

# **ECO-BIYOTEKNOLOJİ**

## **AKADEMİK DERS BİYOREMEDİASYONDA GELİŞMELER**

### **PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ**

Doç. Dr. FEVZİYE ÇELEBİ TOPRAK  
Doç. Dr. YEŞİM KARA  
Doç. Dr. ALİ RAMAZAN ALAN  
Prof. Dr. İZZET KARA  
Prof. Dr. SELÇUK TOPRAK

## ÖÇ1: REMEDİYASYON TEKNOLOJISINE GİRİŞ

### 1. Remediasyon teknolojilerine giriş

Çevremiz, tüm biyolojik sistemlere zararlı olan kimyasal bileşikler tarafından kirletilmektedir. Kontrolsüz endüstriyel gelişme, nüfus artışı, kentleşme, artan gıda talebi, tarım arazilerinin tuzlanması ve tehlikeli kimyasalların çevreye yayılması, günümüzdeki çevre kirliliği problemlerinin başlıca sebeplerindendir. Çevre dostu uygulamalara ve kirlenmiş sahaların restorasyonuna uluslararası düzeyde bir ihtiyaç vardır.

#### 1.1. Remediasyon Terimleri

**Kirlilik**, doğal çevre ya da yaşam üzerinde olumsuz bir etkiye yol açması muhtemel olan zehirli ya da kirlenici maddelerin boşaltılmasıdır. **Kirlenici maddeler**, bir yerin ya da maddenin (su, hava ya da yiyecek) kullanım için uygunluğunu kaybetmesine yol açmaktadır. **İyileştirme**, kirlenmiş alanların doğal haline dönmesi için bu sahaları restore eder. **Çevresel remediasyon**, toprak, su (hem yeraltı hem de yüzey suyu) ve havanın, kirlilikten ya da kirlenici maddelerden arındırılmasıdır. Bu atık ürünler, çevreyi restore etmenin yanı sıra insan sağlığının korunması için de bertaraf edilmektedir. Temizlenen bu sahalar, kentsel gelişim için de kullanılabilir. Çevresel remediasyon, bir plan dahilinde ve genellikle insan sağlığı ve çevresel risk değerlendirmelerine dayanan bir dizi yasal koşullara tabidir. Remediasyon projeleri, kirlenmiş sahaların temizliği için çok büyük çaba gösterilen büyük, geniş çaplı projelerden benzin dökülme durumu olan otoyol kazalarının temizlenmesi gibi daha küçük ve daha az maliyetli projelere kadar değişiklik gösterebilir. Remediasyon projeleri, genellikle belirli bir alan için en uygun teknolojinin belirlenmesinin yanı sıra projenin maliyetini belirlemek için yapılan bir saha değerlendirmesi ile başlar.

Çevresel remediasyon, toprak (humus, alt toprak ve tortu), su (yeraltı ve yüzey suyu) ve hava dâhil olmak üzere çeşitli çevresel ortamda gerçekleştirilir. **Toprak kirlenmesine**, kimyasal kirlenmeler, endüstriyel aktivite ve bazı gübre ve zirai ilaç kullanımı neden olabilir. Toprak kirlenmesi, yeraltı suyunun kirlenmesine yol açan aynı faktörlerin çoğu tarafından oluşmaktadır. **Su kirliliği**, endüstriyel uygulamaların (madencilik ya da doğalgaz ve petrol sondajı) ve kirlenici maddelerin doğrudan suya salınımı ya da topraktan yeraltına akışının sonucunda oluşabilir. **Hava kirliliği**, insanların ürettiği herhangi bir maddenin (karbon dioksit (CO<sub>2</sub>), metan, sülfür dioksit (SO<sub>2</sub>) ve kloroflorokarbonlar gibi sera gazları) ya da doğal sebeplerin

(orman yangınları, volkanik patlamalar, rüzgâr erozyonları, polen dağılması, organik bileşiklerin buharlaşması ve doğal radyoaktivite) atmosfere salınmasıyla ortaya çıkar.

**Toprak remediasyonu**, toprağı arındırmak ve yeniden canlandırmak için kullanılan stratejileri ifade etmektedir. **Su remediasyonu**, suyun kirletici maddelerden arındırılması sürecidir. Genellikle, toprak ve yeraltı suyu, aynı kaynaklarla kirletilir (kimyasal dökülmeler, endüstriyel aktivite ve bazı gübre ve zirai ilaçların kullanımı) ve her ikisi de aynı anda iyileştirilmelidir.

**Hava remediasyonu**, havayı kirleten kirleticilerin havadan bertaraf edilmesi sürecidir.

Kirlenmiş bir çevre için olan mevcut remediasyon teknolojileri, *in-situ* (saha içinde) ve *ex-situ* (saha dışında) olmak üzere başlıca iki gruba ayrılır. *In-situ* teknolojiler, kirlenmiş maddeye yerinde işlem yapılmasını içerir. *Ex-situ* teknolojiler ise, kirletici maddelerin asıl yerlerinden alınıp, doğal yerinde ve doğal yerinin dışında temizlendiği bir remediasyon seçeneğidir. Çevrenin kirleticilerden arınması için çeşitli remediasyon teknolojileri bulunmaktadır. Belirli bir yerde kullanılan metotlar, o yerin özelliklerinin yanı sıra kirliliğin türüne ve boyutuna da bağlıdır. Birçok farklı remediasyon metodu vardır ve yeni teknolojiler düzenli olarak geliştirilmektedir.

## 1.2. Remediasyon Sınıfları

Remediasyon, geleneksel ve biyolojik olmak üzere iki yönetime ayrılabilir.

Geleneksel remediasyon yöntemleri şu şekildedir:

- Kazı ve tarama
- Toprak buharı çıkarma
- Katılaşma ve stabilizasyon
- Toprak yıkama
- Hava Serpme (hava enjeksiyonu ve dağıtımı)
- Pompalama ve arıtma
- Kimyasal oksidasyon
- Yakma

Biyoremediasyon yöntemi ise şu şekildedir:

- Biyoremediasyon

### 1.2.1. Geleneksel Remediasyon Yöntemleri

#### **Kazı ve tarama**

Bu teknik, kirlenmiş bir alandan kirlenmiş toprağın ya da diğer malzemelerin taşınmasını içerir. Toprak remediasyon sürecinin en yaygın şekli **kazıdır**. Bu, toprağı kazıp uzağa taşımak ve

yerine kirlenmemiş toprak koymak kadar basit olabilir, ya da havalandırma gibi daha karmaşık süreçler içerebilir. Bu, kirletici maddelere bağlıdır.

**Tarama**, insan sağlığına ve çevreye olan riskleri azaltmak için kirlenmiş çökeltilerin, temiz sudan ya da deniz suyundan fiziksel olarak çıkarılmasıdır. Tarama, çevresel koşullara (taranacak malzemenin sertliği ve miktarı, sahaya etkisi, bertaraf yöntemi vb.), kirletici türlere ve çökeltilerdeki kirlilik derecesine bağlıdır. Taramayla ilişkili kirleticilerin çıkarılması, her birisi farklı ulaşım ve/ya da maruz kalma yolları ile karakterize olan parçacıklı, çözülmüş ya da uçucu fraksiyonlarda oluşabilir. Proje çıktılarını en verimli şekilde elde etmek için farklı türde tarama malzemesi ve tekniği kullanılır.

### **Toprak buhar ekstraksiyonu**

**Toprak buhar ekstraksiyonu** (TBE) teknolojisi, tüm toprak fazları ile dağıtılan kirleticileri ortadan kaldıran toprak matrisi içinde bir hava hareketi yaratmak için vakum pompaları kullanır. Ekstrakte edilen buhar daha sonra işlem görür ve atmosfere atılır ya da izin verilirse yeraltına tekrar enjekte edilir. TBE, bazı fiziksel bariyerlerin (yapı, ağaç vb.) varlığı yüzünden kazı mümkün olmadığında ya da toprak kirliliğinin boyutu çok büyükse, kirliliğin topraktan bertaraf edilmesi için daha yaygın bir şekilde iyileştirici bir yaklaşım olarak kullanılır. Kirlenmiş toprak ve taban suyu, TBE tekniği ile aynı anda arındırılabilir.

### **Katılaşma veya stabilizasyon**

Bu teknik, atıkları katılaşmış bir matris ile birleştirerek tehlikeli bileşenleri daha az çözünür, daha az hareketli ve daha az zehirli formlara dönüştürmek için kirlenmiş bir ortamın belirli bir bağlayıcı madde ile karıştırılmasını içerir. Bu teknoloji şu anda tabakhaneden gelen ve elektro kaplama ve metal tamamlayıcı sanayilerinin su arıtma tesisinden gelen atıklar gibi farklı sanayilerden gelen geniş yelpazedeki atıkları işlemek için kullanılmaktadır. Bu atıklar genellikle ağır metalleri, organikleri ve çözünebilir tuzları içermektedir.

### **Toprak yıkama**

Bu süreç, topraktan metal kirleticileri çıkarmak için fiziksel ve/ya da kimyasal prosedürleri kullanan *ex situ* ya da *in situ* tekniklerini ifade etmektedir. **Toprak yıkama** işlemi, çoğunlukla içinde daha az kil barındıran ve inorganik kirleticiler ile kirlenmiş olan granül topraklar için uygundur. Toprak yıkama, metal kirleticileri topraktan çıkarmak için birkaç kalıcı işlem alternatifinin birisidir. Kirleticiler organik ise, organik kirleticileri yok etmek gerekmektedir, daha sonra da bazı çözücüler ya da yüzey aktif maddeleri, yıkama maddeleri olarak kullanılır.

## Hava serpmeye

Bu teknikte, kirlenmiş bir sahaya hava enjekte edilir. Enjekte edilen bu hava, oluşan buhar fazı kirliliğini yok etmek için buhar ekstraksiyon sisteminin genellikle hava serpmeye ile bağlantılı olarak uygulandığı doymamış bölgenin içine kadar kirleticileri yıkamaya (kabarcık) yardımcı olur. **Hava serpmeye**, doymuş toprak bölgesinden benzin gibi petrol ürünlerinden daha hafif molekül bileşenlerini (benzin, etil benzin, toluen ve ksilen) azaltmak için kullanılan *in situ* bir remediasyon yöntemidir. Hava serpmeye, uçucu ve/ veya biyoçözünebilir kirleticilerin iyileştirilmesi için uygun maliyetli ve zaman açısından da verimli bir sistemdir.

## Pompalama ve arıtma

Bu teknik, kirlenmiş yeraltı suyunu yeraltından pompalamayı ve zemine dönmeden önce de arındırmayı içerir. Ayrıca, **pompalama ve arıtma** (PAT), hızlı tepki süresi, yüksek güvenilirlik ve uyumluluk ile hayati bir alternatif sunmaktadır. PAT, kirleticilerin yok edilmesindeki ve kirleticilerin taşınması kontrolündeki mükemmelliği nedeniyle yeraltı suyunun iyileştirilmesi ve su restorasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır.

## Kimyasal oksidasyon

**Kimyasal oksidasyon**, CO<sub>2</sub>, su (H<sub>2</sub>O) ve inorganiklerin kirleticilerini mineralize etmeyi ya da en azından bu kirleticileri, zararsız ya da biyoçözünebilir ürünlere dönüştürmeyi hedeflemektedir. Kimyasal oksidasyon süreci, petrol hidrokarbonları, klorlu çözücüler gibi karbon içeren bileşiklerin ve sayısız diğer kirleticilerin arıtılması için atık su endüstrisinde onlarca yıldır kullanılmaktadır.

## Yakma

Yakma, tehlikeli atık maddeleri yok etmek için bir ısıl işlem (yüksek ısıda) sürecidir. Atık maddelerin yakılması, atığı küle, duman gazına ve ısıya dönüştürür (Ikonomou ve ark., 2002). Kül, genellikle atığın inorganik bileşenlerinden oluşmaktadır ve duman gazıyla taşınan katı toprak ya da partikül şeklini alabilir. Duman gazlarının atmosfere dağılmadan önce gaz ve partiküllü kirleticilerden temizlenmesi gerekmektedir.

### 1.2.2. Biyoremediasyon Yöntemi

#### Biyoremediasyon

Biyoremediasyon, kirleticileri toprak, su ve havadan uzaklaştırmak için organizmaların kullanılmasıdır. Bu, ya kirlenmiş malzemeleri saha içinde yok ederek ya da daha sonra başka bir yerde yok edilecek olan kirlenmiş malzemeleri taşıyarak yapılır. Kirleticiler yok etmek için farklı organizmalar (bakteri, mantarlar, algler ve bitkiler) kullanılır ve genellikle belirli kimyasal türleri için özellikle uygundur.

## 2. Tehlikeli çevresel kirleticiler

Tehlikeli bir kirletici, çevreye giren ve istenmeyen etkileri olan ya da bir kaynağın kullanımını olumsuz etkileyen bir madde ya da enerjidir. Çevresel kirleticiler, bitki ya da hayvan türlerinin büyümesini değiştirerek ya da insanların imkânlarına, rahatına, sağlığına ya da mülki değerlerine müdahale ederek kısa veya uzun vadeli hasara neden olabilir. Bazı tehlikeli kirleticiler, biyolojik olarak parçalanabilmektedir ve bu nedenle de çevrede uzun süre kalıcı olmamaktadır. Sürdürülebilir çevre sağlığı üzerindeki potansiyel risklerini ortadan kaldırmak için çevrede uzun süre kalıcılığı olan kirleticilerin, temizlenmesi ya da iyileştirilmesi gerekmektedir. Toprağı, suyu ve havayı kirleten kirleticilerin başlıca kaynakları şu şekildedir.

### 2.1. Fosil Yakıtlar (Petrol, Doğalgaz ve Kömür)

Kömür, petrol ve gaz milyonlarca yıldır toprak altında gömülü haldeki bitki ve hayvanların organik kalıntılarından elde edilen yenilenemeyen enerji kaynakları olan fosil yakıtların üç ana şeklidir. Fosil yakıtlar, büyük ölçüde karbon ve hidrojenden oluşur. Yanma süreci aslında havadaki oksijen ile oluşan kimyasal reaksiyondur. Çoğunlukla, karbon, CO<sub>2</sub> oluşturmak için oksijenle (O) birleşir ve hidrojen (H) su buharı oluşturmak için oksijenle birleşir. Açığa çıkan CO<sub>2</sub>, sera etkisinin nedenidir.

Kömür, organik madde ve az miktarda da inorganik maddeden oluşan katı yanıcı bir maddedir. Temelde her birisi; ısıl değer, kimyasal bileşim, kül içeriği ve jeolojik kökeni bakımından değişiklik gösteren dört ana kömür türü bulunmaktadır. Bu dört kömür türü antrasit, bitümlü, alt bitümlü ve linyittir. Kömür yandığı zaman birçok tehlikeli kirletici açığa çıkar. Başlıca kirleticiler şunlardır: SO<sub>2</sub>, azot oksitler (NO<sub>x</sub>), karbon monoksit (CO), partiküller, hidrokarbonlar, ozon (O<sub>3</sub>), uçucu organik bileşikler, toksik metaller (kadmiyum (Cd), arsenik (As), nikel (Ni), krom (Cr) ve berilyum (Be). Kömür yanarken, asit yağmuru, kentsel ozon ve küresel iklim değişiklikleri gibi çevre problemleriyle bağlantılı birkaç kirletici açığa çıkmaktadır. Kömürün yanıcı olmayan mineral içeriği, taban külüne ve uçucu küle bölünür. Bu fosil yakıtın yanması ile baca gazları da açığa çıkar.

Taban külü ve kazan cürufu az miktarda kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg), sülfat ve diğer bileşenlerle birlikte esas olarak silis, alüminyum oksit ve demirden (Fe) oluşmaktadır. Doğal tuz ve ağır metal içeriği ve bazı durumlarda da düşük pH nedeniyle, bu malzeme aşındırıcı ve toksik özellikler sergileyebilir. Taban külü ve cürufta zenginleşme gösteren elementler, yoğunluk ayırımı etkileri ile kısmen derişik olan baryum (Ba), Be, kobalt (Co), manganez (Mn), sezyum (Cs), bakır (Cu), nikel (Ni), stronsiyum (Sr), tantal (Ta), vanadyum (V), tungsten (W),

öropiyum (Eu), hafniyum (Hf), zirkonyum (Zr) içermektedir. Silisyum oksit (SiO), alüminyum (Al), Fe ve Ca, tipik bir uçucu külün mineral bileşeninin %90'ından fazlasını içermektedir. Mg, potasyum (K), sodyum (Na), titanyum (Ti) ve sülfür (S) küçük bileşenlerdir. As, Cd, kurşun (Pb), cıva (Hg) ve selenyum (Se) gibi eser bileşenlerin hepsi birlikte kömürün toplam bileşiminin % 1'den azını oluştururken, onlar, mineral içeriğin %8'ini oluşturmaktadır. Kömürün yanmasından çıkan baca gazları, esas olarak yanmamış azot, karbondioksit ve su buharını içermektedir.

Ham petrolün 19. Yüzyıldaki keşfi, dünyanın sanayileşmesine ve hayat standartlarının iyileşmesine katkıda bulunan ucuz bir sıvı yakıt kaynağı üretmiştir. Petrokimya sanayisi, tehlikeli maddelerin üretimi ya da kullanımı sırasında üretilen tehlikeli organik atıkların başlıca kaynağıdır. Ham petrolün ya da petrokimyasalların geri kazanımı, ulaşımı ve depolanması, genellikle teknolojik kazaların sonucu olarak üretilen tehlikeli atıkların başlıca kaynaklarıdır. Petrol ve petrol ürünlerinin sızıntısı nedeniyle oluşan deniz suyu ve temiz su kirliliği, arazi sızıntıları ya da borulardaki ya da su depolarındaki sızıntı nedeniyle oluşan yeraltı ya da toprak kirliliği, petrol ya da petrol tortusunun yakılması nedeniyle oluşan hava kirliliği, önemli çevre kirliliği durumlarıdır. Benzin, petrokimya endüstrisinin ana ürünüdür ve %70 alifatik doğrusal ve dallanmış hidrokarbonlardan ve ksilenler, toluen, di-methylbenzenes ve tri-methylbenzenes, etilbenzen, benzen ve diğerleri dahil olmak üzere %30 aromatik hidrokarbonlardan oluşmaktadır. Kimyasal sentez için kullanılan diğer saf dökme kimyasallar, formaldehit, metanol, asetik asit, etilen, polietilen, etilen glikol, polietilen glikoller, propilen, propilen glikol, polipropilen glikoller ve benzen, toluen, ksilenler, stiren, anilin, ftalatlar, naftalen ve diğerleri gibi aromatik hidrokarbonları içermektedir.

Doğalgaz, gözenekli tortul kayalarda özellikle de petrol verimi olanlarda biriken gaz hidrokarbonlarının yanıcı bir karışımıdır. Doğalgaz, esas olarak metandan oluşur, ancak ayrıca etan, propan, bütan ve daha ağır hidrokarbonlar da içermektedir. Ayrıca az miktarlarda nitrojen (N), CO<sub>2</sub>, hidrojen sülfid (H<sub>2</sub>S) ve eser miktarda su içermektedir. Karışımdaki en toksik bileşenleri (propan ve bütan) küçük miktarlarda bulunmaktadır. Sondaj ve kuyulardan doğalgaz çıkarımı ve boru hatlarında taşınmaları sırasında güçlü bir küresel ısınma gazı olan metan sızıntısı, önemli bir çevresel tehlikedir. Doğalgaz, diğer fosil yakıtlardan daha temiz yanmaktadır. Doğalgazın yanması önemsiz miktarlarda S, Hg ve partikül üretir.



## 2.2. Endüstriyel Atık

Endüstriyel atıklar, tehlikeli inorganik ve organik bileşenler nedeniyle tehlikeli atıklar olarak tanımlanır. Bu atıklar, insan sağlığına veya bitkilerin ya da hayvanların hayati eylemlerine zarar vermek (akut ve kronik toksisite, karsinojenisite, teratojenisite, patojenisite vb.), ekosistemin biyoçeşitliliğini, yanmazlığı, aşındırıcı aktiviteyi, patlama özelliğini vb. azaltmak gibi tehlikeli atıkların ortak özelliklerini sergilemektedir. Tehlikeli endüstriyel atıklar; petrole kirlenmiş toprak ve tortuları, hidroksit tortuları, asidik ve bazik çözeltileri, halojenli organik çözücüler, halojenik olmayan organik çözücüler, boya tortularını, galvanik atıkları, tuz tortularını, pestisit içeren atıkları, patlayıcıları ve zararlı madde içeren atık suları ve gaz emisyonlarını içermektedir. İkincil atıklar; tortular, çökeltiler, atık sular, lechatlar ve hava emisyonları gibi tehlikeli endüstriyel atıkların toplanması, işlenmesi, yakılması ve bertaraf edilmesinden üretilmektedir. Bu ikincil atıklar, ayrıca toprak, su ve hava kirliliğine yol açabilir.

## 2.3. Kentsel Atıklar (Katı Atıklar ve Kanalizasyon Suyu)

Katı atıklar (çöpler) genellikle bireyler tarafından üretilir ve gereksiz ya da bozulmuş kişisel eşyaları, bozulmuş yiyecekleri, kâğıdı, bahçe bitkilerini, plastikleri, metalleri, tekstil vb. içermektedir. Katı belediye atıkları, potansiyel olarak insan sağlığına ve çevreye zararlı olan maddeleri içerebilir.

Kanalizasyon suları genellikle dışkı malzemelerinin (organik madde) hâkim olduğu ve ayrıca sanayiler ve ev sahipleri tarafından atık sistemine atılmış olan toksik kimyasalların (metaller, tarım ilaçları, diğer toksik kimyasallar vb.) hayli karmaşık bir karışımıdır.

## 2.4. Tarımsal Atık

Tarımsal atıklar genellikle gübre (kümes ve mezbahalar) ve çiftliklerden gelen diğer atıkları (hasat atıkları, tarımdan dönen su atıklarının alanları, suya, havaya ve toprağa karışan böcek ilaçları ve tarlalardan çıkan tuz ve alüvyonlar) gibi çeşitli tarımsal işlemlerle üretilir. Conserve Energy Future (Gelecek Enerji Korumaya) sitesine göre tarımsal kirlilik, kimyasallar ve toksinler büyük su kütlelerinin diplerine çöktükten sonra yeraltı sularına doğru ilerleyerek karıştığı için su ve göl kirliliğinin birincil kaynağıdır. Bu maddelerin birikmesi en sonunda mavi bebek sendromu ve nörolojik rahatsızlıklar gibi sağlık sorunlarına yol açar. Gübreler, hayvansal gübre, amonyak ve atıklar yerel çevreye doğru yayıldığı ve ekosistem süreçlerini bozduğu için tarımsal atıklar ayrıca, su hayvanlarını ve bitkilerini olumsuz etkileyebilir.



## 2.5. Zirai İlaçlar (Pestisitler)

Zirai ilaçlar, canlı organizmaları (böcekler, otlar, mantarlar, bakteriler vb.) öldürmek amacıyla çevreye kasıtlı olarak bırakılan toksik kimyasal maddelerdir. Zirai ilaçlar, fotosentez, mitoz, hücre bölünmesi, enzim fonksiyonu, büyüme gibi biyolojik süreçlerin engellenmesi, pigmentlerin, proteinlerin ya da deoksiribonükleik asidin (DNA) sentezine müdahale, hücre zarlarının yıkımı, ya da kontrolsüz büyümenin teşvik edilmesi dahil olmak üzere çeşitli mekanizmalar aracılığıyla organizmaları kontrol altında tutar ya da öldürür. Pestisit kullanımı insan uygarlığı kadar eskidir. Pestisitlerin ilk bilinçli kullanımı Sümerler tarafından MÖ 2500 yılında olmuştur. Böcekleri öldürmek için kükürt bileşenlerini kullanmışlardır. Pestisitler, esas olarak hava, toprak, su ve yaban hayatı yoluyla çevrede kirliliğe neden olur. Pestisitler sadece hedeflenen zararlıları öldürmekle kalmaz aynı zamanda havadaki, topraktaki ve sudaki diğer birçok canlıya da zarar vermektedir. Bu nedenle, bioçeşitliliği azaltmaktadır. Nispeten daha ucuz biyopestisitlerin geliştirilmesi gibi güvenli alternatif yöntemler teşvik edilmelidir.

### 2.5.1. Böcek Öldürücüler

Böcek öldürücüler, böcekleri öldürmek için çevreye kasti olarak bırakılmak üzere tasarlanmış olan toksik kimyasallardır. Ayrıca ekosistem üzerinde de olumsuz etkiye yol açabilirler. Böcek öldürücüler; püskürtme yoluyla havayı, toprağı ve suyu kolaylıkla kirletebilir.

### 2.5.2. Ot Öldürücüler (Herbisit)

Bu kimyasallar, istenmeyen bitkileri ya da “yabani otları” öldürmek için kullanılır. Bazıları sadece belirli türleri hedef almak üzere tasarlanmışken, bunların çoğu, dokundukları her bitkiyi öldürecektir. Herbisit uygulamasının, ekilebilir bir alanı çevreleyen bitki örtüsü için bir risk teşkil edebileceği iyi bilinen bir şeydir. Herbisitler, hava, toprak ve su gibi çevre kirliliğine yol açabilir. Bu herbisitler, bölgesel sızıntı ve daha az bir ölçüde doğrudan uygulama ve havadan ilaçlama sonucunda su ekosistemine girebilirler. Tatlı su ekosistemlerindeki mikrobiyal topluluklar, doğrudan hedef alınmamaktadır, ancak bu topluluklar da herbisitlere maruz kalmaktadır ve bu bileşenlerden doğrudan ya da dolaylı olarak etkilenmektedir.

### 2.5.3. Mantar İlaçları (Fungisit)

Bu kimyasallar, mantarları öldürmek için kullanılmaktadır. Mantar ilacı kullanmak; hava, su ve toprak kirliliğine yol açar. Mantar ilaçları, çevreye tarımsal ya da hastane kullanımı ile girmektedir. Örneğin, entansif tarım, akuatik ortam vb. gibi alanlar, bu alanlardaki yüzey suyunda düzenli olarak tespit edilen zirai ilaçlara maruz kalmaktadır. Diğer bir örnek ise, insanlarda mantar enfeksiyonunu tedavi etmek için azol mantar uygulamasından sonra, bu kimyasallar atık suların doğrudan ya da dolaylı bertarafı yoluyla alıcı ortamlara ulaşabilir,

böylece de hedef dışı organizmalara potansiyel risk oluşturur. Ancak, benomil, toprakta yaşayan ve sudaki organizmalara nispeten dar bir toksisite spektrumu olan karbamatlar hariç olmak üzere mantar ilaçlarının çoğunun nispeten düşük memeli toksisitesi vardır. Bunların en büyük çevresel etkisi, toprak ve su mikroorganizmalarına olan toksisitedir.

#### 2.5.4. Bakteri Öldürücüler

Bu kimyasal madde, bakteri oluşumunu engeller. Bakteriler genellikle ham petrol rafinerileri için ara depolamada petrol kuyularında ve bağlantı borularında kaplama ve korozyon inhibitörleri olarak kullanılır. Bu kimyasallar, bakterileri öldürmek ya da büyümelerini engellemek için antimikrobiyal yüzey ve diğer ürünlere giderek daha fazla eklenmektedir. Bunlar ayrıca, gıda üreten hayvanları yetiştirme ve onlara bakma amacıyla hayvancılık ve veterinerlik ilaçlarında da yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Bakteri öldürücülerin diğer önemli bir kullanımı da aerosollerin soğutma kulelerinden salınma ihtimali olan *Legionella* gibi bazı zararlı bakterilerin büyümesini kontrol etmek için olan soğutma kulesi sistemidir.

#### 2.6. Ağır ve Hafif Metaller

Ağır ve hafif metaller, pedogenetik süreçlerle (erozyon, volkanik faaliyetler vb.) ve antropojenik faaliyetlerle (madencilik, cevher arıtma, gübre sanayii, tabakhane, piller, kağıt sanayii, zirai ilaç ve gübre sanayileri vb.) çevrede doğal olarak bulunmaktadır. Bu metaller, doğal ve insan yapımı faaliyetlerle aşırı üretilmeleri nedeniyle esasen toprak ve su ortamlarında kirletici olmaktadır. Bu kirleticiler, uzun süreler boyunca doğada zehirli olmaları, biyo-birikim eğilimleri ve kalıcılıkları nedeniyle özellikle endişe konusudur. Başlıca ağır ve hafif metal kirleticileri şu şekildedir:

**Antimon**, doğal olarak toprakta bulunur ve genellikle alev geciktirici olarak sanayide kullanılmaktadır. Ayrıca, seramik, cam, pil, havai fişek ve patlayıcılarda kullanılmaktadır. İçme suyu, kayanın doğal ayrışması, endüstriyel üretim, evsel atık bertarafı ya da üretim süreçleri yoluyla kirlenmektedir.

**Arsenik** (As) kokusuz ve tatsız bir yarı metal elementidir. Tarımsal ve endüstriyel uygulamalar, içme suyunda arsenik kirliliğine yol açmaktadır.

**Asbest**, doğal yollarla oluşan bir mineraldir. Altı mineral (krizotil, krokidolit, antofilit, tremolit, aktinolit ve amosit) asbest olarak karakterize edilmiştir. Çimento, yer karoları, kâğıt ürünler, boya ve silikon üretiminde, ulaştırmayla ilgili uygulamalarda ve tekstil ve plastiklerin üretiminde kullanılmaktadır. Asbestlerin çoğu, muazzam miktarda maden atığı ve ana kayaçlar oluşturarak geniş çaplı açık ocak madenciliği ile çevreyi kirletmektedir.

**Barium** (Ba), yeraltı suyu kaynakları olarak hizmet veren bazı akiferlerde doğal olarak ortaya çıkmaktadır. Baryumun başlıca kullanımları; petrol ve gaz sondaj çamurları, otomotiv boya, tuğlalar, kiremitler ve jet yakıtlarıdır. Baryum genellikle toprakta doğal olarak oluşan minerallerin çözülmesinden ve geleneksel olmayan sondaj uygulamalarından sonra içme suyunu kirletmektedir.

**Berilyum** (Be), toprakta doğal olarak oluşmaktadır ve genellikle elektrik ekipmanları ve mekanik endüstrilerde kullanılır. Berilyum genellikle suya, madencilik işlemleri, işleme tesislerinden yapılan boşaltma ve uygunsuz atık bertarafı sırasındaki akıştan girmektedir.

**Boron** (B) doğal olarak oluşan bir elementtir. Doğada boron, oksijen ve boratlar olarak adlandırılan birkaç farklı bileşiği oluşturan diğer doğal elementlerle birlikte bulunmaktadır. Akiferlerdeki antropolojik boron kirliliği, sızan septik sistemlere ve borat madenciliğine atfedilmiştir.

**Kadmiyum** (Cd), galvanizli boru yapımı için kullanılan bir metal kirleticidir. Galvaniz borulardaki korozyon veya uygunsuz atık bertaraf su kirliliğine yol açmaktadır. Diğer bir Cd kaynağı da PVC- pencere çerçeveler, plastikler ve çelik kaplamadır.

**Krom** (Cr) toprakta doğal olarak bulunur. Genellikle, metallerin elektro-kaplamasında kullanılır. Ayrıca, eski madencilik faaliyetleri ve endüstriyel uygulamalardan (kaplama, metalürjü, pigmentler ve deri tabaklama) gelen uygunsuz atık bertarafı sırasındaki akış ile suya girmektedir.

**Klor** (Cl), doğal olarak oluşan bir maddedir. Yeraltı sularına çoğunlukla insan faaliyetleri (yol tuzu, gübreler, sanayi atıkları ya da kanalizasyon) ile girmektedir.

**Siyanür** (Cn) elektro-kaplama, çelik işleme, plastikler, sentetik kumaşlar, metal geri kazanım süreçleri ve gübre ürünlerinde kullanılmaktadır. Uygunsuz atık bertarafı, su kirliliğine yol açmaktadır.

**Bakır** (Cu) doğal olarak kum taşları ve malakit ve kalkopirit gibi minerallerde bulunur. Artan Cu seviyeleri, gübrelerde, yapı malzemelerinde, suni ipek üretiminde, pestisit spreylerde kullanılmasından, tarımsal ve evsel atıklardan ve endüstriyel emisyonlardan kaynaklanmaktadır.

**Florür** (F) bazı su kaynaklarında doğal olarak oluşmaktadır. Uygunsuz atık bertarafı ve madencilik faaliyetleri su kirliliğine yol açmaktadır.

**Kurşun** (Pb) hem doğal yollarla (ana kaya ve maden yataklarının ayrışması) hem de insan yapımı faaliyetlerle (madencilik, endüstriyel emisyon, eritme, atık su, sulama ve gübre uygulamaları) oluşmaktadır. Madencilik faaliyetleri ve endüstriyel faaliyetler (plastik, perdah

takımı, katot ışın tüpleri, seramik, lehimler, kurşun saç ve diğer küçük ürün parçaları, çelik ve kablo ıslahı) çevre kirliliğine yol açmaktadır.

**Cıva** (Hg) çevrede doğal olarak oluşmaktadır ve metalik, inorganik ve organik şekillerde bulunabilir. Metal işleme sanayi, tıbbi, kozmetik ve ruhsal amaçlarla kullanılmaktadır genellikle hatalı atık bertarafı sonucunda suları kirletmektedir.

**Nikel** (N) toprakta doğal olarak bulunmaktadır. Genellikle elektro-kaplama, paslanmaz çelik ve alaşım ürünlerinde kullanılmaktadır. Madencilik, endüstriyel uygulama (nikel kaplama, renkli seramik, piller, alaşım yapmak için kullanılan fırınlar ya da enerji santrallerinden ve çöp yakma tesislerinden) ve arıtma işlemlerinden çıkan atıklar, çevre kirliliğine yol açmaktadır.

**Nitrat** (NO<sub>3</sub>) toprakta ve suda doğal olarak oluşmaktadır. Gübrelerde kullanılmaktadır ve kanalizasyonda ya da insanların ve/ya da çiftlik hayvanlarının atıklarında bulunur ve genellikle içme suyuna bu yollarla bulaşır.

**Selenyum** (Se) genellikle yiyeceklerde ve toprakta bulunur. Elektronik, TV kameraları, bilgisayar çekirdekleri, fotokopi işlemleri, cam üretimi, kimyasallar, ilaçlarda ve mantar öldürücü ve yem katkı maddesi olarak kullanılır. Madencilik ve damıtma faaliyetleri çevre kirliliğine yol açabilir.

**Gümüş** (Ag) element şeklinde ve çeşitli cevherlerde doğal olarak oluşmaktadır. Ag genellikle sanayide, fotoğraf kimyasallarında, su damıtma donanımlarında, aynalarda, gümüş kaplama ekipmanlarında, özel pillerde, çatal bıçak setlerinde, mücevheratta, amalgam dâhil olmak üzere tıbbi ve bilimsel diş malzemelerinde kullanılmaktadır. Çevrenin (hava, toprak ve su) gümüşe dayalı kirlenmesinin başlıca kaynağı, doğal ve antropolojik kaynaklardır (fotoğrafların tabını alan kişilerin doğrudan kanalizasyona attığı gelişen fotografik çözümler).

**Sodyum** (Na) yiyecekte ve içme suyunda doğal olarak bulunmaktadır. İçme suyu genel Na alımının sadece küçük bir bölümüne katkıda bulunmaktadır. Na kirliliğinin başlıca kaynağı, yakınlardaki kıyı bölgeler, rüzgârın taşıdığı deniz spreyi ve evsel, ticari ve endüstriyel atıklardır. Genel olarak sodyum tuzları, olgunlaşmış böbreklerin sodyum salgılama verimliliği nedeniyle akut toksik madde değildirler. Yüksek Na konsantrasyonları, suyun aşındırıcı eylemini artırma, suya nahoş bir tat verme ve suyun sertliğinin kaldırılmasında iyon değişimi yumuşatıcılarının çalışmasını engelleme eğilimindedir.

### 3. Kirlenmiş bir alanın karakterizasyonu

Sanayileşme ve doğal kaynakların çıkarılması, dünyada çevre kirliliğine neden olmaktadır. Her gün çevreye (toprak, su ve hava) büyük miktarda (450 milyon kilogramdan fazla) zehirli atık

madde (ağır metal içeren) atılmaktadır. Bu kirleticiler, yaşayan tüm organizmalarda ekolojik probleme yol açmaktadır. Kirlenmiş bir çevrenin arındırılması, ekolojik dengeyi korumak için önemli bir konudur. Gelişmiş ülkeler tarafından remediasyon tekniklerinin geliştirilmesi için kapsamlı çalışmalar yürütülmektedir.

Bu nedenle, aşağıdaki maddeler için kirlenmiş alanları değerlendirmek ve karakterize etmek çok büyük önem taşımaktadır:

- Zararlı kirletici maddelerin yoğunluğunu ve mekânsal dağılımını dikkatli bir şekilde belirlemek,
- Uygun remediasyon tekniğinin seçilmesinin dayanağı olan alan remediasyonun ölçüsünü (bölgeleme) belirlemek,
- Kirlenme nedeniyle çevre ve insan sağlığı risklerini değerlendirmek için.

Alan karakterizasyonu ve değerlendirmesi için alana özgü soruların cevaplanması gerekmektedir:

- Kirleticilerin kaynağı nedir?
- Kirleticilerin türü ve fiziksel şekli nedir?
- Kirliliğin mekânsal ve derinlik ölçüsü
- Kirleticilerin sabit ya da hareketli olup olmadığı,
- Eğer kirleticiler hareketliyse, önemli yolların belirlenmesi,
- Kirleticilerin potansiyel alıcılarının belirlenmesi

Uygun bir remediasyon yöntemi, kirleticilerin toksisite düzeyine ve çevre üzerinde teşkil ettikleri risklere dayalı olarak seçilmelidir. Remediasyon, bütün bir arındırmayı amaçlamamaktadır. Esas odak noktası, kirlilik seviyesini, düzenleyici toksik sınırının altına çekmektir. Gelecekte oluşabilecek herhangi bir potansiyel problem engellemede uzun süreli etkilerini analiz etmek için remediasyon teknolojilerinin sürdürülebilirliği son derece önemlidir. Uygun remediasyon tekniğinin seçilmesi için aşağıdaki basamakların izlenmesi gerekmektedir:

*Bilgi boşluklarının belirlenmesi:* Yeterli güven seviyesine tatmin edici risk değerlendirmesi yapmak için yeterli bilgi mevcutsa, gerekli çalışmalar yapılmalıdır. Eğer yeterli bilgi yok ise, daha ileri bir araştırmanın hedeflerinin tanımlanması gerekmektedir.

*Alan güvenliği:* Personeli ya da çevreyi korumak için gerekli olan herhangi bir güvenlik önlemini belirlemek için alanın potansiyel olarak tehlikeli doğası, başlangıçtan itibaren dikkate alınmalıdır.

*Araştırmanın doğası:* Gelecekteki bir araştırmanın amaçları belirlendiği zaman, uygun veriyi toplamak için gerekli olan araştırmanın doğası üzerine karar verilmelidir.

*Örnekleme mekânı ve derinliği:* Numunelerin toplanacağı mekânlar ve derinlikler ve gerekli olan yerlerin sayısı dikkate alınmalıdır.

*Kimyasal analiz:* Araştırma sırasında elde edilen örnekler üzerine hangi analizlerin yapılması gerektiği, alanın tarihi üzerine yapılacak bir araştırma ve saha içinde karşılaşılan durumların göz önünde bulundurulması yoluyla belirlenecektir.

*Örnekleme yöntemi:* Örneklerin toplandığı, korunduğu ve kimyasal test laboratuvarlarına taşındığı yöntemler, göz önünde bulundurulmalıdır.

Danışmanlar ve sorumlu taraflar genellikle en etkili teknolojinin hangisi olacağı ile ilgili tereddüde düşerler, ancak yine de temizleme hedeflerine ulaşırlar. Güvence altına alma ve bütçeleme fonları, kirlilik konusuna değinmek ve çözmek için yenilikçi teknoloji kullanımını gerektiren ciddi bir problem olduğu için, remediasyon sisteminin seçiminde maliyet kilit bir faktördür. Genellikle tek bir remediasyon teknolojisi, bir alanın kirlenmiş toprağını ve/ya da yeraltı sularını kabul edilebilir seviyelerin altına çekmek için remediasyonda yetersiz kalmaktadır.

Şu anda kullanılan çevresel temizlik uygulamaları, esas olarak geleneksel remediasyon tekniklerini içermektedir. Ancak, biyobilimdeki ve biyoteknolojideki gelişmeler, kirlenmiş bir çevreyi temizlemede ve sağlıklı bir ekolojik dengenin korunmasında biyolojik maddelerden (biyoremediasyon) faydalanan son derece etkili, yeni ve sürdürülebilir remediasyon tekniklerinin geliştirilmesini sağlamaktadır. Geleneksel çevresel temizlik tekniklerinin çoğunun yerini yakın gelecekte sürdürülebilir biyolojik remediasyon teknikleri başarılı bir şekilde alacaktır. Biyoremediasyon, kalıcılık, düşük maliyet (diğer teknolojilerden %60–90 daha az), düşük bakım, gözü rahatsız eden hiçbir şey olmaması, kaynak bölgeleri etkileme kapasitesi, alanı arındırma sürecinin azaltılması ve kirleticilerin tam olarak parçalanmış olması gibi birçok avantajlı özelliğe sahiptir.

#### **4. Biyoremediasyon**

Günümüzde çevre kirliliği, dünyadaki kontrolsüz nüfus artışı ve hızlı sanayileşme ve kentleşme nedeniyle evrensel bir sorundur. Kirlenmiş çevrenin, ekolojik denge için uygun remediasyon teknikleri ile temizlenmesi gerekmektedir. Şuanda kullanılan çevresel temizlik uygulamaları esas olarak geleneksel remediasyon tekniklerini içermektedir. Biyobilimdeki ve biyoteknolojideki yeni gelişmeler, son derece etkili yeni ve sürdürülebilir remediasyon



tekniklerinin geliştirilmesini sağlamaktadır. Yakın gelecekte, sürdürülebilir biyoremediasyon tekniklerinin, geleneksel çevresel temizlik tekniklerinin çoğunun yerini başarılı bir şekilde alması beklenmektedir.

#### 4.1. Biyoremediasyonun Strateji Kriterleri

Kirlenmiş alanların temizliği için biyoremediasyonun kullanılmasını değerlendirirken dikkate alınması gereken önemli faktörler bulunmaktadır. Bu faktörler, aşağıda farklı başlıklar altında açıklanmıştır.

##### 4.1.1. Kirleticilerin büyüklüğü, toksitesi ve hareketliliği

Kirlenmiş alanların uygun bir şekilde araştırılması ve karakterize edilmesi aşağıdaki gibi yapılmalıdır:

- Kirliliğin yatay ve dikey boyutu
- Alandaki kirleticilerin doğası
- Kirleticilerin gelecekteki olası hareketliliği

##### 4.1.2. Kirlenmiş Alanın Jeofiziksel, Jeokimyasal ve Biyolojik Özellikleri

**Toprak yapısı**, düşükten yükseğe değişiklik gösteren kum, silt ve kil içeriği ile farklı dokular içermektedir. Taneli ve iyi yapılandırılmış bir toprak *in situ* biyoremediasyon için havanın, suyun ve besinlerin mikroorganizmalara etkili bir şekilde ulaşmasını kolaylaştırabilir.

**Nem içeriği** (su) toprağın ve diğer ortamların dielektrik sabitini belirlemede önde gelen faktörlerdendir. Toprağın nem içeriği genellikle % 25 – 28 arasında değişiklik göstermektedir.

**pH** (hidrojen gücü), mikropların büyümesi için ve kirleticileri yok etmek için optimum aralık olan 5.5-8.0 arasında değişiklik göstermektedir.

**Sıcaklık**, 15- 45 ° C arasında değişir. Sıcaklık, biyokimyasal reaksiyon hızlarını etkiler ve bu tepkime hızları sıcaklıktaki her 10 °C artış ile ikiye katlanır.

**Oksijen**, esas olarak kirlenmiş alanlardaki hidrokarbonların ilk parçalanışları için kullanılmaktadır. Mevcut oksijen miktarı, biyoremediasyonun, aerobik (oksijenli) ya da anaerobik (oksijensiz) koşullar altında yapılıp yapılmayacağını belirleyecektir.

**Mikrobiyal çeşitlilik** kirlenmiş bir alanda *Pseudomonas*, *Aeromonas*, *Flavobacterium*, *Chlorobacteria*, *Corynebacteria*, *Acinetobacter*, *Mikrobacterium*, *Streptomyces*, *Basil*, *Arthrobacter*, *Aeromonas*, -*Siyanobakteri*, vb. gibi mikrobiyal varlıktır.

**Makrobentos çeşitlilik**, *Eichornia crassipes*, *Salvinia molesta*, *Ceratophyllum demersum* gibi suda yaşayan bitkiler birliği ve bulanıklığın, biyokimyasal oksijen talebinin, kimyasal oksijen



talebinin, amonyağın, nitratın ve evsel atık sulardaki nitratın bozulması için yüksek potansiyeli olan *Anodonta woodiana* and *Limnodrilus hoffmeisteri* gibi suda yaşayan hayvanlar birliğidir.

#### **4.1.3. İnsan ve Çevre Alıcılarının Yakınlığı**

Bir alanın, çevrenin temizlenmesi için biyoremediasyonun uygun olup olmadığı, kirleticilerin parçalanma hızının ve kapsamının, insan alıcıları ve çevresel alıcılar için risk seviyesini düşük tutmak için yeterli olup olmadığına bağlıdır.

#### **4.1.4. Kirleticilerin Parçalanabilirliği**

Petrol hidrokarbon gibi bir bileşen, çevrede doğal olarak oluşuyorsa o bileşenin biyolojik parçalanması genellikle yüksektir. Bunun aksine, yüksek moleküler ağırlığı olan sentetik bileşenler ( karmaşık halka yapıları ve halojen maddeler) daha basit düz zincirli hidrokarbonlara göre daha yavaş parçalanmaktadır.

#### **4.1.5. Planlanan Alan Kullanımı**

Biyoremediasyonun, bir alan için uygun arındırma yöntemi olup olmadığına karar verilmesi, kirleticilerin parçalanma hızının ve kapsamının, riskleri kabul edilebilir seviyelere indirmek için yeterli olup olmamasına bağlıdır.

#### **4.1.6. Düzgünce İzleme Yeteneği**

Çevresel faktörler, kirleticilerin biyo-yararlanımlarını, diğer besinlerin kullanılabilirliğini, biyolojik süreçlerin etkinliğini (örn; sıcaklık ve pH) ve kirleticilerin, alanın jeokimyasal ve jeolojik özellikleri ile nasıl etkileşimde bulunduğu dair kirletici özelliklerini etkileyen kimyasal ve fiziksel özellikleri içermektedir.

#### **4.1.7. Araştırma ve Teknik Yönler**

Petrol hidrokarbonlar, alkoller ve çözücüler dâhil olmak üzere bir dizi biyolojik olarak parçalanabilen kirleticiler olmasına rağmen, poliklorlu bifeniller (PCBs), pestisitler, kömür katranları, klorlu çözücüler ve polinükleer aromatik hidrokarbonlar gibi yaygın olarak kullanılan birçok endüstriyel kimyasallar o kadar kolay parçalanmamaktadır. Bu nedenle, daha yoğun bir araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır, ancak bu tür bir temel araştırmanın finansmanı azalmaktadır. Geleneksel arındırma teknolojilerinin aksine, biyoremediasyon tekniğinin kirlenmiş olan her bir alana özel tasarlanması gerekmektedir. Her bir atık alanının kendine has özellikleri vardır ve bu nedenle de bireysel ilgi gerektirmektedir. Belirli bir stratejinin başarısını ya da başarısızlığını değerlendirmek için henüz resmi bir kriter belirlenmemiştir.

#### **4.1.8. İnsan Kaynakları**

Biyoremediasyon yeni bir teknoloji olduğu için, bu alanda yetişmiş insan kaynakları eksikliği bulunmaktadır. Başarılı bir biyoremediasyon programı, mikrobiyoloji, mühendislik, jeoloji,

hidrojeoloji, toprak bilimi ve proje yönetimi gibi alanları birleştiren multidisipliner bir yaklaşım gerektirmektedir. Üniversiteler, biyoremediasyon mühendisliğinde yeterlik sunmamaktadır ve böylesi bir birleştirilmiş uzmanlık, sadece deneyim ve eğitim yoluyla elde edilebilir.

#### **4.1.9. Kirleticilerin Parçalanabilirliği**

Diğer endüstrilerin aksine, biyoremediasyon yüksek katma değerli ürünlerin üretimi ile sonuçlanmamaktadır. Bu nedenle, risk sermayesi teknolojiye yatırım yapmakta yavaş kalmıştır ve sonuç olarak da araştırma ve geliştirmedeki ticari faaliyetler diğer endüstriyel sektörlerin gerisinde kalmıştır. Biyoremediasyon yenilikçi bir teknoloji olarak görüldüğü için, müşteriler ve düzenleyici kurumlar, geleneksel teknolojilere göre biyoremediasyonu sık sık daha yakından incelemektedir. Sonuç olarak, diğer remediasyon teknolojilerine kıyasla, biyoremediasyon üzerine çoğu zaman daha sıkı kısıtlamalar ve performans standartları getirilmektedir. Biyoremediasyon programı, önceden belirlenmiş olan hedefleri gerçekleştirmezse, bu en sonunda sorumluluk açısından daha büyük risklere yol açabilir.

#### **4.2. Biyoremediasyon Teknolojileri**

Biyoremediasyon teknolojileri, *in-situ* (saha içi), *ex-situ* (saha dışı), biyoreaktör, doğal yavaşlatma ve bitkisel-remediasyon olmak üzere beş tekniğe ayrılabilir. Bu teknikler, ilk olarak şu iki şeyi yapmaktadır: ya kirleticileri alt tabakadan kaldırırlar (arındırma ya da tasfiye teknikleri) ya da maruz kalmayı azaltarak kirleticilerin yarattığı riskleri azaltırlar (stabilizasyon teknikleri).

##### **4.2.1. *In-situ* Biyoremediasyon Teknikleri**

Biyoremediasyon teknikleri, kirlenmiş matrisin havadan, sudan ve topraktan çıkarılmadan yerinde temizlenmesidir. Bu tekniklerin avantajları ve dezavantajları Tablo 4.1’de verilmiştir. Yaygın olarak kullanılan *in-situ* arındırmaları şu şekildedir:

##### **Bioventing (Biyo-havalandırma)**

Biyo-havalandırma, yerel bakterileri harekete geçirmek için kuyular aracılığıyla kirlenmiş toprağa hava ve besin temin etmeyi içermektedir. Eğer kirlilik yüzeyin altında derinde ise, çevresel arındırma için bu teknik kullanılabilir. Biyo-havalandırma, düşük hava akım hızı sağlar ve kirleticilerin atmosfere salınımını ve buharlaşmasını en aza indirirken, sadece biyolojik parçalanma için gerekli olan oksijen miktarını sağlar.

##### **Biyodegradasyon (Biyo-ayırışma/parçalanma)**

Biyodegradasyon, organik kirleticileri parçalamak için kirlenmiş alanda ortaya çıkan çok sayıda organizmayı harekete geçirmek amacıyla kirlenmiş toprakların içinde sulu çözeltileri dolaştırarak oksijen ve besin teminini içermektedir. Genel olarak bu teknik, kirlenmiş topraklar ve yeraltı suları için kullanılabilir.

### **Biosparging (biyo-serpme)**

Bu yöntem, doymuş alandaki organik maddeleri ayrıştırmak için yerel mikroorganizmaları kullanan *in-situ* remediasyon teknolojilerinden birisidir. Doğal olarak oluşan mikroorganizmaların biyolojik faaliyetlerini arttırmak için, hava ve besinler doymuş bölgeye enjekte edilir. Biyolojik serpme, petrol bileşenlerinin kirlettiği yeraltı suyunu ve toprağı temizlemek için kullanılır. Küçük çaplı hava enjeksiyon noktalarının kurulum kolaylığı ve düşük maliyeti, sistemin tasarımında ve yapımında önemli esneklik sağlamaktadır.

### **Bio-augmentasyon (biyo-büyüme)**

Bu yöntem, kirlenmiş sahalarda doğal olarak oluşan ya da bu sahalara dışarıdan getirilen mikroorganizmaların eklenmesini içermektedir. Bu yöntem, özellikle inorganik bileşenleri olan kirlenmiş toprak için faydalıdır.

### **Biostimulasyon (biyo-canlandırma)**

Biostimulasyon, havalandırma, besin maddelerinin eklenmesi, pH ve sıcaklık kontrolü gibi durumları optimize ederek kirletici maddelerin ayrışmasını arttırabilen doğal bir remediasyon türüdür. Bu yöntem, petrol kirleticilerinin topraktan çıkarılması için uygun bir remediasyon tekniği olarak kabul edilebilir ve hem yerli mikrofloraların içsel parçalanma kapasitelerinin hem de *in-situ* süreçlerinin kinetiğinde yer alan çevresel parametrelerin değerlendirilmesini gerektirmektedir.

**Tablo 4.1.** *In-situ* tekniklerinin avantajları ve dezavantajları

Avantajlar	Dezavantajlar
<ul style="list-style-type: none"><li>• Toprağı kazmaya ve taşımaya gerek yoktur- genel olarak daha ucuzdur.</li><li>• Tek seferde büyük miktarda toprağı arındırabilir.</li><li>• <i>Ex-situ</i> tekniklerine kıyasla daha az kirleticinin açığa çıkmasına yol açar.</li><li>• Daha az toz oluşturur.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Killerde/ yüksek katmanlı yeraltı ortamlarında en az etkilidir. Oksijen, arındırma yapılan alan geneline eşit miktarda dağıtılamaz.</li><li>• Arındırma hedefine ulaşmada daha yavaş kalabilir (eğer daha zor parçalanabilen bir kirleticiyse, yıllar alabilir)</li></ul>

<ul style="list-style-type: none"><li>• Toprak geçirgen kumlu bir topraksa (sıkıştırılmış), en etkilidir.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Başa çıkması daha zor olabilir (<i>ex-situ</i> teknolojilerine kıyasla)</li><li>• Mikrobiyal aktivitenin mevsimsel değişimleri bulunmaktadır.</li><li>• Alanlar, sıcaklık, oksijen temini vb. gibi çevresel faktörlere doğrudan maruz kalmaktadır.</li><li>• Besinler, yüzey aktif maddeler, oksijen vb. gibi arındırma katkı maddelerinin problemlili uygulaması</li><li>• Çok yorucu ve zaman alıcı bir süreçtir.</li></ul>
---	---

#### 4.2.2. *Ex-situ* Biyoremediasyon Teknikleri

*Ex-situ* teknolojileri, etkilenen toprağın (kazı) ve suyun (pompalama) orijinal yerlerinden alınıp *in-situ* (sahada) ve *ex-situ* (saha dışında) temizlendiği remediasyon seçeneğidir. En önemli *ex-situ* biyoremediasyon arındırma süreçleri, arazi tarım, biopiles (biyo-yığın) ve kompostlamayı (çürütme) içermektedir. Bu tekniklerin avantajları ve dezavantajları Tablo 4.2’de verilmiştir.

##### **Tarımsal Uygulamalar**

Bu teknik uygulamaları, petrolle kirletilmiş toprak için en kolay ve en etkili yöntemdir. Temel amacı, doğal yollarla biyolojik olarak parçalanabilen organizmaları harekete geçirmek ve kirleticilerin aerobik (havalı) ayrışmasını kolaylaştırmaktır. Tarımsal uygulamalar, temizleme sorumluluklarının yanı sıra izleme ve bakım maliyetlerini düşürme potansiyeli olduğu için alternatif bir bertaraf tekniği olarak çok ilgi görmüştür. Ancak, bu uygulama toprağın 10- 35 cm yüzeyinin temizlenmesi ile sınırlıdır.

##### **Kompostlama (Çürütme)**

Kompostlama yöntemi, termofilik koşullar altındaki (40- 65° C) mikroorganizmalar tarafından organik atıkların ayrıştırılması sürecidir. Bu metot, petrol hidrokarbonları, çözücüler, klorofenoller, pestisitler, herbisitler, PAHs ve nitro aromatik patlayıcılarla kirlenmiş olan topraklara ve biyokatılara uygulanmaktadır.

##### **Biopiles (Biyo-yığın)**

Biopiles, arazi tarımının ve kompostlamanın hibrit bir sistem olarak kullanıldığı bir biyoremediasyon teknolojisidir. Yıkama ve buharlaşma yoluyla kirleticilerin fiziksel kayıplarını kontrol altında tutmaya çalışan arazi tarımının rafine bir versiyonu olan bu teknik,

petrol hidrokarbonları ile oluşan yüzey kirlenmelerinin bertarafı için kullanılmaktadır. Biopiles, petrolle kirlenmiş topraklar için uygulanabilir, uygun maliyetli ve daha az yıkıcı bir remediasyon tekniği olarak görülmektedir.

**Tablo 4.2.** *Ex-situ* tekniklerinin avantajları ve dezavantajları

Avantajlar	Dezavantajlar
<ul style="list-style-type: none"><li>• <i>Ex-situ</i> teknikleri, <i>in-situ</i> tekniklerine kıyasla daha hızlı, kontrolü daha kolay ve daha geniş bir kirletici çeşitlerinde ve toprak tiplerinde kullanılır.</li><li>• Toprağı homojenleştirme, tarama ve sürekli olarak toprağı karıştırma yeteneği nedeniyle arındırmanın benzerliği ile ilgili daha fazla kesinlik vardır.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Toprağın kazılmasını gerektirir, bu da ekipman için artmış maliyete ve planlamaya neden olur.</li><li>• Malzeme taşıma/işçi maruziyet koşulları için daha fazla risk</li><li>• Genellikle biyoremediasyon aşamasından önce bazen de sonrasında kirlenmiş toprağın temizlenmesini gerektirmektedir.</li></ul>

#### 4.2.3. Biyoreaktörler

Farmasötikler gibi maddelerin biyoteknolojik üretimlerinde kullanılan büyüyen organizmalar (bakteri ya da maya) için büyük bir fermantasyon odasıdır. Ayrıca zararlı atıkların daha az zararlı maddelere dönüştürülmesi için kullanılır. Bu teknik, yakıt hidrokarbonları ve organikleriyle kirlenmiş olan toprağı ve suyu remediasyon için kullanılır. Biyoreaktörün kuru ve sulu olmak üzere iki fazı vardır. Sulu fazlı biyoremediasyon, kuru fazlı ile karşılaştırıldığında nispeten daha hızlı bir süreçtir. Sulu fazlı biyoreaktörde, kirlenmiş toprak büyük bir odada su ve diğer katkı maddeleriyle birleştirilir. Sulu fazın aksine, kuru fazlı biyoreaktör, ekstra su içermez. Bu tekniğin avantajları ve dezavantajları Tablo 4.3'te verilmiştir.

**Tablo 4.3.** Biyoreaktör tekniğinin avantajları ve dezavantajları

Avantajlar	Dezavantajlar
<ul style="list-style-type: none"><li>• Nispeten daha hızlı arındırma</li><li>• Azaltılmış pelet oluşumu</li><li>• Artmış sulu homojenleştirme</li><li>• Artmış biyo-yararlanım</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Toprak-su ayırma problem olabilir.</li><li>• Toprağın suyu alındıktan sonra atık su artıma ihtiyacı olmaktadır.</li></ul>

#### 4.2.4. Doğal Azalım

Doğal azalım, topraktaki, yeraltı ve yüzey suyundaki kirleticilerin (organik ve inorganik) kütlelerini, toksisitesini, hareketliliğini, hacmini ve yoğunluğunu azaltmaya yönelik bir süreçtir. Bu süreçler, fiziksel, kimyasal ve biyolojik olarak gruplandırılmaktadır. Fiziksel olgular; adveksiyon, dağılım, seyreltme, difüzyon, buharlaşma ve emilim/dışarı salmadır. Kimyasal süreçler; iyon değişimi, karmaşıklaştırma ve abiyotik (cansız) dönüşümdür. Biyolojik süreçler ise aerobik ve anaerobik biyodegradasyon, bitki ve hayvan naklidir. Doğal azalım, uygun maliyetli bir remediasyon teknolojisidir. Bu tekniğin avantajları ve dezavantajları Tablo 4.4'te verilmiştir.

Doğal azalımı, arındırma işlemi olarak kullanmak için, alanların aşağıdaki kriterlerden birini ya da birkaçını karşılaması gerekmektedir:

- İnsan sağlığına ve çevreye çok az risk teşkil eden bir alanda bulunmalıdır.
- Kirlenmiş toprak ya da yeraltı suyu, potansiyel alıcılara yeterli bir mesafede yer almalıdır.
- Doğal azalımın gerçekten de alanda oluştuğuna dair kanıt olmalıdır.
- Yüksek geçirgenlik, kirleticilerin yayılmasını hızlandırır, düşük geçirgenlik ise bozulmayı yavaşlatır. İdeal olarak, doğal azalım en iyi, geçirgenlik oranı yüksek ve düşük arasında bir yerde olan topraklarda işe yaramaktadır.

**Tablo 4.4.** Doğal azalım tekniğinin avantajları ve dezavantajları

Avantajlar	Dezavantajlar
<p><i>In-situ</i> imhada hiçbir atık oluşmaz ve çapraz ortam transferi olmaz.</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• İnsan sağlığına ve çevreye çok az risk teşkil eder.</li><li>• En toksik ve hareketli kirleticiler genellikle en hızlı ve güvenli şekilde ayrışır.</li><li>• Kesintisiz</li><li>• Uygun maliyetli</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Yeraltı suyunun çıkarılması ve arındırılması ile remediasyon süresi kadar zaman çerçevesi</li><li>• Uzun süreli izleme</li><li>• Akifer heterojenliği, alan karakterizasyonunu karmaşıklaştırır (doğal azalıma özgü değildir).</li><li>• Biyodegradasyon araçları orijinal kirleticilerden daha toksik olabilir.</li></ul>

<ul style="list-style-type: none"><li>• Diğer remediasyonlarla kolaylıkla birleştirilir.</li><li>• Ekipman arızaları nedeniyle aksaklık süresi yoktur.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Bazen diğer remediasyon tekniklerine göre, özellikle de pompalama ve arındırma, daha pahalı olabilir (izleme gereksinimlerinden dolayı).</li></ul>
--	--

#### 4.2.5. Fitoremediasyon

Fitoremediasyon, topraktaki, tortulardaki, çökeltilerdeki, atık sularındaki, yeraltı sularındaki ve havadaki kirleticileri çıkarmak, taşımak, stabilize etmek ve yok etmek için çeşitli bitki türlerini ve ilişkili mikroorganizmaları kullanan bir biyoremediasyon tekniğidir. Bitkiler, toksik organik ya da inorganik maddelerin varlığını gösterebilir, engelleyebilir, biriktirebilir yada yüksek miktarda biriktirebilirler. Bu nedenle de kimyasalların kaderine önemli ölçüde katkıda bulunurlar ve biyosferden istenmeyen bileşenleri kaldırmak için kullanılabilirler. Fitoremediasyon, toksik kirleticilerin çevreden temizlenmesi için çevre dostu, uygun maliyetli ve karbon nötr bir yaklaşım sunmaktadır. Bu tekniğin avantajları ve dezavantajları Tablo 4.5'te verilmiştir.

Fitoremediasyon mekanizmaları, fito-ekstraksiyon, fito-stabilizasyon, fito-buharlaştırma, fito-degradasyon, fito-akümülyasyon, rizo-filtreleme, rizosfer biyodegradasyon ve hidrolik kontrolü kapsamaktadır. Bu mekanizmalar Şekil 4.1'de gösterilmektedir.

##### **Fito-ekstraksiyon**

Fito-ekstraksiyon, kirleticilerin toprak, çökelti ve sudan arındırılması için bitkileri ya da yosunları kullanır. Bu mekanizmada, bitkiler, kendi kök sistemleri ile topraktan ağır metalleri ya da radyonüklitleri çıkarır ve bunları köklerinde biriktirir ya da gövdesine ya da yapraklarına taşır. Bitkiler, hasat edilene kadar kirleticileri çıkarmaya devam eder. Hasattan sonra, kirlenmiş toprak önemli derecede arınma seviyesine ulaşmıyorsa, önemli derecede bir arınma elde etmek için büyüme/hasat döngüsünün birkaç ürün boyunca tekrar edilmesi gerekmektedir.

Fito-ekstraksiyon başlıca avantajı, çevre dostu olmasıdır. Toprak kalitesinde herhangi bir zarara yol açmamaktadır. Fito-ekstraksiyonun diğer bir faydası da diğer arındırma işlemlerinden daha ucuz olmasıdır. Bu süreç bitkiler tarafından kontrol edildiği için, herhangi bir geleneksel toprak temizleme işleminden daha uzun sürmektedir.

##### **Fito-stabilizasyon**

Bu mekanizmada, bitkiler toprak ve sudaki kirlenmiş kimyasal bileşenleri hareketsiz hale getirir. Kirleticiler, köklerle alınır ve rizosferde çökeltilir. Bu, kirleticinin besin zincirine girmesini engeller.



### **Fito-buharlaşma**

Bu mekanizmada, organik kirleticiler içeren su, bitkiler tarafından alınır ve kirletici maddeler bitkilerin yaprakları ile havaya salınırlar. Su, bitkinin iletim sistemi boyunca kökünden yapraklarına kadar ilerlediği esnada suda bulunan kirleticiler değişikliğe uğratılabilir, ve sonra bitkiyi saran havaya buharlaşır ya da uçucu hale gelebilir.

### **Fito-degradasyon**

Bu mekanizmada, kirleticiler (organik) bitkilerin dokularında metabolize edilir ve yok edilir. Bu kk kirletici moleküller daha sonra bydk bitki tarafından metabolitler olarak kullanılabilir, böylece de bitki dokularına dahil olurlar.

### **Fito-akümülasyon**

Bu mekanizmada, kirletici maddeler, diğer besinler ve suyla birlikte bitki kökleri tarafından alınır. Bu kirletici kütle, bitki sürgünlerinde ve yapraklarında yok edilmez, aksine biriktirilir.

### **Rizo-filtreleme**

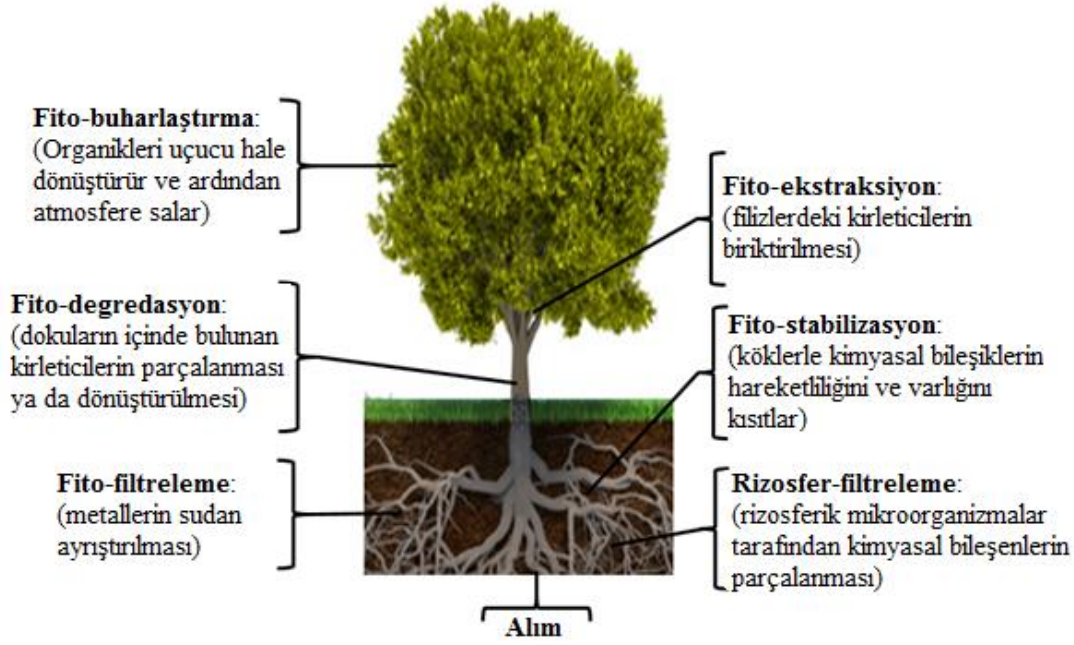
Bu mekanizma, kirlenmiş sudan (yüzey ya da yeraltı) metali absorbe etmek, yoğunlaştırmak ve okeltmek için hem karada hem de suda yaşayan bitkileri kullanır.

### **Rizosfer biyodegradasyonu (Rizodegradasyon)**

Bu mekanizmada, bitkiler, topraktaki mikroorganizmalara besin temin eden kökleri aracılığıyla yaygın maddeleri boşaltır. Böylece mikroorganizmalar biyolojik ayrışmayı arttırır. Örneğin, bitki kökleri, toprak mikroflorası için karbonhidrat kaynaklarını (şeker, alkoller, ve organik asitler) dışarı sızdırır. Bu bileşikler mikrobiyal büyümeyi ve faaliyeti arttırır ve ayrıca mikroplar için kemotaktik sinyal işlevini görürler.

### **Hidrolik kontrol**

Bu mekanizmada, kirlenmiş yeraltı suyu ağaçlar tarafından iyileştirilir.



Şekil 4.1. Fitoremediasyon mekanizmaları

Tablo 4.5. Fitoremediasyon tekniğinin avantajları ve dezavantajları

Avantajları	Dezavantajları
<ul style="list-style-type: none"><li>• Fitoremediasyon, kirlenmiş suyun arıtılması için eski “pompalama ve arındırma” yönteminden daha ucuzdur.</li><li>• Fitoremediasyon, ayrıca kirlenmiş alanın kazılmasından da daha ucuzdur.</li><li>• Basitçe ağaç dikerek ve bu ağaçların büyümesine izin vererek suda bulunan TCE'nin %95'ine kadar olan bir miktarını temizleyebilir.</li><li>• Fitoremediasyon, kurulduktan sonra herhangi bir bakım istemez.</li><li>• Fitoremediasyon bitkileri kullandığı için, estetik olarak da hoştur.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Fitoremediasyon, kirletici madde yoğunluklarının düşük olduğu alanlarla sınırlıdır.</li><li>• Fitoremediasyon, kullanılan bitkilerin kökleri kadar derin kirlilik olan alanlarla sınırlıdır.</li><li>• Besin zinciri, kimyasalların ayrışmasından olumsuz etkilenebilir.</li><li>• Hava, tehlikeli kimyasallar içeren bitkilerin yapraklarının ve dallarının yanmasıyla kirlenebilir.</li></ul>

<ul style="list-style-type: none"><li>• Bitkiler dikildikten sonra, bir zamanlar yaşama elverişsiz olan alanlarda yaban hayatı gelişebilir.</li><li>• Temizleme faaliyeti için güneş enerjisi kullanılır.</li></ul>	
---	--

## 5. KAYNAKLAR

- Albergaria José Tomás, F. G. Martins, M. C. M. Alvim-Ferraz, C. Delerue-Matos, (2014). Multiple Linear Regression and Artificial Neural Networks to Predict Time and Efficiency of Soil Vapor Extraction. *Water Air Soil Pollut* 225:2058.
- Andreozzi Roberto, Vincenzo Caprio, Amedeo Insola, Raffaele Marotta, (1999). Advanced oxidation processes (AOP) for water purification and recovery. *Catalysis Today* 53 (1999) 51–59.
- Baker A.J.M, Brooks R.R., (1989). Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements. A review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery* 1:81-126.
- Brooks R.R., Lee J., Jaffre T., (1974). Some New Zealand and New Caledonian plant accumulators of nickel. *Journal of Ecology* 62: 493-499.
- Brooks R.R., Lee J., Reeves R.D., Jaffre T., (1977). Detection of nicheliferos rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants. *Journal of Geochemical Exploration* 7: 49-57.
- Cameron, R.E., (1992). Guide to Site and Soil Description for Hazardous Waste Site Characterization. Volume 1: Metals. Environmental Protection Agency EPA/600/4-91/029.
- Carter, A., (2000). How pesticides get into water – and proposed reduction measures. *Pesticide Outlook*, 2000, 149-156.
- Celik, A and Demirbas A., (2005). A Removal of heavy metal ions from aqueous solutions via adsorption onto modified lignin from pulping wastes. *Energy Sources* Volume: 27, Issue 12 : 1167-1177.
- Chaney R., Malik M., Li Y.M., Brown S.L., Brewer E.P., Angle J.S., Baker A.J.M., (1997). Phytoremediation of soil metals. *Current Opinion in Biotechnology* 8: 279-284.

- Chen Zhi-Feng and Ying Guang-Guo, (2015). Occurrence, fate and ecological risk of five typical azole fungicides as therapeutic and personal care products in the environment: A review. *Environment International* Volume 84: 142–153.
- Datta AS, A Chakraborty, SS De Dalal, SC Lahiri, (2014). Fluoride contamination of ground water in West Bengal, India Datta, Chakraborty, De Dalal, Lahiri 241 241 Fluoride Contamination of Underground Water in West Bengal, India. *Research report Fluoride* 47(3)241–248.
- Dermont G., Bergeron M., Mercier G., Richer- Laflèche M., (2008). Soil washing for metal removal: A review of physical/chemical technologies and field applications. *Journal of Hazardous Materials* Volume 152, Issue 1: 1–31.
- Denix, (1995). Natural attenuation for petroleum-contaminated sites at federal facilities. Defense Environmental Network and Information exchange, <http://www.denix.osd.mil/denix/Public/Library/Attenuation/attenuation.html>.
- Ellis D.R., Salt D.E., (2003). Plants, selenium and human health. *Current Opinion in Plant Biology* 6: 273-279.
- EPA/630/R-95/002F April 1998 Guidelines for Ecological Risk Assessment (Published on May 14, 1998, Federal Register 63(93):26846-26924.
- Feng Y., Zhang C., Zhong, Z., (2015). Pump-and-Treat Remediation for Organophosphorus Contaminated Groundwater, in an Agrochemical Brownfield International Conference on Energy, Environment and Chemical Engineering (ICEECE) Bangkok, Thailand June 28-29 2015. Pages: 24-28.
- Fulekar M.H., Geetha M, (2008). Bioremediation of chlorpyrifos by *Pseudomonas aeruginosa* using scale up technique. *Journal of Applied Biosciences*, 12: 657-660.
- Fulekar M.H., (2009). Bioremediation of fenvalerate by *Pseudomonas aeruginosa* in a scale up bioreactor. *Romanian Biotechnological Letters*, 14 (6): 4900-4905.
- Fulekar M.H., (2010). *Environmental Biotechnology*. CRC Press and Science Publisher, USA.
- Gemici, Ü., Tarcan, G., Helvacı, C., Somay, A.M., (2008). High arsenic and boron concentrations in groundwaters related to mining activity in the bigadiç borate deposits (Western Turkey). *Appl. Geochem.* 23 (8), 2462–2476.
- Glossary of Environment Statistics, Studies in Methods, Series F, No. 67, United Nations, New York, 1997 (<http://stats.oecd.org/glossary> from available 10.11.2015).

- Goodarzi, F and Huggins, FE, (2001). Monitoring the species of arsenic, chromium and nickel in milled coal, bottom ash and fly ash from a pulverized coal-fired power plant in western Canada. *Journal of Environmental Monitoring* Volume: 3, Issue: 1: 1-6.
- Grasso, D., (1993). *Hazardous waste site remediation, source control*. Connecticut: Lewis Publisher Inc.
- Hildenbrand Zacariah L., Alexandra Osorio, Doug D. Carlton Jr., Brian E. Fontenot, Jayme L. Walton, Laura R. Hunt, Hyppolite Oka, Dan Hopkins, Bryan Bjorndal, and Kevin A. Schug, (2015). *Rapid Analysis of Eukaryotic Bioluminescence to Assess Potential Groundwater Contamination Events*. Hindawi Publishing Corporation *Journal of Chemistry*: 1-6.
- Ikonomou M.G., P. Sather, Jeong-Eun Oh, Won-Yong Choi, Yoon-Seok Chang, (2002). PCB levels and congener patterns from Korean municipal waste incinerator stack emissions. *Chemosphere* 49: 205–216.
- Jadia C.D., Fulekar M. H., (2009). *Phytoremediation of heavy metals: Recent techniques*. *African Journal of Biotechnology* Vol. 8 (6), pp. 921-928.
- Khan Faisal I, Tahir Husain, Ramzi Hejazi, (2004). An overview and analysis of site remediation Technologies. *Journal of Environmental Management* 71: 95–122.
- Khan, F.I., Husain, T., (2003). Evaluation of a petroleum hydrocarbon contaminated site for natural attenuation using ‘RBMNA’ methodology. *Environmental Modeling and Software* 18, 179–194.
- Khan S., Q. Cao, Y. M. Zheng, Y. Z. Huang, and Y. G. Zhu, (2008). Health risks of heavy metals in contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing, China. *Environmental Pollution*, vol. 152, no. 3, pp. 686–692.
- Khan, K., Lu, Y., Khan, H., Ishtiaq, M., Khan, S., Waqas, M., Wei, L., & Wang, T., (2013a). Heavy metals in agricultural soils and crops and their health risks in Swat District, northern Pakistan. *Food and Chemical Toxicology*, 58, 449–458.
- Khan, K., Lu, Y., Khan, H., Zakir, S., Ihsanullah, Khan, S., Khan, A. A., Wei, L., & Wang, T., (2013b). Health risks associated with heavy metals in the drinking water of Swat, northern Pakistan. *Journal of Environmental Sciences*, 25, 2003–2013.
- Kinney CA, Mandernack KW, Moiser AR, (2005). Laboratory investigations into the effects of the pesticides mancozeb, chlorothalonil, and prosulfuron on nitrous oxide and nitric oxide production in fertilized soil. *Soil Biol Biochem* 37: 837–850.

- Kreuger J, Peterson M, Lundgren E., (1999). Agricultural inputs of pesticide residues to stream and pond sediments in a small catchment in Southern Sweden. *Bull Environ Contam Toxicol* 62: 55–62.
- Kumar A, Bisht B.S, Joshi V.D., Dhewa T., (2011). Review on Bioremediation of Polluted Environment: A Management Tool. *International Journal of Environmental Science*. Volume 1, No.6: 1079-1093.
- Kumar Adarsh and Kumar Maiti Subodh, (2015). Assessment of potentially toxic heavy metal contamination in agricultural fields, sediment, and water from an abandoned chromite-asbestos mine waste of Roro hill, Chaibasa, India *Environ Earth Sci*. 74: 2617–2633.
- Mangunwardoyo W, Sudjarwo T, Patria MP., (2013). Bioremediation of effluent wastewater treatment plant Bojongsoang Bandung Indonesia using consortium aquatic plants and animals. *Int J Res Rev Appl Sci* 14(1):150–160.
- Margesin, R., Schinner, F., (2001). Bioremediation (natural attenuation and biostimulation) of diesel-oil-contaminated soil in an alpine glacier skiing area. *Appl. Environ. Microbiol.* 67, 3127-3133.
- Massmann, G., Sültenfuß, J., Dünnbier, U., Knappe, A., Taute, T., Pekdeger, A., (2008). Investigation of groundwater residence times during bank filtration in Berlin: a multitracer approach. *Hydrol. Process.* 22 (6), 788–801.
- Milner M.J., Kochian L.V., (2008). Investigating heavy-metal hyperaccumulation using *Thlaspi caerulescens* as a model system. *Annals of Botany*. 102: 3-13.
- Mohamed A.M.I., Nabil El-menshawy, Amany M. Saif, (2007). Remediation of saturated soil contaminated with petroleum products using air sparging with thermal enhancement Volume 83, Issue 3: 339–350.
- Mulligan C.N., R.N. Yong, B.F. Gibbs (2001). Remediation technologies for metal-contaminated soils and groundwater: an evaluation. *Engineering Geology* Volume 60, Issues 1–4: 193–207.
- Nawab, J., Khan, S., Shah, M. T., Khan, K., Huang Q., & Ali, R., (2015) Quantification of heavy metals in mining affected soil and their bioaccumulation in native plant species. *International Journal of Phytoremediation*, 17, 801–813.
- Ng Y.S., B. SenGupta, M.A.Hashim, (2014). Performance Evaluation of Two-Stage Electrokinetic Washing as Soil Remediation Method for Lead Removal using Different Wash Solutions. *Electrochimica Acta* 147: 9–18.



- Ngole V. M. and G. I. E. Ekosse, (2012). Copper, nickel and zinc contamination in soils within the precincts of mining and landfilling environments. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 9: 485–494.
- Nicholas J. Bero, Matthew D. Ruark, Birl Lowery, (2016). Bromide and chloride tracer application to determine sufficiency of plot size and well depth placement to capture preferential flow and solute leaching. *Geoderma* Volume 262, 15 January 2016, Pages 94–100.
- Nriagu, J. O., (1988). Production and uses of Chromium. In Jo. Nriagu, & E. Niebner (Eds.), *Chromium in the natural and human environments* (pp. 81–104). New York: Wiley.
- Pandey B. and Fulekar M.H., (2012). Bioremediation technology: A new horizon for environmental clean-up. *Biology and Medicine*, 4 (1): 51-59, 2012
- Pastircakova K., (2004). Determination of trace metal concentration in ashes from various biomass materials. *Energy Edu. Sci. Technol.* 13: 97-104.
- Parween Talat, Sumira Jan, Sumira Mahmooduzzafar, Tasneem Fatma and Zahid Hameed Siddiqui, (2016). Selective Effect of Pesticides on Plant A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56: 160–179.
- Perelo Louisa Wessels, (2010). Review: *In situ* and bioremediation of organic pollutants in aquatic sediments. *Journal of Hazardous Materials* 177: 81–89.
- Petersen DG, Dahllof I, Nielsen LP., (2004). Effects of zinc pyriithione and copper pyriithione on microbial community function and structure in sediments. *Environ Toxicol Chem.* 23: 921–928.
- Prasad M.N.V., Helena Freitas, Stefan Fraenzle, Simone Wuenschman, Bernd Markert, (2010). Knowledge explosion in phytotechnologies for environmental solutions. *Environmental Pollution* 158 (2010) 18–23.
- Ptak Corey and McBride Murray, (2015). Organically Complexed Iron Enhances Bioavailability of Antimony to maize (*Zea mays*) Seedling in Organic Soil. *Environmental Toxicology and Chemistry*, Vol. 34, No. 12, pp. 2732–2738.
- Radovanovi Dragana Đ., Zeljko J. Kamberovi, Marija S. Kora and Jelena R. Rogan, (2016). Solidified structure and leaching properties of metallurgical wastewater treatment sludge after solidification/stabilization process *Journal of Environmental Science and Health, Part A* Vol. 51, No. 1, 34-43.



- Reeves R.D., (2006). Hyperaccumulation of trace elements by plants. In Morel J.L., Echevarria G., Goncharova N., eds. Phytoremediation of metal-contaminated soil. NATO science series:IV:earth and environment sciences. 68:New York, NY, USA:Springer,1-25.
- Reeves R.D., Baker A.J.M., (2000). Metal accumulating plants. In Raskin I. Ensley B.D. eds. Phytoremediation of toxic metals:using plants to clean up the environment. New York, NY, USA: John Wiley, 193-229.
- Roth, J.A., Debelak, K.A., and Feather, K.F., (1983). Removal rate of zinc from coal bottom ash in aqueous solutions, *Water Research* 17/9, 1139-1143.
- Sharma Shilpi, (2012). Bioremediation: Features, Strategies and applications. *Asian Journal of Pharmacy and Life Science*. Vol. 2 (2).
- Sasmaz Merve, Bunyamin Akgul, Derya Yıldırım and Ahmet Sasmaz, (2016). Mercury uptake and phytotoxicity in terrestrial plants grown naturally in the Gumuskoy (Kutahya) mining area, Turkey. *International Journal of Phytoremediation*. Vol. 18, No. 1: 69-76.
- Scheiber Laura, Carlos Ayora, Enric Vázquez-Suñé, Dioni I. Cendón, Albert Soler, Juan Carlos Baquero, (2016). Origin of high ammonium, arsenic and boron concentrations in the proximity of a mine: Natural vs. anthropogenic processes. *Science of The Total Environment*. Volume 541, 15 January 2016, Pages 655–666.
- Shukla Keshav Prasad, Nand Kumar Singh, Shivesh Sharma, (2010). Bioremediation: Developments, Current Practices and Perspectives. *Genetic Engineering and Biotechnology Journal*, Volume 2010: GEBJ-3
- Smith I, Carson B, (1977). Trace metals in the environment. Volume 2. Silver. Ann Arbor, MI, Ann Arbor Science Publishers, 469 pp.
- Sors T.G., Ellis D.R., Na G.N. Lahner B. Lee S. Leustek T. Pickering I.J., Salt D.E., (2005). Analysis of sulfur and selenium assimilation in *Astragalus* plants with varying capacities to accumulate of lead and cadmium in transgenic plants. *Nature Biotechnology* 21:914-919.
- Sud Dhiraj, Garima Mahajan, M.P. Kaur, (2008). Agricultural waste material as potential adsorbent for sequestering heavy metal ions from aqueous solutions – A review *Bioresource Technology* Volume 99, Issue 14: 6017–6027.
- Tara M. Clancya, Kathryn V. Snyder, Raghav Reddy, Antonio Lanzirrotti, Susan E. Amrosec, Lutgarde Raskina, Kim F. Haye, (2015). Evaluating the cement stabilization of arsenic-bearing iron wastes from drinking water treatment. *Journal of Hazardous Materials* 300 522–529.

- Tariq, S. R., Shah, M. H., Shaheen, N., Khalique, A., Manzoor, S., & Jaffar, M., (2006). Multivariate analysis of trace metal levels in tannery effluents in relation to soil and water: A case study from Peshawar, Pakistan. *Journal of Environmental Management*, 79(1), 20–29.
- Thapa B, Kumar AKC, Ghimire A., (2012). A review on bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminants in soil. *Kathmandu Univ J Sci Eng Tech* 8(1):164–170.
- Thibodeaux, L.J., (2005) .Recent advances in our understanding of sediment –to-water contaminant fluxes: The soluble release fraction. *Aquatic Ecosystem Health and Management Society*. 8. 1-9.
- Thuß, U., Herzschuh, R., Popp, P., Ehrlich, Chr., and Kalkoff, W.-D., (1997). PCDD/F in flue gas and in bottom ash of lignite domestic combustion and the role of the salt content of the burned briquettes, *Chemosphere* 34, 1091-1103.
- USEPA, (1995). How to Evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites. Office of Solid Waste and Emergency Response, US Environmental Protection Agency. Publication # EPA 510-B-95-007, Washington, DC.
- Vidali M., (2001). Bioremediation an Overview. *Pure and Applied Chemistry* 73, NO:7 1163-1172.
- Wang, Y., Ren, D., and Zhao, F., (1999). Comparative leaching experiments for trace elements in raw coal, laboratory ash, fly ash and bottom ash, *International Journal of Coal Geology* 40, 103-108.
- Wei Yan-Li, Lian-Jun Bao, Chen-Chou Wu, Zai-Cheng He, Eddy Y. Zeng, (2015). Assessing the effects of urbanization on the environment with soil legacy and current-use insecticides: A case study in the Pearl River Delta, China a, *Science of the Total Environment* 514: 409–417.
- Wei, B., & Yang, L., (2010). A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China. *Microchemical Journal*, 94, 99–107.
- William, R. D., Burrill, L. C., Ball, D., Miller, T. L., Parker, R., Al-Khatib, K., Callihan, R. H., Eberlein, C. and Morishita, D. W., (1995). *Pacific Northwest Weed Control Handbook*. Oregon State University Extension Service, Corvallis, OR, p. 358.
- Yanai Junta, Fang-Jie Zhao, Steve P. McGrath, Takashi Kosaki, (2006). Effect of soil characteristics on Cd uptake by the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Environmental Pollution Volume* 139, Issue 1: 167–175.
- Yap Chee Kong and Cheng Wan Hee, (2015). Beryllium Levels in the Mangrove Snail *Nerita lineata* and Surface Sediments from Peninsular Malaysian Mangrove Area (Tahap

Berilium dalam Siput Bakau *Nerita lineata* dan Sedimen Permukaan daripada Kawasan Bakau Semenanjung Malaysia). *Sains Malaysiana* 44(7): 965–971.

Yavuz Merve, Marco Oggioni, Ulku Yetis, Filiz B. Dilek, (2015). Biocides in drinking water system of Ankara, Turkey. *Desalination and Water Treatment* 53: 3253–3262.

Zhang Hua, Xinbin Feng, Chengxin Jiang, Qihua Li, Yi Liu, Chunhao Gu, Lihai Shang, Ping Li, Yan Lin, Thorjörn Larssen, (2014). Understanding the paradox of selenium contamination in mercury mining areas: High soil content and low accumulation in rice. *Environmental Pollution* 188:27-36.

Zhang M. K., Z. Y. Liu, and H. Wang, (2010). Use of single extraction methods to predict bioavailability of heavy metals in polluted soils to rice. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, vol. 41, no. 7, pp. 820–831.

## ÖÇ 2: TEHLİKELİ KİRLLETİCİ MADDELERİN BİYOREMEDİASYONU

### 1. Tehlikeli kirletici maddelerin biyoremediasyonu

Son iki yüzyılda, bir dizi teknolojik gelişme, insan sağlığı, gıda üretimi, konut, konfor, ulaşım ve turizme önemli avantajlar sağlamıştır. Bu insan faaliyetleri; yeni kimyasalların, materyallerin ve muazzam miktarda enerjinin geliştirilmesini talep etmektedir, doğal kaynakları kullanmaktadır ve büyük miktarda çevreyi kirleten insan yapımı atık oluşturmaktadır. Toprak, su ve hava kirliliği, çeşitli kaynaklardan oluşmaktadır ve tüm dünyada önemli bir sorun olmaya devam etmektedir. Fosil yakıtların yakılmasının, madencilik faaliyetlerinin, endüstriyel ve evsel atıkların (kanalizasyon suyu/ atık su) ve hızla büyüyen nüfusun hijyenik olmayan yaklaşımlarının sonucunda oluşan muazzam miktarda organik ve inorganik bileşiğin açığa çıkması nedeniyle, çevre birçok zararlı etkiye maruz kalmıştır. İnsan faaliyetlerinin sonucunda açığa çıkan kirleticiler, asit yağmurları ve küresel ısınma gibi ekolojik felaketlerle bağlantılıdır. Kirlenmiş ekosistemler; bitkiler, mikroorganizmalar, suda yaşayan organizmalar ve yaşam destek fonksiyonları üzerinde hareketsizleştirme, mineralizasyon ve nitrifikasyon gibi etkilere yol açar. En nihayetinde bu da ekosistemin sağlığının yanı sıra insan sağlığını da etkilemektedir. Bu nedenle, mevcut durum, gezegenimizde yaşamın ardındaki itici güç olan biyokimyasal döngülerin düzgün işleyişini sağlamak için acil eylem talep etmektedir. Biyokimyasal döngüler, kirleticilerin biyosfere ulaşmasını engelleyebilen mikrobiyal toplulukların metabolik aktiviteleri ile harekete geçmektedir.

Geleneksel ya da biyolojik önlemler yoluyla kirlenmiş bir çevrenin biyoremediasyonuna teşebbüs edilebilir. Remediasyon süreçlerinin seçimi ve uygulaması kirliliğin türüne ve kapsamına bağlıdır. Bilim adamları, kirleticilerin salınımını azaltmak ve biyoremediasyon ile etkilerini azaltmak için görüş birliğine varmaya çalışıyorlar. Biyoremediasyon yöntemleri, kirlenmiş ekosistemlerin iyileştirilmesi için olan fizikokimyasal arıtma teknolojilerine verimli, çevre dostu ve uygun maliyetli alternatifler olarak görülmektedir. Biyoremediasyonun, geleneksel remediasyon yöntemlerine kıyasla avantajlı özellikleri aşağıdakileri kapsamaktadır:

- Kirleticilerin başka bir ortama taşınmasındansa bertaraf etmek
- Çalışanların kirleticilere maruz kalma sürelerini en aza indirmek
- Düşük enerji gerektirme
- İyileştirme işleminin süresinde muhtemel azalma

- Daha düşük maliyet
- Ekosisteme daha az ya da sıfır zarar

### **1.1. Ağır Metallerle Kirletilmiş Ekosistemlerin Biyoremediasyonu**

Bütün metaller, gerekli olup olmamalarına rağmen, yüksek konsantrasyonlarda toksik etkiler sergileyebilir. Bir kirletici, yaşayan bir organizmaya girmenin yolunu bulduğu zaman, zararlı bir etki gösterebilir. Kirleticinin etkisi bu nedenle faaliyet gösterdiği alandaki yoğunlaşmasının bir fonksiyonudur. Metal toksitesi, asidik bir ortamda, besin eksikliği olan bir ekosistemde ve kötü fiziksel koşullarda daha şiddetli olmaktadır.

Arazilerin doldurulması ve sıvıların katılardan ayrıştırılması, kazı ve gömme ya da toprağın yıkanması gibi geleneksel remediasyon önlemleri yoluyla iyileştirmeye teşebbüs edilebilir. Tarım kimyasallarının uygunsuz kullanımının yanı sıra evsel ve endüstriyel atıkların bertarafı için katı atık depolama alanının kapsamlı kullanımı, yeraltı sularında kirliliğine yol açan büyük miktarda sızıntı su oluşturmuştur ve sızıntı ile ortaya çıkan yeraltı suyunun kirlenme potansiyeli, atık depolama alanları için yeni mühendislik tasarımlarının icadını gerekli kılmıştır. Ağır metallerle kirlenmiş olan ekosistemlerin remediasyonu; iyon değişimi, çökelme, ters ozmoz, buharlaştırma ve kimyasal azaltma gibi fizikokimyasal işlemler kullanılarak gerçekleştirilebilir. Ancak, membran kirlenmesi, yüksek maliyetler, yüksek enerji ihtiyacı ve taşımada düşük verimlilik gibi problemler nedeniyle bu işlemler endüstrilerde az ilgi görmektedir. Genel olarak, teknik uygulanabilirlik, maliyet etkililik ve tesislerin sadeliği, ağır metalleri (Cu, Ar, Pb ve Zn gibi) ve siyanürü kirlenmiş ekosistemden çıkarmak için en uygun arıtma yöntemini seçmede kilit faktörlerdir. Ancak, fotokatalik azaltma, yüzey aktif-esaslı membranlar, akışkan membranlar ve yüzey karmaşıklaşması gibi en son teknolojiler, ağır metallerin kirletilmiş ekosistemlerden taşınması için daha verimlidir.

#### **1.1.1. Mikrop-Tabanlı Temizleme Sistemi (Mikrobiyal Biyoremediasyon)**

Mikroorganizmalar ağır metallere aktif bir şekilde (biyo-birikim) ve/ya da pasif bir şekilde (adsorpsiyon) tutunur. Asıl olarak polisakaritler, yağlar ve proteinlerden oluşan mikrobiyal hücre duvarları, ağır metal iyonlarını bağlayabilen birçok fonksiyon grubu sunmaktadır ve bu gruplar da karboksilat, hidroksi, amino ve fosfat gruplarını içermektedir. Atıktaki biyolojik oksijen ihtiyacını ya da kimyasal oksijen ihtiyacını arttıran bir eylem olan ağır metallerin aktif alımları için mikropların besin ilavesini gerektirmesi nedeniyle büyük ölçekli uygulamalar için çeşitli mikrop aracılı yöntemler arasında, biyobirikim işlemine kıyasla adsorpsiyon işlemi daha uygun görünmektedir. Ayrıca, ağır metal toksisitesi ve diğer çevresel faktörler nedeniyle

sağlıklı bir mikroorganizma nüfusu sürdürmek çok zordur. *Penisilyum*, *Aspergillus* ve *Rizopus* mantar türleri, ağır metallerin sulu çözeltilerden uzaklaştırılması için muhtemel mikrobik maddelerdir. Bitkilere faydalı olmalarıyla bilinen endofitik bakteriler ayrıca yüksek seviyelerde ağır metal biriktiren ana bitkilerin yeteneğini arttırmaktadır.

Mikroorganizmalar, ağır metallerle kirletilmiş çevrelerde yaygın olarak bulunur ve ağır metalleri kolaylıkla toksik olmayan formlara dönüştürebilirler. Biyoremediasyon süreçlerinde, mikroorganizmalar, organik kirleticileri, CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O gibi nihai ürünlere ya da hücre büyümesi için birincil alt tabakalar olarak kullanılan metabolik ara maddelere mineralize etmektedir. Bisorpsiyon, metal mikrop etkileşimleri, biyobirikim, biyomineralizasyon, biyotransformasyon ve biyoözütleme dâhil olmak üzere biyoremediasyonun farklı mekanizmaları bilinmektedir. Mikroorganizmalar, metalleri çözme ve geçiş metallerini azaltma ya da oksitleme yeteneğine sahiptir. Mikropların çevreyi restore ettiği farklı metotlar; ağır metalleri oksitleme, bağlama, hareketsizleştirme, uçucu hale getirme ve dönüştürmedir. Biyoremediasyon, özellikle tasarımcı mikrop yaklaşımı ile ve kirlenmiş alanlarda mikroorganizmaların büyümesini ve aktivitelerini kontrol eden mekanizmayı, mikroorganizmaların metabolik kapasitelerini ve çevresel değişimlere tepkilerini anlayarak başarılı hale getirilebilir.

### **Adsorpsiyon ile mikrobik biyoremediasyon**

Ağır metaller, enerji dâhil edilmeden hücre yapısında mevcut olan bağlama alanlarındaki mikroplar tarafından emilebilir. Bakteriye hücre duvarları ile ilişkili çeşitli reaktif bileşikler arasında, hücre-dışı polimerik maddeler (ortamlarına salgılanan yüksek molekül ağırlıklı bileşikler) özel bir önem taşır ve asit bazlı özellikler ve metal adsorpsiyonu üzerinde önemli etkilere sahip oldukları bilinmektedir. Salgılanan hücre-dışı polimerik maddeler, proton değişimi ve metallerin mikro çökeltilmesi dâhil olmak üzere çeşitli mekanizmalar aracılığıyla ağır metalleri karmaşıklaştırma konusunda büyük bir yeteneğe sahiptir.

### **Fizyo-biyo-kimyasal mekanizma yoluyla mikrobik biyoremediasyon**

Biyosorpsiyon, bir biyosorbentin iki bileşen arasında denge sağlanana kadar sorbata (metal iyonlar) doğru yüksek çekimini kapsayan bir süreçtir. *Saccharomyces cerevisiae*, iyon değişim mekanizması aracılığıyla Zn (I) ve Cd (II)'nin çıkarılması için biyosorbent işlevi görmektedir. *Cunninghamella elegans*, tekstil atık suyuyla açığa çıkan ağır metallere karşı umut vaat eden bir sorbenttir. Mantarlar, ağır metallere erişmek ve onları daha az toksik bileşiklere dönüştürmek için potansiyel biyokatalistlerdir. *Klebsiella oxytoca*, *Allescheriella sp.*, *Stachybotrys sp.*, *Phlebia sp.*, *Pleurotus pulmonarius*, *Botryosphaeria rhodina* gibi bazı

mantarların metal bağlama potansiyeli bulunmaktadır. Pb (II) ile kirletilmiş topraklar, bisorpsiyon işlemi ile *A. parasitica* ve *Cephalosporium aphidicola* gibi mantar türleri ile iyileştirilebilir. Hg'ye karşı dayanıklı mantarlar (*Hymenoscyphus ericae*, *Neocosmospora vasinfecta* ve *Verticillium terrestre*) bir Hg (II) durumunu toksik olmayan bir duruma biyolojik olarak dönüştürebilmiştir. Kirleticilerin çoğu, hidrofobiktir ve bunlar bazı biyolojik olarak yüzey aktif maddelerin salgılanması ve doğrudan hücre kirletici çağrışımı ile mikroplar tarafından alınırlar. Biyolojik yüzey aktif maddeler, düşük ara yüzey gerilimi nedeniyle toprak matrisinden su fazına geri çıkarılmadan önce metallere daha güçlü iyonik bağ kurarlar ve kompleksler oluştururlar.

Biyoremediasyon, ayrıca aerobik ya da anaerobik mikrobik faaliyetleri içerebilir. Aerobik ayrışma genellikle monooksijenazlar, dioksijenazlar, hidroksilazlar, oksidatif dehalojenazları tarafından ya da linyinaz ve peroksidazlar gibi enzimler tarafından üretilen kimyasal olarak reaktif oksijen atomları ile oksijen atomlarının reaksiyonlara girişini içermektedir. Kirleticilerin anaerobik ayrışmaları ise anaoksik elektron alıcıları aracılığıyla oksidatif katabolizma tarafından takip edilen başlangıç aktivasyon reaksiyonlarını içermektedir. Hareketsizleştirme tekniği, toksik metallere fiziksel ya da kimyasal durumlarını değiştirerek ağır metallere kirlenmiş alanlardan hareketini azaltmak için kullanılmaktadır. Katılaşma temizlemesi, kirlenmiş alanda kimyasal maddelerin karıştırılmasını ya da hidroksitlerin çöktürülmesini içermektedir. Kirlenmiş alanlarda, mikroplar, toksik metallere özütlenmesi, şelasyonu, metilasyonu ve redoks dönüşümü ile ağır metalleri hareket ettirmektedir. Ağır metalleri tamamen yok etmek mümkün değildir, ancak işlem, ağır metalleri suda çözünür, çöktürülmüş ve daha az toksik duruma getirerek oksidasyon durumlarını ya da organik komplekslerini dönüştürmektedir. Kirlenmiş ortamların biyoremediasyonunda, mikroplar, terminal elektron alıcıları olarak ağır metalleri ve eser elementleri kullanmaktadır ya da detoksifikasyon mekanizması ile bunları azaltmaktadır. Mikroorganizmalar, metal redoks reaksiyonlarından enerji elde etmek için ve enzimatik ve enzimatik olmayan süreçlerle toksik metallere başa çıkmak için kullandıkları mekanizmalar aracılığıyla ağır metalleri uzaklaştırmaktadır. Bakterilerde direnç gelişimi için iki temel mekanizma, detoksifikasyon (toksik metal durumunun dönüşümü ve kullanılamaz hale gelmesi) ve hücrelerden aktif toksik metal akışının pompalanmasıdır. Temel redoks (oksidasyon ve redüksiyon) reaksiyonu, toprakta toksik metaller ve mikroorganizmalar arasında yer almaktadır, mikroorganizmalar, ağır metaller için oksitleme maddesi olarak hareket etmektedir ve ağır metallere, alternatif elektron



alıcılara (nitrat, sülfat ve demir oksitler) tarafından kabul edilen elektronları kaybetmesine neden olmaktadır.

Aerobik koşullar altında, oksijen elektron alıcısı olarak davranır, anaerobik koşullar altında ise mikroplar, elektron alıcılarını azaltarak organik kirlenmeleri oksitler. Mikroorganizmalar, elektron alıcıları olarak organik bileşiği Fe(III) ve Mn(IV) ile oksitleyerek büyüme için enerji alır. Organik kirliliğin anaerobik degradasyonu, mikrobiyal azaltma için yüksek Fe(III) varlığı ile uyarılır. Solunumda klorlanmış solventler olarak kirlenmelerin elektron alıcıları işlevini gördüğü indirgeyici klorozlaştırma yoluyla kirlenmelerden gelen klorların biyodegradasyonu gerçekleşir. Mikroorganizmalar, metallerin durumunu azaltır ve Geobakter (toprak ve su tortularında anaerobik koşullarda bulunan anaerobik solunum bakteri türleri) gibi çözünürlüğünü değiştirir ve Uranyum çözünür durumu (U<sup>6+</sup>) çözünmez duruma (U<sup>4+</sup>) indirger. Farklı savunma sistemleri (dışarıda tutma, bölünme, kompleks oluşumu ve bağlayıcı protein ve peptid sentezi) toksik metallerin yarattığı basıncı azaltır. Bu metal bağlayıcı protein transkripsiyon faktörlerinin, toksik metale maruz kalma bağlamında (Cd, Zn, Hg, Cu, Au, Ag, Co, Ni ve Bi) hormon ve redoks sinyal işleminde aracılık ettiği bilinmektedir.

### 1.1.2. Ağır Metallerin Fitoremediasyonu

Fitoremediasyon, güneş enerjisiyle harekete geçen çevre dostu bir *in-situ* remediasyon teknolojisidir. Bitkiler ve ilişkili mikroorganizmalar, ağır metallerin toprak, çökelti, tortu, atık su ve yeraltı sularından kısmen çıkarılması için kullanılabilir ya da seçilmiş olan kirlenmeleri bu ortamlarda tamamen iyileştirebilir. Ağır metallerin fitoremediasyonunda, ilk adım fito-özütlemedir, yani ağır metal kirlenmelerin toprak ya da sudan bitki kökleri yoluyla alınması ve taşınmaları ve biyoküttelede biriktirilmeleridir. Metallerin bitki filizlerine taşınması önemli bir biyokimyasal süreçtir ve etkili bir fito-özütleme için arzu edilmektedir. Fitoremediasyonun diğer önemli bir işlemi de rizo-filtreleme, blasto-filtreleme ya da caulo-filtrelemeyi içeren fito-filtrelemedir. Bu işlemde, metaller absorbe edilir ve böylece de topraktaki ve yeraltı suyundaki hareketleri minimize edilir. Yukarıdaki işleme ek olarak, fito-stabilizasyon ya da fito-hareketsizleştirme, çevredeki metallerin hareketliliğini ve biyo-yararlanımını azaltmaktadır. Bitkiler, kökler aracılığıyla sorpsiyon, çökelti, kompleks oluşumu ya da rizosferdeki metal değerlerindeki azalma ile topraktaki ağır metallerin hareketsizleştirilmesini gerçekleştirir. Kirlenmiş topraktan emilen Hg ve Se gibi ağır metallerin bazıları, uçucu formlara dönüştürülür ve ardından fito-buharlaştırma işlemiyle atmosfere salınır. Bu işlem, metalleri tamamen yok etmemektedir, ancak daha sonra onları bir ortamdan (toprak ya da su) diğerine (atmosfer) taşımaktadır ki bu şekilde de metaller tekrar toprağa ya da suya dönebileceklerdir.

Fitoremediasyon yoluyla, özellikle de kirleticileri ayrıştırarak ve zehirden arındırmak için hiperakümülatör yoluyla, ağır metallerin uzaklaştırılması, etkililiği ve uygun maliyeti nedeniyle geniş ilgi çekmektedir. Hiperakümülatör için kullanılan kriterler, metale göre değişmektedir. Hiperakümülatör bitkileri, diğer bitkilere göre daha yüksek düzeyde ağır metal toleransı ve biriktirme yeteneği sergilemektedir. Ağır metal hiperakümülatörleri bulmadaki zorluk, büyümeyi yavaşlatır ve daha düşük biyokütle verimi, hiperakümülatör kullanımını kısıtlar. Bu da süreci zaman alıcı hale getirir ve bu nedenle de hızlı kirlenen alanlar ya da kanalizasyon arındırmaları için uygun değildir. Farklı mekanizmalar aracılığıyla bitkilerin büyümesinde ve/ya da metal toleransında önemli rol oynayan bitki büyümesini teşvik eden kök bakterileri ve *Arbuscular mycorrhizal* mantarı gibi rizosferik mikroorganizmalar, rizosferden çok fonksiyonlu uygun mikrobik kombinasyonları seçmek için fitoremediasyon tasarımı için faydalıdır. Rizosferin remediasyon rolünün, fitoremediasyonun ana parçası olması ve kirleticilerin yok edilmesinin bitki ve organizmaların birleşik aktiviteleri ile başarılması mümkündür. Rizosferden metallerin artan yok edilmesinin asıl nedeni, muhtemelen mikroorganizmaların sayısındaki ve metabolik aktivitelerindeki artıştır. Rizosferik degradasyon sürecinde, bitki büyümesini teşvik eden bakterilerin ve bitkilerin büyümesi üzerine olumlu etkileri olan serbest yaşayan toprak mikroorganizmalarının kullanılması ile bitkiler üzerine metal toksisitesi azaltılabilir. Bu süreçte, bitkiler karbonhidrat, amino asit, flavonoidler vb. içeren eksüdatların salgılanması ile 10- 100 kat daha fazla mikrobiyal aktiviteyi harekete geçirebilir. Karşılığında ise, rizosfer bakterileri, bitkilerin hayatta kalmasına yardımcı olan geniş köklerin oluşumunu kolaylaştırır.

## 1.2. Organik Kirleticilerle Kirlenmiş Olan Ekosistemlerin Biyoremediasyonu

Ham petrol ve rafine edilmiş petrol ürünleri, ekosistemleri kirleten organik kirleticilerin başlıca kaynaklarıdır. Petrol, asıl olarak üç hidrokarbon fraksiyonundan (parafin, naften ve aromatik) oluşmaktadır. Her bir petrol fraksiyonu, tanımlanmış bir oluşumdan ziyade genellikle yüzlerce farklı hidrokarbon molekülünden oluşmaktadır. Bu nedenle, fraksiyonlar; uçuculuk, biyoyararlanım, toksisite, parçalanabilirlik ve kalıcılık yönünden birbirine benzememektedir. Petrolün işlenmesi ve teslimi sırasında dökülmelerin engellenmesi zordur. Bu karmaşık bileşen dizisi, etkili biyoremediasyon stratejileri tasarlamak için büyük bir güçtür.

Petrol hidrokarbonları, çevreye ulaştığı zaman, birkaç nedenin sonucu hasar meydana gelebilir. Başlıca biyolojik etki, petrol tabakasının su, besinler, O<sub>2</sub> ve ışığa ulaşım üzerine olan engelleyici etkisi nedeniyle. Hidrokarbonların sitotoksik ve mutajenik etkisi, uzun süreli

kirlilik sonuçlarına yol açmaktadır. Biyolojik olarak daha fazla kullanılabilen toksik bileşikler sadece artan zararlı etkiler göstermekle kalmaz, aynı zamanda biyodegradasyon için daha yüksek erişilebilirliğe de sahiptir. Buna karşılık, fazlasıyla yüzeyde toplanan fraksiyonlar daha az toksik ama ilgilenmesi daha zordur. Bu genel kural, kirlenmiş toprakların ya da çökeltilerin temizliği için biyolojik strateji tasarlamayla ilgilidir, çünkü petrol hidrokarbonları, bu matrisleri sıkı bir şekilde yüzeyde biriktirme eğilimi göstermektedir.

İyileştirme için uygun strateji seçimi, kirlenmiş matrisin fizyokimyasal özelliklerine, dökülmenin derecesine ve süresine (yaşına) bağlıdır. Biyoremediasyonun amacı, biyodegradasyon hızını yavaşlatan sınırlayıcı faktörlerin üstesinden gelmektir. Organik bileşiklerin biyoremediasyonu, *in-situ* ya da *ex-situ* arındırmaları ile yapılabilir. *In-situ* uygulamaları sırasında, organik kirlilik, kirliliğin olduğu alanda halledilir. *Ex-situ* teknolojileri, kirlenmiş toprağın, organik kirleticilerin çıkarılması için uygun bir arındırma sisteminin planlanabileceği bir yere taşınmasını içermektedir. Petrol hidrokarbonları için, dört senaryo ortaya çıkabilir:

1. Hidrokarbon girişi nedeniyle karbon kaynağının fazlası, diğer besinlerin sınırlanmasıyla sonuçlanmaktadır. Nitrojen ve fosfor eklenmesi, dengeyi yeniden sağlayabilir ve biyodegradasyon hızını artırabilir.
2. Yetersiz oksijen varlığı, biyodegradasyon hızını azaltır. Aerobik hidrokarbon parçalanması sırasında hava enjeksiyonu ya da basit bir karıştırma, oksijen sınırlamasının üstesinden gelebilir.
3. Hidrokarbonların düşük biyo-yararlanımları. Çevre dostu yüzey aktif maddelerin eklenmesi (mikroorganizmalar ya da bitkiler tarafından üretilen toksik olmayan ve biyolojik olarak parçalanabilen maddeler gibi) çözünürlüğü ve böylece de hidrokarbonların biyo-yararlanımlarını artırabilir.
4. Yerel mikrobiyal topluluklardan gelen verimsiz katabolik mekanizmalar. Saf kültür ya da mikrobiyal birlik hidrokarbon-parçalama mikroorganizmalarının eklenmesi, parçalanma hızını artırabilir.

### **1.2.1. Organik Kirleticilerin Mikrop-tabanlı Biyoremediasyonu**

Hidrokarbonla kirlenmiş topraklar için başlıca *in-situ* arındırma stratejileri; biyo-canlandırma, biyo-büyüme ve biyo-havalandırmadır. Biyo-canlandırma işlemi, çevresel faktörlerin ve besinlerin yönetimi ile alanda bulunan yerel mikroorganizmaların metabolizmalarının geliştirilmesini içermektedir. Yerel mikrobiyal toplulukların, istenen katabolik yetenekleri eksik olduğu zaman, biyo-büyüme başarmak için yerel ya da dışsal hidrokarbon-parçalayıcı

mikroorganizmaların eklenmesi gerekmektedir. Organik bileşiklerin aerobik metabolizmasını arttırmak amacıyla, biyo-havalandırma ile havayı iletme için (pasif olarak ya da havalandırma yoluyla) bir dizi oluklu boru kullanılmaktadır.

Petrolle kirlenmiş toprak arındırması için en yaygın *ex-situ* biyoremediasyon teknolojileri, biyo-yığın, kompostlama ve tarımsal uygulamalardır. Burada amaç, düşük maliyetli besinleri ve oksijeni ekleyerek hidrokarbon degradasyonunu hızlandırmaktır. Tarım arazilerinde, toprak yüzeyindeki organik atıkların kontrollü yayılması, yerel mikroorganizmaların, organik kirleticileri aerobik olarak degrade etmesini sağlamaktır. Bu, petrol hidrokarbonla kirlenmiş toprağın remediasyonu için en yaygın kullanılan teknolojilerden birisidir. Tarım arındırması, petrol hidrokarbonlarının biyodegradasyonunu ve buharlaşmasını teşvik etmek için besin uygulayarak ve periyodik dolgularla toprağı havalandırarak kirlenmiş toprağının düz tabakasını (kalınlığı 1 metreye kadar) temizlemeyi içermektedir. Arındırma stratejileri, arazilere göre değişmektedir ve iklim, yer, toprak tipi ve sıcaklık dâhil olmak üzere alana özgü özelliklere göre hazırlanabilir. Eş yüzeylerin havalandırılmasını, mikrobiyal metabolizmayı ya da bakteriyel aşılarda harekete geçirmek için besin değişiklikleri, pH tamponları ve hacim verici maddeler uygulanmalıdır.

Biyo-yığınlar ve küme kompostlama, hacim arttırıcı madde olarak kirlenmiş bir toprağın organik materyallerle karıştırılmasını içermektedir. Bu karışım, toprak yapısını, havalandırmayı ve nem korumayı geliştirerek mikrobiyal aktiviteyi desteklemektedir. Her iki strateji arasındaki temel fark, havalandırma metodudur. Biyo-yığında havayı bir boru şebekesi iletirken, kompostlar, toprağı/hacim arttırıcı madde karışımını periyodik olarak modifiye edilmiş bir küme döndürücüsü ile çevirerek havalandırılır. Biyo-yığınlar ve kümeler, geniş bir kirletici yelpazesinin iyileştirilmesi için başarılı bir şekilde kullanılmaktadır.

### **1.2.2 Organik Kirleticilerin Fitoremediasyonu**

Fitoremediasyon; terleme, fotosentez, metabolizma ve mineral beslenme gibi yüksek bitkilerde ve ilgili mikroorganizmalarda meydana gelen temel fizyolojik mekanizmalara dayanmaktadır. Bitkiler, kirleticileri kökleriyle aldıkları için güneşle çalışan pompalama ve filtreleme sistemi işlevi görmektedir ve kirleticilerin metabolize edilebildiği, ayrışabildiği ya da buharlaşabildiği çeşitli bitki dokularıyla bu kirleticileri taşımaktadır/yerlerini değiştirmektedir. Fitoremediasyon, metabolik ürünlerin salınımı ve mikrobiyal degradasyon yollarıyla ya da eş metabolizmalar aracılığıyla sonradan petrol hidrokarbonlarının biyodegradasyonunu kolaylaştıran artmış havalandırma yoluyla mikrobiyal aktiviteyi teşvik eden bitki köklerine dayanmaktadır.

Fitoremediasyonun etkililiği, kirlenen alandaki petrol hidrokarbonlarının yoğunluğuna, kirliliğin derinliğine, iklimsel koşullara ve toprak nem ozelliklerine ki bu ozelliklerin hepsi bitkilerin buyume potansiyelini etkilemektedir, bağlı olarak değişiklik goştermektedir. Bitkiler koķlerini, toprağa, cozeltilere ve suya goşmektedir ve koķler rizosferdeki mikroorganizmalarla etkileşime girdiği zaman, organik ve inorganik maddeleri alabilir; dış yuzyelerindeki maddeleri stabilize edebilir ve bağlayabilir. Alınan maddeler; taşınabilir, depolanabilir, donuşturulebilir ve bitkilerin farklı hucrelerinde ve dokularında biriktirilebilir. Son olarak, bitkinin toprak ustu kisimlari, molekullerin alimini ya da salimini sağlayan atmosferle gaz alışverişinde bulunabilir.

### **1.2.3. Biyoremediasyonda En Son Stratejiler**

Kirlenmiş bir cevre yi temizlemek iwin (hava, toprak ve su) genetiği değiştirilmiş bazı organizmaların (mikroorganizmalar ve bitkiler) (GDO) kullanımı biyoremediasyon iwin yeni bir stratejidir. Bu biyoteknolojik teknikten ilk olarak 1900'lerin başında bahsedilmiştir. Bilim adamları, hidrokarbon ve pestisitler gibi bazı kimyasalları metabolize etmede organizma yeteneğini arttırmak iwin şu anda genetik muhendisliği yaklaşımını kullanmaktadır. Laboratuvar koşullarında tehlikeli atıkların ayrışmasını geliştirmek iwin bu biyoteknolojik teknik uzerine yoğun calışmalar vardır. Genetik olarak değiştirilmiş organizmalar, daha yuksek ayrışma kapasitesine sahiptir ve belirli koşullar altında ceşitli kirleticilerin ayrışmasında başarılı oldukları goşterilmiştir. Genetik modifikasyonlar teknolojisi, ileri biyoremediasyon yontemleri iwin mikroorganizmalar ve bitkilerde kullanılmaktadır.

### **Biyoremediasyon iwin Genetiği Değiştirilmiş Mikroorganizmalar**

Mikrobiyal biyoremediasyon sureclerinin kontrolu ve optimizasyonu bircoķ faktoru olan karmaşık bir sistemdir. Bu faktorler; kirleticileri parcalama yeteneği olan mikrobiyal bir nufusun varlığını, kirleticilerin mikrobiyal nufusa olan faydalarını ve cevresel faktorleri icermektedir. Bazı araştırmacılar, biyoremediasyon iwin genetiği değiştirilmiş mikroorganizmaların (GDO) kullanılmasının, o yere ozgu mikroorganizmaların kullanılmasından daha etkili olduğunu iddia etmektedir.

### **Biyoremediasyon iwin Genetiği Değiştirilmiş Bitkiler**

Doğada 450'den fazla bitki turu (otlar, ayciceği, mısır, kenevir, keten, yonca, tutun, sogut, Hint hardalı, kavak, su sumbulu vb.) vucutlarında metalleri (Zn, Ni, Mn, Cu, Co ve Cd), yarimetaller (As) ve ametalleri (Se) biriktirebilmektedir. Ayrıca, biyoteknoloji tekniklerini fitoremediasyonla birleştirmek, remediasyon yonteminden daha etkilidir. Genetiği değiştirilmiş bitkiler (GDB) yaklaşımı, son yirmi yıldır başarılı bir şekilde kullanılmaktadır.

## 2. Gelecekteki Beklentiler

Rekombinant DNA teknolojisi, geniş bir kimyasal kirlenmeye karşı artmış degradasyon yeteneği sergileyerek toprak, su ve etkin çamurun biyolojik olarak iyileştirilmesi için yerin karakterine özel verimli bitkilerin ve mikroorganizmaların üretilmesini sağlar. Genetiği değiştirilmiş organizmalar, olumsuz stres durumlarına dayanabilir ve çeşitli ve karmaşık çevresel koşullar altında biyolojik iyileştiriciler olarak kullanılabilir.

Genetik mühendisliği, kirlenmiş alanlardaki kirliliğin derecesini çabuk ve doğru bir şekilde ölçmek için “mikrobiyal biyosensörlerin” geliştirilmesini sağlamıştır. Hg, Cd, Ni, Cu ve As gibi ağır metal konsantrasyonlarını değerlendirmek için çeşitli biyosensörler tasarlanmıştır. Topraktaki kirlenmiş maddelerin bitkisel ayrışması için endofit ve rizosferik bakterilerin genetik planlaması, metalle kirlenmiş alanların temizlenmesi için olan en umut vaat eden yeni teknolojilerden birisi olarak kabul edilmektedir. Fitoşelatin ifade eden, *Escherichia coli* ve *Moreaxella* sp.’nin, yabancı tip suşlara göre kıyasla 25 kat daha fazla Cd ya da Hg biriktirdiği görülmektedir.

Fitoremediasyon teknolojisinin temel kısıtlaması, kirlenmiş alanların ya da metabolizmalarının, bitki dokularında biriktirilmesidir; bu da bitki hayatını kısaltan ve buharlaşma yoluyla atmosfere kirlenmiş alanları salan bir süreçtir. Bu problem, çeşitli inorganik kirlenmiş alanlara karşı bitkilerin metal toleransı, biriktirme ve degradasyon potansiyelinin kullanımı ile minimize edilebilir. Bitkilerin dokularındaki metallerin degradasyonunu sağlamak için bitkilere metal degradasyonundan sorumlu bakteri genleri ilave edilebilir. Daha az çevre dostu olan ve insan sağlığına daha tehlikeli olan fizyo-kimyasal tabanlı stratejilerle karşılaştırıldığında zaman, çeşitli ağır metal kirlenmiş alanlar için genetiği değiştirilmiş bitki temelli biyoremediasyon uygulanması, çevre dostu olması ve azaltılmış sağlık tehlikeleri nedeniyle öne çıkmaktadır. İnorganik kirlenmiş alanların zehirlenmesinin alınması ve biriktirilmesi için transjenik bitkiye çeşitli mikrobiyal genler aktarılabilir. Metalotiyoneinler (sisteinden zengin, düşük molekül ağırlıklı, metal bağlayıcı proteinlerdir) ve fitoşelatinler gibi metallerin zehrinin gideren moleküller, ağır metal alımını, taşınmasını ve biriktirilmesini artırarak bitkiye direnç kazandırabilir. Kavak, söğüt ve Jatpura gibi yüksek biyokütlesi olmasının yanı sıra hızlı büyüyen bitkiler, fitoremediasyon ve enerji üretiminde kullanılabilir. Hızlı büyüyen ve yüksek biyokütlesi olan bitkilerin içinde, kavak, hızlı büyüme hızı ve kısa sürede (5- 8 yıl) yüksek biyo kütle üretme potansiyeli nedeniyle en yaygın olarak çalışılmaktadır. Artmış remediasyon için kavak hibrit çeşitlerinin çoğunun, mikrobiyal katabolik genlerle ve belirli taşıyıcılarla genetiği değiştirilmiştir. Örneğin, civa redüktaz ve  $\gamma$ -glutamilsistein sentetaz genleri, Hg, Cd ve Cu metallerinin yüksek



konsantrasyonlarının biriktirilmesiyle sırasıyla Hg, Cd ve Cu'ya artmış direnç göstermiştir. Birden çok gen aktarımı yapılan bitkiler, hasat edilen biyokütlenin tamamen ek faydalar için kullanılacağını garantiye almak için kirleticilerin tam degradasyonunu kolaylaştıracaktır.

Tasarlanmış biyoremediasyon stratejileri, ağır metallerin azaltılması için rizosfere büyüme uyarıcılarının (elektron alıcıları/vericileri) eklenmesi ya da mikroorganizmaların ya da genetiği değiştirilmiş bitkilerin mikrobiyal büyümelerinin ve bioremediasyon özelliklerinin artması için kirlenmiş toprağa besin eklenmesini içermektedir. Kromat ve uranil redüktaz gibi geliştirilmiş enzimlerin sentezlenmesi yoluyla ağır metalleri azaltma kapasiteleri olan birçok tasarlanmış bakteri, belirli bir işlevi yerine getirmeleri için özel bir rizosfere uygulanmıştır. Benzer şekilde, genetiği değiştirilmiş bitkilerin ayrıca ağır metallerin rizosferik dönüşümünü destekleyebilecek olan belirli bileşikleri ürettiği bilinmektedir.

Fitoremediasyon teknolojisinin başlıca dezavantajı, bitkisel materyallerde kirleticilerin depolanması ve biriktirilmesi ve kirlenmiş alanda birden çok kirletici olduğu zaman yavaşlayan ve yetersiz kalan remediasyon sürecidir. Bu problemlere uygun çözümler, mikrop-bitki sentezini bitki rizosferi içinde birleştirmek ya da bitki dokularında kirleticilerin degradasyonunu sağlamak için mikropları endofit olarak uygulamaktır. Rizosferdeki mikrobiyal nüfus, bitki örtüsü az olan topraklara kıyasla daha yüksektir ve bu, mikroorganizmalar için besin olan maddelerin salınımı yoluyla bitkiler tarafından sağlanan kolaylık nedeniyledir. Bu yaklaşım, laboratuvar koşulları altında değerlendirilmiştir ve arazi koşullarında başarılı olursa, bu teknoloji, kirleticilerin hızlandırılmış yok edilmesini kolaylaştıracaktır, bu da karşılığında biyoenerji için yüksek bitki biyokütle üretimini destekleyecektir. Biyoremediasyon işlemlerinin uygulanması için başlıca stratejiler, bitkilerle birlikte belirli mikroplar tarafından yönlendirilen biyo-canlandırma ve biyo-büyüme yaklaşımlarını içermektedir.

Yukarıda tartışılmış olan stratejilerin yanı sıra, nanoteknoloji ile ağır metallerin ve eser elementlerin remediasyonu gerçekleştirilebilir. Toksik kirleticileri yok etmek için mikrobiyal aktiviteyi arttıran nanopartiküllere “nanobiyoremediasyon” denmektedir. Nano-tabanlı teknolojiler sadece büyük ölçekteki kirlenmiş alanların temizlenme maliyetini düşürmekle kalmaz, aynı zamanda işlem süresini de kısaltır. “Biyonoteknoloji” ya da “biyoteknoloji yoluyla nanoteknoloji” nano-nesnelerin biyoüretimi ya da nano-nesneleri oluşturmak ya da kullanmak için araç olarak kullanılan çift işlevli makromoleküllerdir. Geniş fizyolojik çeşitlilik, küçük boyut, genetik uygulanabilirlik ve kontrollü yetiştirilebilirlik, mikrobiyal hücreleri, polimerler ve magnezozom gibi doğal ürünlerden virüs-benzeri proteinlere ve özel



metal parçacıkları gibi tasarlanmış protein ya da protein yapılarına değişiklik gösteren nano yapıların ideal üreticileri yapmaktadır. Bu yenilikçi teknik, çevredeki organik kirleticilerin yanı sıra artan ağır metal problemine de değinmek için umut vaat eden bir araç olacaktır.

### 3. Sonuçlar

Çevre kirliliği ve küresel ısınma gerçektir. İnsanların faaliyetleri, bu problemlere dikkate değer bir katkıda bulunmaktadır. Bu problemler, dünyanın her yerinde insanları etkilemektedir. İnsanlar, çevreye karşı sorumlu davranışlar sergilemeye başlamalıdır. Atıkların remediasyonu, atığı oluşturmaktan çok daha zordur. Bu nedenle, atığı önlemek, atık oluştuktan sonra arındırmaya ya da temizlemeye çalışmaktan daha iyidir.

### 4. KAYNAKLAR

- Atlas R. M. (1995). Petroleum biodegradation and oil spill bioremediation. *Marine Pollution Bulletin*. 31: 178-182.
- Baker A.J.M, Brooks R.R., (1989). Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements. A review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery* 1:81-126.
- Boopathy R., (2000). Factors limiting bioremediation technologies. *Bioresource Technology* 74: 63-67.
- Brooks R.R., Lee J., Jaffre T., (1974). Some New Zealand and New Caledonian plant accumulators of nickel. *Journal of Ecology* 62: 493-499.
- Brooks R.R., Lee J., Reeves R.D., Jaffre T., (1977). Detection of nicheliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants. *Journal of Geochemical Exploration* 7: 49-57.
- Camenzuli D., B. L. Freidman (2015). On-site and *in situ* remediation technologies applicable to petroleum hydrocarbon contaminated sites in the Antarctic and Arctic. *Polar Research* 34: 24492,
- Chaney R., Malik M., Li Y.M., Brown S.L., Brewer E.P., Angle J.S., Baker A.J.M., (1997). Phytoremediation of soil metals. *Current Opinion in Biotechnology* 8: 279-284.
- Ellis D.R., Salt D.E., (2003). Plants, selenium and human health. *Current Opinion in Plant Biology* 6: 273-279.

- Fuentes S, V. Méndez, P. Aguila, M. Seeger (2014). Bioremediation of petroleum hydrocarbons: catabolic genes, microbial communities, and applications. *Appl Microbiol Biotechnology* 98:4781–4794.
- Fulekar M.H., Geetha M, (2008). Bioremediation of chlorpyrifos by *Pseudomonas aeruginosa* using scale up technique. *Journal of Applied Biosciences*, 12: 657-660.
- Fulekar M.H., (2009). Bioremediation of fenvalerate by *Pseudomonas aeruginosa* in a scale up bioreactor. *Romanian Biotechnological Letters*, 14 (6): 4900-4905.
- Fulekar M.H., (2010). *Environmental Biotechnology*. CRC Press and Science Publisher, USA.
- Juwarkar A. A., S. K. Singh, A. Mudhoo. A comprehensive overview of elements in bioremediation. *Rev Environ Sci Biotechnol* (2010) 9:215–288
- Kang J. W. (2014). Removing environmental organic pollutants with bioremediation and phytoremediation. *Biotechnol Lett* 36:1129–1139.
- Mani D. and C. Kumar (2014). Biotechnological advances in bioremediation of heavy metals contaminated ecosystems: an overview with special reference to phytoremediation. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 11:843–872.
- Milner M.J., Kochian L.V., (2008). Investigating heavy-metal hyperaccumulation using *Thlaspi caerulescens* as a model system. *Annals of Botany*. 102: 3-13.
- Newman L. A., C. M. Reynolds (2004). Phytodegradation of organic compounds. *Current Opinion in Biotechnology*. 15:225–230.
- Pandey B. and Fulekar M.H., (2012). Bioremediation technology: A new horizon for environmental clean-up. *Biology and Medicine*, 4 (1): 51-59, 2012
- Rayu S., D. G. Karpouzas, B. K. Singh (2012). Emerging technologies in bioremediation: constraints and opportunities. *Biodegradation* 23:917–926
- Reeves R.D., (2006). Hyperaccumulation of trace elements by plants. In Morel J.L., Echevarria G., Goncharova N., eds. *Phytoremediation of metal-contaminated soil*. NATO science series:IV:earth and environment sciences. 68:New York, NY, USA:Springer,1-25.
- Reeves R.D., Baker A.J.M., (2000). Metal accumulating plants. In Raskin I. Ensley B.D. eds. *Phytoremediation of toxic metals:using plants to clean up the environment*. New York, NY, USA: John Wiley, 193-229.