

Derleme/Review

## Biyoremediasyon ve Fungusların Biyoremediasyonda Kullanılması

Ali VURAL, Semra DEMİR\*, Gökhan BOYNO

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi. Ziraat Fakültesi. Bitki Koruma Bölümü, 65080 Van, Türkiye  
\*e-posta: semrademir@yyu.edu.tr

**Öz:** Çevre kirliliğine neden olan kirleticiler, artan nüfusun paralelinde gelişen sanayi ile birlikte hızlı bir artış kazanmıştır. Bu kirleticiler hem doğanın dengesini bozmakta hem de canlıların sağlığını olumsuz yönde etkilemektedir. Günümüzde bu kirleticilerin giderilmesi ilgili yapılan çalışmalarda biyoremediasyon önemli bir yer kazanmıştır. Biyoremediasyon, bu kirleticiler üzerinde çeşitli mikroorganizmaları kullanarak çevreye zararlı olmayan ürünlere dönüştürmek için uygun maliyetli ve çevre dostu bir yöntem olmaktadır. Özellikle de bu mikroorganizmalar arasında biyoremediasyonda kullanılan funguslar, salgıladıkları enzimler ve/veya miselli yapıları gibi özellikleri ile kirleticileri ayrıştırarak zararsız ürünlere dönüştürdüklerinden dolayı oldukça dikkat çekmiştir. Bu derlemede, biyoremediasyon ve fungusların farklı ve yeni metabolik kapasitelerini tanımlayan farklı yönleri ile biyoremediasyon potansiyelindeki rolünün ortak bir platformda bir araya getirilmesi amaçlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Biyoremediasyon, Çevre kirliliği, Funguslar, Kirleticiler

### Bioremediation and Using of Fungi in Bioremediation

**Abstract:** Pollutants causing environmental pollution have gained a rapid increase with the industry developing parallel to the increasing population. These pollutants both disrupt the balance of nature and affect the health of the living beings in the negative. At the present time, bioremediation has gained an important place in the studies related to the elimination of these pollutants. Bioremediation is an affordable and environmentally friendly method for converting pollutants into non-environmentally harmful products using various microorganisms. In particular, among these microorganisms, the fungi used in the bioremediation have attracted considerable attention because they decompose the pollutants into harmless products by their properties such as secreted enzymes and / or mycelia structures. In this review, it is aimed to bring together the different aspects of bioremediation and fungi that define different and new metabolic capacities and their role in bioremediation potential on a common platform.

**Keywords:** Bioremediation, Environmental pollution, Fungi, Pollutants

### Giriş

Hızlı, plansız kentleşme ve sanayileşme, hızla artan trafik, gerekli önlemler alınmadan işletilen madenlerin yanı sıra yanlış arazi kullanımı, tarım arazilerinde artan kimyasal gübre ve pestisit uygulamaları, toprak erozyonu vb. sorunlar dünya genelinde olduğu gibi ülkemizde de çevre kirliliğine neden olmaktadır (Akıncı ve ark. 2016). Ayrıca dünyada ve ülkemizde nüfusun günden güne hızlı artışına paralel olarak artan gıda, enerji, barınma v.s. ihtiyaçları, sanayi devrimine de hızlı bir ivme kazandırmıştır. Ancak bu hızlı yükseliş, direkt ve/veya indirekt olarak, uzun süreli çevre kirliliğine sebep olan büyük miktarlarda çeşitli organik ve inorganik kimyasalların üretimine neden olmuştur. Toprak kirliliğine neden olan bu kimyasallar endüstriyel aktivitelerin tipik bir yan etkisidir (Sabate ve ark. 2004). Ekosistem içinde toprak kirliliğinin yanı sıra çevresel kirliliğe de neden olan bu kimyasalların çok azı güvenli bir şekilde yok edilmektedir.

Organik antropojenik bileşikler arasında yer alan polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH), klorlu uçucu organik bileşikler (VOC) ve alkil benzen (benzen, toluen, etil benzen ve ksilenler, BTEX), hidrokarbonlar, poliklorlubifeniller (PCB) ve trikloroetilen (TCE) toprakta sıkça karşılaşılan kirleticiler arasındadır (Reible ve Demrenova 2002). Bu kirletici maddelerin yanı sıra, petrol endüstrisinin ve pazarının genişlemesiyle birlikte, araçların yakıt dolmuş boşaltım esnasında veya petrol taşıyan tankerlerde sızmalar, patlama sonucu petrol saçılması ve atık petrol ürünlerinin oluşması da çevre kirliliğine sebep olmaktadır (Adeniye ve Afolabi 2002). Ayrıca ağır metaller olarak adlandırılan periyodik cetvelin üçüncü ya da daha yüksek periyodundaki elementleri (Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Ni, Sn, Zn vb) içeren kirleticiler (Şener 2010), kalıcı olarak toprak üzerinde ya da içerisinde birikir (Akıncı ve ark. 2016).

Kirleticilerin topraklarda birikmesinin sadece toprak verimliliği ve ekosistem fonksiyonları üzerinde değil, aynı zamanda besin zinciri yoluyla hayvan ve insan sağlığı üzerinde de etkileri vardır (Kocaer ve Başkaya 2003).

Hem nüfus artışının hem de azalan su kaynaklarının beraberinde getirdiği, insanoğlunun yeni su kaynakları arayışı arasında en dikkat çeken çeşitli yollarla kirletilmiş suları arıtarak kullanmasıdır (Çakmakçı ve ark. 2017). Biyoteknoloji yöntemleri ile bugün dünyadaki birçok kent, bu kirletilmiş sularını temizlemek için mikroorganizmaları kullanmaktadır. Ayrıca organik kimyasal madde ya da kağıt ve fermentasyon ürünleri üreten birçok fabrikanın atıkları bu yöntemlerle temizlenmektedir. Bu nedenle biyoteknoloji uygulamaları kapsamında mikroorganizmaların kullanılması nedeniyle biyoremediasyonun rolü kirlilik yönteminde oldukça önem kazanmaktadır.

#### *Kirlilik Yönetiminde Biyoremediasyonun Rolü*

Biyoteknolojik yöntemlerin, endüstriye kazandırdığı en önemli iki kazanç, yenilenebilir kaynakların kullanımına olanak sağlaması ve endüstriyel atık miktarlarının azaltmasıdır (Berkem 1996; Stottmeister ve ark. 2005). Biyoteknolojik iyileştirme yöntemleri arasında yer alan biyoremediasyon metodu, verimli, ekonomik, çok yönlü ve çevreye duyarlı bir çözüm olarak kabul edilmiştir (Margesin ve Schinner 2001). Ayrıca sözkonusu bu yöntemin yakılma ve depolama gibi geleneksel yöntemlere göre de daha fazla avantajlar sunduğu ifade edilmektedir (Boopathy 2000).

Biyoremediasyon metodu, kirlenmiş toprak ve suların daha çevre dostu bir şekilde kirliliğinin giderimi için bitkiler, toprak solucanları, fungus ve bakteri gibi makro ve mikroorganizmaların kullanılması yöntemidir (Anonim 2015). Bu metot, tehlikeli maddeleri, zararsız veya daha az zararlı maddelere parçalamak için mikroorganizmaların kullanıldığı uzun süreli arıtım prosesleri olarak bilinmektedir (Scragg ve ark. 1999; Dua ve ark. 2002). Kirletilmiş alanlar da uygun mikroorganizmaların kullanılmasıyla, metabolizma haricinde çeşitli fiziksel ve kimyasal reaksiyonlar gerçekleştirir ve kirleticilerin parçalanması ve yok edilmesi ile sonuçlanır (Gillespie ve Philip 2013; Mishra ve ark. 2014).

Biyoremediasyon metodu, özellikle kirlenmiş kara ve su alanlarında doğal yollarla uygulayarak zehirli, bozulmayan bileşiklerin, toksik olmayan ürünlere verimli bir şekilde dönüştürülmesi nedeniyle çevre dostudur ve ayrıca ekonomik açıdan da karlıdır (Deshmukh ve ark. 2016). Bu metotla, trikloroeten ve bazı PCB'ler gibi klorlu türleri içeren ve parçalanmaya dirençli olacağı sanılan bazı kimyasalların *in vitro* koşullarında biyolojik olarak ayrışabildiği görülmüştür (Mohn 2004). Hatta metaller bile biyolojik olarak parçalanmasalar da mikroorganizmalar tarafından daha az zararlı hale dönüştürülebildikleri için biyoremediasyon metotları kapsamında değerlendirilmektedirler (Vidali 2001).

Ancak, biyoremediasyonun pek çok avantajlarının yanı sıra başlıca iki dezavantajı mevcuttur. Birincisi, funguslar, mayalar ve bakteriler biyoremediasyon uygulamalarında önemli rol oynayan mikroorganizmalardır (Frazar 2000; Strong ve Burgess 2008), fakat bu mikroorganizmaların sadece birkaçı organik bileşiklerin geniş kitlesine etki edebilmektedir. Şimdiye kadar tabiatta var olan kimyasalları büyük oranda yok etmek için her şeyi yiyebilen organizma bulunabilmiş değildir. İkincisi, biyoremediasyonun etkisini göstermek için uzun zamana ihtiyaç duymasıdır. İklim koşullarına da bağlı olarak biyoremediasyon metodu ile bir alanı iyileştirmek birkaç yıl ya da daha fazla sürmektedir (Chowdhury ve ark. 2012). Böyle bir sınırlamadan kurtulmak için bazı çözümler geliştirilmiştir. Bu çözümler; genetik manipulasyon tekniklerinin gelişmiş yeni ırklar elde etmek için kullanılması, belirli biyoremediasyon metotlarının biyokimyasal olarak kuvvetlendirilmesi ve en etkilisi ise biyoremediant popülasyonunun artışı olarak sayılabilir.

Biyoremediasyon metodunun etkili olabilmesi için, mikroorganizmaların kirletici maddelere enzimatik olarak saldırması ve onları zararsız ürünlere dönüştürmeleri gerekir. Kirletici maddeleri parçalayan mikroorganizmalar, kirletici maddelerle yakın ilişkide ve doğru yerde olmalıdırlar (Dindar ve ark. 2010). Ayrıca bu metod da kirletici maddeleri parçalayabilen ve onları toksik olmayan yan ürünlere dönüştüren mikroorganizmaların büyümelerinin teşvik edilmesi gerekir (Ceyhan ve Esmeray 2012). Eğer mikroorganizma popülasyonu mevcut değilse ya da mevcut popülasyon yetersizse, mikroorganizmaları kirletici maddelerle temas ettirmek için veya popülasyonlarını arttırmak için bazı mühendislik mekanizmaları geliştirilmelidir (Singh ve Ward 2004). Bu amaçla, kirletici maddelerin bulunduğu bölgeye besin aktarımı yapılarak mevcut popülasyonun desteklenebilir, toprağın mikroorganizma kompozisyonuna göre, doğal olarak toprakta bulunan mikroorganizmalar daha etkin duruma geçirilebilir ya da toprağa yeni mikroorganizma aktarılmasıyla popülasyonu artırılabilir (Ceyhan ve Esmeray 2012). Ayrıca çevresel koşullar kontrol edilmeli, mikroorganizmaların metabolik aktivitelerini ve büyümelerini optimize etmek için şartlar değiştirilmelidir. Biyoremediasyon uygulaması sırasında sıcaklık, besin elementleri (başta azot ve fosfor), elektron alıcılar (oksijen, nitrat ve sülfat) ve pH gibi çevresel faktörler düzenlenmelidir (Baker ve Herson 1994).

Son yıllarda, tehlikeli atık yönetiminde biyoremediasyon metodu oldukça önem kazanmıştır. Dünyadaki birçok kent, tehlikeli atık yönetimi kapsamında biyoremediasyon metodu ile mikroorganizmaları kullanmakta ve bu kentlerin sayısının gün geçtikçe artması da beklenmektedir. Örneğin ABD’de EPA tarafından biyoremediasyon projeleri planlanıp 100’den fazla bölgede uygulanmaktadır. Çevresel biyoteknoloji kapsamı altında yer alan biyoremediasyon metotları her geçen gün gelişmektedir ve gelecekte, nitelikli canlı organizmaları ve genetik mühendisliğini toksik maddelerin çevre üzerindeki yükünü de azaltmada kullanılacaktır. Artan toksik madde sayısı ile uygulanan biyoremediasyon tekniklerinin de artacağı umulmaktadır (Alexander 1999).

### *Biyoremediasyon Teknikleri*

Biyoremediasyon tekniklerinin önemli bir özelliği, çeşitli mikroorganizmaları içeren temiz olmayan açık ortamlarda gerçekleştirilmesidir (Huang ve ark. 2013; Sivakumar ve ark. 2012). Bu teknik, yerinde (in-situ) biyoremediasyon tekniği, uzaktan (ex-situ) biyoremediasyon tekniği (Boopathy 2000; de Lorenzo 2008; Lemming ve ark. 2009) ve kombine biyoremediasyon tekniği olmak üzere 3 ana sınıfta incelenir (Shukla ve ark. 2010).

### *Yerinde (in situ) Biyoremediasyon Tekniği*

Öncelikle yerinde biyoremediasyon teknikleri, biyolojik filtreler (Gómez-Silvn ve ark. 2010; Jing ve ark. 2012), biyolojik arttırma (Mrozik and Piotrowska-Seget 2010; Schauer-Gimenez ve ark. 2010) ve biyolojik uyarılma (McGlashan ve ark. 2012) konularını içermektedir.

Yerinde biyoremediasyon teknikleri bulaşık alanları temizlemek için iyi bir metottur. Çünkü nakil ücreti gerektirmez ve kimyasal kirleticileri elemine etmek için doğal mikroorganizmaları kullanır. Ancak yerinde biyoremediasyon teknikleri her zaman en iyi çözüm olmayabilir. Bu yöntem kum gibi az sıkı, mikroorganizmaların ve gübreleme materyallerinin hızlı yayılmasına izin veren topraklarda daha çok etkilidir. Katı, killi ve yoğun taşlı topraklar ile yoğun kirli yüzey sularında yerinde biyoremediasyon tekniklerine uygun olmayabilir ve kimyasal kirlenmelerde bu yöntemle arttırmaları yıllar alabilir (Thieman ve ark. 2013; Wu ve ark. 2014).

Yerinde biyoremediasyon teknikleri daha çok, dizel yakıt ve yoğun yağlar gibi halojen olmayan, yarı uçucu organiklerin giderilmesinde uygulanmaktadır (Dindar ve ark. 2010).

### *Uzaktan (ex -situ) Biyoremediasyon Tekniği*

Uzaktan biyoremediasyon tekniği kompostlama (Jorgensen ve ark. 2000; Peng ve ark. 2013), arazi düzeltme, biyolojik yığınlama (Antizar-Ladislao 2007; 2008) ve biyoreaktörleri (Wu ve ark. 2011 a, b; Yan ve ark. 2011; Wijekoon ve ark. 2013) kapsamaktadır. Bu teknikte, kirli toprakların taşınması veya kirli suların biyoremediasyon bölgesine pompalanması gerekir (Zeyauallah ve ark. 2009). Yani yerinde biyoremediasyon teknikleri, toprak veya yeraltı suları kazı yapılmadan yerinde işlem görürken, uzaktan biyoremediasyon tekniklerinde ise kazı yapıldıktan sonra taşınım söz konusudur (Shukla ve ark. 2010). Bu yönüyle uzaktan biyoremediasyon tekniği ekonomik yönden dezavantaja sahiptir.

Uzaktan biyoremediasyon uygulamasında steril edilecek toprağın tipine, miktarına ve kimyasalın çeşidine göre birçok farklı tekniği kapsamına rağmen en sık kullanılan teknik bulamaç fazlı biyoremediasyon tekniğidir (Thieman ve ark. 2013). Bulamaç fazlı biyoremediasyon tekniğinde, kirlenen toprak taşınır, topraktaki mikroorganizmaların kullanılmasıyla biyoayırıştırma gerçekleşir daha sonra biyoreaktörlerde su ve gübre karışımı şeklinde uygulanır. Ayrıca kirli sularda aktif çamur yöntemi uygulanarak sudaki organik maddelerin parçalanması sağlanır (Alexander 1999).

### *Kombine Biyoremediasyon Tekniği*

Tehlikeli atık alanları, hastane atıkları, radyoaktif atıklar, artım çamurlarının döktüğü alanlar gibi tehlikeli atıklar için önerilen bir tekniktir. Bu tehlikeli alanlar, kolay kolay bozulmayan, karmaşık ve inorganik bileşik karışımlarını içerir ve sadece kombine biyoremediasyon tekniği ile temizlenirler (Alexander 1999; Ceyhan ve Esmeray 2012).

### *Biyoremediasyon Sürecinde Yer Alan Organizmalar*

Biyoremediasyon tekniğinde bitkiler de rol oynamasına rağmen mikroorganizmalar en yüksek biyoremediasyon potansiyeline sahiptirler. Bu mikroorganizmalar ya kirleticilerin bulunduğu yerde doğal olarak bulunan ya da sonradan dışarıdan aktarılan, biyoremediasyon için kullanılan asıl ajanlardır (Prescott ve ark. 2002).

Fungus ve bakteriler gibi biyoremediasyonda kullanılan mikroorganizmalar doğal ve sentetik orijinli molekülleri ayrıştırır ve bozarlar. Ancak funguslar, enzim sistemleri ve miseliyal yapıları açısından biyoremediasyon tekniğinin amacına daha uygundurlar.

#### *Biyoremediasyonda Kullanılan Funguslar*

Biyoremediasyonda kullanılan funguslara ve salgıladıkları enzimlere, geniş spektrumlu birçok inatçı çevresel kirleticinin indirgenmesi, endüstriyel ve tarımsal sanayi atıklarının ayrıştırıp kullanılabilir ürünlere dönüştürülmesi yeteneğine sahip olmalarından dolayı mikoremediasyon adı verilir (Gadd 2001; Goltapeh ve ark. 2013; Kulshreshtha ve ark. 2014).

Funguslar ekstrem iklim koşulları dahil olmak üzere farklı iklim koşullarının topraklarında gelişebilirler ve havadaki sporların dağılması yoluyla da yayılabilirler, aynı zamanda ekosistem dengesinin korunmasına da yardımcı olurlar (Anastasi ve ark. 2013). Funguslar, morfolojileri ve çeşitli biyokimyasal kapasiteleri nedeniyle toprak ve su canlılarını da kapsayarak tüm ekosistemlerde ayrıştırıcı olarak önemli bir rol oynamaktadırlar (Deshmukh ve ark. 2016).

Fungusların biyolojik ayrıştırma faaliyetleri sonucunda, farklı ahşap türleri, depolanmış kağıt, tekstil, plastik, deri, elektrik izolasyonları ve çeşitli ambalaj malzemeleri gibi materyalleri yok etmekte, ekosistemde kalıcı ve oldukça toksik olan kirleticileri önemli ölçüde azaltabilen ve parçalayabilen doğal ayrıştırıcılar olarak da kullanılmaktadırlar (Çizelge 1) (Singh 2006).

Funguslar birçok biyoaktif bileşik üretmekle beraber, biyoremediasyon uygulamalarında daha çok fungal enzimler ön plana çıkmaktadır (Mougin ve ark. 2009). Çünkü çoğu fungus substrat özgüllüğüne sahip değildirler ve eksoenzimler olarak substrata salınırlar. Funguslar genellikle makromoleküllerin ekstrasellular bozulmalarını sağladıklarından, dış çevrelere daha yüksek oranlarda farklı enzimler üretir ve salgırlar (Kahraman ve Yeşilada 2001; Harms ve ark. 2011). Çeşitli substratları hücrelerinde absorbe edebilirler ve metabolize ederek küçük moleküllere ayrıştırırlar. Fungusların donanımlı bir enzimatik sisteme sahip olmaları, onlara tabiattaki sentetik substratlar gibi geniş aralıkta daha iyi gelişme kabiliyeti sağlar. Habitat çeşitliliği ve çok sayıda enzimi salgılama yeteneğinden dolayı funguslar, çeşitli alanlarda biyoremediasyon için oldukça önemli potansiyel adaylardır (Deshmukh ve ark. 2016). Enzim salgılama yeteneğinin yanında hifsel gelişimi de onlara problemin üstesinden gelme yeteneği verir. Miseliyal yapılarıyla, toprakta bulunan toksinleri besin zincirine girmeden önce tahrip ederek etkisiz hale getirirler (Stamets 2005).

Funguslar diğer mikroorganizmalar gibi toprağın canlı biyokütlesini oluşturmaktadırlar (Hoshino ve Morimoto 2008). Ancak yüksek üreme oranı, kompleks enzimatik ve salgı sistemleri ile zaman zaman diğer fiziksel ve/veya kimyasal remediasyon ajanlarının yerine de geçebilirler. Bunun yanısıra, fungusların biyokütlesi, hifsel yapısı ve daha uzun yaşam döngüsü nedeniyle kirli toprakların biyoremediasyonunda ve yüksek toksin konsantrasyonlarına karşı biyoremediasyonda rol oynayan bakterilere göre daha dayanıklıdırlar. Bu da onlara avantaj sağlamaktadır (Evans ve Hedger 2001; Singh ve ark. 2015). Ayrıca funguslar biyoremediasyonda kullanılan diğer mikroorganizmalara göre, daha kolay nakledilebilir, genetik olarak düzenlenebilir ve çoğaltılabilirler.

Çizelge 1. Biyoremediasyon potansiyeli olan funguslar (Deshmukh ve ark. 2016)

Bileşikler	Funguslar	Referanslar
POP'lar		
Poliklorlu bifeniller	<i>Doratomyces nanus</i> , <i>D. purpureofuscus</i> , <i>D. verrucisporus</i> , <i>Myceliophthora thermophila</i> , <i>Phoma eupyrena</i> , <i>Thermoascus crustaceus</i> ,	Mouhamadou ve ark. 2013
Poliklorlanmış dibenzofuranlar	<i>Aspergillus niger</i> White rot fungi, <i>Phanerochaete sordida</i>	Marco-Urrea ve ark. 2015 Wu ve ark. 2013 Turlo 2014
Fenilüre herbisit diuron Tekstil boyaları	<i>Mortierella</i> <i>Aspergillus niger</i> , <i>A. foetidus</i> , <i>T. viride</i> , <i>A. sojae</i> , <i>Geotrichum candidum</i> , Penicillium sp., <i>Pycnoporus cinnabarinus</i> , Trichoderma sp., White rot fungi, <i>Bjerkandera adusta</i> , <i>Ceriporia metamorphosa</i> , Ganoderma sp.	Ellegaard-Jensen ve ark. 2013 Jebapriya ve Gnanadoss 2013 Ma ve ark. 2014
Petrol ürünleri Ham Petrol	<i>A. niger</i> , <i>Rhizopus sp.</i> , Candida sp., Penicillium sp., Mucor sp.	Damisa ve ark. 2014
Benzin Değirmen atıkları	<i>Exophiala xenobiotica</i> <i>Rhizopus oryzae</i> , <i>Pleurotus sajor caju</i>	Isola ve ark. 2013 Duarte ve ark. 2013
Deri atıkları	<i>Aspergillus flavus</i> , Aspergillus sp. <i>A.niger</i> , <i>A. jegita</i>	Bennet ve ark. 2013
PAH Difenil eter	White rot fungi, <i>Pleurotus ostreatus</i> , <i>Trametes versicolor</i>	Wu ve ark. 2013 Rosales ve ark. 2013
Anthracene Naftalin	Armillaria sp. White rot fungi, <i>Pleurotus eryngii</i>	Hadibarata ve ark. 2013 Hadibarata ve ark. 2013
PPCP Kafeinler	<i>Chrysosporium keratinophilum</i> , <i>Gliocladium roseum</i> , <i>Fusarium solani</i> , <i>A. restrictus</i> , <i>Penicillium</i> , <i>Stemphylium</i>	Nayak ve ark. 2013
Sitalopram, Fluoksetin, Sulfametoksazol	<i>Bjerkandera sp. R1</i> <i>Bjerkandera adusta</i> , <i>Phanerochaete chrysosporium</i>	Rodarte-Morales ve ark. 2011
Fungisitler Metalaxyl ve Folpet	Gongronella sp., <i>R. stolonifer</i>	Martins ve ark. 2013
Pestisitler Klorlanmış hidrokarbonlar; Heptaklor	<i>P. ostreatus</i>	Purnomo et ve ark. 2013
Chloropyriphos Ağır metaller	<i>Aspergillus terreus</i> <i>Aspergillus</i> , <i>Curvularia</i> , <i>Acrimonium</i> , <i>Pythyme</i> <i>Aspergillus flavus</i>	Silambarasan ve Abraham 2013 Akhtar ve ark. 2013 Kurniati ve ark. 2014

### Beyaz Çürükçül Funguslar

Beyaz çürükçül fungusların, parçalanması zor olan lignin, klorlu aromatik ve alifatik hidrokarbonlar ile boyarmaddeler gibi birçok maddeyi salgıladıkları ekstrasellular enzim sistemleri sayesinde ayrıştırabilme kabiliyetleri vardır (Bumpus ve Aust 1985; Kapdan ve ark. 2000). Ayrıca endokrin bozucu kimyasallar (EDC), su organizmaları için akut ve kronik toksisite olan maddeler ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri ile sonuçlanabilecek ilaçlar ve kişisel bakım ürünleri (PPCP) gibi kirleticiler, beyaz çürükçül funguslar tarafından ayrıştırılmaktadır.

Beyaz çürükçül funguslar enzim salgılayıp ligninin sindirmesiyle oluşan hemiselüloz ve selülozu enerji kaynağı olarak kullanırlar (Winqvist 2014) ve isimlerini de hemiselüloz ve selülozdan dolayı kirleticilerin üzerinde ağartılmış, beyaz bir görünüm oluşturmalarından dolayı almışlardır.

Biyoremediasyonda en çok kullanılan beyaz çürükçül fungusları, *Phanerochaete chrysosporium*'un yanında *Coriolus versicolor* ve *Trametes versicolor*'dır (Demir ve ark. 2006), *Bjerkandera adusta* ve *Pleurotus* sp. fungusları da yapılan çalışmalarda biyoremediasyon ajanları olduğu kanıtlanmıştır (dos Santos Bazanella 2016). Ayrıca, *Lentinula edodes*, *Irpex lacteus*, *Agaricus bisporus* ve *Pleurotus tuber-regium* beyaz çürükçül fungusları da kalıcı ksenobiyotik bileşikleri ayrıştırabildiği bilinmektedir (Singh 2006; Adenipekun ve Lawal 2012).

Beyaz çürükçül funguslar, lakkazlar ve peroksidazlar gibi fenoloksidaz enzim sistemlerine sahiptirler (Reddy ve Mathew 2001; Anastasi ve ark. 2013). Lakkazlar, beyaz çürükçül funguslarının hemen hemen bütün türleri tarafından çeşitli derecelerde üretilmektedir (Baldrian 2006). Son zamanlarda pyrene (Anastasi ve ark. 2009b), benzo[al]pyrene (Li ve ark. 2010) ve chrysene (Nikiforova ve ark. 2010) gibi inatçı kirleticileri ayrıştırma kabiliyetlerinden dolayı lakkazlar dikkat çekmektedir. Peroksidazlar ise, lignin (LiP), manganez (MnP) ve versatil peroksidazlar (VP) gibi enzim sistemlerine ayrılarak lignoselülozların biyodegradasyonuna sokulurlar ve daha dirençli bileşiklerin biyolojik dönüşümüne katılırlar.

### Kahverengi Çürükçül Funguslar

Kahverengi çürükçül funguslar, ligninin enzimatik olmayan fenton tip katalitik sistemi tarafından, ahşapta mevcut selüloz ve hemiselülozu ayrıştırabilme yeteneğine sahiptirler. Bu ayrıştırma sonrası kahverengi çürükçül funguslar lignini tipik kahverengimsi bir birikinti olarak bırakır (Stamets 2005) ve ismini de bu kahverengimsi lignin birikintisinden alır.

Hyde ve Wood (1997) ve son yıllarda Purnomo ve ark. (2008) tarafından yapılan çalışmalarda fenton reaksiyonunu, kahverengi çürükçül funguslar tarafından kirleticilerin muhtemel bir parçalanma mekanizması olarak ifade etmişlerdir. Fenton reaksiyonu hidrojen peroksit ile demir (Fe) iyonlarının oksidasyonunu içerir. Fenton reaksiyonu, sellobiyoz dehidrogenaz enzimi içeren kahverengi çürükçül funguslar tarafından gerçekleştirilir. Bu enzim,  $Fe^{3+}$ 'ü  $Fe^{2+}$ 'ye dönüştüren cellodeksinlerin çift oksidasyonuyla saflaştırılmıştır.

Beyaz çürükçül fungusların fenoloksidaz içermesi ve bu yolla organik kirleticilerin ayrıştırmasında rol oynaması, onların biyoremediasyon yeteneklerinin önemli ölçüde açıklıyor olsa da, fenol peroksidazlardan yoksun kahverengi çürükçül fungusları bu konuda başarısız olmaktadır. Ancak, kahverengi çürükçül funguslar ile ilgili yapılan çeşitli PAH'ları bozabildikleri kanıtlanmıştır. Örneğin, kahverengi çürükçül funguslarından *Laetiporus sulphureus*'un fenantrenin (Sack ve ark. 1997), *Gloeophyllum trabeum*, *Fomitopsis pinicola* ve *Daedalea dickinsii* funguslarının ise dikloro difenil trikloroethan (DDT)'in bozulmasına neden olduğu tespit edilmiştir (Purnomo ve ark. 2011).

Günümüzde kahverengi çürükçül fungusları, bakır toleransı ve oksalik asitin yüksek seviyelerde üretiminden dolayı, kromlu bakır arsenatla muamele edilmiş ahşap atıklarından metal uzaklaştırmak için kullanılmaktadır (Kim ve ark. 2009).

### Deniz Fungusları

Deniz ekosisteminde ekstrem koşullarda yaşayabilen fungusların, bu ekosisteme giren odunsu ve/veya otsu kirleticilerin temel ayrıştırıcıları olarak yer alabilirler. İlave deniz fungusları özellikle organik maddenin, kitinin ve ligninin biyolojik parçalanmasında aktif rol oynamaktadırlar (Garzoli ve ark. 2015). Bu fungusların hidrokarbonların ve ağır metallerin biyoremediasyonunda kullanılmakta ve ikincil metabolitler, biosurfaktanlar, yeni enzimler, polisakaritler ve çoklu doymamış yağ asitlerinin üretiminin de önemli potansiyele sahip olduğu belirlenmiştir (Damare ve ark. 2012).

Kirleticileri ayrıştırmada önemli rol oynayan lakkaz ve peroksidaz enzimleri beyaz çürükçül funguslarında olduğu gibi deniz fungusları tarafından da üretilmektedir. Deniz fungusları, lignin degradasyonuna ya da modifiye etme özelliğine sahip olan ve birçok aromatik ve inatçı çevre kirleticilerinin parçalanmasında kullanılan ekstrasellüler enzimleri de üretebilirler (Garzoli ve ark. 2015).

Deniz kaynaklı fungusların toksik ve kalıcı organik kirleticiler üzerindeki biyoremediasyonu arttırmak için birtakım çalışmalar yapılmıştır. Örneğin Divya ve ark. (2014) yüksek tuzluluk ve fenoliklere toleranslı lakkaz üretimini teşvik etmek için, fenolik maddelerle kirlenmiş bir nehir ağzından izole ettikleri *Trichoderma viride*'yi deniz ekosisteminde kullanmış ve başarılı sonuçlar almışlardır. Benzer şekilde PCB 118 gibi kalıcı organik kirleticilerin, *Penicillium* cinsine ait iki deniz fungusu tarafından ayrıştırılabildiği belirlenmiştir (Verma ve ark. 2012; Gao ve ark. 2013). Başka bir çalışmada, kalıcı organik kirleticiler ile pentaklorofenolün, deniz kaynaklı fungus olan

*Trichoderma harzianum* tarafından önemli oranda ayrıştığı görülmüştür (Vacondio ve ark. 2015). Deniz kaynaklı funguslar olan *Mucor*, *Aspergillus*, *Penicillium* ve bazı mayaların, 0.01 ile 0.25 mg/mL konsantrasyonlarda suda çözünür ham yağ damıtık maddeleri için biyoremediasyon potansiyeline sahipken, daha yüksek konsantrasyonlarda organizmalar için toksik etki yarattığı belirlenmiştir (Hickey 2013).

### Ekstremofilik Funguslar

Ekstremofilik funguslar, termotolerans, pH toleransı ve diğer ekstrem koşullara tolerans gibi bazı özel özelliklere sahip olduklarından dolayı endüstriyel atıkların biyoremediasyonu açısından oldukça önemli yere sahiptirler (Neifar ve ark. 2015).

Ekstremofilik funguslar genel olarak ekstrem çevre koşullarına sahip alanlardan izole edilirler. Örneğin, *Acidomyces acidophilus* kükürt alanına bitişik bir doğal gaz arıtma tesisinden (Sigler ve Carmichael 1974), *Hortaea acidophila*, 0.6 civarı pH'ya sahip, humik ve fülvik asit içeren kahverengi kömürden (Hölker ve ark. 2004), *Hortaea werneckii* ve *Acidomyces acidophilus* ise pH değeri 2.3 olan ve yüksek konsantrasyonlarda Fe, Cu, Zn, As, Mn ve Cr içeren topraktan izole edilmiştir (Zettler ve ark. 2002).

Ekstremofilik funguslar biyoremediasyon işlemindeki rollerinin yanı sıra, ekstrem koşullardaki kirlilik oranları hakkında da indikatör görevi üstlenmektedirler (Connel ve Staudigel 2013).

### Mikorizal Funguslar

Rizosfer bölgesindeki simbiyotik yaşamın en yaygın türü olan mikorizal funguslar, organik kirleticilerin fitoremediasyonu bağlamında son yıllarda dikkat çekmeye başlamıştır (Khan ve ark. 2000; Joner ve ark. 2001). Mikorizal funguslar ektomikorizal ve endomikorizal funguslar olarak ikiye ayrılır. Endomikorizal fungusların en yaygın türü olan Arbüsküler Mikorizal Funguslar (AMF), mikroskobik toprak fungusları olup, aynı anda bitki köklerinde ve rizosferde kolonize olarak hifsel dallanmaları ile geniş alanlara yayılırlar (Demir 2002). AMF rizosferde geniş alanlara yayılarak, kirleticilerin fungusun hifleri ve sporları yoluyla emilmesini ve kök bölgesinde daha fazla yüzey alanı oluşturarak kirleticilerin uzaklaştırılmasını sağlarlar. Ancak ektomikorizal funguslar, endomikorizal funguslara oranla mikoremediasyonda daha çok rol oynamaktadır.

Günther ve ark. (1998), kirlenmemiş koşullarda yetişmiş sarıçam ile simbiyotik yaşayan, *Suillus granulatus* ve *Paxillus involutus*'un fungus/kök homojenitesinde peroksidazların seviyesinin arttığını belirlemişlerdir. Yine çam bitkisi köklerinde simbiyotik yaşayan *Suillus bovinus* ve *Rhizopogon roseolus* ektomikorizal fungusların, ortamda bulunan kadmiyumun uzaklaştırılmasında etkili olduğu tespit edilmiştir (Sousa ve ark. 2014). Meharg ve Cairney (2000), ektomikorizal fungusların, kalıcı etkiye sahip bazı organik kirleticileri (POP) parçalayabildiğini saptamışlardır. Benzer olarak Donnelly ve Fletcher (1994), bazı ektomikorizal fungusların PCB bozunumunda etkili olduğunu belirleyerek, biyoremediasyonda mikorizal fungusların kullanılmasını önermişlerdir. Meharg ve ark. (1997), ektomikorizal fungus *Suillus variegatus* Kuntze'nin trinitrotoluen (TNT)'nin, Huang ve ark. (2007) ise yine ektomikorizal funguslar *Boletus edulis* Bull, *Gomphidius viscidus*, *Laccaria bicolor* (Maire) Orton ve *Leccinum scabrum* Gray saf kültürde DDT'nin bozunumunu tespit etmişlerdir.

Sonuç olarak ektomikorizal funguslar, çeşitli kirleticileri başarıyla azaltabilir veya ortamdan uzaklaştırılmasını sağlayabilirler. Ayrıca sinerjik bir etkileşim ile köklerde bulunan farklı mikroorganizmaların kirleticilerin bozulmasındaki etkisine katkıda bulunabilir, birincil ve ikincil bozulma ürünlerinin bir kısmını da parçalayabilirler. Mikorizal funguslarda karbon potansiyeli sınırlayıcı değildir, çünkü mikorizal sistem kendi karbon kaynağını bitkiden sağlarlar. Bundan dolayı, mikoremediasyon uygulamalarında ektomikorizal funguslar daha çok rol oynamakta ve birçok kirli bölge için tercih edilen yöntemler arasında yer almaktadır.

## **Sonuç**

Dünyada ve ülkemizde artan nüfusun gıda, enerji gibi ihtiyaçlarına cevap verebilmek için gerek tarımsal üretim gerekse de endüstriyel üretimde kimyasallar yoğun olarak kullanılmaktadır. Kullanılan bu kimyasallar çevre kirliliğine neden olmaktadır ve dolayısıyla da canlıların sağlığını tehdit etmektedirler. Mevcut arıtma sistemlerinin yetersizliğinden dolayı, bozulan doğal dengeyi tekrar kurabilmek ve toprakların ve su kaynaklarının temizlemesini sağlamak amacıyla ileri arıtım yöntemleri geliştirilmiştir. Bu ileri arıtım yöntemlerinin başında ise hem çevre dostu hem de ekonomik olması yönünden biyoremediasyon gelmektedir.

Biyoremediasyon, mikroorganizmaların kullanılmasıyla, kirleticilerin yıkıma uğratılmasını sağlayan ve çevre kirliliğini azaltmada gelecek vadeden bir yöntemdir. Özellikle de biyoremediasyon kapsamı altında mikoremediasyon uygulamalarında kullanılan funguslar, kirlilik ve atıkların biyolojik arıtımında daha fazla paya

sahip olmaktadır. Mikoremediasyon uygulamaları oldukça yeni olmasına karşın, dünyada ve özellikle ülkemizde bu alanda önemli gelişmeler vardır. Tarımsal ve endüstriyel birçok atığın üzerinde yetişebilen funguslar, yetiştikleri bölgede biyolojik çeşitliliği artıran, kirleticileri ayrıştırabilen ve miselli yapılarından dolayı doğadaki besin iletiminde önemli rolü üstlenen eşsiz güzelliğe sahip gizemli mikro canlılardır. Fungusların biyoremediasyon çalışmalarında kullanılması, fungusların ucuz elde edilebilmesi ve birçok endüstriyel atık üzerinde kolayca gelişebilmesinden dolayı ekonomik yönden fayda sağlamaktadır (Lavrovsky 2004). Benzer şekilde birçok bitkisel, endüstriyel ve tarımsal atığın da değerlendirilmesinde önemli roller üstlenmektedirler.

Sonuç olarak, başarılı bir çevre kirliliği kontrolü için öncelikle kirlenmiş alanların belirlenmesi ile birlikte kayıt altına alınması, incelenmesi ve sınıflandırılması gerekmektedir. Toprakların ve su kaynaklarının iyileştirilmesinde uygulanan metotlar ve teknikler konusunda bir program oluşturulmalıdır. Çevre kirliliğinin tespiti, giderimi ve yaptırımlarına ilişkin çalışmaların artırılması büyük önem taşımaktadır. Ancak unutulmamalıdır ki evrensel bir problem halini alan çevre kirliliği için en iyi çözüm kuşkusuz çevre kirliliğini önleme çalışmalarıdır.

## Kaynaklar

- Adenipekun CO, Lawal R (2012). Uses of mushrooms in bioremediation: A review. *Biotechnology and Molecular Biology Reviews*, 7(3), 62-68.
- Adeniyi AA, Afolabi JA (2002). Determination of total petroleum hydrocarbons and heavy metals in soils within the vicinity of facilities handling refined petroleum products in lagos metropolis. *Environmental International*, 28, 79-82.
- Anonim (2015). [https://www.teachengineering.org/view\\_lesson.php?url=collection/cub/\\_lessons/\\_cub\\_bio\\_lesson06.xml](https://www.teachengineering.org/view_lesson.php?url=collection/cub/_lessons/_cub_bio_lesson06.xml) (Erişim tarihi: 15.03.2018).
- Akhtar S, Mahmood-ul-Hassan M, Ahmad R, Suthor V, Yasin M (2013). Metal tolerance potential of filamentous fungi isolated from soils irrigated with untreated municipal effluent. *Soil Environ*, 32(1), 55-62.
- Akıncı YC, Yüksek T, Demirel Ö (2016). Ağır metaller ile kirlenmiş toprağın iyileştirilmesinde *Vetiver grass (Vetiveria zizanioides (linn.) nash)* ve solucanların kullanılması. *Mimarlık Bilimleri ve Uygulamaları Dergisi*, 1.
- Alexander M (1999). *Biodegradation and bioremediation second edition*, Academic Press New York.
- Anastasi A, Tigini V, Varese GC (2013). The bioremediation potential of different ecophysiological groups of fungi. In *Fungi as bioremediators*. Springer, Berlin, Heidelberg, 29-49.
- Anastasi A, Coppola T, Prigione V, Varese GC (2009b). Pyrene degradation and detoxification in soil by a consortium of basidiomycetes isolated from compost: role of laccases and peroxidases. *J. Hazard. Matter*. 165: 1229–1233.
- Antizar-Ladislao B, Beck AJ, Spanova K, Lopez-Real J, Russell NJ (2007). The influence of different temperature programmes on the bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in a coal-tar contaminated soil by in-vessel composting. *Journal of Hazardous Materials*, 144(1), 340-347.
- Antizar-Ladislao B, Spanova K, Beck AJ, Russell NJ (2008). Microbial community structure changes during bioremediation of PAHs in an aged coal-tar contaminated soil by in-vessel composting. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 61(4), 357-364.
- Baker KH, Herson DS (1994). *Microbiology and biodegradation*. Bioremediation, 9-60.
- Baldrian P (2006). Fungal laccases—occurrence and properties. *FEMS microbiology reviews*, 30(2), 215-242.
- Bennett RM, Cordero PRF, Bautista GS, Dedeles GR (2013). Reduction of hexavalent chromium using fungi and bacteria isolated from contaminated soil and water samples. *Chemistry and Ecology*, 29(4): 320-328.
- Berkem AR (1996). Kimya tarihine toplu bir bakış. *Türkiye Kimya Derneği Yayınları*.
- Boopathy R (2000). Factors limiting bioremediation Technologies. *Bioresource Technology*, 74: 63-67.
- Bumpus JA, Aust SD (1985). "Studies On The Biodegradation of Organopollutants by a White Rot Fungus", *International Conference on New Frontiers for Hazardous Waste Management*, 404-410.
- Ceyhan N, Esmeray E (2012). Petrol kirliliği ve biyoremediasyon. *Türk Bilimsel Derleme Dergisi*, 5(1), 95-101.
- Chowdhury S, Bala NN, Dhauria P (2012). Bioremediation-A Natural Way For Cleaner Environment. *International Journal of Pharmaceutical, Chemical and Biological Sciences*, 2(4): 600-611.
- Connell L, Staudigel H (2013). Fungal diversity in a dark oligotrophic volcanic ecosystem (DOVE) on Mount Erebus, Antarctica. *Biology*, 2(2), 798-809.
- Çakmakçı T, Şahin Ü, Kızıloğlu FM, Tüfenkçi Ş, Kuşlu Y, Erkuş FŞ (2017). Wastewater Treatment in Constructed Wetlands and Suggestions for the Use of Constructed Wetlands in Cold-Climate Regions. *Yuzuncu Yıl University Journal of Agricultural Sciences (YYU J AGR SCI)*. 27(4): 651-656.
- Damare S, Purnima S, Seshagiri R (2012). "Biotechnology of marine fungi." *Biology of Marine Fungi*. Springer, Berlin, Heidelberg. 277-297.
- Damisa D, Oyegoke TS, Ijah UJJ, Adabara NU, Bala JD, Abdulsalam R (2013). Biodegradation of Petroleum by Fungi Isolated From Unpolluted Tropical Soil.



- Demir G, Özcan HK, Elmaslar E, Borat M (2006). Decolorization of Azo Dyes by the White Rot Fungus *Phanerochaete chrysosporium*. *Sigma*, 3.
- Demir S (2002). Mikorhizal Fungus *Glomus intraradices* (Schenck & Smith)'in Bazı Sebze Bitkilerinin Köklerinde Kolonizasyonu. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Bilimleri Dergisi (J. Agric. Sci.)*, 12(1), 53-57.
- Deshmukh R, Khardenavis AA, Purohit HJ (2016). Diverse metabolic capacities of fungi for bioremediation. *Indian journal of microbiology*, 56(3), 247-264.
- Dindar E, Şağban F, Başkaya H (2010). Bioremediation of Contaminated Soil. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 15 (2), 123-137.
- Divya LM, Prasanth GK, Sadasivan C (2014). Potential of the salt-tolerant laccase-producing strain *Trichoderma viride* Pers. NFCCI-2745 from an estuary in the bioremediation of phenol-polluted environments. *Journal of basic microbiology*, 54(6), 542-547.
- Donnelly PK, Fletcher JS (1994). Potential use of mycorrhizal fungi as bioremediation agents.
- dos Santos Bazanella GC, Araújo CAV, Castoldi R, Maria G, Maciel FDI, Marques, CG, Peralta RM (2016). Ligninolytic enzymes from white-rot fungi and application in the removal of synthetic dyes. *Fungal enzymes*, 258.
- Dua M, Singh A, Sethunathan N, Johri A (2002). Biotechnology and bioremediation: successes and limitations. *Applied microbiology and biotechnology*, 59(2), 143-152.
- Duarte K, Justino CI, Pereira R, Panteleitchouk TS, Freitas AC, Rocha-Santos TA, Duarte AC (2013). Removal of the organic content from a bleached kraft pulp mill effluent by a treatment with silica-alginate-fungi biocomposites. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 48(2), 166-172.
- Ellegaard-Jensen L, Aamand J, Kragelund BB, Johnsen AH, Rosendahl S (2013). Strains of the soil fungus *Mortierella* show different degradation potentials for the phenylurea herbicide diuron. *Biodegradation*, 24(6), 765-774.
- Evans CS, Hedger JN (2001). Degradation of plant cell wall polymers. In *Fungi in Bioremediation*; Gadd GM, Ed. Cambridge University Press: Cambridge, UK. 1–26.
- Frazar C (2000). The bioremediation and phytoremediation of pesticide-contaminated sites. US Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response, Technology Innovation Office, Washington, DC, USA, Tech. Rep.
- Gadd GM (2001). *Fungi in Bioremediation*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 481 pp.
- Gao GR, Yin YF, Yang DY, Yang DF (2013). Promoting behavior of fungal degradation Polychlorinated Biphenyl by Maifanite. In *Advanced Materials Research*. Trans Tech Publications, 662, pp. 515-519.
- Garzoli L, Gnani G, Tamma F, Tosi S, Varese GC, Picco AM (2015). Sink or swim: Updated knowledge on marine fungi associated with wood substrates in the Mediterranean Sea and hints about their potential to remediate hydrocarbons. *Progress in Oceanography*, 137, 140-148.
- Gillespie IM, Philp JC (2013). Bioremediation, an environmental remediation technology for the bioeconomy. *Trends in biotechnology*, 31(6), 329-332.
- Goltapeh EM, Danesh YR, Varma A (2013). Fungi as bioremediators. In *Soil Biology*. Springer, Heidelberg, Germany, 32-489 pp.
- Gomez-Silvan C, Molina-Munoz M, Poyatos JM, Ramos A, Hontoria E, Rodelas B, Gonzalez-Lopez J (2010). Structure of archaeal communities in membranebioreactor and submerged-biofilter wastewater treatment plants. *Bioresour. Technol.* 101 (7), 2096–2105.
- Günther TH, Perner B, Gramss G (1998). Activities of phenol oxidizing enzymes of ectomycorrhizal fungi in axenic culture and in symbiosis with Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Journal of Basic Microbiology*, 38(3), 197-206.
- Hadibarata T, Zubir MMFA, Chuang TZ, Yusoff ARM, Salim MR, Fulazzaky MA, Nugroho AE (2013). Degradation and transformation of anthracene by white-rot fungus *Armillaria* sp. F022. *Folia microbiologica*, 58(5), 385-391.
- Hadibarata T, Teh ZC, Zubir MMFA, Khudhair AB, Yusoff ARM, Salim MR, Hidayat T (2013). Identification of naphthalene metabolism by white rot fungus *Pleurotus eryngii*. *Bioprocess and biosystems engineering*, 36(10), 1455-1461.
- Harms H, Schlosser D, Wick LY (2011). Untapped potential: exploiting fungi in bioremediation of hazardous chemicals. *Nature Reviews Microbiology*, 9(3), 177.
- Hickey P (2013). Toxicity of water soluble fractions of crude oil on some bacteria and fungi Isolated from marine water. *Am J Anim Res*, 3:24–29
- Hoshino YT, Morimoto S (2008). Comparison of 18S rDNA primers for estimating fungal diversity in agricultural soils using polymerase chain reaction-denaturing gradient gel electrophoresis. *Soil Science & Plant Nutrition*, 54(5), 701-710.
- Hölker U, Bend J, Pracht R., Tetsch L, Müller T, Höfer M, Hoog GS (2004). *Hortaea acidophila*, a new acid-tolerant black yeast from lignite. *Antonie van Leeuwenhoek*, 86(4): 287-294.
- Huang Y, Zhao X, Luan S (2007). Uptake and biodegradation of DDT by 4 ectomycorrhizal fungi. *Science of the Total Environment*, 385(1-3), 235-241.

- Huang Y, Zhang J, Zhu L (2013). Evaluation of the application potential of bentonites in phenanthrene bioremediation by characterizing the biofilm community. *Bioresour. Technol.* 134, 17–23.
- Hyde SM, Wood PM (1997). A mechanism for production of hydroxyl radicals by the brown-rot fungus *Coniophora puteana*: Fe (III) reduction by cellobiose dehydrogenase and Fe (II) oxidation at a distance from the hyphae. *Microbiology*, 143(1), 259-266.
- Isola D, Selbmann L, de Hoog GS, Fenice M, Onofri S, Prenafeta-Boldú FX, Zucconi L (2013). Isolation and screening of black fungi as degraders of volatile aromatic hydrocarbons. *Mycopathologia*, 175(5-6), 369-379.
- Jebapriya GR, Gnanadoss JJ (2013). Bioremediation of textile dye using white rot fungi: A review. *International Journal of Current Research and Review*, 5(3), 1.
- Jing Z, Li YY, Cao S, Liu Y (2012). Performance of double-layer biofilter packed with coal fly ash ceramic granules in treating highly polluted river water. *Bioresour. Technol.* 120, 212–217.
- Joner EJ, Johansen A, Loibner AP, dela Cruz MA, Szolar OH, Portal JM, Leyval C (2001). Rhizosphere effects on microbial community structure and dissipation and toxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in spiked soil. *Environmental science & technology*, 35(13), 2773-2777.
- Jorgensen KS, Puustinen J, Suortti AM (2000). Bioremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil by composting in biopiles. *Environ. Pollut.* 107 (2), 245–254.
- Kahraman S, Yeşilada O (2001). Industrial and agricultural wastes as substrates for laccase production by white-rot fungi. *Folia microbiologica*, 46(2), 133.
- Kapdan I, Kargı F, McMullan G, Marchant R (2000). Comparison of white-rot fungi cultures for decolorization of textile dyestuffs. *Bioprocess Engineering*, 22(4), 347-351.
- Karigar CS, Rao SS (2011). Role of microbial enzymes in the bioremediation of pollutants: a review. *Enzyme research*, 2011.
- Khan AG, Kuek C, Chaudhry TM, Khoo CS, Hayes WJ (2000). Role of plants, mycorrhizae and phytochelators in heavy metal contaminated land remediation. *Chemosphere*, 41(1-2), 197-207.
- Kim GH, Choi YS, Kim JJ (2009). Improving the efficiency of metal removal from CCA-treated wood using brown rot fungi. *Environmental technology*, 30(7), 673-679.
- Kocaer FO, Başkaya HS (2003). Metallerle Kirlenmiş Toprakların Temizlenmesinde Uygulanan Teknolojiler.
- Kulshreshtha S, Mathur N, Bhatnagar P (2014). Mushroom as a product and their role in mycoremediation. *AMB Express*, 4(1), 29.
- Kurniati E, Arfarita N, Imai T, Higuchi T, Kanno A, Yamamoto K, Sekine M (2014). Potential bioremediation of mercury-contaminated substrate using filamentous fungi isolated from forest soil. *Journal of Environmental Sciences*, 26(6), 1223-1231.
- Lavrovsky V (2004). Microencapsulated enzyme systems. Enhanced oil recovery and bioremediation.
- Lemming G, Hauschild M, Bjerg P (2009). Life cycle assessment of soil and groundwater remediation technologies: Literature review. *International journal of Life Cycle Assessment*, 15(1), 115-127.
- Li T, Yuan S, Wan J, Lu X (2010). Hydroxypropyl- $\beta$ -cyclodextrin enhanced electrokinetic remediation of sediment contaminated with HCB and heavy metals. *J. Hazard. Mater.* 176, 306–312.
- de Lorenzo V (2008). Systems biology approaches to bioremediation. *Curr. Opin. Biotechnol.* 19, 579–589.
- Ma L, Zhuo R, Liu H, Yu D, Jiang M, Zhang X, Yang Y (2014). Efficient decolorization and detoxification of the sulfonated azo dye Reactive Orange 16 and simulated textile wastewater containing Reactive Orange 16 by the white-rot fungus *Ganoderma* sp. En3 isolated from the forest of Tzu-chin Mountain in China. *Biochemical engineering journal*, 82, 1-9.
- Marco-Urrea E, García-Romera I, Aranda E (2015). Potential of non-ligninolytic fungi in bioremediation of chlorinated and polycyclic aromatic hydrocarbons. *New biotechnology*, 32(6), 620-628.
- Margesin R, Schinner F (2001). Biodegradation and bioremediation of hydrocarbons in extreme environments. *Applied microbiology and biotechnology*, 56(5-6), 650-663.
- Martins MR, Pereira P, Lima N, Cruz-Morais J (2013). Degradation of metalaxyl and folpet by filamentous fungi isolated from Portuguese (Alentejo) vineyard soils. *Archives of environmental contamination and toxicology*, 65(1), 67-77.
- McGlashan MA, Tsoflias GP, Schillig PC, Devlin JF, Roberts JA (2012). Field GPR monitoring of biostimulation in saturated porous media. *J. Appl. Geophys.* 78, 102–112.
- Meharg AA, Cairney JW, Maguire N (1997). Mineralization of 2, 4-dichlorophenol by ectomycorrhizal fungi in axenic culture and in symbiosis with pine. *Chemosphere*, 34(12), 2495-2504.
- Meharg AA, Cairney JW (2000). Ectomycorrhizas extending the capabilities of rhizosphere remediation. *Soil Biology and Biochemistry*, 32(11-12), 1475-1484.
- Mishra A, Kumari M, Pandey S, Chaudhry V, Gupta KC, Nautiyal CS (2014). Biocatalytic and antimicrobial activities of gold nanoparticles synthesized by *Trichoderma* sp. *Bioresource technology*, 166: 235-242.
- Mohn WW (2004). Biodegradation and bioremediation of halogenated organic compounds. In *Biodegradation and bioremediation*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 125-148.
- Mougin C, Boukcim H, Jolivald C (2009). Soil bioremediation strategies based on the use of fungal enzymes. In *Advances in Applied Bioremediation*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 123-149.

- Mouhamadou B, Faure M, Sage L, Marçais J, Souard F, Geremia RA (2013). Potential of autochthonous fungal strains isolated from contaminated soils for degradation of polychlorinated biphenyls. *Fungal biology*, 117(4), 268-274.
- Mrozik A, Piotrowska-Seget Z (2010). Bioaugmentation as a strategy for cleaning up of soils contaminated with aromatic compounds. *Microbiol. Res.* 165 (5), 363–375.
- Nayak V, Pai PV, Pai A, Pai S, Sushma YD, Rao CV (2013). A comparative study of caffeine degradation by four different fungi. *Bioremediation journal*, 17(2), 79-85.
- Neifar M, Maktouf S, Ghorbel RE, Jaouani A, Cherif A (2015). Extremophiles as source of novel bioactive compounds with industrial potential. *Biotechnology of bioactive compounds: sources and applications*. Wiley, Hoboken, 245-268.
- Nikiforova SV, Pozdnyakova NN, Makarov OE, Chernyshova MP, Turkovskaya OV (2010). Chrysene bioconversion by the white rot fungus *Pleurotus ostreatus* D1. *Microbiology* 79, 456–460.
- Peng J, Zhang Y, Su J, Qiu Q, Jia Z, Zhu YG (2013). Bacterial communities predominant in the degradation of 13C4-4,5,9,10-pyrene during composting. *Bioresour. Technol.* 143, 608–614.
- Purnomo AS, 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.
- Purnomo AS, Mori T, Takagi K, Kondo R (2011). Bioremediation of DDT contaminated soil using brown-rot fungi. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 65(5), 691-695.
- Purnomo AS, Mori T, Putra SR, Kondo R (2013). Biotransformation of heptachlor and heptachlor epoxide by white-rot fungus *Pleurotus ostreatus*. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 82, 40-44.
- Prescott LM, Harley JP, Klein DA (2002). *Microbiology*, 5th Edition, McGrawHill, New York, pp 1014.
- Reddy CA, Mathew ZACHARIA (2001). Bioremediation potential of white rot fungi. In *British Mycological Society Symposium Series*, Vol. 23, pp. 52-78.
- Reible D, Demnerova K (2002). *Innovative approaches to the on-site assessment and remediation of contaminated sites*. Springer Science & Business Media, Vol. 15.
- Rodarte-Morales AI, Feijoo G, Moreira MT, Lema JM (2011). Degradation of selected pharmaceutical and personal care products (PPCPs) by white-rot fungi. *World J. of Microbiology and Biotechnology*, 27(8), 1839-1846.
- Rosales E, Pazos M, Ángeles Sanromán M (2013). Feasibility of Solid-State Fermentation Using Spent Fungi-Substrate in the Biodegradation of PAHs. *CLEAN–Soil, Air, Water*, 41(6), 610-615.
- Sabate J, Vinas M, Solanas AM (2004) Laboratory-scale bioremediation experiments on hydrocarboncontaminated soils. *International Biodeterioration & Biodegradation* 54, 19-25.
- Sack U, Heinze TM, Deck J, Cerniglia CE, Martens R, Zadrazil F, Fritsche W (1997). Comparison of phenanthrene and pyrene degradation by different wood-decaying fungi. *Applied and Environmental Microbiology*, 63(10), 3919-3925.
- Scragg IG, Hensmann M, Bate CA, Kwiatkowski D (1999). Early cytokine induction by *Plasmodium falciparum* is not a classical endotoxin-like process. *European journal of immunology*, 29(8), 2636-2644.
- Schauer-Gimenez AE, Zitomer DH, Maki JS, Struble CA (2010). Bioaugmentation for improved recovery of anaerobic digesters after toxicant exposure. *Water Res.* 44 (12), 3555–3564.
- Shukla KP, Singh NK, Sharma S (2010). Bioremediation: developments, current practices and perspectives. *Genet Eng Biotechnol J*, 3: 1-20.
- Sigler L, Carmichael, JW (1974). A new acidophilic *Scytalidium*. *Canadian J. of Microbiology*, 20(2): 267-268.
- Silambarasan S, Abraham J (2013). Ecofriendly method for bioremediation of chlorpyrifos from agricultural soil by novel fungus *Aspergillus terreus* JAS1. *Water, Air, & Soil Pollution*, 224(1), 1369.
- Singh A, Ward OP (2004). *Applied bioremediation and phytoremediation*. Springer Science Business Media, Vol. 1.
- Singh H (2006). *Mycoremediation: fungal bioremediation*. John Wiley & Sons.
- Singh M, Srivastava PK, Verma PC, Kharwar RN, Singh N, Tripathi RD (2015). Soil fungi for mycoremediation of arsenic pollution in agriculture soils. *Journal of applied microbiology*, 119(5), 1278-1290.
- Sivakumar G, Xu J, Thompson RW, Yang Y, Randol-Smith P, Weathers PJ (2012). Integrated green algal technology for bioremediation and biofuel. *Bioresour. Technol.* 107, 1–9.
- Sousa NR, Ramos MA, Marques AP, Castro PM (2014). A genotype dependent-response to cadmium contamination in soil is displayed by *Pinus pinaster* in symbiosis with different mycorrhizal fungi. *Applied Soil Ecology*, 76, 7-13.
- Stamets P (2005). *Mycelium Running: How Mushrooms Can Help Save the World*. Berkley. Ten Speed Press.
- Stottmeister U, Aurich A, Wilde H, Andersch J, Schmidt S, Sicker D (2005). White biotechnology for green chemistry: fermentative 2-oxocarboxylic acids as novel building blocks for subsequent chemical syntheses. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 32(11-12), 651-664.
- Strong PJ, Burgess JE (2008). Treatment methods for wine-related and distillery wastewaters: a review. *Bioremediation journal*, 12(2): 70-87.
- Şener Ş (2010). Çevre için Jeoloji; Ağır Metallerin Çevresel Etkileri. *SDUGEO*, 1(3), 33-35.
- Thieman WJ, Palladino MA, Bayraç AT (2013). *Biyoremediyasyon*.
- Turło J (2014). The biotechnology of higher fungi-current state and perspectives. *Folia Biologica et Oecologica*, 10(1), 49-65.

- Vacondio B, Birolli WG, Ferreira IM, Selegim MH, Gonçalves S, Vasconcellos S. P, Porto AL (2015). Biodegradation of pentachlorophenol by marine-derived fungus *Trichoderma harzianum* CBMAI 1677 isolated from ascidian *Didemnum ligulum*. *Biocatalysis and agricultural biotechnology*, 4(2), 266-275.
- Verma AK, Raghukumar C, Parvatkar RR, Naik CG (2012). A rapid two-step bioremediation of the anthraquinone dye, Reactive Blue 4 by a marine-derived fungus. *Water, Air, & Soil Pollution*, 223(6), 3499-3509.
- Vidali M (2001). Bioremediation, An overview. *Pure Appl. Chem.*73: 163-1172.
- Wijekoon KC, Fujioka T, McDonald JA, Khan SJ, Hai FI, Price WE, Nghiem LD, (2013). Removal of N-nitrosamines by an aerobic membrane bioreactor. *Bioresour. Technol.* 141, 41–45.
- Winqvist E (2014). The Potential of Ligninolytic Fungi in Bioremediation of Contaminated Soils. Aalto University publication series Doctoral Dissertations 54.
- Wu J, Zhao Y, Liu L, Fan B, Li M (2013). Remediation of soil contaminated with decabrominated diphenyl ether using white rot fungi. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 21(3), 171-179.
- Wu Y, Hu Z, Kerr PG, Yang L (2011a). A multi-level bioreactor to remove organic matter and metals, together with its associated bacterial diversity. *Bioresour. Technol.* 102 (2), 736–741.
- Wu Y, Hu Z, Yang L, Graham B, Kerr PG (2011b). The removal of nutrients from non-point source wastewater by a hybrid bioreactor. *Bioresour. Technol.* 102 (3), 2419–2426.
- Wu Y, Xia L, Yu Z, Shabbir S, Kerr PG (2014). In situ bioremediation of surface waters by periphytons. *Bioresource technology*, 151, 367-372.
- Yan R, Yang F, Wu Y, Hu Z, Nath B, Yang L, Fang Y (2011). Cadmium and mercury removal from non-point source wastewater by a hybrid bioreactor. *Bioresour. Technol.* 102 (21), 9927–9932.
- Zettler LAA, Gómez F, Zettler E, Keenan BG, Amils R, Sogin ML (2002). Microbiology: eukaryotic diversity in Spain's River of Fire. *Nature*, 417(6885): 137.
- Zeyaullah M, Atif M, Islam B, Abdelkafé AS, Sultan P, ElSaady MA, Ali A (2009). Bioremediation: A tool for environmental cleaning. *African Journal of Microbiology Research*, 3(6), 310-314.