Başka bir araştırmaya göre bitkilere *Pseudomonas putida* aşılama, konukçu bitkinin naftalinin fitotoksik etkilerinden korunmasıyla sonuçlanmıştır. Aşılama bitkiler naftaline maruz bırakıldığında hem tohum çimlenmesi hem de bitki terleme oranları aşılama kontrolüne göre daha yüksek bulunmuştur. Bitkilerin bu suşla aşılama, yapay olarak kirlenmiş toprakta aşılama bitkilerle karşılaştırıldığında daha yüksek (% 40) naftalin olduğu ve bozunma oranlarının da *P. putida* aşılama bitkilerde kolaylaştığı belirlenmiştir (Germaine ve ark., 2009). Mastretta ve ark. (2009) *Nicotiana tabacum*'un kadmiyuma dirençli endofit *Sanguibacter* sp. ile aşılama sonucu Cd konsantrasyonunun sürgün dokularında arttırdığını belirlemişlerdir. Sheng ve ark. (2008) *Brassica napus*'un Pb dirençli endofit bakterilerle aşılama sürgünde Pb alımını arttırdığını saptamışlardır.

Ayrıca endofitik fungusların yaprakların çürümesiyle açığa çıkan fenolik asit allelokimyasalları *Phomopsis liquidambari* parçalamak için enzimler üretebilir. Topraktaki mikroorganizmalar ile bitkilerin büyümesi üzerinde olumsuz etkileri olan allelokimyasallar yoluyla ekolojik baskılamanın etkisi potansiyel olarak hafifletildiği gözlenmiştir (Chen ve ark., 2011).

Çinko ve Ni bitki büyümesi için çok önemli besin maddeleridir; ancak, yüksek konsantrasyonlarda bulunduklarında bitkilerde toksisiteye neden olabilmektedir. Yapılan bir çalışmada, *Viburnum grandiflorum*'dan bitki gelişimini teşvik eden endofitik bakterileri izole etme ve Zn ve Ni toksik toprakta tek başına ve kaya fosfatı ile birlikte bitki ve savunma teşvik potansiyeli değerlendirilmiştir. Çalışma için Zn, Ni, izole edilmiş endofitik *Bacillus mycoides* ve kaya fosfat kullanılarak on iki farklı işlem uygulanmış;

Ni, Zn ve kaya fosfat sırasıyla (100 mg kg⁻¹) ve (0.2 g kg⁻¹) oranlarında kullanılmıştır. Araştırmada Ni bitkiler için çinkodan daha toksik bulunmuş; ancak, *V. grandiflorum*'dan izole edilen endofitik bakterilerin buğday (*Triticum aestivum*) bitkilerinde Ni ve çinkonun toksik etkilerini azalttığı bildirilmiştir. Aynı araştırmada *Bacillus mycoides*'in etkisi, ağır metal toksisitesini teşvik eden ve bastıran kaya fosfat ile kombinasyon halinde daha belirgin olduğu ve *B. mycoides* ve kaya fosfat kombinasyonunun, bitki büyümesini iyileştirmek ve metal stresinin üstesinden gelmek için yararlı olabileceği araştırmacılarca ifade edilmiştir (Shahzad ve ark., 2024).

Liu ve ark. (2024) tarafından, endofitlerle desteklenen fitoremediasyon sistemleri üzerine birçok çalışma yapılmış olmasına rağmen, kirlenmiş doğal ortamlarda mikroorganizmalarla desteklenen fitoremediasyonu değerlendirmek ve geliştirmek için “gerçek” sonuçlar elde etmek amacıyla büyük ölçekli saha denemelerinin önemli olduğuna dikkat çekilmektedir.

8. Sonuçlar

Endofitlerle ilgili son dönemde artan araştırmalar hem bitki büyümesine katkıları hem de toprak kirliliğine etkileri açısından çevre dostu ve sürdürülebilir tarıma uygun olduklarını göstermiştir. Burada tartışılan çalışmalara dayanarak, endofit destekli fitoremediasyonun umut verici bir yöntem olduğu düşünülmektedir. Kirlenmiş bulaşık topraklarda endofitler, bitki gelişimini iyileştirebilir, besin alımını artırır, ağır metalleri harekete geçirir, fitotoksisiteyi azaltır, organik kirleticileri bozar; böylece, bitkilerdeki kirletici birikimini değiştirebileceği düşünülmektedir. Endofit destekli fitoremediasyon yönteminin olumlu yönlerine rağmen, hasat edilen bitkilerin yüksek düzeyde ağır metal içermesi, fitoremediasyon yönteminin geniş alanlar gerektirmesi, toksik etkiye sahip elementleri dönüştürse de onları geride bırakması gibi olumsuz etkileri bulunmaktadır.

Sonuç olarak bitkilerde metallerin alımı ve birikiminin endofitlerin varlığında artması veya azalması, temel olarak topraktaki metallerin konsantrasyonuna bağlıdır denilebilir. Bu konuda Türkiye’de de detaylı çalışmaların yapılmasının toprakta ağır metal birikiminin azaltılmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Etik Beyanı

Yazarlar, bu araştırma için etik onay gerektmediğini beyan etmektedir.

Finansman

Bu araştırma, hiçbir dış finansman almamıştır.

Yazarların Katkı Beyanı

Yazarlar; makaleye eşit katkıda bulunduklarını, makalenin yayına hazır son halini gördüklerini/okuduklarını ve onayladıklarını beyan ederler.

Çıkar Çatışması Beyanı

Tüm yazarlar, bu çalışma için herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Kaynaklar

- Ahsan, M.T., Najam-Ul-Haq, M., Idrees, M., Ullah, I., Afzal, M., 2017. Bacterial endophytes enhance phytostabilization in soils contaminated with uranium and lead. *International Journal of Phytoremediation*, 19: 937-946.
- Arachevaleta, M., Bacon, C.W., Hoveland, C.S., Radcliffe, D.E., 1989. Effect of the tall fescue endophyte on plant response to environmental stress. *Agronomy Journal*, 81: 83-90.
- Ashraf, S.S., Ali, Q., Zahir, Z.A., Ashraf, S.S., Asghar, H.N., 2019. Phytoremediation: Environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 174: 714-727.
- Barzanti, R., Ozino, F., Bazzicalupo, M., Gabbrielli, R., Galardi, F., Gonnelli, C., Mengoni, A., 2007. Isolation and characterization of endophytic bacteria from the nickel hyperaccumulator plant *Alyssum bertolonii*. *Microbial Ecology*, 53: 306-316.
- Berti, W.R., Cunningham, S.D., 2000. Phytostabilization of metals, phytoremediation of toxic metals. In: I. Raskin and B.D. Ensley (Eds.), *Using Plants to Clean-up the Environment*, New York, Wiley, pp.71-88.
- Chandra, R., Saxena, G., Kumar, V., 2015. Phytoremediation of environmental pollutants: An eco-sustainable green technology to environmental management. In: R. Chandra (Ed.), *Advances in Biodegradation and Bioremediation of Industrial Waste*, Boca Raton, CRC Press, pp. 1-30.
- Chen, L., Luo, S., Xiao, X., Guo, H., Chen, J., Wan, Y., Li, B., Xu, T., Xi, Q., Rao, C., Liu, C., Zeng, G., 2010. Application of plant growth-promoting endophytes (PGPE) isolated from *Solanum nigrum* L. for phytoextraction of Cd-polluted soils. *Applied Soil Ecology*, 46(3): 383-389.
- Chen, Y., Peng, Y., Dai, C., Ju, Q., 2011. Biodegradation of 4-hydroxybenzoic acid by *Phomopsis liquidambari*. *Applied Soil Ecology*, 51: 102-110.
- Chlebek, D., Hupert-Kocurek, K., 2019. Endophytic bacteria in the phytodegradation of persistent organic pollutants. *Advancements of Microbiology*, 58: 70-79.
- Dalvi, A.A., Bhalerao, S.A., 2013. Response of plants towards heavy metal toxicity: An overview of avoidance, tolerance and uptake mechanism. *Annual Plant Science*, 2(9): 362-368.
- Durand, A., Leglize, P., Benizri, E., 2021. Are endophytes essential partners for plants and what are the prospects for metal phytoremediation? *Plant Soil*, 460: 1-30.
- Feng, N.X., Yu, J., Zhao, H.M., Cheng, Y.T., Mo, C.H., Cai, Q.Y., Li, Y.W., Li, H., Wong, M.H., 2017. Efficient phytoremediation of organic contaminants in soils using plant-endophyte partnerships. *Science of the Total Environment*, 583: 352-368.
- Funk, C.R., White, R.H., Breen, J., 1993. Importance of Acremonium endophytes in turfgrass breeding and management. *Agriculture Ecosystem Environment*, 44(1-4): 215-232.
- Gaiero, J.R., McCall, C.A., Thompson, K.A., Day, N.J., Best, A.S., Dunfield, K.E., 2013. Inside the root microbiome: bacterial root endophytes and plant growth promotion. *American Journal of Botany*, 100(9): 1738-1750.
- Gerhardt, K.E., Gerwing, P.D., Greenberg, B.M., 2017. Opinion: Taking phytoremediation from proven technology to accepted practice. *Plant Science*, 256: 170-185.
- Germaine, K.J., Keogh, E., Ryan, D., Dowling, D.N., 2009. Bacterial endophyte-mediated naphthalene phytoprotection and phytoremediation. *Federation of European Microbiological Societies Microbiology Letters*, 296(2): 226-234.
- Glick, B.R., 2003. Phytoremediation: Synergistic use of plants and bacteria to clean up the environment. *Biotechnology Advances*, 21(5): 383-393.
- Glick, B.R., 2010. Using soil bacteria to facilitate phytoremediation. *Biotechnology Advances*, 28(3): 367-374.
- Gray, J.S., 2002. Biomagnification in marine systems: The perspective of an ecologist. *Marine Pollution Bulletin*, 45(1-12): 46-52.
- Guarino, F., Miranda, A., Castiglione, S., Cicatelli, A., 2020. Arsenic phytovolatilization and epigenetic modifications in arundo donax L. assisted by a PGPR consortium. *Chemosphere*, 251: 126310.
- Hall, J., 2002. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. *Journal of Experimental Botany*, 53(366): 1-11.
- Hamilton, C.E., Bauerle, T.L., 2012. A new currency for mutualism? Fungal endophytes alter antioxidant activity in hosts responding to drought. *Fungal Diversity*, 54: 39-49.
- Hamilton, C.E., Gundel, P.E., Helander, M., Saikkonen, K., 2012. Endophytic mediation of reactive oxygen species and antioxidant activity in plants: A review. *Fungal Diversity*, 54: 1-10.
- Hasan, M.M., Uddin, M.N., Ara-Sharmeen, F.I., Alharby, H., Alzahrani, Y., Hakeem, K.R., 2019. Assisting phytoremediation of heavy metals using chemical amendments. *Plants*, 8(9): 295.

- Ho, Y.-N., Shih, C.-H., Hsiao, S.-C., Huang, C.-C., 2009. EN-P43 A novel endophytic bacterium, *Achromobacter xylosoxidans*, helps plants against pollutant stress and improves phytoremediation (Section VI Environmental Biotechnology). *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 108(1): S94.
- Huo, W., Zhuang, C., Cao, Y., Pu, M., Yao, H., Lou, L., Cai, Q., 2012. Paclobutrazol and plant-growth promoting bacterial endophyte *Pantoea* sp. enhance copper tolerance of guinea grass (*Panicum maximum*) in hydroponic culture. *Acta Physiologiae Plantarum*, 34: 139-150.
- Idris, R., Trifonova, R., Puschenreiter, M., Wenzel, W.W., Sessitsch, A., 2004. Bacterial communities associated with flowering plants of the Ni hyperaccumulator *Thlaspi goesingense*. *Applied and Environmental Microbiology*, 70(5): 2667-2677.
- Jia, Y., Huang, H., Sun, G.-X., Zhao, F.-J., Zhu, Y.-G., 2012. Pathways and relative contributions to arsenic volatilization from rice plants and paddy soil. *Environmental Science & Technology Journal*, 46(15): 8090-8096.
- Kapahi, M., Sachdeva, S., 2019. Bioremediation options for heavy metal pollution. *Journal of Health and Pollution*, 9(24): 191203.
- Khan, Z., Doty, S., 2011. Endophyte-assisted phytoremediation. *Current Topics in Plant Biology*, 12: 97-105.
- Kristin, A., Miranda, H., 2013. The root microbiota-a fingerprint in the soil? *Plant Soil*, 370: 671-686.
- Latch, G.C.M., 1993. Physiological interactions of endophytic fungi and their hosts. Biotic stress tolerance imparted to grasses by endophytes. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 44(1-4): 143-156.
- LeDuc, D.L., Abdel-Samie, M., Montes-Bayon, M., Wenton, L.M., 2006. Overexpressing both ATP sulfurylase and selenocysteine methyltransferase enhances selenium phytoremediation traits in Indian mustard. *Environmental Pollution*, 144(1): 70-76.
- Li, H.-Y., Wei, D.-Q., Shen, M., Zhou, Z.-P., 2012. Endophytes and their role in phytoremediation. *Fungal Diversity*, 54: 11-18.
- Liu, L., Quan, S., Li, L., Lei, G., Li, S., Gong, T., Zhang, Z., Hu, Y., Yang, W., 2024. Endophytic bacteria improve bio- and phytoremediation of heavy metals. *Microorganisms*, 12(11): 2137.
- Lodewyckx, C., Taghavi, S., Mergeay, M., Vangronsveld, J., Clijsters, H., Lelie, D., 2001. The effect of recombinant heavy metal-resistant endophytic bacteria on heavy metal uptake by their host plant. *International Journal of Phytoremediation*, 3(2): 173-187.
- Luo, S., Chen, L., Chen, J., Xiao, X., Xu, T., Wan, Y., Rao, C., Liu, C., Liu, Y., Lai, C., Zeng, G., 2011. Analysis and characterization of cultivable heavy metal-resistant bacterial endophytes isolated from Cd hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. and their potential use for phytoremediation. *Chemosphere*, 85(7): 1130-1138.
- Ma, Y., Prasad, M.N.V., Rajkumar, M., Freitas, H.J.B.A., 2011. Plant growth promoting rhizobacteria and endophytes accelerate phytoremediation of metalliferous soils. *Biotechnology Advances*, 29(2): 248-258.
- Madhaiyan, M., Poonguzhali, S., Tongmin, S., 2007. Metal tolerating methylotrophic bacteria reduces nickel and cadmium toxicity and promotes plant growth of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.). *Chemosphere*, 69(2): 177-346.
- Marques, A.P., Rangel, A.O., Castro, P.M., 2009. Remediation of heavy metal contaminated soils: phytoremediation as a potentially promising clean-up technology. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 39(8): 622-654.
- Mastretta, C., Taghavi, S., Lelie, D., Mengoni, A., Galardi, F., Gonnelli, C., Barac, T., Boulet, J., Weyens, N., Vangronsveld, J., 2009. Endophytic bacteria from seeds of *Nicotiana tabacum* can reduce Cd phytotoxicity. *International Journal of Phytoremediation*, 11(3): 251-267.
- Miethke, M., Marahiel, M.A., 2007. Siderophore-based iron acquisition and pathogen control. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 71(3): 413-451.
- Özbolat, G., Tuli, A., 2016. Ağır metal toksisitesinin insan sağlığına etkileri. *Arşiv Kaynak Tarama Dergisi*, 25(4): 502-521.
- Öztürk, L., Karanlık, S., Özkutlu, F., Çakmak, İ., Kochian, L.V., 2003. Shoot biomass and Zinc/Cadmium uptake for hyperaccumulator and non-accumulator *Thlaspi* species in response to growth on a Zinc-deficient calcareous soil. *Plant Science*, 164(6): 1095-1101.
- Pawlik, M., Płociniczak, T., Thijs, S., Pintelon, I., Vangronsveld, J., Piotrowska-Seget, Z., 2020. Comparison of two inoculation methods of endophytic bacteria to enhance phytodegradation efficacy of an aged petroleum hydrocarbons polluted soil. *Agronomy*, 10(8): 1196.
- Rajkumar, M., Ae, N., Prasad, M.N.V., Freitas, H., 2010. Potential of siderophore-producing bacteria for improving heavy metal phytoextraction. *Trends Biotechnology*, 28(3): 142-149.
- Rajkumar, M., Prasad, M.N.V., Swaminathan, S., Freitas, H., 2013. Climate change driven plant-metal-microbe interactions. *Environment International*, 53: 74-86.
- Read, D.J., Perez-Moreno, J., 2003. Mycorrhizas and nutrient cycling in ecosystems-A journey towards relevance? *New Phytologist*, 157(3): 475-492.
- Rizzi, L., Petruzzelli, G., Poggio, G., Vigna Guidi, G., 2004. Soil physical changes and plant availability of Zn and Pb in a treatability test of phytostabilization. *Chemosphere*, 57(9): 1039-1046.
- Salt, D.E., Smith, R.D., Raskin, I., 1998. Phytoremediation. *Annual Review of Plant Biology*, 49(1): 643-668.
- Shahzad, A., Aslam, U., Ferdous, S., Qin, M., Siddique, A., Billah, M., Naeem, M., Mahmood, Z., Kayani, S., 2024. Combined effect of endophytic *Bacillus mycoides* and rock phosphate on the amelioration of

- heavy metal stress in wheat plants. *BMC Plant Biology*, 24(1): 125.
- Sheng, A.-F., Xia, J.-J., Jiang, C.-Y., He, L.-Y., Qian, M., 2008. Characterization of heavy metal-resistant endophytic bacteria from rape (*Brassica napus*) roots and their potential in promoting the growth and lead accumulation of rape. *Environmental Pollution*, 156(3): 1164-1170.
- Shin, M., Shim, J., You, Y., Myung, H., Bang, K., Cho, M., Kamala-Kannan, S., Oh, B., 2011. Characterization of lead resistant endophytic *Bacillus* sp. MN3-4 and its potential for promoting lead accumulation in metal hyperaccumulator *Alnus firma*. *Journal of Hazardous Materials*, 199: 314-320.
- Soleimani, M., Afyuni, M., Hajabbasi, M.A., Nourbakhsh, F., Sabzalian, M.R., Christensen, J.H., 2010. Phytoremediation of an aged petroleum contaminated soil using endophyte infected and non-infected grasses. *Chemosphere*, 81(9): 1084-1090.
- Suman, J., Uhlík, O., Viktorova, J., Macek, T., 2018. Phytoextraction of heavy metals: A promising tool for clean-up of polluted environment? *Frontiers in Plant Science*, 9: 1476.
- Thakur, S., Singh, L., Wahid, Z.A., Siddiqui, M.F., Atnaw, S.M., Din, M.F.M., 2016. Plant-driven removal of heavy metals from soil: Uptake, translocation, tolerance mechanism, challenges, and future perspectives. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188: 1-11.
- Weyens, N., Truyens, S., Dupae, J., Newman, L., Taghavi, S., Lelie, D., Carleer, R., Vangronsveld, J., 2010. Potential of the TCE degrading endophyte *Pseudomonas putida* W619-TCE to improve plant growth and reduce TCE phytotoxicity and evapotranspiration in poplar cuttings. *Environmental Pollution*, 158(9): 2915-2919.
- Weyens, N., Truyens, S., Saenen, E., Boulet, J., Dupae, J., Taghavi, S., Lelie, D., Carleer, R., Vangronsveld, J., 2011. Endophytes and their potential to deal with co-contamination of organic contaminants (toluene) and toxic metals (nickel) during phytoremediation. *International Journal of Phytoremediation*, 13(3): 244-255.
- Wuana, R.A., Okieimen, F.E., 2011. Heavy metals in contaminated soils: A review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. *International Scholarly Research Notices*, Article ID 402647.
- Yousaf, S., Andria, V., Reichenauer, T.G., Smalla, K., Sessitsch, A., 2010. Phylogenetic and functional diversity of alkane degrading bacteria associate with Italian ryegrass (*Lolium multiflorum*) and birdsfoot trefoil (*Lotus corniculatus*) in a petroleum oil-contaminated environment. *Journal of Hazardous Materials*, 184(1-3): 523-532.
- Zamani, N., Sabzalian, M.R., Khoshgoftarmanesh, A., Afyuni, M., 2015. Neotyphodium endophyte changes phytoextraction of zinc in *Festuca arundinacea* and *Lolium perenne*. *International Journal of Phytoremediation*, 17(5): 456-463.
- Zhang, Y., He, L., Chen, Z., Zhang, W., Wang, Q., Qian, M., Sheng, X., 2011. Characterization of lead-resistant and ACC deaminase-producing endophytic bacteria and their potential in promoting lead accumulation of rape. *Journal of Hazardous Materials*, 186(2-3): 1720-1725.

ALINTI: Tunali, U., Kansu, B., Tunali, B., 2025. Ağır Metallerle Bulaşık Topraklarda Endofitlerle Fitoremediasyon. *Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi*, 12(1): 101-109.

CITATION: Tunali, U., Kansu, B., Tunali, B., 2025. Phytoremediation with Endophytes in Heavy Metal Contaminated Soils. *Turkish Journal of Agricultural Research*, 12(1): 101-109. (In Turkish).