



Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi 5 (1): 95-101, 2012  
ISSN: 1308-0040, E-ISSN: 2146-0132, www.nobel.gen.tr

## Petrol Kirliliği ve Biyoremediasyon

Nur CEYHAN\*

Esra ESMERAY

Muğla Üniversitesi Fen Fakültesi, Biyoloji Bölümü, 48170, Muğla, TÜRKİYE

\*Sorumlu Yazar

nurceyhan@mu.edu.tr

Geliş Tarihi : 05 Şubat 2012

Kabul Tarihi : 11 Mart 2012

### Özet

Yeni birçok sanayi dalının gelişmesi, var olanların etkinliğini artırması ve sürekli artan şehir nüfusu, bu yüzyılın başından itibaren doğal kaynakların kirlenmesine neden olmuş ve beraberinde çevre sorunlarının oluşmasını kaçınılmaz kılmıştır. Günümüzde en önemli çevre kirliliği etmenlerinden biri petrol ve petrol türevlerinin oluşturduğu kirliliktir. Petrol endüstrisinin ve petrol pazarının genişlemesiyle; patlama sonucu petrol saçılması, tanklardan veya boşaltım esnasında tankerlerden sızma ve atık petrol ürünlerinin dağılması çevre kirliliği ile sonuçlanmıştır.

Biyoremediasyon, mikroorganizmalar kullanılarak zararlı maddeleri toksik olmayan bileşiklere dönüştüren bir proses olup, kimyasal sıvıların ve tehlikeli atıkların arıtılması için kullanılan ümit verici tekniklerden biridir. Çevre konusundaki hassasiyetlerin artmasıyla çevre biyoteknolojisi uygulamaları artacaktır. Bugün, dünyadaki birçok kent atık sularını temizlemek için mikroorganizmaları kullanmakta ve bu kentlerin sayısının hızla artması beklenmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Petrol Kirliliği, Biyoremediasyon, Mikroorganizmalar

## Petroleum Pollution and Bioremediation

### Abstract

Due to new developments in many industries, the increasing effectiveness of existing ones, and the ever-increasing urban population, from the beginning of this century, have caused pollution of natural sources and environmental issues. Nowadays, some of the most important factors of the environmental pollution are oil and oil products. Expansion of the oil industry and the oil market, oil scattering as a result of the explosions, leakage and waste from tanks during unloading of petroleum products have resulted in the environmental pollution.

Bio-remediation is a process that uses microorganisms to change harmful substances into non-toxic compounds and it is a promising technique for purification of liquids and hazardous wastes. Applications in environmental biotechnology will be increased by the environmental sensitivities. Today, many cities around the world are using microorganisms to clean waste water and the number of these cities are expected to increase rapidly.

**Key Words:** Petroleum Pollution, Bioremediation, Microorganisms

## GİRİŞ

Yeni birçok sanayi dalının gelişmesi, var olanların etkinliğini artırması ve sürekli artan şehir nüfusu, bu yüzyılın başından itibaren doğal kaynakların kirlenmesine neden olmuş ve beraberinde çevre sorunlarının oluşmasını kaçınılmaz kılmıştır. Çevre sorunlarının oluşmasının nedeni nüfus, sanayileşme, kentleşme ve turizm gibi temel başlıklar altında toplanabilir [1]. Çevre kirliliğini şu şekilde tanımlayabiliriz;

Doğanın temel fiziksel unsurları olan, hava, su ve toprakta zararlı etkilerin oluşması ile ortaya çıkan ve canlıların yaşamalarını olumsuz yönde etkileyen çevre sorunlarının

tümü, çevre kirliliği olarak adlandırılır. Başka bir ifadeyle çevre kirliliği ya da çevre kirlenmesi, canlıları tehdit eden, cansız varlıkların niteliğini değiştiren zararlı maddelerin hava, su, toprak ve gıdalar gibi alıcı ortamlara yoğun bir biçimde karışması olayıdır. Bu olay sonucunda alıcı ortamların fiziksel, kimyasal ya da biyolojik özellikleri değiştiğinden doğal dengeleri bozulmaktadır. Çevre kirliliği çeşitleri genel olarak; hava kirliliği, su kirliliği, toprak kirliliği, gürültü kirliliği ve nükleer kirlilik olarak sınıflandırılır [2]. Birçok zararlı madde ve materyal çevre kirliliğine neden olmaktadır. Bunlardan en önemlilerinden birisi petrol ve türevlerinin oluşturduğu kirliliktir.

### Petrol Kirliliği

Günümüzde en önemli çevre kirliliği etmenlerinden biri petrol ve petrol türevlerinin oluşturduğu kirliliktir. Kullanılan petrollü araçlar en geniş pazara sahip olan ve hala hızla gelişim gösteren sektörlerdendir. 1900'lü yıllarda enerji için kullanılan miktar 0.4 trilyon \$ iken bugün 5.8 trilyon \$'dır ve 2020'li yıllarda bu sayının 10.4 trilyon \$ olacağı tahmin edilmektedir [3]. Kullanılan ulaşım araçlarının %96'sı petrol ve türevi maddelerle çalışmaktadır. Hava ve deniz taşımacılığının %100'ünde, raylı sistemlerin ise %89,2'sinde petrol ve türevi maddeler kullanılmaktadır [4].

Petrol araması ve çıkarılması sırasında deniz araçlarının kaza yapması sonucu varillerce ham petrol deniz suyuna karışmaktadır. Bu durum hem ekonomik hem de çevresel sorunlar yaratmaktadır. Deniz ortamında çok yaygın olan petrol kirlenmesi ve bunun sonucu olarak ortaya çıkan bileşikler, ekosistem içerisindeki tüm organizmaları az veya çok etkilemektedir [5,6]. Yapılan araştırmalar, kirlenmenin ileri boyutlara ulaştığı kıyı bölgelerinde yaşayan canlılarda hidrokarbonların önemli oranlarda biriktiğini, ancak açık denizde yaşamlarını sürdüren canlılarda da petrol ürünlerinin ppm veya ppb oranlarında bulunabildiğini ortaya koymaktadır. Deniz suyunda ppb oranındaki hidrokarbon yoğunluğu, birikim (biyo-akümülyasyon) sonucu, denizel organizmalarda ppm düzeylerine ulaşmaktadır. Bunun nedeni, hidrokarbonların besin zinciri yolu ile canlı organizmalarda birikime (biyo-magnifikasyon) uğramasıdır [7].

Petrol hidrokarbonlarının denizel canlılarda (balık, yumuşakçalar v.b.) ne şekilde metabolizmaya uğradıkları konusunda son 10 yıldır kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Bazı araştırmacılar yaptıkları denemelerde, suya bırakılan petrol ürünlerinin fitoplankton'da 10–30 ppb düzeyinde fotosentezi stimüle (uyarma) ettiğini, buna karşın 60–200 ppb seviyesinde fotosentezi yavaşlattığını ve daha yüksek yoğunluklarda ise, tümü ile durdurduğunu göstermişlerdir. Denizel organizmaların yanı sıra, su yüzeyini paylaşan kuşlar da yüzeyde oluşan filmlerden etkilenirler. Hemen hemen her büyük tanker kazasından sonra, martı, karabatak vb. deniz kuşlarının kütleler halinde öldükleri gözlenmektedir. Bunlar, avlanma amacı ile suya dahlışları sırasında petrol ile sıvandıklarından uçamamakta ve çırpınma sürecinde yuttukları ve deri ile temas eden petrolden zehirlenmektedirler. Bazı araştırmacılar ise, laboratuvar şartları altında çeşitli organizmaların belirli petrol ürünlerine karşı dirençlerini ölçmüşlerdir [7]. Bu araştırmalarla elde edilen sonuçlara göre, hidrokarbonların canlılara etkisi, ortam koşulları ile doğrudan ilgilidir. Örneğin su sıcaklığı, oksijen içeriği, pH gibi ortam faktörleri, canlıların petrol ürünlerine olan direncini etkilemektedir. Bunun yanı sıra, ortamda bulunan diğer maddelerin, örneğin deterjanlar ve benzeri petrol seyrelticiler (dispersanlar) petrolün olumsuz etkisini arttıran faktörler olarak saptanmıştır [7].

Petrol ürünleri bulaşmış balık ve diğer su ürünlerinin insanlar tarafından tüketilmesi, bu ürünlerdeki petrol konsantrasyonunun çok düşük düzeyde olduğu durumlarda dahi, sağlık açısından sakıncalar yaratmaktadır. Bu sakıncaların başında, ham petrolü oluşturan bileşiklerden bir bölümünün, hayvanlar ve insanlarda kanser yapıcı olduğu bilinen veya bu konuda kuşkuyla olan maddelerden oluşması gelmektedir [7,8]. Bunlar arasında, halkalarında N ve S bulunan heterosik bileşikler, polisiklik ve heterosiklik bileşiklerin metil türevleri ile polinükleer hidrokarbonlar yer almaktadır. Ayrıca ayrılmış,

çözünmüş ve kısmen bozulmuş petrol ürünleri içerisinde aktif kanserojen etkileri olan yükseltgeme ürünleri de oluşmaktadır [7].

Petrol endüstrisinin ve petrol pazarının genişlemesiyle; patlama sonucu petrol saçılması, depo tanklarından veya boşaltım esnasında tankerlerden sızma ve atık petrol ürünlerinin dağılması çevre kirliliği ile sonuçlanmaktadır [7].

Petrol kirliliği ile ilgili olarak tarihte yaşanan deniz felaketlerinden en dikkat çekici olanları şunlardır;

**Torrey Canyon Petrol Faciası (1967):** 18 Mart 1967'de 117.000 ton ham petrol taşıma kapasitesi ile döneminde dünyanın en büyük süpertankerlerinden bir tanesi olan Torrey Canyon, navigasyon hatası nedeniyle Sicilya Adaları ve İngiltere'de karaya oturmuş ve çok büyük bir deniz kirliliğine yol açmıştır. Gemiden 30.000 ton petrol denize dökülmüş, petrol tabakası İngiltere ve Fransa arasında denize yayılmıştır. 15.000 deniz kuşu zayı olmuş ve kirliliğin etkileri yıllarca sürmüştür. 1973 Denizlerin Gemiler Tarafından Kirletilmesinin Önlenmesine Ait Uluslararası Konvansiyonu (MARPOL) gündeme gelmiş ve CLC 1969-Petrol Kirliliği Zararları için Sivil Sorumluluk konusundaki Uluslararası Antlaşma gibi yeni kurallar oluşturulmuştur [9].

**Independenta Petrol Sızıntısı (1979):** İstanbul Boğazı'nda meydana gelen kazaların en büyüklerinden biri 15 Kasım 1979 tarihinde Haydarpaşa önlerinde Romen bandıralı Independenta tankerinin Evriali isimli bir Yunan tankeri ile çarpışması sonucunda 95 000 ton petrol denize dökülmüş, kazada 43 denizci hayatını kaybetmiştir [9].

**Nassia Petrol Sızıntısı (1994):** 13 Mart 1994 günü 100.000 ton petrol taşıyan Güney Kıbrıs Rum Cumhuriyeti bandıralı Nassia tankerin bir kuru yük gemisi ile İstanbul Boğazı'nda çarpışması sonucu büyük bir yangın çıkmış ve 30 kişi ölmüştür. Kazada denize 20 000 ton petrol dökülmüştür. Tanker günlerce yanarak İstanbul'u tehdit etmiş olup, oluşan çevre kirliliğinin önüne geçilememiştir [9].

**Prestige Petrol Sızıntısı (2002):** 13 Kasım 2002 günü 77.127 ton ham petrol taşıyan Prestige tankeri İspanya'nın Atlantik kıyısı açıklarında ağır hava koşulları nedeniyle Finisterre Burnu'nun 27 mil açığında çatlak oluşması nedeniyle yakıt sızdırmaya başlamıştır. Kısmen az bir sızıntısı olan geminin kurtarılmasının tek çaresinin sığınma limanı olduğunu kabul etmeyen İspanyol otoriteleri, geminin ekonomik bölgesi içine girmesini yasaklayınca tam 6 gün boyunca ağır hava koşullarında Atlantik'te bekleyen tanker, 19 Kasım 2002'de İspanya kıyılarından 133 mil açıktan ortadan ikiye kırılmıştır ve personel tahliye edilmiştir. 77 000 ton ham petrol denize dökülmüş olup yıllarca İspanya ve Fransa kıyılarını kirletmeye devam etmiştir [10].

**Grand Isle Louisiana Petrol Faciası (2010):** 20 Nisan 2010'de Meksika Körfezi'nde bir petrol firması tarafından kiralanıp işletilen Deep Horizon keşif sondaj platformunda yaşanan bir patlama, platformun çökmesine ve günler sonra da batmasına yol açmıştır [11]. Firma başlangıçta, denizin altındaki kırık boru hattından günlük 1000 varil (42.000 galon) ham petrol döküleceğini tahmin ediyordu. Ancak Ulusal Okyanus ve Atmosfer Derneği tarafından bu rakamın günde 5000 varil (210.000 galon), yani Sahil Güvenlik ve sanayinin temizleyebileceğini açıkladığı orandan 5 kat daha fazla olduğu açıklandı. Bu alanlarda çok nadir görülen ve tehdit altındaki hayvanların da dâhil olduğu 600'ün üzerinde yabancı türe ev sahipliği yapan önemli sığınma evleri vardır. Ayrıca bu alan her yıl 5 milyon göçmen kuşlara ev sahipliği yapmaktadır. Pek çok balık ve memeli için yumurtlama mevsimi olan bir dönemde meydana gelen bu sızıntı, Körfez'de bu türlerin ve gelecekteki popülasyonları için tehdit yaratmaktadır [11,12].

**Exxon Valdez Petrol Sızıntısı (1989):** 24 Mart 1989'da 50 milyon galon petrol taşıyan Exxon Valdez adlı tanker, Alaska Bliqh Reef'de karaya oturmuştur [10]. Geminin gövdesinde açılan delikten 11 milyon galondan fazla ham petrol denize dökülmüş ve kirlilik çok kısa zamanda

2250 km'lik bir sahil şeridinde yayılmıştır. ABD tarihinin en büyük tanker facialarından biri olan olay, 36.000'den fazla deniz kuşunun ve 1000'den fazla su samurunun da içinde bulunduğu doğal yaşamı tümüyle tehdit edecek boyutlara ulaşmıştır [10].

Sorunu çözmek için uğraşan bilim adamları ve doğal yaşam uzmanları, bölgenin ekolojik dengesini eskiye döndürmek için doğanın kendi gücünü kullanmayı düşünmüşlerdir. Uzmanlar bölgede yaptıkları taramalar sonucu bu petrolü parçalayabilecek doğal mikroorganizma sayısını belirlemişlerdir. Kontamine yani kirlenmiş alanda 10.000 üzerinde petrol parçalayan bakteri türü bulunmuşlardır. Bu türler arasında;

- *Acinetobacter calcoaceticus*
- *Artrobacter/Brevibacterium sp.*
- *Oceanospirillum sp.*
- *Pseudomonas putida*
- *Pseudomonas sp.*
- *Trichosporon sp.*
- *Alcaligenes sp.*
- *Flavobacter/Cytophaga sp.*
- *Pseudomonas fluorescens*
- *Pseudomonas stutzeri*
- *Pseudomonas vesicularis*
- *Vibrio sp.* yer alır.

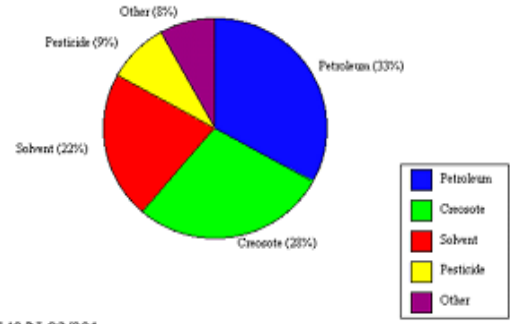
Yaşanan tüm bu olaylar çevre kirliliğinin çözümüne yönelik teknolojilerin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Bu çevre teknolojileri canlı organizmaların ve onlardan elde edilen ürünlerin, zararlı atıkların arıtımında ve çevre kirliliğinin önlenmesinde kullanılmasını kapsamaktadır. Geleneksel yöntemlerden çok daha verimli olan çevre biyoteknolojisi yöntemleri sayesinde, yüksek sıcaklıklarda yakma ve atık sahaları oluşturma gibi yöntemlere alternatifler oluşturulabilmektedir [6]. Çevre konusundaki hassasiyetlerin artmasıyla çevre biyoteknolojisi uygulamaları artacaktır. Bugün, dünyadaki birçok kent atık sularını temizlemek için mikroorganizmaları kullanmakta ve bu kentlerin sayısının hızla artması beklenmektedir. Temizlenmesi yasal olarak zorunlu bölgelerin (maden alanların endüstriyel bölgeler, su kaynakları v.b.), geleneksel yöntemlerle temizlenmesinin maliyeti yapılan hesaplara göre, yaklaşık 1,7 trilyon dolardır. Çevre biyoteknolojisi yöntemleriyle kirlı bölgelerin, bu tutarın çok altında temizlenebileceği hesaplanmaktadır [1].

### Biyoremediasyon

Biyoremediasyon, mikroorganizmalar kullanılarak zararlı maddeleri toksik olmayan bileşiklere dönüştüren bir proses olup, kimyasal sıvıların ve tehlikeli atıkların arıtılması için kullanılan ümit verici tekniklerden biridir [13].

Bakteriler zararlı atıkları, zarsız yan ürünlere dönüştürdükten sonra ya ölümler ya da sayıları normal populasyon düzeyine ulaşır [13]. Böylece ekolojik denge bozulmaz. Ayrıca, toprakta bulunan mikroorganizmaların belirlenmesi ile toprak rehabilitasyonu için en uygun kompozisyon oluşturulabilmektedir.

Bazı durumlarda atıkları işlemede kullanılan mikroorganizmaların yan ürünleri yararlı ürünler oldukları için geri kazanım sağlayabilmektedir. Anaerobik arıtma teknolojisi buna örnek olarak verilebilir. Atıklarında organik madde yoğunluğu fazla olan fabrikalarda uygulanan bu teknolojide, uygun biyokimyasal parametrelerin sağlandığı reaktörler kullanılır. Bu reaktörlere anaerobik koşullarda yaşayan metan bakterileri, organik atıkları parçalayarak kirliliği giderirken



US. EPA/540/N-93/001

Şekil 1. Biyoremediasyon teknolojisinin uygulanabildiği başlıca atık tipleri

bir yandan da metan gazı üretirler. Sonra oluşan bu metandan elektrik üretilerek işletmeye ek bir enerji kaynağı sağlanır.

Özellikle gıda, kâğıt vb. endüstriler bu yöntem için çok uygundur [13].

Biyoremediasyonda rol oynayan mikroorganizmalar funguslar, mayalar ve bakterilerdir [15,16]. Bir mikroorganizmanın canlılığını sürdürebilmesi için besine ve enerjiye ihtiyacı vardır. Doğada mikroorganizmalar toprakta çok çeşitli organik maddeleri parçalayarak kendileri için gerekli olan besin ve enerji kaynağını sağlarlar. Şekil 1.'de görüldüğü gibi bu besin maddelerinin başında petrol ve türevi maddeler, pestisitler, solvent maddeler vb. gelmektedir. Ayrıca metilen klorit ve kükürt gibi kimyasal maddeler de besin ve enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır [13].

Biyoremediasyon olayında kontaminant maddeleri parçalayabilen ve onları toksik olmayan yan ürünlere dönüştüren mikroorganizmaların büyümeleri teşvik edilerek mikroorganizmaların doğal olarak bu prosesinden yararlanılır. Yani biyoremediasyon uygulaması atıkların döküldüğü bölgeye besin aktarımı yapılarak, toprağın bakteri kompozisyonuna göre, doğal olarak toprakta bulunan bakterilerin etkin duruma geçirilmesi ya da toprağa yeni bakteriler aktarılması şeklinde olabilir. Mikroorganizmalar kontaminantlara maruz kaldığında artan bir yetenek ile bu maddeleri degrades etme yönünde bir gelişme gösterirler. Genellikle bu toksik maddeyi parçalayarak enerji elde eden strainler ön plana çıkmaktadır [13].

Biyodegradasyon doğal bir proses olmasına rağmen bazı biyodegrade olabilen organik maddeler doğada parçalanmadan kalmaktadır. Bu durumun en önemli nedeni bir çok çevresel koşulun proses üzerinde etkili olmasıdır [13].

- Kimyasal madde konsantrasyonunun mikroorganizmaya toksik etki yapacak düzeye erişmesi uyum sorununa yol açar,
- Mikrobiyal çeşitlilik biyodegradasyon için elverişsiz veya yetersiz olabilir,
- Çevresel koşulların çok asidik veya bazik olması,
- Besin içeriği yönünden dengelenmemiş maddelerin (petrol ve petrokimyasal atıklar) degradasyonunda azot, fosfor, kükürt v.b. iz elementlerin eksikliği,
- Nem durumunun elverişsiz olması,
- Kimyasal atığı enerji kaynağı olarak kullanan mikroorganizmalar için oksijen ve amonyak gibi elektron akseptörlerinin eksikliği de nedenler arasında yer alır.

Biyoremediasyonda tehlikeli atıkları bertaraf etmek için genetik olarak düzenlenmiş mikroorganizmaların kullanımı

ABD Çevre Koruma Kurumu (EPA) tarafından yasaklanmıştır. Böyle mikroorganizmaların doğada rekabet güçleri zayıftır. Bununla beraber, insan sağlığı ve çevre açısından da ne gibi riskler taşıdığı pek bilinmemektedir. Bu nedenle bu tip mikroorganizmalar ancak laboratuvar çalışmalarında kullanılır [13].

Biyoremediasyonun avantajları [13]:

1. Biyoremediasyon ekolojik olarak güvenli doğal bir prosestir.
2. Kontaminantların bir besin kaynağı olarak mevcut olması durumunda varolan mikroorganizmalar artmaktadır. Kontaminantlar azaldığında populasyon kendiliğinden azalmaktadır.
3. Biyolojik parçalanmadan çıkan atıklar genellikle karbondioksit, su, yağ asitleri gibi zararsız bileşiklerdir. Orijinal pollutanntan daha toksik bir ürün oluşturma olasılığı çok azdır.
4. Biyoremediasyonda kontaminantlar çevresel bir ortamdan bir diğerine transfer edilmeden hedef kimyasal maddeler tamamen ortadan kaldırılmaktadır.
5. Biyoremediasyon tehlikeli atıkların bertaraf edilmesi için sıklıkla kullanılan teknolojilere göre daha ucuzdur. Örneğin, biyoremediasyon ile bir bölgenin temizlenme maliyeti 45-50 milyon \$ iken atıkların ortadan kaldırılması için bir fırın inşa etme maliyeti 140 milyon \$'a kadar çıkmaktadır. Ayrıca atıkların taşınması da pek tercih edilmez.

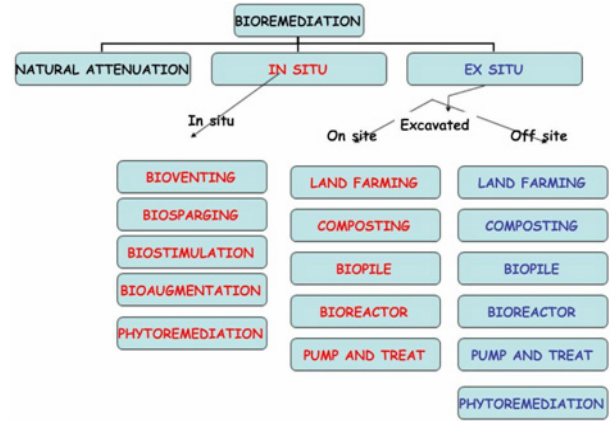
Biyoremediasyonun dejavantajları ise [13]:

1. Sahip olduğu bazı sınırlamalar biyoremediasyonun bir temizleme teknolojisi olarak yaygın kullanımını engeller.
2. Biyoremediasyona başlamadan önce çok iyi bir araştırma yapılması gerekmektedir ve kompleks kontaminant karışımı ve bölgeler için uygun biyoremediasyon teknolojisi mühendisine gerek duyulmaktadır. Toprakta mikroorganizmaların izolasyonu için mikrobiyologlara, parçalanma yol izinin belirlenmesi için ise biyokimyacılar gerek duyulmaktadır.
3. Biyoremediasyonla yapılan temizleme işlemi yakma veya toprağın kazılıp atılması ile karşılaştırıldığında uzun bir zaman almaktadır.
4. Bazı toksik yan ürünlerin oluşumuna karşı önceden tedbir almak gereklidir.

Biyoremediasyon için en uygun kimyasal maddeler [13]:

- Klor içermeyen (=dehalojenize) fenolikler ve kresoller: 2-metil fenol
- Dehalojenize aromatik bileşikler: benzen, toluen, xylene (BTEX)
- Polinükleer aromatik hidrokarbonlar: Creasate
- Aklanlar ve alkenler: Fuel oil
- Poliklorlanmış bifeniller: Triklorobifenil
- Klorofenoller: pentaklorofenoller
- N içeren heterosiklikler: piridin
- Klorlanmış solventler: kloroform, trikloro etilen, vinil klorid
- Herbisit ve pestisitler olup bunların hepsi aerobik biyodegradasyonla parçalanabilmektedir. Klor içermeyen aromatik bileşikler, dehalojenize fenolik bileşikler, klorlanmış solventler ve klorofenoller anaerobik olarak parçalanmaktadır [13].

Biyoremediasyon ilk olarak petrol ürünlerini ve hidrokarbonları degrade etmek için kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle petrol, yağ ve diğer benzeri materyallerin depolandığı yeraltı tanklarının yaklaşık %15'i sızdırmaktadır. Bu bölgelerin çoğunda toprağın ve yeraltı sularının temizlenmesinde



Şekil 2. Biyoremediasyon teknikleri

biyoremediasyon en etkili yöntemdir. Ayrıca orman koruma bölgelerinde özellikle ABD'de 200'den fazla kimyasal bileşimin kompleks bir karışımı olan creasate yılda 500 bin ton kullanılmaktadır. Bu maddeyi üreten sanayi bölgelerinden, tanklardan ve orman koruma bölgelerinden creasate toprak ve yeraltı suyuna sızmaktadır. Bu maddenin temizlenmesinde de biyoremediasyon en etkin yoldur. Şu anda ABD'de EPA tarafından 100'den fazla bölgede biyoremediasyon projeleri planlanıp uygulanmaktadır. Artan toksik madde sayısı ile uygulanan biyoremediasyon yöntemlerinin artacağı umulmaktadır [13].

### Biyoremediasyon Teknikleri

In-situ arıtım, ex-situ arıtım ve kombine arıtım olmak üzere 3 ana sınıfta incelenen biyoremediasyon tekniklerini Şekil 2.'de görüldüğü gibi daha ayrıntılı olarak şematize etmek mümkündür [17].

### In-Situ Arıtım

Hem yüzey hem yeraltı arıtımını kapsamaktadır. Yüzey remediasyonunda oksijenin sağlanması daha kolaydır. Havanın oksijeninden yararlanılır. Yeraltı remediasyonunda kontamine olan materyale mutlaka oksijen veya su verilerek yapılır [13].

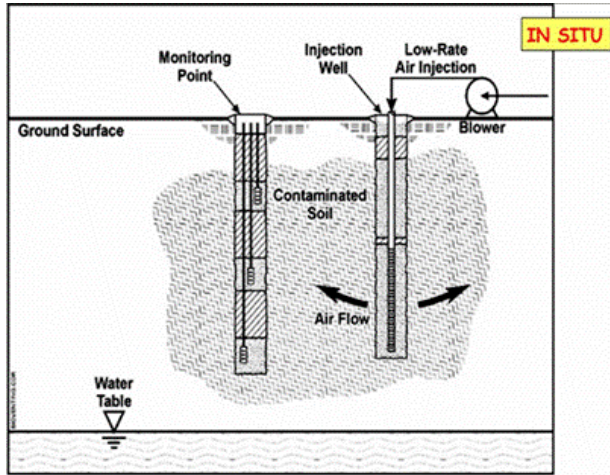
### Yüzey Biyoremediasyon Teknikleri

Toprağın 15-30 cm derinliğinde, kontaminant yoğunluğu yüksek olduğunda uygulanır. Havalandırmayı sağlamak için toprak işlenir ve bakteriyel büyümeyi sağlamak için çeşitli besin maddeleri ve su kullanılır. Burada doğal olarak bulunan mikroorganizmalar kontaminantı biyodegradasyona uğratmakta ve böylece pollutanntı uzaklaştırılmaktadır. Bu yöntemle buharlaşabilen maddelerin volutil remediasyonu gerçekleşir [13].

Bu yöntem petrole kirlenmiş sahillerin, plajların temizlenmesinde etkilidir. Petrol parçalayan mikroorganizmalar diğer besinler sağlandığında sahil şeridindeki petrol kirliliği için diğer fiziksel yöntemlere göre daha kullanışlıdır [13].

### Yeraltı Biyoremediasyon Teknikleri

Kontaminantı degrade eden mikroorganizmalar toprakta ve yeraltında doğal olarak mevcuttur. Yeraltındaki sorun bakterilerin oksijeninin tükenmesidir. Bu nedenle biyoremediasyonun gerçekleşmesi için kirlenmiş bölgeye oksijen verilmeli ve gerekirse besin ilavesi yapılmalıdır. Toprağın ve yeraltı suyunun temizlenmesinde Şekil 3.'te



Şekil 3. Yeraltı biyoremediasyon tekniğinin uygulanması

görüldüğü gibi kanallar aracılığıyla derinlere besin ve oksijen gönderilerek aerobik degradasyonun sürekliliği sağlanır [13,18]. Hava saf oksijen ve  $H_2O_2$  veya ozon gazı olabilir. Genellikle enjeksiyon kuyularıyla 12 m derinliğe kadar hava ulaştırılır. Yeraltı suyunun artılmasında toprağın özellikleri çok önemlidir, suyu ve havayı geçiren gözenekli toprak olmalıdır [13].

#### Ex-Situ Arıtım

Burada toprağın temizlenmesinde kontamine toprak yerinden alınarak arıtma tesisindeki suyla karıştırılıp sürekli oksijen verilerek suyun içerisindeki kontaminasyonu gerçekleştiren organik maddenin biyodegradasyonu gerçekleştirilir. Separasyondan sonra temiz toprak elde edilir. Temizlenen toprak sonra tekrar alınan sahaya götürülür. Aktif çamur yöntemiyle kontamine sudaki organik maddelerin parçalanması sağlanır [13].

#### Kombine Arıtım

Tehlikeli atıklar için önerilen bir yöntemdir (tehlikeli atık alanları, hastane atıkları, radyoaktif atıklar, arıtım çamurlarının döküldüğü alanlardır). Bu tehlikeli alanların kolay kolay degrade olmayan kompleks ve inorganik bileşik karışımları içerir ve sadece kombine arıtım ile temizlenirler [13].

#### Tehlikeli atık alanlarının temizlenmesinden önce dikkat edilmesi gereken noktalar [13]:

- Biyoremediasyonda kullanılacak teknik seçilmeden önce remediasyon seçenekleri üzerine bir ön değerlendirme yapılır. Çok sayıda örneğin laboratuvar analizlerini içeren bir bölge analizi yürütülüp kontaminant saptanır. Bu analizler sonucunda bölgedeki kimyasal maddelerin potansiyel olarak degrade edilip edilmediğinin belirlenmesi gerekir. Eğer biyodegrade edilemiyor ise fiziksel ve kimyasal basamaklar ilave edilmelidir.
- Kontaminantlar arasında mikrobiyal Biyodegradasyon prosesi için toksik maddelerin olup olmadığını araştırılması gerekir.
- Kontaminasyon seviyesinin belirlenmesi gerekir. Kontaminantın hangi konsantrasyonda bulunduğu çok önemlidir.
- Bölgenin mikrobiyolojik karakteristiklerinin belirlenmesi yani bölgede aerobik veya anaerobik bakterilerden

hangisinin daha üstün olduğunun belirlenmesi gerekir.

- Çevresel koşulların biyolojik arıtım için uygun olup olmadığını belirlenmesi gerekir. Bu çevresel koşullar pH, nem içeriği, toksik olan ağır metallerin topraktan ön işleme ayrılıp ayrılmayacağı gibi koşullardır.
- Bölgenin mikrobiyolojik gereksinimlerinin belirlenmesi gerekir. Hem besinlerin hem o bölgede bulunan spesifik kontaminantları parçalayacak ilave bakteriler gerekiyorsa belirlenmesi gereklidir [13].

#### Biyoremediasyonu Etkileyen Çevresel Faktörler

Biyoremediasyonun gerçekleşip gerçekleşmeyeceğini belirleyen en önemli çevresel faktörler pH, sıcaklık, konsantrasyon ve redoks potansiyelidir. Bu faktörler biyoremediasyonun hızını da arttırmaktadır [13, 19].

**pH:** Toprakların çoğu 5-9 arasında pH değerine sahiptir. Bu aralık birçok mikroorganizmanın büyümesi için uygun bir aralıktır. Bakteriye türlerin bir çoğunun büyümesi için optimum pH 6,5-7,5 arasındadır. Toprağın biyoremediasyonunda toprağın pH'sı belirlenip biyoremediasyonu yapacak organizmanın türüne göre en uygun biyodegradasyon pH'sı ayarlanmalıdır. Optimum pH değeri substrata göre de değişmektedir [13].

**Sıcaklık:** Enzimatik olarak katalizlenen arıtım reaksiyonlarını etkiler. Mikrobiyal reaksiyonlarda özellikle belli bir sıcaklığın üzerinde hücresel komponentler irreversibl olarak inaktive olmaktadır. Burada biyoremediasyonda rol alan mikroorganizmaların sıcaklık istekleri göz önünde bulundurulmalıdır. Fakat soğuk iklimlerde biyoremediasyon için beklenmesi gereken süre uzar bunun nedeni reaksiyon hızlarını düşmesidir [13].

**Konsantrasyon:** Kontaminantın konsantrasyonunun anlaşılması çok önemlidir. Düşük konsantrasyonlarda mikroorganizmalar tarafından tolere edilebilir. Ksenobiyotikler, yüksek konsantrasyonlarda toksik etki gösterirler. Konsantrasyon direk olarak spesifik büyüme hızını etkilemektedir. Eğer kontaminantın konsantrasyonu litrede mikrogram, nanogram arasındaki düşük konsantrasyonlarda ise mikroorganizmaların büyümesi için enerji ve C kaynağı olarak yetersiz kalabilmektedir. Yüksek konsantrasyonlarda toksik etki gösterir, düşük konsantrasyonlarda da spesifik büyüme hızını etkilediğinden ne çok düşük ne de çok yüksek konsantrasyonda olmamalıdır [13].

**Redoks Potansiyeli:** Bir ortamın aerobik veya anaerobik olup olmadığını belirler yani bir ortamda hangi elektron akseptörünün olduğunu ifade eder. Redoks potansiyeli yüksek (-) ise nitrat, sülfat, karbondioksit gibi elektron akseptörü olduğunu, yüksek (+) ise elektron akseptörü olarak oksijenin kullanıldığını gösterir [13]. Kontaminantı parçalayan organizmanın kullandığı spesifik elektron akseptörünün organik bir maddenin biyotransformasyonunu gerçekleştirmesinde çok büyük önemi vardır [13].

#### Biyoremediasyonda Biyolojik Uygunluk

Mikroorganizmalar karasal veya sucul habitatlara dağılmış durumdadır. Toprakta hava, su ve katı faz olmak üzere üç faz vardır. Mikroorganizmalar ve pollutant toprağın içerisinde bu fazlarda bulunurlar. Organik pollutantların birçoğu hidrofobik olup toprak partiküllerinin yüzeyinde birikme eğilimindedir. Sadece çok az bir konsantrasyonu su fazında bulunabilmektedir [13].

Bakterilerin ise topraktaki besin maddelerini daha ziyade sıvı faz yoluyla aldığı bilinmektedir. Bu da topraktaki biyotransformasyon oranını düşüren en önemli sebeplerden biridir. Yine kontaminantların özellikle toprakta yarık ve çukurlarda toplanması yani homojen bir dağılım göstermemesi mikroorganizmaların kontaminanta ulaşımını engeller. Kontaminantın fizikokimyasal özellikleri onların biyolojik uygunluklarını belirlemektedir. Örneğin; düşük bir suda erime kabiliyeti biyolojik olarak uygun olmayan bir özelliktir. Yine birbirine karışmayan fazlar oluşturma özelliği de biyolojik olarak uygun olmayan bir özelliktir. Özellikle petrol karışımları ve kolrlu organik maddelerin birçoğu hidrofobik olduğundan toprak içerisindeki hidrofilik kısımlara ulaşmamaktadır [13].

#### Biyoremediasyonun Kontrolünün Yapılması

Biyoremediasyon prosesinin başarılı uygulanıp uygulanmadığının ve etkinliğinin ispatı, prosesin her seviyesinde interdisipliner bir sistematik ve değerlendirme stratejisine gereksinim duymaktadır [13].

Biyoremediasyon kontrolünde bazı parametreler dikkate alınır;

Kimyasal izleme parametreleri: Kimyasal olarak izlenen parametrelerin başında pollütant gelmektedir. Biyoremediasyon yolunda gidiyor ise konsantrasyonun gittikçe azalması gerekir. Bu ana parametrelerden biridir. Diğer parametreler pollütantın referans bir pollütanta göre biyolojik parçalanabilirlik oranıdır. Fakat bu daha ziyade pilot ölçekte kullanılır. Diğer parametreler reaksiyon ara ürünleri ve transformasyon ara ürünleridir. Reaksiyon son ürünleri veya yan ürünleri karbondioksit, metan gibi ürünler olup tam ölçekli proses yani arazide izlenen bir parametredir. Terminal elektron akseptörünün izlenmesi de tam ölçekli proses olup arazide izlenen parametrelerdendir. Daha büyük parametreler kimyasal oksijen ihtiyacı, toplam organik C, çözülmüş organik C ve toplam petrol hidrokarbonlarıdır. Bu da tam ölçekli biyoremediasyon prosesinde kullanılan parametrelerdendir. Toksikite kimyasal olarak bakılan izleme prosesidir. Genel toksisite (hücrede herhangi bir yerde etkili olan toksisite) ve gen toksisitesi (genler üzerinde toksik olup olmadığı) olarak iki şekilde incelenir [13].

Mikrobiyal populasyon ve aktiviteleri için mikrobiyolojik izleme parametreleri: Özellikle kontamine olmuş alanlardaki degradatif mikrobiyal populasyonların ölçek büyüme sonucundaki kompozisyon miktarı, çeşitlilik ve aktivite bilgilerini izlemek için kullanılan parametrelerdir. İlk yapılması gereken degradatif populasyonların sayılmasıdır. Bu toprak ise plate count sayımı (toplam hetotrofların sayımı), spesifik katabolit bir fenetik sayım ise spesifik, bir bakteri sayımı yapılır. Yine arazide zenginleştirme kültürleri yapılabilir [13].

#### Petrol ve Türevlerinin Biyoremediasyonu

Ham petrol organik içeriği kompleks ve değişken bir karışıma sahiptir. Yeraltında birikmiş organik madde, yüksek sıcaklık ve basınç koşulları altında uzun sürede mikroorganizmaların anaerobik degradasyonu sonucu doğal gaz, sıvı ham petrol, kaya petrolü ve zifte dönüşür. Ham petroldeki başlıca bileşikler hidrokarbonlardır. Bunlar; metan, alifatik n-alkanlar, pentanlar, heksanlar, heptanlar, sikloparafinler v.b., benzen, toluen gibi monosiklik aromatikler, naftalin, fenantren gibi polisiklik hidrokarbonlar, kükürt, azot ve ağır metal içeren heterosiklik bileşikler, zift ve katrandır [14].

#### Biyoremediasyon Piyasası

##### Dünya'daki Durum

Özellikle ABD başta olmak üzere biyoremediasyon piyasası endüstrileşmiş ülkelerde giderek artmaktadır.

ABD'de gelişmesinin sebepleri;

1. ABD'de biyoremediasyonun büyük bir kısmı ARGE'lerde geliştirilmiştir.
2. Amerikan Çevre Koruma Kanunu'nun faaliyet alanı çok geniş ve yaptırımlar diğer ülkelere göre çok daha ağırdır.
3. Petrol kirlenmesinin biyoremediasyonla temizlenmesi toplumun biyoremediasyona verdiği önemi arttırmıştır.

1990'lı yıllarda Amerikan biyoremediasyon piyasası 60 milyon \$ olarak hesaplanırken 1995'de 300 milyon \$'a yükselmiştir. ABD'de 150'den fazla şirket bu işle uğraşmaktadır. Bu şirketler üç geniş sektöre sahiptir. Bunlar;

1. Biyoremediasyon hizmetleri
2. Multidisipliner çevre hizmetleri
3. Ürün satıcılarıdır.

ABD'deki bazı şirketler bir terminalin temizliğinde, üç metodu birden kullanmaktadır. İlk olarak zehirli atıkların bulunduğu sahanın toprağı, dev bir çift sürme makinası ile ters yüz edilir. Sonra içine su, gıda maddesi ve bakteri asılanır. Takriben yedi hafta içinde bakteriler toprağın 40-45 cm derinliğine kadar bütün atıkları yiyip bitirirler. Bu toprak, oradan kaldırılıp biyoreaktöre taşındıktan sonra aynı işlemler bir alt tabakadaki toprağa tatbik edilir ve böylece saha tabaka tabaka temizlenmiş olur.

##### Türkiye'deki Durum

Türkiye'de bulunan biyoremediasyon şirketlerinin çoğu ABD şirketlerinin Türkiye'deki temsilcileridir ve ürün satıcısıdır. Bununla beraber, ülkemizde henüz bir arıtım tesisi kurmak tam anlamıyla destek görmemektedir. Konu ile ilgili yaptırımlar çok yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle ARGE'lerin geliştirilmesi ve insan kaynaklarının desteklenmesi gerekmektedir.

## SONUÇ

Biyoremediasyon diğer yöntemlere kıyasla kontamine su ve toprak alanlarının temizlenmesinde daha ucuz ve gelecek vaat eden bir yöntemdir [20]. Uzun dönem kamu sağlığının korunması, küçük bir alanda ve az sayıda ekipmanla dahi prosesin uygulanabilirliği, tehlikeli materyallerin taşınmasına gerek olmaması bu teknolojinin tercih nedenlerindedir.

## KAYNAKLAR

- [1] Türküm, S. (1998). Çağdaş toplumda çevre sorunları ve çevre bilinci. Can G. (Ed.). Çağdaş yaşam çağdaş insan. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi Açık Öğretim Fakültesi İlköğretim Öğretmenliği Lisans Tamamlama Programı, 165-181.
- [2] Yıldız, K., Sipahioğlu, Ş., Yılmaz, M. (2008). Çevre bilimi ve eğitimi, Gündüz Eğitim ve Yayıncılık, Ankara, ISBN: 978-925-6859-86-5 S.104-105.
- [3] Mendez, M. (2010). Green crude is answer, TED Oil Spill Conference, Washington, DC.
- [4] Detchon, R. (2010). Say no to oil, TED Oil Spill Conference, Washington, DC.
- [5] ASCE Task Committee on Modeling Oil Spills. (1996).

- State-of-the-art review of modeling transport and fate of oil spills, Water Resources Engineering Division, ASCE. *Journal of Hydraulic Engineering* 122(11):594-609.
- [6] Biddle, M. (2011). We can recycle plastic, TED Conference, Washington, DC.
- [7] Artuz, M. L. (1991). Petrol kirlenmesi açısından denizlerimizde durum, M.B.B. Natural Resources 12/1.
- [8] Otto Wong, Scd, Face, G. K. Raabe Drph. Ms, (1989) Critical review of cancer epidemiology in petroleum industry employees, with a quantitative meta-analysis by cancer site, *American Journal of Industrial Medicine*, Volume 15, Issue 3, 283–310.
- [9] Ece, J. N. (2008) Tarihe geçen deniz kazaları ve önlemler, Çözüm Var Yayınları
- [10] Barış, E. (2011). Türkiye ve dünyadaki önemli deniz kazaları, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, <http://www.deniz.cevreorman.gov.tr/guncel/T%C3%BCrkiye%20ve%20D%C3%BCnyadaki%20%C3%96nemli%20Petrol%20Kazalar%C4%B1.pdf>
- [11] Schaum, J., Cohen, M., Perry, S., Artz, R., Draxler, R., Frithsen, J. B., Heist, D., Lorber, M., Phillips, L. (2010). Screening level assessment of risks due to dioxin emissions from burning oil from the BP Deepwater Horizon Gulf of Mexico spill. 15;44(24):9383-9.
- [12] National Oceanic and Atmospheric Administration. (2010). Deepwater Horizon Incident: NOAA Situation Update 25 Apr 10. Emergency Response Division, Office of Response and Restoration Website. Retrieved April 26, 2010.
- [13] Alexander, M. (1999). Biodegradation and bioremediation second edition, Academic Press New York.
- [14] Mrozik, A., Piotrowska, Z., Labuzek, S. (2003). Review: Bacterial degradation and bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons, Vol. 12, No. 1 (2003), 15-25
- [15] Frazar, C. (2000). The bioremediation and phytoremediation of pesticide-contaminated sites, National Network of Environmental Studies (NNEMS).
- [16] Strong, P. J., Burgess, J. E. (2008). Treatment methods for wine-related ad distillery wastewaters: a review. *Bioremediation Journal*, 12: 70-87.
- [17] Keshav, P. S., Nand, K. S., Shivesh, S. (2010). Bioremediation: Developments, current practices and perspectives, *Genetic Engineering and Biotechnology Journal*, Volume 2010: GEBJ-3
- [18] Lee, T. H., Byun, I. G., Kim, Y. O., Hwang, I. S., Park, T. J. (2006). Monitoring biodegradation of diesel fuel in bioventing processes using in situ respiration rate, *Water Science and Technology*, 53(4-5):263-72.
- [19] Margesin, R., Schinner, F. (2011). Biodegradation and bioremediation of hydrocarbons in extreme environments, 56:650–663
- [20] Kamaludeen, SPBK., Arunkumar, K. R., Avudainayagam, S., Ramasamy, K. (2003). Bioremediation of chromium contaminated environments, *Indian Journal of Experimental Biology*, 41: 972-985.