

TEHLİKELİ ATIK YÖNETİMİ

Bölüm 7: Tehlikeli Atıklarla Kirlenmiş Alanların İyileştirilmesi

Prof. Dr. Güray Salihoğlu

SALİHOĞLU, G., 2019, Tehlikeli Atık Yönetimi, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu, 510 sayfa, Ankara. ISBN: 978-605-312-330-9.

7. Tehlikeli Atıklarla Kirlenmiş Alanların İyileştirilmesi

Öğretmen Kılavuzu

Öğrenme Amaçları

Bu bölümün sonunda öğrenciler,

1. Kirlenmiş alanların iyileştirilmesinde yerinde ve alan dışında uygulanan teknolojiler hakkında bilgi sahibi olacak,
2. Biyolojik, fiziksel, kimyasal ve ısı yöntemleri arasındaki farkları bilecek,
3. İyileştirme teknolojilerinin etkili olabileceği kirleticiler konusunda yorum yapabilecek,
4. İyileştirme teknolojilerinin sınırlı yönleri hakkında bilgi sahibi olacaktır.

Düşünülmesi Gereken Sorular

1. Kirlenmiş bir toprağı eski haline getirmek mümkün müdür?
2. Toprak iyileştirme yöntemleri uygulandığında toprak yapısı zarar görür mü?
3. Toprakların tehlikeli atıklarla kirlenmesinin önüne geçmek için neler yapılabilir?
4. Yasal düzenleme toprak kirliliğinin önünde geçmek için yeterli midir?

İçindekiler

7. Tehlikeli Atıklarla Kirlenmiş Alanların İyileştirilmesi.....	1
Öğretmen Kılavuzu	2
7.1. Giriş.....	4
7.2. Toprakların Kirlenmesi ve Kirlenmiş Toprakların İyileştirilmesi	4
7.3. Kirlenmiş Alanları Temizleme Teknolojileri	8
7.3.1. Kirlenme Alanında Uygulanan Biyolojik Yöntemler.....	8
7.3.2. Kirlenme Alanında Uygulanan Fiziksel ve Kimyasal Yöntemler	16
7.3.3. Kirlenme Alanında Uygulanan Isıl Yöntemler	26
7.3.4. Kirlenme Alanının Dışında Uygulanan Biyolojik Yöntemler	29
7.3.5. Kirlenme Alanının Dışında Uygulanan Fiziksel ve Kimyasal Yöntemler	34
7.3.6. Kirlenme Alanının Dışında Uygulanan Isıl Yöntemler	44
7.4. Kirliliği Sınırlama Teknolojileri	45
7.5. Kirlenmiş Yeraltısularının Arıtımı.....	47
7.6. Tehlikeli Atıklarla Kirlenmiş Alanlarda Gaz Emisyonlarının Arıtımı	48
7.7. Kirlenmiş Alanlarla İlgili Ulusal Yasal Mevzuat	48
Özet ve Değerlendirme.....	50
Kaynaklar	52
Konu Sonu Soruları ve Çözüm Setleri	54
Test	57

7.1. Giriş



Bu bölümde tehlikeli maddelerle veya tehlikeli atıklarla kirlenmiş alanların iyileştirilmesinde kullanılan teknolojiler açıklanmaktadır. Kirlenmiş alanların temizlenmesinde uygulanabilecek teknolojiler, kirlenme alanında (in situ) veya kirlenme alanının dışında (ex situ) uygulanabilecek teknolojiler olarak iki grupta değerlendirilmektedir. Bölüm kapsamında bu iki grup içinde yer alan teknolojiler, biyolojik, fiziksel-kimyasal ve ısı yöntemleri başlıkları altında sunulmaktadır. Kirlenmiş alanların iyileştirilmesinde temizleme teknolojilerinin yanısıra kirlilik sınırlama yöntemleri de sunulmaktadır. Bölüm, bu alandaki ulusal mevzuatın özetlenmesiyle sonlandırılmaktadır.

7.2. Toprakların Kirlenmesi ve Kirlenmiş Toprakların İyileştirilmesi

Kirleticiler çoğunlukla kazalar, taşıma esnasında dökülmeler, atık depolama alanlarından sızma sonucunda veya endüstriyel faaliyetler esnasında çevresel ortamlara yayılır (Meuser, 2013; Riser-Roberts, 1998 ; Wu ve diğ., 2004). Hızlı endüstrileşme devam ettiği müddetçe, çevresel ortamlarda zehirli kimyasal maddelerle karşılaşmak kaçınılmaz hale gelmektedir. Örneğin biyobozunur olmayan ağır metallerin topraktaki birikimleri sonucunda gıda zincirleri etkilenmekte, insan sağlığına olan risk artmaktadır (Sarwar ve diğ., 2017).

Toprak, gerek bitki büyümesindeki gerekse ölü biyokütlenin parçalanarak yaşam döngüsüne girmesindeki rolü açısından, karasal ekosistemin önemli bir unsurudur. Doğası gereği heterojendir; mineraller ve organik katılar, sıvı ve gaz fazda çeşitli bileşenler içerir (Hyman ve Dupont, 2001). Toprağın mineral kısmı, ana kayaçların iklimsel koşullara maruziyeti sonucunda ortaya çıkan ürünlerden, silikatlardan, kil minerallerinden, demir, alüminyum ve mangan oksitlerden, kireçtaşı gibi karbonatlardan oluşmaktadır. Toprağın organik kısmını yaşayan canlılar, ölü bitkiler, mikroorganizmaların bitki artıklarını parçalaması sonucu oluşan koloidal humus oluşturmaktadır (Gavrilescu ve diğ., 2009). Katı bileşenler biraraya gelerek agrega yapısı oluşturmakta, böylelikle birbiriyle bağlantılı ve içi hava veya suyla dolu boşluklardan oluşan bir sistem ortaya çıkmaktadır (Gavrilescu ve diğ., 2009).

Sonuçta ortaya çıkan toprak - su - hava ortamı, karmaşık bir yapıdadır. Farklı toprak fraksiyonları ve bileşenleri antropojenik kimyasal maddelere maruz kaldığında, farklı kimyasal reaksiyonlar gerçekleşir. Kirleticilerin kile veya organik maddeye tutunması durumunda ortaya çıkan risk düşük düzeydedir. Bazı durumlarda kirleticiler toprak içinde tutunmadan kalır veya toprak asitliğindeki değişikliklerden dolayı tekrar hareketlenerek önemli bir risk oluştururlar (Gavrilescu ve diğ., 2009).

Petrolle kirlenmiş toprakların temizlenmesi sürecinde yaşanan problemler, hızlı sonuç veren ve farklı fiziksel ortamlarda kolay uygulanabilen iyileştirme teknolojilerinin geliştirilmesi ihtiyacını ortaya çıkarmıştır (USEPA, 2002). Petrol hidrokarbonları, çok klorlu bifeniller (PCB'ler), çok halkalı aromatik hidrokarbonlar (PAH'lar), ağır metaller ve pestisitler gibi karmaşık kimyasal karışımların insan sağlığı ve çevre üzerindeki potansiyel tehlikeleri konusunda kamuoyu bilinçlenmeye başlamıştır. Çevresel kirlenmenin getirdiği çözüm bulma ihtiyacına yanıt olarak toprak, atıksu, yeraltı suyu gibi farklı çevresel

ortamlar için kirlenme alanında (in situ) veya kirlenme alanı dışında (ex situ) uygulanabilecek çeşitli iyileştirme teknolojileri geliştirilmiştir (Pavel ve Gavrilescu, 2008). Kirlenmiş bir alanın temizlenebilmesi veya kirlenmenin güvenli ve kabul edilebilir bir seviyeye getirilebilmesi için farklı biyolojik, fiziksel ve kimyasal yöntemlerin bir kombinasyonunun kullanılması gerekebilir (USEPA, 2002).

Kirlenmiş alanların iyileştirilmesi için uygulanacak teknolojinin seçimi, kirleticinin türüne, alanın özelliklerine, yasal zorunluluklara, maliyet ve zaman sınırlamalarına bağlı olarak değişir (Reddy ve diğ., 1999). İyileştirme teknolojileri alana özgü olduğu için, başarılı bir alan iyileştirme çalışmasında, uygun teknolojinin seçim aşaması zor ancak çok önemli bir adımdır (USEPA, 2002).

Alan iyileştirme çalışmalarının amacı, kirlenmeyi sınırlandırmak, çevrenin daha fazla bozulmasının önüne geçmek, insan ve diğer canlıların tehlikeli maddelere maruz kalmalarını engellemektir. Alanda uygulanacak iyileştirme teknolojisinin seçimi için aşağıdaki kriterler dikkate alınmaktadır:

- İyileştirme hedeflerine kısa ve uzun dönemde ulaşma etkinliği
- Kirleticici hacmini azaltma etkinliği
- Kirleticinin zehirliliğini azaltma etkinliği
- Maliyet etkinliği

Aşağıda en hafiften en etkin olanına kadar çeşitli iyileştirme stratejileri sıralanmaktadır (Hyman ve Dupont, 2001; Pavel ve Gavrilescu, 2008):

1. **Değişiklik yapmamak:** Çevresel değerlendirme sonucunda insan ve çevre sağlığı açısından bir risk oluşumu saptanmazsa herhangi bir iyileştirme adımı zorunlu tutulmayabilir. Hayvan ve insan maruziyetinin olmadığı küçük ölçekli dökülmeler durumunda herhangi bir iyileştirme çalışması tercih edilmeyebilir.
2. **Kurumsal ve Yasal Yaptırımlar:** Tehlikeli bir durum oluşması durumunda, alanın kullanımını kısıtlayacak veya yasaklayacak kurumsal yaptırımlar uygulanabilir. Kurumsal yaptırımlar kapsamında, kirlenmiş alana giriş yasaklanabilir, kirlenmiş alanın çitlerle ayrılması istenebilir, kirlenmiş akiferlerin yakınında kuyu açılmasına izin verilmeyebilir.
3. **Doğal Yenilenmenin İzlenmesi:** Bazı durumlarda, doğa kirlenmeyi kendi kendine temizleyebilir. Bazı kirleticiler güneş ışığı yardımıyla (fotoliz), biyo-iyileştirme yoluyla veya hidroliz gibi kimyasal reaksiyonlar yoluyla tehlikesiz bileşenlerine ayrılabilir. Bazen bazı kirleticiler topraktaki katı partiküllere tutunarak hareketsiz hale gelebilir. Böyle bir olasılık bulunduğu durumda doğal yenilenmenin gerçekleşip gerçekleşmediğinin izlenmesi gereklidir.
4. **Kirliliğin Sınırlandırılması:** Çevresel kirlenmenin getirdiği risk, insanların, yaban hayatının ve çevresel ortamların bu kirlilikle temas yollarının sınırlandırılmasıyla azaltılabilir. Buna örnek olarak kirlenmiş toprakların üzerinin örtülmesi ve fiziksel bariyerlerin oluşturulması verilebilir.

5. Kirleticilerin Parçalanması: Yan ürünlerin zehirli olmaması durumunda kirleticilerin parçalanması, riski ortadan kaldırabilir. Bu tür teknikler yerinde (in situ) veya alan dışında (ex situ) olarak uygulanabilir. Fito-iyileştirme, biyo-iyileştirme, fenton uygulaması ve ozonlama bu yöntemlere örnek olarak verilebilir.

6. Temizleme ve Bertaraf: Bazı durumlarda en iyi seçenek kirlenmiş toprağı fiziksel olarak yerinden almak ve lisanslı bir bertaraf alanında depolamak olabilir. Genellikle bu durum kimyasal maddeler ve radyoaktivite ile kirlenmiş topraklar için geçerlidir. Diğer durumlarda toprak yıkama, ısı işlem vb. yöntemlerle kirleticileri topraktan ayırmak mümkün olmaktadır. Yeraltısuyu içindeki kirleticiler, aktif karbon veya iyon değişimi gibi çeşitli arıtma yöntemleriyle giderilebilir.

Toprak tabakalı bir yapıya sahiptir. Üst kısım doymamış bölgeyi (sızdırma bölgesi), alt kısım ise doymuş bölgeyi oluşturmaktadır. Toprakta kirletici taşınımını etkileyen faktörler arasında yoğunluk, gözeneklilik, nem oranı ve geçirimsizlik sayılabilir. Kirleticilerin buhar basıncı ve kimyasal tabiatı da taşınımı etkiler (Pavel ve Gavrilescu, 2008).

Birçok alanın iyileştirilmesinde tek başına veya birbiriyle bağlantılı olarak uygulanayaygın stratejiler aşağıdaki gibidir:

- Kirleticilerin parçalanması veya değiştirilmesi
- Kirleticilerin çevresel ortamdan çıkarılması veya ayrılması
- Kirleticilerin hareketsiz hale getirilmesi.

Kirleticilerin parçalanmasını veya kimyasal yapılarının değiştirilmesini sağlayan teknolojiler biyolojik, fiziksel - kimyasal ve ısı teknolojiler olarak gruplandırılabilir. Bu teknolojiler yerinde veya kirlenmiş alanın dışında uygulanabilir.

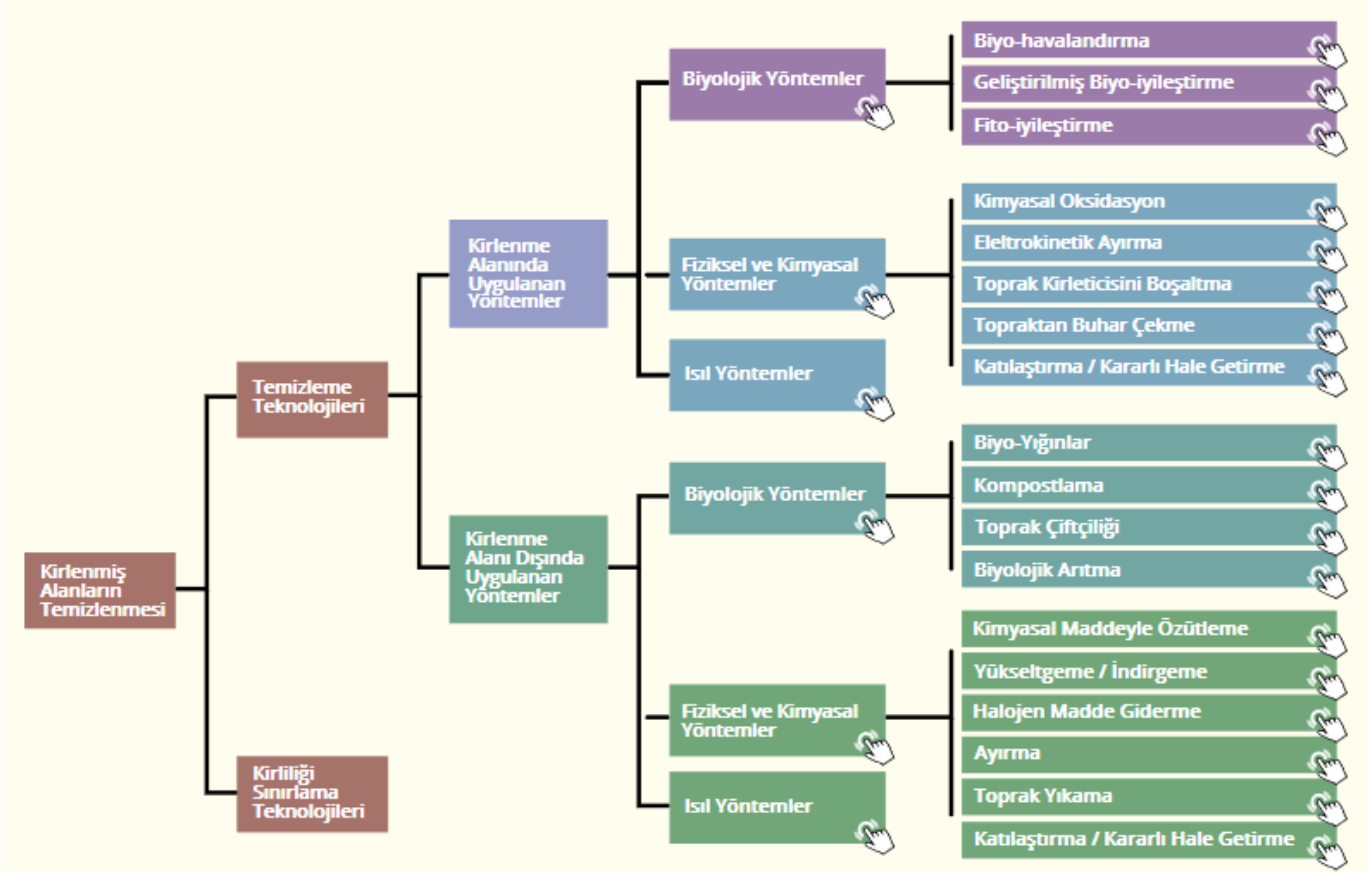
Kirleticilerin çevresel ortamdan çıkarılması veya ayrılması için yaygın olarak ısı ayırma (termal desorpsiyon), toprak yıkama, çözücüyle çıkarma (solvent ekstraksiyonu), topraktan buhar çekme (toprak buhar ekstraksiyonu-SVE) teknolojileri uygulanmaktadır. Kirlenmiş yeraltısuları için ise faz ayrımı, karbon adsorpsiyonu, havayla sıyırma, iyon değişimi gibi yöntemler ayrı ayrı veya kombinasyon halinde uygulanabilir. En etkin arıtma kombinasyonuna ulaşmak için en etkin kirletici taşınma mekanizmalarının kullanıldığı teknolojinin seçilmesi gerekmektedir. Toprak içinde havanın suya oranla daha fazla taşınabileceği unutulmamalıdır. Örneğintopraktabulunan suda çözünmeyen uçucu bir kirletici için topraktan buhar çekme (SVE) teknolojisi toprak yıkama yönteminden daha etkin bir giderim sağlar.

Kirleticileri hareketsiz hale getiren teknolojiler arasında kararlı hale getirme, katılaştırma ve kirlilik sınırlama (depolama veya sulu harç duvarlar oluşturma) yöntemleri bulunmaktadır. Bu teknolojilerin hiçbirisi kalıcı olarak etkili değildir. Bu nedenle zaman zaman bakım faaliyetlerinin de yürütülmesi gerekir. Kararlı hale getirme teknolojileri genellikle metallerle ve diğer inorganik kirleticilerle kirlenmiş alanların iyileştirilmesinde tercih edilir.

Genelde bütün bir kirlenmiş alanı iyileştirmek için tek bir teknoloji yeterli olmaz; farklı teknolojiler bir kombinasyon halinde uygulanır. Toprakтан buhar çekme (SVE) teknolojisi, yeraltısuyunun pompalanması

ve hava sıyırma yöntemleriyle birleştirilerek, kirleticiler hem yeraltısuyundan hem de topraktan aynı anda uzaklaştırılmaya çalışılır. SVE sisteminden ve hava sıyırıcıdan çıkan emisyonlar, tek bir gaz arıtma ünitesinde işlem görebilir. Toprak içinden geçen hava akışının bir başka faydası da doğal biyolojik aktiviteyi tetiklemesidir; bu durumda biyolojik parçalanma ortaya çıkabilir. Bazı durumlarda hava doygun veya doymamış bölgeye enjekte edilerek kirletici taşınımı kolaylaştırılır ve biyolojik aktivite desteklenir.

Kirlenmiş alanların iyileştirilmesinde uygulanan yöntemler Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Kirlenmiş alanların iyileştirilmesi için uygulanan yöntemler (USEPA, 2002)

Kirletici sınıflarına göre kirlenme alanında uygulanabilecek temizleme teknolojileri Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. Kirletici sınıflarına göre kirlenme alanında uygulanabilecek temizleme teknolojileri (USEPA, 2006)

O: İyi, Ø: Ortalama, ●: Kötü, K: Kimyasal maddeye özgü UOB: Uçucu Organik Bileşik	Halojeniz UOB'ler	Halojenli UOB'ler	Halojeniz Yarı UOB'ler	Halojeniz Yarı UOB'ler	Yakutlar	inorganik maddeler	Radyonüklitler	Patlayıcılar
	Fiziksel / Kimyasal Yöntemler							
Topraktan Buhar Çekme (SVE)	O	O	●	●	O	●	●	●
Katılaştırma / Kararlı hale getirme (K/K)	●	●	Ø	Ø	●	O	O	●
Kimyasal Oksidasyon	Ø	Ø	●	Ø	●	K	K	Ø
Toprak kirleticisini boşaltma	O	O	Ø	Ø	Ø	O	●	●
Elektronik Ayırma	Ø	Ø	Ø	Ø	●	O	Ø	●
Biyolojik Yöntemler								
Biyo-iyileştirme	O	O	O	K	O	K	K	O
Biyo-havalandırma	O	O	O	●	O	●	●	●
Fito-iyileştirme	Ø	Ø	Ø	K	Ø	Ø	●	●
Isıl Yöntemler								
Isıl Yöntem (elektriksel dirençle ısıtma, buhar enjeksiyonu ve ekstraksiyonu, kondüktif ısıtma, radyofrekansla ısıtma ve vitrifikasyon)	O	O	O	O	O	●	●	●

7.3. Kirlenmiş Alanları Temizleme Teknolojileri

7.3.1. Kirlenme Alanında Uygulanan Biyolojik Yöntemler

Yerinde yapılan temizleme işleminin başlıca avantajı, toprağın kazılma ve taşınma ihtiyacını ortadan kaldırmasıdır. Bu da ekonomik bir avantaj sunmaktadır. Ancak yerinde arıtma genellikle daha uzun süreler gerektirmekte, temizleme işleminin tüm alanda eşit oranda gerçekleştiğinden emin olunamamaktadır. Toprak ve akifer özellikleri çeşitlilik gösterdiği için sürecin etkinliğini doğrulamak zor olmaktadır (USEPA, 2002).

Biyo-iyileştirme teknikleri, mikroorganizmalar için uygun ortamlar oluşturularak, büyümelerinin ve kirleticileri gıda ve enerji kaynağı olarak kullanmalarının tetiklendiği parçalama teknikleridir. Bu, mikroorganizmalar için gereken oksijen, besin maddesi ve nem ortamının oluşturulması, sıcaklık ve pH şartlarının kontrol edilmesi anlamına gelmektedir. Bazen özel kirleticileri parçalamak üzere adapte edilmiş mikroorganizmaların alana uygulanması yoluyla süreç hızlandırılmaktadır (USEPA, 2002).

Biyolojik süreçler genellikle düşük maliyetlerle uygulanabilir. Kirleticiler bu şekilde parçalandığı için kalıntıların bertarafı gibi bir durum sözkonusu olmaz. Ancak bu süreçler uzun sürelerde gerçekleştiği için kirleticilerin parçalanıp parçalanmadığından emin olunamaz. Örneğin poliaromatik hidrokarbonlar (PAH'lar) biyolojik süreçlerle parçalandıklarında geride daha az parçalanabilir durumda olan PAH'lar kalır. Oluşan bu yeni PAH'lar kanserojen türler olarak sınıflandırılır (USEPA, 2002). Klor konsantrasyonu arttıkça biyo-parçalanabilirlik azalır. Bazı bileşenlerin kendilerinden daha zehirli bileşiklere parçalanabildiği de bilinmektedir (örn. trikloretilen vinil klorüre parçalanabilir). Yerinde yapılan uygulamalarda oluşan bu yan ürünler, yeraltısuyuna taşınabilir veya herhangi bir iyileştirme yapılmazsa doğrudan temas alanında bulunabilir. Bu iyileştirme yönteminde toprak, akifer ve kirleticinin karakterizasyonu ve çekilen yeraltısuyunun artırılması gerekli olmaktadır. Bazı durumlarda, düşük seviyede kirlenmiş yeraltısuyu, iyileştirme yapılan alana geri devrettirilerek alanın sulanması sağlanır (USEPA, 2002).

Bütün organik bileşikler için uygun olmasa da, biyo-iyileştirme teknikleri özellikle petrol hidrokarbonları, çözücüler, pestisitler, ahşap koruyucular ve bazı diğer organik kimyasal maddelerle kirlenmiş toprakların iyileştirilmesi için başarıyla uygulanmaktadır. Biyo-iyileştirme inorganik kimyasal maddelerin parçalanması için uygun değildir.

Mikroorganizmaların kirleticileri parçalama dereceleri, kirleticilerin konsantrasyonlarına, oksijen teminine, nem, sıcaklık, pH ve besin maddesi düzeylerine bağlıdır. Yerinde yapılan uygulamalar toprak parametrelerine karşı hassasiyet gösterir. Örneğin, toprakta kil ve humik madde gibi bileşenlerin bulunması, biyolojik süreç performansında değişikliklere yol açar.

Toprakta aerobik koşulları sürdürmeye yetecek düzeyde oksijen bulunduğundan emin olmak için hava veya hidrojen peroksit enjeksiyonuna başvurulabilir. Ancak hidrojen peroksit kullanımı çok sınırlı düzeyde tutulur, çünkü yüksek konsantrasyonlarda (100 ppm üzeri) mikroorganizmalar için zehirli olabilir. Yüksek klorlu kirleticilerin parçalanması için anaerobik şartlara başvurulabilir; ancak bu süreç çok yavaş gerçekleşir. Kısmen klor giderimi yapılmış kirleticilerin diğerleri kadar parçalanabilmesi için anaerobik sürecin ardından aerobik süreçler uygulanabilir.

Su, besin maddelerinin ve organik bileşenlerin mikrobiyal hücreye iletilmesi ve metabolik atıkların hücreden dışarı atılması için bir taşıma ortamı olarak hizmet verir. Ancak suyun gereğinden fazla olması, oksijenin taşınmasını engelleyeceğinden aerobik mikroorganizmalar için ölümcül olabilir.

Hücre büyümesi için gereken besin maddeleri, azot, fosfor, potasyum, kükürt, magnezyum, kalsiyum, mangan, demir, çinko, bakır ve iz elementler olarak sayılabilir. Besin maddeleri yeterli düzeyde bulunmuyorsa mikrobiyal faaliyet sınırlanır. Kirlenmiş çevrelerde eksikliği en çok hissedilen maddeler genellikle azot ve fosfor olmaktadır (USEPA, 2002). Bu elementler biyo-iyileştirme sistemine kullanılabilir

formlarda (azot için amonyum, fosfor için fosfat olarak) ilave edilir. Fosfatlar, demir ve kalsiyum gibi minerallerle reaksiyona girerek kararlı çökelekler oluşturup toprak ve akiferdeki boşlukları doldurarak tıkanmalara yol açabilir.

pH, çözünürlüğü, dolayısıyla birçok bileşenin mikroorganizmalar için yarayışlılığını etkiler. Mikroorganizmalar için zehirli olan birçok metal yüksek pH düzeylerinde çözünmez formda bulunur. Bu nedenle pH düzeyi artırılarak mikroorganizmaların zehirlenme riski azaltılabilir.

Sıcaklık, ortamdaki mikrobiyal faaliyeti etkiler. Sıcaklık azaldıkça biyolojik parçalanma yavaşlar. Mikroorganizmalar donma noktasının altında, canlı halde kalsalar da faaliyet gösteremezler, ancak sıcaklık arttıkça faaliyetlerini sürdürürler. Biyo-iyileştirme alanının, sıcak hava enjeksiyonu gibi bir yöntemle ısıtılması iyileştirme sürecini hızlandırabilir. Ancak gereğinden fazla olan bir sıcaklık yükselmesi, bazı mikroorganizmalar için ölümcül olabilir, toprağı steril hale getirebilir.

Sıcaklık artışı bazı kirleticilerin buharlaşmasına neden olabilir. Kirleticilerin çözünürlüğünün genellikle sıcaklıkla artıyor olmasına rağmen bazı hidrokarbonların düşük sıcaklıkta daha çözünür olabildiğı bilinmektedir (USEPA, 2002). Oksijenin çözünürlüğü sıcaklıkla artmaktadır.

Biyolojik faaliyetler, belirli kirleticileri parçalamak için özellikle yetiştirilmiş ve olağandışı çevresel şartlarda yaşayabilecek mikrobiyal kültürlerin kullanılmasıyla başlatılır. Bazen kirlenme alanındaki mikroorganizmalar toplanmakta, özel olarak yetiştirilmekte ve alandaki mikroorganizma topluluğunu artırmak için tekrar alana aşılanmaktadır (USEPA, 2006).

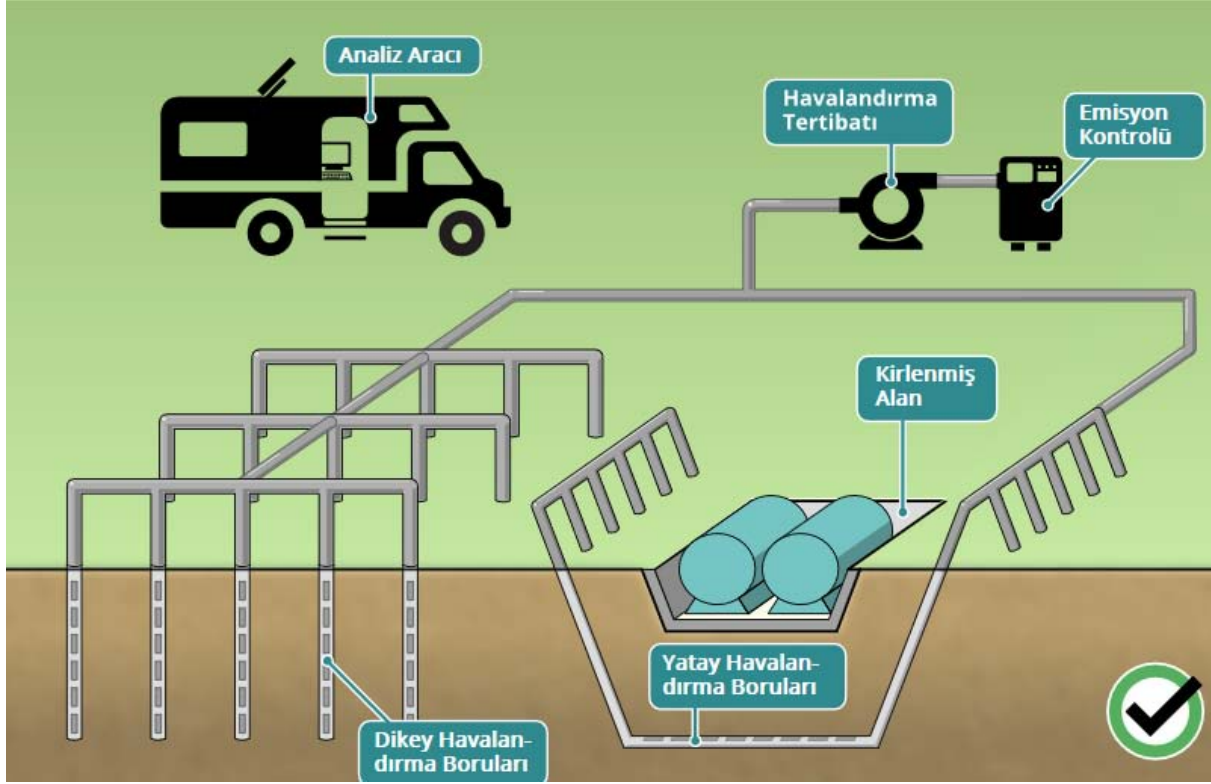
Biyo-iyileştirmenin belli bir durum için etkin olup olmayacağını anlamak için arıtılabilirlik veya fizibilite çalışmaları uygulanır. Çalışmanın boyutları kirleticinin tabiatına ve alanın özelliklerine göre değişir. Petrol hidrokarbonlarıyla (benzin veya diğer parçalanabilir organik maddeler) kirlenmiş alanlar için, yerli mikrobiyal toplulukların mevcudiyetlerini ve düzeylerini, besin maddesi miktarını, mikrobiyal zehirlerin bulunup bulunmadığını, pH, gözeneklilik ve nem gibi toprak özelliklerini incelemek için temsil edici örnekler üzerinden hareket etmek yeterlidir. Biyolojik yöntemlerin etkinliğini doğrulamak için "öncesi" ve "sonrası" durumlarını temsil edecek istatistiki karakterizasyon teknikleri uygulanmalıdır.

Yerinde uygulanabilen biyolojik temizleme yöntemleri arasında biyo-havalandırma, geliştirilmiş biyo-parçalanma ve fito-iyileştirme sayılabilir (USEPA, 2006).

7.3.1.1. Biyo-havalandırma

Bu yöntemde kirlenmiş ve doymuş olmayan topraklara, biyolojik parçalanmayı hızlandırmak amacıyla basınçlı hava veya oksijen verilmektedir (USEPA, 2002).

Şekil 2'de tipik bir biyo-havalandırma sistemi görülmektedir.



Şekil 2. Tipik bir biyo-havalandırma sistemi (USEPA, 2002)

Biyo-havalandırma, topraktaki mikroorganizmalara oksijen temin ederek, kirlenmiş alandaki aerobik olarak parçalanabilir bileşiklerin biyo-parçalanmalarını hızlandıran bir teknolojidir. Toprakta buhar çekme teknolojisine tersine, biyo-havalandırmada mikrobiyal faaliyete yetecek kadar oksijen sağlamak üzere düşük hava oranları uygulanır. Oksijen, topraktaki kirlenme kalıntılarının üzerine doğrudan hava enjekte edilerek uygulanır. Biyolojik olarak aktif bir toprakta buhar hareketi çok daha yavaş olacağı için biyoparçalanma buhar hareketinden önce gerçekleşir. Biyo-havalandırma orta ve uzun dönemde sonuç veren bir teknolojidir. Temizlenme birkaç aydan birkaç yıla kadar uzayabilir (USEPA, 2002).

Biyo-havalandırma teknolojilerinin petrol hidrokarbonlarıyla, klorlu olmayan çözücülerle, bazı pestisit türleriyle, ahşap koruyucularla ve diğer bazı organik kimyasal maddelerle kirlenmiş toprakların iyileştirilmesinde başarıyla uygulandığı bilinmektedir (USEPA, 2002, 2006). Biyo-iyileştirme yoluyla inorganik maddeler parçalanmasa da bu maddelerin değerlikleri değiştirilerek mikroorganizma yüzeyine tutunma ve birikme özellikleri geliştirilebilir.

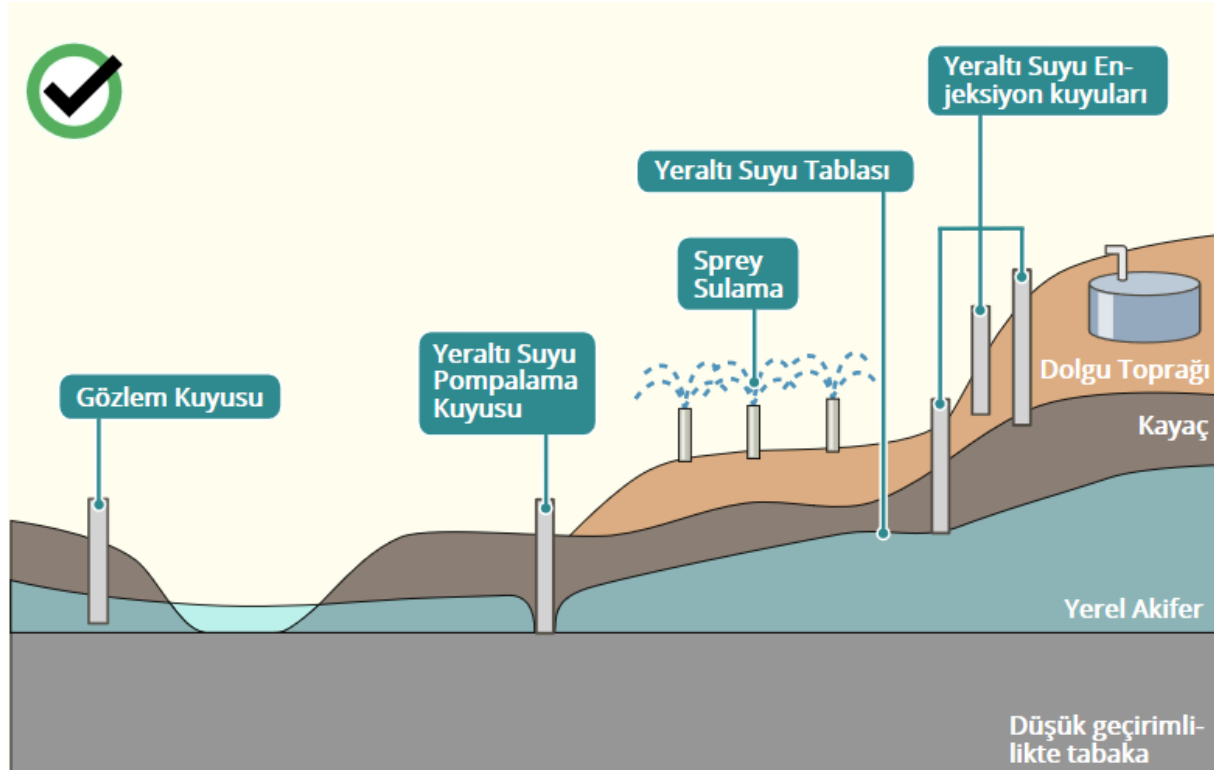
Bu sürecin etkinliğini sınırlandıran faktörler:

- Yüzeyin 1 metreye kadar altında bulunan yeraltı suyu tabakası ve doymuş toprak gözenekleri biyo-havalandırma performansını azaltır.

- Hava enjeksiyon kuyularının etki çapının içinde buhar birikimi olabilir. Bu problem, biyo-havalandırmadan önce buradaki buharın çekilmesiyle azaltılabilir.
- Toprak neminin çok düşük olması biyo-parçalanmayı sınırlandırır ve biyo-havalandırmanın etkinliğini azaltır.
- Çıkan gazların izlenmesi gerekli olabilir.
- Klorlu bileşiklerin aerobik parçalanması çok zor olabilir. Anaerobik bir süreç bu sorunu hafifletebilir.
- Düşük sıcaklıklar iyileştirmeyi yavaşlatabilir (Khan ve diğ., 2004).

7.3.1.2. Geliştirilmiş Biyo-iyileştirme

Kirlenmiş alanlara su bazlı çözeltiler enjekte ederek alandaki yerli mikroorganizmaların faaliyetlerinin desteklenmesi ve biyolojik parçalanmanın artırılması teknolojisidir (USEPA, 2002). Biyo-iyileştirmeyi geliştirmek için besin maddeleri, oksijen ve diğer katkıları kullanılır. Şekil 3'te tipik bir geliştirilmiş biyo-iyileştirme sistemi görülmektedir. Yerli veya aşılınmış mikroorganizmalar (mantar, bakteri ve diğer mikroorganizmalar), kirlenmiş toprak ve/veya yeraltısuyundaki organik kirleticileri metabolize ederek zararsız son ürünlere dönüştürür.



Şekil 3. Tipik bir Geliştirilmiş Biyo-iyileştirme Sistemi (USEPA, 2002)

Yeterli oksijen ve besin maddeleri bulunması durumunda, mikroorganizmalar organik kirleticileri karbondioksit, su ve mikrobiyal hücre kütlelerine dönüştürür. Biyo-iyileştirme, yeraltısuyunun veya kirlenmemiş suyun besin maddeleriyle karıştırılarak ve çözülmüş oksijenle doymuş hale getirilerek

toprağa enjekte edilmesi yoluyla geliştirilir. Bazen alıştırılmış (aklime edilmiş) mikroorganizmalar ve/veya hidrojen peroksit gibi başka bir oksijen kaynağı ilave edilir. Sığ bölgesi kirlenmiş topraklarda sprey sulama, derin bölgesi kirlenmiş topraklarda ise enjeksiyon kuyuları kullanılmaktadır. Toprak sıcaklığı düşük olan kirlenmiş alanlarda, toprak yüzeyini örtterek sıcaklığını ve parçalanma oranını artırmak için ısı battaniyeleri kullanılabilir. Geliştirilmiş biyo-iyileştirme uzun dönemli bir teknoloji olarak bilinmektedir. Bir kirli su birikintisini temizlemek yıllarca sürebilir.

Oksijenin olmaması durumunda, organik kirleticiler, mikroorganizmalar tarafından metan, karbondioksit ve bazı iz elementlere dönüştürülür.

Kirleticiler bazen orjinal kirleticilerden daha tehlikeli bileşiklere dönüştürülebilir. Örneğin trikloretilen (TCE), oksijensiz koşullarda kendisinden daha tehlikeli ve kalıcı bir bileşik olan vinil klorüre dönüştürülür. Bu tür problemlerden kaçınmak için biyo-iyileştirme projeleri yerinde gerçekleştirilir. Aerobik koşullar tekrar oluşturulursa vinil klorür parçalanabilir.

Bu teknik, petrol hidrokarbonları, çözücüler, pestisitler, ahşap koruyucular ve diğer organik kimyasal maddelerle kirlenmiş toprak, çamur ve yeraltısuyu için uygulanabilir. Laboratuvar ve pilot ölçekli bazı çalışmalar, askeri mühimmat atıklarından kaynaklanan nitrotoluenin parçalanmasında anaerobik parçalanmanın etkili olduğunu göstermiştir (USEPA, 2002). Biyo-iyileştirme düşük seviyeli kirlilik gideriminde etkilidir.

Temizlenen kirletici grupları arasında PAH'lar, halojeniz yarı uçucu organik bileşikler (UOB'ler), BTEX'ler bulunmaktadır. Biyo-iyileştirmede ısı uygulaması yoktur, besin maddesi gibi düşük maliyetli girdiler gerekli olmaktadır. Tekniğin uygulanmasıyla ilave arıtma ve bertaraf gerektiren kalıntılar oluşmaz. Yerinde uygulama yapıldığında kirlenmiş toprağın kazılması gerekli olmaz. Fiziko-kimyasal ve ısıl yöntemlerle kıyaslandığında, özellikle halojeniz yarı UOB'lerin gideriminde biyo-iyileştirmenin maliyet avantajı yüksektir.

Biyo-iyileştirme yoluyla İnorganik bileşiklerin parçalanması mümkün olmasa da inorganik maddelerin değeriği değiştirilerek kirleticilerin toprak yüzeyine tutunma, çökme, birikme ve mikroorganizmalar tarafından alınma özellikleri gelişir.

Teknolojinin sınırlı yönleri aşağıdaki gibidir:

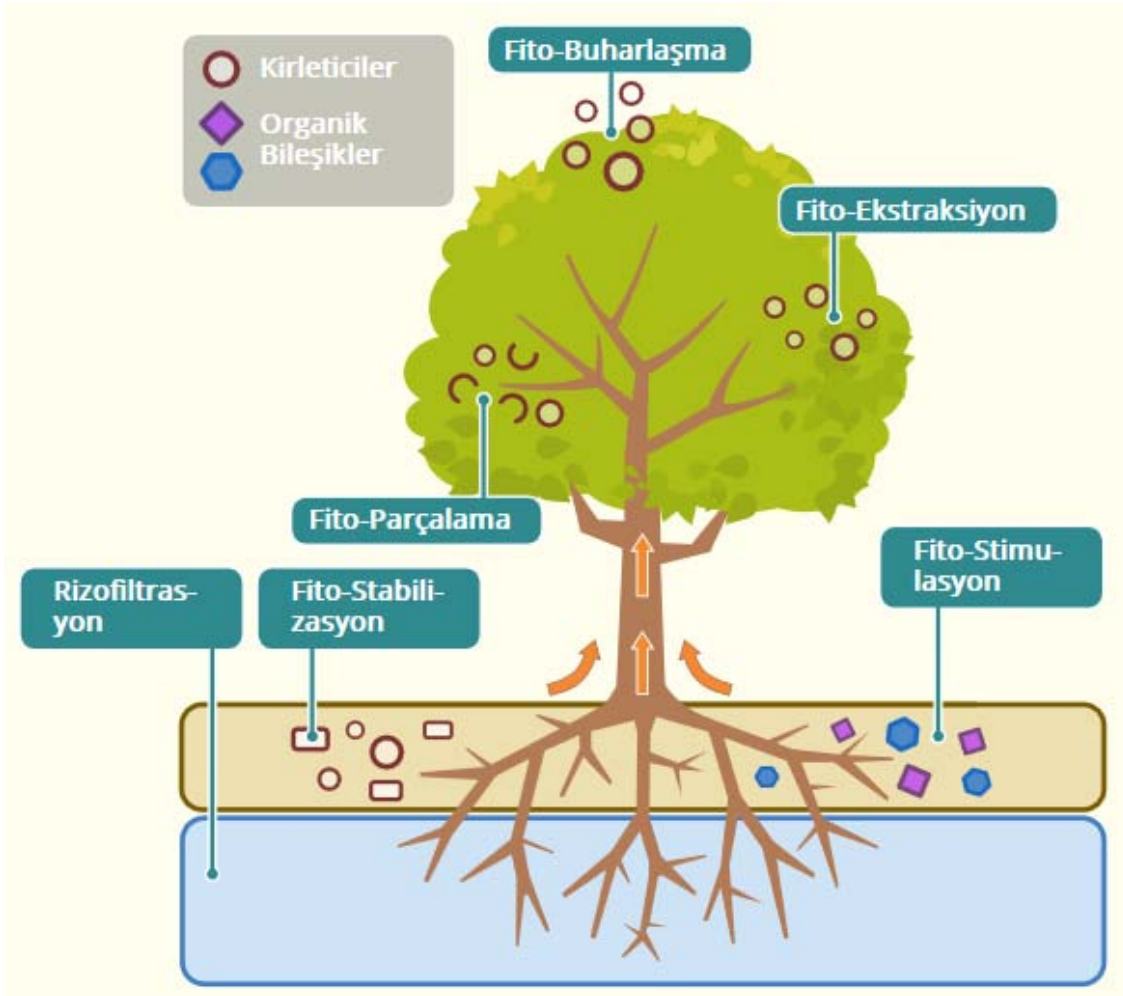
- Toprak matrisi kirletici mikroorganizma temasına izin vermiyorsa temizleme hedeflerine ulaşamaz.
- Su bazlı çözeltilerin toprak içindeki sirkülasyonu, kirletici taşınımını artırabilir ve yeraltısuyunun artırımını gerekli hale getirir.
- Mikroorganizmaların seçici koloniler oluşturması besin maddesi ve su enjeksiyon kuyularının tıkanmasına neden olabilir.
- Bu sistem killi, çok tabakalı topraklar ve heterojen ortamlar için uygun değildir çünkü bu ortamlarda oksijen (veya diğer elektron alıcısı) taşınımı sınırlanır.

- Yüksek ağır metal konsantrasyonları, yüksek klorlu organik maddeler, uzun zincirli hidrokarbonlar ve inorganik tuzlar mikroorganizmalar için zehirli olabilir.
- Biyo-iyileştirme düşük sıcaklıklarda yavaşlar.
- Yeraltısuyunda 100-200 ppm üzerindeki hidrojen peroksit konsantrasyonu mikroorganizma faaliyetini olumsuz etkiler.
- Çekilen yeraltısuyunun, tekrar enjekte edilmeden önce temizlenmesi için hava sıyırma veya karbon adsorpsiyonu gibi bir arıtma sistemi gerekli olabilir.

Bu faktörlerin birçoğu iyi mühendislik uygulamalarıyla kontrol edilebilir. Alana özgü faktörler nedeniyle iyileştirme için gereken zaman 6 ay ve 5 yıl arasında değişmektedir (USEPA, 2006).

7.3.1.3. Fito-iyileştirme

Fito-iyileştirme, toprak ve sedimentteki kirlenmeleri gidermek, taşımak, kararlı hale getirmek ve parçalamak için bitkilerin kullanıldığı bir iyileştirme sürecidir. Kirlenmeler organik veya inorganik olabilir (USEPA, 2002). Şekil 4'te tipik bir fito-iyileştirme sistemi görülmektedir.



Şekil 4. Tipik bir fito-iyileştirme sistemi (USEPA, 2002)

Fito-iyileştirme yöntemleri 5 başlık altında gruplandırılabilir:

- 1) Kök Bölgesi Filtrasyonu (Rizofiltrasyon): Kirleticilerin bitki kökleriyle kirlenmiş sudan alınması
- 2) Fito-ekstraksiyon: Kirleticinin topraktan alınması
- 3) Fito-parçalama (Fitodegradasyon): Topraktaki veya sudaki kirleticilerin, bitki metabolizması ile parçalanması
- 4) Fito-stimulasyon veya bitki destekli biyo-iyileştirme: Bitkinin kök bölgesindeki faaliyetleri yardımıyla mikrobiyal parçalanmanın canlandırılması
- 5) Fito-stabilizasyon: Kirleticilerin toprak ortamındaki taşınımını azaltmak için bitkilerin kullanılması (GWRTAC, 1996)

Fito-iyileştirme projelerinde en yaygın kullanılan flora kavak ağacıdır, çünkü bu ağaçlar çok hızlı büyürler ve birçok iklimde yaşayabilirler. Kavak ağaçları, diğer bitkilere oranla topraktan veya akiferden daha fazla su çekebilirler. Bu şekilde çözülmüş kirleticiler suyla birlikte çekilebilir ve topraktaki kirli su azaltılabilir.

Fito-parçalama kirleticilerin bitki dokularında metabolize olmasını ifade etmektedir. Bitkiler, dehalojenaz ve oksijenaz gibi enzimler üretirler. Bu enzimler parçalanmayı hızlandırırlar. Aromatik ve klorlu alifatik bileşiklerin fito-parçalanma yoluyla dönüşümlerini geliştirmek için araştırmalar sürdürülmektedir.

Bitki köklerinden salınan doğal maddeler, mikroorganizmalara besin maddesi sağlayarak onların biyolojik faaliyetlerini geliştirir. Bitki kökleri toprağı gevşetir, öldüklerinde arkalarında su ve havanın geçişine imkan verecek şekilde yollar bırakırlar. Bu süreç sayesinde su, yüzey bölgesine çekilir ve daha aşağıdaki doymuş bölgelerin nemi azalmaya başlar.

Fito-stabilizasyon bitki tarafından üretilen bazı kimyasal bileşiklerin kök ve toprak arakesitinde bulunan kirleticileri hareketsiz hale getirmesini anlatmaktadır.

Fito-iyileştirme, metaller, pestisitler, çözücüler, patlayıcılar, ham petrol, PAH ve depolama alanı sızıntı suları gibi kirleticilerin gideriminde uygulanabilir. Bazı bitki türlerinin, metalleri köklerinde tutma yeteneğı bulunmaktadır. Atıksulardaki metalleri gidermek için kirlenmiş alanlarda bitkilendirme yapılabilir. Kökler metallerle doymuş hale geldiğinde bitkiler hasat edilir. Hiper-biriktirici bitkiler önemli miktarda metalik bileşikleri bünyelerine alma eğilimindedirler. Yeraltısuyundaki organik kirleticileri alma ve onları karbondioksit veya bitki dokusu olarak metabolize etme yeteneğı olan ağaç çeşitleri konusunda araştırmalar sürdürülmektedir (USEPA, 2002).

Fito-iyileştirmenin avantajlı yönleri aşağıdaki gibi sıralanabilir (Khan ve diğ., 2004):

- Fito-iyileştirme teknolojisinin çevreye verdiği rahatsızlık düşük düzeydedir.
- Estetik olarak iyi görünen, pasif ve güneş enerjisiyle gerçekleşen bir uygulamadır.
- Birçok kirletici grubu üzerinde etkili ve ikincil atık üretiminin düşük düzeyde olduğu bilinmektedir. Bu uygulamayla organik kirleticiler karbondioksit ve suya dönüştürülmüş olurlar.

- Geniş alanlarda uygulanabilecek ekonomik bir yöntemdir.
- Bitkiler hasat edildikten sonra toprağın tarımsal amaçla kullanımı mümkün olabilir.
- Bazı yöntemlerde olduğu gibi toprağın depolanması veya izolasyonu bu yöntemde gerekli değildir.

Fito-iyileştirmenin sınırlı yönleri aşağıdaki gibidir:

- Arıtma bölgesinin derinliği, fito-iyileştirmede kullanılan bitkilere bağlıdır. Yüksek konsantrasyonlardaki tehlikeli maddeler, bitkiler için zehirleyici olabilir.
- Diğer biyolojik arıtma yöntemlerine benzer kütle transfer sınırlamaları vardır.
- Uygulandığı bölgeye bağlı olarak mevsimsel bir etkinlik sunabilir.
- Kirleticilerin bir ortamdan diğerine taşınmasına neden olabilir (örn. topraktan havaya).
- PCB'ler gibi güçlü bağlanan kirleticiler için etkin değildir.
- Biyo-parçalanma ürünlerinin zehirliliği ve bitki tarafından ulaşılabilirliği her zaman bilinmemektedir.
- Taşkın veya kuraklık gibi iklimsel ve hidrolojik koşullar bitki büyümesini ve kullanılabilir bitki türlerini etkiler.
- Kirleticiler bu bitkileri yiyen hayvanlar nedeniyle gıda zincirine giriş yapabilir.
- Kullanılmış bitkilerin hasat edilip bertaraf edilmesi gereklidir (Khan ve diğ., 2004).

7.3.2. Kirlenme Alanında Uygulanan Fiziksel ve Kimyasal Yöntemler

Fiziksel ve kimyasal yöntemlerde, kirleticileri veya kirlenmiş ortamı parçalamak (örn. kimyasal olarak dönüştürmek), ayırmak veya sınırlamak için fiziksel özellikler kullanılmaktadır. Topraktan buhar çekme (ekstraksiyon) yönteminde, kirleticiyi topraktan ayırmak için uçuculuk özelliği kullanılmaktadır.

Toprak kirleticisini boşaltma yönteminde ise kirleticiyi topraktan fiziksel olarak ayırmak için kirleticinin sıvı içindeki çözünürlüğünden faydalanılır. Kirleticinin çözünürlüğünü kimyasal olarak artırmak için kullanılan çözültüye yüzey aktif maddeler ilave edilebilir. Katılaştırma/kararlı hale getirme yönteminde ise hem fiziksel hem de kimyasal araçlar kullanılır. Katılaştırma yönteminde, kirleticisi kapsül içerisine alınırken, kararlı hale getirme (stabilizasyon) yönteminde ise kirleticisi değişime uğratılmakta veya matrise bağlanmaktadır.

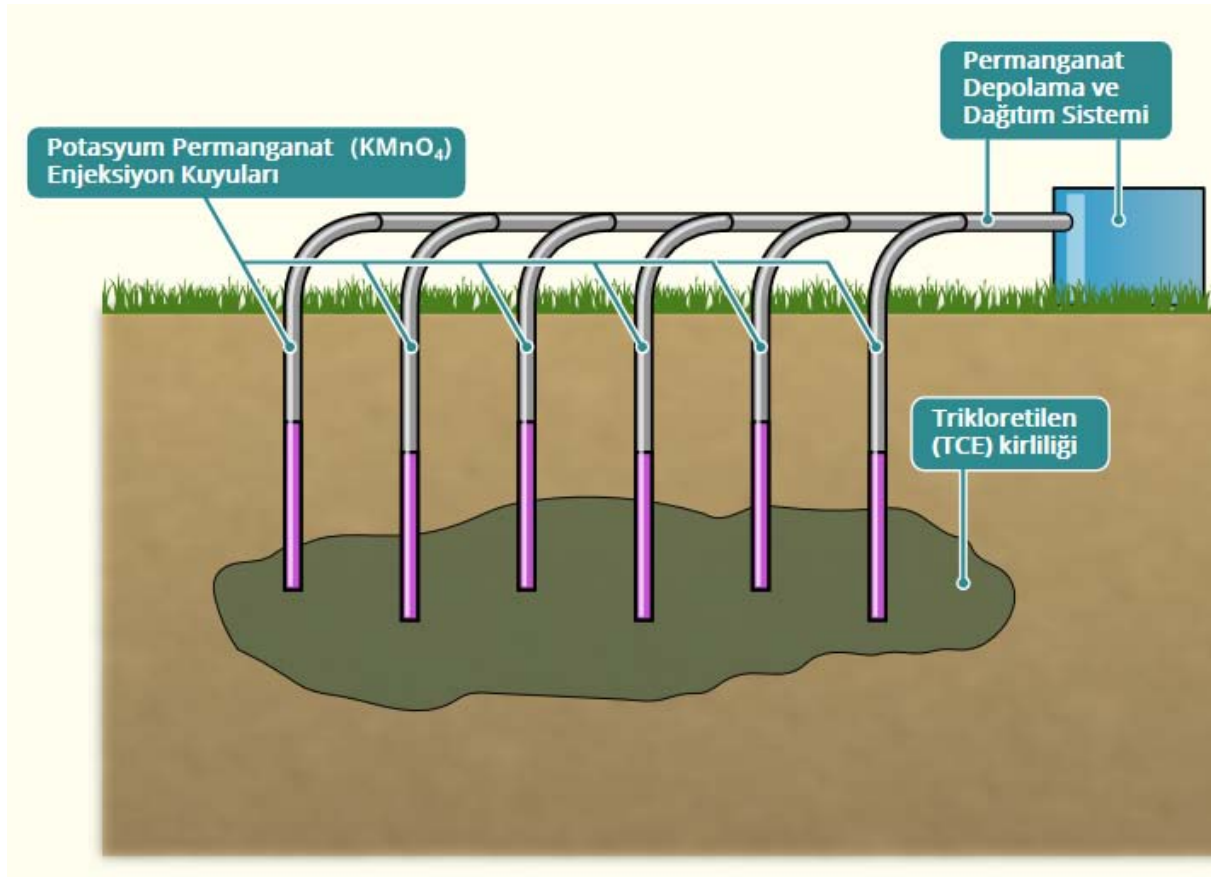
Fiziksel ve kimyasal yöntemler maliyet etkili yöntemlerdir ve biyolojik yöntemlerle kıyaslandıklarında kısa sürede tamamlanabilirler. Kullanılan ekipman halihazırda bulunabilen ekipmandır ve üretimi zor değildir. Ayırma tekniklerinden kaynaklanan kalıntıların ayrıca bertarafı gerekir; bu da toplam proje maliyetini artırır ve izin alma sürecine tabidir. Toprak kirleticisini boşaltma yönteminde kullanılan özütleme akışkanları kirleticinin hareketini artıracığı için toprak altının da iyileştirilmesi gerekli olmaktadır.

Yerinde uygulanabilecek fiziksel/kimyasal iyileştirme teknolojileri arasında kimyasal oksidasyon, elektrokinetik ayırma, toprak kirleticisini boşaltma, topraktan buhar çekme ve katılaştırma/kararlı hale getirme sayılabilir.

Yerinde uygulanan bazı fiziksel ve kimyasal arıtma teknolojileri belirli toprak parametrelerine karşı hassasiyet gösterirler. Örneğin toprakta kil veya humik maddelerin bulunması, yatay ve dikey hidrolik parametrelerde değişikliklere neden olur. Bu da fiziksel ve kimyasal süreç performansını etkiler. Katılaştırma/kararlı hale getirme teknolojileri diğer fiziksel ve kimyasal yöntemlere göre toprak parametrelerine daha az hassasiyet gösterir.

7.3.2.1. Kimyasal Oksidasyon

Kimyasal oksidasyon, tehlikeli kirleticileri tehlikesiz veya daha kararlı, daha az hareketli ve/veya inert olan az zehirli bileşiklere kimyasal olarak dönüştürme sürecini ifade etmektedir. Yaygın olarak kullanılan oksitleyici maddeler arasında, ozon, hidrojen peroksit, hipokloritler, klor ve klordioksit sayılabilir (USEPA, 2002). Şekil 5'te tipik bir kimyasal oksidasyon sistemi görülmektedir.



Şekil 5. Tipik bir kimyasal oksidasyon sistemi (USEPA, 2002)

Kimyasal oksitleyiciler birçok zehirli organik kimyasal maddenin hızlı ve tam kimyasal parçalanmasını sağlar. Genellikle oksitleyici maddeler, doymamış alifatik (trikloretilen, TCE) ve aromatik (örn. benzen) bileşikler için %90'ın üzerinde arıtma verimine sahiptir. Reaksiyon hızları çok yüksektir (dakikalar içinde

%90 parçalanma gerçekleşebilir). Saha uygulamalarına göre, kirleticiye uygun oksitleyici maddenin ve doğru dağıtım sisteminin belirlenmesi, temizleme hedeflerinin sağlanması için oldukça önemlidir.

Ozon gazı kirleticileri doğrudan veya hidroksil radikali oluşturarak okside eder. Peroksit gibi, ozon reaksiyonları da asidik pH şartlarında etkilidir. Oksidasyon reaksiyonları çok hızlı gerçekleşir (pseudo birinci derece kinetik reaksiyon ile). Yüksek reaktifliği ve kararsızlığı nedeniyle ozon alanda oluşturulur (USEPA, 2002).

Doğal veya ilave edilen demir iyonu (Fe^{+2}) varlığında kullanılan sıvı hidrojen peroksit (H_2O_2) ile gerçekleştirilen oksidasyon, Fenton maddesininin dolayısıyla hidroksil radikallerinin (OH^{\cdot}) oluşumuna yol açar. Bu güçlü oksitleyici radikaller birçok organik bileşiği parçalayabilir. Fenton maddesiyle yapılan oksidasyon yüksek asidik pH şartlarında (pH 2-4 aralığında) etkili, orta-yüksek alkali şartlarda ise etkisiz olmaktadır. Bu reaksiyonlar oldukça hızlıdır ve ikinci derece kinetik reaksiyon ile açıklanır.

Doğal sistemlerde permanganatın (genellikle sıvı veya katı $KMnO_4$ olarak temin edilir; Na, Ca veya Mg tuzları halinde de bulunabilir) reaksiyon stokiyometrisi karmaşıktır. Çok değerlikli ve mineral formları nedeniyle Mn, çeşitli reaksiyonlara katılabilir. pH'a bağlı olarak reaksiyonlar elektron transferi veya serbest radikal oksidasyonu ile parçalama etkisi gösterirler. Permanganat reaksiyonları pH 3.5-12 aralığında etkilidir.

Hedeflenen bir kimyasal maddenin parçalanma hızı ve düzeyi, kimyasal maddenin kendisine, oksidatif parçalanmaya olan hassasiyetine, matris şartlarına, pH, sıcaklık ve oksitleyici konsantrasyonuna, oksitleyici maddeyi tüketebilecek maddelerin (doğal organik madde gibi) konsantrasyonuna, karbonat ve diğer serbest radikal avcılarının konsantrasyonlarına bağlı olarak değişir. Oksitleyici maddelerin yeraltına dağıtım sisteminin oluşturulması oldukça önemlidir. Dağıtım sistemlerinde, oksitleyici maddenin toprak altına adveksiyon yoluyla hızla hareket etmesini sağlayacak dikey ve yatay enjeksiyon kuyuları ve dağıtım noktaları bulunmaktadır.

Permanganat diğer oksitleyici maddelere göre daha karardır, difüzyon süreçleri ile hareket eder. Oksidasyonun sistem üzerindeki etkilerine dikkat edilmelidir. Sistem etkin bir şekilde tamponlanmıyorsa sistemin pH'ı düşebilir. Oksidasyonla tetiklenen diğer etkiler arasında geçirimsizliği azaltan kolloid oluşumu, redoks hassasiyeti olan metallerin harekete geçmesi, zehirli yan ürünlerin oluşması, sıcaklık ve gaz oluşumu ve biyolojik rahatsızlık yer alabilir.

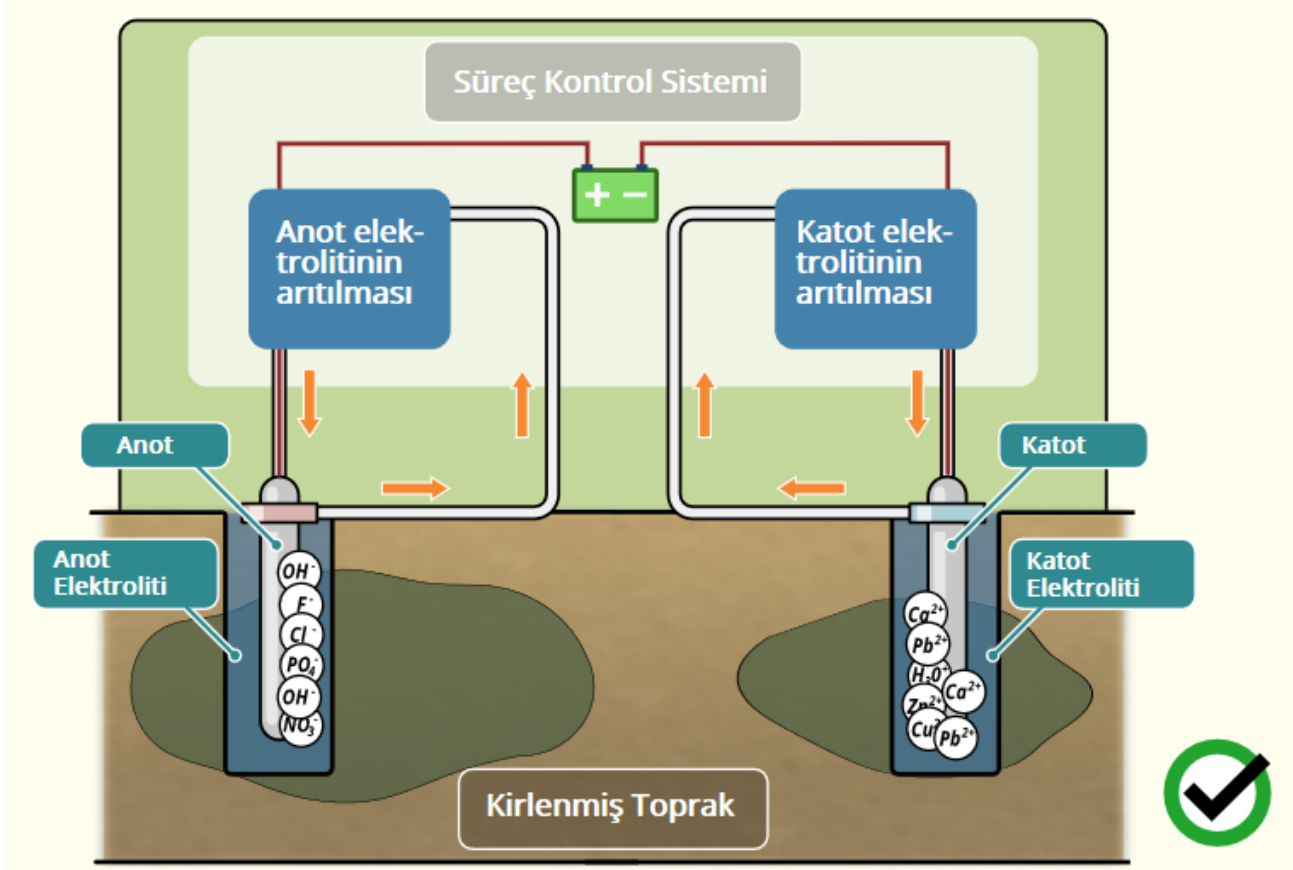
Kimyasal oksidasyonun sınırlı yönleri aşağıdaki gibidir:

- Hedeflenen organik kirleticilere bağlı olarak ihtiyaç duyulan çok miktardaki tehlikeli oksitleyici maddeyi taşıma ihtiyacı ve verimsiz olabilen oksitleyici tüketimi
- Bazı kirleticilerin oksitleyici maddelere karşı dirençli olması
- Prosesle tetiklenen zararlı etkilerin ortaya çıkma potansiyeli

Yerinde uygulanan kimyasal oksidasyonu geliştirmek ve maliyetini azaltmak için çeşitli araştırma çalışmaları yapılmaktadır (USEPA, 2002).

7.3.2.2. Elektrokinetik Ayırma

Elektrokinetik ayırma teknolojisinde, metalleri ve polar organik maddeleri ayırmak ve gidermek için elektrokimyasal ve elektrokinetik süreçler uygulanır. Şekil 6'da tipik bir elektrokinetik ayırma sistemi görülmektedir.

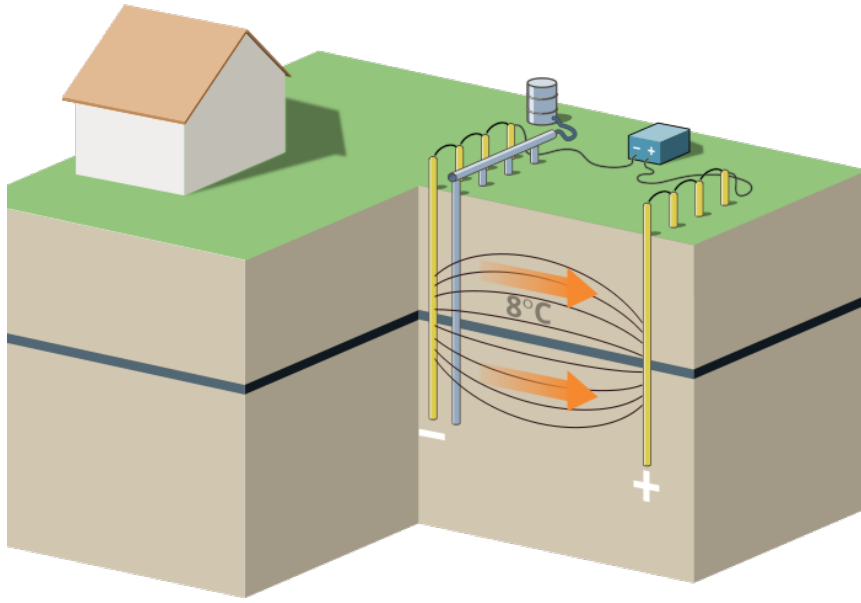


Şekil 6. Tipik bir yerinde elektrokinetik ayırma sistemi (USEPA, 2002)

Elektrokinetik ayırma sisteminin temel prensibi, toprak içinde anot ve katot dizilerinden oluşan seramik elektrotlardan geçen düşük şiddetli doğru akım uygulamasıdır. Bu şekilde yüklenmiş türler, iyonların ve suyun elektrotlara doğru hareket etmesine neden olmaktadır. Metal iyonları, amonyum iyonları ve artı yüklenmiş organik bileşikler katota doğru hareket ederler. Klorür, siyanür, florür, nitrat ve eksi yüklü organik bileşikler ise anota doğru hareket ederler. Akım, anotta bir asidik yüzey, katotta da bazik bir yüzey oluşturur. Asidik şartların bu şekilde oluşturulması, daha önce bağlı durumdaki kirleticilerin hareketlenmesine ve taşınarak katotta toplanmasına yardım etmektedir (USEPA, 2002).

Elektrokinetik ayırma yönteminde iki yaklaşım benimsenir: geliştirilmiş giderim ve giderim olmadan ayırma.

Geliştirilmiş giderim yaklaşımı, kutuplaşmış elektrotlara elektrokinetik olarak taşınan kirleticilerin daha sonra giderimini ve alan dışında arıtımını ifade eder. Kirleticilerin elektrotta giderimi çeşitli tekniklerle sağlanabilir: Elektrotta elektrokaplama, elektrotta çöktürme, elektrot yanındaki suyu pompalama, iyon değiştirici reçinelerle kompleks oluşturma. Bu giderim yöntemi özellikle metallerle kirlenmiş toprakların iyileştirilmesinde yaygın olarak benimsenmektedir. Şekil 7’de elektrokinetik ayırma uygulaması şematize edilmiştir.



Şekil 7. Elektrokinetik ayırma uygulaması

Elektrokinetik ayırma için hedeflenen kirleticiler toprak ve çamurlardaki ağır metaller, anyonlar ve polar organik maddelerdir. Giderilen konsantrasyon düzeyleri birkaç ppm'den onbinler düzeyine değişir. Elektrokinetik ayırma yöntemi daha çok geçirimli topraklarda uygulanabilir. Doygun ve kısmen doymuş kil ve silt-kil karışımlarında drenaj mümkün olmayacağı için yöntem uygun değildir.

Nem içeriği %10'un altında olan alanlarda bu yöntemin etkinliği ani bir düşüş göstermektedir. En yüksek etkinlik, nem içeriğinin %14-18 aralığında olması durumunda gerçekleşir. Toprakta metalik malzemelerin gömülü olması durumunda elektriksel iletkenlik değişim gösterir; bu nedenle doğal jeolojik alansal çeşitliliğin önceden belirlenmesi gereklidir. Maden cevheri çökelekleri gibi yüksek elektriksel iletkenlik gösteren çökelekler, tekniğin verimsiz olmasına neden olur.

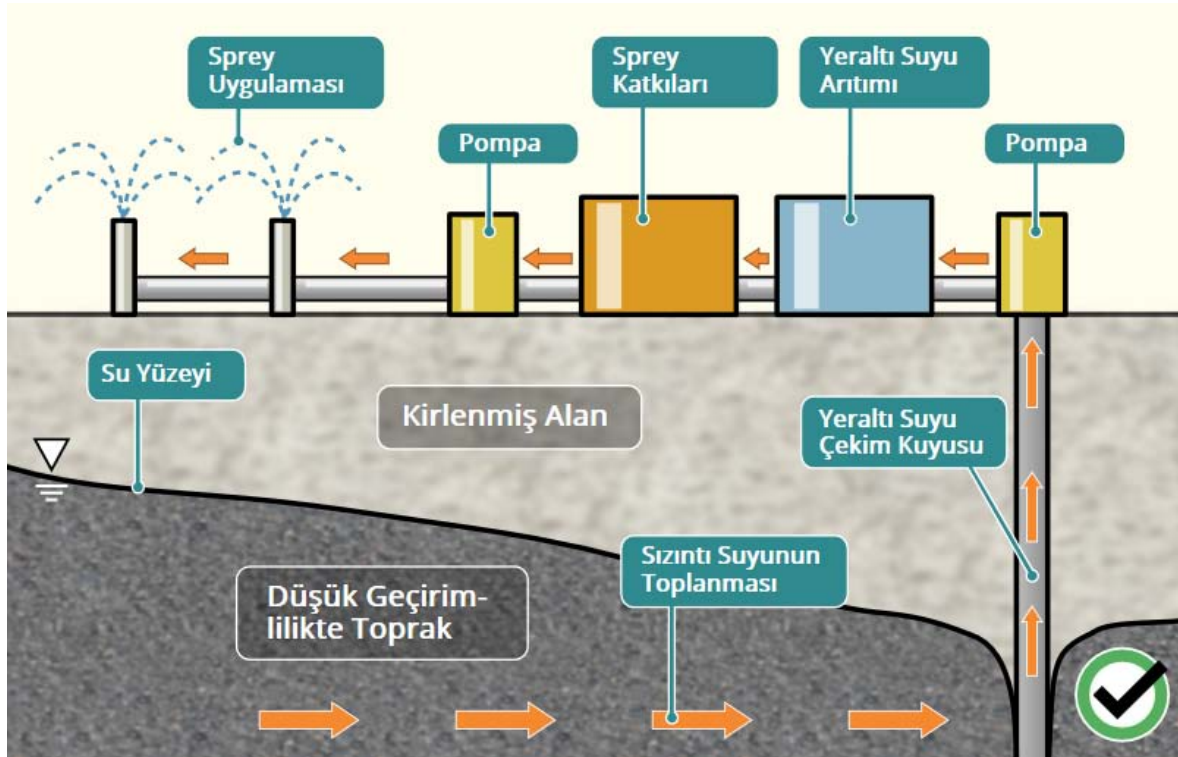
İşlem görmüş toprak yığnında kalıntı bırakmamak için karbon, grafit, platin gibi inert elektrotlar kullanılmalıdır. Elektroliz sonucunda metalik elektrotlar çözünebilir ve toprak yığnının içinde aşındırıcı ürünler bırakabilir.

Elektrokinetik ayırma, negatif yüzey yükleri nedeniyle killi topraklarda diğerlerine göre daha etkindir. Ancak killerin yüzey yükleri, gözenek sıvılarının pH'sı ve kirleticilerin yüzeye tutunmaları nedeniyle değişir. Elektrotlardaki yüksek pH ve yükseltgenme-indirgenme değişiklikleri, elektrokinetik ayırmanın etkinliğini azaltabilir. Yükseltgenme-indirgenme reaksiyonları istenmeyen ürünlerin (örn. klor gazı vb.) oluşmasına neden olabilir (USEPA, 2006).

7.3.2.3. Toprak Kirleticisini Boşaltma

Bu teknikte kirleticilerin çözünürlüğünü artırmak için toprağa veya yeraltısuyuna su (veya katkı maddesi içeren su) enjekte edilerek kirlenmiş bölgedeki su yüzeyi yükseltilmektedir. Bu şekilde, kirleticilerin yeraltısuyuna sızması sağlanmakta, daha sonra yeraltısuyu çekilerek arıtılmaktadır. Şekil 8'de tipik bir toprak kirleticisini boşaltma sistemi görülmektedir.

Yerinde yapılan bu uygulamada kirleticiler suyla veya uygun bir çözeltiyle topraktan çıkarılmaktadır. Daha sonra bu çözeltinin akiferden alınması ve arıtılması gerekmektedir.



Şekil 8. Tipik bir toprak kirleticisini boşaltma sistemi (USEPA, 2002)

Akışkan olarak bir çözücü karışımı (su ve alkol gibi çözünürlüğü yüksek bir organik çözücü) kullanılabilir. Akışkan vadoz bölgeye veya doygun bölgeye veya her ikisine de enjekte edilerek organik kirleticiler çıkarılmaya çalışılır. Kirlenmiş alanın üst kısmına enjekte edilen akışkan alanın alt kısmından toplanır. Toplanan sıvı daha sonra zeminin üzerine çıkarılarak arıtılır.

Çıkarılan yeraltısuyu ve kirletici içeren çözücü karışımı alıcı ortamlara verilmeden önce, deşarj standartlarını sağlayacak şekilde arıtılmalıdır. Arıtımı yapılarak geri kazanılan çözücü başka bir uygulamada tekrar kullanılabilir. Bu çözücülerden kirleticilerin giderimi de toprak boşaltma sisteminin maliyetini belirleyen temel faktördür. Bu çözücülerin arıtımı sonucunda proses çamurları, atık karbon veya atık iyon değiştirme reçinesi oluşabilir. Bu atıkların ayrıca yönetilmesi gerekir. Kullanılmış akışkan içinde uçucu kirleticiler bulunuyorsa, bu bileşiklerin hava emisyonu olarak ayrıca toplanması ve arıtılması gerekir. Bu yöntem uygulanırken toprağa uygulanan akışkanın topraktan tamamen çıkarıldığından emin olmak gereklidir. Toprak boşaltma süreci genellikle kısa ve uzun vadeli gerçekleşmektedir.

Toprak kirleticisini boşaltma sürecinde hedeflenen kirletici grupları, genellikle inorganik maddelerdir. Teknoloji, UOB'ler, yarı UOB'ler, petrol ve pestisitler için de uygulanabilir ancak, budiğer alternatif teknolojilerden daha yüksek maliyetli olur. Bazı organik kirleticilerin etkin çözünürlüğünü artırmak için bazı yüzey aktif maddeler de kullanılabilir, ancak boşaltma çözücüsünün toprak sisteminin fiziksel/kimyasal özelliklerini değiştirebileceği unutulmamalıdır. Bu teknoloji uygulanarak metallerin geri kazanımı sağlanabilmekte, bazı organik ve inorganik kirleticiler kaba taneli topraklardan uzaklaştırılabilir.

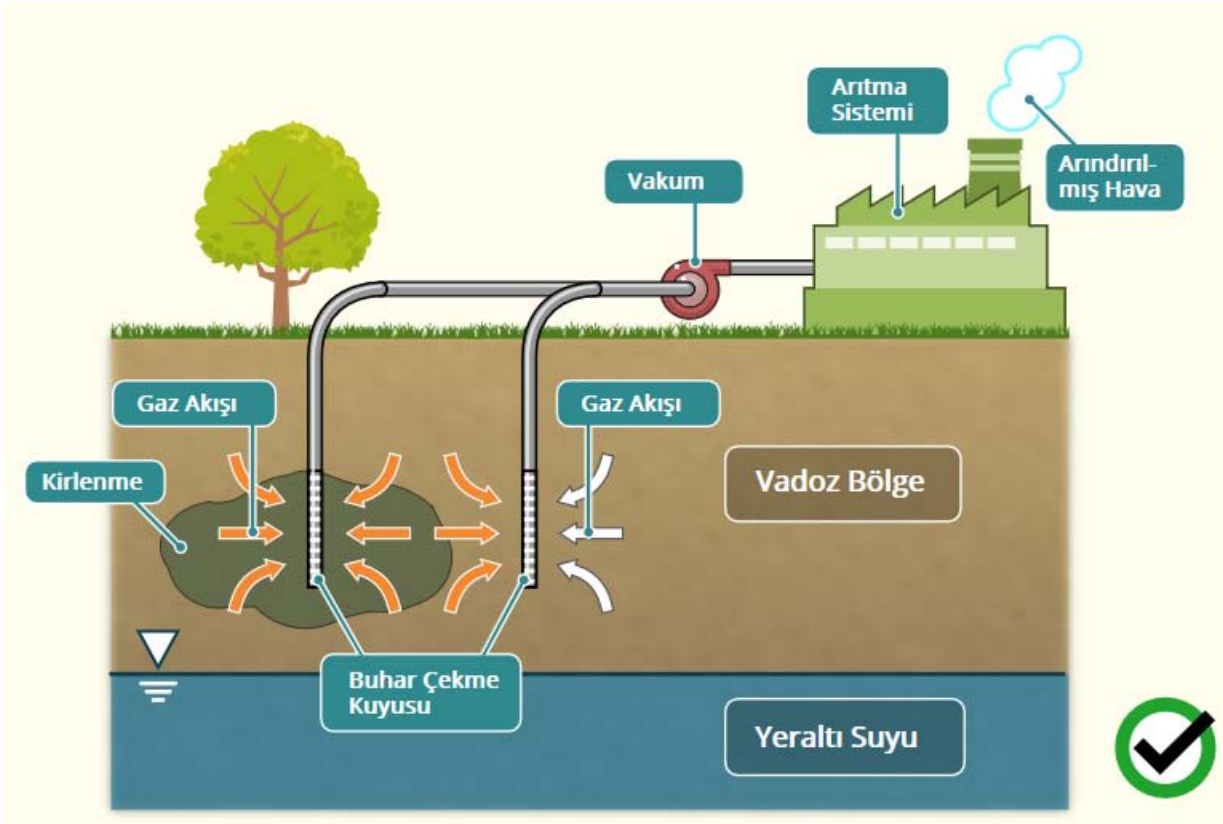
Bu yöntemin uygulanmasındaki sınırlı yönler aşağıdaki gibidir:

- Düşük geçirimsilikte ve heterojen toprakların arıtımı zordur.
- Yüzey aktif maddeler toprağa bağlanabilir ve toprağın gözenek yapısını etkiler.
- Boşaltma sıvılarının toprakla yaptığı reaksiyon kirleticilerin hareketlenmesine neden olabilir.

Bu teknolojinin ancak toprak boşaltma sıvısının tam olarak toplanması mümkün olduğunda uygulanması gerekmektedir. Toplanan sıvının ayrılması ve arıtılmasından doğacak maliyet sürecin maliyetini belirler (Khan ve diğ., 2004; USEPA, 2006).

7.3.2.4. Toprakten Buhar Çekme (Toprak Buhar Ekstraksiyonu)

Kuyular yardımıyla vakum uygulanarak oluşturulan basınç farkıyla, gaz fazındaki uçucu kirleticilerin topraktan çıkarılması işlemidir. Şekil 9'da tipik bir topraktan buhar çekme uygulaması görülmektedir.



Şekil 9. Topraktan buhar çekme uygulaması

Bu teknoloji doygun olmayan (vadoz) toprak bölgesinde uygulanır. Kontrollü bir hava çekişiyle topraktaki uçucu ve yarı uçucu kirleticiler giderilebilir. Topraktan ayrılan gazın, yasal düzenlemelere uygun bir şekilde arıtılması gerekmektedir. Genellikle dikey çekme kuyuları uygulanır (derinlik 1,5 – 90 metre aralığında değişmektedir), ancak kirlenme bölgesinin geometrisine uygun şekilde yatay hendekler de tercih edilebilir (USEPA, 2002). Gaz kaçıışını engellemek, kuyuların etki yarıçapını artırmak için genelde toprak yüzeyinin üzerinde geomembran örtü uygulaması yapılır. Yeraltısuyunun kuyulardan yukarı çıkmasını engellemek veya vadoz bölge derinliğini artırmak için depresyon pompaları da kullanılabilir. Kirlenmenin derin bölgede olması durumunda veya düşük geçirimlilikteki topraklar kirlendiğinde, hava enjeksiyonu, süreci kolaylaştırabilir. Bu teknolojinin işletme ve bakım süresi orta ve uzun vadeli olmak üzere değişmektedir.

Topraktan buhar çekme teknolojisindeki hedef kirleticiler, uçucu organik bileşikler ve bazı yakıtlardır. Yöntem, Henry sabiti 0.01'in veya buhar basıncı 0.5 mm Hg'nin üzerinde olan kirleticiler için uygundur. Toprağın nem içeriği, organik içeriği, geçirimliliği gibi faktörler teknolojinin verimini etkiler. Bu teknolojiyle ağır metaller, yağlar, PCB'ler veya dioksinler giderilemez. Süreç, toprak içinde sürekli bir hava akışı oluşturduğu için toprakta bulunan bazı düşük uçuculuktaki organik maddelerin biyo-parçalanmaya uğradığı görülebilir (USEPA, 2006).

Sürecin uygulanabilirliğini sınırlayan faktörler aşağıdaki gibidir:

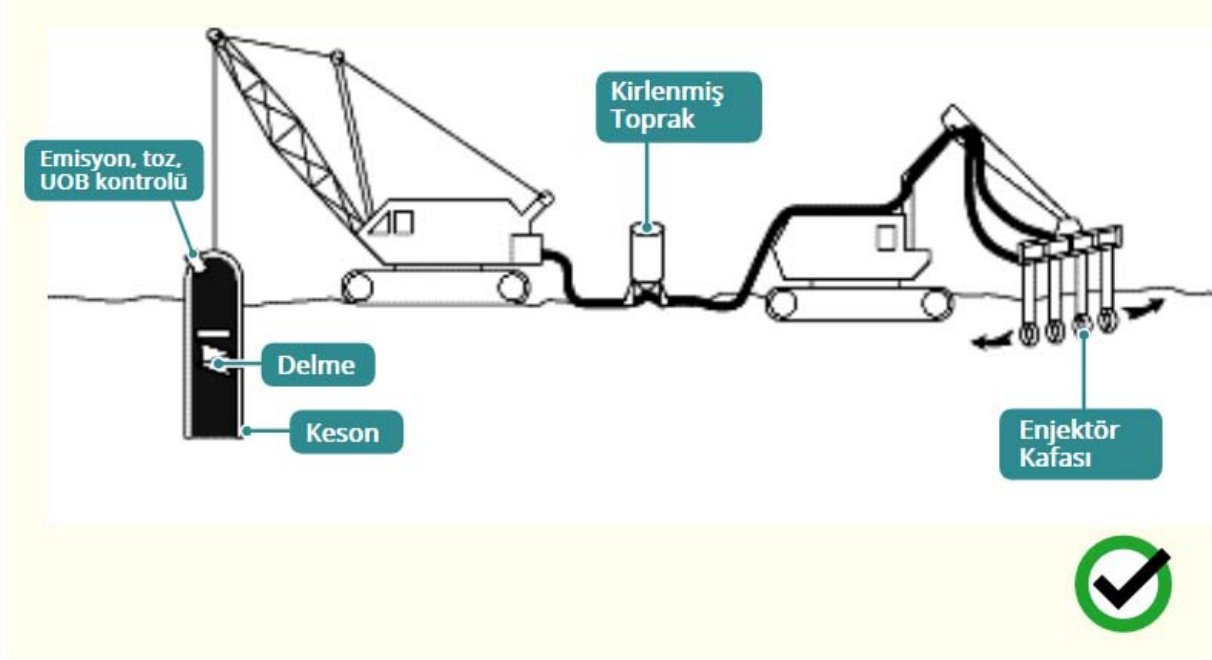
- Toprakta yüksek oranda ince malzeme bulunduğunda ve doymunluk düzeyi yüksek olduğunda vakum ihtiyacı artar. Bu da maliyeti artıran ve işletimi zorlaştıran bir faktördür.
- Geçirirliğı farklı olan veya tabakalaşması çok olan topraklarda gaz çekme kuyularının aralıkları hassasiyetle belirlenmelidir. Aksi takdirde kirlenmiş bölgelerde gaz dağılımı düzensiz olur.
- Yüksek organik içeriğı olan veya aşırı kuru topraklarda UOB bağlanması yüksek olur. Bu da bu tür topraklarda yöntemin verimini azaltır.
- Teknolojinin uygulanması sonucu ortaya çıkan emisyonların çevre ve insan sağlığına zarar vermemesi için arıtılması gerekmektedir.
- Gaz arıtımı sonucu oluşan atıksuyun arıtılması gerekli dir. Arıtımda aktif karbon vb. malzeme kullanılmışsa, arıtım süreci sonucunda bu malzemelerin de rejenerasyon veya bertaraf gerektireceğı unutulmamalıdır.
- Bu teknoloji doymun bölgede etkili değıldir. Ancak su yüzeyi düşürülerek yöntemin etkinliğini artırmak mümkündür (Khan ve diğ., 2004).

7.3.2.5. Katılaştırma / Kararlı Hale Getirme (K/K)

Bu yöntemde, kirleticiler kararlı bir kütle içinde fiziksel olarak bağlanırlar veya kirleticilerle matris arasında kimyasal reaksiyonlar gerçekleşerek kirleticiler hareketsiz hale getirilirler. Katılaştırma/ kararlı hale getirme süreçleri BÖLÜM 5'te detaylı bir şekilde anlatılmaktadır.

Katılaştırma/kararlı hale getirme (K/K) yönteminde, fiziksel ve kimyasal araçlarla toprak içindeki tehlikeli kirleticilerin hareketi azaltılmaktadır. Diğeri iyileştirme tekniklerinden farklı bir şekilde, K/K yönteminde kirleticiler kendi taşıyıcı ortamlarından uzaklaştırılmaya değıl, ortamlarında (toprak, kum ve/veya onları içeren yapı malzemeleri) tutulmaya çalışılırlar. Kirleticilerin hareketsiz hale getirildiğinden emin olmak için çeşitli sızdırma teknikleri yapılır. K/K teknolojisi tek başına uygulanabileceğı gibi diğeri arıtma ve bertaraf yöntemleriyle birlikte de uygulanabilir. Elde edilen yeni yapı faydalı kullanıma sunulabilir veya depolama alanında bertaraf edilebilir.

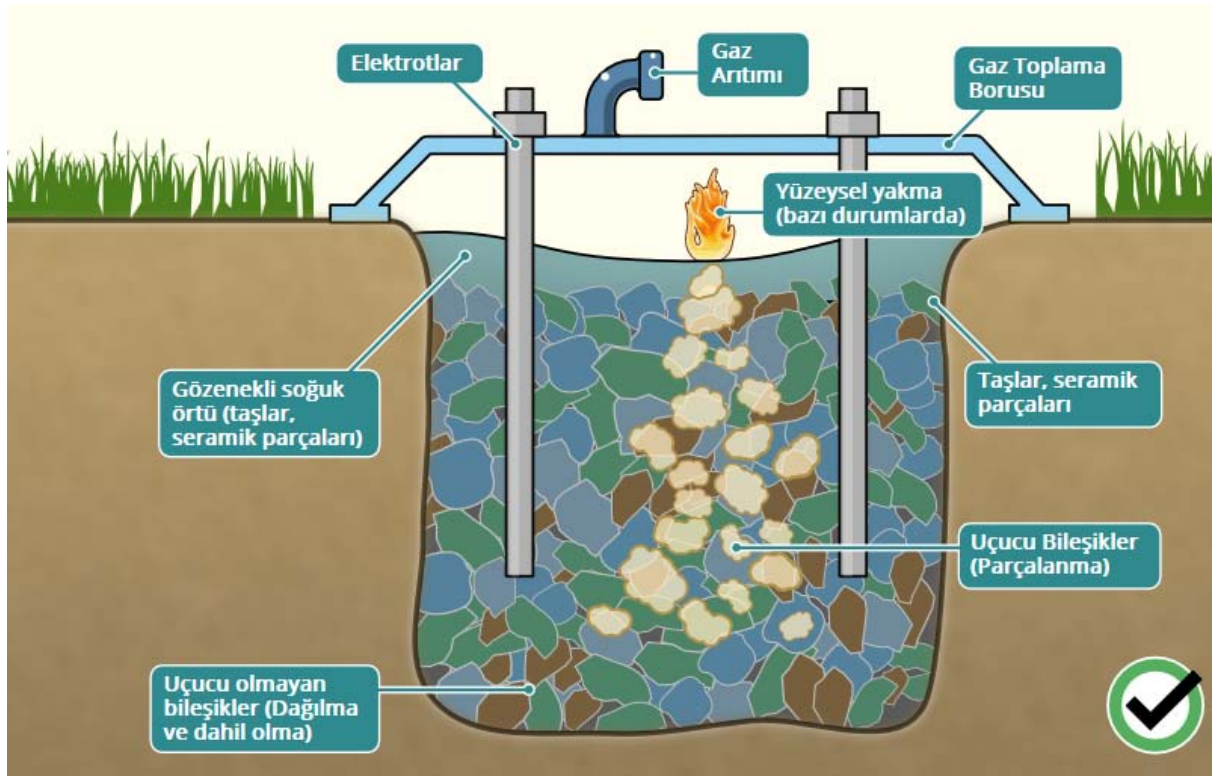
Toprakta yapılan K/K uygulamalarında yaygın yöntemlerden biri de delme - keson ve bağlayıcı madde enjeksiyonu sistemidir (Şekil 10). Bu sistemde kirleticileri hareketsiz hale getirerek toprakta hapsedmek için bağlayıcı maddeler kullanılmaktadır.



Şekil 10. Tipik bir delme & keson ve bağlayıcı madde enjeksiyonu sistemi

Kirleticinin dikey hareketini engellemek için kirlenmiş alanın alt kısmında yatay bariyerler oluşturulur. Beton dip bariyeri belli bir yönde yapılan delme işlemi ve basınçlı harç enjeksiyonu sistemiyle gerçekleştirilir. Bu teknolojinin uygulanabilmesi toprak özelliklerine bağlıdır.

Yerinde vitrifikasyon ise başka bir K/K sürecidir (Şekil 11). Toprağı eritmek için yüksek derecede sıcaklık uygulanır (1600-2000 °C) ve piroliz yoluyla inorganik maddelerin çoğu sabitlenmiş, organik kirleticilerin çoğu parçalanmış olur. İnorganik kirleticiler camlaşmış (vitrifiye) ve kristal yapıdaki malzeme içinde tutulmuş olur. Su buharı ve organik piroliz ürünleri tutularak baca gazı arıtma sistemine yönlendirilir. Vitrifikasyon ürünü kimyasal olarak kararlıdır, sızmaya karşı dirençlidir. Oluşan cam ve kristal malzeme obsidyen veya bazalt kayalara benzemektedir. Bu süreç organik maddeleri parçalar ve giderir. Radyonüklitler ve ağır metaller erimiş toprak içinde tutulurlar. Yerinde uygulanan K/K süreci kısa ve orta süreli iken, yerinde vitrifikasyon süreci genellikle kısa süreli bir uygulamadır (USEPA, 2002).



Şekil 11. Tipik bir yerinde vitrifikasyon sistemi (USEPA, 2002)

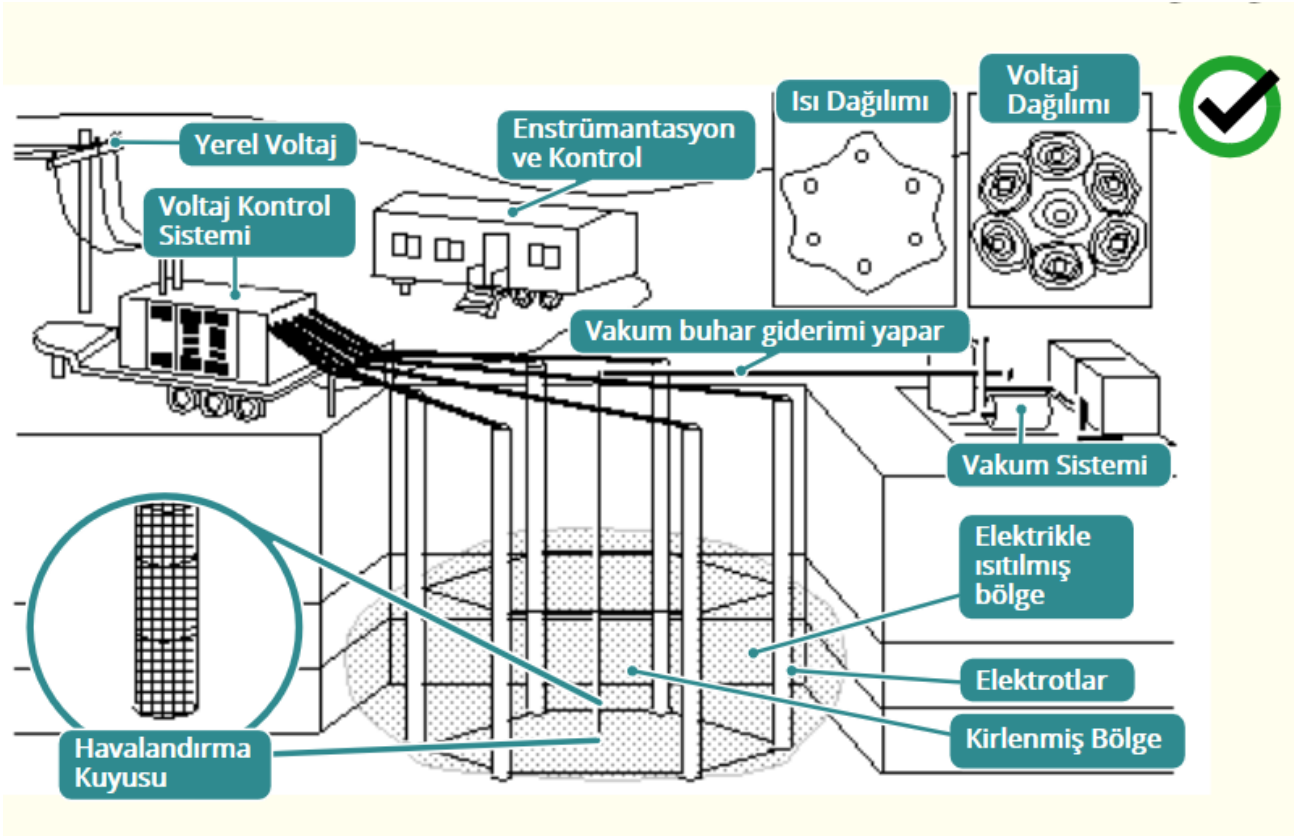
7.3.3. Kirlenme Alanında Uygulanan Isıl Yöntemler

Yerinde uygulanan ısıl yöntemlerin avantajı, toprağın kazılmasına ve taşınmasına ihtiyaç duymadan iyileştirmenin sağlanmasıdır. Bu da maliyeti azaltıcı bir faktördür. Ancak yerinde arıtma süreçleri genellikle uzun süreler gerektirir ve iyileştirmenin tüm kirlenme bölgelerini kapsadığından emin olmak zordur. Toprak ve akifer özellikleri değişebildiği için sürecin etkinliğini doğrulamak zor olmaktadır.

Isıl yöntemler hızlı iyileşme süreleri sunarlar, ancak iyileştirme alternatifleri içinde en yüksek maliyetli yöntemlerdir. İlk yatırım ve işletme esnasındaki enerji ve ekipman maliyetleri, maliyet yüksekliğinin ana sebepleridir.

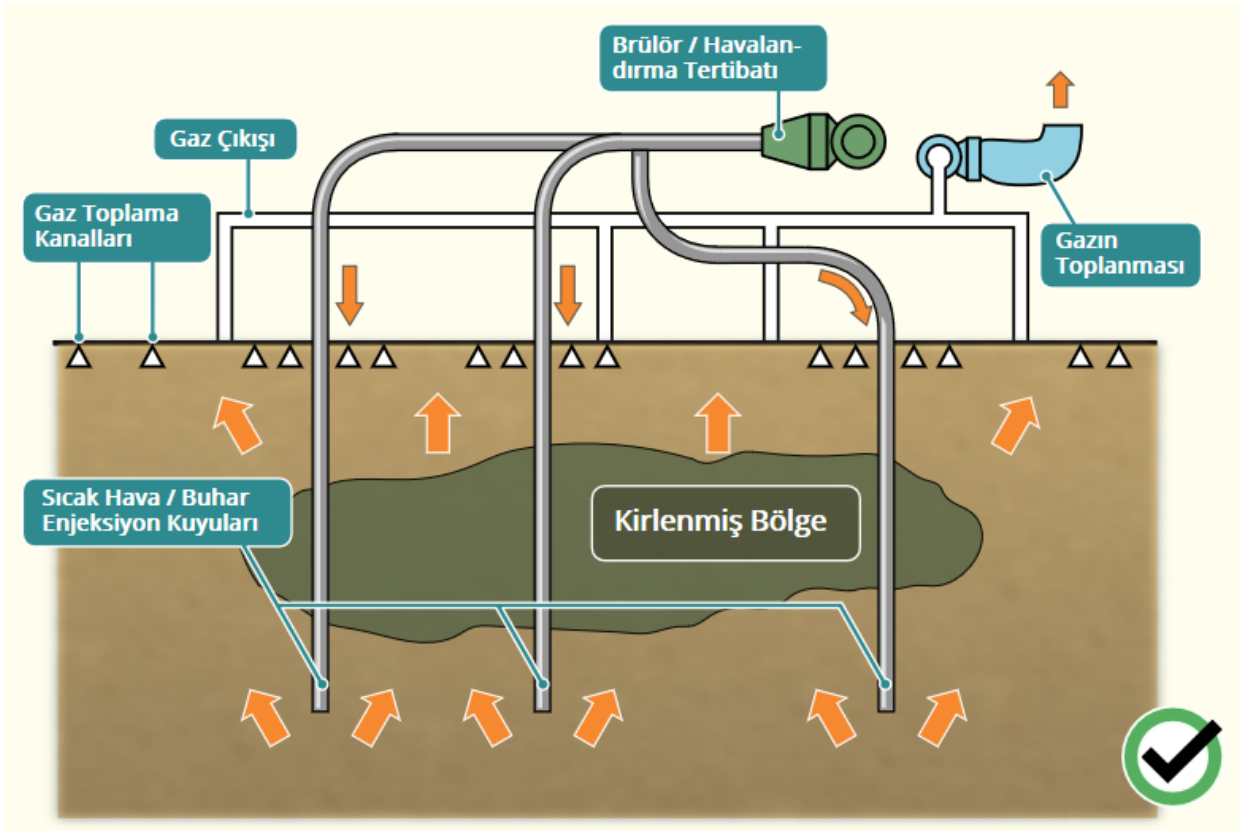
Isıl yöntemler 4 grupta sınıflandırılabilir: Elektrik direnciyle ısıtma, topraktan ısıtılmış buhar çekme, iletme yoluyla (kondüktif) ısıtma, radyo frekansıyla ısıtma. Bu teknolojiler uçucu ve yarı uçucu kirleticilerin giderim verimini artırmak için toprağa ısı ilavesini içermektedir. Bu iyileştirme sistemlerinin ayrılmaz bir parçası, oluşan buharın çekilmesi ve hareketlenmiş kirleticilerin arıtılmasıdır. Yeraltısuyu akış hızı yüksek olduğunda buhar enjeksiyonu esnasında sıvı çekimi de yapılabilir (USEPA, 2006). Sıcaklık artırıldığında viskozite azalmakta, çözünürlük artmakta, yüzeye tutunma azalmakta, uçucu ve yarı uçucu organik bileşiklerin giderimi kolaylaşmaktadır (Meuser, 2013; USEPA, 2006).

Elektrik direnciyle ısıtma yönteminde topraktaki elektrotlar arasından topraktaki nem yoluyla elektrik akımı geçirilmektedir. Elektrik akımı toprak gözeneklerindeki nem içinden akarken, toprakta oluşan direnç nedeniyle ısı oluşmaktadır. Elektrotlar, seçilmiş derinliklerde elektriksel gücü dağıtmak için donatılmış kuyular olarak düşünülebilir, aynı zamanda buhar kazanım kuyuları olarak da işlev görürler. Toprak ısıtılırken, önce daha iletken olan silt ve kil ısınır. Doymun bölgede 100°C üzerinde sıcaklıklara ulaşılabilir. Bu sıcaklıklarda elde edilen buhar, özellikle silt ve killerin temizlenmesinde faydalıdır çünkü bu bileşenlerden kirletici hareketi genelde difüzyonla kontrol edilmektedir (Beyke ve Fleming, 2002).



Şekil 12. Elektrik Direnciyle Toprak Isıtma Sistemi (USEPA, 2006)

Isıl yöntemlerle geliştirilmiş topraktan buhar çekme süreci (buhar enjeksiyonu ve çekme sistemi olarak da bilinir), topraktaki kirleticilerin uçuculuğunu artırmak için sıcaklığın uygulandığı bir süreçtir. Bu süreç gaz arıtımını ve kalıntı sıvılarının arıtımını gerektirmektedir. Enjeksiyon kuyularına buhar enjeksiyonu ve hareketlenen yeraltı suyunun, kirleticilerin, kuyulardaki buhar basıncının çekilmesini içerir.



Şekil 13. Tipik sıcak hava enjeksiyon sistemi (USEPA, 2002)

İletim yoluyla ısıtma tekniğinde bir dizi dikey ısıtıcı/vakum kuyular veya yüzey ısıtıcı battaniyeler kullanılmaktadır. Isıtıcı kuyular tabanı mühürlenmiş çelik borulardan oluşmaktadır. Bir ısıtma elemanı yardımıyla çelik boru radyant enerjiyle, kuyunun etrafındaki toprak da ısıl iletim yoluyla yaklaşık 590°C'ye ısıtılmaktadır. Vakum uygulandığında buharlaşan organik maddeler ısınmış toprak boyunca buharlaşmakta, kirleticilerin bir kısmı parçalanmaktadır. Çekilen buharlar artılmak üzere yüzeye taşınmaktadır (Baker ve Heron, 2004).

Radyo-frekansıyla ısıtma sisteminde, toprakların ısıtılması için alternatif elektrik akımı uygulanmaktadır. Teknik, düzensiz elektrik yükleri olan dielektrik malzemelerin varlığına dayanmaktadır. Elektriksel alanın uygulanması polar moleküllerin hareketlenmesine neden olur. Bu titreşim, mekanik bir ısı oluşumuna neden olur. Dağınık radyo frekansları (örneğin 6.78 MHz, 13.56 MHz, 27.12 MHz ve 40.68 MHz daha yüksek yedi frekansla birlikte) endüstriyel, bilimsel veya tıbbi uygulamalarda kullanılmaktadır.

7.3.4. Kirlenme Alanının Dışında Uygulanan Biyolojik Yöntemler

Alan dışında yapılan iyileştirmenin temel avantajı, toprağı homojenize etme, eleme ve sürekli karıştırma imkânı verdiği için, yerinde yapılan arıtmaya göre daha kısa süreler gerektirmesi, arıtmanın düzgün dağılımından daha fazla emin olunmasıdır. Ancak alan dışında yapılan iyileştirme toprakların kazılmasını gerektireceğı için maliyeti artırmakta ve ekipman, yasal izin, malzeme taşıma ve işçi maruziyeti değerlendirmelerinin yapılması ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır.

Biyo-iyileştirme teknikleri, uygun koşulları sağlayarak mikroorganizmaların büyümesini ve kirleticileri besin ve enerji kaynağı olarak kullanmalarını tetikleyen parçalama ve dönüşüm teknikleridir. Uygun koşulları sağlamak için oksijen, besin maddesi, nem kombinasyonun sağlanması, pH ve sıcaklık kontrolü gerekli olmaktadır. Bazen belirli kirleticileri parçalamak için adapte edilmiş mikroorganizmalar sürece ilave edilmektedir.

Biyolojik süreçler genellikle düşük maliyetli uygulamalardır. Süreçte kirleticiler parçalanabilir veya dönüştürülebilirler ve kalıntı arıtımı gerekli olmaz. Ancak uzun süreler gerektirirler ve kirleticilerin tam olarak parçalandığından emin olmak zordur. Örneğın PAH'ların biyolojik arıtımı sonucunda geride daha az parçalanabilen PAH türleri kalmaktadır. Geride kalan yüksek moleküllü PAH'lar kanserojen madde olarak sınıflandırılmaktadır. Aynı zamanda klor içeriğinin artışının biyoparçalanabilirlikte azalmaya neden olduğu bilinmektedir. Biyo-iyileştirme sürecinde bazı bileşenlerin daha zehirli yan ürünlere parçalanabildiğı bilinmektedir (örn. TCE vinil klorüre parçalanır). Alan dışında yapılan iyileştirme çalışmalarının yerinde yapılan uygulamalara göre bir avantajı, tehlikesiz son ürünler elde edilinceye kadar tehlikeli olan bu yan ürünlerin arıtma ünitesinde tutulmasıdır.

Biyo-iyileştirme tekniklerinin petrol hidrokarbonları, çözücüler, pestisitler, ahşap koruyucular ve diğer organik kirleticilerle kirlenmiş toprakları başarıyla iyileştirebildiğı bilinmektedir. Biyo-iyileştirme teknikleri inorganik kirleticilerde tercih edilmemektedir.

Mikroorganizmaların kirleticileri parçalama hızları çeşitli faktörlere bağlıdır: kirleticiler türü, oksijen miktarı, nem, besin maddesi miktarı, pH, sıcaklık, kirleticinin mikroorganizma tarafından ulaşılabilirliği (örn. killi topraklar kirleticileri içine aldıkları için mikroorganizmaların ulaşmasını engelleyebilirler), kirleticinin konsantrasyonu (yüksek konsantrasyonlar mikroorganizmalar için zehirleyici olabilir), mikroorganizmalar için zehirli maddelerin varlığı (örn. cıva) vb.

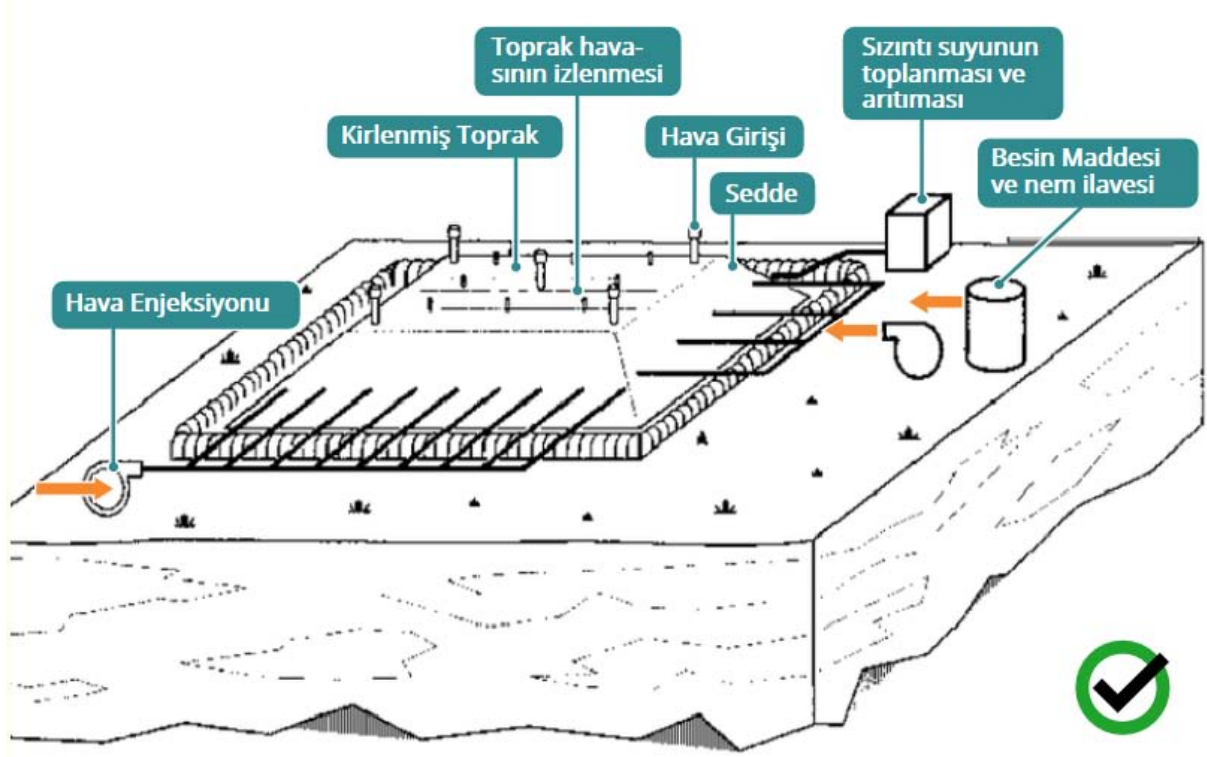
Kirlenme alanının dışında uygulanan biyolojik iyileştirme teknikleri arasında biyo-yığınlar, kompostlama, toprak çiftçiliğı ve biyolojik arıtma sayılabilir.

7.3.4.1. Biyo-yığınlar

Kazılmış topraklar toprak iyileştiricilerle karıştırılarak toprak üstündeki yapılar yerleştirilir. Bu teknik, havalandırılmalı durağan yığın şeklinde yapılan bir kompostlama sürecidir. Kompost, yığınlar şeklinde

oluşturulmakta ve havalandırma ekipmanı yardımıyla havalandırılmaktadır. Şekil 14'te tipik bir biyo-yığın sistemi görülmektedir.

Biyo-yığın sistemi, kazılmış ve toprak iyileştiricilerle karıştırılmış toprakların bir alana yerleştirilerek sızıntı sularının toplanıp arıtıldığı ve havalandırmanın gerçekleştirildiği tam ölçekli bir teknolojidir. Petrol bileşenlerini gidermek için yaygın olarak kullanılır. Biyo-parçalanmayı hızlandırmak için nem, sıcaklık, besin maddesi, oksijen ve pH kontrol edilir.



Şekil 14. Tipik bir biyo-yığın sistemi (USEPA, 2002)

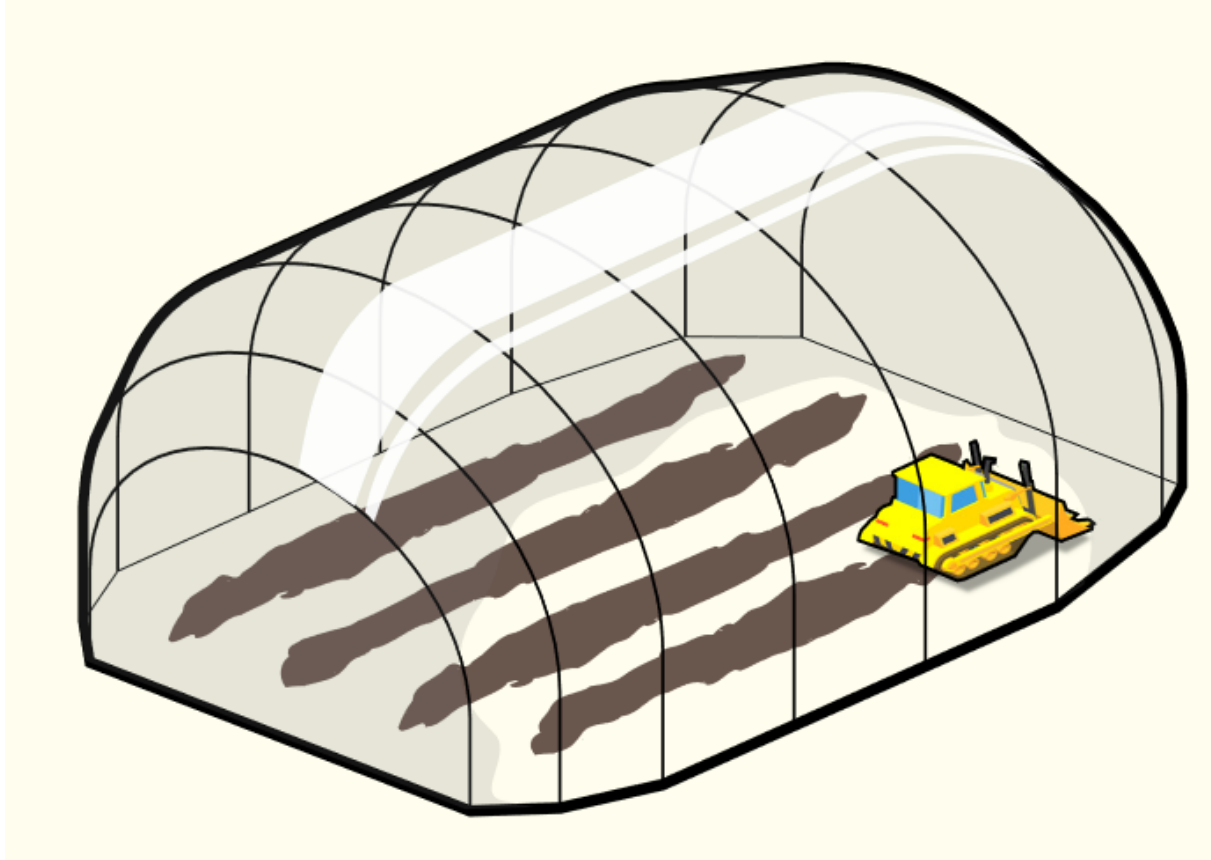
Kirleticilerin topraktan sızmasını engellemek için iyileştirmenin yapıldığı toprağın konduğu alan genellikle geçirimsiz bir tabakayla örtülür. Biyo-parçalanmayı hızlandırmak için geliştirilmiş ticari besin maddesi ve katkı maddesi formülasyonları bulunmaktadır. Bu formülasyonlar genellikle kirlenmiş toprağa özgü faktörler göz önünde bulundurularak modifiye edilir.

Yığınların altında bir hava dağıtım sistemi bulunur. Hava kirli toprak içinden bir vakum veya basınç uygulanarak geçirilmektedir. Toprak yığınları en fazla 2-3 metre yüksekliğinde tutulur. Yüzeysel akışı ve buharlaşmayı kontrol etmek ve güneşle ısıtmadan faydalanabilmek için bu yığınlar plastik örtü ile kaplanabilir. Toprakta uçucu organik kirleticiler bulunuyorsa, topraktan ayrılan havanın deşarj edilmeden önce arıtılması gerekir.

Biyo-yığın sistemi kısa-dönemde sonuç veren bir teknolojidir. İşletme ve bakım süreci birkaç hafta ile birkaç ay arasında değişmektedir (Khan ve diğ., 2004; USEPA, 2002).

7.3.4.2. Kompostlama

Kirlenmiş topraklar kazılarak çıkarılır, katkı maddeleriyle ve talaş, saman, sebze atıkları gibi organik iyileştiricilerle karıştırılır. Katkı maddeleri ve iyileştiriciler gözenek oranını dengeler ve termofilik mikrobiyal faaliyet için karbon ve azot dengesini sağlar. Şekil 15'te tipik bir sıralı kompostlama süreci görülmektedir.



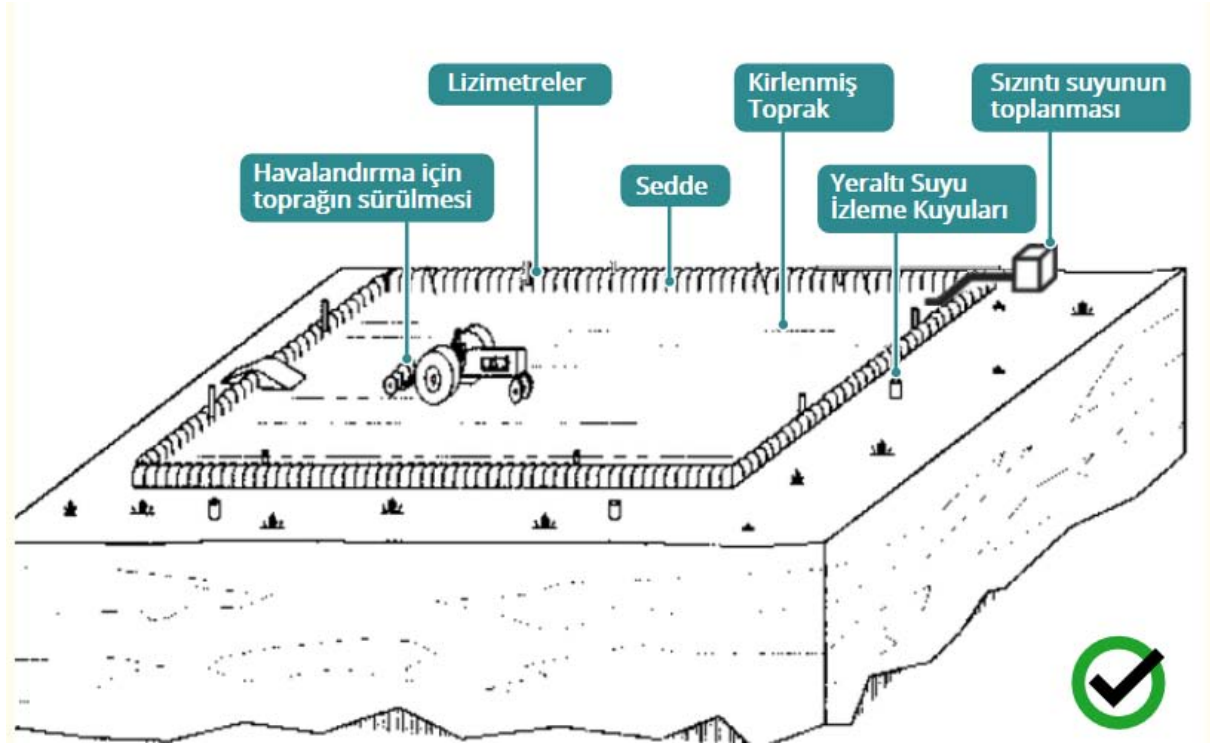
Şekil 15. Tipik bir sıralı kompostlama süreci (USEPA, 2002)

Kompostlama süreci organik kirleticilerin (örn. PAH'lar) kontrollü bir şekilde mikroorganizmalar tarafından tehlikesiz kararlı yan ürünlere dönüştürülmesi sürecidir. Tehlikeli organik bileşiklerle kirlenmiş toprakların kompostlanabilmesi için termofilik sıcaklık şartlarının (54-65°C) sürdürülmesi gerekmektedir. Sıcaklık artışı atık içindeki organik maddelerin parçalanması sırasında mikroorganizmalar tarafından üretilen ısı nedeniyle. En yüksek parçalanma verimi, oksijenlenmenin sağlanmasıyla (örneğin kompost sıralarının her gün çevrilerek havalandırılmasıyla), gerektiğinde sulamayla ve nem içeriği ve sıcaklığın sürekli izlenmesiyle elde edilir. Kompostlama sürecinde 3 tasarım yaygındır: havalandırılmalı statik yığın

kompostlama (Kompost, yığınlar şeklinde oluşturularak pompalar veya vakum yardımıyla havalandırılmaktadır), mekanik olarak karıştırılan reaktör tipi kompostlama (Kompost kapalı bir reaktöre yerleştirilerek karıştırılır ve havalandırılır) ve sıralı kompostlama (Kompost uzun sıralı yığınlar şeklinde yerleştirilir ve gezici bir ekipmanla havalandırılır). Sıralı kompostlama oldukça maliyet etkili bir kompostlama süreci olarak bilinmektedir. Bu kompostlama tipinde uçucu emisyonlar da yüksek olacağı için gaz arıtımı gerekli olabilir (Pavel ve Gavrilesco, 2008; USEPA, 2002).

7.3.4.3. Toprak Çiftçiliği

Bu yöntemde, kirlenmiş toprak kazılarak sızdırmazlığı sağlanmış yataklara serilir. Daha sonra sürekli döndürülerek havalandırılır. Şekil 16’da tipik bir toprak çiftçiliği sistemi görülmektedir.



Şekil 16. Tipik bir toprak çiftçiliği sistemi (USEPA, 2002)

Toprak çiftçiliği, sızıntı sularını kontrol etmek için sızdırmaz tabakaların yer aldığı tam ölçekli bir biyo-iyileştirme teknolojisidir. Kirleticilerin parçalanma hızını kontrol etmek için toprak şartları sürekli kontrol edilmektedir. Kontrol edilen şartlar aşağıdaki gibidir:

- Nem içeriği (sulama veya spreyleme yoluyla)
- Oksijen içeriği (önceden belirlenmiş bir sıklıkta toprağın sürülmesi, karıştırılması ve havalandırılması yoluyla)

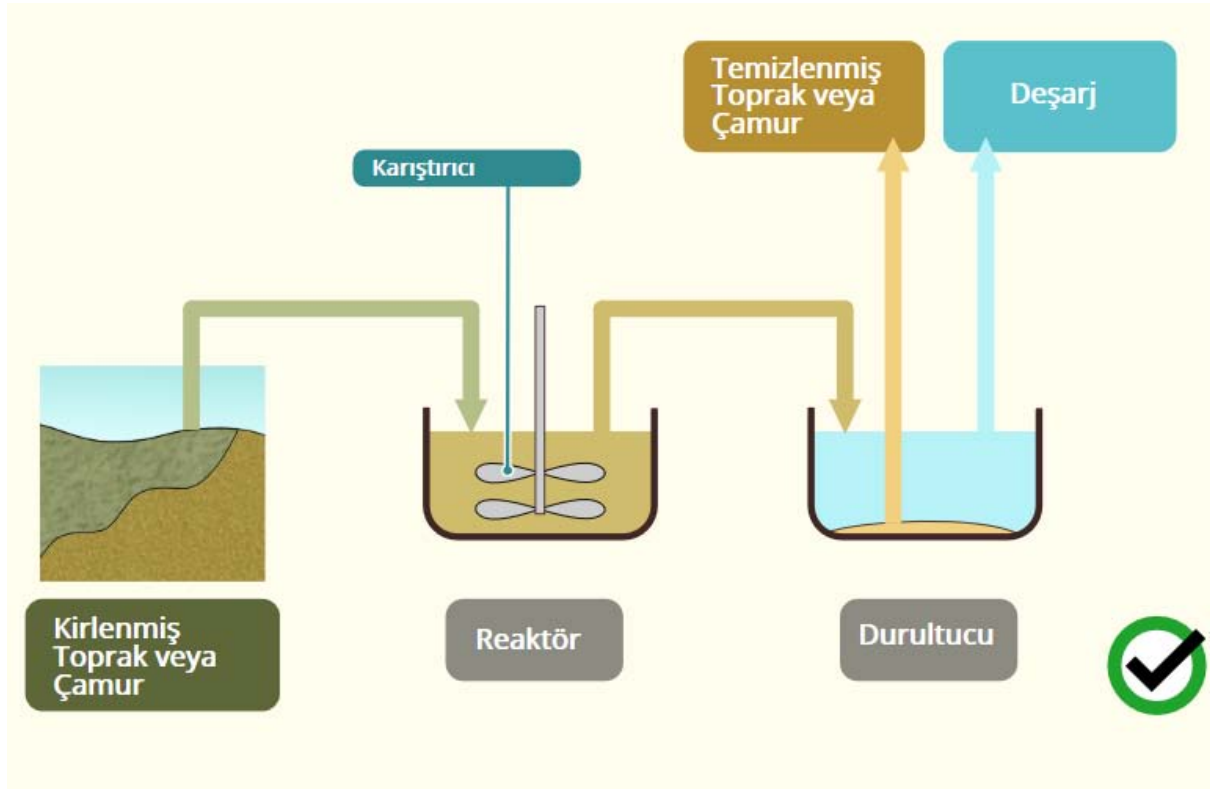
- pH (öğütülmüş kireçtaşı veya tarımsal kireç ilave ederek nötral pH düzeyinde tamponlama yoluyla)
- Genel şartlar (toprak katkı maddeleri, besin maddeleri vb. ilave ederek)

Bu teknik yıllarca sondaj atıklarını, petrol çamurlarını ve diğer petrol rafineri atıklarını yönetmek için kullanılmıştır. Toprak çiftçiliğinde tarımsal işlemlerde kullanılan ekipman kullanılmaktadır. Bu çiftçilik faaliyetleri tehlikeli bileşenlerin mikrobiyal parçalanmasını geliştirmek içindir. Kirleticinin molekül ağırlığı arttıkça parçalanma hızı azalmaktadır. Kirletici türlerinin klor ve nitrat içeriği arttıkça parçalanması daha zor hale gelmektedir. Bu teknik orta ve uzun vadede etkisini göstermektedir (USEPA, 2002).

Kirlenmiş toprak, arıtma alanının üzerine ince bir tabaka olarak serilmekte ve toprağa besin maddesi, mineral, nem beslemesi yapılarak mikrobiyal faaliyet canlandırılmaktadır (Hejazi ve diğ., 2003). Kirleticiler ve mikroorganizmalar arasındaki teması artırmak için toprağın çok iyi karıştırılması ve aerobik parçalanma için yeterli oksijenin sağlanması gerekmektedir.

7.3.4.4. Biyolojik Arıtma

Kirlenmiş toprak suyla ve diğer katkı maddeleriyle karıştırılarak yarı katı bir karışım elde edilir. Bu karışım, katılar askıda tutulacak ve mikroorganizmalar topraktaki kirleticilerle temas edebilecek şekilde karıştırılır. Sürecin tamamlanmasından sonra karışım susuzlaştırılır ve temizlenmiş toprak elde edilir. Şekil 17'de kirlenmiş topraklara uygulanan tipik bir biyolojik arıtma süreci görülmektedir.



Şekil 17. Tipik bir biyolojik arıtma süreci (USEPA, 2002)

Kirlenmiş toprak veya çamura uygulanan biyolojik arıtma süreci, kazılmış toprağın bir biyoreaktör içinde kontrollü arıtımını kapsamaktadır. Kazılarak alandan alınan toprak, içindeki taş ve moloz gibi malzemelerden ayrıldıktan sonra belli bir konsantrasyon derecesine gelinceye kadar suyla karşılaştırılır. Karışımın konsantrasyonu kirleticinin konsantrasyonuna, parçalanma hızına, toprağın fiziksel yapısına bağlı olarak belirlenir. Karışım içindeki katılar reaktör içinde askıda tutularak besin maddeleri ve oksijenle karıştırılır. Gerekirse pH kontrolü için asit veya alkali bir madde karışıma ilave edilir. Uygun bir mikroorganizma popülasyonunun bulunmaması durumunda, karışıma mikroorganizma ilavesi yapılabilir. Biyoparçalanma tamamlandığında, karışım susuzlaştırılır. Susuzlaştırma araçları iecrisinde durultucular, basınçlı filtreler, vakum filtreler, kum kurutma yatakları veya santrifüj aletleri bulunmaktadır. Bu biyoreaktörlerin etkisi kısa-orta vadede görülebilir.

Bu teknik, patlayıcılar, petrol hidrokarbonları, petrokimyasal maddeler, çözücüler, pestisitler, ahşap koruyucular ve diğer organik maddelerle kirlenmiş topraklarda uygulanabilir. Biyoreaktörler, heterojen topraklarda, düşük geçirimlilikteki alanlarda, yeraltı suyunun kontrol edilemediği durumlarda ve hızlı arıtımın gerekli olması durumunda yerinde biyolojik tekniklere göre avantajlıdır. Biyoreaktörlerde öncelikle halojen içermeyen yarı uçucu ve uçucu organik bileşikler arıtılmaktadır. Çok klorlu bifenilleri, halojenli yarı uçucu organik bileşikleri, pestisitleri arıtmak için ardışık anaerobik / aerobik biyoreaktörler kullanılabilir (Khan ve diğ., 2004; USEPA, 2002).

7.3.5. Kirlenme Alanının Dışında Uygulanan Fiziksel ve Kimyasal Yöntemler

Fiziksel / kimyasal yöntemler kirleticilerin veya kirlenmiş ortamların fiziksel özelliklerini kullanarak kirleticiyi parçalamakta (kimyasal olarak değiştirmekte), ayırmakta veya kirleticinin hareketini sınırlamaktadır. Bu yöntemler içinde kimyasal yükseltgeme/indirgeme ve halojen giderimi süreçleri parçalama teknolojileridir. Toprak yıkama ve kimyasal maddeyle özütleme ayırma teknolojileridir. Katılaştırma/kararlı hale getirme teknolojisi bir hareketsizleştirme teknolojisidir.

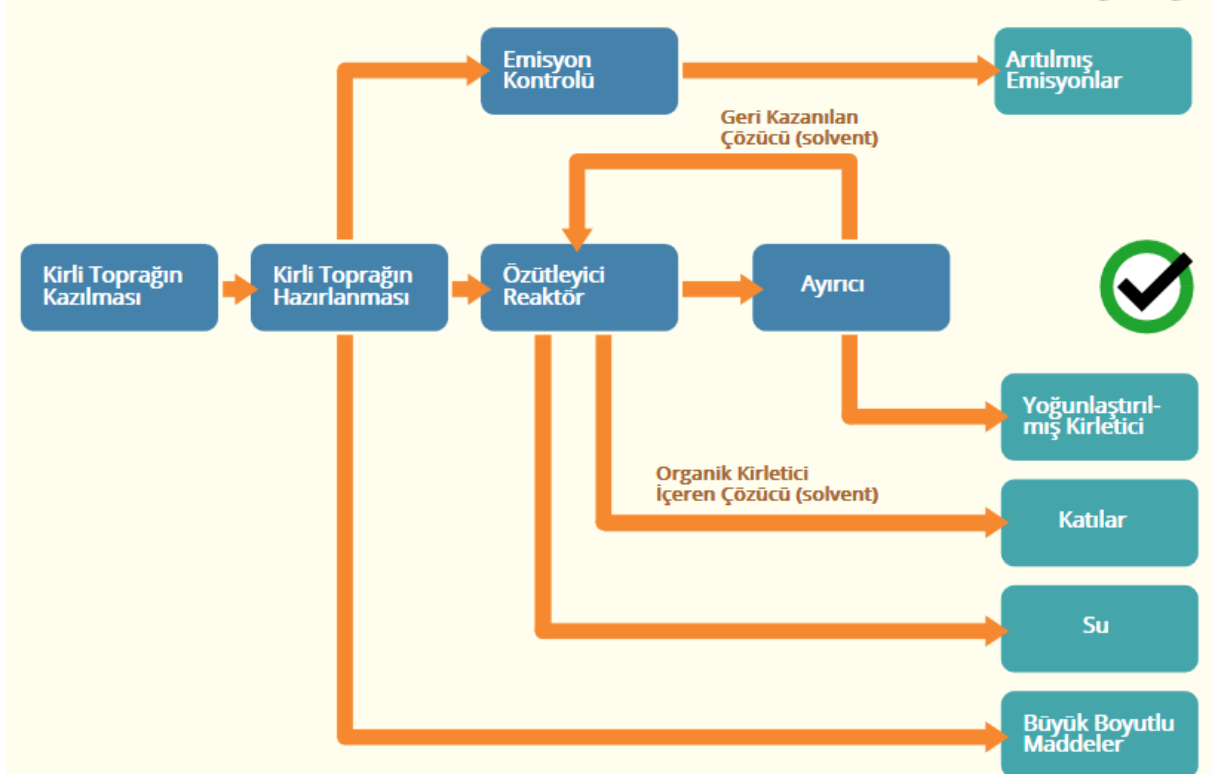
Fiziksel / kimyasal yöntemler genellikle maliyet etkili yöntemlerdir ve biyolojik yöntemlerle kıyaslandıklarında kısa sürelerde tamamlanabilirler. Ekipmanları bulunabilir durumdadır. Ayırma tekniklerinden çıkan kalıntıların bertaraf edilmesi ihtiyacı bulunmaktadır; bu da proje maliyetini etkilemekte, yasal izinlerin alınmasını gerektirmektedir.

Alan dışında uygulanabilecek fiziksel / kimyasal yöntemler arasında kimyasal maddeyle özütleme, kimyasal yükseltgeme/indirgeme, halojen madde giderme, ayırma, toprak yıkama ve katılaştırma / kararlı hale getirme teknolojileri bulunmaktadır.

7.3.5.1. Kimyasal Maddeyle Özütleme

Kirlenmiş toprak ve kimyasal madde bir reaktör içinde karıştırılır; böylelikle kirletici maddeler kimyasal madde yardımıyla çözülmüş hale getirilir. Sonraki aşamada reaktördeki çözelti, bir ayırıcı yardımıyla katı

maddeden ayrılır. Katı maddeden ayrılan ve kirletici içeren sıvı ise arıtmak üzere uzaklaştırılır. Şekil 18'de tipik bir kimyasal maddeyle özütleme sistemi görülmektedir.



Şekil 18. Tipik bir kimyasal maddeyle özütleme sistemi (USEPA, 2002)

Kimyasal maddeyle özütleme yöntemi kirleticileri parçalamamakta, ancak topraktan uzaklaştırmaktadır. Böylelikle arıtılması gereken tehlikeli atık hacmini azaltmaktadır. Süreçte özütleyici olarak kimyasal bir madde kullanılmaktadır ve yöntem bu yönüyle toprak yıkama sürecinden ayrılmaktadır. Bu teknolojinin ticari ölçekteki üniteleri kullanımdadır. Bu üniteler kullanılan kimyasal maddenin, ekipmanın tipine ve işletme moduna göre değişmektedir.

Kimyasal maddeyle özütlemeye önce, ince fraksiyonun daha fazla kirletici içereceği düşüncesiyle, toprak kaba ve ince fraksiyonlara ayrılır. Fiziksel ayırma aynı zamanda partikül fazdaki ağır metalleri ayırarak özütleme hızlarını da geliştirir.

Asit Özütlemesi: Bu yöntemde özütleyici madde olarak asit kullanılır. Öncelikle topraklardan kaba katıları ayırmak için eleme işlemi yapılır. Daha sonra özütleme reaktöründe, topraklara hidroklorik asit ilave edilir. Ünitelerdeki bekleme süresi, toprağın ve kirleticinin tipine, kirletici konsantrasyonuna göre değişmektedir. Toprak-özütleyici karışımı, özütleme reaktöründen sürekli olarak dışarı pompalanır ve toprağın özütleyici sıvıdan ayrılacağı hidrosiklonlara iletilir.

Özütleme tamamlandıktan sonra, toprak faz, yıkama sistemine iletilir. Toprak faz suyla yıkanarak içindeki asit ve metallere arındırılır. Özütleme çözeltisi ve yıkama suları ticari olarak bulunabilen çöktürücü maddelerle rejenere edilir. Bu amaçla sodyum hidroksit, kireç ve diğer formülasyonların yanında metalleri gideren ve asiti iyileştiren yumaklaştırıcılar (flokülant) da kullanılabilir. Ağır metaller geri kazanıma uygun bir şekilde konsantre hale getirilir. Son adımda topraklar susuzlaştırılır, kireç ve gübre gibi maddelerle toprak içindeki kalıntı maddeler nötrale edilir.

Çözücü (solvent) Özütlemesi: Bu yöntemde özütleyici madde olarak çözücüler (solvent) kullanılır. Bu yöntem genellikle diğer teknolojilerle kombinasyon içinde uygulanır. Kombinasyon yapılabilecek teknolojiler arasında alan özelliklerine bağlı olarak, katılaştırma / kararlı hale getirme, yakma ve toprak yıkama yöntemleri bulunmaktadır.

Bazı durumlarda da çözücü özütlemesi tekniği tek başına uygulanabilir. Bu teknikle hedeflenen organik kirleticilerin yanında organik olarak bağlı metaller de özütlenebilir. Sonuçta özel yöntemlerle bertaraf edilmesi gereken kalıntılar ortaya çıkar. Yöntem tek başına uygulandığında arıtılan toprak matrisinde bulunabilen çözücü kalıntıları zehirlilik problemi ortaya çıkarabilir. Arıtılmış toprak yasal standartları sağlayacak duruma getirildikten sonra tekrar alana döndürülür. Bu yöntemin işletme ve bakım süreci genellikle orta vadelidir (USEPA, 2002).

Çözücü özütlemesinin PCB, UOB, halojenli çözücüler, petrol atıkları gibi kirleticiler içeren sediment, çamur ve toprak iyileştirmesinde etkili olduğu bilinmektedir. Boya atıklarında, sentetik kauçuk süreci atıklarında, kömür-katran atıklarında, sondaj çamurlarında, ahşap işleme atıklarında, ayırma çamurlarında, pestisit/insektisit atıklarında, petrol rafinerisi atıklarında uygulanabildiği bilinmektedir. Asit özütlemesi ise özellikle ağır metallerle kirlenmiş sediment, çamur ve toprakları iyileştirmekte etkilidir.

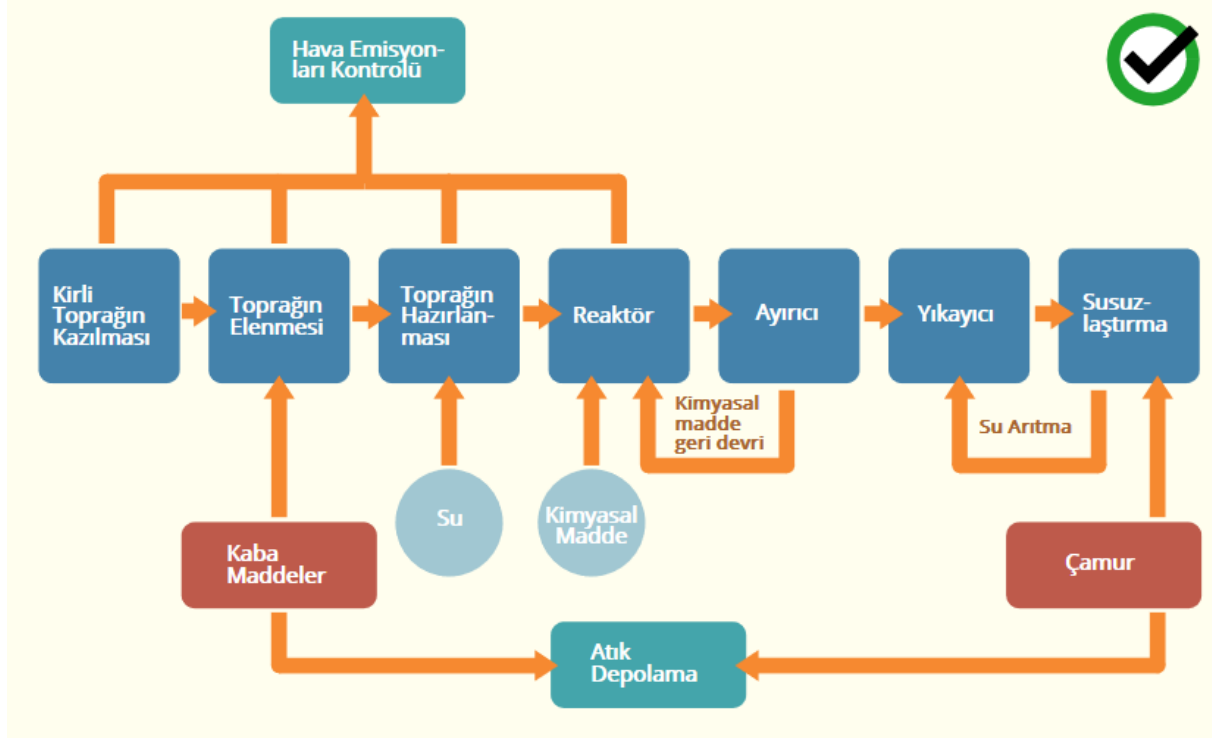
Sürecin uygulanabilirliğini ve etkinliğini sınırlayan faktörler aşağıdaki gibidir:

- Bazı toprak tipleri ve farklı nem içeriği seviyeleri süreç performansını olumsuz yönde etkilemektedir.
- Yüksek kil içeriği özütleme verimini azaltmakta ve daha uzun temas süreleri gerektirmektedir.
- Organik olarak bağlı metaller, hedeflenen organik kirleticilerle birlikte özütlenebilir. Bu da kalıntıların yönetimini zorlaştırır.
- Deterjan ve emülgatörlerin bulunması, özütleme performansını olumsuz etkiler.
- İşlem görmüş topraklarda zehirli özellikteki çözücü kalıntıları kalabilir.
- Yüksek molekül ağırlıklı organik ve hidrofilik maddelerde çözücü özütlemesi çok az etkilidir.
- Asit özütlemesinden sonra, toprakta bulunabilecek kalıntı asitlerin nötrale edilmesi gereklidir.
- Yasal standartlara uygun hale getirecek düzeyde yürütülen bir iyileştirme süreci çok yüksek maliyetli olabilir.

7.3.5.2. Yükseltgeme / İndirgeme

Yükseltgeme / indirgeme teknolojisinde tehlikeli bileşenler, daha az tehlikeli veya tehlikesiz, daha kararlı, daha az hareket eden, ve/veya inert bileşenlere dönüştürülür. En yaygın oksitleyici maddeler ozon,

hidrojen peroksit, hipokloritler, klor ve klordioksittir. Şekil 19'da tipik bir yükseltgeme/ indirgeme süreci görülmektedir.



Şekil 19. Tipik bir kimyasal yükseltgeme / indirgeme süreci (USEPA, 2002)

Yükseltgeme/ indirgeme (redoks) reaksiyonları elektronların bir bileşikten diğer bileşiğe transferini ve kimyasal bağların kırılmasını içermektedir (Khan ve diğ., 2004). Bu süreçte reaksiyona girenlerden biri yükseltgenmekte (oksitlenmekte, elektron kaybetmekte), diğeri indirgenmektedir (elektron kazanmakta). Bu teknoloji kısa-orta vadeli bir teknolojidir.

Kimyasal redoks için hedef kirlenimler genelde inorganik maddelerdir. Yöntemin halojen içermeyen uçucu organik bileşikler, hidrokarbonlar ve pestisitler için etkinliği daha az olmaktadır.

Sürecin sınırlı yönleri aşağıdaki gibidir:

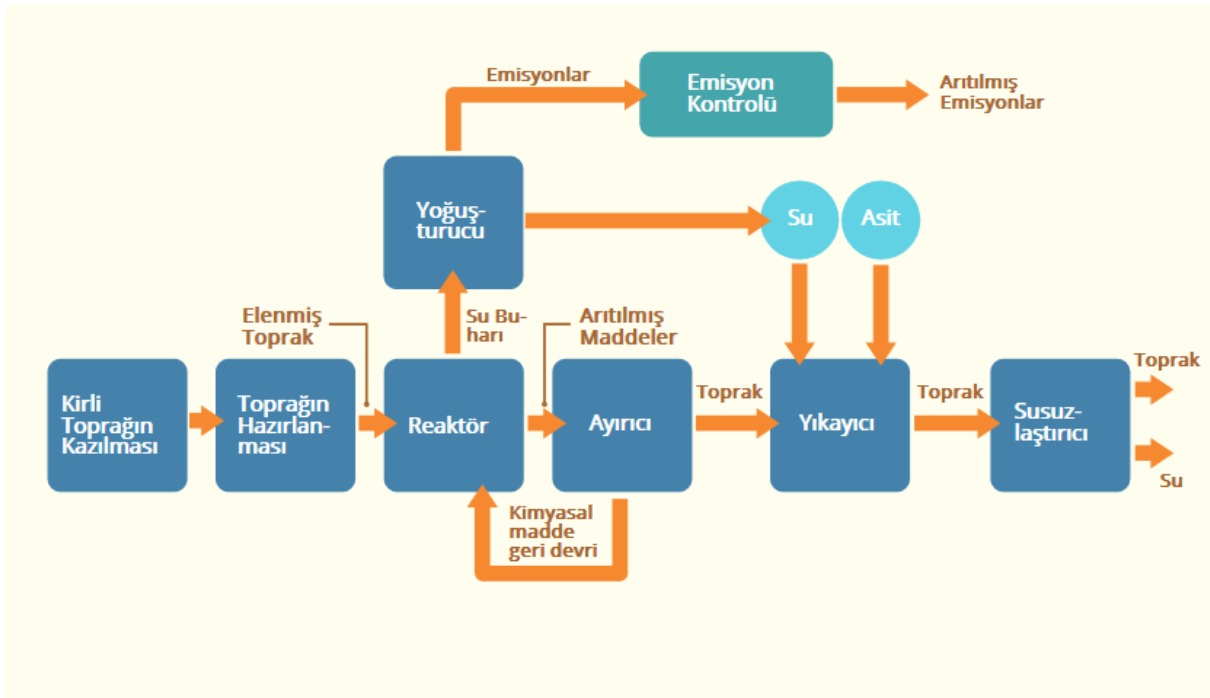
- Kirlenimciye ve kullanılan oksitleyici maddeye bağlı olarak eksik oksidasyon ortaya çıkabilir veya ara kirlenimler oluşabilir.
- Yüksek kirlenimci konsantrasyonlarında yüksek miktarda oksitleyici madde gerekli olacağından süreç, maliyet-etkili olmayabilir.

- Süreç verimini artırmak için ortamdaki yağ ve gres miktarının en düşük seviyeye indirilmesi gerekir.

Oksitleyici maddeler genellikle kirleticiye özgü değildirler ve hedeflenen kirleticilerin yanında toprağın organik maddesiyle de reaksiyona girerler. Yükseltgenme/İndirgenme reaksiyonları özellikle içme suyu dezenfeksiyonunda kullanılan, siyanür giderimi sağlayan, iyi bilinen bir teknolojidir. Topraktaki kirleticileri gidermek için de gelişmiş sistemler kullanılmaktadır (Pavel ve Gavrilescu, 2008).

7.3.5.3. Halojen Madde Giderme

Halojenli organik maddelerle kirlenmiş topraklara bazı kimyasal maddeler ilave edilir. Halojen giderme süreci, halojen moleküllerinin yer değiştirmesiyle veya kirleticilerin kısmi buharlaşmasıyla veya parçalanmasıyla sağlanır. Kirlenmiş toprak elenir, bir öğütücü yardımıyla parçalanır ve kimyasal maddelerle karıştırılır. Karışım bir reaktörde ısıtılır. Şekil 20’de tipik bir halojen madde giderim süreci görülmektedir.



Şekil 20. Tipik bir halojen madde giderim süreci

Klorlu organik bileşiklerle kirlenmiş toprakların iyileştirilmesi için geliştirilen bazı katalizlenen parçalama sürecinde, kirlenmiş topraklar elenerek öğütüldükten sonra, sodyum bikarbonat ile karıştırılır. Karışım bir reaktörde 330°C'nin üzerinde bir sıcaklıkta ısıtılarak kirleticiler kısmen parçalanır ve buharlaştırılır. Buharlaştırılan kirleticiler tutulur, yoğunlaştırılır ve ayrıca arıtılır.

Teknolojinin bir başka uygulamasında alkali polietilen glikol maddesi kullanılmaktadır. Kirlenmiş topraklar ve kimyasal madde bir reaktör içinde ısıtılır. Reaksiyon sırasında polietilen glikol, halojen moleküllerle yer değiştirir ve kirleticinin daha az zehirli hale gelmesi sağlanır. Kimyasal madde kirleticiyle reaksiyona girerek glikol eter ve/veya hidrosilli bir bileşik ve alkali bir metal tuz oluşturur. Bu ürünler suda çözünebilir yan ürünlerdir. Süreçte oluşan atıksu genelde kimyasal oksidasyon, biyo-parçalanma, karbon adsorpsiyonu veya çöktürme yöntemiyle arıtılır. Halojen giderimi normalde kısa-orta vadeli bir süreçtir. Bu yöntemle kirletici, başka bir ortama aktarılmak yerine kısmen parçalanmaktadır.

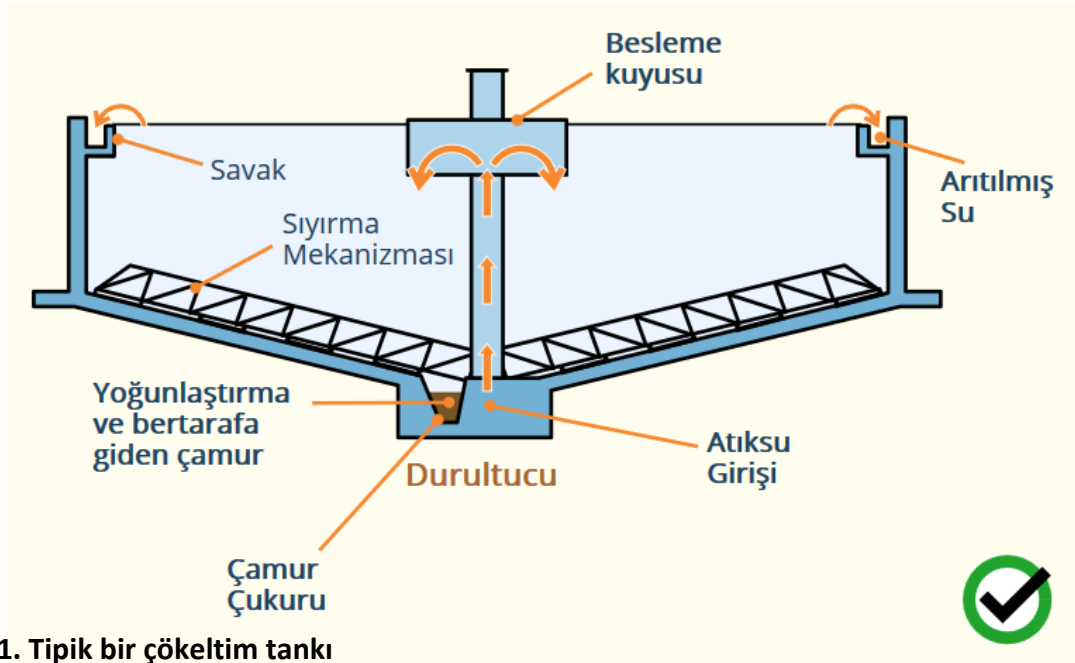
Halojen giderimi yöntemi için hedef kirleticiler, halojen içeren yarı uçucu organik bileşikler ve pestisitlerdir. Bu yöntem PCB'lerin arıtımında yakmanın dışında uygulanabilecek nadir süreçlerden biridir. Yöntem küçük ölçekli uygulamalar için uygundur.

Yöntemin sınırlı yönleri aşağıdaki gibidir:

- Yüksek kil ve nem içeriği arıtma maliyetini artırır.
- Büyük atık hacimleri için genellikle maliyet etkili bir yöntem değildir.
- Klorlu organik madde içeriği %5'in üzerinde olan toprakların yüksek miktarlarda kimyasal maddeye ihtiyaç duyulur.
- Topraktaki ince madde fraksiyonu ve nem içeriği yüksek olduğunda kalıntıların tutulması ve arıtımı zor olmaktadır.

7.3.5.4. Ayırma

Ayırma teknikleri, fiziksel ve kimyasal araçlarla kirlenmiş katıları konsantre hale getirmek için kullanılmaktadır. Bu süreçler kirleticileri buldukları ortamdan koparmaya çalışır. Şekil 21'de yerçekimi esasıyla çalışan tipik bir çökeltim tankı verilmektedir.



Şekil 21. Tipik bir çökeltim tankı

Kirlenmiş katıları topraklardan ayırmak için ayırma süreçleri kullanılır. Alan dışında yapılan ayırma işlemi çeşitli süreçlerle gerçekleştirilebilir. Yer çekimiyle ayırma, eleme/fiziksel ayırma, özellikle kentsel atıksuların arıtılmasında kullanılan ve iyi bilinen yöntemlerdir.

Yerçekimi kuvvetinin etkili olduğu ayırma işlemi fazlar arasındaki yoğunluk farkına bağlı olarak etkili olmaktadır. Ekipman boyutu ve sürecin etkinliği, partikül boyutu, yoğunluk farkı, akışkan viskozitesi, partikül konsantrasyonunun bir fonksiyonu olan katı çökeltme hızına bağlıdır. Bu yöntem, birbirine karışmayan petrol fazlarının gideriminde kullanılır. Partikül boyutunu artırmak için öncesinde koagülasyon ve flokülasyon uygulanır, ince partiküllerin giderimi sağlanır.

Manyetik ayırma, hafif manyetik radyoaktif partiküllerin su, hava veya toprak ortamından ayrılması için kullanılır. Bütün uranyum ve plutonyum bileşikleri hafif manyetik özellik gösterirken, taşıyıcı ortamlar manyetik özellik göstermez. Bu süreç, kirlenmiş toprağı manyetize bir ortamdan geçirme yoluyla uygulanır. Manyetize hacim, çelik yünü gibi manyetik bir malzeme içerir ve manyetik kirlilik oluşturan partikülleri toprak içinden ayırır.

Kirleticileri daha küçük hacimlerde yoğunlaştırmak için farklı boyutlarda elekler kullanılabilir. Fiziksel ayırma, birçok organik ve inorganik kirleticinin, toprağın ince fraksiyonuna (kil veya silt) kimyasal veya fiziksel olarak bağlanma eğilimi bulunduğu bilgisine dayandırılır. Kil ve silt partikülleri fiziksel olarak daha büyük taneli kum ve çakıl partiküllerine sıkışma ve adezyon yoluyla bağlanırlar. Daha küçük bir hacimde konsantre hale getirilen kirleticiler daha sonra arıtılarak bertaraf edilir.

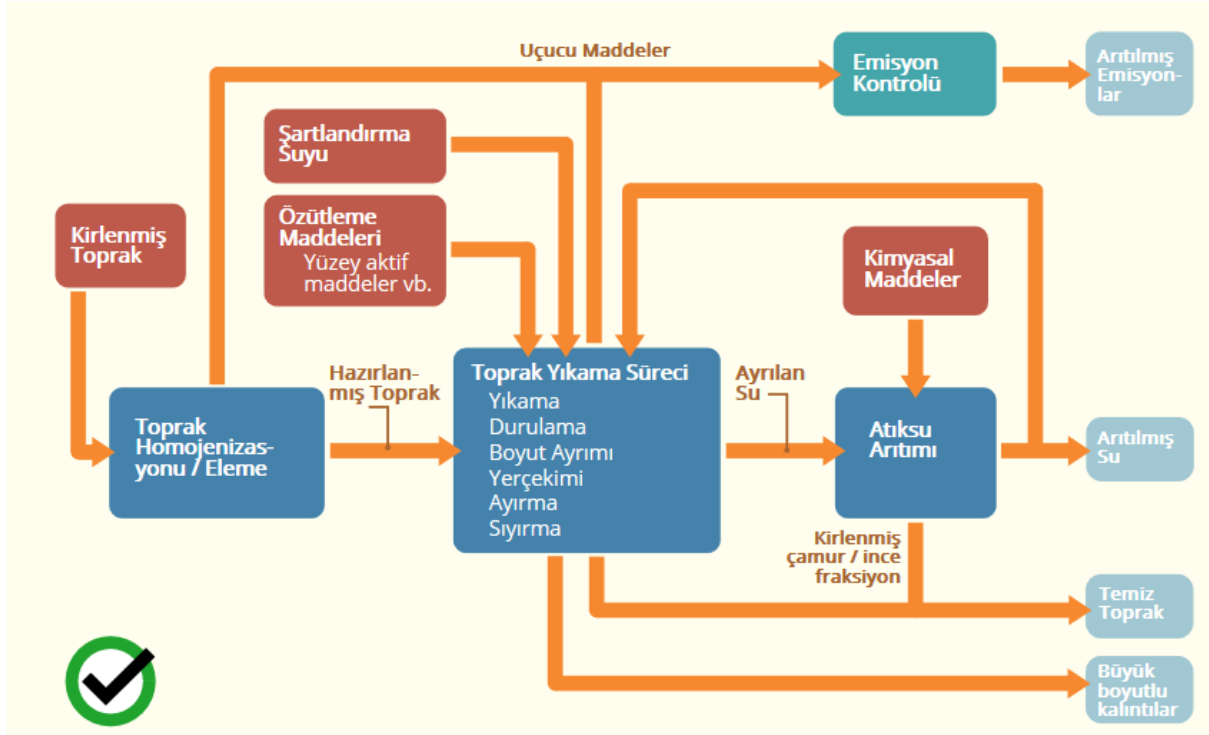
Alan dışında uygulanan ayırma süreçlerinin hedef kirletici grupları arasında, yarı uçucu organik bileşikler, yakıtlar ve inorganik maddeler (radyonüklitler dahil) bulunmaktadır. Teknoloji, belli uçucu organik bileşikler ve pestisit türleri üzerinde etkilidir. Ağır metal kirleticiler partiküller halinde bulunuyorsa, ayırma işlemi etkili olur.

Yöntemin sınırlı yönleri aşağıdaki gibidir:

- Yüksek kil ve nem içeriği arıtma maliyetini artırır.
- Bu süreçler katı ve sıvı faz yoğunlukları arasındaki farka bağlı olarak etkilidir. Partiküllerin özgül ağırlıkları çökeltme hızını ve proses verimini etkiler. Çökeltme hızı akışkanın viskozitesinden etkilenir.
- Organik çamurun septik koşullarda bulunmasından dolayı ortaya çıkan koku problemlerini gidermek için özel önlemlerin alınması gerekli olmaktadır.

7.3.5.5. Toprak Yıkama

İnce toprak taneciklerine tutunmuş kirleticiler, toprak kütesinden sıvı bazlı bir sistemle partikül boyutuna bağlı olarak ayrılır. Yıkama suyu, temel bir yıkama çözeltisi, yüzey aktif madde, pH ayarlayıcı veya şelat yapıcı madde ile artırılarak organik madde ve ağır metal giderimi yapılır. Şekil 22'de tipik bir toprak yıkama süreci görülmektedir.



Şekil 22. Tipik bir toprak yıkama süreci

Toprak yıkama, kirleticileri gidermek için toprağın alan dışında yıkandığı bir süreçtir. Kirleticiler aşağıdaki iki yoldan biriyle topraktan ayrılır:

- Yıkama çözeltisi içinde kirleticileri çözerek veya askıda tutarak (pH'ın belli bir süre boyunca kimyasal olarak değiştirilmesiyle kirleticiler askıda tutulabilir)
- Partikül boyutu ayırma, yerçekimiyle ayırma veya sıyırma yoluyla kirleticileri daha küçük bir toprak hacmi içinde konsantre hale getirerek.

Toprak yıkama sistemleri birçok giderim tekniğini birleştirerek ağır metal, radyonüklit ve organik kirleticiler gibi çeşitli kirleticilerin gideriminde oldukça etkilidirler. Ancak sürecin yeterince ticarileşmiş olduğu söylenemez (Pavel ve Gavrilescu, 2008).

Topraktaki kirleticilerin karmaşık karışımları (metal, uçucu olmayan organik maddeler ve yarı uçucu organik bileşikler) ve heterojen kirleticiler kompozisyonları nedeniyle bütün kirleticileri gidermeye uygun tek bir yıkama çözeltisi formüle etmek mümkün olmamaktadır. Bu gibi durumlar için farklı yıkama çözeltileriyle ardışık yıkama uygulamaları gerekli olabilir.

Toprak yıkama genellikle bir ortam transfer teknolojisi olarak bilinmektedir. Topraktan elde edilen kirlenmiş su, kirleticilere uygun yöntemlerle arıtılmaktadır. Toprak yıkamanın süresi kısa ve orta vadeli olarak değişmektedir.

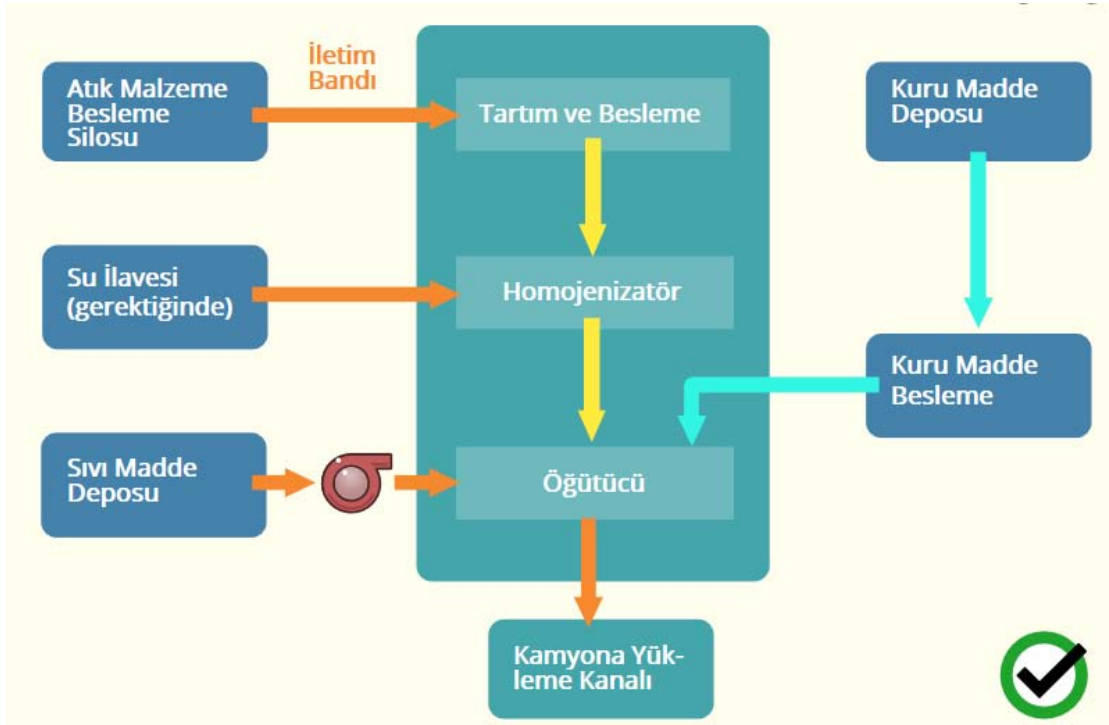
Hedef kirlenici grupları arasında yarı uçucu organik bileşikler, yakıtlar ve ağır metaller bulunmaktadır. Teknoloji metallerin geri kazanımına imkân verir, kaba taneli topraklardan organik ve inorganik kirlenicileri temizleyebilir.

Teknolojinin sınırlı yönleri aşağıdaki gibidir:

- Karmaşık atık karışımları (organik maddelerle karışmış metaller) yıkama sıvısının formülasyonunu zorlaştırır.
- Toprağın yüksek humik madde içeriği bir ön arıtım gerektirebilir.
- Yıkama sıvısı ilave bir arıtma gerektirir.
- Kil boyutundaki partiküllerin yüzeyine tutunmuş organik maddeleri gidermek güç olmaktadır (Khan ve diğ., 2004; Pavel ve Gavrilescu, 2008).

7.3.5.6. Katılaştırma / Kararlı Hale Getirme

Bu süreçte kirleniciler kararlı bir kütle içinde fiziksel olarak tutulmakta veya bağlayıcı madde ve kirleniciler arasında kimyasal reaksiyonlar tetiklenerek kirlenici hareketi sınırlanmaktadır. Katılaştırma/kararlı hale getirme süreçleri BÖLÜM 5'te detaylı bir şekilde anlatılmaktadır. Şekil 23'te alan dışında gerçekleştirilen tipik bir katılaştırma / kararlı hale getirme süreci görülmektedir.



Şekil 23. Alan dışında gerçekleştirilen tipik bir katılaştırma / kararlı hale getirme süreci

Alanda gerçekleştirilen katılaştırma/kararlı hale getirme (K/K) sürecinde olduğu gibi (Bkz. 7.3.2.5), alan dışında gerçekleştirilen K/K sürecinde de kirleniciler kütle içinde fiziksel olarak tutulurlar (katılaştırma)

veya kimyasal reaksiyonlara girerek hareketsiz hale gelirler (kararlı hale getirme). Alan dışındaki K/K oluşan malzemelerin bertarafını gerektirdiği için alanda yapılandan farklılık gösterir.

Zaman içinde K/K teknolojisinde bazı yenilikler geliştirilmiştir. Yeniliklerin çoğu kanıtlanmış süreçlerdir. Geliştirilen yenilikçi süreçler arasında, 1) Bitümleştirme, 2) Sıvılaştırılmış (emülsifiye) asfalt, 3) Modifiye kükürt çimentosu, 4) Polietilen ekstrüzyonu, 5) Puzolan/Portland çimentosu, 6) Radyoaktif atık katılaştırma, 7) Çamur kararlılaştırma (stabilizasyon), 8) Çözünür fosfatlar, ve 9) Vitrifiye/erimiş cam süreçleri sayılabilir.

Tipik bir alan dışı K/K süreci kısa-orta vadelidir.

Bitümleştirme: Bu süreçte kirlenmiş topraklar erimiş bitümen içine gömülür ve bitümen soğudukça hapsedilmiş olur. Süreçte, ısınmış bitümen ve kirli toprak ısıtılmış bir ekstrüder içinde birleştirilir. Karışımdaki su %0.5 nem oranına gelinceye kadar buharlaştırılarak azaltılır. Nihai ürün, kalıptan çıkmış toprak ve bitümenin homojen bir karışımıdır.

Sıvılaştırılmış (Emülsifiye) Asfalt: Asfalt emülsiyonları kimyasal maddelerle kararlı hale getirilmiş ve suda dağıtılmış (disperse olmuş) çok küçük asfalt tanecikleridir. Emülsiyonlar katyonik veya anyonik olabilir. Bu süreçte uygun yüke sahip emülsifiye asfalt, ortam sıcaklığında, hidrofilik sıvı veya yarı-sıvı atıkla (kirlenmiş yeraltusuyu, toprak veya çamur) birleştirilmektedir. Karıştırma işleminden sonra emülsiyon parçalanmakta, atık içindeki su açığa çıkmaktadır. Organik faz, atık katılar etrafında kümelenmiş hidrofobik bir asfalt matrisi oluşturmaktadır. Bazı durumlarda, kireç ve alçı gibi nötralizan maddelerin ilave edilmesi gerekli olmaktadır. Priz ve kür için belli bir süre verildikten sonra, atık ortaya çıkan katı asfaltın içinde düzenli bir şekilde dağıtılmış ve sızdırmaz hale getirilmiş olur.

Modifiye Kükürt Çimentosu: Modifiye kükürt çimentosu, ticari olarak bulunabilen termoplastik bir malzemedir. 127-149°C sıcaklıklarda kolaylıkla eritilir ve atıkla karıştırılarak homojen bir sıvı karışım elde edilir. Bu karışım uygun konteynırlara konarak soğutulur. Burada çeşitli karıştırma aletleri kullanılabilir. Uygulanan sıcaklıkların düşük olması nedeniyle oluşan kükürtdioksit ve hidrojen sülfür emisyonları sınır değerlerin altındadır.

Polietilen Ekstrüzyonu: Bu süreçte polietilen bağlayıcılar ve kuru atık malzemeler bir silindirde ısıtılarak karıştırılır. Isıtılmış homojen karışım silindirden çıktıktan sonra bir kalıp içine alınır, burada soğur ve katılaşır. Polietilenin özellikleri sayesinde kararlı ve katılaşmış bir ürün ortaya çıkar.

Puzolan / Portland Çimentosu: Bu süreç uçucu kül, fırın tozu, pomza veya yüksek fırın cürufu gibi puzolan bazlı malzemelerden ve Portland çimentosu gibi çimento bazlı malzemelerden gelen silikatlarla gerçekleştirilir. Bu malzemeler kimyasal olarak suyla reaksiyona girer ve atığın fiziksel özelliklerini iyileştirerek katı, çimentolaşmış bir ürün ortaya çıkarırlar. Bu reaksiyon sayesinde pH düzeyi yükselerek bazı ağır metal kirleticilerin çözünürlüğü azaltılmış, çökme ve hareketsiz hale gelme özellikleri artmış olur. Puzolan ve çimento bazlı bağlayıcı maddeler inorganik kirleticiler için uygundur. Organik kirleticiler için etkinlikleri düşüktür.

Radyoaktif Atık Katılaştırma: Bu süreçte radyoaktif atık maddeleri kapsül içerisine alacak düzgün ve kararlı bir matris oluşturmak için katılaştırma katkıları kullanılır. Sıvılar için pompalar, çamur ve katılar için iletim bantları, depolama siloları, tartılar, borulama ve karıştırıcılar kullanılır. Elde edilen atık depolanmaktadır.

Çamur Stabilizasyonu: Bu süreçte çamura kimyasal bir katkı, cüruf veya puzolan bir malzeme ilave edilerek tehlikeli bileşenlerin zehirliliği ve hareketliliği azaltılmaya çalışılır. Ağır metal sızdıran çamurlar bu yöntemle kararlı hale getirilir.

Çözünür Fosfatlar: Çözünür fosfat sürecinde, metallerin çözünürlüğünü azaltmak için pH'ı kontrol etmek ve düşük çözünürlükte karmaşık metal molekülleri oluşturmak için farklı fosfat formları ve alkali ilavesi yapılır. Diğer kararlı hale getirme süreçlerinden farklı bir şekilde, çözünür fosfatlar atığı sert, tekil (monolitik) bir kütleye çevirmez. Bu uygulamaya örnek olarak, uçucu kül içindeki kurşun ve kadmiyumu hareketsiz hale getirmek için çözünür fosfat ve kireç kullanımı verilebilir.

Vitrifikasyon / Erimiş Cam: Bu süreçte atık malzemeler 1200°C'ye kadar ısıtılarak cam veya cam benzeri maddelere dönüştürülmektedir. Yüksek sıcaklıklarda tüm organik bileşikler parçalanabilir ve süreç sonunda çok az yan ürün oluşur. Ağır metal ve radyonüklit gibi maddeler, cam yapısına dahil olurlar. Bu yapı oldukça güçlü, dayanıklı ve sızmaya dirençlidir. Atık malzemeler katıların yanında sıvılar, çamurlar ve yanabilir malzemeler olabilir. Borosilikat ve kireç-soda karışımı temel cam yapıcılardır ve camsı (vitrikiye) ürünün temel matrisini oluştururlar.

Sürecin etkinliğini sınırlayan faktörler aşağıdaki gibidir:

- Çevresel koşullar kirleticilerin uzun-dönemdeki hareketsizliğini değiştirebilir.
- Bazı süreçlerin sonucunda önemli derecede bir hacim artışı (bazen orijinal hacmin iki katı kadar) gerçekleşir.
- Belirli atıklar belirli süreçler için uygun değildir. Bu nedenle uygulama öncesinde arıtma denemeleri yapmak gereklidir.
- Organiklerin hareketi genellikle sınırlanamamaktadır.
- Birçok kirletici ve süreç kombinasyonu için uzun dönemli etkinlik henüz ispatlanmış değildir.

7.3.6. Kirlenme Alanının Dışında Uygulanan Isıl Yöntemler

Isıl yöntemler en hızlı ancak en yüksek maliyetli yöntemler içinde yer alırlar. Maliyeti oluşturan kalemler, enerji ve ekipman giderleridir. Hem ilk yatırım hem de işletme maliyetleri açısından yüksek maliyetli uygulamalardır. Yakma teknolojisi Bölüm 4'te detaylı bir şekilde anlatılmaktadır.

Isıl süreçlerde ısı kullanılarak kirleticiler buharlaştırılabilir (ayırma işlemi), ayrıştırılabilir, parçalanabilir veya eritilebilir. Isıl ayırma teknikleri içinde termal desorpsiyon ve sıcak gaz uygulaması bulunmaktadır. Isıl parçalama teknikleri içinde yakma ve piroliz teknikleri bulunmaktadır.

Ayırma tekniklerinin çıkan buharı arıtma ekipmanı ile donatılmış olması gerekmektedir. Parçalama tekniklerinde katı (kül) ve bazen sıvı (hava kirliliği kontrolünden kaynaklanan) kalıntılar ortaya çıkmaktadır. Bu atıkların ayrıca arıtılması ve/veya bertarafı gerekmektedir.

Sıcak gazla kirlilik giderme yönteminde, kirlenmiş malzemenin sıcaklığı belli bir süre boyunca artırılarak (260°C'ye getirilerek) buharlaşması sağlanmakta, süreçte oluşan gaz bir ikinci yakıcı sistemden geçirilerek buhar fazdaki tüm kirlenmeler yakılmaktadır.

Tam yanma (insinerasyon) yönteminde tehlikeli atıklar içindeki organik bileşenler yüksek sıcaklıklarda (870-1200 °C) oksijen varlığında yakılmaktadırlar. Baca gazlarının ve kalıntılarının arıtımı ve bertarafı gerekmektedir.

Akışkan yataklı yanma sisteminde sisteme hava verilerek katılar askıda tutulmakta ve zehirli hidrokarbonları parçalayabilecek türbülanslı bir yanma bölgesi oluşturulmaktadır.

Kızılötesi yakma teknolojisinde, organik atıkları yanma sıcaklıklarına getirmek için elektrikle güçlendirilmiş silikon karbür çubuklar kullanılmaktadır. Atık, yanma odasına beslendikten sonra 1000°C'ye kadar kızılötesi ışın yoluyla ısıtılmaktadır. İkinci yanma odası kalan kalıntıları yakmak için kullanılmaktadır.

Oksijenin eksik tutulduğu yanma süreçlerine piroliz adı verilmektedir. Bu süreçte organik maddeler gaz bileşenlere ve karbon ve külden oluşan sıvı ve katı bileşiklere dönüştürülmektedir.

Termal desorpsiyon yöntemiyle atıkların içindeki uçucu maddeler ve organik kirlenmeler uçucu hale getirilir. Taşıyıcı bir gaz veya vakum sistemi buhar faza geçmiş suyu ve kirlenmiş maddeyi gaz arıtma sistemine iletir. Bu sistemlerdeki yatak sıcaklıkları, seçili kirlenmeleri buharlaştırır ancak okside etmez. Yüksek sıcaklığın uygulanması durumunda sıcaklık, 320-560°C aralığında değişmektedir. Bu yöntem tam yanma, K/K gibi diğer yöntemlerle birlikte uygulanmaktadır. Petrol hidrokarbonları için 90-320°C aralığında değişen sıcaklıklar uygulanmaktadır. Çok yüksek sıcaklıklar uygulanmadıkça kirliliği giderilmiş toprakların fiziksel özellikleri değişmez.

Yakma teknolojisiyle, tehlikeli atıklarla, patlayıcı maddelerle, klorlu hidrokarbonlarla kirlenmiş topraklar iyileştirilebilir (USEPA, 2002).

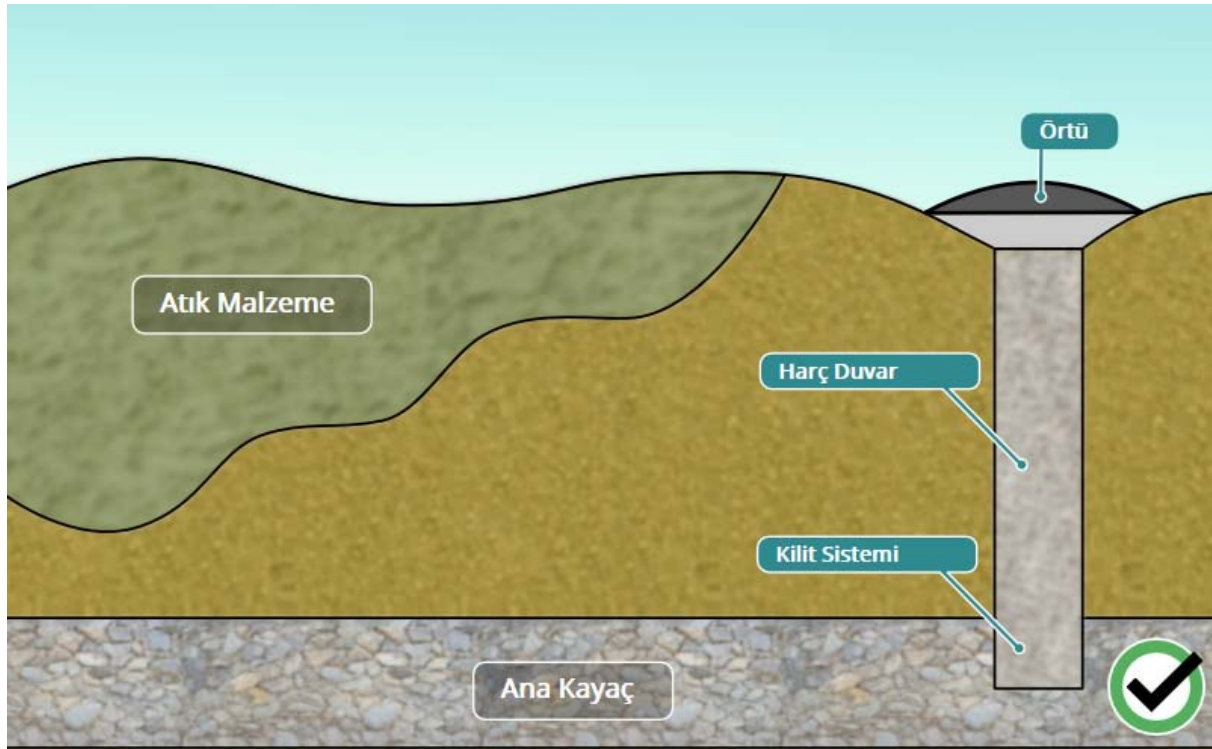
7.4. Kirliliği Sınırlama Teknolojileri

Kirliliği sınırlama teknolojilerinin genel amacı, kirlenmelerin toprakta veya yeraltı suyunda hareket etmesinin önüne geçmektir. Kirlenmiş maddeler gömüldüyse veya alanda bırakıldıysa, kirlenmelerin hareketinin sınırlandırılması gerekmektedir. Alandaki yüzeyaltı kirlenme, potansiyel tehlikeler, gerçekçi olmayan maliyetler ve yeterli arıtma teknolojisinin bulunmaması gibi nedenlerle kazı yapmaya ve atıkların alınmasına imkan vermiyorsa, kirliliğin sınırlandırılmasına başvurulmaktadır.

Kirlilik sınırlama teknolojileri hızlı sürede montaj edilebilmekte ve orta düzeyde bir maliyet sunmaktadır. Bu teknolojilerin uygulanmasında toprakların kazılması gerekmez. Ancak bu teknolojilerin uygulanması durumunda düzenli denetim ve kontrol ihtiyacı doğar. Yeraltısuyu gözlem kuyuları bulunmalı, yeraltısuyunun kirlenip kirlenmediği sürekli kontrol edilmelidir. Kirlilik sınırlama teknolojileri arasında depolama alanı üst örtü sistemi, yeraltı bariyerleri ve harç duvarlar ve derin kuyu enjeksiyonu sayılabilir.

Depolama alanlarının üst örtü sistemleri alana özgü tasarlanmaktadır. Tek tabakalı bitkilendirilmiş topraktan oluşan bir örtü sisteminden, karmaşık çok tabakalı toprak ve geosentetik sistemlere kadar farklı uygulamalar görülebilir. Depolama alanlarında kullanılan üst örtü sistemleri BÖLÜM 6'da detaylı bir şekilde anlatılmaktadır.

Yeraltı bariyerleri bir başka kirliliği sınırlama yöntemi olarak uygulanır. Bentonit ve su harcıyla doldurulmuş dikey kazılmış hendekler yeraltı bariyeri olarak kullanılabilir. Hendekler, çökmeleri önlemek ve yeraltısuyu akışını geciktirmek, akışın yönünü değiştirmek için bentonit ve su harcı karışımıyla doldurulur (USEPA, 2002). Bu duvarlar 30 m derinliğe kadar inşa edilebilir, kalınlıkları 0.6-1,2 m aralığında değişebilir. Şekil 24'te tipik bir harç duvar sistemi görülmektedir.



Şekil 24. Tipik bir harç duvar sistemi (USEPA, 2002).

Harç duvarların uygulanabilirliğini sınırlayan faktörler aşağıdaki gibidir:

- Ağır inşaat işçiliği gerektirir.

- Bu yöntemle sadece kirlenme alanındaki kirleticilerin hareketi sınırlanabilir.
- Toprak-bentonit dolgular güçlü asit ve bazlara, tuz çözeltilere ve bazı organik kimyasal maddelere karşı bütünlüğünü koruyamamaktadır. Belirli kimyasal maddelere direnç göstermek için farklı kombinasyonlarla harçlar hazırlanabilir.
- Harç duvarların zaman içinde tahrip olma potansiyeli bulunmaktadır.
- Bu teknolojinin kullanılması gelecekte başka bir iyileştirme yöntemine ihtiyaç duyulmayacağını garanti etmemektedir.

Toprak-bentonit duvarlar inşa edilmeden önce değerlendirilmesi gereken faktörler: maksimum izin verilebilir geçirimsizlik, beklenen hidrolik gradyan, gereken duvar dayanımı, kullanılacak bentonitin mevcudiyeti, kirlenmenin sınırları, atıkların ve kirleticilerin duvar malzemesiyle uyumu, duvarın sıkıştırılıp kilitleneceği ana kayacın özellikleri (örn. derinlik, geçirimsizlik ve süreklilik), dolgu malzemesinin özellikleri, arazi ve fiziksel yerleşim.

Derin kuyu enjeksiyonu ise bir sıvı atık bertaraf teknolojisidir. Bu yöntemle arıtılmış veya arıtılmamış sıvı atık, jeolojik oluşumlar içine enjekte edilmektedir. Bunun için enjeksiyon kuyuları kullanılmaktadır. Bu jeolojik oluşumların kirleticilerin su kaynaklarına ulaşmasına izin vermeyecek yapılar olmasına dikkat edilmelidir. Tipik bir enjeksiyon kuyusu binlerce metre derinlikteki geçirimsiz tabakaya kadar uzanacak eş-merkezli borular içermektedir. Derin kuyu enjeksiyonundaki hedef kirleticiler, uçucu organik bileşikler, yarı uçucu organik bileşikler, yakıtlar, patlayıcılar ve pestisitlerdir. Enjeksiyon yöntemi, sismik aktivitenin olabileceği alanlarda yapılmamalıdır. Enjekte edilen atıklar kuyu sisteminin mekanik bileşenleriyle uyumlu olmalıdır.

7.5. Kirlenmiş Yeraltılarının Arıtımı

Tehlikeli atıklarla yapılan iyileştirmelerde, kirlenmiş yeraltısının arıtımı da söz konusu olabilir. Yeraltılarının yerinde ve alan dışında arıtmaları mümkündür. Yeraltılarına uygulanan arıtma yöntemleri, toprak arıtımında olduğu gibi biyolojik veya fiziksel/ kimyasal yöntemler olarak gruplandırılabilir.

Yerinde uygulanabilecek biyolojik yöntemler arasında oksijenlendirme (hava veya hidrojenperoksit ilavesiyle) ve fito-iyileştirme yöntemleri bulunmaktadır. Fiziksel-kimyasal yöntemlere örnek olarak havayla sıyırma, çift fazlı özütleme, ısı uygulaması verilebilir.

Alan dışında uygulanabilecek biyolojik yöntemler, biyoreaktörler ve inşa edilmiş sulak alanlar olarak sınıflandırılabilir. Kirlenmiş yeraltılarına alan dışında uygulanabilecek fiziksel ve kimyasal arıtma yöntemleri arasında yüzeye tutunma/içine alma (adsorpsiyon/absorpsiyon), ileri oksidasyon süreçleri, havayla sıyırma, granül aktif karbon/sıvı faz aktif karbon yüzeyine alma, iyon değişimi, çökeltme/koagülasyon/flokülasyon, ayırma vb. yöntemler yer almaktadır. Kirlenmiş yeraltı sularında uygulanabilecek kirlilik sınırlandırma teknolojilerine örnek olarak fiziksel/biyolojik bariyerler ve derin kuyu enjeksiyonu verilebilir.

7.6. Tehlikeli Atıklarla Kirlenmiş Alanlarda Gaz Emisyonlarının Artırımı

Gaz atıklar içindeki uçucu organik bileşiklerin giderimi için çok sayıda teknoloji bulunmasına rağmen, bu teknolojilerin kirlenmiş alanlarda oluşan emisyonlar için uygulanması sınırlı düzeyde olmaktadır. Biyo-filtrasyon, katalitik ve termal oksidasyon teknikleri bu tür kirleticilerin gideriminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Karbon yüzeyine tutunma (adsorpsiyonu) tekniği, uçucu organik bileşikleri parçalamayan ancak kontrollü bir hacim içinde tutabilen bir teknolojidir. Bu durumda oluşan atık karbonun bertaraf ihtiyacı doğacağı unutulmamalıdır.

Gaz emisyonlarının arıtma verimini ve maliyetini etkileyen faktörler aşağıdaki gibidir:

- Uçucu organik bileşik (UOB) konsantrasyonu,
- Halojenli UOB'lerin bulunma durumu,
- Katalizör için zehirli maddenin bulunma durumu,
- Partikül yükü,
- Nem içeriği,
- Gaz debisi ve ortam sıcaklığı.

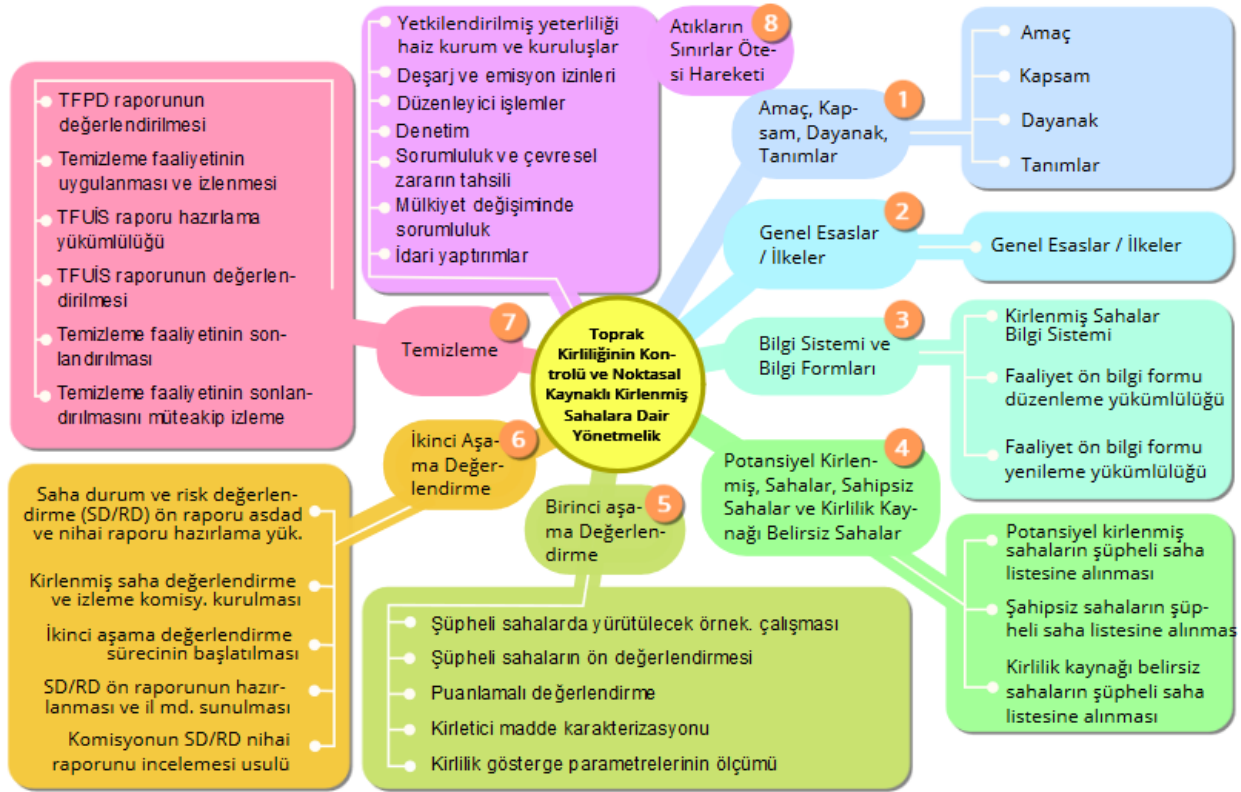
Kirlenmiş alanlarda uygulanabilecek teknolojiler arasında biyo-filtrasyon, yüksek enerjiyle parçalama, membran ayırma, termal olmayan plazma, oksidasyon, sıyırıcılar ve karbon yüzeyine tutunma (adsorpsiyon) süreçlerini saymak mümkündür.

7.7. Kirlenmiş Alanlarla İlgili Ulusal Yasal Mevzuat

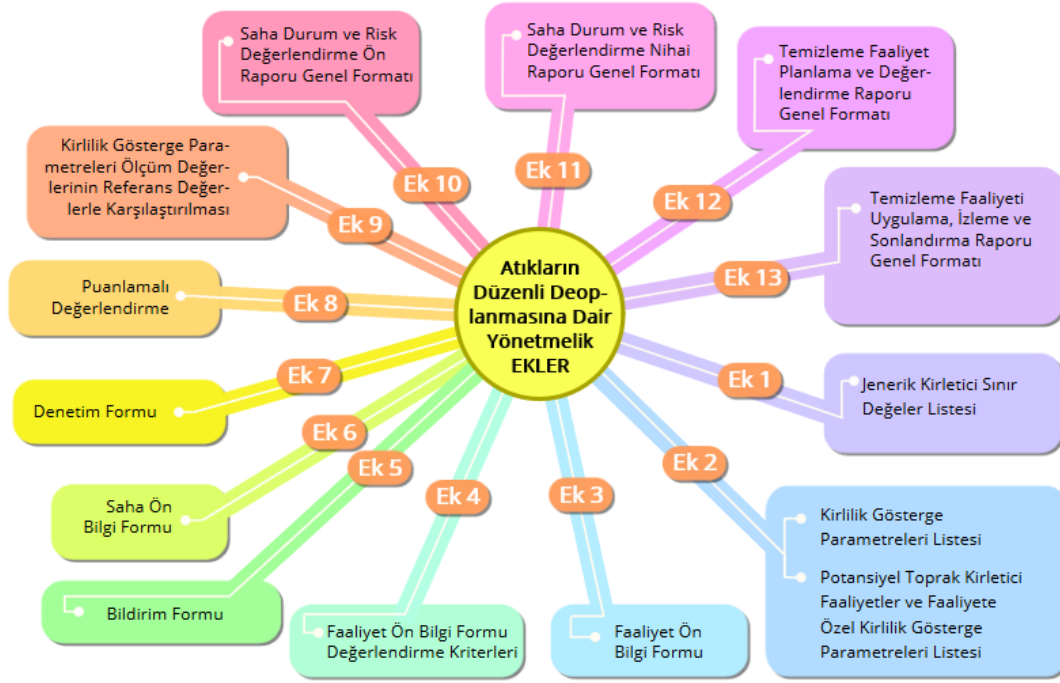
Türkiye'de kirlenmiş alanlarla ilgili temel yasal düzenleme, 08.06.2010 tarih ve 27605 sayılı Resmi Gazete'de yayınlanan "Toprak Kirliliğinin Kontrolü Ve Noktasal Kaynaklı Kirlenmiş Sahalara Dair Yönetmelik" tir (ToprakY, 2010). Bu yönetmeliğe dayanarak çıkarılan Yeterlik Tebliği 17 Haziran 2011 tarih ve 27967 sayılı Resmi Gazete'de yayınlanmıştır (Top.Yeterlik, 2011). Toprak Kirliliğinin Kontrolü Ve Noktasal Kaynaklı Kirlenmiş Sahalara Dair Yönetmelik'in amacı ve kapsamı Tablo 2'de, yönetmelik bölümleri için zihin haritası Şekil 25'te ve yönetmelik ekleri için zihin haritası Şekil 26'da verilmektedir.

Tablo 2. Toprak Kirliliğinin Kontrolü Ve Noktasal Kaynaklı Kirlenmiş Sahalara Dair Yönetmelik Amaç ve Kapsamı

Adı	TOPRAK KİRLİLİĞİNİN KONTROLÜ VE NOKTASAL KAYNAKLI KİRLENMİŞ SAHALARA DAİR YÖNETMELİK
Resmi Gazete Tarih/ Sayı	08.06.2010/27605
Amaç	Bu Yönetmeliğin amacı; alıcı ortam olarak toprağın kirlenmesinin önlenmesi, kirlenmenin mevcut olduğu veya olması muhtemel sahaları ve sektörleri tespit etmek, kirlenmiş toprakların ve sahaların temizlenmesi ve izlenmesi esaslarını sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle uyumlu bir şekilde belirlemektir (ToprakY, 2010).
Kapsam	Bu Yönetmelik, toprak kirliliğinin önlenmesi, kirlenmenin mevcut olduğu veya olması muhtemel sahaların ve sektörlerin tespiti, kayıt altına alınması, kirlenmiş toprakların ve sahaların temizlenmesi ve izlenmesine ilişkin teknik ve idari usul ve esasları kapsar (ToprakY, 2010).



Şekil 25. Toprak Kirliliğinin Kontrolü ve Noktasal Kaynaklı Kirlenmiş Sahalara Dair Yönetmelik Bölümleri İçin Zihin Haritası



Şekil 26. Toprak Kirliliğinin Kontrolü ve Noktasal Kaynaklı Kirilenmiş Sahalara Dair Yönetmelik Ekleri İçin Zihin Haritası

Özet ve Değerlendirme



Tehlikeli atıklarla kirlenmiş alanları iyileştirme çalışmalarının amacı, alandaki kirlenmeyi sınırlandırmak, çevrenin daha fazla bozulmasının önüne geçmek, insan ve diğer canlıların tehlikeli maddelere maruz kalmalarını engellemektir. Alanda uygulanacak iyileştirme teknolojisinin seçimi için, a) iyileştirme hedeflerine kısa ve uzun dönemde ulaşma etkinliği, b) Kirletici hacmini azaltma etkinliği, c) Kirleticinin zehirliliğini azaltma etkinliği, d) Maliyet etkinliği gibi kriterler dikkate alınmaktadır.

Alan iyileştirme çalışmalarında uygulanan teknolojiler, biyolojik, fiziksel / kimyasal ve ısı teknolojiler olarak gruplandırılmaktadır. Bu teknolojiler yerinde veya kirlenmiş alanın dışında uygulanabilir.

Kirleticilerin çevresel ortamdan çıkarılması veya ayrılması için yaygın olarak ısı ayırma (termal desorpsiyon), toprak yıkama, çözücüyle çıkarma (solvent ekstraksiyonu), toprak buharını çıkarma (toprak buhar ekstraksiyonu) teknolojileri uygulanmaktadır. Kirlenmiş yeraltıları için ise faz ayırımı, karbon

adsorpsiyonu, havayla sıyırma, iyon değişimi gibi yöntemler ayrı ayrı veya kombinasyon halinde uygulanabilir.

Kirleticileri hareketsiz hale getiren teknolojiler arasında kararlı hale getirme, katılaştırma ve kirlilik sınırlama yöntemleri bulunmaktadır. Kirleticileri hareketsiz hale getiren teknolojilerin hiçbirisi kalıcı olarak etkili değildir. Bu nedenle zaman zaman bakım faaliyetlerinin de yürütülmesi gerekmektedir. Kararlı hale getirme teknolojileri genellikle metallerle ve diğer inorganik kirleticilerle kirlenmiş alanların iyileştirilmesinde tercih edilmektedir.

Genelde kirlenmiş bir alanı iyileştirmek için tek bir teknoloji yeterli olmaz; farklı teknolojiler bir kombinasyon halinde uygulanır. Örneğin toprak buharını çıkarma teknolojisi, yeraltısuyunun pompalanması ve hava sıyırma yöntemleriyle birleştirilerek, kirleticiler hem yeraltısuyundan hem de topraktan aynı anda uzaklaştırmaya çalışılır. Buhar çıkarma sisteminden ve hava sıyırıcıdan çıkan emisyonlar, tek bir gaz arıtma ünitesinde işlem görebilir.

Türkiye'de kirlenmiş alanlarla ilgili temel yasal düzenleme, 2010 yılında yayınlanan "Toprak Kirliliğinin Kontrolü Ve Noktasal Kaynaklı Kirlenmiş Sahalara Dair Yönetmelik" tir (ToprakY, 2010). İyileştirme uygulamaları bu yönetmelik doğrultusunda gerçeleştirilmektedir.

Kaynaklar

Baker, R.S., Heron, G., 2004. In-situ delivery of heat by thermal conduction and steam injection for improved DNAPL remediation. Proceedings of the 4th International Conf. on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds, Monterey, CA, May 24-27, 2004. Battelle, Columbus, OH. <http://www.terratherm.com/resources/TechPapers/Terratherm%20Delivery%20of%20Heat%20Paper%20-%20Monterey.pdf>.

Beyke, G., Fleming, D., 2002. Enhanced removal of separate phase viscous fuel by electrical resistance heating and multi-phase extraction. 9th Annual International Petroleum Environmental Conference, October 22-25, 2002, Albuquerque, NM.

Gavrilescu, M., Pavel, L.V., Cretescu, I., 2009. Characterization and remediation of soils contaminated with uranium. J Hazard Mater 163, 475-510.

GWRTAC, 1996. Phytoremediation. Groundwater Remediation Technologies Analysis Center. Publication # GWRTAC-TO-96-03. 425 Sixth Avenue, Regional Enterprise Tower, Pittsburgh, PA.

Hejazi, R.F., Husain, T., Khan, F.I., 2003. Landfarming operation of oily sludge in and region - human health risk assessment. J Hazard Mater 99, 287-302.

Hyman, M., Dupont, R.R., 2001. Groundwater and Soil Remediation. Process Design and Cost Estimating of Proven Technologies, ASCE Press.

Khan, F.I., Husain, T., Hejazi, R., 2004. An overview and analysis of site remediation technologies. Journal of Environmental Management 71, 95-122.

Meuser, H., 2013. Soil Remediation and Rehabilitation: Treatment of Contaminated and Disturbed Land, Environmental Pollution 23, DOI 10.1007/978-94-007-5751-6_1, Springer Science+Business Media, Dordrecht.

Pavel, L.V., Gavrilescu, M., 2008. Overview of Ex Situ Decontamination Techniques for Soil Cleanup. Environ Eng Manag J 7, 815-834.

Reddy, K.R., Admas, J.F., Richardson, C., 1999. Potential technologies for remediation of Brownfield. Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management 3, 61-68.

Riser-Roberts, E., 1998 Remediation of Petroleum Contaminated Soil: Biological, Physical, and Chemical Processes, Lewis Publishers, Boca Raton, FL.

Sarwar, N., Imran, M., Shaheen, M.R., Ishaque, W., Kamran, M.A., Matloob, A., Rehman, A., Hussain, S., 2017. Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: Modifications and future perspectives. Chemosphere 171, 710-721.

Top.Yeterlik, 2011. Toprak Kirliliğinin Kontrolü Ve Noktasal Kaynaklı Kirlenmiş Sahalara Dair Yönetmelik Yeterlilik Belgesi Tebliği. 17 Haziran 2011 tarih ve 27967 sayılı Resmi Gazete.

ToprakY, 2010. Toprak Kirliliğinin Kontrolü ve Noktasal Kaynaklı Kirlenmiş Sahalara Dair Yönetmelik, 8/6/2010 tarihli ve 27605 sayılı Resmî Gazete.

USEPA, 2002. Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, Version 4, Federal Remediation Technology Roundtable (FRTR). https://frtr.gov/matrix2/section3/sec3_int.html Erişim Tarihi: 18.04.2018.

USEPA, 2006. In Situ Treatment Technologies for Contaminated Soil United States Environmental Protection Agency, Engineering Forum Issue Paper EPA 542/F-06/013.

Wu, F.B., Chen, F., Wei, K., Zhang, G.P., 2004. Effect of cadmium on free amino acid, glutathione and ascorbic acid concentrations in two barley genotypes (*Hordeum vulgare* L.) differing in cadmium tolerance. *Chemosphere* 57, 447-454.

Konu Sonu Soruları ve Çözüm Setleri

1. Tehlikeli atıklarla kirlenmiş alanlara uygulanacak iyileştirme teknolojisinin seçiminde hangi faktörler göz önünde bulundurulmalıdır?

Yanıt

Alanda uygulanacak iyileştirme teknolojisinin seçimi için aşağıdaki kriterler dikkate alınmaktadır:

- İyileştirme hedeflerine kısa ve uzun dönemde ulaşma etkinliği
- Kirletici hacmini azaltma etkinliği
- Kirleticinin zehirliliğini azaltma etkinliği
- Maliyet etkinliği

2. Tehlikeli atıklarla kirlenmiş alanlara uygulanacak iyileştirme teknolojilerini genel olarak gruplandırınız.

Yanıt

Kirlenmiş alanlardaki kirleticilerin parçalanmasını veya kimyasal yapılarının değiştirilmesini sağlayan teknolojiler, biyolojik, fiziksel & kimyasal ve ısı teknolojileri olarak gruplandırılabilir. Bu teknolojiler yerinde veya kirlenmiş alanın dışında uygulanabilir.

3. Yerinde yapılan alan temizleme işlemlerinin avantajı nedir?

Yanıt

Yerinde yapılan temizleme işleminin başlıca avantajı, toprağın kazılma ve taşınma ihtiyacını ortadan kaldırmasıdır. Bu da ekonomik bir avantaj sunmaktadır.

4. Biyo-iyileştirme tekniklerinin uygulanma esasını açıklayınız.

Yanıt

Biyo-iyileştirme teknikleri, mikroorganizmalar için uygun ortamlar oluşturularak, büyümelerinin ve kirleticileri gıda ve enerji kaynağı olarak kullanmalarının tetiklendiği parçalama teknikleridir. Bu, mikroorganizmalar için gereken oksijen, besin maddesi ve nem ortamının oluşturulması, sıcaklık ve pH şartlarının kontrol edilmesi anlamına gelmektedir. Bazen özel kirleticileri parçalamak üzere adapte edilmiş mikroorganizmaların alana uygulanması yoluyla süreç hızlandırılmaktadır. Mikroorganizmaların kirleticileri parçalama dereceleri, kirleticilerin konsantrasyonlarına, oksijen teminine, nem, sıcaklık, pH ve besin maddesi düzeylerine bağlıdır.

5. Tehlikeli atıklarla kirlenmiş alanlara yerinde uygulanabilecek fiziksel ve kimyasal iyileştirme teknolojilerine örnek veriniz.

Yanıt

Yerinde uygulanabilecek fiziksel/kimyasal iyileştirme teknolojileri arasında elektrokinetik ayırma, toprak kirleticisini boşaltma, topraktan buhar çekme, katılaştırma/kararlı hale getirme sayılabilir.

6. Tehlikeli atıklarla kirlenmiş alanlara uygulanabilecek ısı yöntemlerinin avantajı ve dezavantajı nedir?

Yanıt

Isıl yöntemler, diğer yöntemlere oranla daha hızlı iyileşme süreleri sunarlar, ancak iyileştirme alternatifleri içinde en yüksek maliyetli yöntemlerdir. İlk yatırım ve işletme esnasındaki enerji ve ekipman maliyetleri maliyet yüksekliğinin ana sebepleridir. Süreç sonunda oluşan gaz emisyonlarının arıtılması gerekmektedir. Isıl yöntemlerde oluşan katı (kül) ve bazen sıvı (hava kirliliği kontrolünden kaynaklanan) kalıntıların ayrıca bertarafı gerekmektedir.

7. Tehlikeli atıklarla kirlenmiş alanlara yerinde uygulanabilecek ısı iyileştirme teknolojilerine örnek veriniz.

Yanıt

Isıl yöntemler 4 grupta sınıflandırılabilir: Elektrik direnciyle ısıtma, topraktan ısıtılmış buhar çekme sistemi, iletme yoluyla (kondüktif) ısıtma, radyo frekansı ile ısıtma. Bu iyileştirme sistemlerinin ayrılmaz bir parçası, oluşan buharın çekilmesi ve hareketlenmiş kirleticilerin arıtılmasıdır.

8. Tehlikeli atıklarla kirlenmiş alanlar için, alan dışında uygulanabilecek biyolojik iyileştirme teknolojilerine örnek veriniz.

Yanıt

Kirlenme alanının dışında uygulanan biyolojik iyileştirme teknikleri arasında biyo-yiğınlar, kompostlama, toprak çiftçiliği ve çamur fazda biyolojik arıtma sayılabilir.

9. Tehlikeli atıklarla kirlenmiş alanlar için, alan dışında uygulanabilecek fiziksel ve kimyasal iyileştirme teknolojilerine örnek veriniz.

Yanıt

Alan dışında uygulanabilecek fiziksel / kimyasal yöntemler arasında kimyasal maddeyle özütleme, kimyasal yükseltgeme/indirgeme, halojen giderme, ayırma, toprak yıkama ve katılaştırma / kararlı hale getirme teknolojileri bulunmaktadır.

10. Tehlikeli atıklarla kirlenmiş alanlarda kirlilik hangi yöntemlerle sınırlandırılabilir?

Yanıt

Kirlilik sınırlama teknolojileri arasında depolama alanı üst örtü sistemi, yeraltı bariyerleri ve harç duvarlar ve derin kuyu enjeksiyonu sayılabilir.

11. Tehlikeli atıklarla kirlenmiş alanlarda, kirlenmiş yeraltıları için, alan dışında uygulanabilecek biyolojik, fiziksel ve kimyasal ve ısı yöntemleri neler olabilir?

Yanıt

Kirlenmiş yeraltılarına alan dışında uygulanabilecek biyolojik yöntemler, biyoreaktörler ve inşa edilmiş sulak alanlar olarak sınıflandırılabilir. Fiziksel ve kimyasal arıtma yöntemleri arasında yüzeye tutunma/içine alma (adsorpsiyon/absorpsiyon), ileri oksidasyon süreçleri, havayla sıyırma, granül aktif karbon/sıvı faz aktif karbon yüzeyine alma, iyon değişimi, çökelme/koagülasyon/flokülasyon, ayırma vb. yöntemler yer almaktadır. Kirlenmiş yeraltı suları için uygulanabilecek kirlilik sınırlandırma teknolojilerine örnek olarak fiziksel/biyolojik bariyerler ve derin kuyu enjeksiyonu verilebilir.

12. Tehlikeli atıklarla kirlenmiş alanlarda gerçekleştirilen iyileştirme işlemleri sonucu çıkarılan gaz emisyonlarına hangi arıtma teknolojileri uygulanabilir? Örnek veriniz.

Yanıt

Biyo-filtrasyon, katalitik ve termal oksidasyon teknikleri uçucu organik kileticilerin gideriminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Karbon yüzeyine tutunma (adsorpsiyonu) tekniği, uçucu organik bileşikleri parçalamayan ancak kontrollü bir hacim içinde tutabilen bir teknolojidir.

13. Türkiye'de tehlikeli atıklarla kirlenmiş alanlarla ilgili yasal bir düzenleme var mıdır?

Yanıt

Türkiye'de kirlenmiş alanlarla ilgili temel yasal düzenleme, 08.06.2010 tarih ve 27605 sayılı Resmi Gazete'de yayınlanan "Toprak Kirliliğinin Kontrolü Ve Noktasal Kaynaklı Kirlenmiş Sahalara Dair Yönetmelik" tir.

Test

1. Aşağıdaki ifade hangi teknolojiyi tanımlamaktadır?

"Topraktaki mikroorganizmalara oksijen temin ederek, kirlenmiş alandaki aerobik olarak parçalanabilir bileşiklerin biyo-parçalanmalarını hızlandırmak"

- a) Toprakтан buhar çekme
- b) Biyo-havalandırma
- c) Biyo-yiğınlar
- d) Fito-iyileştirme

2. Aşağıdakilerden hangisi bitkilerin kullanıldığı bir iyileştirme teknolojisidir?

- a) Toprak çiftliği
- b) Biyo-iyileştirme
- c) Fito-iyileştirme
- d) Kompostlama

3. Aşağıdakilerden hangisi biyo-iyileştirmeyi geliştirmek için uygulanabilecek adımlardan biri değildir?

- a) Alana mikroorganizma aşılması yapmak
- b) Alana besin maddesi ilave etmek
- c) Alana çözücü (solvent) ilave etmek
- d) Kirlenmiş alanı ısı battaniyesi ile örtmek

4. Aşağıdaki ifade hangi teknolojiyi tanımlamaktadır?

" Ozon, hidrojen peroksit, hipokloritler, klor ve klordioksit gibi maddeler kullanarak, tehlikeli kirleticileri tehlikesiz veya daha kararlı, daha az hareketli ve/veya inert olan az zehirli bileşiklere dönüştürme teknolojisi"

- a) Toprakтан buhar çekme
- b) Kimyasal oksidasyon
- c) Toprak yıkama
- d) Elektrokinetik ayırma

5. Aşağıdakilerden hangisi elektrokinetik ayırma teknolojisi için doğru değildir?

- a) Bu yöntemde uygulanan doğru akım kirlenici türleri elektrikle yüklemektedir.
- b) Anotta asidik bir yüzey, katotta bazik bir yüzey oluşturulur.
- c) Klorür, siyanür, florür, nitrat gibi türler katoda doğru hareket etmektedirler.
- d) Bu yöntemde toprak içerisine yerleştirilmiş seramik elektrotlar bulunmaktadır.

6. Aşağıdakilerden hangisi yerinde gerçekleştirilen bir iyileştirme teknolojisi değildir?

- a) Biyolojik arıtma
- b) Toprak kirlenmesini boşaltma
- c) Katılaştırma/kararlı hale getirme
- d) Fito-iyileştirme

7. Toprağı eritmek için 1600-2000 °C düzeyinde sıcaklıkların uygulandığı iyileştirme teknolojisi aşağıdakilerden hangisidir?

- a) Elektrokinetik ayırma
- b) Topraktan buhar çekme
- c) Yükseltgeme / indirgeme
- d) Vitrifikasyon

8. Aşağıdakilerden hangisi kirlenmiş topraklara uygulanan biyolojik arıtma teknolojisi için doğru değildir?

- a) Bu yöntemde kirlenmiş toprak reaktör içinde askıda tutulmaktadır.
- b) pH kontrolü için reaktöre asit veya alkali maddeler ilave edilebilir.
- c) Bu teknik ağır metallerle kirlenmiş topraklarda etkili olmaktadır.
- d) Biyolojik arıtma yerinde uygulanan biyo-iyileştirme yöntemlerinden daha hızlı sürede sonuç vermektedir.

9. Aşağıdakilerden hangisi kirlenmiş topraklara uygulanan yükseltgeme/indirgeme teknolojisi için doğru değildir?

- a) Bu yöntemde hedef kirlenici türleri genelde inorganik maddelerdir.
- b) Yüksek kirlenici konsantrasyonlarında bile sınırlı oksitleyici maddeye ihtiyaç duyulduğundan maliyet-etkili bir teknolojidir.

- c) Bu süreçte gerçekleşen reaksiyonlar elektronların bir bileşikten diğer bileşiği transferini ve kimyasal bağların kırılmasını içermektedir.
- d) Süreçte kullanılan oksitleyici maddeler topraktaki organik maddeyle de reaksiyona girmektedirler.

10. Aşağıdakilerden hangisi kirlenmiş topraklarda uygulanan kirliliği sınırlama teknolojileri için doğru değildir?

- a) Bu teknolojilerin genel amacı kirleticilerin toprakta veya yeraltı suyunda hareket etmelerinin önüne geçmektir.
- b) Kirlilik sınırlama teknolojileri hızlı sürede montaj edilebilmekte ve orta düzeyde bir maliyet sunmaktadır.
- c) Kirlilik sınırlama teknolojileri arasında depolama alanı üst örtü sistemi, yeraltı bariyerleri ve harç duvarlar ve derin kuyu enjeksiyonu sayılabilir.
- d) Bu teknolojiler alandaki kirletici giderimi için nihai çözüm sunmaktadır.