T.C.
ÇEVRE VE ŞEHİRCİLİK
BAKANLIĞI

KİRLENMİŞ SAHA TEMİZLEME/İYİLEŞTİRME TEKNOLOJİLERİ KILAVUZU





UNDP
Güçlü bireyler.
Güçlü toplumlar.

gef

T.C.
ÇEVRE VE ŞEHİRCİLİK
BAKANLIĞI

KİRLENMİŞ SAHA TEMİZLEME/İYİLEŞTİRME TEKNOLOJİLERİ KILAVUZU

Hazırlayanlar:

Prof.Dr. İpek İMAMOĞLU, Çevre Mühendisliği Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Sinem ERDOĞDU, Serbest Uzman, Çevre Mühendisi
Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü
Su ve Toprak Dairesi Başkanlığı, Toprak Kirliliği Kontrolü Şube Müdürlüğü

Çeviriler : Kamil GENCEL (Jeoloji Müh.), Sevgi Deniz AKDEMİR
Görseller : Sinan Özhan KAYA

Yasal Uyarı
Birleşmiş Milletler Kalkınma Programı (UNDP), 2017

Bu doküman Küresel Çevre Fonu (GEF) finansal desteği ile "Kalıcı Organik Kirletici (KOK) Stoklarının Bertarafı ve KOK Salınımlarının Azaltılması" projesi kapsamında Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, UNDP ve Orta Doğu Teknik Üniversitesi işbirliği ile hazırlanmıştır. Bu dokümandaki içerikler UNDP'nin görüşlerini yansıtmamaktadır.

İçindekiler

KISALTMALAR iii

1. GİRİŞ 1

2. TEKNOLOJİLERİN SINIFLANDIRILMASI 3

2.1. Kirlenmiş Ortama Göre Uygulanabilecek Teknolojiler 5

2.1.1. Toprak Kirliliğinin Temizlenmesi ve Uygun Teknolojiler 5

2.1.2. Yeraltı Suyu Kirliliğinin Temizlenmesi ve Uygun Teknolojiler 8

2.2. Kirletici Maddelere Göre Uygulanabilecek Teknolojiler 10

2.2.1. Halojensiz Uçucu Organik Bileşikler (VOC) 13

2.2.2. Halojensiz Yarı Uçucu Organik Bileşikler (SVOC) 14

2.2.3. Halojenli Uçucu Organik Bileşikler (HVOC) 15

2.2.4. Halojenli Yarı Uçucu Organik Bileşikler (HSVOC) 16

2.2.5. Yakıt Bazlı Kirleticiler 17

2.2.6. İnorganik Kirleticiler 18

2.2.7. Patlayıcılar 19

2.3. Temizleme Teknolojileri Matrisi 19

3. TEKNOLOJİ DEĞERLENDİRME KRİTERLERİ 20

3.1. Uygulanabilirliğin Değerlendirilmesi 20

3.1.1. Genel Uygulanabilirlik 20

3.1.2. Sahaya Özel Uygulanabilirlik 21

3.2. Performansın Değerlendirilmesi 22

3.2.1. Genel Değerlendirme 22

3.2.2. Zaman-Maliyet Değerlendirmesi 23

3.3. Arıtılabilirlik çalışmaları 24

4. TEKNOLOJİLERİN DETAYLI AÇIKLAMASI 25

4.1. Biyolojik Prosesler 26

4.1.1. Kompostlama 26

4.1.2. Toprak Biyoyığınları 28

4.1.3. Arazide Islah 30

4.1.4. Siluri Faz Biyoreaktör 32

4.1.5. Biyoventilasyon 35

4.1.6. Fitoremediasyon 38

4.1.7. Geliştirilmiş Biyoremediasyon 40
4.1.8. İzlemeli Doğal Giderim 44
4.1.9. Biyoreaktör 47
4.1.10. Yapay Sulak Alan 49
4.2. Fiziksel/Kimyasal Prosesler 51
4.2.1. Yeraltı Suyu Pompalama 51
4.2.2. Yağmurlama Sulama 55
4.2.3. Ayırma 56
4.2.4. Kimyasal Ekstraksiyon 58
4.2.5. Halojensizleştirme 60
4.2.6. Kimyasal İndirgenme/Yükseltgenme 63
4.2.7. İleri Oksidasyon Prosesleri 65
4.2.8. İyon Değişimi 67
4.2.9. Yumaklaştırma/Topaklaştırma/Çöktürme 69
4.2.10. Absorpsiyon/Adsorpsiyon 71
4.2.11. Granül Aktif Karbon Adsorpsiyonu 73
4.2.12. Toprak Yıkama 75
4.2.13. Solidifikasyon/Stabilizasyon 78
4.2.14. Toprak Gazı Ekstraksiyonu 83
4.2.15. Hava Kabarcıklı Arıtım 86
4.2.16. Sıvı-Gaz Emişli Arıtım 88
4.2.17. Çift Faz Ekstraksiyonu 90
4.2.18. Havalı Sıyırma 92
4.2.19. Kuyu içi Havalı Sıyırma 94
4.2.20. Kimyasal Oksidasyon 96
4.2.21. Elektrokinetik Ayırma 99
4.2.22. Isıl Arıtım 101
4.2.23. Pasif/Reaktif Arıtma Bariyerleri 103
4.2.24. Fiziksel Bariyerler 106
4.2.25. Yönlü Kuyular 108
4.2.26. Hafriyat ve Saha Dışına Taşıma 109
4.2.27. Yüzey Kapatma 110
4.2.28. Çatlaklama 113
4.3. Termal Prosesler 115
4.3.1. Yakma 115

4.3.2. Isıl Arıtım 118
4.3.3. Isıl Desorpsiyon 121
4.3.4. Piroliz 125
4.3.5. Açık Yakma/Açık Patlatma 127
4.4. Proses Kaynaklı Çıkış Gazlarının Arıtılması 128
4.5. Örnek Temizleme Süreçleri 130
4.5.1. Toprakta Uygulanabilir Örnek Temizleme Süreçleri 130
4.5.2. Yeraltı Suyunda Uygulanabilir Örnek Temizleme Süreçleri 134
5. İZLEME 137
5.1. Temizleme Öncesi İzleme 140
5.2. Temizleme Esnasında İzleme 140
5.3. Temizleme Sonrası İzleme 147
5.4. İzleme Aktivitelerinin Bileşenleri ve Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar 150
EKLER 156
EK-1 TEKNOLOJİ İSİMLERİ SÖZLÜĞÜ 156
EK-2 JENERİK KİRLETİCİLERİN KİRLETİCİ GRUPLARINA GÖRE SINIFLANDIRILMASI* 158
EK-3 TEMİZLEME TEKNOLOJİLERİ MATRİSİ* 162
KAYNAKLAR 164
TABLOLARIN KAYNAKLARI 167
GÖRSELLERİN KAYNAKLARI 168

Tablolar Listesi

Tablo 2.1 Teknoloji Gruplarının Uygulanmasında Avantajlar ve Kısıtlamalar 4

Tablo 2.2 Toprak Kirliliğinin Temizlenmesinde Etkili Parametreler 5

Tablo 2.3 Yeraltı Suyu Kirliliğinin Temizlenmesinde Etkili Temel Parametreler 8

Tablo 2.4 Halojenli/Halojensiz VOC ve SVOClerin Fazlara Göre Dağılımı 12

Tablo 3.1 Toprak Tiplerinin Sınıflandırması 21

Tablo 3.2 Kirlilik Derinliği Sınıflandırması 21

Tablo 3.3 Temizleme Süresi Sınıflandırması 23

Tablo 4.1 Alternatif Sorbent Maddeler ve Soğurdukları Bileşikler 72

Tablo 4.2 Farklı Yıkama Sıvılarının Etkilediği Kirleticiler 76

Tablo 4.3 PRB ile Kirletici Giderim Mekanizmaları 103

Tablo 4.4 Kirlenmiş Topraklarda Yaygınlıkla Kullanılan İyileştirme Teknolojileri 131

Tablo 4.5 Kirlenmiş Yeraltı Suyunda Yaygın Olarak Kullanılan İyileştirme Teknolojileri 135

Tablo 5.1 İzleme Faaliyetlerinin Amacı 137

Tablo 5.2 Yerinde Yeraltı Suyu Biyoremediasyonu Örnek İzleme Planı 141

Tablo 5.3 Biyoventilasyon Sistemi İzleme Önerileri 142

Tablo 5.4 Çift Faz Ekstraksiyonu Örnek İzleme Planı 142

Tablo 5.5 Toprak Buhar Ektraksiyonu İzleme Önerileri 143

Tablo 5.6 Düşük Sıcaklıkta Isıl Desorpsiyon Temizleme Programı Örnek İzleme Planı 143

Tablo 5.7 Biyoyığın / Arazide Islah Prosesleri Remediasyon İzleme Planı Örneği 145

Tablo 5.8 Aerobik Biyoremediasyon İzleme Parametreleri ve Örnekleme Aralıkları 148

Tablo 5.9 Kimyasal Oksidasyon İzleme Parametreleri ve Örnekleme Aralıkları 149

Tablo 5.10 İzlemeye Yönelik Örneklemede Önemli Kirletici Madde Özellikleri 151

Tablo 5.11 İzleme Çalışmaları için Önemli Gösterge Parametrelerin Özellikleri 152

Şekiller Listesi

Şekil 2.1 Toprak İyileştirmesinde Yaygın Olarak Kullanılan Teknolojiler 7
Şekil 2.2 Yeraltı Suyunun İyileştirilmesinde Yaygın Olarak Kullanılan Teknolojiler 9
Şekil 2.3 VOC Kirliliğinin Temizlenmesinde Kullanılan Teknolojiler 13
Şekil 2.4 SVOC Kirliliğinin Temizlenmesinde Kullanılan Teknolojiler 14
Şekil 2.5 HVOC Kirliliğinin Temizlenmesinde Kullanılan Teknolojiler 15
Şekil 2.6 HSVOC Kirliliğinin Temizlenmesinde Kullanılan Teknolojiler 16
Şekil 2.7 Yakıt Kirliliğinin Temizlenmesinde Kullanılan Teknolojiler 17
Şekil 2.8 İnorganik Kirliliğin Temizlenmesinde Kullanılan Teknolojiler 18
Şekil 2.9 Patlayıcı Kirliliğinin Temizlenmesinde Kullanılan Teknolojiler 19
Şekil 4.1 Kompost İşletmesi Örneği 26
Şekil 4.2 Toprak Biyoyığınları Prosesi Örneği 28
Şekil 4.3 Arazide Islah Yöntemi Kesit Gösterimi 30
Şekil 4.4 Arazide Islah Yöntemi İşletme Örneği 31
Şekil 4.5 Lagün tipi Siluri Faz Biyolojik Arıtım Örneği 32
Şekil 4.6 Tam Karıştırmalı Tank Reaktör tipi Siluri Faz Biyolojik Arıtım Örneği 33
Şekil 4.7 Biyoventilasyon Proses Şeması 35
Şekil 4.8 Fitoremediasyon mekanizmaları 38
Şekil 4.9 Biyoremediasyon Çalışma Prensibi 41
Şekil 4.10 İzlemeli Doğal Giderim Mekanizmalarının Temsili Gösterimi 44
Şekil 4.11 İzleme Kuyusu Ağı ile Kirletici Dağılımının Durumuna Genel Bir Örnek 45
Şekil 4.12 Döner Biyodisk tipi Biyoreaktör Prosesi Genel Arıtım Şeması 47
Şekil 4.13 Yapay Sulak Alan Temsili Gösterimi 49
Şekil 4.14 Su Tablasının Baskılanması ile Pompala-Arıt Tekniği 52
Şekil 4.15 Pompalama ve Arıtma Teknigi ile Serbest Ürün Geri Kazanımı 52
Şekil 4.16 Yağmurlama Sulama Yönteminin Arıtma Sistemine Entegrasyonuna Örnek 55
Şekil 4.17 Yeraltı Suyunun Filtrasyon ile Ayrılması Şematik Gösterim 56
Şekil 4.18 Kimyasal Ekstraksiyon Prosesi Akım Şeması 58
Şekil 4.19 Halojensizleştirme Prosesi Şematik Gösterim 60
Şekil 4.20 Kimyasal İndirgenme/Yükseltgenme Prosesi Şematik Gösterim 63
Şekil 4.21 İleri Oksidasyon Prosesi Şematik Gösterim 65
Şekil 4.22 İyon Değişimi Prosesi Şematik Gösterimi 67
Şekil 4.23 Koagülasyon/Flokülasyon ve Çöktürme Prosesi Gösterimi 69
Şekil 4.24 Absorpsiyon Ve Adsorpsiyon Prensipleri 71
Şekil 4.25 Sabit Yataklı Aktif Karbon Arıtma Sistemi Örneği 73
Şekil 4.26 Yerinde Toprak Yıkama Şematik Gösterim 75
Şekil 4.27 Yerinden Alınarak Toprak Yıkama Şematik Gösterim 76
Şekil 4.28 Yerinden Alınarak Solidifikasyon Prosesi Akış Şeması 78

Şekil 4.29 Auger Metodu ile Solidifikasyon/Stabilizasyon Uygulanması 79
Şekil 4.30 Yerinde Vitrifikasyon Prosesi Bileşenleri 80
Şekil 4.31 Toprak Gazı Ekstraksiyonu Örnek Gösterim 83
Şekil 4.32 Hava Kabarcıklı Arıtım Uygulaması Örneği 86
Şekil 4.33 Sıvı-Gaz Emişli Biyolojik Arıtım Prosesi Örnek Gösterim 88
Şekil 4.34 Çift Faz Ekstraksiyon Çalışma Prensibi 90
Şekil 4.35 Havalı Sıyırma Prosesi Gösterim Şeması 92
Şekil 4.36 Kuyu içi Hava ile Sıyırma Prosesi Gösterim Şeması 94
Şekil 4.37 Kimyasal Oksidasyon yöntemi ile Yeraltı Suyu Temizleme Gösterimi 96
Şekil 4.38 Elektrokinetik Ayırma İşlemi Çalışma Prensibi 99
Şekil 4.39 Yeraltı Suyunda Isıl İşlem Uygulaması Örnek Gösterim 101
Şekil 4.40 Geçirgen Reaktif Bariyer Uygulamasi Örnek Gösterimi 104
Şekil 4.41 Fiziksel Bariyer Uygulama Örneği 106
Şekil 4.42 Yönlü Kuyular Prosesi Örnek Uygulama Gösterimi 108
Şekil 4.43 Yüzey Kaplama İşlemi Örnek Gösterimi 110
Şekil 4.44 Yüzey Kaplamanın Su Toplama ile Geliştirilmesi 111
Şekil 4.45 Örnek Çatlaklama Uygulaması Gösterimi 113
Şekil 4.46 Yakma Prosesi Örnek İşletme Şeması 115
Şekil 4.47 Toprakta Isıl İşlem Uygulaması Örnek Gösterim 118
Şekil 4.48 Toprakta Elektrik Dirençli Isıl İşlem Uygulaması 119
Şekil 4.49 Piroliz Prosesi Akım Şeması 125
Şekil 4.50 Biyofiltrasyon Prosesi 128
Şekil 4.51 Oksidasyon Prosesi 129
Şekil 4.52 Buhar Faz Karbon Adsorpsiyonu 129
Şekil 4.53 Islak Yıkayıcı Sistemi 129
Şekil 4.54 VOC veya HVOC'lerle Kirlenmiş Topraklar için Örnek Temizleme Süreci 132
Şekil 4.55 HSVOC'lerle Kirlenmiş Topraklar için Örnek Temizleme Süreci 133
Şekil 4.56 Yakıtlarla Kirlenmiş Topraklar için Örnek Temizleme Süreci 133
Şekil 4.57 HVOC'lerle Kirlenmiş Yeraltı Suları için Örnek İyileştirme Süreci 136
Şekil 5.1 Temizleme Süreci ve Sonrası İzleme Aktiviteleri - Örnek Zaman Çizelgesi 138
Şekil 5.2 İzleme Aşamalarının Kapsamı 139
Şekil 5.3 İzleme Kapsamındaki Bileşenlerin Gösterimi 144
Şekil 5.4 Temizleme/İyileştirme Faaliyetlerinde İş Gücü/Maliyet ve Zaman Grafiği 146
Şekil 5.5 İzleme Geri Bildirimi Kullanılarak Sistem Optimizasyonu Yaklaşımı 146
Şekil 5.6 Standart Bir İzleme Kuyusundaki Bileşenlerin Gösterimi 154

Kısaltmalar

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AKM	Askıda Katı Madde
APEG	Alkali Polietilen Glikol
BCD	Baz Katalize Bozunma
BOİ	Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı
BTEX	Benzen, Toluen, Etilbenzen, Ksilen
DNAPL	Yoğunluğu Sudan Fazla Suyla Karışmayan Sıvı Tehlikeli Kimyasal Madde
DCE	Dikloroetilen
EDTA	Etilendiamintetraasetikasit
FRTR	Federal Temizleme Teknolojileri Yuvarlak Masası
GAC	Granül Aktif Karbon
GPCR	Gas Fazında Kimyasal İndirgenme
HCB	Hekzaklorobenzen
HCH	Hekzaklorosiklohekzan
HDPE	Yüksek yoğunluklu polietilen
HSVOC	Halojenli Yarı Uçucu Organik Bileşik
HTTD	Yüksek Sıcaklıkta Isıl Desorpsiyon
HVOC	Halojenli Uçucu Organik Bileşik
KOİ	Kimyasal Oksijen İhtiyacı
KOK	Kalıcı Organik Kirletici
LNAPL	Yoğunluğu Sudan Az Suyla Karışmayan Sıvı Tehlikeli Kimyasal Madde
LTTD	Düşük Sıcaklıkta Isıl Desorpsiyon
MCPA	2-methyl-4-chlorophenoxyacetic acid
MTBE	Metil-Tersiyer-Bütil-Eter
NAPL	Suyla Karışmayan Sıvı Tehlikeli Kimyasal Madde
PAH	Poliaromatik Hidrokarbon
PCB	Poliklorlu Bifenil
PCDD/F	Poliklorlu Dibenzodioksin/Poliklorlu Dibenzofuran
PCE	Tetrakloroetilen
PCP	Pentaklorofenol
PM	Partikül madde
Ppm	Milyonda bir birim (mg/L)
PRB	Pasif, reaktif bariyer

PVC	Polivinil klorür
S/S	Solidifikasyon/Stabilizasyon
SVE	Toprak Buhar Ekstraksiyonu
SVOC	Yarı Uçucu Organik Bileşik
TBA	Tert bütil alkol
TCA	Trikloroasetikasit
TCE	Trikloroetilen
TNT	Trinitrotoluen
TOK	Toplam Organik Karbon
TOX	Toplam organik Halojen
TPH	Toplam Petrol Hidrokarbonları
UNDP	Birleşmiş Milletler Kalkınma Programı
USD	Amerikan Doları
USEPA	Birleşik Devletler Çevre Koruma Ajansı
UV	Ultraviyole
VOC	Uçucu Organik Bileşik (Uçucu Organik Kirleticiler)
YÖNETMELİK	Toprak Kirliliği Kontrolü ve Noktasal Kaynaklı Kirlenmiş Sahalara Dair Yönetmelik

1. GİRİŞ

Bu kılavuz Toprak Kirliliğinin Kontrolü ve Noktasal Kaynaklı Kirlenmiş Sahalara Dair Yönetmelik (Resmi Gazete tarih 08.06.2010, sayı 27605) kapsamında temizlenmesine karar verilen kirlenmiş sahalar için teknoloji seçimine yardımcı olmak üzere hazırlanmıştır. Söz konusu Yönetmeliğin Yedinci Bölümü'nde açıklanan ve Yönetmelik Ek-12'de verilen format kapsamında saha sahibinin saha temizleme düzeyi konsantrasyonu ve temizleme yöntemi seçimi konusundaki değerlendirmesini içeren raporun Kirlenmiş Saha Değerlendirme ve İzleme Komisyonu tarafından değerlendirilmesi aşamasında kılavuzun açıklayıcı, kapsamlı bilgi vererek Komisyon'a yardımcı olması hedeflenmektedir. Kirlenmiş sahaların temizlenmesi çok bileşenli karmaşık bir işlem olduğundan, kılavuzda içerilen bilgilere ihtiyaç duyulduğunda en kolay şekilde ulaşılabilmesi amacıyla kılavuzun organizasyonu aşağıda açıklanmaktadır.

İkinci bölümde, kirlenmiş sahaların temizlenmesi için uygun teknoloji seçimi anlatılmaktadır. Burada kirlenmiş ortam (toprak veya yeraltı suyu) ve kirletici türü (yedi grupta açıklanmıştır: halojenli ve halojensiz uçucu organik bileşikler, halojenli ve halojensiz yarı uçucu uçucu organik bileşikler, yakıtlar, patlayıcılar ve inorganikler) özelinde teknoloji seçenekleri sıralanmaktadır. Radyoaktif kirleticiler kapsam dışında bırakılmıştır. Gruplarda bulunan kirleticilerin bazı temel özellikleri ve bu gruplara dâhil olan kirleticiler bu bölümde açıklanmaktadır. Toprak Kirliliğinin Kontrolü ve Noktasal Kaynaklı Kirlenmiş Sahalara Dair Yönetmelik kapsamında listelenen, toprak kirliliğine yol açan maddeler Yönetmelik ekindeki Jenerik Kirletici Sınır Değerler listesinde verilmektedir. Jenerik Kirleticiler listesinde yer alan kirletici maddeler, kılavuz kapsamında belirtilen yedi kirletici grubuna göre sınıflandırılmış ve kılavuzun Ekler bölümünde tablo olarak verilmiştir. Kılavuzun etkin kullanılabilmesi için öncelikle, kirlenmiş sahadaki kirletici veya kirleticilerin hangi gruba girdiğinin belirlenmesi ve sonrasında uygun teknoloji alternatiflerinin incelenmesine geçilmesi önerilmektedir. İkinci bölümde son olarak, kirlenmiş sahalarda uygulanabilecek en güncel temizleme teknolojileri ve bunların uygulanabildiği kirletici grupları bir özet olarak Temizleme Teknolojileri Matrisi (EK-3) adı altında sunulmuştur. Bu matris, belirli bir grup kirletici için uygulanabilecek teknoloji seçeneklerini hızlıca görebilmek, ve karşılaştırmalı değerlendirebilmek amacıyla özet olarak hazırlanmıştır.

Kılavuzun üçüncü bölümünde, teknoloji seçiminde gözönüne alınması gereken kriterler sıralanmaktadır. Burada uygulanabilirlik, performans ve arıtılabilirlik çalışmaları alt başlıklarında kriterler açıklanmıştır.

Kılavuzun dördüncü bölümü, teknolojilerin detaylı açıklamasına ayrılmıştır. Toprak ve yeraltı suyunun temizlenmesinde, yerinde ve yerinden alınarak uygulanabilecek biyolojik, fiziksel/kimyasal, termal ve diğer teknolojilerin herbiri altı alt başlıkta anlatılmıştır: tanım, uygulanabilirlik, kısıtlamalar, süre, maliyet, uygulama sırasında dikkat edilecek konular ele alınarak toprak ve yeraltı suyu için örnek bazı temizleme süreçleri anlatılmıştır. Burada amaç, kirlenmiş bir sahanın temizlenmesinde birden çok teknoloji kombinasyonunun kullanımının söz konusu olduğunu örneklerle göstermektir.

Kılavuzun beşinci bölümünde kirlenmiş saha temizleme çalışmalarının ayrılmaz parçası olan izleme aktiviteleri anlatılmaktadır. Bu bölüm altında izleme çeşitleri ve izlemede dikkat edilmesi gereken konulara yer verilmiştir.

Bir teknolojinin kılavuz kapsamına dâhil edilmemiş olması, o teknolojinin bir sahaya uygulanamaz olduğu anlamına gelmemelidir. Kılavuzda olabildiğince güncel, yeterliliği kanıtlanmış, yaygın kullanımı olan tüm teknolojilerin dâhil edilmesi amaçlanmıştır. Kılavuz içeriğinde olmayan bir teknolojinin kirlenmiş sahanın temizlenmesi için önerilmesi durumunda, dördüncü bölümde teknoloji açıklamalarında kullanılan alt başlıklara dikkat edilmesi, sahada uygulama örneklerine yer verilmesi ve yeni teknolojinin uygulanabilirliği kanıtlanması gerekmektedir. Teknolojilere dair bilgilerin sürekli olarak geliştiği dikkate alınmalıdır. Olası uygulanabilir teknolojilerin seçiminde, kılavuz kapsamında literatürden faydanılmış olsa da, teknolojilerin uygulanabilirliği noktasında seçilen temizleme teknolojisinin tedarikçilerinin varlığı, en güncel bilgilere göre maliyet ve performans beklentileri ve sahaya özel durumların değerlendirilerek teknoloji seçiminin gözden geçirilmesi gerekir. Unutulmamalıdır ki, seçilen teknolojinin ve alternatiflerinin uygulanabilirliğine dair yaklaşımlar, saha ve teknoloji özelinde bilgilerin detayına bağlı olarak netlik kazanır. Teknoloji ile ilgili sahaya özel arıtılabilirlik çalışmaları yapılması halinde en doğru ve uygulanabilir bilgilerin ortaya çıkartılması mümkündür.

Not: Kılavuzda metin içinde cümle sonlarında yer alan rakamlar, kaynak kodlarını göstermektedir.

2. TEKNOLOJİLERİN SINIFLANDIRILMASI

Kirlenmiş sahaların temizlenmesi, biyolojik, kimyasal, fiziksel veya termal işlemlerle gerçekleştirilir.

Biyolojik arıtma yöntemleri ile toprak veya yeraltı suyundaki kirleticiler, mikrobiyal metabolizma aktiviteleri sonucunda karbon dioksit, su, yağ asitleri ve biyokütle gibi zararsız bileşenlere dönüştürülür. Metabolik aktivite ile, aerobik ve anaerobik ortamlarda kirleticiler tam olarak mineralize olabilir (karbon dioksit, su gibi ürünlere dönüşme) veya kısmi bozunmaya (kirleticiden daha farklı, daha küçük bileşiklere dönüşme) uğrayabilir. Biyolojik prosesler genellikle düşük maliyetlidir. Kirleticiler yok edilebilir ve çoğunlukla çok az kalıntı meydana gelir veya hiç kalıntı oluşmaz. Ancak, prosesin zaman gereksinimi yüksektir ve kirleticilerin tamamen yok olup olmadığının belirlenmesi zor olabilir. Sahanın koşullarına göre, mikroorganizmalar yüksek kirletici düzeylerine veya toksik maddelere karşı hassas olabilir.

Fiziksel/kimyasal arıtma yöntemleri, kirleticilerin ya da kirlenmiş ortamın fiziksel ve/veya kimyasal özelliklerini, kirliliği yok etmek (ör. kimyasal olarak dönüştürmek), ayırmak veya hapsetmek için kullanır. Fiziksel prosesler, ortamdaki kirleticilerin faz değişimini başlatır. Kirleticilerin veya kirlenmiş ortamın fiziksel özellikleri kullanılarak fiziksel mekanizmalar ile kirleticilerin bir fazdan diğerine (örneğin sudan gaz haline) değiştirmesi sağlanır. Kirleticilerin kimyasal yapısında bir değişiklik meydana gelmez. Sahanın temizlenmesinde birden fazla yöntem kullanılabileceği gibi, hapsetme teknolojileri de seçilebilir. Hapsetme kategorisindeki temizleme sistemi bileşenleri aktif ve pasif olarak ikiye ayılır: (1) Aktif sistemlerin işletilmesi için sürekli enerji ve iş gününe ihtiyaç vardır (ör. kuyulardan yeraltı suyu pompalama). (2) Pasif sistemler ise bakım işlemi hariç pek fazla ilgi gerektirmezler. (ör. yüzey örtme/kapatma). Kimyasal Prosesler, kimyasal tepkimeler ile kirleticilerin kimyasal yapısı (ve doğadaki davranışı) daha az toksik veya ortamdan daha kolay ayrılan bileşikler oluşturmak üzere değiştirilir. Kimyasal prosesler, biyolojik temizleme işlemlerine kıyasla tipik olarak maliyet etkin sistemlerdir ve kısa sürede uygulanabilirler. Kullanılan ekipmanlar halihazırda piyasada bulunabilir ve genellikle mühendislik faktörü veya enerji ihtiyacı bakımından hassas sistemler değildir. Bazı yerinde fiziksel/kimyasal temizleme teknolojileri toprak yapısına/parametrelerine hassas olabilir. Örneğin, topraktaki kil veya hümik madde içeriği yatay ve dikey hidrolik parametreleri değiştirir ve fiziksel/kimyasal süreç performansında değişkenliklere neden olabilir.

Termal yöntemler, kirleticilerin uçuculuğunu arttırmak, kirleticileri yakmak, parçalamak, yok etmek veya eritmek için ısıl işlemler kullanılır. Termal prosesler hızlı temizleme seçeneği sunar ancak, tipik olarak en maliyetli temizleme teknolojileri grubudur. Bu maliyet farkı, yerinden alınarak gerçekleştirilen ısıl işlemler için, yerinde ısıl işleme göre daha azdır. Maliyetler enerji ve ekipman maliyetlerine bağlı olarak değişir ve toplam maliyet üzerinde hem ana yatırım maliyeti hem de işletme/bakım maliyetleri ağırlıklı etkiye sahiptir. Toprağın ısıl yöntemlerle temizlenmesi kısa-orta süre (aylar – yıl) arasında değişebilir. Tüm temizleme yöntemleri için geçerli olduğu üzere, bir kirlenmiş sahanın temizleme işleminin tamamlanma süresi sahadan sahaya değişen: mevcut kirleticilerin türü ve miktarı, kirlenmiş alanın büyüklüğü ve derinliği ve mevcut toprak

tipi ve şartlarına bağlı olarak değişiklik gösterir [1].

Yukarıda açıklanan ve bu kılavuzun dördüncü bölümünde herbir teknoloji için ayrıntılı olarak açıklanan temizleme yöntemlerinin birbirlerine göre avantajları ve uygulama kısıtlamaları Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1 Teknoloji Gruplarının Uygulanmasında Avantajlar ve Kısıtlamalar

	Avantaj	Kısıtlamalar
Biyolojik Prosesler	Çok çeşitli organik kirleticileri temizleyebilir. • Tüm ortamlara uygulanabilir. • Çok az kalıntı oluşturur/hiç oluşturmaz. • Sistem tasarımında esneklik payı vardır. • Göreceli olarak uygun maliyetlidir.	• Genellikle inorganik kirleticilere uygulanamaz. Temizleme veya iyileşleştirme yavaş gerçekleşir. • Kapsamlı saha karakterizasyonu gerektirir. Performansı saha koşullarıyla sınırlıdır.
Fiziksel Prosesler	• Hızlı temizleme sağlar. • Çok çeşitli kirleticilere ve ortamlara uygulanabilir. • Daha az saha karakterizasyonu gerektirir. • Göreceli olarak düşük maliyetlidir.	• Çoğunlukla kirleticileri arıtmaz, bir ortamdan diğerine taşır. • Süreç sonrasında kullanılan materyaller arıtma gerektirir. • Performansı saha karakteristiği ile sınırlıdır.
Kimyasal Prosesler	• Hızlı temizleme sağlar. • Çok çeşitli kirleticileri temizleyebilir. • Tüm ortamlara uygulanabilir	• Kapsamlı saha karakterizasyonu gerektirir. • Performansı saha karakteristiği ile sınırlıdır. • Süreç sonrasında kullanılan materyaller arıtma gerektirir.
Termal Prosesler	• Hızlı temizleme sağlar. • Organik kirleticilere uygulanabilir. • Toprak ortamına uygulanabilir. • Kirlenmiş ortam hacminde büyük azalma sağlar.	• İnorganik kirleticilere uygulanamaz. • Sıvı ve gaz ortamda uygulanamaz. • Proses kalıntıları oluşturur. • Verimliliği kirleticiye bağlıdır. • Göreceli olarak yüksek maliyetlidir.

Temizleme işlemi, kirleticiye doğrudan ***"Yerinde"*** müdahale ederek veya kirletici *"Yerinden alınarak"* gerçekleştirilebilir. Yerinden alınarak temizleme kirlenmiş saha üzerinde olabileceği gibi, sahanın dışında bir tesise taşınarak da gerçekleştirilebilir. Temizleme işleminde ayrıca kazı, hafriyat, pompalama, bariyer kurulumu gibi diğer yöntemler de söz konusu olabilir. Teknolojiler (1) Kirlenmiş ortama göre ve (2) Kirleticiye göre iki sınıfa ayrılmış ve bunlar aşağıda özetlenmiştir. Kılavuzun dördüncü bölümünde kirlenmiş sahalar için uygulanabilecek, genellikle kullanılan ve etkinliği saha ölçeğinde kanıtlanmış tüm teknolojiler detaylı olarak verilmiştir.

2.1. Kirlenmiş Ortama Göre Uygulanabilecek Teknolojiler

2.1.1. Toprak Kirliliğinin Temizlenmesi

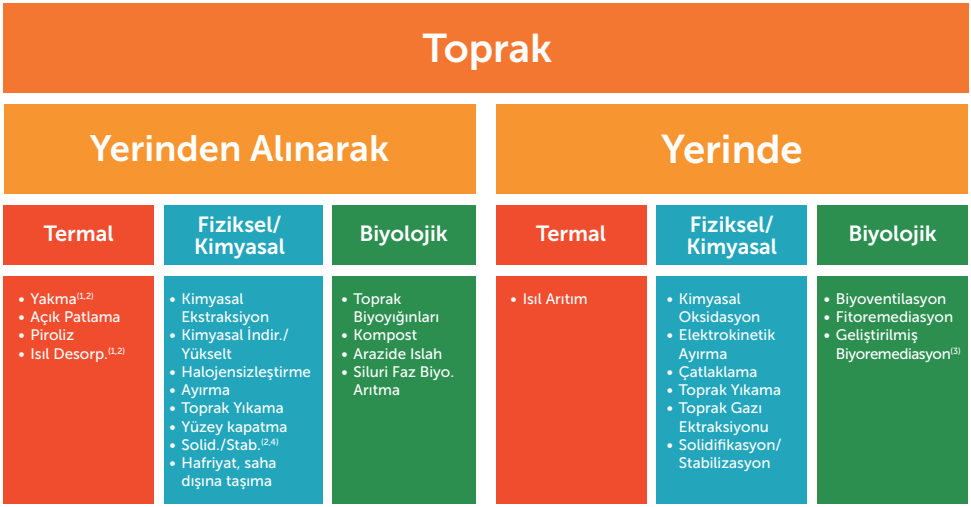
Toprak ortamının fiziksel ve kimyasal yapısı son derece değişkendir. Bu değişkenlik genellikle dikey eksende, yatay eksende olduğundan daha fazladır. Bir saha özelinde toprak yapısının değişkenliğinin fazla olması, kirleticilerin dağılımında farklılıklar yaratarak toprakta taşınımlarının ve temizlemenin zorlaşmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle, teknoloji seçiminde sahada gerçekleştirilen etüt çalışmalarının yanı sıra teknoloji seçimine yönelik olarak sahanın karakterizasyonu büyük önem taşımaktadır. Her sahanın kendine has koşulları olduğu unutulmamalıdır. Bu nedenle, varsa saha ile ilgili daha önce gerçekleştirilmiş çalışmalara ulaşılması önemlidir. Sahanın toprak yapısına ilişkin önceden gerçekleştirilmiş çalışmaların raporları (çalışmanın tarihi ve uygulama alanının saha ile tutarlı olması koşulu ile), mevcut ise, sahada toprağın değişkenliğini incelemek için alınması gereken numune sayısı azalır ve böylelikle inceleme maliyetleri düşer. Toprak kirliliğinin temizlenmesi için uygun teknolojilerin planlanması, tasarlanması ve işletilmesi aşamasında önemli rol oynayan temel parametreler Tablo 2.2'de gösterilmiştir.

Tablo 2.2 Toprak Kirliliğinin Temizlenmesinde Etkili Parametreler

Parametre	Açıklama
Partikül boyutu dağılımı	Çoğu toprak temizleme teknolojisi için önemli bir faktördür. Genellikle kaba taneli, gevşek (ör. kum ve ince çakıl) yapıların temizlenmesi kolaydır. Değişken partikül yapısı nütrient beslemesinde homojen olmayan dağılıma neden olur ve pek çok arıtma prosesinde tutarsız giderim hızlarına yol açar. Büyük mıcır ve kaba çakıl yapıdaki topraklar vitrifikasyon ve kimyasal ekstraksiyon prosesleri için tercih edilmez. Ayrıca solidifikasyon/stabilizasyon teknolojileri için de uygun olmayabilir.
Homojenite ve izotropi	Homojen olmayan topraklar (ör. birbirini izleyen kil ve kum katmanları) kirliliği, ve yeraltına verilen temizleyici maddeleri yönlendirebilir ve temizleme veriminde düşüşe neden olabilir. Bu durum yüzey altı akışkan hareketlerine dayanan yerinde temizleme teknolojilerini (toprak yıkama, buhar ekstraksiyonu, vakum ekstraksiyonu, biyobozunma) zorlaştırmaktadır.
Hacim/Yığın yoğunluğu	Toprağın içerisindeki su ve boşluklar da dâhil olmak üzere birim hacimde toprağın ağırlığını ifade eden birimdir. Malzeme taşıma/yönetme hesaplarında ağırlığı hacime çevirme hesabında ve uygun karıştırma ve ısı transferi koşullarının oluşup oluşmayacağınının belirlenmesinde kullanılır.
Partikül yoğunluğu	Toprak parçacığının özgül ağırlığını ifade eden parametredir.Partikül yoğunluğundaki değişiklikler ağır metallerin ayrılmasına ilişkin proseslerde önemli rol oynar. Ayrıca, toprak yıkama prosesinde ve toprakta askıdaki katı maddelerin çökelme hızının belirlenmesinde (yumaklaşma ve çöktürme proseslerinde) önemlidir.
Geçirgenlik	Yerinde temizleme teknolojilerinde öncelikli önemi olan bir parametedir. Toprak yıkama sıvılarının kirleticilerle teması ve giderim etkinliği düşük toprak geçirgenliği ile ya da farklı toprak katmanları arasındaki geçirgenlik farkları ile azalabilir. Düşük geçirgenlik hava ve buharın toprak ortamından geçişini kısıtlar. (ör. SVE prosesinde VOClerin buharlaşmasını azaltır.) Yerinde biyoremediasyon çalışmalarında kullanılan nütrient çözeltileri düşük geçirgenliğe sahip olan topraklarda istenen sürede nüfuz edemeyebilir. Yerinde vitrifikasyon çalışmalarını, buhar çıkışını yavaşlatması neticesinde sınırlandırır.

Parametre	Açıklama
Nem	Yüksek nem içeriği; havanın/gazların toprak içerisindeki hareketini engelleyecektir (vakum ekstraksiyon tekniğinde önemlidir). Hafriyat ve malzeme taşıma sorunlarına neden olabilir. Vitrifikasyon ve diğer ısıl işlemlerinde, enerji gereksinimine bağlı maliyetleri arttırır. Yerinden alınmadan gerçekleştirilen biyolojik arıtma işlemlerinin verimini arttıran bir etmendir.
pH	Temizlenecek kirletici maddenin pH'ı pek çok temizleme teknolojisi için önemlidir. İnorganik kirleticilerin çözünürlüğü pH'tan etkilenir. Genellikle yüksek pH'lı topraklarda inorganiklerin hareket kabiliyeti azalmaktadır. İyon değişimi ve flokülasyon proseslerinin etkinliği çok düşük veya çok yüksek pH'larda etkilenebilir. Biyoremediasyon prosesindeki mikroorganizma çeşitliliği ve faaliyetleri, aşırı pH aralıklarından etkilenebilir.
Redoks potansiyeli (Eh)	Kimyasal yükseltgenme, indirgenme reaksiyonlarının söz konusu olduğu durumlarda, ele alınan malzemenin yükseltgenme/indirgenme (redoks) potansiyelini ortaya koyar. Sıvı fazda düşük Eh şartlarının sağlanması, bazı halojenli organik bileşiklerin anaerobik biyolojik bozunmasını destekler.
Oktanol/ su dağılım katsayısı (Kow)	Bir kimyasal maddenin organik faz (ör. solvent) ile su fazı arasında nasıl dağılım göstereceğini ifade eden katsayıdır. Kow çevre sistemlerinde organik kimyasalların akıbetini açıklamak için kullanılan önemli bir parametredir. Bu parametre sudaki çözünürlük ve toprakta soğurulma katsayısı ile ilişkilidir. Düşük Kow değerine (<10) sahip kimyasalların hidrofilik olduğu, suda yüksek çözünürlüğe sahip olduğu, yağ/ sediman tutunma katsayılarının küçük olduğu ve sucul organizmalarda biyobirikiminin düşük olacağı söylenebilir. Büyük Kow değerine (>10^4) sahip kimyasallar sudan kaçınır, suda çözünürlüğü düşüktür, hümik topraklar gibi organik yüzeylerde tutunma eğilimi gösterir ve sucul organizmalarda biyobirikim yapar.
Hümik içerik	Toprakta doğal olarak bulunan organik içeriğin bozunabilir bölümüdür. Yüksek hümik içerik; toprağa bağlanır, organiklerin toprağa tutunmasını arttırır ve hareket kabiliyetini kısıtlar, yeraltı suyuna kirleticilerin geçişini azaltır. Toprak buhar ekstraksiyonu, organik maddelerin yüksek soğurma özelliği nedeniyle buhar ekstraksiyonu, toprak yıkama gibi prosesleri kısıtlar. Biyoremediasyon ve kimyasal oksitlenmeyi olumsuz etkileyecek şekilde aşırı oksijen ihtiyacına yol açmaktadır.
Toplam organik karbon (TOK)	Biyobozunma için uygun olan kirleticilerin varlığının bir göstergesi olarak kullanılır (kirletici miktarına dair bilgi vermez). Toprağın yapısındaki doğal organikler ve organik kimyasal kirleticilerin tamamının varlığına işaret eder. Toprak TOK değeri indirgenme/ yükseltgenme tepkimelerinde sadece kirletici için değil, topraktaki organik içerik için de ayrıca kimyasal madde eklenmesi gerekeceğinin habercisidir. Biyoremediasyon yöntemlerinden özellikle Biyoventilasyon yönteminin uygunluğu için toprakta yüksek TOK miktarı önerilir.
Elektron alıcılar	Elektron alıcıların varlığı hakkında bilgi verir. Biyobozunur kirleticilerin akıbetinin belirlenmesinde oksijen, nitrat, demir, mangan, sülfat gibi elektron alıcıların, varlığı önemlidir.
Yağ ve gres	Yağ ve gres, toprak parçacıklarını kaplayarak, toprağın bağ kurma kabiliyetini zayıflatır, karıştırma gibi işlemleri zorlaştırır. Benzer şekilde yağ ve gres, indirgenme/yükseltgenme reaksiyonlarında reaktif madde ile atığın temasını zorlaştırabilir ve reaksiyon verimini olumsuz etkiler.

Toprak kirliliğinin iyikeştirilmesinde genellikle kullanılmakta olan alternatif teknolojiler Şekil 2.1'de gösterilmektedir [2].



Şekil 2.1 Toprak İyileştirmesinde Yaygın Olarak Kullanılan Teknolojiler

1) Toprakta Uçucu Organik Bileşikler (VOC ve HVOC) için başarısı kabul görmüş teknolojidir.
2) Ahşap işleme endüstrisi kaynaklı kirlenmiş topraklarda başarısı kabul görmüş teknolojidir.
3) Toprakta yakıtlar için başarısı kabul görmüş teknolojidir.
4) Toprakta İnorganikler için başarısı kabul görmüş teknolojidir.

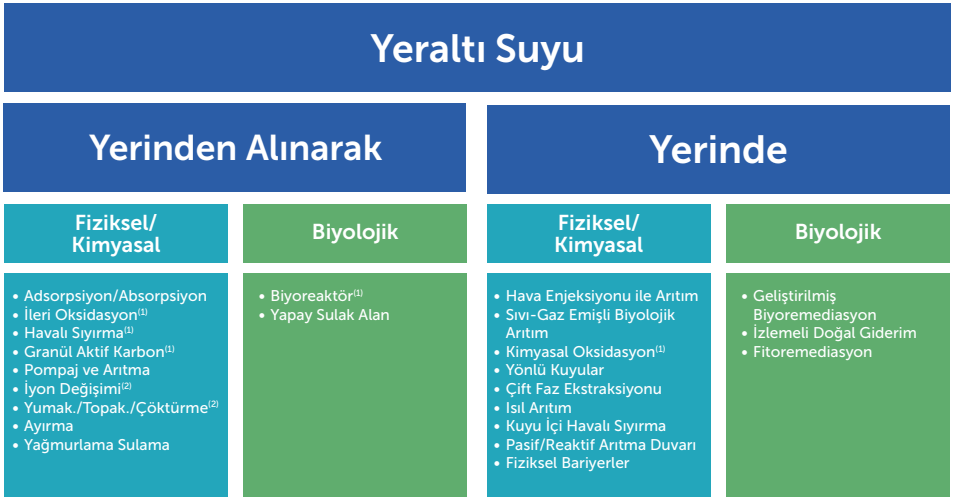
2.1.2. Yeraltı Suyu Kirliliğinin Temizlenmesine Uygun Teknolojiler

Yeraltı suyunun, üzerinde yer alan toprak katmanındaki kirleticilerden dolayı kirlenmiş olması yaygın olarak karşılaşılan bir durumdur. Toprak kirliliğine benzer olarak, bu kirlilik analizinde gerekli olan temel parametrelerin (pH, TOK, BOİ, KOİ, yağ ve gres) yanı sıra kirletici maddenin bilinmesi ve miktarının ortaya konulması gerekir. Yeraltı suyu kirliliğinin giderim yönteminin belirlenmesinde toprak ve akifer karakterizasyonunun yapılmış olması çok önemlidir. Ayrıca, kirlenmiş yeraltı suyundaki; sertlik, amonyak, toplam çözünmüş katı maddeler, metal içeriğinin (örn. demir ve mangan) bilinmesi gerekir. Saha koşullarının ve geçmişinin bilinmesi de olası kirleticilerin belirlenmesi ve maliyet-etkin yöntemlerin seçiminde önemli rol oynar. Kimyasal parametlerin yanı sıra, jeolojik ve hidrolojik bilgiler de planlama, izleme ve temizleme aşamaları için gereklidir. Yüzey altı hidrostatigrafisininin yapısını (homojenite ve izotropi) değerlendirebilmek için detaylı bir jeolojik karakterizasyon çalışması gereklidir. Yeraltı suyunun ortalama akış hızının hesaplanması da önemlidir. Ortalama akış hızı hidrolik iletkenlik, hidrolik gradyan (izleme kuyularındaki yeraltı suyu seviyesi kullanılarak hesaplanır) ve efektif porozite (literatürden elde edilen bilgilere göre tahmin edilebilir) verilerinden yola çıkarak hesaplanabilir. Tüm bu parametreler, temizlenecek sahada pompa testlerinin yapılmasını gerekli kılar.

Tablo 2.3 Yeraltı Suyu Kirliliğinin Temizlenmesinde Etkili Temel Parametreler

Parametre	Açıklama
pH	Pek çok arıtma prosesinin uygulanabilirliğinin belirlenmesinde önemli bir parametredir. pH'nın arıtma proseslerine özel ayarlanması gerekmektedir. pH değişimleri ile kirleticilerin çözünürlüğü ve toksisitesi değişebilir. Düşük pH kimyasal indirgenme/yükseltgenme prosesleri ile girişim yapabilir. Aşırı pH seviyeleri biyolojik arıtma sistemlerinin uygulanmasını zorlaştırır. Ortamda bulunan metaller ve inorganik maddeler, fenolik ve azot içeren bileşikler ortam pH'ından etkilenir. (karbon adsorpsiyonu, iyon değişimi ve flokülasyon gibi prosesleri etkiler)
Redoks potansiyeli (Eh)	pH ile birlikte indirgenme/yükseltgenme dengesinin durumunu ortaya koyar. Düşük/Eh anaerobik biyobozunmanın sağlanmasını ve bazı halojenli bileşiklerin halojensizleşerek bozunmasını destekler.
Organik içerik BOİ, KOİ ve TOK	BOİ, KOİ ve TOK ölçümleri sırasıyla, kirleticinin biyobozunur, kimyasal olarak oksitlenebilir veya yanabilir özelliklerini gösterir.
Yağ ve gres	Yağ ve gres yeraltı suyunda ayrı bir faz olarak bulunabilir. Düşük konsantrasyonlarda olsa dahi, birincil arıtma sistemlerini (ör. iyon değişim reçineleri, aktif karbon sistemleri gibi) tıkayabilir. Yağ ve gres içeriğine sahip suların ön arıtmadan geçirilmesi gerekir.
Diğer	Temel anyonlar (klor, sülfat, fosfat ve nitrat) ve katyonlar (kalsiyum, magnezyum, sodyum, ve potasyum) yerinde jeolokimyasal etkileşimlerin, kirlilik çeşitliliğinin ve su içeren bölgeye hareketin değerlendirilmesinde önemlidir.

Yeraltı suyu kirliliğinin iyileştirilmesinde genellikle kullanılmakta olan alternatif teknolojiler Şekil 2.2'de verilmektedir [2].



Şekil 2.2 Yeraltı Suyunun İyileştirilmesinde Yaygın Olarak Kullanılan Teknolojiler

1) Yeraltı suyunda çözünmüş organik bileşikler, VOC ve SVOC kirliliği için başarısı kabul görmüş teknolojidir.

2) Çözünmüş metaller için başarısı kabul görmüş teknolojidir.

2.2. Kirletici Maddelere Göre Uygulanabilecek Teknolojiler

Kirlenmiş sahaların temizlenmesinde, kirlenmiş ortamın özelliklerinin yanısıra bir diğer önemli bileşen de kirletici(ler)dir. Toprak veya yeraltı suyu iyileştirme çalışmalarına başlamadan önce, sahada varolan kirleticilerin eksiksiz olarak tanımlanması ve derişimlerinin, dağılımının mümkün olan en düşük belirsizlikle öğrenilmiş olması gerekir. Sahadaki kirleticiler net olarak belirlendiğinde, varolan kirleticilere uygun teknolojiler daraltılarak uygun teknoloji seçimi daha nitelikli ve hatasız hale gelecektir. Aşağıda kirletici grupları bazında uygulanabilir teknolojiler listelenmektedir.

Kılavuzun oluşturulmasında kirleticiler, yedi gruba ayrılmıştır:

1. Halojen içermeyen uçucu organik bileşikler (VOC)
2. Halojen içermeyen yarı uçucu organik bileşikler (SVOC)
3. Halojenli VOCler (HVOC)
4. Halojenli SVOCler (HSVOC)
5. Yakıtlar
6. İnorganikler
7. Patlayıcılar

Yakıtlar genellikle VOC grubunun özelliklerini taşımakla beraber, kullanım amacı bakımından belirgin biçimde diğer kirleticilerden ayrıldığı için ayrıca ele alınmıştır. Patlayıcılar ise genellikle SVOC olarak nitelendirilebilir maddelerden oluşmakla birlikte, temizlenme teknolojileri bakımından diğer SVOClerden farklı temizleme yöntemleri uygulanmasını gerektirir ve temizleme esnasında yüksek güvenlikli önlemler alınmalıdır. Bu nedenle patlayıcılar da ayrı bir başlık olarak ele alınmıştır.

Herhangi bir madde ile kirlenmiş sahaların temizlenmesi değerlendirilirken, kimyasal maddenin halojen (flor, klor, brom, iyot) içerip içermediği bilgisi çok önemlidir. Bir maddenin kimyasal yapısında halojen olup olmaması, maddenin bozunurluğu, suda çözünürlüğü ve tüm fizikokimyasal özelliklerini etkiler. Bu nedenle halojen içeren bileşiklerle kirlenmiş toprak veya yeraltı suyunun temizleme teknolojileri de halojensiz olanlardan farklılaşır. Örneğin, yakma teknolojisi uygulanırken, kirletici madde klor içeriyorsa baca gazı emisyonlarının, toksik maddeler olan dioksin ve furanları içerebileceğinden, arıtılması için çok daha hassas ve kapsamlı teknolojilere gerek duyulacaktır.

Toprak veya yeraltı suyunun uçucu ve yarı-uçucu organik bileşiklerle kirlenmesi tipik olarak dört farklı fazda bulunur (bkz. Tablo 2-4). Kirleticiler yeraltında doygun olmayan bölgede belirtilen fazlardan bir veya birkaçı halinde bulunabilirler. Gözenekli

yapıda suyun yüzey gerilimi etkisiyle kirleticiler bazen de kalıntı birikintiler halinde sıvı olmayan fazlar şeklinde bulunabilirler. Suda çözünmeyen veya düşük çözünürlüğe sahip organik kirleticiler özellikle bu şekilde suya karışmayan halde yeraltında bulunabilirler. Bunların yoğunluğu sudan az olanları LNAPL olarak adlandırılır. Ham petrol, benzin, mazot, ısınma yağı LNAPL olarak kirlenmiş sahalarda bulunabilir. Diğer yandan, yoğunluğu sudan fazla olan karışmayan sıvılar DNAPL olarak adlandırılır. Kreosot, zift, trikloroetilen (TCE), tetrakloroetilen (PCE), içeriğinde PCBler, diklorometan, pentaklorofenol gibi organik kirleticiler bulunabilecek atık çözücüler DNAPL olarak kirlenmiş sahalarda bulunabilir. LNAPL yeraltı suyu tabakasının üstünde yüzerken, DNAPL akiferin dibine çöker. LNAPL kılcal saçakta toprağa tutunarak yeraltı su tabakasının üstünde doygun olmayan bölgede birikinti halinde bulunabilir.

Faz	HVOC-VOC	HSVOC - SVOC
Gaz	Doygun olmayan bölgede	Doygun bölgede
Katı	Doygun ve doygun olmayan bölgede sıvı fazdaki kirletici toprağa adsorplanmış olarak.	Doygun ve doygun olmayan bölgede toprağa veya akifer materyaline adsorplanmış veya dağılmış olarak
Sıvı	Doygun ve doygun olmayan bölgede gözenek suyunda çözünürlükleri ölçüsünde	Doygun ve doygun olmayan bölgede gözenek suyunda çözünürlükleri ölçüsünde
Karışmamış	NAPL olarak yoğunlukla doygun olmayan bölgede	NAPL olarak yoğunlukla doygun bölgede

Kirleticiler, fizikokimyasal özelliklerine göre suda değişik miktarlarda çözünebilir. Yeraltında yığın halinde dağılmamış olarak bulunan kirleticiler doygun veya doygun olmayan bölgede çözünerek yeraltı suyuna karışabilir. Düşük çözünürlüğü olan organik bileşikler bile az miktarlarda da olsa yeraltı suyuna geçebilirler. Yığın halinde bulunan, buhar basıncı yüksek olan uçucu organik bileşikler ise, gaz fazına geçerek doygun olmayan bölgede hava boşluklarında birikebilir, VOC gaz bulutu oluşturarak yatay olarak yeraltı suyu hareketinden bağımsız şekilde ilerleyebilir. Bu kimyasallar sudaki yüksek çözünürlükleri dolayısıyla yeraltı suyunda yüksek derişimlerde bulunurken dahi buhar basınçları da yüksek olduğundan sudan gaz fazına geçerek VOC gaz bulutu oluşturabilirler. Halojensiz yarı-uçucu VOClerin buhar basıncı ve sudaki çözünürlükleri VOClere oranla daha düşük olmasına karşın açıklanan bu mekanizma, göreceli daha az olmakla birlikte onlar için de geçerli olabilir.

Bu bölümde kirletici grupları için toprak/yeraltı suyu kirlenmesi durumlarında, yerinde veya yerinde olmayan temizleme teknolojileri şemalarla ifade edilmiştir. Oluşturulan tüm şemalar, gelişmişlik düzeyi, göreceli maliyet ve performans, teknolojiyi sağlayan firmalar ve teknolojinin kanıtlanmış giderim verimi kriterleri gözönüne alınarak en avantajlı grupta belirtilenler koyu siyah renk ile yazılmıştır. Şemalarda bunların altında, gri ton ile yazılan liste ise, uygulanabilir olmakla birlikte, aynı kriterlerde göreceli olarak daha yeni/az denenmiş/az avantajlı teknolojileri ifade etmektedir.

Yönetmelik ekindeki Jenerik Kirleticiler listesinde yer alan kirletici maddeler, kılavuz kapsamında yukarıda belirtilen yedi kirletici grubuna göre sınıflandırılmıştır (Bkz. EK-2). Gruplarda bulunan kirleticilerin bazı temel özellikleri ve bu gruplara dâhil olan kirleticiler bu bölümde açıklanmaktadır. Kılavuzun etkin kullanılabilmesi için öncelikle sözkonusu kirletici veya kirleticilerin yukarıda belirtilen gruplardan hangisine girdiği, EK-2'ye bakılarak belirlenmeli ve sonrasında uygun teknoloji alternatifleri incelenmelidir.

2.2.1. Halojensiz Uçucu Organik Bileşikler (VOC)

Halojensiz uçucu organikler, fizikokimyasal özellikleri bakımından yüksek buhar basınçları olması nedeniyle, normal çevresel koşullarda (ör. oda sıcaklığında) kolaylıkla gaz fazına geçen, birbirinden farklı kimyasal yapıya sahip bileşiklerdir. Bu bileşiklerin genellikle suda çözünürlükleri de yüksektir. Halojensiz VOCler yalnızca endüstride değil, evlerde kullanılan temizlik, kozmetik veya sağlık ürünlerinde dahi bulunabilmektedir. Yakıtlar büyük oranda kimyasal özellikler olarak halojensiz uçucu organik sınıfına girse de kullanım amaçlarının ayırd edici olması bakımından ayrı bir kategoride değerlendirilmekte ve açıklanmaktadır.

VOC Niteliğindeki kirleticilere örnek olarak: *Akrilonitril, Akrolein, Aseton (2-Propanon), Butanol, 4,6-Dinitro-o-kresol, Karbon disülfid, Ksilen, Furan, Nitrobenzen, Metil tersiyer-bütil eter (MTBE), Siklohekzanon, Stiren, Tetraetil kurşun, Vinil asetat* verilebilir.

Halojensiz VOClerle kirlenmiş bölgelerin bulunabileceği yerlere örnek: Yakma ocakları, kimyasal üretim tesisleri ve kimyasal madde bertaraf edilen alanlar. Kirlenmiş deniz sedimanı. Bertaraf kuyuları ve sızıntı alanları. Elektrokaplama/metal finisaj tesisleri. Yangınla mücadele tatbikat alanları, hangarlar/uçak bakım alanları, düzenli depolama tesisleri ve gömme alanları, sızıntı yapan su toplama ve deşarj hatları, sızıntı yapan depolama tankları, radyoaktif/karışık atıkların bertaraf alanları, oksidasyon havuzları/lagünleri, boya sıyırma ve sprey kabini alanları, pestisit/herbisit karıştırma alanları, solvent yağ alma (degres) alanları, yüzey seddeleri ve araç bakım alanlarıdır [2].



Şekil 2.3 VOC Kirliliğinin Temizlenmesinde Kullanılan Teknolojiler

2.2.2. Halojensiz Yarı Uçucu Organik Bileşikler (SVOC)

Halojensiz yarı uçucu organik bileşikler, buhar basıncı ve suda çözünürlükleri halojensiz uçucu organiklere oranla çok daha düşük çeşitli bileşikleri içerir. Yakıtlar ve patlayıcılar bu kategoriye alınmamıştır. Kirlenmiş sahalarda DNAPL olarak bulunabilirler. Bu kategorideki önemli ve yaygın olarak bulunan kirleticiler, pestisitler ve organik malzemenin tam yanmaması esnasında oluşan PAH'lardır.

SVOC Niteliğindeki kirletici örnekleri: *Akrilamid, Antrasen, Asenaften, Benz(a)antrasen, Benz(a)antrasen, Benzidin, Benzo(a)piren, Benzo(b)floranten, Benzo(k)floranten, Benzoik asit, Bis(2-etilhekzil)fitalat, Butil benzil fitalat, Dietilfitalat, 1,2-Difenilhidrazin, Dimetilfitalat, Di-n-butil fitalat, 4,6-Dinitro-o-kresol, 2,4-Dinitrofenol, Di-n-oktil fitalat, Fluoren, Furan, Hidrokinon, Indeno(1,2,3-cd)piren, İzoforon, Karbaril, Karbazol, Karbofuran, Krizen, Maneb, Naftalin, 2-Nitrofenol, 4-Nitrofenol, N-Nitrozodimetilamin, N-Nitrozo-di-N-propilamin, N-Nitrozodifenilamin, Piren, Tributiltin oksit* 'dir

Tipik olarak halojensiz yarı uçucu organik bileşiklerle kirlenmiş bölgelerin bulunabileceği yerlere örnek: Yakma ocakları, kimyasal üretim tesisleri ve kimyasal madde bertaraf edilen alanlar. Kirlenmiş deniz sedimanı. Bertaraf kuyuları ve sızıntı alanları. Elektrokaplama/metal finisaj tesisleri. Yangınla mücadele tatbikat alanları, hangarlar/uçak bakım alanları, düzenli depolama tesisleri ve gömme alanları, sızıntı yapan su toplama ve deşarj hatları., sızıntı yapan depolama tankları, radyoaktif/karışık atıkların bertaraf alanları, oksidasyon havuzları/lagünleri, pestisit/herbisit karıştırma alanları, solvent yağ alma (degres) alanları, yüzey seddeleri ve araç bakım alanları, ahşap koruma işlemi yapılan alanlardır [2].



Şekil 2.4 SVOC Kirliliğinin Temizlenmesinde Kullanılan Teknolojiler

2.2.3. Halojenli Uçucu Organik Bileşikler (HVOC)

Halojenli uçucu organik bileşikler, halojensiz VOClerden farklı olarak kimyasal yapılarında halojen (ör.flor, klor, brom veya iyot) barındırdıklarından farklı fizikokimyasal özellikler gösterir. Halojensiz olanlara göre suda çözünürlükleri daha düşüktür. Sanayide pek çok uygulamada kullanılan çözücüler halojenli VOC sınıfına girmektedir. Kirlenmiş sahalarda DNAPL olarak bulunabilirler [3].

HVOC Niteliğindeki kirleticilere örnek olarak: *Bromodiklorometan, Bromoform, Dikloroetan, Dikloroetilen, 2,4-Diklorofenoksi asetik asit, Dikloropropan, Hekzakloroetan, Hekzakloro-1,3-bütadien, 1,1,2,2-Tetrakloroetan, Tetrakloroetilen, Hekzaklorosiklopentadien, Karbon tetraklorit, Metil bromür, Klorodibromometan, Kloroform, Klorometan, Metilen klorür, Trikloroetan, Trikloroetilen, Vinil klorür (kloroetilen)* verilebilir

Tipik olarak halojenli uçucu organiklerle kirlenmiş bölgelerin bulunabileceği yerlere örnek: Yakma ocakları, kimyasal üretim tesisleri ve kimyasal madde bertaraf edilen alanlar. Kirlenmiş deniz sedimanı. Bertaraf kuyuları ve sızıntı alanları. Elektrokaplama/metal finisaj tesisleri. Yangınla mücadele tatbikat alanları, hangarlar/uçak bakım alanları, düzenli depolama tesisleri ve gömme alanları, sızıntı yapan su toplama ve deşarj hatları., sızıntı yapan depolama tankları, Radyoaktif/karışık atıkların bertaraf alanları, oksidasyon havuzları/lagünleri, boya sıyırma ve sprey kabini alanları, pestisit/herbisit karıştırma alanları, solvent yağ alma (degres) alanları [2].



Şekil 2.5 HVOC Kirliliğinin Temizlenmesinde Kullanılan Teknolojiler

2.2.4. Halojenli Yarı Uçucu Organik Bileşikler (HSVOC)

Halojenli yarı uçucu bileşikler, tipik olarak halojensiz SVOClere oranla daha da düşük buhar basıncı ve suda çözünürlüğe sahiplerdir. Pestisitler bu grupta yeralmaktadır. Kirlenmiş sahalarda DNAPL olarak bulunabilirler. HSVOCs grubuna dâhil en çok gözlenen bileşikler PCBlerdir. Ahşap koruma amacıyla kullanılan pentaklorofenol da bu gruptadır, bu madde ABD'de çok sayıda kirlenmiş sahada tespit edilmiştir [3].

HSVOC niteliğindeki kirleticilere örnek olarak: *Aldrin, Atrazin, Triklorofenol, Triklorobenzen, Tetraklorobenzen, Tetraklorodibenzo-p-Dioksin, Toksafen, Klordan, p-Kloroanilin, Klorobenzen, PCB , Pentaklorobenzen, Metoksiklor, Hekzakloro-1,3-bütadien, Hekzaklorobenzen, Hekzaklorosiklopentadien, Heptaklor, Heptaklorepoksit, DDD, DDE, DDT, -Diklorobenzen, 3,3'-Diklorobenzidin, 2,4-Diklorofenol, Dieldrin, Endosülfan, Endrin, 2-Klorofenol, beta-Kloronaftalin* verilebilir

Tipik olarak halojenli yarı uçucu organik bileşiklerle kirlenmiş bölgelerin bulunabileceği yerlere örnek: Yakma ocakları, kimyasal üretim tesisleri ve kimyasal madde bertaraf edilen alanlar. Kirlenmiş deniz sedimanı. Bertaraf kuyuları ve sızıntı alanları. Elektrokaplama/metal finisaj tesisleri. Yangınla mücadele tatbikat alanları, hangarlar/uçak bakım alanları, düzenli depolama tesisleri ve gömme alanları, sızıntı yapan su toplama ve deşarj hatları, sızıntı yapan depolama tankları, radyoaktif/karışık atıkların bertaraf alanları, oksidasyon havuzları/lagünleri, pestisit/herbisit karıştırma alanları, solvent yağ alma (degres) alanları, yüzey seddeleri ve araç bakım alanları, ahşap koruma işlemi yapılan alanlardır [2].



Şekil 2.6 HSVOC Kirliliğinin Temizlenmesinde Kullanılan Teknolojiler

2.2.5. Yakıt Bazlı Kirleticiler

Yakıt bazlı kirleticiler tipik olarak halojen içermez. Halojensiz VOC ve SVOC'ler için belirtilen hususlar yakıt bazlı kirleticiler için de geçerlidir. Doygun olmayan bölgedeki kirlilik, Bölüm 2.2'nin başında Tablo 2.4'te belirtilen dört fazda da gerçekleşebilir. Genellikle suda çözünürlükleri sınırlıdır. Çoğu yakıt bazlı kirletici sudan hafif olduğu için kirlenmiş sahalarda LNAPL olarak yeraltı su tabakasının üstünde yüzer halde bulunabilirler.

Yakıt kirliliği sınıfına giren kirletici maddelere örnek olarak: *Antrasen, Asenaften, Toplam Petrol Hidrokarbonları (Alifatik) (EC5- EC35), Toplam Petrol Hidrokarbonları (Aromatik) (EC5- EC35), Benz(a)antrasen, Benzen, Benzo(a)piren, Benzo(b)floranten, Benzo(k)floranten, Dibenz(a,h)antrasen, 2,4-Dimetilfenol, Etilbenzen, Fenol, Floranten, Fluoren, Indeno(1,2,3-cd)piren, Kresol, Krizen, Ksilen, Metil tersiyer-bütil eter (MTBE), Naftalin, Piren, Piridin, Toluen, Tetraetil kurşun* verilebilir.

Tipik olarak yakıt bazlı kirleticilerle kirlenmiş bölgelerin bulunabileceği yerlere örnek: Havalimanları, kimyasal bertaraf sahaları, kontamine deniz sedimanı, bertaraf kuyuları ve sızıntı alanları, yangınla mücadele eğitim alanları, hangarlar, uçak bakım alanları, düzenli depolama alanları, yakma ve gömme tesisleri, sızıntı yapan depolama tankları, çözücü ile temizleme/yağdan arındırma işlemi yapılan alanlar, atık göletleri ve araç bakım istasyonlarıdır [2].



Şekil 2.7 Yakıt Kirliliğinin Temizlenmesinde Kullanılan Teknolojiler

2.2.6. İnorganik Kirleticiler

İnorganik kirleticiler büyük oranda metaller ve asbest, siyanür ve tiyosiyanattan oluşmaktadır. Organik kirleticilerin aksine metaller bozunmaya uğratılamazlar, bu nedenle kirlenmiş sahada metallerin bulunması uzun süreli çevresel bir tehlike oluşturmaktadır. Metallerin doğadaki akıbeti fiziksel ve kimyasal özelliklerinin yanısıra, içinde bulunduğu çevresel ortam ve toprağa bağlıdır. Toprağın metal tutma kapasitesi aşıldığında, ciddi miktarda metal, düşük pH ve uygun toprak koşulları olduğunda yağmur ile yıkanarak yeraltı suyuna taşınabilmektedir. Yüzey toprağındaki metaller de rüzgar ve erozyon gibi taşınım yolları ile yer değiştirebilir.

İnorganik kirleticilere örnek olarak: *Antimon, Arsenik, Bakır, Baryum, Berilyum, Civa, Çinko, Gümüş, Kadmiyum, Kalay, Kobalt, Krom (III), Krom (VI), Krom (toplam) , Kurşun, Molibden, Nikel, Selenyum, Talyum, Titanyum, Tiyosiyanat, Siyanür, Vanadyum* verilebilir.

Tipik olarak inorganik kirleticilerle kirlenmiş bölgeler: yakma ocakları, kimyasal üretim tesisleri ve kimyasal madde bertaraf edilen alanlar, kirlenmiş deniz sedimanı, bertaraf kuyuları ve sızıntı alanları, elektrokaplama/metal finisaj tesisleri, yangınla mücadele tatbikat alanları, düzenli depolama tesisleri ve gömme alanları, sızıntı yapan su toplama ve deşarj hatları, sızıntı yapan depolama tankları, radyoaktif/karışık atıkların bertaraf alanları, oksidasyon havuzları/lagünleri, boya sıyırma ve sprey kabinleri, kumlama yapılan alanlar, yüzey seddeleri ve araç bakım alanları, ahşap koruma işlemi yapılan alanlardır [2].



Şekil 2.8 İnorganik Kirliliğin Temizlenmesinde Kullanılan Teknolojiler

2.2.7. Patlayıcılar

Yarı uçucu organik bileşikler için ifade edilen bilgiler, bu alt bölümde belirtilen kirleticiler için de geçerli olarak kabul edilebilir. Patlayıcı atık tanımı genellikle havacılıkta kullanılan yakıtlar, patlayıcı nitelikteki malzemeler ve mühimmat için kullanılır. Bu malzemelerin tamamı "enerjetik maddeler" olarak daha genel bir kategori altında sınıflandırılabilir. Bu malzemeler ateşleme ile veya yeterli miktarda bulunduğunda ısı, şok, sürtünme, kimyasal tutarsızlık, veya elektrostatik deşarj ile kendiliğinden infilak etme özelliğine sahiptir. Bu tür malzemelerin her biri ateşlenme hareketine farklı tepki verecektir, tümü yanar, ancak patlayıcı nitelikte olanlar ve havacılık yakıtları bir takım koşullar altında infilak eder. Burada toprak ve yeraltı suyunda patlayıcı nitelikteki kirleticilerin giderimi hakkında bilgi verilmektedir. İtici gazlar, mühimmatlar ve diğer benzeri patlama özelliği olan malzemeler kapsam dışında bırakılmıştır. Patlayıcı atıklarla kirlenmiş sahaların temizlenmesinde en önemli konu, temizleme veya hafriyat sırasında ateşlemenin önlenmesi için gerekli güvenlik önlemlerinin alınmasıdır [2]. Patlayıcı nitelikteki kirleticilere örnek olarak 2,4-Dinitrotoluen, 2,6-Dinitrotoluen verilebilir.



Şekil 2.9 Patlayıcı Kirliliğinin Temizlenmesinde Kullanılan Teknolojiler

2.3. Temizleme Teknolojileri Matrisi

Temizleme teknolojilerinin kirletici gruplarına göre uygulanması ve karşılaştırmalı değerlendirmelerinde kullanılabilecek bazı kriterler için derecelendirilmesi EK-3'te verilmektedir. Matriste derecelendirme için teknolojinin gelişmişlik düzeyi, tek başına yeterliliği, göreceli maliyet/performans altında bakım ve onarım, ilk maliyet, sistem güvenilirliği, işletme kolaylığı, göreceli maliyet, temizleme süresi göz önüne alınan ve karşılaştırmada kullanılan faktörlerdir. Matriste yer alan teknolojilerin sürekli gelişim halinde olduğu unutulmamalıdır.

3. TEKNOLOJİ DEĞERLENDİRME KRİTERLERİ

Toprak ve toprak kaynaklı yeraltı suyu kirliliğinin temizlenmesine yönelik alternatif teknolojiler değerlendirilirken kriterler "Uygulanabilirlik" ve "Performans" başlıkları altında sınıflandırılabilir. Uygulanabilirlik değerlendirmesi kapsamında: Her kirlenmiş saha için geçerli olan ***genel uygulanabilirlik*** (kirletici türü, toprak yapısı, kirliliğin derinliği) ve kirlenmiş sahaya özel olarak değerlendirilmesi gereken hususlar *sahaya özel uygulanabilirlik* başlıkları altında özetle belirtilmektedir. Performans değerlendirmesi kapsamında: *genel değerlendirme* (teknolojinin gelişmişlik düzeyi, uygulama yaygınlığı, güvenilirlik ve bakım, açığa çıkan yan ürünler/kalıntılar, veri ihtiyacı, kendi başına yeterlilik, halk tarafından kabul edilebilirlik) ve ***zaman-maliyet*** *değerlendirmesi* ele alınmıştır.

Hiçbir değerlendirme kriteri, tek başına bir teknolojinin seçilmesi için yeterli değildir. Tüm bu kriterlerin bütüncül olarak değerlendirilmesinden sonra temizleme teknolojisinin uygunluğuna karar verilmelidir [1].

3.1. Uygulanabilirliğin Değerlendirilmesi

3.1.1. Genel Uygulanabilirlik

Genel uygulanabilirlik, kirleticilerin temel özellikleri (nitelik ve nicelik), kirlenmiş ortam (yapısal özellikleri) ve kirliliğin dağılımını (derinlik ve yayılım) kapsar. Bu göstergelerin belirlenmesi sahaya özel uygulanabilirlik kriterlerinin oluşturulmasında da bir temel oluşturur. Bu sayede, temizleme teknolojisinin kurulum stratejisinin oluşturulmasında genelden özele doğru metodolojik yaklaşımların geliştirilmesine olanak sağlar. Genel uygulanabilirlik, temel olarak üç parametrenin sorgulanması ile değerlendirilebilir:

1. Kirletici Türü : Kirletici maddenin içeriği, niteliği, fizikokimyasal özellikleri, kullanım amaçları vb. özellikler, kirleticiye özel temizleme teknolojisinin seçiminde önemlidir. Bu kılavuz kapsamında, değerlendirmede kolaylık oluşturması amacıyla kirlenmiş bir sahada bulunma ihtimali olan kirleticiler karakteristik özellikleri, formülasyonları ve kullanımlarına göre yedi alt kategoriye (VOC, HVOC, SVOC, HSVOC, Yakıtlar, Patlayıcılar ve İnorganikler) ayrılmıştır. Bir kirletici maddenin hangi gruba dâhil olduğu EK-2'de sunulan liste kullanılarak bulunabilir. Bölüm 2.2. altında her bir kirletici grubuna uygun olan temizleme teknolojileri ilgili kirletici grubu başlığı altında yer alan şekillerde (Şekil 2.3 - Şekil 2.9) sıralanmıştır. EK-2'de yer almayan kirletici madde/ler ile kirlenmiş olan bir sahada, önerilen teknolojinin uygunluk değerlendirmesi için kirletici madde hakkında ayrıntılı bilgi edinilmesi ve teknolojinin kirleticiye uygunluğunun değerlendirilmesi gerekir.

2. Toprak Yapısı: Toprağın parçacık yapısı, filtrasyon kapasitesi, geçirgenliği vb. toprak yapısına dair özellikler bir temizleme teknolojisinin tercih

edilmesi/edilmemesi konusunda belirleyici rol oynar. Bu kılavuzda kullanılan kaba kum, heterojen toprak, killi ve siltli yapı gibi ifadelerle kast edilen genel kabul görmüş toprak özellikleri Tablo 3.1'de belirtildiği gibidir.

Tablo 3.1 Toprak Tiplerinin Sınıflandırması

Toprak Tipi	Toprak Yapısı	Geçirgenlik	Partikül Çapı
Kaba Kum	Kaba kum, çok iri taneli kaba kum ve çakıl	Seri/çok seri (> 127 - 254 mm/saat)	> 0,5 mm
Heterojen	Tınlı kum, çok ince kum, ince kum ve orta incelikte taneli kum	Orta serilikte (5 - 127 mm/saat)	0,05 – 0,5 mm
Kil ve Silt	Kil, silt, siltli kil, silt ve/veya kil ve/veya kum veya karışımlarını içeren balçık,	Çok yavaş/yavaş (<1,3 - 5 mm/saat)	< 0,002 - 0,05 mm

3. **Kirliliğin Derinliği:** Özellikle yerinde temizleme tekniklerinde kirleticinin derinliği kritik bir parametredir. Bu kılavuzda yer alan sığ kirlilik, kirliliğin derinde bulunması gibi anlatımlarda genel olarak kabul görmüş olan derinlik dereceleri ifade edilmektedir. Varsayılan sığ ve derin kavramlarının tanımları Tablo 3.2'de belirtildiği gibidir.

Tablo 3.2 Kirlilik Derinliği Sınıflandırması

Derinlik Sınıfı	Açıklama
Sığ	Toprak yüzeyi kirlilik sütunundan < 0.2 - 0.5 metre mesafede
Orta Derinlik	Toprak yüzeyi kirlilik sütunundan 0.5 - 1.5 metre mesafede
Derin	Toprak yüzeyi kirlilik sütunundan 1.5 metre veya daha derinde

3.1.2. Sahaya Özel Uygulanabilirlik

Temizleme teknolojisi, saha koşullarına özel olarak belirlenmelidir. Aşağıda sahaya özel teknolojilerin belirlenmesinde temel olarak sorgulanması gereken hususlara dair örnek teşkil edebilecek konular sıralanmıştır. Sahaya özel uygulanabilirlik değerlendirmesinde, aşağıdaki listeyle sınırlı kalınmaması gerektiği, bu örneklere ek olarak, sahanın durumu özelinde başka önemli kriterlerin de ortaya çıkabileceği unutulmamalıdır:

a) **Sahadaki Kirlilik konsantrasyonu:** Her teknoloji her tip kirlilik yoğunluğunda başarıyla çalışamaz. Sahanın temizleme işleminden önceki kirlilik konsantrasyonunun temizleme teknolojisini olumsuz etkileyip etkilemeyeceği bilinmelidir.

b) **Erişilebilir minimum konsantrasyon:** Seçilen teknoloji ile ulaşabilecek en üst temizleme noktasındaki kirletici konsantrasyonun, saha için hedeflenen nihai kirletici konsantrasyonunu karşılaması gerekir.

c) **Temizlenen ortamın niteliği:** Temizleme işlemi tamamlandıktan sonra, temizlenen ortamın kirlilik öncesi özelliklerini koruyup korumaması önemli bir kriterdir. Bazı teknolojiler temizleme işlemi sonrasında ortamın yapısını değiştirir. Kirlilik giderilse de toprak yapısında/işlevinde geri dönülemez içerik değişikliği meydana gelmiş olabilir. Bu kriter, doğal kaynakların

değerinin yanı sıra sahanın temizleme sonrası kullanım amaçları da düşünülerek değerlendirilmelidir.

d) **İşletme güvenliği riski:** Temizleme teknolojisinin kurulum, işletme ve sonlandırmasında, işçi sağlığı, güvenliği ve saha civarındaki sakinlerin sağlığı ve güvenliği gözetilmelidir. Teknolojinin yerinde mi yerinden alınarak mı uygulanacağı, yerleşim yerlerine uzaklığı, uygulama sahasının özellikleri ve temizlemede kullanılacak prosesler önemli değerlendirme kriterleridir.

e) **Sahanın fiziksel kısıtları:** Saha, temizleme faaliyetinin kurulum, işletme ve sonlandırmasında çalıştırılacak makine, ekipman, vs. çalışması, yerleştirilmesi, vs. gibi işlemler için elverişli olmalıdır. Kirlenmiş sahanın ve civarında yer alan konut/işletmelerin alansal kısıtları teknolojinin uygulanmasında önemli sınırlamalar getirebilir.

3.2. Performansın Değerlendirilmesi

Kirlenmiş bir saha için uygun olan temizleme teknolojisinin belirlenme sürecinde çevresel anlamda kabul edilebilir; teknik, mali açıdan yapılabilir ve sahaya özel koşullarda uygulanabilir tüm temizleme seçeneklerinin belirlenmiş olması gerekir. Birbirine alternatif oluşturan temizleme teknolojileri; bilimsel bulgular, başarılı olmuş uygulamalar ve uygun maliyetli yöntemler dikkate alınarak karşılaştırmalı olarak değerlendirilmelidir. Bir kirlenmiş sahanın temizlenmesinde uygulanabilir olduğu belirlenen en az üç teknolojinin bu şekilde değerlendirmeye tabi tutulması ve sahanın temizlenmeden olduğu gibi bırakılmasının da bir alternatif olarak değerlendirmeye dâhil edilmesi sağlıklı bir değerlendirme için asgari olarak göz önüne alınması gereken hususlardır. Aşağıda yer alan Bölüm 3.2.1 ve Bölüm 3.2.2'de alternatif temizleme önerilerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan kriterler kısaca açıklanmaktadır.

3.2.1. Genel Değerlendirme

a) **Gelişmişlik düzeyi:** Teknolojinin başarılı örneklerinin ölçeği (tam ölçekli, pilot ölçekli veya laboratuvar ölçekli) bilinmelidir. Tam ölçekli olarak uygulanabilirliği kanıtlanmış teknikler, pilot veya laboratuvar ölçekli çalışmalara göre daha tercih edilebilir. Bu kılavuzda yalnızca en az bir kirletici grubu için başarısı kanıtlanmış, gelişmiş teknolojilere yer verilmiştir. Kılavuzda yer almayan teknolojilerin kirlenmiş bir sahaya özel temizleme önerisi olarak sunulması, teknolojinin uygun olmadığı anlamını taşımamalıdır ancak, bu kılavuzdan faydalanılarak benzer şartlarda yaygın olarak kullanılan temizleme teknolojileri ile karşılaştırmalı bir değerlendirme yapılmalıdır.

b) **Uygulama yaygınlığı:** Önerilen temizleme teknolojisini sağlayabilecek/başarıyla uygulayabilecek firma sayısı, firmaların şimdiye kadar tamamlamış olduğu benzer çalışmalar ve uygulamayı tasarladıkları teknolojiler hakkında bilgi sahibi olunmalıdır.

c) **Güvenilirlik ve bakım ihtiyacı:** Pek çok örnek uygulama ile belirli koşullar altında performansı kanıtlanmış sistemler güvenilirdir. İşletmesi karmaşık olan teknolojiler, işletme esnasında hata oluşturmaya daha meyillidir. Bu nedenle işletmenin planlanan şekilde sürdürülmesi için düzenli olarak takip edilmesine/bakımına ihtiyaç olabilir. Bakım ihtiyacı düşük olan sistemler

sürekli olarak bir çalışanın kontrolünü gerektirmez, kurulum sonrası minimum kontrol ile temizleme işlemini başarıyla sürdürebilir.

d) **Açığa çıkan yan ürünler/kalıntılar:** Temizleme teknolojisi proses kaynaklı kalıntılar oluşturuyorsa, oluşan kalıntıların da arıtılması gerekebilir. Bu nedenle kalıntı oluşturmayan prosesler diğerlerine göre daha avantajlıdır. Özellikle kimyasal tepkime içeren teknolojiler bu anlamda dikkatle değerlendirilmelidir. Değerlendirmede sadece katı/sıvı faz kalıntılar değil, proses beraberinde açığa çıkan emisyonlar/gaz fazındaki yan ürünler de değerlendirmeye tabi tutulmalıdır.

e) **Veri Gereksinimi:** Temizleme teknolojilerinin tasarımında, her teknoloji için farklı nitelikte veri ihtiyacı olacaktır. Veri ihtiyacının az olması, teknoloji açısından avantajlı bir durumdur. Burada dikkat edilmesi gereken konu, bazı temizleme teknolojileri için saha koşullarına özel arıtılabilirlik çalışmalarının gerçekleştirilmiş olmasıdır.

f) **Kendi başına yeterlilik:** Bazı teknolojiler, hedeflenen temizleme derecesine erişmek için kendi başına yeterli olurken, bazı teknolojilerin başka sistemlerle birlikte kullanılması gerekir. Kendi başına yeterli olan teknolojileri uygulamak, bütünleyici teknolojilere göre daha kolaydır.

g) **Halk tarafından kabul edilebilirlik:** Uygulanacak teknolojinin halktan büyük oranda olumsuz tepki alması tercih edilmeyen bir durumdur. Temizleme faaliyetinin civarda yaşayan insanların kirleticilere olan maruziyetini arttırmaması ve buna yönelik önlemlerin faaliyet öncesinde planlanması gerekir. İşletme esnasında açığa çıkan koku, gürültü, araç trafiği, hafriyat yığınları gibi nedenler şikayetlere neden olabilmektedir.

3.2.2. Zaman-Maliyet Değerlendirmesi

Temizleme teknolojilerinin, uygulama sisteminin tamamı gözetilerek (ara birimler, ekipmanlar, izleme çalışmaları vb.) zaman/maliyet etkinliğinin belirlenmesinde temel olarak ele alınması gereken hususlar şunlardır:

a) **Temizleme süresi:** Temizleme süresi, temizleme hedefine ulaşıncaya kadar geçen süreyi belirtmektedir. Kirlenmiş sahaların kullanım amaçlarına yönelik olarak, kabul edilebilir makul temizleme süreleri farklı olabilir. Kılavuzda belirtilen teknolojilerin süreleri ifade edilirken, teknolojiye özel bulguların yanı sıra aşağıdaki tabloda ifade edilen genel bilgiler dikkate alınmıştır.

Tablo 3.3 Temizleme Süresi Sınıflandırması

Temizleme Zamanı	Toprak		Yeraltı Suyu
	Yerinden Alınarak Temizleme	Yerinde Temizleme	
Kısa Süre	6 aydan az	1 yıldan az	3 yıldan az
Orta Süre	6 ay - 1 yıl arası	1 yıl – 3 yıl arası	3 – 10 yıl
Uzun Süre	1 yıldan fazla	3 yıldan fazla	10 yıldan fazla

b) **Toplam Maliyet:** Teknoloji seçiminde kurulum ve işletme maliyetleri dikkate alınmalıdır. Özellikle orta- uzun süreli temizleme teknolojileri için

işletme ve bakım maliyetleri önem kazanmaktadır. Ayrıca tasarım, ön hazırlık ve izleme maliyetleri de gözardı edilmemelidir [1].

3.3. Arıtılabilirlik çalışmaları

Bir teknolojinin daha önce belirli bir kirletici ile kirlenmiş olan sahaya uygulamada başarılı olması, bu teknolojinin her zaman her koşulda etkin temizleme sağlayacağı anlamına gelmez. Bu nedenle kirlenmiş sahada, seçilen teknolojinin başarılı olup olmayacağının belirlenmesi için arıtılabilirlik çalışmaları gerçekleştirilir. Arıtılabilirlik çalışması, önerilen temizleme yönteminin saha koşullarında uygulanabilir olup olmadığını, teknolojinin temel proseslerini sahaya benzer koşullarda çalıştırarak bulmak için, sahadan alınmış kirlenmiş toprak ile laboratuvar ölçeğinde veya sahada pilot ölçekte, teknolojinin denenmesini içermektedir. Arıtılabilirlik çalışması ile prosese dair şu hususlarda bilgi sağlanabilir [4]:

- Temizleme prosesinin verimine etki eden kritik olarak gerçekleştirilmesi gereken kontroller ve işletme parametreleri (ör. pH, sıcaklık, besi seviyesi, nem vs.)
- Tepkime derecesi, hızı ve sabitleri
- Tepkimeye bağlı olarak oluşan yan ürünler
- Toprakta/yeraltı suyunda doğal şartlarda kirliliği giderebilecek mikroorganizmaların varlığı ve bu organizmaların gelişmesi için optimal şartlar
- Enjeksiyon basıncının toprak/akifer özelliklerine etkileri
- Sızıntı suyu oluşumunun, çevre koşullarına bağlı olarak (pH değişimi, yeraltı suyu seviyesi değişimi) değişimi
- Sahanın jeolojik/hidrojeolojik yapısındaki değişkenliklerin teknolojinin uygulanmasına olası etkileri
- Enjeksiyon/ekstraksiyon noktalarının sayısının ve aralıklarının kirleticilere erişmek için yeterli olup olmadığı
- Enjeksiyon/ekstraksiyon noktalarındaki aktiviteler nedeniyle kirleticinin yer değiştirmesi olasılığı

Arıtılabilirlik çalışmalarında tam ölçekte saha uygulamasına geçildiğinde proses izleme için en uygun olan gösterge parametreleri belirlenebilir. Bu çalışmalar özellikle yerinde ve biyolojik teknolojilerin uygulanması durumunda faydalıdır ayrıca, fiziksel ve kimyasal proseslerin tasarımında kullanılacak kimyasal madde miktarının belirlenmesi, işletme şartlarının planlanması ve fizikokimyasal tepkime katsayılarının belirlenmesinde arıtılabilirlik çalışmaları yapılması gerekebilir. Bir teknolojinin kendi başına performansı ile bir arıtma sistemi içerisindeki performansının farklılık gösterebileceği, ayrıca teknolojilerin temizleme performanslarının sahaya özel olduğu unutulmamalı ve ekonomik olarak yapılabilir koşullarda arıtılabilirlik çalışmalarının gerçekleştirilmesine önem verilmelidir.

4. TEKNOLOJİLERİN DETAYLI AÇIKLAMASI

Bu bölümde temizleme teknolojileri; temizleme mekanizmaları, temizlemeyi hedefledikleri kirleticiler, temizleyebildikleri kirlenmiş ortam dikkate alınarak; (1) tanım, (2) uygulanabilirlik, (3) kısıtlamalar, (4) süre, (5) maliyet, (6) uygulama sırasında dikkat edilecek konular başlıkları altında açıklanmıştır. Bu kılavuzdaki açıklamalar, toprak ve yeraltı suyunun temizlenmesi için yaygın olarak kullanılan güncel teknolojileri kapsamaktadır. Burada amaç, okuyucuya teknolojiler hakkında temel bilgiler vererek bir kirlenmiş sahanın temizlenmesi öncesi teknoloji seçimi sırasında karşılaştırma ve değerlendirme için altyapı oluşturmaktır. Kirlenmiş bir sahanın temizlemesinde önerilen bir teknolojinin kılavuz içerisinde yer almaması, o teknolojinin uygulanamaz olduğu anlamına gelmez. Arıtılabilirlik çalışmaları ve şimdiye kadar benzer şartlardaki sahalarda başarılı uygulamalarına dair bilimsel verilerle desteklenen farklı teknolojiler de temizleme alternatifi olarak değerlendirilebilir. Temizleme teknolojilerine ilişkin özel uzmanlık gerektiren, sahaya özel koşullarla değerlendirilen, temizlemenin yeterli olacağına dair kanıt teşkil edecek bilgi sağlanmasının gerekli olduğu durumlarda, bu kılavuz kapsamı ile sınırlı kalınmamalı; teknoloji seçimi, uygulaması ve yeterliliğini belgeleyen uzman raporlarına ve sahaya özel arıtılabilirlik çalışmalarına başvurulmalıdır.

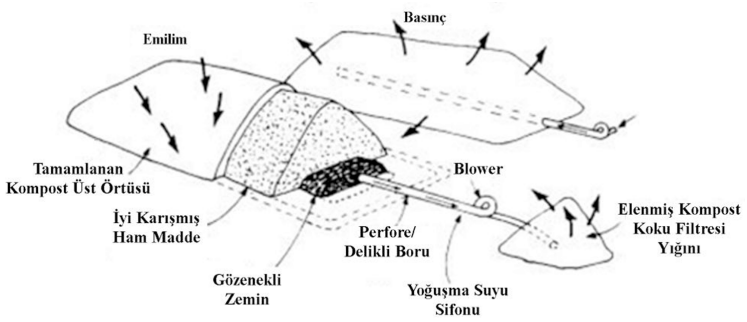
Kirlenmiş sahalarda toprak ve/veya yeraltı suyuna uygulanabilecek olan temizleme teknolojileri Biyolojik, Fiziksel-Kimyasal, Termal olarak üç ayrı kategoride açıklanmıştır. Ayrıca, toprak/yeraltı suyu kirliliği temizleme çalışmaları esnasında proses kaynaklı olarak açığa çıkması muhtemel emisyonların giderimine yönelik teknoloji seçenekleri kısaca belirtilmiştir. Son olarak, bu bölümde tek tek açıklanan bazı temizleme proseslerinin birbiri ile ilişki halinde kullanımını göstermek üzere, birden fazla teknolojinin birlikte kullanıldığı kirlenmiş toprak ve yeraltı suyu temizleme sistemlerine örnekler verilmektedir. Temizleme sürecinin, kirlenmiş bir sahanın temizlenmesinin her zaman sahaya özgü pek çok şart barındırdığı gözönüne alınarak ve teknik bilgilerin her zaman sahaya özel şartlar ve edinilen bilgilerle birlikte yeniden değerlendirilerek tasarlanması gerektiği unutulmamalıdır.

4.1. Biyolojik Prosesler

4.1.1. Kompostlama

Kompostlama	
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinden alınarak
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Toprak
Proses Türü	Biyolojik
Uygulanabilecek kirletici türleri	VOC SVOC Patlayıcılar HVOC ve Yakıtlar
Maliyet	629 – 756 USD/metreküp
Süre	6 Ay - 1 Yıl

Tanım: Kompostlama, organik kirleticilerin aerobik ve anaerobik koşullar altında mikroorganizmalar tarafından, zararsız ve stabil yan ürünlere çevrildiği kontrollü bir biyolojik süreçtir. Kompostlama işleminde kirlenmiş toprak kazılarak yerinden çıkartılır, organik katkı maddeleri ve hacim arttırıcı malzemelerle (ör. odun parçacıkları, saman, gübre ve bitki atıkları, patates, vb.) karıştırılarak prosese hazır hale getirilir. Daha sonra proses tiplerine göre, uygun alanlarda, zemin geçirimsizliği ve emisyon kontrolü sağlanıp serilerek biyolojik bozunma sağlanması için karıştırılır, nem oranı ayarlanır. Organik malzemelerin bozunması sırasında mikroorganizmaların ürettiği ısının sonucu olarak sistemin sıcaklığı yükselir. Çoğu durumda sahaya özgü mikroorganizmaların kullanımı ile gerçekleştirilebilen bir prosestir. Kompostlama işleminin maksimum bozunma verimi, oksijen devamlılığının sağlanması (günlük olarak karıştırma ve havalandırma), gerektiği kadar sulama ve nem içeriğinin yakından izlenmesi ile sağlanır. Proses bileşenleri ve genel görünümü Şekil 4.1.'de gösterilmektedir.



Şekil 4.1 Kompost İşletmesi Örneği

Kompostlama işlemi için havalandırmalı statik yığın kompostlama (kompostlar yığın hale getirilir ve fan veya vakum pompaları ile havalandırılır), mekanik biçimde çalkalanmış konteyner içi kompostlama (kompost, karıştırma ve havalandırma işleminin gerçekleştirileceği bir reaktöre yerleştirilir) ve sıralı yığınlama (windrow)

kompostlama (kompost uzun yığınlar olacak şekilde yerleştirilir ve taşınabilir bir ekipmanla periyodik olarak karıştırılır) alternatifleri bulunmaktadır.

Uygulanabilirlik: Kompostlama işlemi, biyolojik olarak bozunabilen organik bileşenler ile kirlenmiş topraklarda uygulanabilir. Aerobik, termofilik kompostlama PAH ile kirlenmiş topraklar için de uygulanabilir. Sıralı yığın kompostlama, patlayıcılarla kirlenmiş toprağın arıtımında etkili bir teknolojidir. ABD'de gerçekleştirilen örnek çalışmalarda, patlayıcılarla kirlenmiş toprağın temizlenmesinde %96'nın üzerinde verim sağlanabilmiştir. Kompostlama için kullanılan bütün malzemeler ve sistemler ticari olarak mevcuttur.

Kısıtlamalar: Kompost işlemini değerlendirmek için, kirletici konsantrasyonu, hafriyat ihtiyacı, kompost karışım için gerekli katkı maddelerinin uygunluğu ve maliyeti, arıtma için gerekli alan, toprak tipi ve kompostlama için kirleticilerin yatkınlığı gibi veriler gerekmektedir.Kompostlama yapılabilmesi için geniş bir araziye ihtiyaç vardor. Kompostlama işlemi, düzenleyici malzemelerinin eklenmesi nedeniyle hacimsel bir artış ile sonuçlanır. Ağır metallerin gideriminde etkili bir yöntem değildir. Ayrıca yüksek seviyedeki ağır metaller mikroorganizmalar için zehirleyici olabilir.

Süre: Kompostlama, temizlenecek atığın miktarına, kirletici konsantrasyonuna ve niteliğine bağlı olarak ve işletme şartlarının biyolojik bozunmaya uygun yönetildiği şartlarda altı ay ile bir yıl arasında değişen zamanlarda gerçekleştirilebilir.

Maliyet: Proses maliyeti, arıtılacak toprak miktarı, kompost içindeki toprak yapısı dağılımı, katkı maddelerinin bulunma kolaylığı, kirleticinin türü ve kullanılacak tasarıma göre değişir. Kirletici türü, maliyetin değişmesinde en büyük paya sahiptir. Yüksek yoğunluktaki toprakların (düşük hacim, yüksek kütle) kompostlama maliyeti düşer. Diğer yandan, toprakta organik madde miktarı (TOK) arttıkça kompostlama maliyeti artar.

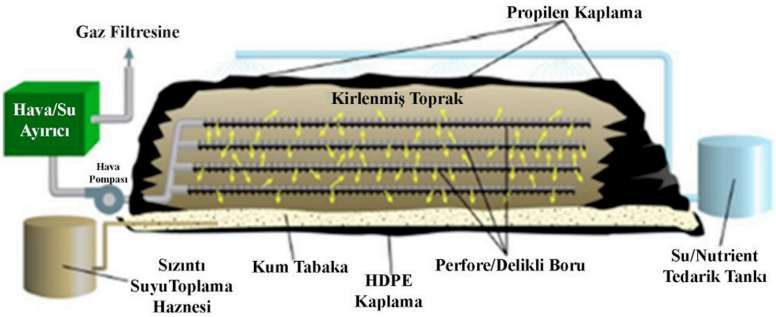
Bu teknolojiye dair maliyetlerin hesaplanmasında, 1000 metreküpten az kirlenmiş toprak küçük ölçekli saha 1000 metreküpten fazla kirlenmiş toprak ise büyük ölçekli saha olarak kabul edilir. Bu şartlarda sıralı yığınlar prosesi kullanılarak gerçekleştirilen kompost işlemi için örnek maliyet aralığı sadece kompostlama işlemi için kirlenmiş metreküp toprak başına 326 – 451 USD arasında, prosesin toplam maliyeti ise 629 – 756 USD/metreküp arasında değişmektedir. Sızıntı suyunu toplamak için kullanılacak ekipman maliyete dâhildir. Nispeten basit ekipman gereksinimleri sıralı yığın kompostlamayı ekonomik ve teknik olarak cazip kılmaktadır.

Uygulama sırasında dikkat edilecek konular: Sistem için en uygun katkı maddesinin seçilmesinde, istenen gözenek yapısının sağlanması ve termofilik aktiviteyi destekleyecek karbon azot dengesinin temin edilmesi gözetilmelidir. Zararlı organik kirleticilerle kirlenmiş toprağın kompostlanması için termofilik koşulların (54°C - 65°C) sağlanması gerekmektedir. Aynı zamanda, bu proses yüksek kaçak emisyonuna sahip olabilir. Eğer kirletici içinde VOC ve SVOC'ler mevcutsa çıkış gazlarının kontrol edilmesi gerekebilir. Hafriyat işlemine bağlı olarak kontrolsüz VOC emisyonları meydana gelebilir [2].

4.1.2. Toprak Biyoyığınları

Biyoyığın	
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinden alınarak
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Toprak
Proses Türü	Biyolojik
Uygulanabilecek kirletici türleri	Yakıtlar VOC HVOC
Maliyet	130 – 260 USD/metreküp (ana yatırım maliyeti)
Süre	6 Aydan kısa
Diğer	HVOC, SVOC, pestisitlerde ve patlayıcılarda kullanımında belirsizlikler mevcuttur

Tanım: Biyoyığın prosesi, topraktaki petrol ürünleri kaynaklı kirleticilerin derişimini biyobozunma yardımı ile azaltmak için kullanılır. Kazılarak yerinden alınan kirlenmiş toprak, katkı maddeleri ile karıştırılır ve zemin üzerinde, korunaklı, sızıntı suyu toplama sistemi ve havalandırma yapısı olan etrafı çevrili bir alana yerleştirilir. Kirlenmiş toprak, yığınlar halinde depolanır ve fan ya da vakum pompa ile havalandırılır. Proses esnasında nem, sıcaklık, nütrient ve pH kontrol altında tutulur. Bu şartlarda biyobozunma sağlanmış olur. Arıtma alanı genellikle kirleticilerin temiz toprağa sızıntı suyu ile karışmasını önlemek için geçirimsiz bir tabaka ile kaplanır veya kapatılır. Toplantın sızıntı sularının sisteme geri döndürülmeden önce biyoreaktörlerde arıtılması gerekebilir. Tedarikçiler biyobozunmayı gerçekleştirmek/hızlandırmak için patentli besiler ve ek formülasyonlar/yöntemleri sisteme dâhil edebilir. Bu formülasyonlar, genellikle sahaya özel şartlar için değiştirilebilmektedir. Toprak yığınları toprağın altından hava geçişini temin edecek bir hava dağıtım sistemi vasıtasıyla, vakum veya pozitif basınç kullanılarak havalandırılır. Havalandırma veriminin sağlanması açısından toprak yığınlarının maksimum yüksekliğinin 2-3 metre olması tavsiye edilmektedir. Toprak yığınları, yüzey suyu akışlarını, buharlaşmayı ve uçucu bileşiklerin kaçmasını önlemek üzere ve güneş enerjisinden alınan ısı enerjisinin korunması amacıyla plastik örtü ile kapatılabilir. Sistemin temel bileşenlerini gösteren örnek bir biyoyığın hücresi Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2 Toprak Biyoyığınları Prosesi Örneği

Uygulanabilirlik: Biyoyığın işlemi, VOC'ler ve yakıt hidrokarbonlarıyla kirlenmiş toprakların temizlenmesinde kullanılabilir. HVOC'ler, SVOC'ler ve pestisitler de bu yönteme tabi tutulabilir ancak; proses etkinliği bu gruplara dâhil olan sadece bazı kirleticiler için geçerli olup, giderim verimi de değişken olabilir. Yakıt türevleri ile kirlenmiş sahalarda uygulanabilirliği kanıtlanmış bir teknolojidir.

Kısıtlamalar: Bu prosesin kullanımı halojenli bileşikler için belirsizlik taşımaktadır, patlayıcıların arıtımında da yeterince verimli olmayabilir. Periyodik karıştırma yapılan işletmelere nazaran, statik arıtma (karıştırma olmaksızın) yapılan işletmelerde tüm sistemde eş giderim verimi sağlanamayabilir. Benzer kirlenmiş toprak hacmi düşünüldüğünde, sulu çamur fazında işletilen teknolojilerle karşılaştırıldığında daha uzun sürede arıtım gerçekleşmektedir.

Süre: Biyoyığın, kısa süren bir teknolojidir. Ortalama 4.000 metrekare büyüklüğünde 3 metre derinlikte , yaklaşık 18.000 ton kirlenmiş saha için altı aydan kısa bir sürede temizlemenin tamamlanması tahmin edilir.

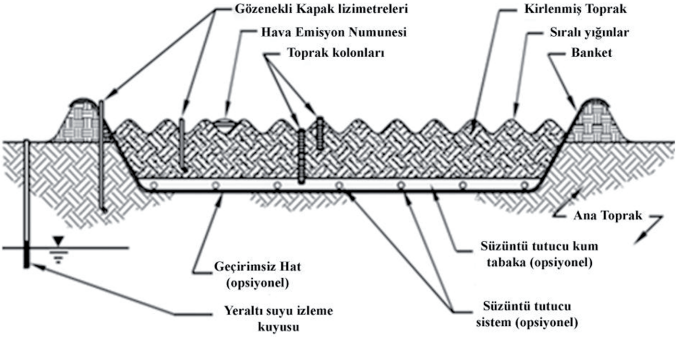
Maliyet: Biyoyığın teknolojisinin maliyetleri kirleticinin türüne, kullanılacak prosedüre, ayrıca gerekli olabilecek ön arıtma ve arıtma sonrası işlemlerin kullanımına ve emisyon kontrolü ekipmanlarının gerekliliğine göre değişiklik göstermektedir. Biyoyığın, göreceli olarak basit bir uygulama olup, işletme ve bakım için personel gereksinimi düşüktür. Yığınların serileceği yatak ve alt örtü malzemesi için tipik maliyetler yığınlanan metreküp toprak başına 130 USD - 260 USD arasında değişiklik göstermektedir.

Uygulama Sırasında dikkat edilecek konular: Biyobozunmayı hızlandırmak için nem, sıcaklık, besi, oksijen ve pH düzenli olarak kontrol edilmelidir. Proses öncesinde kirlenmiş toprağın kazılarak çıkartılması ve nakliyesi gerektiğinden, bu işlemlere bağlı olarak işletme şartlarında oluşabilecek risklere hazırlıklı olunmalıdır. Kirleticilerin biyobozunurluk derecesinin, en uygun oksijen ve besi değerlerinin belirlenmesi için arıtılabilirlik testleri gerçekleştirilmelidir. Toprak içeriğinde havaya salınması muhtemel uçucu organik bileşikler varsa topraktan çıkan havanın da arıtılması ve toprak buharında/emisyonda VOC giderimi sağlanması gerekli olabilir [2].

4.1.3. Arazide Islah

Arazide Islah	
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinden alınarak
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Toprak
Proses Türü	Biyolojik
Uygulanabilecek kirletici türleri	VOC SVOC, Yakıtlar
Maliyet	100 USD/metreküp (ana yatırım maliyeti)
Süre	En az 1 yıl
Diğer	Ağır hidrokarbonların arıtımında tercih edilir

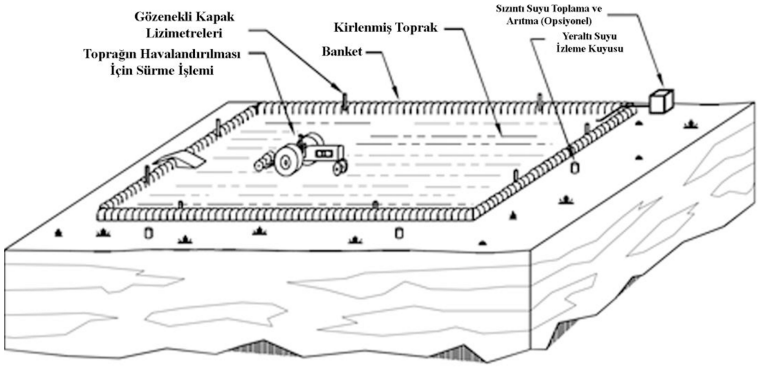
Tanım: Kirlenmiş toprak hafriyat sonrasında yalıtımlı zemin yatağına konulur ve atığı havalandırmak için periyodik olarak tersyüz edilir veya sürülür. Kirletici, toprak, iklim koşulları ve biyolojik aktivite, kirletici bileşenleri parçalamak, değiştirmek ve immobilize etmek için birlikte dinamik bir sistem olarak davranır. Kirlenmiş ortam genellikle 50 cm kalınlığındaki katmanlar halinde arıtılır. Arıtımda arzu edilen seviyeler elde edildiğinde, katman kaldırılır ve yenisi kurulur. Temizlenmiş toprağın tamamı değil de, üst kısmı alınıp yerine yeni kirlenmiş toprak eklenip karıştırılması, yeni toprağa aktif bozundurucu mikrobiyal kültürü aşılamak ve arıtma süresini kısaltmak için etkili olabilir. Sistem altyapısı Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Arazide Islah Yöntemi Kesit Gösterimi

Uygulanabilirlik: Yerinden alınarak arazide ıslahın petrol hidrokarbonlarının arıtımında başarılı bir yöntem olduğu kanıtlanmıştır. Benzin gibi hafif ve daha uçucu hikrokarbonlar, uçuculuklarından faydalanılan yöntemlerle (ör.SVE) çok daha iyi arıtılmaktadır. Bu nedenle, yerinde olmayan biyolojik arıtımın kullanımı genellikle daha ağır hidrokarbonlarla sınırlıdır. Genel bir kural olarak, molekül ağırlığı yüksek olan PAHların bozunma hızı daha yavaştır. Ayrıca, bileşik ne kadar klorlu ve nitratlı ise bozunmanın gerçekleşmesi o derece zordur. Mazot, 2 numara ve 6 numara yakıt yağları, yağlı çamur, ahşap koruyucu atıkları (PCP ve kreosot), kok atıkları ve bazı böcek ilaçları içeren kirleticiler arazide ıslah yöntemi kullanılarak başarılı bir şekilde arıtılmıştır. Özellikle petrol endüstrisi tarafından üretilen çamurlar için pek çok tam

ölçekli tesis kurulmuştur. Şekil 4.4'te arazide ıslah işletmesi bileşenleri gösterilmektedir.



Şekil 4.4 Arazide Islah Yöntemi İşletme Örneği

Kısıtlamalar: Bu prosesin alan gereksinimi fazladır. Veri ihtiyacı yüksek bir prosestir. Uygulama öncesinde kirletici madde/lerin yapısına ve yayılım profile dair bilgilerin, toksik maddelerin varlığının, kirlenmiş ortama dair yapısal, jeolojik ve hidrojeolojik bilgilerin, toprağun su tutma kapasitesi, nütrient içeriği, pH, geçirgenlik ve arazide doğal olarak mevcut mikroorganizma populasyonunun yoğunluğu, katyon değişim kapasitesi gibi bir dizi özelliklerinin yanı sıra topoğrafya, erozyon, iklim, toprak stratigrafisi gibi verilerin değerlendirilmesi gerekir. Bu tip sistemlerde kirleticilerin biyolojik bozunmasını etkileyen şartlar (ör. sıcaklık, yağış) genellikle kontrol edilememektedir ve bu durum arıtım işleminin tamamlanma süresini arttırmaktadır. Bu yöntem ile inorganik kirleticiler biyolojik bozunmaya uğramaz [2].

Süre: Arazide ıslah orta-uzun vadeli bir teknolojidir, temizleme hedefine ulaşılmasının en az 1 yıl sürmesi beklenmektedir.

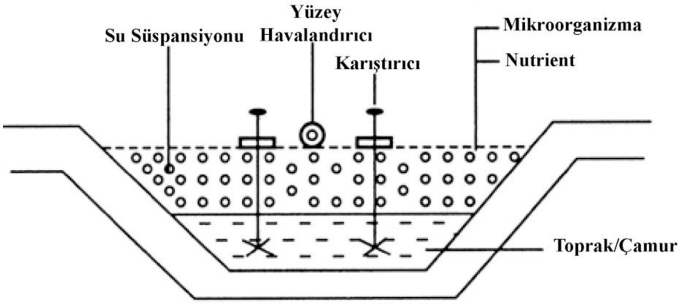
Maliyet: Arıtılabilirlik çalışmaları için gerekli maksimum bütçe 25.000 – 50.000 USD (laboratuvar ölçekli) ve 100.000 USD (pilot ve sahada denemeler) olabilmektedir. Sistem zemini maliyeti metreküp kirli toprak başına 100 USD 'dan azdır.

Uygulama Sırasında dikkat edilecek konular: Toprak koşulları (nem, havalandırma, pH ve katkı maddeleri) kirletici bozunma oranını optimize etmek için sürekli olarak kontrol edilmelidir. Arazide ıslah edilen saha, yeraltı suyu, yüzey suyu, hava veya besin zinciri kirliliğine sebep olmamak amacıyla titizlikle yönetilmelidir. Uygun izlemenin yapılması ve çevresel güvenlik önlemlerinin alınması gerekmektedir. Özellikle toprağın sürülmesi ve diğer malzemelerin taşınması işlemleri sırasında toz kontrolü önemli bir hususdur. Yağmur suyu toplama sistemleri kurulmalı ve izlenmelidir. Çözücüler gibi uçucu kirleticilerden kaynaklanabilecek hava kirliliğinin önlenmesi için ön arıtım uygulanmalıdır [5].

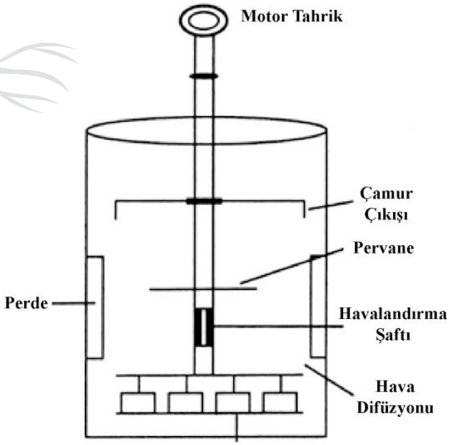
4.1.4. Siluri Faz Biyoreaktör

Siluri Faz Biyoreaktör	
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinden alınarak
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Toprak
Proses Türü	Biyolojik
Uygulanabilecek kirletici türleri	SVOC VOC Patlayıcılar HVOC, Yakıtlar
Maliyet	130 – 200 USD/metreküp
Süre	6 Ay - 1 Yıl
Diğer	Özel adapte edilmiş mikroorganizmalarla: HSVOC, HVOC (ör. Pestisitler, KOK) giderimi yapılabilir. Heterojen, düşük geçirimli topraklarda yerinde biyolojik teknolojilere yeğlenen bir sistemdir.

Tanım: Siluri faz biyolojik arıtma, kirlenmiş toprağın biyoreaktörlerde kontrollü arıtımını içeren bir prosestir. Yerinden kazılarak alınan kirlenmiş toprak ilk olarak fiziksel ön işlemden geçirilerek taş ve çakıllar ayıklanır. Ortamda bulunan kirleticilerin biyobozunma hızı ve toprağın fiziksel yapısına bağlı olarak belirlenen kirletici madde derişimine ulaşıncaya kadar suyla ve katkı maddeleriyle karıştırılarak sulu bir çamur (bulamaç) elde edilir. Tipik olarak bulamaç ağırlıkça %10 - %30 arasında katı madde içerir. Gerekli olması halinde pH'ı kontrol etmek için asit veya baz eklenebilir. Ayrıca, uygun popülasyon olmaması durumunda mikroorganizma da eklenebilir. Bu çamur, katıların askıda tutulması ve mikroorganizmaların toprak kirleticileriyle temas halinde kalması için sürekli besi maddeleri ve oksijenle birlikte karıştırılır. Prosesin tamamlanmasından sonra, çamur susuzlaştırılır ve temizlenen toprak bertaraf edilir. Susuzlaştırma işlemi için çöktürme tankları, basınçlı filtreler, vakum filtreler, kum kurutucu yatakları ya da santrifuj kullanılabilir. Bazı proseslerde toprak, kirleticileri yoğunlaştırmak için ön yıkamaya tabi tutulur. Bu işlemden sonra temiz kısım (ince daneli kumlu bölüm) tahliye edilir ve geriye sadece kirli ince parçalar ve biyolojik olarak arıtılması gereken yıkama suyu kalır. Şekil 4.5'te Lagün tipi bulamaç fazında biyolojik arıtım reaktörü gösterilmektedir. Şekil 4.6'da ise tam karıştırmalı tank tipi reaktör örneği görülebilir.



Şekil 4.5 Lagün tipi Siluri Faz Biyolojik Arıtım Örneği



Şekil 4.6 Tam Karıştırmalı Tank Reaktör tipi Siluri Faz Biyolojik Arıtım Örneği

Uygulanabilirlik: Bu temizleme teknolojisi; heterojen, düşük geçirgenliğe sahip topraklarda, altta bulunan yeraltı suyunun tutulmasının zor olması durumunda, veya hızlı arıtma sürelerine gereksinim duyulması halinde yerinde biyolojik tekniklere yeğlenir. Siluri faz biyoreaktörler öncelikli olarak kazılarak yerinden alınmış toprakta SVOC ve VOC giderilmesinde kullanılmaktadır. Ayrıca, patlayıcılar da bu yöntemle arıtılabilir. Reaktöre kometabolit eklenmesi ve özel olarak adapte edilmiş mikroorganizmaların kullanılması ile HVOC ve HSVOClerin gideriminde de etkili olabilir. Bu nedenle uygun şekilde adapte edildiğinde mühimmat bileşenleri, petrol hidrokarbonları, petrokimyasallar, solventler, ahşap koruyucular, pestisitler ve PCBler ve diğer organik kimyasallarların gideriminde kullanılabilecek bir teknolojidir. Pestisit ve PCB gideriminde ardışık anaerobik/aerobik siluri faz biyoreaktörler etkili olmaktadır. Sahaya ve saha dışına kolaylıkla taşınabilecek olan taşınabilir arıtma üniteleri mevcuttur. Aerobik biyosiluri uygulamaları da oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır.

Kısıtlamalar: Biyoremediasyonun belirli bir sahadaki toprağın temizlenmesine uygun olup olmadığının belirlenmesi için kirlenmiş toprağın karakterizasyonunun yapılması ve kirleticilerin biyobozunurluk potansiyellerinin değerlendirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, arıtılabilirlik çalışmalarına gerek vardır. Biyoremediasyonun etkinliğinin değerlendirilmesinde göz önünde bulundurulması gereken önemli kirletici parametreleri çözünebilirlik ve toprak sorpsiyon katsayısıdır. Ayrıca kirletici madde(ler)in uçuculuğu (buhar basıncı), kimyasal reaktivitesi, (biyolojik olmayan reaksiyonlara eğilimleri, hidroliz oksidasyon ve polimerizasyon gibi) ve biyobozunurluğu bilinmelidir.

Süre: Siluri faz biyoreaktörler kısa-orta süreli teknoloji olarak sınıflandırılabilir. Biyosilüri reaktörlerindeki gerekli bekleme süreleri kirleticilerin yapısına, konsantrasyonlarına ve istenen temizleme düzeyine göre değişiklik göstermektedir. Örneğin pestisitlerlerle kirlenmiş topraklar için reaktörde ortalama 13 gün bekleme süresi gerekirken, rafineri çamurları için 60 gün geçerlidir. Temizlenmesi gereken maddenin niteliği, topraktaki kirletici konsantrasyonu gibi faktörler gözönüne alınarak bu teknoloji ile altı ay ile bir yıl arası bir sürede temizleme gerçekleştirilebilir.

Maliyet: Siluri faz biyoreaktörler ile arıtma maliyetleri metreküp kirlenmiş toprak başına 130 USD ile 200 USD arasında değişmektedir. Siluri-biyoreaktör çıkışında, uçucu organiklerin varlığına bağlı olarak emisyon gazlarının da arıtılması gerekmesi halinde maliyetler metreküp başına 160 USD – 210 USD arasında olabilir.

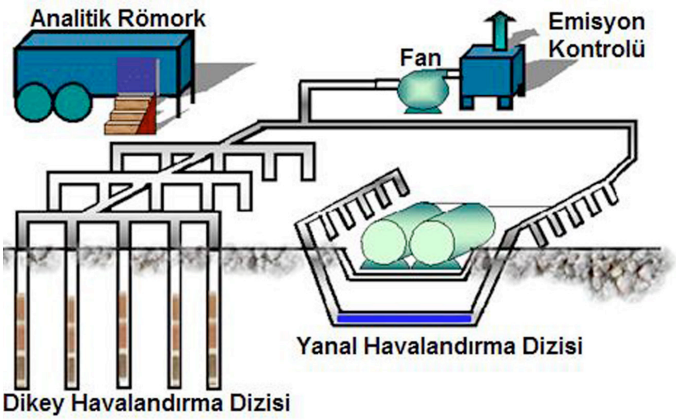
Uygulama Sırasında dikkat edilecek konular: Malzemenin reaktöre verilmeden önce boyutlandırması zor ve pahalı olabilir. Heterojen ve kil yapıdaki toprakların ön işleminde özellikle dikkat edilmelidir. Ortamda serbest fazda ürün bulunması halinde, öncelikli olarak serbest fazdaki ürünlerin temizlenmesi zorunludur. Arıtma sonrası ince partükül yapıdaki toprağın susuzlaştırması pahalı olabilir. Geri döndürülmeyen atıksuların bertaraf edilmesi için ayrıca uygun bir yöntem seçilmesi gerekmektedir. Tek bir organik kirletici için laboratuvar şartlarında ve/veya diğer temizleme sahalarında biyobozunurluk performansı kanıtlanmış olsa dahi, temizlenmek istenen sahada temizlenemebilme koşulları pek çok faktöre bağlıdır, beklenen işletme koşulları arıtılabilirlik çalışmaları ile önceden desteklenmelidir [2].

4.1.5. Biyoventilasyon

Biyoventilasyon	
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinde
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Toprak
Proses Türü	Biyolojik
Uygulanabilecek kirletici türleri	Yakıtlar* VOC SVOC
Maliyet	79 – 970 USD/metreküp
Süre	1 Yıl – 3 Yıldan daha fazla
Diğer	Daha çok kalıntı kirliliğe uygulanmaktadır Düşük geçirgenlik topraklarda uygulanamaz

* Yakıt kirliliğinde başarısı kanıtlanmış, önerilen teknolojidir.

Tanım: Biyoventilasyon, toprak ortamında halihazırda mevcut olan mikroorganizmalara oksijen desteği sağlayarak, aerobik olarak bozunabilen bileşiklerin, toprakta doğal yollardan biyolojik olarak parçalanmasını hızlandıran bir teknolojidir. Biyoventilasyon teknolojisi, kirlenmiş doygun olmayan bölgenin havalandırılmasıyla toprağın oksijen konsantrasyonun yükseltilmesini ve böylece biyobozunurluğun arttırılmasını sağlar. SVE teknolojisinden farkı, mikroorganizmaların aktivitesini destekleyecek kadar düşük düzeyde havalandırma debisi ile işlem yapılmasıdır. Çoğunlukla toprakta kalıntı olarak bulunan kirliliğe doğrudan hava enjeksiyonu ile oksijen sağlanır. Bu işlem sırasında toprakta adsorplanmış olarak bulunan yakıt kalıntılarının bozunmasının yanısıra, gaz fazındaki uçucu bileşikler de topraktan yukarı doğru hareket etmeleri sırasında toprak biyolojik olarak aktifleştiği için bozunurlar. Biyoventilasyon teknolojisinin örnek bir işletmedeki bileşenleri Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7 Biyoventilasyon Proses Şeması

Uygulanabilirlik: Biyoventilasyon tekniği petrol hidrokarbonları, klor içermeyen çözücüler, bazı pestisitler, ahşap koruyucular ve diğer organik kimyasallar ile kirlenmiş toprağın temizlenmesinde kullanılabilir. Bu yöntem inorganik kirleticilerin bozunmasını sağlamaz, ancak uygulama esnasında inorganik maddelerin değerliklerinin değişmesi ile adsorpsiyonu, ve mikro/makroorganizmalar tarafından tutulma, biriktirilme ve konsantre olmasına yardımcı olabilir. Biyoventilasyon teknolojisinin özellikle SVE prosesi ile birlikte kullanılması yaygın olan bir uygulamadır. Biyoventilasyon uygulaması için gerekli donanımların tamamı piyasada bulunabilir hale gelmiştir ve gittikçe yaygın bir teknoloji halini almaktadır. Yüksek su tablası, yüksek nem içeriği ve ince-parçacık yapısının bir arada bulunduğu (düşük geçirgenliği olan) topraklarda biyoventilasyon yöntemi uygulanamaz. Toprağın gaz geçirgenliğini etkileyen faktörler; toprak parçacık boyutu ve toprağın nem içeriğidir. Hava geçirgenliğini sınırlandıran en önemli faktör toprakta çok fazla nem bulunmasıdır. Bu nedenle bu yöntem yüksek su tablası, yüksek nem içeriği ve ince-parçacık yapısının birarada bulunduğu topraklarda uygulanamaz.

Kısıtlamalar: Biyoventilasyon prosesinin başarılı olmasında aerobik şartların sağlanması ve hidrokarbon tüketen mikroorganizmaların toprakta yeterli konsantrasyonlarda bulunması gereklidir ki istenen biyobozunma hızlarına ulaşılabilinsin. Bu iki kriterin sağlanabileceğinden emin olunması için toprağın hava geçirgenliğini ve yerinde mikrobiyal aktivite hızlarını belirlemeye yönelik test çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Toprak yapısı (pH, nem, temel nütrientler ve sıcaklık) mikrobiyal aktiviteyi etkilemektedir. Biyoventilasyon işleminin en verimli olduğu durum mikrobiyal aktivitenin oluşması için en uygun şartların sağlandığı, toprak pH'sının 6-8 arasında olduğu durumlardır. Ancak bu optimum aralık oluşmasa bile mikrobiyal aktivite yine de devam etmektedir. Optimum toprak nemi şartları ise toprak yapısına göre farklılık gösterir. Çok fazla nem toprakta hava geçişini azaltarak, çok düşük nem miktarı ise biyolojik aktiviteyi sınırlandırarak prosesi olumsuz etkiler. Sürdürülebilir biyoventilasyon prosesi için kütlece %2 - %5 arasında bir nem içeriği yeterlidir. Ayrıca, aşırı soğuk iklim koşullarında dahi uygulanabilir bir yöntem olmasına rağmen genel olarak düşük sıcaklıklar, biyolojik aktivitenin yavaşlamasına bağlı olarak temizleme hızını yavaşlatmaktadır.

Süre: Bioventilasyon ile temizlemenin en az bir yıl kadar sürmesi beklenmektedir. Tüm biyolojik temelli teknolojilerde olduğu gibi, biyoventilasyon teknolojisi kullanılarak yerinde arıtım için gerekli süre, toprağın ve kirlenmiş ortamın kimyasal özelliklerine fazlasıyla bağlıdır. Orta ile uzun vadeli kabul edilen biyoventilasyon teknolojisi, olumsuz şartlarda üç yıldan fazla zaman alabilir.

Maliyet: Biyoventilasyon prosesi için öncelikli maliyet etkeni yüzey alanıdır. Kirliliğin yayıldığı yüzey alanı, açılması gereken enjeksiyon/ekstraksiyon kuyularının sayısını, dolayısıyla maliyeti belirleyen en önemli etkendir. Açılacak kuyu sayısının fazlalığı, maliyeti de arttıracaktır. Biyoventilasyon prosesinin maliyetini etkileyen diğer unsurlar; kirleticinin türü ve konsantrasyonu, toprak geçirgenliği, kuyuların konumu, pompaj hızı ve çıkış gazı arıtımına ihtiyaç olup olmamasıdır. Kum ve çakıl tipi topraklarda kurulması gereken enjeksiyon/ekstraksiyon kuyularının diğer toprak türlerine göre daha az olması beklenir. Bu tür topraklarda biyoventilasyon uygulamasındaki maliyet önemli derecede düşecektir. Bu teknoloji pahalı ekipmanlar gerektirmez ve işletme/bakım için bir kaç personel yeterli olabilir. Ancak uygulama esnasında periyodik bakım ve

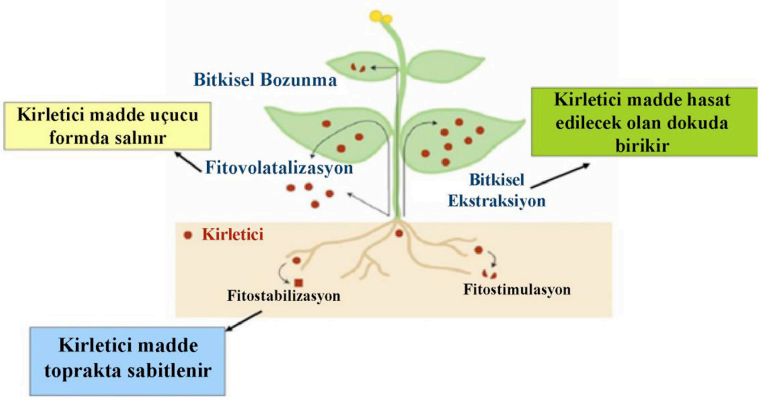
izleme gerekmektedir. Temizlenen metreküp toprak başına maliyetler 79 ile 970 USD arasında değişebilmektedir. Bu büyük maliyet aralığı, yerinde gerçekleştirilen uygulamaların, sahaya özel değişkenlere bağlı olarak oluşabilecek koşul değişikliklerinden fazlasıyla etkilenmesine bağlıdır.

Uygulama Sırasında dikkat edilecek konular: İstenen nem oranını sağlamak için toprağın sulanması veya enjekte edilen havanın neminin arttırılması gibi yöntemler tercih edilebilir. Hava enjeksiyon kuyularının da etkisiyle, enjeksiyon kuyularının etki yarıçapı civarında çıkan buhar bodrum katlarda birikme yapabilir. Bu sorunu gidermek için tehlike arz eden yapının civarındaki havanın çekilmesi sağlanmalıdır. Klorlu bileşiklerin oksijenli biyobozunması sözkonusu olduğunda, kometabolitlerin veya bir anaerobik döngünün varlığı gerekebilir, bunlar olmaksızın biyoventilasyon etkin olmayabilir. Temizleme işlemi esnasında toprak yüzeyindeki salınım gazlarının izlenmesi ve arıtım ihtiyacının belirlenmesi gerekebilir [2].

4.1.6. Fitoremediasyon

Fitoremediasyon		
Yerinde / Yerinden alınarak	Yerinde	Yerinde
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Toprak	Yeraltı Suyu
Proses Türü	Biyolojik	Biyolojik
Uygulanabilecek kirletici türleri	İnorganikler VOC HVOC SVOC	HVOC SVOC HSVOC VOC
Maliyet	147 – 2322 USD/ metreküp	4,8– 18 USD/metrekare
Süre	En az 3 yıl	En az 3 yıl
Diğer	Sığ kirliklerde tercih edilir	

Tanım: Fitoremediasyon toprakta ve yeraltı suyunda bulunan kirleticileri ayırmak, taşımak/yer değiştirmek, stabilize etmek ve yok etmek için kullanılan bir yöntemdir. Kendi içerisinde çeşitli mekanizmalar kullanarak kirliliği giderir. Toprakta ve yeraltı suyundaki kirliliğin giderim mekanizmaları; geliştirilmiş rizosfer biyoparçalanma ve fitodegradasyondur. Ayrıca hidrolik kontrol, toprakta fitoekstraksiyon, fitoakümülasyon ve fitostabilizasyon mekanizmaları da aktif rol oynar. Bazı bitkiler metalleri köklerinde biriktirebilir [6]. Kökler doygunluğa ulaştıkça kesilir. Şekil 4.8'de fitoremediasyon giderim mekanizmalarının bir bitki ile ilişkisi gösterilmektedir.



Şekil 4.8 Fitoremediasyon mekanizmaları

Uygulanabilirlik: Fitoremediasyon metallerin, pestisitlerin, solventlerin, patlayıcıların, ham petrol, PAHların arıtımında kullanılır. Yeraltı suyunda organik kirleticilerin giderilmesinde ağaçların temizleme mekanizmaları ayrıca araştırılmaktadır. Ağaçlar, organik kirleticilerin yerini değiştirerek yoğunluğunu azaltabilir, terleme yoluyla bünyesinden uzaklaştırabilir ve CO2 ve bitki dokusu olarak metabolizmasına katar.

Genellikle sığ kirliliğe erişebilen bir yöntemdir. Köklerinde metal biriktirme özeliğine sahip bitkiler yeraltı suyundan metallerin gideriminde kullanılabilir [2]. Hiper-biriktirici bitkiler ise çok yüksek oranlarda metal kirliliğinin giderilmesinde ve depolanmasında etkilidirler. Halen geliştirme aşamasında olan bir yöntemdir. Proses sonucunda oluşan bitki metabolizmasında hapsolan veya bitkilerden salınan maddelerin besin zincirine toksik veya zararlı etkilerinin olmadığının, genel halk sağlığına bir risk teşkil etmediğinin kanıtlanması için çalışmalar yapılması gerekmektedir.

Kısıtlamalar: Toprakta gerçekleştirilen fitoremediasyon uygulamalarında temizlenebilen alanının derinliği fitoremediasyonda kullanılan bitkilere bağlı olarak değişir. Kütle transferi tüm biyoremediasyon yöntemlerindeki gibi, sınırlandırıcı olabilir. Uygulama yerine bağlı olarak mevsimlik işleyen bir sistem olabilir, ki bu durum temizleme süresini uzatır. Topraktan/sudan kirleticiler havaya karışabilir. Çok güçlü (ör. PCBler) veya çok zayıf tutunmuş kirleticiler için etkin bir yöntem değildir. Biyobozunma ürünlerinin toksisitesi bilinmemektedir. Reaksiyon ürünlerinin suda çözünürlüğü, orijinal kirleticilerden yüksek olabilir ve bu nedenle yeraltı suyunda hareket kazanabilir, canlılarda biyobirikim yapabilir. Otoritelerin aşina olmadığı bir teknolojidir. İklim veya mevsimsel koşullar bitkilerin gelişmesini etkiler temizleme etkilerini yavaşlatabilir veya temizleme süresini uzatabilir. Fitoremediasyon yöntemi geniş arıtma alanı gerektirebilir [6].

Süre: Uzun süreli bir teknolojidir. Pek çok değişkene bağlı olduğundan dolayı işletme süresi için tam bir aralık vermek mümkün değildir ancak üç yıldan daha uzun süre alması beklenebilir.

Maliyet: Kirlenmiş alanının büyüklüğü öncelikli maliyet etmenidir. Ayrıca, çok önemli bir etken numune analizlerinden kaynaklanacak maliyetlerdir. Yeraltı suyu arıtımında ise kullanılan ağaçların olgunluğu (ve ağaçları bu olgunluğa getirebilmek için gereken çalışma/izleme süresi) ikincil önemli maliyet etmenidir. Kirlenmiş toprağın temizlenmesinde temizlenen metreküp toprak başına maliyetler 147 USD ile 2322 USD arasında değişebilir. Yeraltı suyunun temizlenmesinde ise bitkilendirilen yüzey alanı başına 4,8 - 18 USD /metrekare arasında değişebilmektedir. Bu derece geniş maliyet aralıklarının olması, prosesin henüz genel geçer uygulamalarının oluşmamış olmasından kaynaklanmaktadır.

Uygulama sırasında dikkat edilecek konular: Tehlikeli maddelerin yüksek konsantrasyonları bitkiler için toksik olabilir [2].

4.1.7. Geliştirilmiş Biyoremediasyon

Geliştirilmiş Biyoremediasyon		
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinde	Yerinde
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Toprak	Yeraltı Suyu
Proses Türü	Biyolojik	Biyolojik
Uygulanabilecek kirletici türleri*	VOC Yakıtlar SVOC HSVOC Patlayıcılar	VOC Yakıtlar SVOC HSVOC Patlayıcılar
Maliyet	30 – 100 USD/metreküp	10 – 20 USD/ metreküp
Süre	6 Ay - 5 Yıl	6 Ay – 5 Yıl
Diğer	Ahşap koruma/kaplama sanayinde, petrol rafinericiliğinde sıklıkla kullanılır. Düşük derişimdeki kalıntı kirliliğin gideriminde etkilidir. Kil ve heterojen yapıdaki topraklarda tavsiye edilmez. KOK kirliliğinin gideriminde kullanılabilir.	

* Ahşap koruma/kaplama sanayinde organiklerle kirlenmiş sahalarda başarısı kanıtlanmış teknolojidir.

Tanım: Geliştirilmiş biyoremediasyon, ortama eklenen mikroorganizmaların toprak ve/veya yeraltı suyundaki organik kirleticileri uygun koşullar altında besin ve enerji kaynağı olarak tüketmesi ile yerinde bozunmasının sağlanmasıdır. Toprak veya yeraltı suyuna oksijen, nütrient, nem sağlanarak sıcaklık ve pH kontrolü ile uygun koşulların oluşturulması mümkün olmaktadır. Biyoremediasyonda, mikroorganizmaların doğal bozunma süreçlerinin hızlandırılması amacıyla nütrient, elektron tutucu veya bozunmayı gerçekleştirdiği bilinen mikroorganizma eklemesi yapılmaktadır. Aerobik koşullarda mikroorganizmalar organik kirleticileri karbon dioksit, su, etilen gibi düşük molekül ağırlıklı hidrokarbonlara dönüştürür. Anaerobik koşullarda ise organikler metan, biraz karbon dioksit ve çok az hidrojen gazına dönüştürülmektedir. Soğuk iklim koşullarında da başarılı biyoremediasyon örnekleri olmakla birlikte giderim düşük sıcaklıklarda yavaşlamaktadır. Isı battaniyeleri bu durumlarda kullanılabilmektedir. Yeraltı suyuna oksijen sağlanması, yeraltı suyu tabakası altına hava enjeksiyonu veya kirlenmiş yeraltı suyu bölgesinde hidrojen peroksit sirküle edilmesiyle gerçekleştirilebilir. Anaerobik koşullarda, biyoremediasyon hızının ve veriminin arttırılabilmesi amacıyla sıvılaştırılmış nitrat da sirküle edilebilir ancak henüz bu uygulama pilot ölçekte gösterilmiştir. Katı fazda oksijen takviyesi amacıyla da peroksit ürünleri eklenebilir. Mikroorganizma aktivitesini hızlandırmak ve uygun koşulları sağlamak amacıyla melas, bitkisel yağ gibi eklemeler de yapılabilmektedir. Bazen kirlenmiş saha koşulları (toprak kirliliği durumunda jeolojik yapının geçirimsiz olması nedeniyle eklentilerin homojen dağıtılamaması veya sahanın soğuk iklimde bir bölgede yeralması dolayısıyla mikrobiyal aktivitenin çok yavaş olması) nedeniyle hafriyat yapılarak da biyoremediasyon gerçekleştirilebilir. Benzer şekilde kirlenmiş yeraltı suyu için de yeraltı suyu yüzeye pompalanarak tanklar içerisinde arıtılıp sonrasında geri yeraltı suyuna pompalanması veya kanalizasyon şebekesine boşaltılması söz konusu olabilir. Böyle bir durumda kirleticilerin uçuculukları dolayısıyla havaya karışma ihtimali gözönüne alınarak tanklardan hava emisyonlarının arıtımı da düşünülmelidir. Şekil 4.9'da mikroorganizamaların yeraltındaki kirleticileri doğal olarak giderme mekanizması basitçe özetlenmiştir [7].



Şekil 4.9 Biyoremediasyon Çalışma Prensibi

Uygulanabilirlik: Kirlenmiş toprak veya yeraltı suyunda uygulanabilir bir teknolojidir. Biyoremediasyon özellikle kaynağın kaldırılması sonrasında geriye kalan düşük derişimdeki kirliliğin gideriminde etkilidir. Yüksek geçirgenliği olan bölgeler biyoremediasyon ile çok daha hızlı temizlenebilir. Biyoremediasyon ile en efektif olarak giderilen kirleticiler yakıtlar ve petrol hidrokarbonları (TPH, PAH), BTEX, SVOC, çözücüler, pestisitler, ahşap koruyucuları (pentaklorofenol, kreosot, vb) gibi organik kirleticilerdir. ABD'de uzun yıllar boyunca gerçekleştirilen saha temizleme çalışmalarında özellikle ahşap koruma/işleme sanayinde ilk tercih edilen temizleme yöntemidir. Biyoremediasyon inorganik kirleticiler için uygulanmaz ancak bu yöntem inorganiklerin değerliğini değiştirmek amacıyla kullanılabilir. Bu şekilde inorganiklerin adsorpsiyonu, toprak üstünde hareketsizleştirme ve çökelme, mikroorganizma tarafından tutulma, birikme ve mikro/makroorganizmalarda konsantre olması kolaylaştırılabilir. Akifere nitrat eklenmesi ile toluen, etil benzen ve ksilenlerin anaerobik olarak bozunması sağlanabilir. Ancak, yakıtlardaki benzen, mutlak anaerobik koşullarda daha yavaş biyobozunmaya uğramaktadır. Oksijen/nitrat karışımının eklenmesi buna bir çözüm olarak geliştirilme sürecindedir. Küçük çaplı hava enjeksiyon noktaları kolay ve ucuz olarak sahaya yerleştirilebilmektedir. Bunlar remediasyon sisteminin tasarım ve inşaatı sırasında kolaylık ve göreceli düşük maliyet sağlamaktadır. Yeraltı tabakasına hava basmak, toprak buhar ekstraksiyonu (SVE) veya biyosıyırma yöntemleri ile uçucu organik kirleticilerin giderimi için biyoremediasyon ile birlikte kullanılabilmektedir [3].

KOK gideriminde kullanılan biyoremediasyon temelli farklı patentli süreçler bulunmaktadır. Kalıcı organik kirleticilerin anaerobik bozunumu, aerobik bozunmaya göre daha hızlıdır. Anaerobik bozunma ile klorsuzlaştırma gerçekleştirilir, bu sayede kirleticinin toplam kütlesinde çok fazla azalma meydana gelmemesine rağmen toksisitesi büyük ölçüde azalmış olur, hatta tamamen giderilmiş olabilir. PCB, PCDD ve PCDF anaerobik şartlar altında mikroorganizma faaliyetleri esnasında dönüştürülür. Anaerobik bozunma (klorsuzlaştırma) sonrasında kirleticiler daha kolay biyobozunur nitelik kazanır.

Bu işlem için karbon kaynağı ve/veya elektron tutucu olarak görev alacak kimyasalların eklenmesi gerekebilir. PCB'lerden klor gideriminde kullanılan organizmalar 2,3,5,6 tetraklorobifenil ve asetat eklenmesine ihtiyaç duymaktadır. Bu şekilde PCDD/F gideriminin etkinliği henüz kanıtlanmamıştır [8]. Biyoremediasyon genellikle pestisitlerle yoğun olarak kirlenmiş olan sahalarda uygun değildir ancak düşük seviyedeki KOKlar ve PCB kirliliğinde etkilidir [9]. Kirletici maddenin toprakta bulunma süresi uzadıkça toprakta tutunma oranı ve stabilitesi artar. Bu artışa bağlı olarak biyobozunurluğu azalır. Biyoremediasyon sonucunda, toksik yan ürünler oluşturabilir, kirleticiler ilk bulunma durumuna göre daha hareketli hale gelebilir. Bu nedenle izleme çalışmaları gerekli ve önemlidir.

Kısıtlamalar: Kirlenmiş yeraltı suyu uygulamalarında; zemin yapısının heterojen olduğu koşullarda nitrat veya hidrojen peroksitin eşit olarak kirlenmiş bölgeye yayılması zor olabilmektedir. Biyoremediasyonun hızlanması için eklenen kimyasallar (ör.hidrojen peroksit) mikrobiyal enzimler veya topraktaki demir dolayısıyla harcanabilir ve sistemin etkinliğini düşürebilir. Nitrat enjeksiyonu içme suyunda nitrat sınırı dolayısıyla kabul edilmeyebilir. Yeraltı suyunun yeniden yerin altına enjeksiyonu/deşarjı öncesinde tekrar bir arıtma gerekli olabilir.

Kirlenmiş toprak uygulamalarında; toprak yapısı hedef kirletici konsantrasyonlarına ulaşmayı engelleyebilir. Kil, çok katmanlı veya heterojen toprak yapısındaki ortamlarda oksijen transfer kısıtları dolayısıyla bu sistemin uygulanması tavsiye edilmez. Yüksek ağır metal derişimleri, çok klorlu organikler, uzun zincirli hidrokarbonlar ve inorganik tuzlar mikroorganizmalar için toksik olabilir. Düşük ortam sıcaklıklarında biyoremediasyon hızı düşer. Hidrojen peroksit saklama ve kullanımında güvenlik kuralları ön plana çıkmaktadır.

Süre: Geliştirilmiş biyoremediasyon uzun süreli bir teknolojidir. Altı aydan beş yıla kadar sürebilir. Süreyi etkileyen faktörler: (1) kirleticinin türü, toprak/yeraltı suyundaki derişimi, konumu (ulaşılması zor, porozitesi düşük topraklardaki veya kaya çatlaklarındaki kirliliklerin giderimi çok uzun zaman alabilir) ve dağılımı (alan geniş ve derinse süreç uzayacaktır), (2) oksijen kaynağı, nem, sıcaklık, pH, besin kaynağı (3) mikroorganizma eklenme durumu ve mikroorganizmaların kirleticiyi doğrudan enerji kaynağı olarak kullanıp kullanmaması, (4) toprak koşulları (kil, hümik madde varlığı gibi).

Maliyet: Kirlenmiş toprak için teknolojinin uygulanmasında tipik olarak metreküp toprak başına 30-100 USD maliyet tahmin edilmektedir. Maliyete etki eden faktörler: (1) toprak türü ve kimyası, (2) yapılan eklentilerin miktar ve tipi, (3) kirliliğin tip ve kapsamı. Kirlenmiş yeraltı suyu sözkonusu olduğunda, hava enjeksiyonu ile oksijen verilen sistemlerde, arıtılan metreküp yeraltı suyu başına 10 ila 20 USD maliyet gerektirmektedir. Hidrojen peroksit eklenen sistemlerin oksijen eklenenlere göre yaklaşık on katı maliyetinin olduğu belirtilmektedir. Bu sistemlerin işletme giderleri göreceli olarak fazladır çünkü sürekli bir hidrojen peroksit kaynağı kurulması gerekmektedir. Nitrat ile temizlenen sistemlerde arıtılan yeraltı suyundaki yakıtın litresi için 40-60 USD maliyet belirtilmektedir. Biyoremediasyon tipik olarak enerji (ısıtma veya pompa), pahalı kimyasallar veya yerinde gerçekleştirildiğinde hafriyat gerektirmediğinden, özellikle PAHlar ve SVOC ile kirlemiş sahaların temizlenmesinde diğer teknolojilere göre maliyet açısından avantajlıdır.

Uygulama Sırasında dikkat edilecek konular: Bazen biyobozunma sonrasında orijinal kirleticilerin daha toksik ürünlere dönüşmesi sözkonusu olabilir. Örneğin anaerobik koşullarda biyoremediasyon sırasında, çok yaygın kullanımı olan klorlu bir çözücü olan trikloroetilen, çok daha toksik olan vinil klorüre dönüşmektedir. Bu nedenle temizleme sırasında oluşan ürünlerin çok iyi izlenmesi gerekmektedir. Temizleme sürecinin iyi izlenmesiyle vinil klorür aerobik koşullar sağlanarak kolayca zararsız son ürünlere dönüştürülmektedir. Genel olarak biyoremediasyonun ilerleyen aşamalarında oluşan yan ürünler için yeraltı suyunun da arıtılması gerekebilmektedir. Örneğin, petrol hidrokarbonlarının gideriminde yüksek molekül ağırlıklı kanserojen PAHlar (ör. Benzo(a)piren) biyoremediasyon ile düşük molekül ağırlıklı bileşiklere dönüşmektedir. Bu bileşiklerin suda çözünürlüğünün göreceli daha yüksek olması dolayısıyla mobilitesi daha yüksek olduğundan risk teşkil edebilir. Biyolojik aktivitenin sınırlanmaması için besin verilmesi (toprağın azot ve fosfor açısından zenginleştirilmesi için sırasıyla amonyum ve fosfat eklemesi gerekmektedir. Enjekte edilen sıvıların kirleticiler ile temas ettiğinden emin olunmalıdır ve yeraltı suyu sirkülasyonu sağlanarak aktif biyobozunma olan bölgelerden kirleticinin uzaklaşmaması sağlanmalıdır. Hava enjeksiyonu sonrasında vadoz bölgede basınç artışı gözlenebilir, bu durum da civar binaların bodrum katlarında buhar birikmesine sebep olabilir. Biyoremediasyonun hızlandırılması için eklenen su içerisindeki maddeler kirletici hareketini arttırarak yeraltı suyunun da arıtımını gerekli kılabilir. Mikroorganizmalar çeşitli bölgelerde kolonize olarak nütrient ve su enjeksiyon kuyularında tıkanmaya yol açabilir. Hidrojen peroksit saklama ve kullanımında güvenlik kuralları ön plana çıkmaktadır. Yeraltı suyunda yüksek derişimi (100-200 ppm'den yüksek) mikroorganizma aktivitesini olumsuz etkilemektedir.

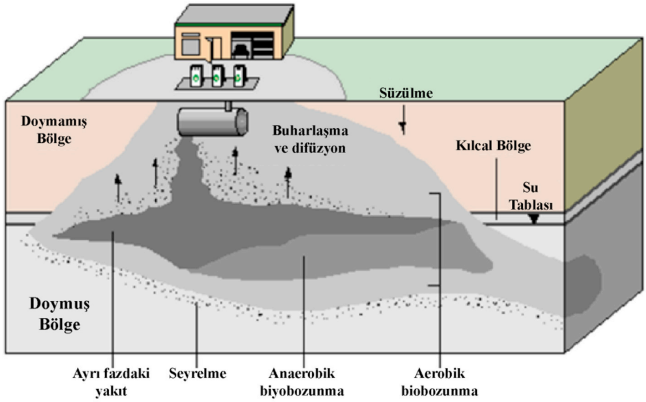
Biyoremediasyon işleminin etkinliğinin denenmesi amacıyla saha çalışması öncesinde laboratuvar ölçekli arıtılabilirlik çalışmaları gerçekleştirilmelidir. Fizibilite çalışmasında tanımlanması gereken önemli kirletici özellikleri süzüntü oluşma potansiyeli (suda çözünürlük ve toprak adsorpsiyon katsayısı), kimyasal reaktivite ve biyobozunurluktur. Petrol hidrokarbonları (benzin veya diğer kolay bozunur bileşikler) ile kirlenmiş olan sahalarda genellikle temsili örnek alınarak toprakta yeterli düzeyde mikroorganizma olduğunun gösterilmesi, besin seviyeleri, pH, geçirgenlik ve nem gibi toprak özelliklerinin belirlenmesi yeterli olabilir, ayrıca biyoremediasyonun fizibilitesinin çalışılmasına gerek olmayabilir. Fizibilite çalışması sonucunda hedef derişime ulaşmak için gereken süre ve parametreler belirlenmiş olmalıdır. Saha ön denemeleri ile açılacak kuyu sayısı, etki çapı ve öncül maliyet değerlendirmeleri yapılabilir. Biyoremediasyon ile temizleme etkinliğinin, süreç öncesinde ve sonrasında alınan derişimler arasında istatistiksel analiz ile gösterimi tercih edilmelidir.

Belirlenmesi gereken toprak özellikleri: kirlenmiş bölgenin derinlik ve yüzey alanı olarak tanımlanması, kirletici konsantrasyonları, toprak tip ve özellikleri (organik madde miktarı, tekstür, pH, geçirgenlik, su tutma kapasitesi, nütrient seviyesi, vb), redoks potansiyeli, başka toksik kirleticilerin varlığı, başka elektron tutucuların derişimi sayılabilir [2] [7]

4.1.8. İzlemeli Doğal Giderim

İzlemeli Doğal Giderim	
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinde
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Yeraltı Suyu
Proses Türü	Biyolojik
Uygulanabilecek kirletici türleri	VOC SVOC Yakıtlar HVOC HSVOC
Maliyet	İzleme yapılacak alanın boyutlarına bağlıdır
Süre	En az 3 yıl sürmesi beklenir
Diğer	Bu uygulamadan kirletici kaynağı temizlendikten sonra en etkin şekilde sonuç alınabilir

Tanım: İzlemeli doğal giderim kirleticilerin, yeraltındaki doğal süreçlerle kabul edilebilir seviyelere takip altındayken indirilmesi anlamına gelir. Doğal giderim "eylemsizlik" anlamına gelmemektedir fakat bu seçeneğin düşünülmesi genellikle, kirleticilerin bozunma derecesi, yayılımı ve özellikle kirletici kütle halinde yayılırken/ yer değiştirirken yeraltında ulaşacağı noktalarında oluşacak konsantrasyonun tahminini gerektirmektedir. Şekil 4.10 ile yeraltında sızdırma yapan bir tanktan yayılan kirleticilerin farklı bölgelerde ve derinliklerdeki doğal giderim mekanizmaları temsili olarak kabaca özetlenmiştir

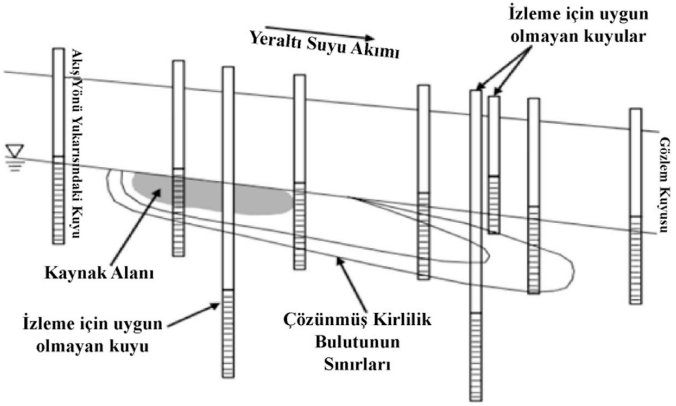


Şekil 4.10 İzlemeli Doğal Giderim Mekanizmalarının Temsili Gösterimi

Bu yöntemde doğal olarak temizlenme beş farklı mekanizma yoluyla gerçekleşir: (1) Biyobozunma: Mikroorganizmalar, doğal yaşam süreçlerinde kirleticileri besin olarak kullanır ve bozunmalarını sağlar. (2) Soğurulma: Kirleticilerin bir bölümü, yüzeyaltı toprak partiküllerine yapışarak tutunur. Bu sayede kirleticiler yok olmaz fakat daha

derine ilerleyemez veya yeraltı suyuna karışarak taşınamaz. (3) Buharlaşma: Benzin/solvent gibi bazı uçucu nitelikteki maddeler, faz değiştirerek zemin yüzeyinden buhar halinde havaya karışır. Böylelikle hava ile seyrelmiş olan kirleticiler, gün ışığı ile de bir miktar bozunmaya uğrar. (4) Kimyasal Reaksiyonlar: Kirleticiler, yeraltında doğal olarak kimyasal bozunmaya uğradıklarında daha az zararlı olan kirletici formlara dönüşebilirler. (5) Seyrelme: Kirleticiler yeraltında doğal olarak karışım ve bozunmaya maruz kaldığında kirletici konsantrasyonunda azalma meydana gelir [2].

Gerçekte yeraltındaki jeolojik yapının karmaşıklığı nedeniyle kirleticilerin dağılımı ve yeraltındaki davranışlarının kesin sınırlarla ayrılması mümkün değildir. Yerin altında farklı bölgelerde farklı şekilde dağılımlar ve farklı giderim mekanizmalarının tespit edilmesi amacıyla modelleme çalışmaları gerçekleştirilmesi, kirleticilerin potansiyel maruziyet yollarına erişmesinden önce konsantrasyonlarının temizleme hedefi seviyesine düşeceğinin belirlenmesi için gerekmektedir. Ayrıca bozunmanın temizleme hedefleri ile orantılı olarak ilerlediğini doğrulamak amacı ile uzun süreli ve kapsamlı bir izleme süreci gerçekleştirilmelidir. Aşağıdaki görselde Şekil 4.10'dakine benzer bir dağılım gösteren kirleticinin izlenmesi için açılan kuyular gösterilmektedir.



Şekil 4.11 İzleme Kuyusu Ağı ile Kirletici Dağılımının Durumuna Genel Bir Örnek

Şekil 4.11'de görülebileceği gibi, tüm sondaj kuyuları kirleticinin dağılımının izlenmesinde uygun vazife görmeyebilir. Kirliliğin yeraltında ilerlerken kat ettiği mekanizmalar (bozunma, soğurulma, stabilizasyon, yer değiştirme vs.) izleme kuyularında kirliliğin doğru şekilde tespit edilebileceği yatay ve dikey eksendeki doğrultuları etkilemektedir. İzlemeyi gerçekleştirirken kirliliğin yapısını ve hareketlerinin doğru analiz edilerek ilerlenmesi bu nedenle çok önemlidir.

Uygulanabilirlik: Doğal giderim için hedef kirleticiler VOC, SVOC ve yakıtlardır. Pestisitler için kullanılabilir olsa da, süreç daha az etkili ve sadece bazı pestisitler için uygulanabilirdir. Ayrıca, doğal giderim süreci metallerin değerliğini de değiştirebileceğinden krom benzeri bazı metaller için de uygun olabilir. İzlemeli doğal giderim en verimli olarak kirlilik kaynağının ortadan kaldırıldığı durumlarda

çalışır. Biyolojik ayrışmanın oluşmasını sağlayan doğru koşulların varlığında etkili bir temizleme yöntemi olarak kabul edilir. 1988 yılından beri uygulanmakta olan bir tekniktir. Sadece birkaç yüzey kurulumu gerektirdiğinden, doğal sisteme az müdahale eden bir tekniktir. Saha koşullarına ve temizleme hedeflerine bağlı olarak, diğer iyileştirici teknolojilerle birlikte ya da birbirini takip ederek, belirli bir sahanın tamamına veya bir kısmına uygulanabilir. Diğer iyileştirme teknolojilerine göre daha az kalıntı, atık üretimi oluşturur.

Kısıtlamalar: Bu tekniğin veri gereksinmesi yüksektir. Modelleme için giriş parametreleri olarak kullanılan verinin (toprak ve yeraltı suyu kalitesi, serbest, kalıntı ve çözünmüş fazdaki kirleticilerin üç boyutlu dağılımı, zamanla değişken kirletici konsantrasyonları gösteren tarihsel su kalitesi verileri, kirleticilerin fiziksel/kimyasal karakteristikleri, biyolojik bozunma potansiyelini belirlemek için jeokimyasal veriler, potansiyel alıcıların konumu, yeraltı suyu kuyuları, yüzey suyu deşarj noktaları vb.) toplanması gereklidir Ara parçalanma ürünleri daha hareketli ve asıl kirleticiden daha toksik olabilir. Doğal giderim, tehdit oluşturan saha risklerinin mevcut olduğu yerler için uygun değildir. Kirletici bozunma derecesi, kirletici türleri ve konsantrasyonları, sıcaklık, nem, besin/elektron alıcıların varlığı gibi çeşitli parametrelere bağlıdır (örneğin: oksijen, nitrat). Kirletici seviyeleri azalana saha kadar yeniden kullanılamayabilir. Birçok potansiyel tedarikçi doğal giderimin izlenmesi için gerekli modelleme, örnekleme ve analizleri gerçekleştirebilmesine rağmen bu tekniğin hayata geçirilmesi basit değildir ve mikrobiyoloji/biyoremediasyon, hidrojeoloji ve jeokimya dâhil olmak üzere birçok teknik alanda uzmanlık gerektirir [2].

Süre: Bu teknik ile bir sahanın temizlenmesi birkaç yıl sürebilir. Temizleme süresi çeşitli faktörlere bağlıdır. Örneğin kirletici konsantrasyonu yüksekse, kirlenmiş alan genişse temizleme süresinde artış beklenir. Doğal koşulların elverişli olması (toprak yapısı, pH, nem seviyesi, mikroorganizmaların varlığı vs.) sistem verimini olumlu etkiler ve giderim süresini kısaltır. Diğer temizleme teknolojileri ile karşılaştırıldığında, iyileştirme hedeflerine ulaşmak daha uzun zaman alabilir.

Maliyet: Saha karakterizasyonu ve performans izleme, doğal giderim ile ilgili en önemli maliyetlerden ikisini oluşturmaktadır. Saha karakterizasyonu, kirletici ve kirletici bozunma oranlarının derecesini belirlemektedir. Performans izlemeyle ise, kirleticilerin taşınmasını, bozunmasını ve temizlenme durumu takip edilir. Sistem maliyetleri, uygulamanın süresine, izlenecek parametrelere bağlı olarak numune sayıları ve frekansları ve analiz maliyetlerine bağlı olarak çok fazla değişkenlik gösterebilir.

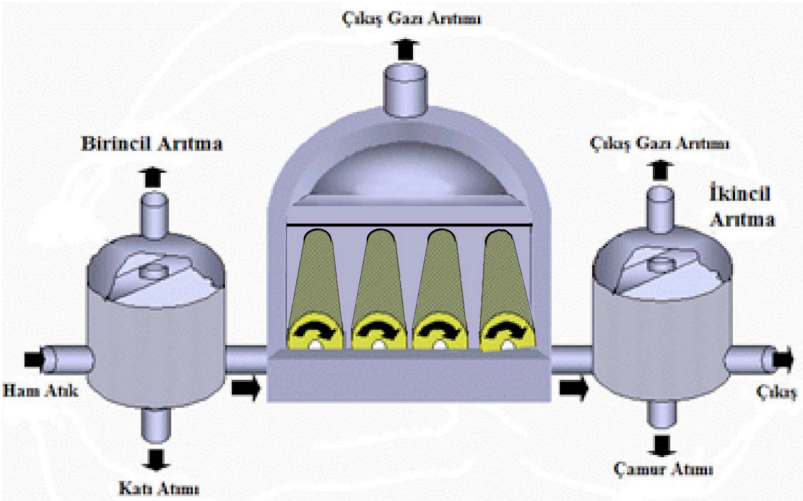
Uygulama Sırasında dikkat edilecek konular: İzleme çalışmaları; hidrolojik ve jeokimyasal koşullardan etkilenen doğal giderim zaman içinde değişebileceği, daha önce sabitleşmiş olan kirleticilerin yeniden hareketlenme olasılığı, kirleticilerin parçalanmadan başka bir yere göç etme ihtimali, göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmelidir. Eğer serbest fazda ürün varsa ilk olarak serbest fazın ortadan kaldırılması gerekebilir. Sistemin modellemeye benzer şekilde çalıştığından, kirlilik gideriminin yeterince hızlı bir şekilde temizleme hedeflerine ulaşıp yayılmadığından ve insan sağlığına ve çevreye karşı koruyucu olduğundan emin olmak için saha düzenli olarak izlenmelidir. İzlemeli doğal giderim sahada hafriyat yapılmayacağından emisyonlarda artış ile işçiler veya civar halkın maruziyetinde artışa sebep olmaz [10] .

4.1.9. Biyoreaktör

Biyoreaktör	
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinden alınarak
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Yeraltı Suyu
Proses Türü	Biyolojik
Uygulanabilecek kirletici türleri	SVOC* VOC* Yakıtlar Patlayıcılar HVOC
Maliyet	9,5 – 44 USD/metreküp
Süre	En az 3 yıl

*VOCler ve SVOClerle kirlenmiş sahalarda başarısı kanıtlanmış, önerilen teknolojidir.

Tanım: Biyoreaktörler sudaki kirleticileri, tutunmuş veya askıda sistemlerdeki mikroorganizmalar yardımı ile giderimde kullanılan teknolojilerdir. Askıda büyüyen sistemlerde (örn. akışkan yataklı veya ardışık kesikli reaktörler) kirlenmiş yeraltı suyu, mikrobiyal popülasyonun organik maddeyi aerobik olarak ayrıştırıp; CO_2, H_2O ve yeni hücreler ürettiği bir havalandırma tankında dolaşır. Bu hücreler havalandırma tankında bir çamur oluşturur ve bu çamur geri dönüştürülür ya da dışarı atılır. Sabit büyüme sistemlerinde (örn. yukarı akışlı sabit filmli biyoreaktör, döner biyodisk, damlatmalı filtreler) mikroorganizmalar suyu kirleticilerden ayrıştırmak için inert destek yapısı üzerinde gelişir ve tutunur. Biyoreaktör sistemlerinde bazı iyileştirmeler yapılabilir (örn. aktif karbon eklemesi) Mikroorganizamaların gelişmesini desteklemek nütrient eklenmesi de mümkündür. Şekil 4.12.'de örnek olarak döner biyodisk tipi bir reaktörün bileşenlerinin gösterildiği işletme şeması mevcuttur.



Şekil 4.12 Döner Biyodisk tipi Biyoreaktör Prosesi Genel Arıtım Şeması

Uygulanabilirlik: Biyoreaktörler evsel ve endüstriyel atık suların arıtımında uzun yıllardır kullanılan gelişmiş teknolojilerdir. Kirlenmiş yeraltı suyunun arıtımında SVOC, yakıt hidrokarbonları ve biyolojik olarak parçalanabilir herhangi bir organik maddeyi arıtmak için kullanılmaktadır. Bu işlem bazı pestisitlerde daha az etkili olabilir. Bazı halojenlenli bileşikler (ör. PCP, klorobenzen ve diklorobenzen izomerleri) için başarılı pilot ölçekli saha çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kometabolit içeren biyoreaktörler; yerinden alınan yeraltı suyunu PCB, HVOC ve HSVOC tipi kirleticilerden arıtmak için kullanılabilir. Biyoreaktör teknolojisi on yıllardır evsel ve endüstriyel atıksuların arıtımında uygulanmakta olan bir teknolojidir. On yıldan fazladır da kirlenmiş sahalardan alınmış yeraltı sularının arıtımı için kullanılmaktadır

Kısıtlamalar: Biyoreaktörde uygun mikrobiyal koşulların sağlanması ve kirlenmiş yeraltı suyuna aklime olması zaman alabilir. Düşük ortam sıcaklıkları biyolojik ayrışma oranını önemli ölçüde düşürerek daha uzun temizleme süreleri veya ısıtma için artan maliyetlere neden olur. Bazı istenmeyen ve sistemin giderim verimini düşüren mikroorganizmalar biyoreaktörlerde büyüyebilir.

Süre: Temizleme süresi sahadaki yeraltı koşullarına ve kirleticilerin yeraltındaki katı fazdan desorpsiyon kolaylığı/zorluğuna bağlıdır. Biyoreaktör teknolojileri ile temizleme uzun süreli bir süreçtir. Eğer organizmaların iklime alışması gerekiyorsa, başlangıç zamanı yavaş olabilir ancak daha önce belirli tehlikeli atıklar adapte edilmiş kültürlerin varlığı/kullanımı, başlangıç ve bekleme süresini azaltabilir.

Maliyet: Verilen atığın KOİ'si öncelikli maliyet etmenidir. İkincil etmen ise atık akımının pH'ını nötralize etmek için gerekli asit / baz miktarıdır. Sistem maliyetleri arıtılan metreküp kirlenmiş su bazında 9,5 USD ile 44 USD arasında değişebilir.

Uygulama Sırasında dikkat edilecek konular: Seyreltilmiş haldeki kirlenmiş yeraltı suyu, genellikle mikrobiyal popülasyonu yeterli olarak desteklemez ve bu özellikle askıda büyüme reaktörleri için geçerlidir. Sisteme nütrient ilavesi gerekli olabilir. Çok yüksek kirletici konsantrasyonları mikroorganizmalar için toksik olabilir ve özel tasarım yöntemleri gerektirebilir. Aktif çamur tipi sistemlerde buharlaşmanın olması durumunda hava kirliliği kontrolleri de gerekebilir. Çamur süreçlerinden artakalanların arıtılması ya da bertarafı ayrıca gözetilmelidir. Biyoreaktör çıkışındaki temizlenmiş yeraltı suyunun deşarjı izin gerektirebilir [2].

4.1.10. Yapay Sulak Alan

Yapay Sulak Alan	
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinden alınarak
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Yeraltı Suyu
Proses Türü	Biyolojik
Uygulanabilecek kirletici türleri	İnorganikler Patlayıcılar
Maliyet	İşletme süresine göre değişecektir
Süre	10 yıldan fazla

Tanım: Yapay sulak alan doğal jeokimyasal ve biyolojik prosesleri bir ekosistemde toplayan bir yöntemdir. Proseste filtrasyon ve biyobozunma mekanizmaları kullanılır. Her ne kadar temizlemede tüm sulak alan ekosistemi kullanılsa da, arıtmanın büyük bölümünü sistemdeki mikroorganizmalar gerçekleştirir. Yüksek metal konsantrasyonu, düşük pH değerine sahip sular sulakalan ekosisteminin aerobik ve anaerobik bölümlerinden geçerken çeşitli fizikokimyasal prosesler ile temizlenir. Temsili bir yapay sulak alanın yanal kesiti, giderim mekanizmaları ile birlikte Şekil 4.13'de gösterilmiştir.



Şekil 4.13 Yapay Sulak Alan Temsili Gösterimi

Uygulanabilirlik: Yapay sulak alan, atık su arıtımında organik maddelerin, azot ve fosfor gibi nütrientlerin ve askıda katıların gideriminde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Ayrıca eser metallerin ve toksik maddelerin kontrol edilmesinde de etkilidir. Metal veya kömür madenciliğinde asit maden drenajının arıtılmasında kullanılmaktadır. Bu tip atıklar asidik tipte yüksek metal konsantrasyonları içermektedir. Yapay sulak alan prosesi nötr veya baz nitelikleri çözeltilerin arıtılması için adapte edilebilir. Yerinden pompalanarak çekilen yeraltı suyunda metallerin gideriminde etkili bir yöntemdir. Atıksu arıtımında kullanımı hakkında geniş literatür bilgisi mevcuttur. Yapay sulak alan ile kirlenmiş yeraltı suyunun temizlenmesi 1993 yılından beri pilot ölçekte başarıyla uygulanabilmektedir. Mühimmat atıklarının, patlayıcıların vs. gideriminde kullanılabildiği bilinmektedir.

Kısıtlamalar: Yapay sulak alanların uzun dönem etkinliğini tahmin etmek zordur. Zamanla sulak alanın arıtma veriminde düşüş olacaktır. Debi değişiklikleri ve sıcaklık

farkları düzenli olmayan giderim verimine yol açabilir. Soğuk hava şartları sistemi olumsuz etkiler. Yüksek giriş debileri giderim mekanizmalarına aşırı yüklenmeye neden olur, düşük giriş debileri ise bitkilerin kurumasına ve sulak alanın fonksiyonlarının zayıflamasına neden olur. Mühendislik faktörünün az olduğu, kontrol edilemeyen doğa şartları ile işleyen bir proses olması, proses giderim verimini tahmin etmeyi zorlaştırmaktadır, düzenli numune takibi ile sistem izlenmelidir.

Süre: Sulak alan teknolojisi yıllarca işletilmesi mümkün olan uzun süreli bir teknolojidir. Maliyet hesaplamalarında, 10 yıllık ve 30 yıllık işletme verileri kullanılarak geliştirilen maliyet tahminleri mevcuttur. Dolayısıyla en az 3 yıl olmak üzere, onlarca yıl sürebilecek bir teknoloji olduğu unutulmamalıdır.

Maliyet: Yapay sulak alan kurulumu proje bazında fazlaca değişkenlik gösterebilir ve pek çok saha için maddi olarak uygun olmayabilir. Çalışmalar yapay sulak alan işletmesinin maliyetinin işletme süresinin bir fonksiyonu olarak 3,6 USD.yıl/maliyet olduğunu göstermiştir. 10 yıllık bir işletmenin toplam maliyeti 0,36 USD/metreküp olurken, 30 yıllık bir işletmenin maliyeti ise 0,12 USD/metreküp/yıldır.

Uygulama sırasında dikkat edilecek konular: Bu yöntem ile giderimin mümkün olup olmadığının anlaşılması için laboratuvar ve pilot ölçekli çalışmaların yapılması gereklidir. Sistemin düzenli olarak izlenmesi, performans değişikliklerine göre tasarıma müdahaleler yapılması gerekli olabilir. Sistemin en belirgin mühendislik kontrol faktörü olan besleme debisinin laboratuvar çalışma performansına göre yönetilmesi uygun olur. Tesisin işletme ve bakımında sürekli bir çalışan gereklidir. Su girişinde veya sistem içi çökelmeler nedeniyle yaşanabilecek tıkanıklıklar belirli bölgelerde homojen olmayan birikmelere yol açı sistem verimini düşürebilir, tıkanık oluşmadığından emin olunmalıdır. Sistemin üzeri açık olduğu için, sulak alan yakınında haşerat, böcek vs. üremesinin takip edilmesi ve çevreye rahatsızlık vermemesi için kontrol altında tutulması gerekmektedir [2].

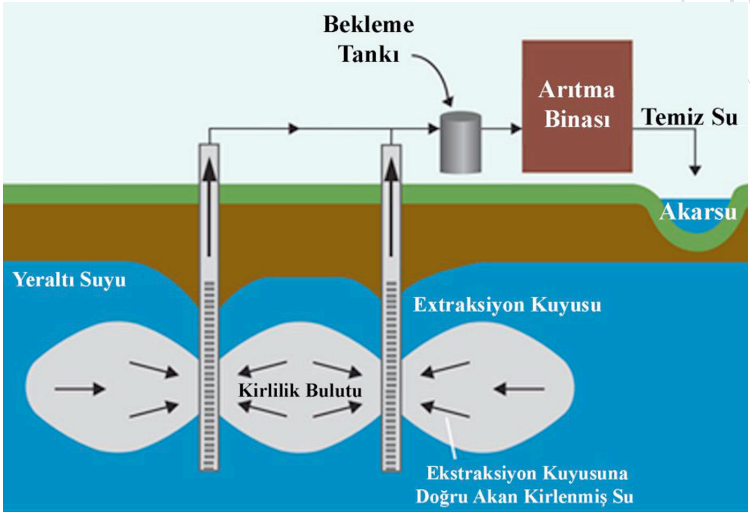
4.2. Fiziksel/Kimyasal Prosesler

4.2.1. Yeraltı Suyu Pompalama

Pompaj Ve Arıtma	
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinden alınarak
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Yeraltı Suyu
Proses Türü	Fiziksel
Uygulanabilecek kirletici türleri	Tüm kirleticiler
Maliyet	Yeraltı suyu pompalama miktarı ve seçilen arıtma teknolojisine göre çok değişiklik gösterir
Süre	En az 3 yıl

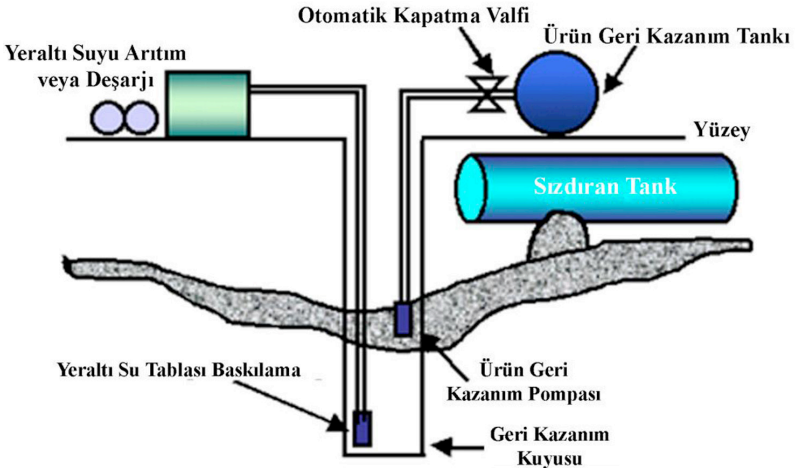
Tanım: Yeraltı suyu ekstraksiyon kuyularından çekilerek ya doğrudan arıtma sistemine gönderilir veya arıtmaya gönderilmek üzere bekleme tankına alınır. Arıtma sistemi tek bir yöntemden oluşabileceği gibi çoğu kez yüksek konsantrasyonlarda kirlilik ve/veya farklı kirletici gruplarının bulunması nedeniyle farklı arıtma işlemlerinin kombinasyonundan oluşur. Pompalama ve arıtma yöntemleri yeraltı suyunun çekilmesi için bir veya daha fazla kuyu kurulumunu içerir. Yeraltı suyu pompalamanın hedefleri yüzey altında çözünmüş kirleticilerin giderilmesi, kirli yeraltı suyunun hapsedilmesi ve kirliliğin yer değiştirmesinin engellenmesidir. Gerçekleştirilmesi mümkün pek çok pompaj ve arıtma seçeneği içerisinde hangisinin en uygun olduğuna karar vermek için ilk olarak doğrudan kaynağa müdahale edilmesinin mi yoksa kirliliğin hapsedilmesinin mi en uygun seçenek olduğuna karar verilmelidir. Hapsetme seçeneğinde, yeraltı suyunun pompalanması kirletici akımlarının saha dışına göç etmesini engellemek için hidrolik bariyer olarak kullanılır, yeraltından çıkartılan suyun da ayrıca arıtılması gerekir. Eğer temizleme seçeneğine karar verilmişse, temizleme seviyesi belirlenmelidir. Temizleme seçeneğinde, çeşitli proseslerin bileşimi olan arıtma sistemleri kullanılabilir. Yeraltı suyu için gereken temizleme verimine ve kirliliğin durumuna göre, yeraltı suyu için yerinden alınarak uygulanabilen tüm temizleme teknolojileri (Bkz. Şekil 2.2) pompalanıp yüzeye çıkartılan kirlenmiş yeraltı suyu için uygulanabilir. Yeraltı suyunun yerinden alınmasının bir diğer bileşeni proses etkinliğinin kanıtlanması için uygulanacak izleme programıdır. Yeraltında kalan bölümün kuyular ve piezometreler yardımı ile izlenmesi, operatörün yeraltında değişen koşullara karşılık olarak sistemde değişiklikler yapabilmesine olanak sağlar [11]. Pompalama-arıtma teknolojisinin çeşitli uygulama yöntemleri bulunmaktadır:

Su tablasının baskılanması, NAPL geri kazanımında suyla karışmayan fazı pompalamak ve geri kazanım kuyularından yeraltı suyunun çekilmesini kapsamaktadır. Pompalama ile yeraltı suyu çekilir ve ekstraksiyon alanı etrafındaki su tablasını düşürerek depresyon konisi oluşturur. Su yüzeyindeki NAPL düşüm konisine doğru hareket eder ve kuyu içerisindeki NAPL seviyesi yükselmiş olur. Bu noktadan çekilen NAPL arıtmaya gönderilir. Şekil 4.14'te bu tekniğin bir örneği gösterilmektedir.



Şekil 4.14 Su Tablasının Baskılanması ile Pompala-Arıt Tekniği

Serbest Ürün Geri Kazanımı prosesi, sıvı fazda çözünmemiş organikler için özellikle 20 santimetreden yüksek yakıt hidrokarbon katmanının su tablası üzerinde olduğu durumda kullanılır. Serbest ürün genellikle pompa sistemi ile yüzeye çıkartılır. Serbest ürün çekildikten sonra, içeriğine göre bertaraf edilebilir veya yeniden kullanılabilir. Sadece ürünün, ürünle birlikte suyun veya ürün ile suyun ayrı ayrı çekildiği sistemler mevcuttur. Arıtma nedeniyle çamur ve kullanılmış filtreler gibi atıkların oluşabilir.



Şekil 4.15 Pompalama ve Arıtma Teknigi ile Serbest Ürün Geri Kazanımı

Yüzey aktif madde ile geliştirilmiş geri kazanım prosesi kirli akifere yüzey aktif maddelerin enjekte edilmesi ile gerçekleştirilir. Yüzey aktif maddelerin yeraltı suyuna enjekte edilmesi, toprak ortamına tutunmuş olan kirleticilerin hareketliliğini ve çözünürlüğü arttırmayı hedefler. Yeraltı suyu, enjeksiyon noktasından biraz uzakta dışarı pompalanır, yüzey aktif maddeler ve kirleticiler yerinden alınarak arıtma ile temizlenir. Çok fazlı kirleticilerin etkin şekilde giderimi için hidrofobik bileşenlerin enjekte edilmesi de bu yöntem ile mümkündür. Bu sayede, çekilen su içerisindeki kirletici madde kütlesinde artış sağlanarak daha etkin temizleme gerçekleştirilmiş olur [2].

Uygulanabilirlik: Pompalama ve arıtma, yeraltı suyu kirliliğine neden olan kaynak (sızıntı yapan tanklar, kirlenmiş toprak, vs.) temizlendikten veya sahadan kaldırıldıktan sonra uygulanan bir tekniktir. Çözünmüş kimyasallar, endüstriyel solventler, metaller ve fuel oil kirliliğinin temizlenmesinde kullanılan bir yöntemdir. Ayrıca, kirlilik akımının saha dışına çıkıp su kaynaklarına karışmaması için hapsetme amacıyla da kullanılır. Yüzey aktif madde ile iyileştirilmiş geri kazanım, yüksek yoğunlukta DNAPL kirliliğinde tercih edilir. Su tablası baskılama, yüksek hidrolik iletkenliğe sahip akiferlerde ve düşük akışkanlığa sahip kalın NAPL katmanının geri kazanımında etkilidir. En iyi işletme mekanizması için NAPL kalındığı pompanın emiş portunu örtecek kadar olmalıdır. Yüksek bakiye doygunluğuna sahip kirleticilere ve hidrolik iletkenliği 10^{-5} cm/sn'den düşük olan homojen akiferlerde uygulanamaz. Toprak kirliliği ortadan kaldırıldıktan sonra yeraltı suyunda var olup saha dışına akış yapan kirliliğin uzun yıllara yayılan temizlenmesinde tercih edilebilir bir sistemdir. Pompalama ve arıtma yeraltı suyu için en sık kullanılan temizleme yöntemidir. Geçtiğimiz 20 yıl içerisinde pek çok pompala-arıt yöntemi geliştirilmiştir. Konvansiyonel pompa, kuyu ve hendekler ile gerçekleştirilebilen, ticari olarak kolaylıkla temin edilebilir teknolojiler içeren bir yöntemdir. Çift faz ekstraksiyonu da bu teknikle aynı prensipte çalışan tam ölçekli bir teknolojidir.

Kısıtlamalar: Yeraltı suyu pompalamanın gerekli olup olmadığının belirlenmesi için saha karakterizasyon çalışması yapılmalıdır. Pompalama işlemi için strateji belirlenmesi için hidrolik iletkenlik, kirlilik bulutu (plume) yapısının üç boyutlu belirlenmesi, kirlilenme olayının tarihçesi, yeraltının fiziko-kimyasal özellikleri ve jeolojik yapısı, kirleticinin biyolojik ve kimyasal karakteristikleri, akifer ve toprak özellikleri bilinmelidir. Ektraksiyon kuyularının ve bağlı arıtma sistemlerinin mikroorganizma aktivitesi nedeniyle kirlenmesi sistem performansını olumsuz etkileyebilir. Bu problemin oluşması ihtimali kurulum öncesinde değerlendirilmelidir. Yüzeyaltı heterojen yapısı yüzeyaktif geliştirilmiş geri kazanım yönteminin başarıyla uygulanmasını zorlaştırır. Yüzey altında kalıntı yüzey aktif maddeler toksik etki gösterebilir. Yeraltına enjekte edilecek yüzey aktif maddelerin seçiminde yeraltı suyu mevzuatına uyum sağlanması ve ilgili kurumlardan görüş alınması önemlidir. Seviye düşürme serbest ürünün geri kazanımı sürecinde büyük hacimlerde su açığa çıkartır. Depresyon kuyusunun eski haline dönmesi su tablasında doygun bölgeye serbest ürün tutunmasına neden olabilir. Kuyu tasarımı, pompalama sistemi ve temizleme için kriterler fiziksel saha karakteristiklerine ve kirletici tipine bağlıdır.

Süre: Pompalama-arıtma yöntemi ile bir sahanın temizlenmesi birkaç yıldan, onlarca yıla kadar sürebilir. Temizleme süresi sahaya özel faktörlere bağlı olarak değişir. Kirletici konsantrasyonlarının yüksek olduğu, kirletici kaynağının tamamen yok edilmediği durumlarda, kirletici bulutunun büyük olması halinde ve yeraltı suyu

akışının düşük olduğu veya akış yolunun karmaşık olduğu durumlarda temizleme işlemi daha uzun zaman alır.

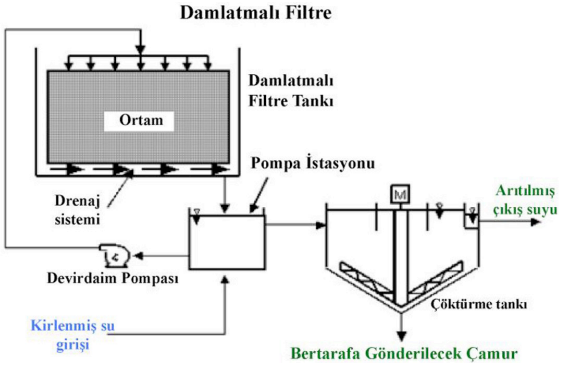
Maliyet: Maliyet verileri sahadan sahaya yeraltı suyu pompalama ve seçilen arıtma teknolojisine göre çok değişiklik gösterir. Su tablası baskılama sistemi kurulum maliyetleri düşük-orta kabul edilebilir, NAPL geri kazanımına göre de maliyetler değişebilir. Arıtma sistemi için izin alma, tedarik ve işletme süreçleri yüksek maliyetlidir. Ayrıca yeraltı suyunun temizlenmesi için harcanacak malzeme (ör. aktif karbon) ve arıtma atıklarının (ör.kullanılmış aktif karbon, çamur, vd) bertarafı ek maliyet oluşturur.

Uygulama Sırasında dikkat edilecek konular: Pompalama işlemi kirliliği yer üstüne çıkartmasına rağmen kişileri kirleticiye maruz bırakmaz. Sahaya yakın ikamet eden veya çalışan kişiler sistemin kurulması aşamasında sondaj kuyularının açılması ve malzemelerin sahaya taşınmasında artan kamyon trafiğinden etkilenebilir. Sondaj esnasında gürültü kirliliği oluşması beklenir. Arıtma sistemlerinin gürültü kirliliğinin en aza indirilmesi de önemlidir. Uzun süreli sistemler olduğu için temizleme esnasında saha üzerinde faaliyetlerin devam edeceği şekilde tasarımlar gerçekleştirilmelidir. Örneğin, arıtma sistemi faaliyet alanından uzakta bir alanda kurulabilir Görüntü kirliliği yaratmaması açısından arıtma sisteminin etrafı kapatılabilir. Sistemin (ekstraksiyon kuyuları ve arıtma tesisi) tasarıma uygun olarak işleyip işlemediğinin kontrol edilmesi için düzenli olarak izlenmesi gerekir. Ayrıca, kirletici bulutunun azaldığını ve yayılmadığını kontrol etmek için yeraltı suyundan düzenli olarak numune alınmalıdır. Tahmin edilen oranda kirleticiye ulaşılamaması, kirliliğin yer değiştirmesi ve pompaj ekipmanının arızalanması gibi durumlar temizleme süresini daha da uzatır. Kirleticiler toprağa tutunma eğilimi gösterir ve bu yöntem kullanılarak toprak gözeneklerine yerleşen bakiye kirlilik temizlenemez. Yüzey aktif maddelerin akifere verilmesi ile çözünürlüğü artan kirleticilerin saha dışına çıkartılmasına çalışılabilir. Pompalanan su genellikle su arıtma sistemine verilir. Yeraltından çıkartılan suyun nasıl ve nereye deşarj edileceği konusu kritiktir, sahaya özel işletme koşullarına bağlı olarak otoritelerden alınan görüşe görer karar verilmelidir [11] [2].

4.2.2. Yağmurlama Sulama

Yağmurlama Sulama	
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinden alınarak
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Yeraltı Suyu
Proses Türü	Fiziksel
Uygulanabilecek kirletici türleri	VOC HVOC
Maliyet	Bilgi bulunmamaktadır.
Süre	Bilgi bulunmamaktadır.

Tanım: Yağmurlama sulama kirlenmiş sudaki uçucu organik bileşikleri gaz fazına geçirmeyi hedefleyen basit bir temizleme teknolojisidir. Prosesin temelinde VOC içeren suyun basınçlı şekilde yağmurlama sistemine verilmesi yer alır. Yağmurlama sulama sistemi VOCleri çözünmüş sıvı fazdan gaz fazına geçirir böylelikle VOCler doğrudan atmosfere salınmış olur.



Şekil 4.16 Yağmurlama Sulama Yönteminin Arıtma Sistemine Entegrasyonuna Örnek

Uygulanabilirlik: Yağmurlama sulama çözünmüş fazdan buhar fazına kolaylıkla geçebilecek herhangi bir kirletici (halojensiz ve halojenli VOCler) için uygulanabilir. Hedef kirleticiler VOCs, SVOCs, yakıt, patlayıcılar ve pestisitlerdir. Yağmur sulama yeni sayılabilecek bir proses olduğu için hakkında çok az detaylı bilgi mevcuttur. Atıksu arıtımında kullanılan damlatmalı filtre düzeneğiyle entegre edilerek uygulanması sözkonusu olabilir.

Kısıtlamalar: Bu proses ile kirleticilerin atmosfere doğrudan salınması söz konusu olduğundan mevzuat gereği gerekli izinlerin alınması sorun teşkil edebilir. Metallerle kirlenmiş yeraltı suyuna uygulanamaz. Sistem performansı sıcaklıktan etkilenir. Hava emisyon yönetmelikleri sıkılaştıkça bu yöntem geçersiz hale gelebilir.

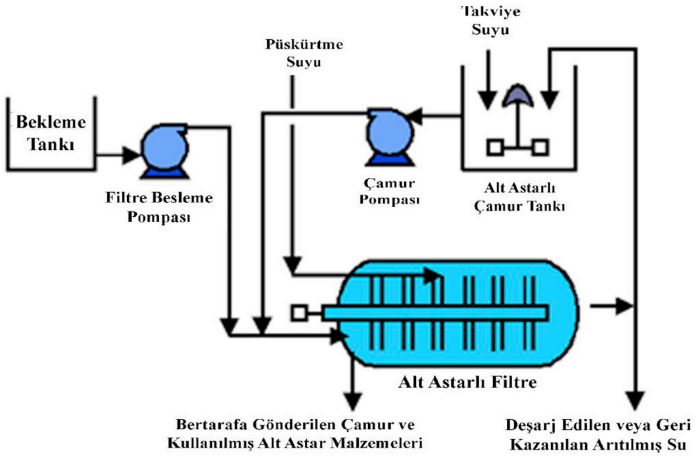
Süre ve Maliyet: Prosesin maliyet ve süresine yönelik yeterli veri bulunmamaktadır. Saha koşulları ve malzeme miktarına göre değişkenlik gösterir.

Uygulama sırasında dikkat edilecek konular: Hızlı sulama nedeniyle atık su birikintileri, göletlenme oluşabilir [2].

4.2.3. Ayırma

Ayırma	
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinden alınarak
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Yeraltı Suyu
Proses Türü	Fiziksel/Kimyasal Arıtma
Uygulanabilecek kirletici türleri	HVOC HSVOC Yakıtlar
Maliyet	0,36-1,20 USD/metreküp
Süre	3 Yıl – 10 yıl
Diğer	Ön arıtma veya son arıtma olarak kullanılır.

Tanım: Ayırma teknikleri, kirlenmiş yeraltı suyunun veya toprağın temizlenmesinde fiziksel veya kimyasal yöntemlerle kirleticileri konsantre ederek bağlı oldukları ortamdan ayrılmalarını sağlar. Yeraltı suyunun kirleticilerden ayrılmasında; distilasyon, filtrasyon/ultrafiltrasyon/mikrofiltrasyon, kristalizasyon, membran pervaporasyon, ters ozmoz gibi alternatifler kullanılabilir. Yerinden alınarak kirlenmiş topraktan kirleticilerin ayrılması için ise manyetik kuvvetler, yerçekimi kuvveti veya eleme uygulanabilir. Atıksu arıtma tesislerinden tecrübe edilen çöktürme ve eleme topraktaki kirleticileri ayırmak için kullanılabilir. Manyetik ayırma tekniği ise henüz geliştirilmekte olan bir tekniktir [2].



Şekil 4.17 Yeraltı Suyunun Filtrasyon ile Ayrılması Şematik Gösterim

Uygulanabilirlik: Toprakta ayırma, yaygın olarak kullanılan bir temizleme teknolojisi değildir. Bu yöntem ile yeraltı suyundan VOC, SVOC, pestisitler ve askıda katı maddeler giderilebilir. Solventler yeniden kullanılmak üzere geri kazanılabilir. Toprakta yerinden alınarak ayırma prosesinin hedef grubu SVOC, yakıtlar ve

inorganiklerdir, ayrıca VOCler ve pestisitlerin giderilmesinde de uygulanabilir. Manyetik ayırma ile özellikle ağır metallerin giderilmesi mümkündür. Kimyasal ekstraksiyon öncesinde özellikle fiziksel ayırma uygulanır. Kirliliğin çoğunun ince partiküllerde olduğu varsayımıyla bu özellikle önemlidir. Yeraltı suyunun yerinden alınarak ayırma işlemine tabi tutulması kirli sudan kirleticileri ayırmak için bir ön arıtma veya son arıtma niteliğindedir. Endüstriyel atıksular da bu proses kullanılarak arıtılabilir. Çöktürme ve eleme tam ölçekli yerleşik teknolojilerdir. Çoğunlukla atıksu arıtımı ve çamur arıtımında yaygın olarak kullanılan teknolojilerdir. Manyetik ayırma topraktan radyoaktif atıkların ayrılmasında geliştirilmekte olan bir teknolojidir.

Kısıtlamalar: Partikül boyutu dağılımı, toprak tipi, fiziksel yapı, nem içeriği, kirletici türü ve konsantrasyonu, toprak yapısı ve organik içerik, bu proses için önemli olan kriterlerdir. Toprağın çöktürme yöntemi ile ayrılmasında yüksek kil ve nem içeriği temizleme maliyetini arttırır. Ayrılan toprak halen daha kirleticileri içermektedir, sadece daha konsantre olmuş durumdalardır. Bu nedenle tek başına bir temizleme teknolojisi değildir.

Yeraltı suyunun çeşitli proseslerde ayrılmasında ise yağ ve gres konsantrasyonları akış hızını yavaşlatarak proseslere girişim yapabilir. Distilasyon ve kristalizasyon sistemleri için uygun alanın bulunması gereklidir (distilasyon üniteleri yüksek olabilir ve geniş alan gereksinimi olabilir), işletme sıcaklıklarında bozunan, polimerize olan veya patlama riski taşıyan bileşiklerin distilasyon işlemine tabi tutulması önerilmez.

Süre: Ayırma prosesi kısa-orta vadeli kabul edilebilir, bu da bir yıla kadar uzanan bir süreye karşılık gelmektedir [1].

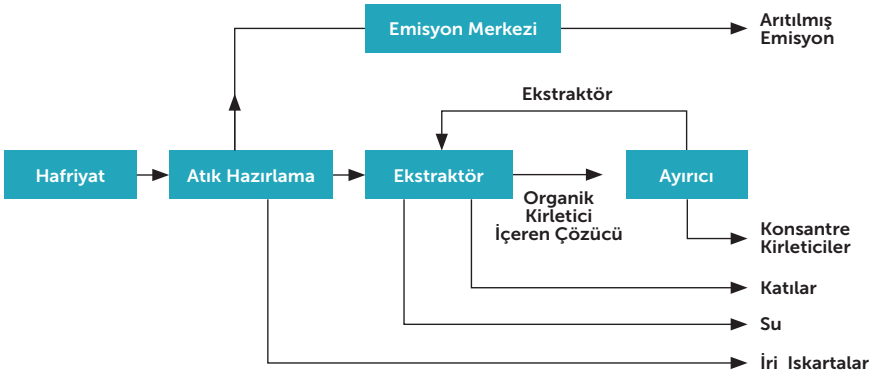
Maliyet: Temizlenen bir metreküp yeraltı suyu için filtrasyon maliyetleri 0,36 – 1,20 USD arasında değişmektedir. Ayırma teknolojilerinden çöktürme tankı veya fiziksel eleme/ayırma belediye atıkları için de sıklıkla kullanıldığından maliyetler bu uygulamalar ile karşılaştırılabilir.

Uygulama Sırasında dikkat edilecek konular: Koku probleminin yönetilmesine ve oluşan yan ürünlerin (çökelti vb.) uygun şekilde bertarafına dikkat edilmelidir [2].

4.2.4. Kimyasal Ekstraksiyon

Kimyasal Ekstraksiyon	
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinden alınarak
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Toprak
Proses Türü	Kimyasal
Uygulanabilecek kirletici türleri	VOC SVOC HSVOC İnorganik
Maliyet	358 - 1717 USD/ metreküp
Süre	6 Ay – 1 Yıl
Diğer	Yüksek kil içerikli topraklarda verim düşer Hidrofilik maddeler ve ağır organik bileşiklerde az etkilidir KOK gideriminde kullanılabilir

Tanım: Kimyasal ekstraksiyon teknolojisi, kirlenmiş toprağın yerinden alınarak, bir reaktörde çözücü madde ile karıştırılması sonucunda kirleticilerin çözeltiye geçmesi esasına dayanır. Bu yöntem ile kirleticiler topraktan ayrılıp, sıvı fazda yoğunlaştırılır ve nihai olarak bertaraf edilmesi gereken tehlikeli atık hacminde büyük oranda azalma sağlanmış olur. Bu yöntemin, yerinden alınarak toprak yıkama teknolojisinden farkı, ekstraksiyon işlemi için kimyasal maddeler (çözücü) kullanılmasıdır. Proses akış şeması Şekil 4.18'de gösterilmiştir.



Şekil 4.18 Kimyasal Ekstraksiyon Prosesi Akım Şeması

Proses öncesinde toprak, kaba bileşenleri ayırmak üzere elekten geçirilir. Kirlilik yoğunluğunun ince bileşenlerde olduğu varsayılarak, ekstraksiyon ince bileşen üzerine uygulanır. Proses esnasında toprak-ekstrakt karışımı karıştırma tankından düzenli olarak uzaklaştırılır ve hidrosiklon (yıkama) yardımı ile ayrılır. Yıkama sonrasında katı faz (toprak) susuzlaştırılır, ekstraksiyonda asit kullanılmışsa kalan

asitleri nötralize etmek için kireçtaşı ve gübre ile karıştırılır. Kalan sıvı faz ise, piyasada hazır bulunan topaklaştırma ve çöktürme kimyasalları (NaOH, kireçtaşı vb.) ile karıştırılır ve temizlenen kısım geri kazanılır. Ekstrakt çözeltisi olarak organik bir solvent kullanılması, organik bağ ile tutunmuş olan metallerin gideriminde etkili olacaktır. Bu yöntem genellikle diğer organik kirlilik giderim işlemleri (ör. solidifikasyon/stabilizasyon, yakma veya toprak yıkama) ile birlikte kullanılır.

Uygulanabilirlik: Solvent ekstraksiyonu teknolojisi PCB, VOC, halojenli solventler ve petrol atıkları ile kirlenmiş toprakların temizlenmesinde etkin bir yöntemdir. Bu proses ile boya, sentetik kauçuk proses, kömür katranı, pestisit/insektisit ve ahşap işleme atıklarının yanısıra sondaj, ayırma çamurları, ve petrol rafineri yağlarından organik kirleticilerin ayrılmasında etkilidir. Metallerin giderimi için asit çözeltisi ile ekstraksiyon tercih edilir. Özellikle organik kirliliğin giderilmesinde kullanılmaktadır. Bu yöntem sonunda temizlenen topraklar sahaya geri doldurulabilir. Geri kazanılan yakıtlardan, içeriğine göre yakıt katkı maddesi olarak faydalanılabilir. Sistemden ayrılan suyun pH'ı ayarlanarak endüstriyel tipte atıksu arıtma tesislerine iletilmesi gerekir.

Pek çok KOK gideriminde kullanılabilen tam ölçekli uygulamaları geliştirilmiş bir teknolojidir. Bu proses kullanılarak gerçekleştirilen PCB gideriminde ABD'de dört Superfund sahasında %99 verim elde edilmiştir. DDT ile kirlenmiş bir sahada ise %98,8 giderim verimi sağlanmıştır [8]. Kirlenmiş ortamdan PCBler ekstrakte edildikten sonra açığa çıkan solvent atıklarının bertaraf edilmesinde otoklav tekniği kullanılabilir. Otoklav teknolojisinin sadece PCBli atıklar için uygulanması önerilir, başka KOKlar için uygulanmaz [9].

Kısıtlamalar: Bu prosesi etkileyen toprak parametreleri partikül boyutu, pH, partisyon katsayısı; katyon değişim kapasitesi, organik içerik, nem miktarı, metal, uçucu, kil ve kompleks atık karışımlarının varlığıdır. Yüksek kil içeriği ekstraksiyon verimini düşürebilir ve uzun temas süresi gerektirir. Yüzey aktif madde ve emülsifiye katkıları ekstraksiyon performansını olumsuz etkiler. Ekstraksiyon solventinin seçiminde teknik uzmanlık gereklidir. Yüksek molekül ağırlığına sahip organik bileşikler ve çok hidrofilik maddelerle kirlenmiş topraklarda bu proses en az etkilidir.

Süre: Bu prosesin işletme ve bakım süreleri orta vadelidir. Yaklaşık olarak altı ay ile bir yıl arasında zaman alacağı varsayılabilir.

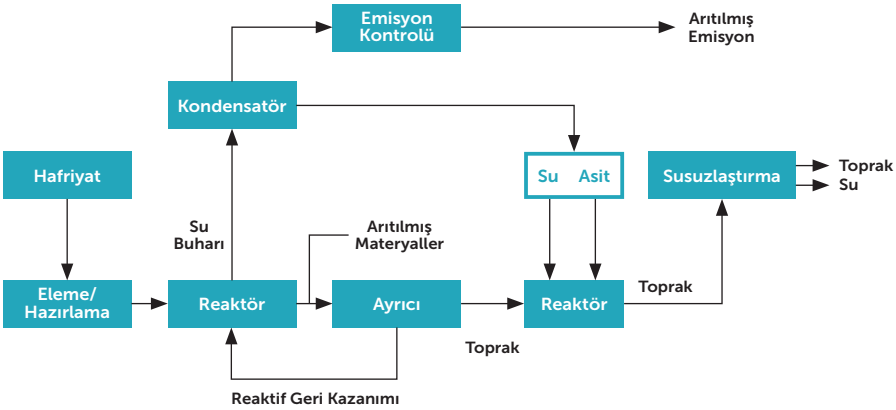
Maliyet: Temizlenen malzeme miktarının maliyet üzerine büyük etkisi vardır. Bunun yanı sıra atığın nem içeriği arttıkça temizleme maliyetinin nem miktarı az olan toprağa göre daha fazla olması beklenir. Ana maliyetler diğer teknolojilere göre yüksek olabilir. Bu teknoloji büyük sahalarda daha ekonomik hale gelebilir. Yaklaşık maliyet 358 - 1717 USD/metreküp'tür, bu maliyete kazılarak yerinden alınma maliyeti dâhil edilmemiştir.

Uygulama Sırasında dikkat edilecek konular: Organiklere bağlı olan metaller, bağlı oldukları organik maddelerle birlikte ekstrakte edilebilir, bu durumda kalıntı maddelerin yönetilmesi zorlaşmaktadır. Temizleme işlemi sonrasında toprakta bir miktar solvent kalıntısı kalacaktır, bu nedenle seçilen solventin niteliği (toksisite vb.) önemlidir. Asitle ekstraksiyondan sonra, temizlenmiş topraktaki asit kalıntılarının nötralize edilmesi gereklidir [2].

4.2.5. Halojensizleştirme

Halojensizleştirme	
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinden alınarak
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Toprak
Proses Türü	Kimyasal
Uygulanabilecek kirletici türleri	HSVOC HVOC
Maliyet	220 – 550 USD/ton
Süre	En çok 1 yıl
Diğer	KOK gideriminde kullanılabilir

Tanım: Halojen içeren organiklerle kirlenmiş toprağa reaktif maddeler eklenerek gerçekleştirilen bir prosestir. Tepkime sonucunda halojen molekülleri bileşikten ayrılır, kirleticiler bozunur ve kısmi olarak buharlaşabilir. Halojensizleştirme işlemi öncesinde kirlenmiş toprak yerinden alınarak ön işlemden (eleme, kırma ve öğütme) geçirilir. Ön işlem sonrasında seçilen reaktif madde toprağa karıştırılır. Reaktif madde olarak, alkali polietilen glikol (APEG) türevleri veya baz-katalize bozunma (BCD) teknolojisinde sodyum bikarbonat kullanılır. APEG teknolojisinde karışım reaktörde ısıtılır, oluşan tepkime, polyetilen glikol moleküllerinin halojen molekülleri ile yer değiştirmesini sağlar böylelikle bileşik tehlikesiz/daha az toksik hale gelir. Proses sonucunda, glikol eter ve/veya hidroksil bileşikleri ve alkali metal tuzları gibi suda çözünen yan ürünler oluşur. Aşağıdaki şekilde (bkz. Şekil 4.19) halojensizleştirme prosesi aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 4.19 Halojensizleştirme Prosesi Şematik Gösterim

Proses sonucunca açığa çıkan atıksu kimyasal oksidasyon, biyobozunma, karbon adsorplanması veya çöktürme ile arıtılabilir. BCD teknolojisinde ise karışım reaktörde 330°C üstüne ısıtılır ve halojenli kimyasalların kısmi olarak bozunması ve buharlaşması sağlanır. Gaz fazına dönüşen kirleticiler tutularak ayrı olarak arıtılır.

APEG ve BCD tipi halojensizleştirme prosesleri, kendi başına uygulanabilir teknolojilerdir ancak, diğer teknolojilerle birlikte de kullanılabilirler.

Uygulanabilirlik: Halojensizleştirme teknolojisi için hedef kirleticiler, HSVOCler ve pestisitlerdir. PCBlerle kirlenmiş sahaların temizlenmesinde başarısı kanıtlanmış bir teknolojidir. Küçük ölçekli uygulamalar için uygundur. Halojenli VOClerin temizlenmesinde de kullanılabilir ancak, diğer halojenli VOC giderimi yöntemlerine göre daha pahalı bir alternatiftir.

Klorsuzlaştırma prosesleri sıvı PCBlerin ve PCBlerle kirlenmiş yağların arıtımında oldukça gelişmiştir. Tam ölçekli uygulamaları mevcuttur. BCD, klorlu organik bileşiklerle (özellikle PCB, dioksin ve furan) kirlenmiş toprakların temizlenmesinde uygulanabilir. BCD teknolojisi uygulamaları PCB içeren sıvılar ve organoklorlu pestisitler için de kullanılabilir [12]. Bu yöntem ile klorlu organik bileşik içeriğinin 2 mg/kg'dan düşük seviyelere kadar giderilmesi mümkündür. Proses 10.000 ppm civarında kirletici konsantrasyonuna sahip sahayı ölçülebilir limitlerin altına iki saat içerisinde indirmeyi başarmıştır. PCBler ve kontamine transformatör yağları için tipik bir uygulamadır. Gerek kanıtlanmış bir teknoloji olması, gerekse PCB ve KOKları tek aşamada yok etmesi nedeniyle tercih edilen bir tekniktir. Bu proses transformatör ve kapasitörlere uygulanmasından önce solvent ekstraksiyonu gerçekleştirilmesi gerekmektedir. BCD teknolojisi, ABD, Avustralya, Meksika, İspanya ve Çek Cumhuriyeti'nde kullanılmaktadır [8]. APEG prosesi ABD'de, PCB ile kirlenmiş sahalarda 1985 yılından itibaren farklı sahalarda kullanılmış ve başarılı olmuştur. 45.000 ppm civarındaki PCB konsantrasyonunun gideriminde tam ölçekli olarak başarıya ulaşmıştır. Proses sonucunda PCB bileşiği baaşına 2 ppm derecesine kadar düşüş sağlanabilmiştir. BCD prosesi APEG'e göre daha yeni geliştirilmiştir ancak uygulaması mevcuttur. Örneğin, Çek Cumhuriyeti'nde pentaklorofenol, hexaklorobenzen, lindan ve dioksinler ile yüksek düzeyde kirlenmiş bir kimyasal üretim kompleksinin (yaklaşık 23000 ton toprak, 9000 ton bina kalıntısı, vs.) sahasının temizlenmesinde BCD teknolojisi (öncesinde termal desorpsiyon uygulanarak) tercih edilmiştir.

Bir diğer klorsuzlaştırma modifikasyonu olan Gaz Fazında Kimyasal indirgenme (GPCR) teknolojisi, bir hidrojenasyon prosesi olup, hidrojence doygun olmayan organik moleküllere hidrojen eklemesi ile moleküldeki klor halkalarını kırarak klor gideriminin sağlanmasıdır. GPCR tam ölçekli olarak uygulanabilir bir teknoloji olup aromatik halkaları parçalama özelliği nedeniyle pentaklorofenol (PCP), PCB , HCB , dioksin ve ayrıca PAH gibi halojen içermeyen bileşiklerin gideriminde etkilidir. Yüksek sıcaklık (>850 °C) ve düşük basınçta hidrojenle tepkimeye giren PCB, PAH, klorofenol, PCDD, klorobenzen, pestisit, herbisit ve insektisitler; metan, HCl ve benzen gibi düşük molekül ağırlıkta hidrokarbonlar meydana getirir. Bu prosesin KOKlarla ilgili uzun ve belgeli ticari işlemleri mevcuttur. Katı atıkların temizlenmesinde ısıl desorpsiyon ile desteklenmesi gerekir. Isıl desorber indirgeyici hidrojen atmosferinde eş zamanlı yok etme sağlar. Proses komplekstir, iş gücü ihtiyacı yüksektir ve yüksek kalifiye personel gerektirir. Düşük miktardaki atıklar için maliyet etkin bir proses olmayabilir. GPCR prosesi Japonya, Kanada, ABD, Avustralya'da 10 yılı aşkın süredir tam ölçekli olarak işletilmektedir. Avustralya'da gaz fazında indirgenme yoluyla % 99,999 verimle PCB giderimi gerçekleştirilmiştir. Kanada'da yüksek konsantrasyonda PCB içeren yağlar ve klorobenzenler için ticari ölçekte yüksek verimle giderim gerçekleştirilmektedir [8].

BCD ve GPCR teknolojilerinin de KOK giderimiyle ilgili tam ölçekli uygulamalarında olumlu sonuçlarına dair kanıtlar 90lı yıllardan beri mevcuttur. Bu proseslerin dioksin ve furan oluşturma potansiyeli oldukça düşüktür, oluşabilecek dioksin ve furanlar da BCD prosesi ile klorsuzlaştırılır [12] [9].

Bilyeli öğütme teknolojisinde, KOK içeren yüksek konsantrasyondaki atıkların bilyelerin dönüşü esnasında açığa çıkan mekanik ve kimyasal enerji yardımıyla işlenerek atıkla reaktif madde arasında indirgeyici halojensizleştirme meydana gelmesini sağlar [9]. Eklenen reaktif madde (CaO, Mg, Na veya diğer metaller veya oksitleri) indirgeyici ve baz rolünü oynar. Özellikle CaO eklenerek gerçekleşen organoklor bileşiklerinin yok edilmesinin yan ürünleri genellikle düşük toksisiteye sahip olan grafit, kalsiyum klorür ve kalsiyum hidroksittir [12]. Bu proses PCB ve DDT gibi halojenli hidrokarbon kirliliğinde uygulanabilir [9]. Prosesin tam ölçekli uygulamalarına dair az bilgi bulunmaktadır. Yeni Zellanda'da, DDT, aldrin, dieldrin, lindan ile kirlenmiş topraklarda tam ölçekli uygulaması gerçekleştirilmiş, sırasıyla %91, %89, %70 ve %88 giderim verimi sağlanabilmiştir [8]. Bu uygulama dışında pilot ölçekli sonuçlar mevcuttur. Bu yöntem ile dioksinler gibi yeni kirleticiler oluşturulması riski düşüktür. Kullanımı kuru, katı ve konsantre olmayan KOK atıkları ile sınırlıdır [12]. Öğütme sonucunda küçük partiküllerin oluşumuna bağlı olarak toz açığa çıkabilir [8]. Bu partiküller PAH ve klorlu hidrokarbonlar içerebileceğinden kontrolü ve giderimi planlanmalıdır [9] [12].

Kısıtlamalar: Proses öncesinde; su, alkali metaller ve topraktaki humus içeriğinin belirlenmesi ve , reaktif madde seçiminin kirleticiye uygun olarak gerçekleştirilmesi için arıtılabilirk çalışmaları gerçekleştirilmesi gerekir. %5'ten fazla klorlu organik bileşik konsantrasyonuna sahip ortamlarda kullanılacak reaktif madde miktarı fazlalaşmaktadır. Genel olarak kirlenmiş toprakta yüksek miktarda ince partiküller (ör.kil) ve nem bulunması temizlemeyi zorlaştırmaktadır. BCD prosesinde, kalıntıların tutulması ve arıtılması özellikle bu durumlarda zorlaşmaktadır.

Süre: Halojensizleştirme normalde kısa-orta süreli bir prosestir. En fazla bir yıl içerisinde tamamlanması beklenir. Temizlenen ortamda birden çok fazın olması, toplam organik halojenlerin konsantrasyonu maliyet ve süreyi etkileyen unsurlardır. Hümik içeriği yüksek topraklarda kimyasal dehalojenasyon prosesinin reaksiyon süreleri uzar.

Maliyet: Tam ölçekli işletme için maliyetlerin 220–550 USD/ton arasında değiştiği tahmin edilmektedir. Bu maliyete hafriyat, geri doldurma, kalıntıların bertarafı, ve analiz maliyetleri dâhil değildir. Yüksek kil yapısı ve nem içeriği maliyeti bir miktar arttırabilir. APEG prosesi genellikle büyük atık hacimleri için uygun maliyetli değildir. KOKlar ile kirlenmiş toprakların temizlenmesinde BCD prosesi maliyeti yaklaşık 3000 USD/ton'dur.

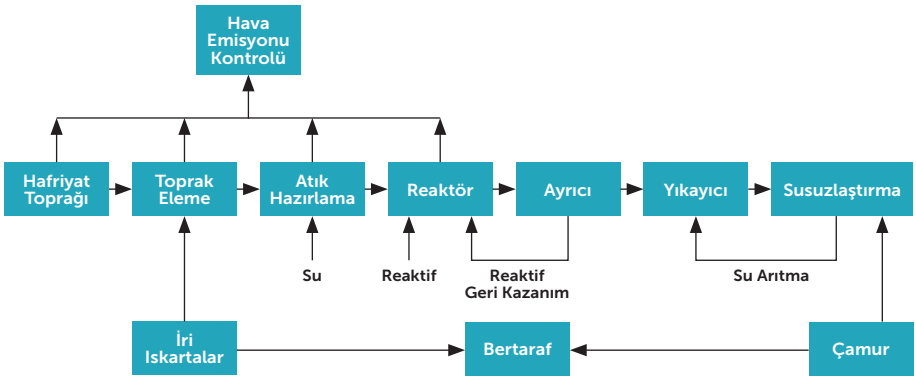
Uygulama sırasında dikkat edilecek konular: Prosesin uygulanacağı toprağın özelliklerinin uygulama öncesinde analiz edilmiş olması ve arıtılabilirlik çalışmaları ile sistem veriminin belirlenmesi önemlidir [2].

4.2.6. Kimyasal İndirgenme/Yükseltgenme

İndirgenme/Yükseltgenme	
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinden alınarak
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Toprak
Proses Türü	Kimyasal
Uygulanabilecek kirletici türleri	İnorganikler*
Maliyet	190-660 USD/metreküp
Süre	En çok 1 yıl
Diğer	Oksidasyon; ozon, peroksit ve permanganat eklemesi ile kirlenmiş toprağa yerinde yapılan bir temizleme yöntemi olarak da kullanılabilir. KOK gideriminde kullanılabilir

*İnorganiklerle (siyanatlar dâhil) kirlenmiş sahalarda başarısı kanıtlanmış, önerilen teknolojidir.

Tanım: İndirgenme/yükseltgenme tepkimeleri tehlikeli kirleticileri tehlikesiz veya daha etkisiz (kararlı, az hareketli ve/veya inert) bileşiklere dönüştürür. Tepkimeler sırasında bileşikler arasında elektron alışverişi gerçekleşir. Yaygın olarak kullanılan oksitleyici maddeler; ozon, hidrojen peroksit, hipoklorit, klor, klor dioksittir. Şekil 4.20'de proses akış şeması gösterilmektedir.



Şekil 4.20 Kimyasal İndirgenme/Yükseltgenme Prosesi Şematik Gösterim

Uygulanabilirlik: Kimyasal redoks tepkimelerinde hedef kirletici grubu inorganiklerdir. Halojen içermeyen VOCler, SVOCler, yakıtlar ve pestisitler üzerinde uygulanabilse de daha az etkilidir. Kimyasal redoks içme suyu ve atık suyun dezenfeksiyonu için kullanılan geniş kapsamlı doğru sonuç veren bir teknoloji olup siyanür ve krom atıklarının arıtımı için yaygın olarak kullanılmaktadır. Geliştirilmiş sistemler topraktaki tehlikeli atıkları arıtmada günümüzde daha sıklıkla kullanılmaktadır.

Ergimiş Tuz Oksidasyonu: Tehlikeli atıkların, patlayıcıların, KOKlar dahil olmak üzere tüm organik içerikteki kirleticileri yok etme kabiliyetine sahip pilot ölçekli ısıl bir prosestir. Organik atıklar eriyik karbonat tuzları havuzu içerisinde 700°C – 950°C'de oksitlenerek CO_2, N_2 ve suya dönüştürülür. Bu proses sonucunda büyük miktarda atık tuz oluşur. Ayrıca yüksek miktarlarda dioksin oluşturma riski vardır. 1997 yılından beri, özellikle ağır metaller için ticari olarak işletilmektedir. Askeri ve radyoaktif atıkların işlenmesinde sıklıkla kullanılmış, KOK gideriminde fazla uygulanmamıştır [12].

Elektrokimyasal Oksitlenme: Pilot ölçekte uygulamaları mevcuttur. Düşük sıcaklık ve atmosferik basınçta, elektrokimyasal olarak oluşan oksitleyici maddeler, organoklorlu bileşiklerle tepkimeye girerek CO_2, su ve inorganik iyonlar oluşturur. Dioksin ve furan oluşumu gerçekleşmez. Proses yan ürünleri nitrik asit tuzları, yıkama solüsyonları ve çıkış gazlarıdır. CerOx ismi verilen bir modifikasyonu endüstriyel atıklardan kaynaklanan tehlikeli organik atıkların, laboratuvar atıklarının, toksik kimyasalların, pestisit, herbisit, PCB ve sudaki seyreltik organiklerin arıtımında kullanılmak üzere geliştirilmiştir [9]. Bu teknoloji yeterince gelişmiş ve tam ölçekte denenmeye hazır sayılabilir. Girdideki yüksek klor içeriği yüksek klor gazı emisyonlarına sebep olur. Dioksin oluşum riski azdır. KOK giderimiyle ilgili verimi konusunda kesin veri yoktur çünük KOK atıklarıyla ticari ölçek uygulama bulunmamaktadır [12].

Kısıtlamalar: Tamamlanmayan yükseltgenme tepkimeleri sonucunda ara kirletici/kalıntı oluşumu meydana gelebilir. Çok yüksek kirletici derişimleri olduğunda, oksidan madde gereksinimi çok artacağından maliyet çok artar ve uygun bir teknoloji olmayabilir.

Süre: Kimyasal indirgenme/yükseltgenme kısa – orta vadeli bir teknoloji olarak kabul edilir. 1 yıl kadar bir sürede tamamlanacağı varsayılabilir.

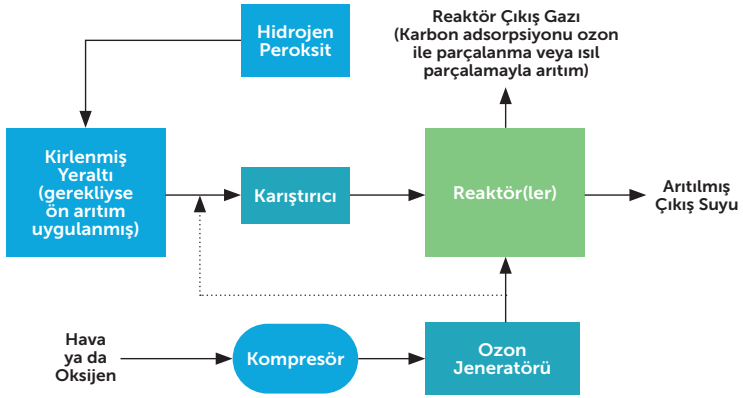
Maliyet: Birden çok fazın varlığı, toplam organik halojenlerin varlığı işlem süresi ve maliyetini etkileyen faktörlerdir. Ayrıca büyük miktarlarda oksitleyici madde gerekli olduğundan, bu yöntem yüksek kirletici konsantrasyonları için uygun maliyetli değildir.

Uygulama Sırasında dikkat edilecek konular: Proses öncesinde temizleme süresi ve maliyetine etki edebilecek olan su, alkali metaller, toprakdaki humus içeriği, birden fazla faz olup olmadığı ve TOX miktarının belirlenmesi gerekmektedir. Uygulamanın kalıntı oluşturmadığından, tepkimeler sonucunda oluşan bileşiklerin ilk durumdaki bileşiklerden daha az zararlı olduğundan emin olunmalıdır. Sistem çalışma verimini optimize etmek için ortamdaki yağ ve gres minimize edilmelidir. Bu nedenle çalışma öncesinde arıtılabilirlik testlerinin gerçekleştirilmesi önemlidir.

4.2.7. İleri Oksidasyon Prosesleri

İleri Oksidasyon	
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinden alınarak
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Yeraltı suyu
Proses Türü	Kimyasal
Uygulanabilecek kirletici türleri	VOC HVOC Yakıtlar Patlayıcılar SVOC HSVOC
Maliyet	0,03 USD/metreküp – 3 USD/metreküp
Süre	1 Yıl - 10 yıl

Tanım: İleri oksidasyon prosesleri, çeşitli oksitleyici ajanlar yardımıyla yeraltı suyundaki organik kirleticilerin parçalanmasını sağlar. UV oksidasyon prosesi, kirlenmiş sudaki organik ve patlayıcı nitelikteki kirletici unsurların güçlü yükseltgeyici ajanlar eklenmesi ve UV ışınlarına maruz bırakılması yardımıyla oksitlenmesidir. Yardımcı yükseltgeyici maddeler ozon (O_3) ve/veya hidrojen peroksit (H_2O_2) olabilir. Tam mineralizasyon sağlandığında proses çıktıları karbon dioksit, su ve tuzlardır.



Şekil 4.21 İleri Oksidasyon Prosesi Şematik Gösterim

Uygulanabilirlik: UV oksidasyonu ile yok edilebilecek kirleticiler: organik ve patlayıcılar; petrol hidrokarbonları, sanayi solventleri ve temizleyici olarak kullanılan klorlu hidrokarbonlar ve TNT gibi mühimmat bileşenleridir. Hidroksil grubu ile reaktif her organik kirleticinin bu yöntem ile parçalanması mümkündür. Pek çok durumda, biyobozunmaya dirençli klorlu hidrokarbonlar dahi UV oksidasyonu ile etkili olarak giderilebilirler. UV oksidasyon prosesi ile hızlı bir biçimde oksitlenen organik bileşikler, TCE, PCE ve vinil klorür gibi çift bağlı bileşikler ve toluen, benzen, ksilen ve fenol gibi basit aromatik bileşiklerdir. Çeşitli UV oksidasyon

sistemlerini piyasada bulmak mümkündür. Arıtılabilirlik çalışmalarında kullanılmak üzere pilot ölçekli, kesikli ve sürekli çalıştırılabilir reaktörler olduğu gibi, yüksek debilerde (ör. 3.800 - 3.800.000 litre/gün) çalıştırılmak üzere pilot ve tam ölçekli sistemler de mevcuttur. UV oksitleme prosesinin en önemli avantajı, havalı sıyırma veya karbon adsorpsiyonu gibi yöntemlerde kirleticiler bir fazdan diğerine konsantre edilirken, burada kirleticilerin yok edilmesidir. UV oksidasyon, uzun yıllardır yeraltı suyu arıtımında tam ölçekli olarak petrol ürünleri, TCE, DCE, TCA ve vinil klorür gibi endüstriyel organiklerin giderilmesinde kullanılmaktadır [2].

Superkritik Su Oksidasyonu: Pilot ölçekte uygulamaları mevcuttur. Yüksek sıcaklık ve yüksek basınç altındaki süperkritik su ile organik bileşiklerin yok edilmesi prensibine dayanır. PCB, halojenli alifatik ve aromatikler, akrilonitril atıksuları ve pestisit atık sularında uygulanabilir. Proses tamamen kapalı döngü halinde işletilmektedir. Proses sonucunda kül ve gaz oluşur [9]. Yüksek konsantrasyonlu KOK kirliliğinde pilot ölçekte uygulamaları mevcuttur. Japonya'da 2002 yılından beri PCB gideriminde kullanılmıştır. Bozunması zor, aşındırıcı, PCBler gibi yüksek sıcaklıklarda hidroklorik asit oluşturup aşındırma sorunu olan atıklar için geliştirilmiştir. Poliklorlu atıkların işlenmesinde temizlenmesinde dioksin/furan oluşma riski vardır [12].

Kısıtlamalar: Arıtıma tabi tutulan suyun UV ışınlarını iyi şekilde iletmesi önemlidir (yüksek bulanıklık girişime neden olur). Bulanıklık faktörü UV/H_2O_2 için UV/O_3 olduğundan daha kritiktir. Serbest radikaller kirletici giderim verimini etkileyebilir. Aşırı kimyasal oksitleyici dosajı da olumsuz yönde etki edebilir. UV oksidasyonu ile arıtılacak olan sıvı fazın ağır metal iyonlarınca fakir olması (10 mg/L'den az), ve yağlar ve gresin bulunmaması gerekir. UV/O_3 kullanımında, organik kirleticilerin (TCA gibi) parçalanmak yerine buharlaşma (sıyırılma) olasılığının olduğu unutulmamalıdır. Bu durumda çıkış gazından aktif karbon veya kalatilik oksidasyon ile temizlenmeleri gerekebilir. Sıvı fazın ön arıtımı, arıtma verimini iyileştirmek, UV reaktörü ve kuvars kollarının bakım ihtiyacını en aza indirmek için gerekli olabilir. Oksitleyicilerin depolanması ve yönetimi güvenlik önlemleri açısından özel özen gerektirir.

Süre: Temizlenmesi gereken yeraltı suyunun miktarına bağlı olarak proses kısa veya uzun vadeli olabilir.

Maliyet: Maliyetler genellikle 1000 litre başına 0,03 USD ve 3 USD arasındadır. Maliyetler, enerji gereksinmesinden ötürü, diğer teknolojilere nazaran yüksek olabilir. UV oksidasyon uygulamasının maliyetini etkileyen faktörler: kirleticilerin türleri ve konsantrasyonu (çünkü bunlar, oksitleyici seçimi, dozu, UV ışık şiddeti ve arıtma süresini doğrudan etkiler), gereken giderim verimi, su debisi, ön arıtma veya ikincil arıtma ihtiyacı. Maliyetler, enerji gereksinmesinden ötürü, diğer teknolojilere nazaran yüksek olabilir.

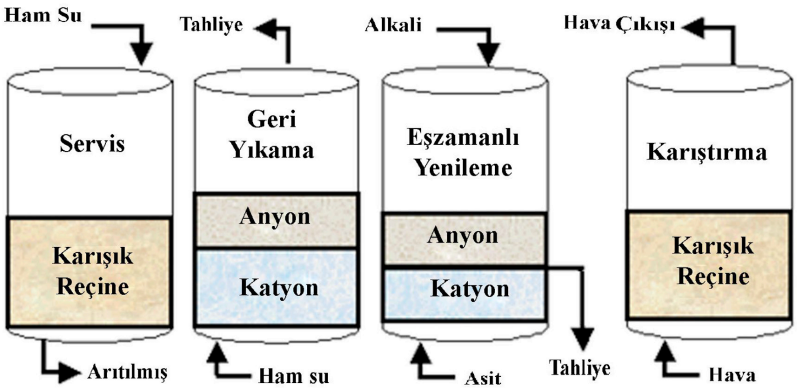
Uygulama Sırasında dikkat edilecek konular: UV oksidasyonu prosesinin işletme ve bakım süreleri, giriş suyunun bulanıklığı, kirletici konsantrasyonu ve metal konsantrasyonu, serbest radikal varlığı, UV reaktörlerinin bakım aralıkları işletme esnasındaki önemli hususlardır [2].

4.2.8. İyon Değişimi

İyon Değişimi	
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinden alınarak
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Yeraltı suyu
Proses Türü	Fiziksel/Kimyasal Arıtma
Uygulanabilecek kirletici türleri	İnorganikler*
Maliyet	0,08 – 0,21 USD/metreküp
Süre	1 Yıl - 10 yıl

*Metallerle kirlenmiş sahalarda başarısı kanıtlanmış, önerilen teknolojidir.

Tanım: İyon değişimi, sıvı fazdaki anyonları veya katyonları karşı değerlikli iyonlar ile değiştirerek sudan giderme prensibine dayalı bir teknolojidir. İyon değişim malzemeleri sentetik organik maddelerden üretilmiş, değişebilir iyonların tutunacağı iyonik fonksiyonel gruplar içeren reçineler olabilir. Ayrıca inorganik ve doğal polimer malzemeler de iyon değiştirici olarak kullanılabilir. Reçine kapasitesi dolduğunda reçineler yeniden kullanılmak üzere geri kazanılır veya bertaraf edilir.



Şekil 4.22 İyon Değişimi Prosesi Şematik Gösterimi

Uygulanabilirlik: İyon değişimi yöntemi ile çözünmüş metaller sıvı fazdan temizlenebilir. Metaller dışında nitrat, amonyak azotu ve silikat gideriminde de uygulanabilir. Yeraltı suyundan ağır metallerin gideriminde çöktürme yöntemine göre daha avantajlı kabul edilmektedir. Ağır metallerle ve radyoaktif maddelerle kirlenmiş yeraltı sularının temizlenmesinde modüler, taşınabilir teknolojiler şeklinde uygulamalarının olduğu bilinmektedir.

Kısıtlamalar: Yeraltı suyundaki oksitleyiciler, iyon değişim reçinesine zarar verebilir. Rejenerasyon aşamasında oluşan atıksu için ayrıca arıtma ve bertaraf gerekir.

Süre: İyon değişim teknolojisi, kısıtlamalarda bahsedilen faktörlere bağlı olan tipik olarak kısa-orta vadelidir.

Maliyet: Ana maliyet etkenleri, ön arıtma ihtiyacı, deşarj gereklilikleri ve reçinenin yeniden kullanılabilirliği, geri kazanım malzemesi kullanımı ve verimliliğidir. Yaklaşık proses maliyeti 0,08 – 0,21 USD/metreküp olarak kabul edilebilir.

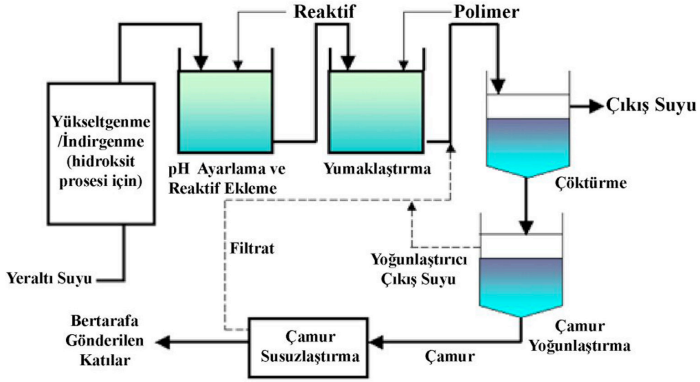
Uygulama sırasında dikkat edilecek konular: Yeraltı suyunda yağ ve gres bulunması durumunda iyon değişim reçinesi tıkanabilir. 10 ppm'den yüksek askıda katı madde konsantrasyonu, pH (reçine seçimini etkiler) veya suyun kimyasal içeriği (ör. yükseltgeyici madde varlığı, v.d.) reçinenin düzgün çalışmasını engelleyebilir. Bu veya benzeri durumlarla karşılaşmamak için giriş suyu analizleri sürekli olarak izlenmelidir [2].

4.2.9. Yumaklaştırma/Topaklaştırma/Çöktürme

Yumaklaştırma/Topaklaştırma/Çöktürme	
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinden alınarak
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Yeraltı suyu
Proses Türü	Fiziksel/Kimyasal Arıtma
Uygulanabilecek kirletici türleri	İnorganikler*
Maliyet	4,49 – 10,83 USD/metreküp
Süre	1 Yıl - 10 yıl
Diğer	Genellikle ön arıtma olarak kullanılır. Suyun kompozisyonu arıtma süresini ve verimini etkiler.

*Metallerle kirlenmiş sahalarda başarısı kanıtlanmış, önerilen teknolojidir.

Tanım: Bu proses, yeraltı suyunda çözünmüş kirleticileri, pH ayarlaması yapılarak ve/veya kimyasal çöktürücü kullanılarak çözünmez hale getirip çöktürme veya filtreleme ile sudan ayrılması esasına dayanır. Yeraltı suyunun temizlenmesinde özellikle diğer arıtma tekniklerinin öncesinde, metal girişimini engellemek için ön arıtım olarak kullanılmaktadır. Kirlenmiş yeraltı suyunda çöktürme ile metal giderimi, çözünmüş ağır metal tuzlarının çözünmeyen tuzlara dönüştürülerek çökelmesi ile gerçekleştirilir. Proses tasarımına bağlı olarak, yeraltı suyundan ayrılan çökelti çamurları metal geri kazanımı için ayrıca arıtılabilir veya doğrudan bertarafa gönderilebilir.



Şekil 4.23 Koagülasyon/Flokülasyon ve Çöktürme Prosesi Gösterimi

Uygulanabilirlik: Bu teknoloji remediasyon alanında çoğunlukla toksik metallerin giderilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Günümüzde metal hidroksit çöktürme özellikle elektronik ve elektrokaplama sanayiinde ön arıtma teknolojisi olarak tercih edilmekte ve sıklıkla uygulanmaktadır. Bileşik oluşturan maddeler (ör. siyanür veya EDTA) ile bağlı halde bulunan metallerin temizlenmesi zordur. Bu proses yıllardır endüstriyel atık sulardan ağır metallerin gideriminde öncelikli yöntem olarak

uygulanmaktadır. Metal giderimindeki kanıtlanmış başarısı nedeniyle metallerle kirlenmiş yeraltı sularının temizlenmesinde kabul edilmiş geçerli bir teknolojidir. Çöktürme (çökelme ve/veya topaklaştırma ve filtrasyon ile birlikte) yeraltı suyunda metallerin gideriminde pompalama ve arıtma tekniği kullanımında en yaygın tercih edilen proseslerden biri haline gelmiştir.

Kısıtlamalar: Kullanılacak prosesin belirlenmesinde kirletici metallerin çözünürlüğü ve gerekli temizleme derecesi önemlidir. Tüm pompala-arıt tekniklerinde olduğu gibi arıtmanın sonuca ulaşması için öncelikle kirletici kaynağının (toprakta adsorbe olmuş metaller gibi) giderilmiş olması gerekmektedir. Farklı pek çok metal türlerinin kirletici olarak bulunması, temizleme işlemini zorlaştırır (bir tip metal gideriminin optimizasyonu başka bir metalin giderimine uygun olmayabilir). Sistem verimi seçilen katı fazı ayırma tekniğine bağlı olarak değişir (ör. çöktürme, topaklaştırma ve/veya filtrasyon). Proses sonrasında toksik çamur açığa çıkabilir. Proses sırasında pH ayarlandığından, suyun yapısına farklı çözünmüş tuzlar katılır. Temizlenen suda yeniden pH düzenlemesi yapılması gerekir. İşletme parametrelerinin belirlenmesi için laboratuvar ölçekli arıtılabilirlik testleri gerçekleştirilmelidir.

Süre: Yumaklaşma/topaklaşma/çöktürme prosesi 1 metreküp su için bir günden uzun sürmez ancak, toplam arıtma süresi çekilmesi gereken kirlenmiş yeraltı suyu miktarı ve kirlenmiş sudaki kirleticilerin niteliğine bağlı olarak (farklı kirletici türlerinin varlığı gibi) değişim gösterecektir.

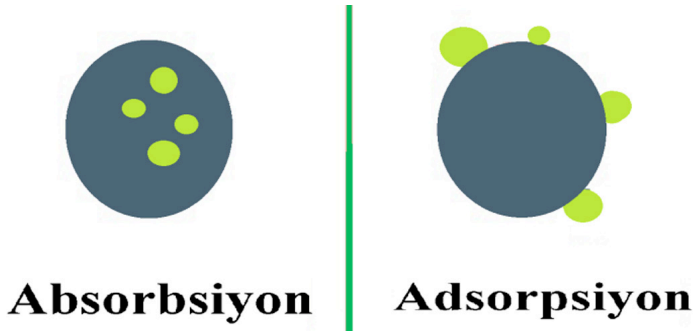
Maliyet: Proses mmaliyetleri 4,49 - 10,83 USD/metreküp olarak tahmin edilmektedir. Maliyet tahmini yumaklaştırma/çöktürme prosesinin devamında eklenmesi gereken arıtma aşamalarını (susuzlaştırma ve bertaraf) içermeksizin gerçekleştirilmiştir. Çamur bertaraf işlemi toplam proses maliyetini arttıracaktır. Kullanılan reaktif maddelerin niteliği ve miktarına göre, gerekli sistem kontrolleri ve sistemin işletilmesi için personel ihtiyacına göre yüksek maliyetli bir proses olabilir.

Uygulama sırasında dikkat edilecek konular: Çöktürme prosesi elektrostatik yüzey yükleri ile askıda kalabilecek çok küçük partiküller oluşturabilir. Bu durumu önceden belirlemek için çöktürme testleri gerçekleştirilmelidir. Çözünebilir (VI) değerlikli krom için yumaklaştırma ve topaklaştırma öncesinde (III) değerliğe indirmek için ayrıca bir işlem gerekli olacaktır. Prosesin tek değişkeni girdi su debisi olduğu için bu parametreye bağlı olarak sistem değişimlerinin dikkatle gözlemlenmesi gerekmektedir. Metal hidroksit çamurlarının bertarafı dikkate alınmalıdır. Çıkış suyunda istenmeyen konsantrasyonların oluşmaması için eklenecek reaktif miktarı dikkatli seçilmelidir. Katıların uygun şekilde çökmesini sağlamak için polimer eklenebilir [2].

4.2.10. Absorpsiyon/Adsorpsiyon

Absorpsiyon/Adsorpsiyon	
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinden alınarak
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Yeraltı suyu
Proses Türü	Fiziksel/Kimyasal
Uygulanabilecek kirletici türleri	HVOC HSVOC İnorganikler
Maliyet	63–90 USD/metreküp (ağır metal gideriminde forager sponge adsorban madde olarak kullanıldığında)
Süre	1 Yıl – 10 Yıl

Tanım: Sıvı fazdaki kirleticiler sorbent yüzeyinde tutunarak (soğurularak) konsantre olur, böylece kirleticinin sıvı fazdaki konsantrasyonu azalır. Soğurulma fiziksel, kimyasal ve elektrostatik mekanizmalarla gerçekleşebilir. Sıvılarda çözünen ve çözücü arasındaki ilişki adsorpsiyon derecesinin belirlenmesinde önemli rol oynar. En sık kullanılan adsorban madde Granül Aktif Karbon (GAC)'dur. Diğer sık kullanılan doğal ve sentetik sorbentler, aktifleştirilmiş aluminyum, forager sponge (bir cins sellülozik polimer), lignin ve kil, sentetik reçinedir. Şekil 4.24.'te absorpsiyon ve adsorpsiyon proseslerinin prensipleri şematik olarak anlatılmıştır. Absorpsiyon prosesinde kirletici madde/ler adsorbanın içerisine geçerek maddenin iç yapısında fiziksel olarak tutunur, adsorpsiyon prosesinde ise adsorban maddenin dış yüzeyine yapışarak tutunmuş olur. Kirleticiler bu şekilde kirlenmiş ortamdan ayrılarak, adsorban üzerinde birikir.



Şekil 4.24 Absorpsiyon Ve Adsorpsiyon Prensipleri

Uygulanabilirlik: Çoğu organik kirletici ile bazı inorganik kirleticiler sıvı ve gaz fazlarından adsorpsiyon/absorpsiyon prosesleri ile temizlenebilir. Adsorban maddeler kirleticiye özel seçilmelidir. Aşağıda verilen tabloda, hangi tip adsorban maddenin özellikle hangi maddelerin tutulmasında etkili olduğu gösterilmektedir. Sentetik reçinerek patlayıcılar gibi termal olarak dengesiz maddelerin tutulmasında GAC'a göre daha uygundur çünkü sentetik reçinelerin geri kazanımında ısıl olmayan

prosesler kullanılmaktadır. Sentetik reçine GAC'a göre pahalı olmasına rağmen, daha yüksek seçici adsorban kapasitesi vardır ve daha dayanıklıdır. Evsel, endüstriyel ve tehlikeli tipte atıkların yönetiminde adsorpsiyon/absorpsiyon teknolojisi uzun süredir kullanımda olan güvenilirliği kanıtlanmış bir teknolojidir. Bu nedenle bu teknoloji kavramsal, teorik ve mühendislik uygulamaları bakımından tam olarak gelişmiş durumdadır.

Tablo 4.1 Alternatif Sorbent Maddeler ve Soğurdukları Bileşikler

Adsorban Madde	Özelliği
Granül Aktif Karbon	Organik ve inorganik kirleticiler
Aktifleştirilmiş Aluminyum	Flor, ağır metaller, arsenik ve selenyum
Forager Sponge	Ağır metaller (Cd, Cu, Pb) için seçiçi adsorpsiyon
Lignin/Sorptif Kil	Sıvı fazdan organik, inorganik ve ağır metalller
Sentetik Reçine	Termal olarak dengesiz bileşikler ve patlayıcılar

Kısıtlamalar: Suda yüksek çözünürlüğü olan bileşikler ve küçük moleküller iyi soğurulamaz. Yüksek kirletici konsantrasyonlarına sahip kirlenmiş sularda esas arıtma olarak kullanıldığında maliyetleri yüksektir. Yüksek yağ içerikli kirlenmiş sularda uygulanabilir değildir.

Süre: Saha koşullarına, temizlenecek kirleticinin özellikleri, kirlenmiş yeraltı suyunun hacmi ve seçilen sorbent maddenin seçiciliğine göre büyük değişkenlik gösterir.

Maliyet: Forager Sponge teknolojisi kullanılarak ağır metal ile kirlenmiş suyun bir yıl boyunca arıtılmasının maliyeti adsorban rejenere edilmeksizin 90USD/metreküp veya rejenere edildiğinde 63USD/metreküp'tür. Adsorbent prosesleri için maliyet öngörüsü mevcut değildir.

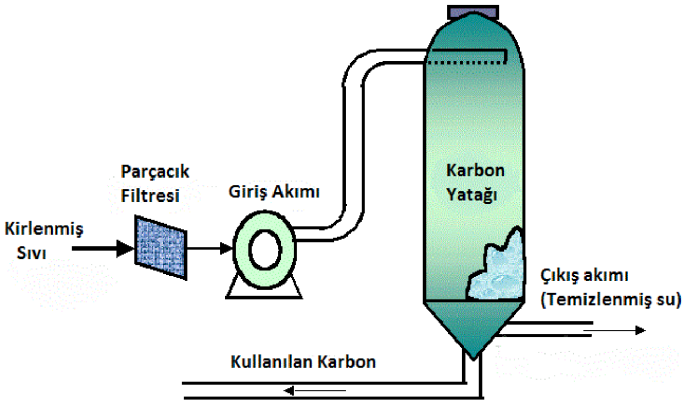
Uygulama sırasında dikkat edilecek konular: Soğurulabilir tehlikeli madde konsantrasyonlarının çok yüksek olduğu durumlarda adsorban ünite sıklıkla değiştirilmesi gerekeceğinden pratik bir uygulama olmaz. Kirleticiyi tutmuş olan sorbent, geri kazanılamıyorsa çoğunlukla tehlikeli atık olarak ele alınarak bertaraf edilmesi gerekecektir [2].

4.2.11. Granül Aktif Karbon Adsorpsiyonu

Granül Aktif Karbon	
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinden alınarak
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Yeraltı suyu
Proses Türü	Fiziksel
Uygulanabilecek kirletici türleri	VOC* SVOC* Yakıtlar
Maliyet	0,32 – 1,70 USD/metreküp
Süre	En çok 3 yıl

*VOCler ve SVOClerle kirlenmiş sahalarda başarısı kanıtlanmış teknolojidir.

Tanım: Sıvı fazdaki karbon adsorpsiyonu, yeraltı suyunun aktif karbon içeren bir dizi kolon içerisinden geçirilerek, organik kirleticilerin adsorplanmasını sağlayan tam ölçekli bir teknolojidir. Karbon adsorpsiyonu sistemleri için en yaygın iki reaktör biçimi sabit yatak ve hareketli yataktır. Sabit yatak sıvıların adsorpsiyonu için sıklıkla tercih edilen bir sistemdir. Silikonlu karbon gibi aktif karbon modifikasyonları, giderim verimliliğini artırarak kolon malzemesinin daha uzun süreli kullanımını sağlayabilir. Kirlenmiş yeraltı suyu, yukarıdan aşağıya veya aşağıdan yukarı doğru aktif karbon dolgulu kolondan geçirilerek kirleticilerin GAC'e tutunması sağlanır.



Şekil 4.25 Sabit Yataklı Aktif Karbon Arıtma Sistemi Örneği

Uygulanabilirlik: Karbon adsorpsiyonu için hedef kirletici gruplar hidrokarbonlar, yarı uçucu organik bileşikler ve patlayıcılardır. HVOCler ve pestisitler üzerinde etkisi sınırlıdır. Sıvı fazdaki karbon adsorpsiyonu düşük kirletici konsantrasyonlarında (10 mg/L den az) veya kirletici oranı yüksek olup düşük besleme hızında (dakika başına tipik olarak 2-4 litre) kirletici maddelerin giderilmesinde etkilidir. Karbon adsorpsiyonu sistemleri göreceli hızlı ve temizleme verimleri yüksektir. Aktif karbon

ile adsorpsiyon, kentsel/endüstriyel ve tehlikeli atıkların arıtımında çok uzun süredir kullanılan yaygın bir teknolojidir.

Kısıtlamalar: Birden fazla kirleticinin varlığı işlemin performansını etkileyebilir. Yüksek oranda askıda katı madde (>50 mg/L), yağ ve gres (>10mg/L) içeren girdiler karbon kirlenmesine neden olabileceğinden sık temizleme gerektirebilir. Bu durumda ön arıtma faydalı olur. Kolon dolgu maddesinin tipi, gözenek büyüklüğü, karbon kalitesi ve çalışma sıcaklığı işlem performansını etkiler. Bu nedenle karbon seçiminde arıtılabilirlik testleri gerçekleştirilir. Suda çözünürlüğü yüksek bileşikler ve küçük moleküller adsorbe edilemez. Sistemin lojistik ve ekonomik dezavantajları ise harcanan karbonun işlem sonunda bertaraf edilmesinin gerekmesi ve taşıma maliyetleridir.

Süre: Aktif karbon filtresinden su veya buharın geçişi sadece birkaç dakika sürmektedir. Ancak, aktif karbon ile bir sahanın tamamen temizlenebilmesi yeraltı suyundaki kirleticilerin veya kirletici buharların tamamının aktif karbon sistemine aktarılmasının ne kadar süreceğine bağlıdır. Bu birkaç aydan birkaç yıla kadar sürebilir. Temizleme süresinin artmasına neden olabilecek faktörler: (1) Çözünmüş kirleticilerin kaynağının tam olarak ortadan kaldırılmaması ve/veya kirletici konsantrasyonlarının çok yüksek olması, (2) Kirlenmiş yeraltı suyunun/gazların miktarının fazla olması, (3) Yeraltı suyu veya buhar arıtımının diğer arıtma yöntemleri ile birlikte kullanılmasının gerekmesi. İşletme ve bakım süresi kirletici tipine, konsantrasyonuna ve hacmine, ek arıtma gereksinimleri ve metal konsantrasyonuna bağlıdır.

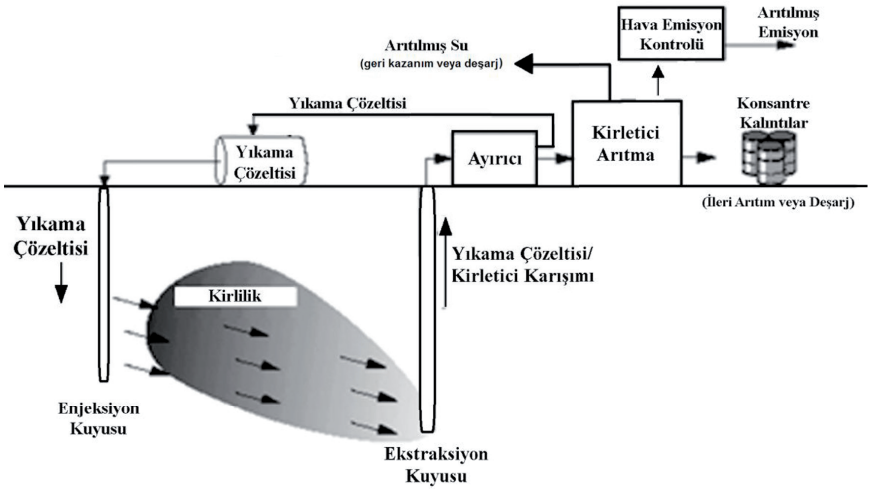
Maliyet: GAC prosesi maliyeti; kirli suyun besleme hızına, kirletici madde tipine, kirletici kütlesel debisine, hedeflenen çıkış konsantrasyonuna, alan ve zaman ihtiyaçlarına bağlıdır. Konsantrasyon düzeyi düşük kirleticiler ve yüksek besleme hızlarında çalıştırılan sistemlerde maliyetler daha düşük olabilir. Günlük 0,4 milyon litre debide her 1.000 litre için maliyet 0,32 USD'dan 1,70 USD'a değişmektedir. Yüksek kirletici konsantrasyonu olması durumunda ön arıtma kullanılması maliyetleri yükseltir [2].

Uygulama sırasında dikkat edilecek konular: Proses veriminin sürekli olarak çıkış suyu ve havasından alınacak numuneler ile test edilmesi gerekmektedir. Eğer bazı kirleticilerin giderilemediği gözlemlenirse, çıkış akımının yeniden sistemin başına gönderilmesi gerekebilir. Aktif karbonun ömrünü tamamladığı noktadan itibaren çıkış konsantrasyonları artar. Bu durumda karbonun değiştirilmesi gerekmektedir. Aktif karbon geri kazanılabilir veya bertaraf edilebilir. Patlayıcılar veya metallerle kirlenmiş karbon yeniden kullanılmak üzere geri kazanılamaz, bu nedenle uygun şekilde bertaraf edilmesi gerekmektedir. Arıtılacak olan su içinde askıdaki katı maddelerin uzaklaştırılması için ön arıtma gerçekleştirilmesi önemlidir. Askıda katı madde giderimi yapılmazsa bunlar kolon içinde birikerek basınç farkında bir artışa neden olabilir. Basınç farkı çok yüksek olduğunda, biriken katı, geri yıkama veya başka bir yöntem kullanılarak, çıkartılmalıdır. Aktif karbon ile temizleme, civarda ikamet eden kişileri rahatsız edecek bir etki yaratmaz. Yeraltından suyun çekilmesi aşamasında iş makinalarının kullanımı gerekli olabilir. Karbon tanklarının yerleştirilmesi ve değiştirilmesi esnasında tesis civarında araç trafiğinin artması söz konusu olabilir [13].

4.2.12. Toprak Yıkama

Toprak Yıkama		
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinde	Yerinden alınarak
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Toprak	Toprak
Proses Türü	Kimyasal Arıtma	Fiziksel/Kimyasal Arıtma
Uygulanabilecek kirletici türleri	İnorganikler VOC HVOC	VOC, SVOC HVOC, HSVOC, İnorganikler
Maliyet	24 – 64 USD/metreküp	70 – 187 USD /metreküp
Süre	En çok 3 yıl	En çok 1 yıl
Diğer	Geçirimi yüksek, silt-kil içeriği düşük, parçacık yapısı büyük topraklarda etkilidir KOK gideriminde kullanılabilir	

Tanım: Toprak yıkama toprak ortamındaki kirleticilerinin yıkama çözeltisine transfer edilmesini sağlayan bir yöntemdir. Bu yöntem kirlenmiş sahanın özellikleri, kirlilik boyutu, derinliği, miktarı vb. şartlara göre yerinden alınarak veya yerinde gerçekleştirilebilir. Yerinde toprak yıkama, kirlenmiş topraktaki kirleticilerin su ile veya diğer sulu çözeltilerle enjeksiyon veya süzülme ile temasını içermektedir. Yıkama sıvılarının toprağın hemen altındaki akiferden alınması ve geri dönüştürülmesi gerekir. Yıkama işlemi doğrudan kirlilik kaynağına uygulanabileceği gibi, kirletici kaynağından yayılan kirlilik bulutuna da uygulanabilir. Kirletici bulutuna uygulanan yıkama işleminde çözücü karışımı kirlenmiş alanın yukarısına enjekte edilir. Kirletici maddeler çözücüde tutulur ve kirleticileri taşıyan yıkama çözeltileri kirlilik kaynağının aşağısından çekilir ve yerüstünde arıtılır.



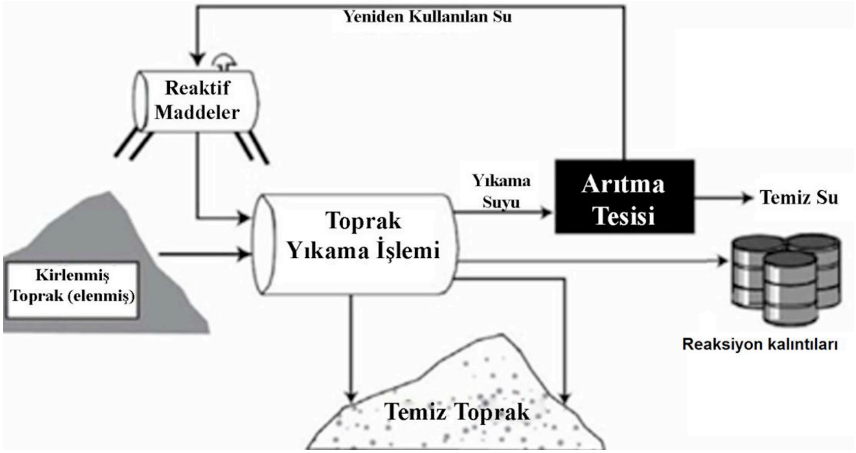
Şekil 4.26 Yerinde Toprak Yıkama Şematik Gösterim

Toprağın yerinden alınarak yıkanması işleminde ise, kirlenmiş toprağın hafriyatı sonrasında, kirletici maddelerin yıkama tanklarında pH ayarlaması ile askıda veya çözünmüş halde tutulması sağlanır veya partikül boyutu ayrımı ile daha küçük toprak hacimlerinde konsantre edilir. Çeşitli kirleticilerin yıkanması için tercih edilen farklı özelliklerdeki çözeltiler in hedeflediği temel kirleticiler Tablo 4.2'de incelenebilir [2].

Tablo 4.2 Farklı Yıkama Sıvılarının Etkilediği Kirleticiler

Yıkama Sıvısı Niteliği	Hedef Kirletici
Su	Suda çözünebilir kirleticiler
Asit Çözeltisi (Nitrik-Hidroklorik asit)	Bazı metaller ve organik kirleticiler
Baz Çözeltisi (NaOH)	Fenoller ve bazı metaller
Yüzey Aktif Madde (Deterjan, emülsifiye)	Yağlı kirleticiler, yakıtlar
Organik Solvent (etanol)	Suda çözünmeyen organik kirleticiler

Asit çözeltileri özellikle atık pil geri kazanımı ve metal kaplama tesislerinden kaynaklanan metal ve organik kirliliğinde, ayrıca krom kaplama endüstrisinden kaynaklı çinko kirliliğinin yıkanmasında tercih edilen çözeltilerdir. Yerinden alınarak toprak yıkama tekniği Şekil 4.27'de gösterilmektedir.



Şekil 4.27 Yerinden Alınarak Toprak Yıkama Şematik Gösterim

Uygulanabilirlik: Yerinde toprak yıkama tekniğinin hedeflediği kirleticiler inorganiklerdir. Bu yöntem, metallerin geri kazanımına olanak sağlar, büyük parçacık yapıdaki topraklardan organik ve inorganik maddelerin ayrılmasında etkilidir. Ayrıca, VOC, SVOC yakıt ve pestisitle kirlenmiş toprakların iyileştirilmesinde de kullanılabilir ancak, bu tip kirleticilerin gideriminde çok daha ekonomik avantajlar bulunabilir. Düşük geçirgenlikte ve heterojen yapıdaki toprakların bu yöntemle temizlenmesi zordur. Yerinden alınarak toprak yıkama sistemi ise sahada kurulabileceği gibi,

sahada taşınabilir mobil bir teknoloji olarak da uygulanabilir. Yerinden alınarak toprak yıkama ile temizleme işlemi kuzey Avrupa ve Amerika'da metal işleme tesislerinden kaynaklanan kirliliğin giderilmesinde tercih edilmektedir. Mobil yerinde yıkama üniteleri ise 1988 yılından beri ABD'de dökülmelerin ve kontrolsüz tehlikeli atık sahalarından kaynaklanan kirlenmenin olması durumunda kullanılmıştır. Yerinden alınarak toprak yıkama prosesinin hedef kirleticileri SVOC, yakıtlar ve ağır metallerdir. Seçilen bazı VOC ve pestisitler üzerinde de uygulanabilir teknolojidir. Büyük parçacıklı topraklardan metal geri kazanımında etkili olarak kullanılabilir. Avrupa'da yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Toprak yüzeyinde tutunmuş olan PCB, KOKlar ve diğer partiküller topraktan sodyum hidroksit gibi kostik ajanların katılması ile ayrılabilir [9].

Kısıtlamalar: *Yerinde toprak yıkama prosesi* ile düşük geçirgenliğe sahip ve heterojen toprakların temizlemesi zordur. Diğer teknolojilere göre saha jeolojisi hakkında daha ayrıntılı bilgi sahibi olunması gereklidir. Yıkama sıvıları ve yüzey aktif maddeler ile kirleticinin yeraltında başka bölgelere sızıntı yapma riski vardır. Yüzey aktif maddeler toprağa yapışarak geçirgenliğini azaltabilir. *Yerinden alınarak toprak yıkama prosesinde* atık karışımları (organiklerle karışık metaller) yıkama çözeltisi seçimini zorlaştırır. Yüksek hümik madde içeren toprakların ön arıtmaya tabi tutulması gereklidir. Kil türü partiküllerin üzerine adsorblanmış olan organiklerin bu yöntemle temizlenmesi zor olabilir.

Süre: Toprağın yıkanarak iyileştirilmesi kısa-orta süreli teknoloji olarak kabul edilir. Yerinde yıkama yaklaşık bir ila üç yıl, yerinden alınarak yıkama da altı aydan üç yıla kadar sürebilir.

Maliyet: Yerinde uygulanan toprak yıkama için birincil maliyet etkeni toprak geçirgenliğidir. Düşük geçirgenliğe sahip topraklar toprak yıkama işlemine karşı daha dirençlidir bu nedenle temizleme süresi uzayacak ve maliyetler artacaktır. İkincil maliyet etmeni ise yeraltı suyuna olan uzaklıktır. Su tablasının derin olması daha yüksek maliyetlere neden olmaktadır. Geri kazanılmış sıvıların yüzeyüstü ayırma ve arıtma maliyetleri bir diğer etmendir. Yerinde toprak yıkama prosesinin temizlenmesi yaklaşık olarak kirlenmiş metreküp toprak için 24-64 USD arasında değişmektedir. Yerinden alınarak yıkama ise 70–187 USD/metreküp arasında değişebilir.

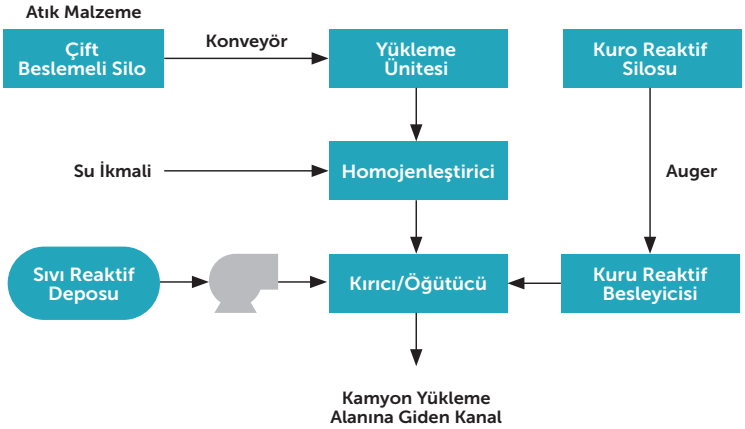
Uygulama Sırasında dikkat edilecek konular: Toprak ve kirletici yapısına uygun olan yıkama sıvılarının seçilmesi için arıtılabilirlik çalışmaları yapılması gereklidir. Toprağın yüksek oranda silt ve kil içermesi durumunda toprak yıkama teknolojisi etkin performans göstermez. Bu tür topraklarda ince parçacıklara adsorbe olan kirleticileri parçacıklardan ve yıkama suyundan ayırmak kolaylıkla mümkün olmamaktadır. Proses sonucunda, tutulan kirleticilerle birlikte geri kazanılan sıvı fazın arıtılmasından kaynaklanan atıkların (arıtma çamuru ve kullanılmış karbon ve iyon değişim reçineleri vb.) ve yıkama sularındaki uçucu maddelerden kaynaklanan emisyonların arıtılması gerekmektedir. Topraktaki yıkama maddesi kalıntılarının takip edilmesi, kirlilik oluşturmadığından emin olunması gerekmektedir. Yüzey aktif maddeler toprağa tutunur ve etkin toprak gözenekliliğini düşürür. Yıkama sıvılarının toprak ile olan tepkimeleri de kirletici hareketliliğini azaltabilir [2].

4.2.13. Solidifikasyon/Stabilizasyon

Solidifikasyon/Stabilizasyon		
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinde	Yerinden alınarak
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Toprak	Toprak
Proses Türü	Kimyasal Arıtma	Kimyasal Arıtma
Uygulanabilecek kirletici türleri	İnorganikler*	İnorganikler*
Maliyet	50 - 425 USD/metreküp	124 - 248 USD/metreküp
Süre	En çok 1 yıl	En çok 6 ay

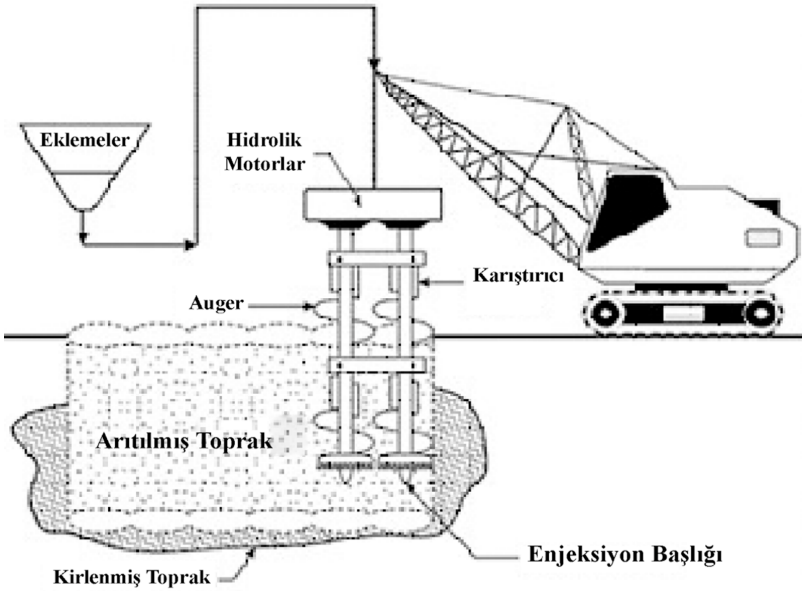
*İnorganiklerle kirlenmiş sahalarda başarısı kanıtlanmış, önerilen teknolojidir.

Tanım: Diğer temizleme teknolojilerinden ayrı olarak S/S kirleticileri yok etmek/ayırmak yerine kirliliğin hareket kabiliyetini sınırlandıran bir tekniktir. Stabilizasyon, kirlenmiş topraktan kirleticilerin çevreye sızma ihtimalini en aza indirmek için kimyasal tepkimeler yardımıyla kirlenmiş toprağı kararlı hale getirir. Solidifikasyonda ise kirlenmiş toprak bağlayıcı ajanlarla karıştırılıp kirletici ile toprak birbirine bağlanır. Yerinde veya yerinden alınarak gerçekleştirilen S/S uyulamalarında sıklıkla kullanılan bağlayıcı ajanlar çimento, asfalt, uçucu kül ve kildir. Bağlanmanın oluşması için çoğu durumda su eklenmesi de gereklidir. Daha sonra karışımlar kurutulur ve katı blok oluşturmak üzere sertleşmeye bırakılır. Atığın yeterince sığ derinlikte olduğu durumlarda kirlenmiş toprak yerinden alınarak saha üzerinde stabilizasyon eklentileri ile karıştırılabilir. Yerinden alınan toprak iş makinaları ile kum mikserine yüklenir, burada malzemeler karıştırılır ve ufalanır. Yüzey üzerinde karıştırılarak katılaştırılan veya stabilize edilen atıklar hafriyatın doldurulmasında kullanılabilir veya bir düzenli depolama tesisinde bertaraf edilebilir [14].



Şekil 4.28 Yerinden Alınarak Solidifikasyon Prosesi Akış Şeması

Bir diğer durumda, stabilize edici maddeler kirleticilere toprağın içerisindeyken karıştırılabilir. Bu yöntem büyük karıştırıcılar (auger sistemler) ve sondaj kuyuları ile mümkün olur. Bu işlem için gerekli olan kuyu sayısı, auger boyutlarına ve kirlenmiş alanın büyüklüğüne bağlıdır. Yerinde karıştırılan atıklar genellikle bir yüzey örtüsü ile kapatılarak temizlenen kirlenmiş ortamın su ile teması engellenir

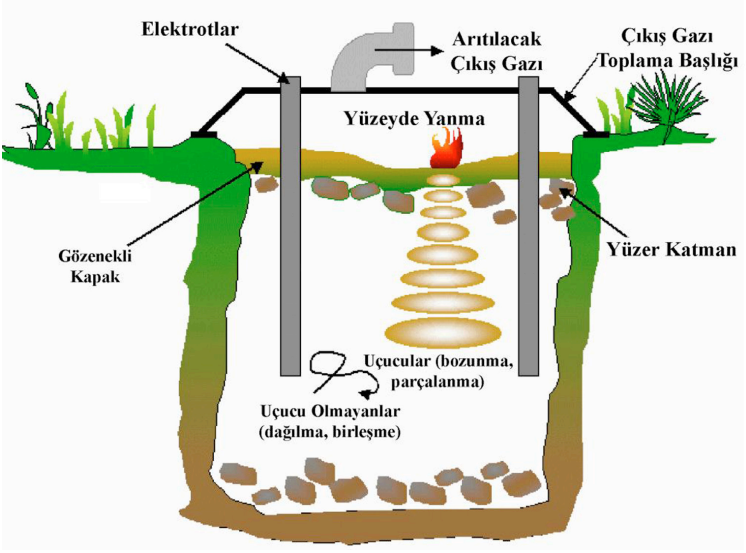


Şekil 4.29 Auger Metodu ile Solidifikasyon/Stabilizasyon Uygulanması

Solidifikasyon/stabilizasyon teknolojisinin farklı bir çeşidir olan vitrifikasyon tekniğinde toprağın ergitilmesi için elektrik akımıyla çok yüksek ısılara (1600 °C - 2000 °C) ulaşılır. Bu sayede pek çok inorganik madde hareketsizleştirilir ve organik kirleticiler piroliz yoluyla yok edilir. Organik piroliz ürünleri ve su buharı kirleticileri, çıkış gazı arıtma ünitesine yönlendirilir. Vitrifikasyon ürünü kimyasal olarak stabil, sızıntıya karşı dirençli, obsidiyen veya bazalt kayası benzeri cam ve kristal yapıda bir maddedir. Vitrifikasyon için cam oluşmasında gerekli olan minimum toprak alkali içeriği (sodyum ve potasyum oksitleri) kütlece %1,4 olmalıdır [2].

Uygulanabilirlik: S/S prosesinin uygulanmasında hedef kirletici grupları inorganik maddelerdir. Çoğu S/S prosesinin organik kirleticiler ve pestisitler üzerinde sınırlı etkisi bulunmaktadır. Sadece vitrifikasyon prosesinin pek çok organik kirleticiyi parçalama özelliği bulunmaktadır. Vitrifikasyon tekniği çoğu toprak yapısında uygulanabilir. Vitrifikasyon prosesi ile organikler yok edilebilir ve inorganiklerin çoğu hareketsizleştirilebilir. Solidifikasyon/stabilizasyon teknolojisi kirleticilere, özellikle metallere olan maruziyeti azaltmakta hızlı ve düşük maliyetli bir çözüm sunar [14]. S/S kendi başına kullanılabilir veya diğer temizleme ve bertaraf yöntemleri ile birlikte, nihai ve/veya ara temizleme olarak da kullanılabilir. Auger ve

reaksiyon/enjektör sistemleri, başarısı kanıtlanmış, çoğu sahaya ve atık tiplerine uygulanabilirdir. Konvansiyonel malzemeler ve ekipman ile çalışabilir, reaktif ve ek malzemeler piyasada mevcuttur. Vitrifikasyon prosesinin de pilot ve tam ölçekte başarılı uygulamaları bulunmaktadır. Farklı atık tipleri ve çamur için temizleme testleri gerçekleştirilmiştir. Homojen özellikteki topraklarda 6 metreye kadar proses derinliklerine inilebilmiştir. Erişilebilir derinlik heterojen şartlarda sınırlıdır. Yerinden alınarak gerçekleştirilen S/S prosesinin performansı kullanılan proses türüne göre değişiklik gösterir. Solidifikasyon/stabilizasyon ve modifikasyonlarının KOK yönetiminde pilot ölçekte uygulamaları mevcuttur. Özellikle Vitrifikasyon uygulamasının kullanımı KOK gideriminde yaygındır. PCBler dahil, organik kirleticiler vitrifikasyonda uygulanan yüksek sıcaklıklar ile yok edilir. Yerinden alınarak vitfirikasyon, stok halindeki KOKlara da uygulanabilir. Avrupa, Avustralya ve Amerika'da yerinde ve yerinde olmayan uygulamalar ile pestisitlerin ve PCBlerle kirlenmiş toprakların temizlenmesinde kullanılmıştır. Vitrifikasyon tüm KOKlar için %99,999 giderim verimi ile uygulanabilmektedir [8]. Vitrifikasyonun patentli bir çeşidi olan GeoMelt teknolojisi, yüksek KOK içeriği olan sahalarda, pestisit stoklarında, gömülmüş pestisitlerin olduğu durumlarda, PCB ve sıvılarla kirlenmiş topraklarda kullanılmıştır. Örnek olarak GeoMelt teknolojisinin 18.000 ppm'e varan PCB konsantrasyonlarındaki 25.000 ton toprağın iyileştirilmesinde ve kütlece %33 HCB içeren atıklarının giderilmesinde kullanıldığı bilinmektedir [12].



Şekil 4.30 Yerinde Vitrifikasyon Prosesi Bileşenleri

Vitrifikasyon, ısıya dayalı bir proses olduğu için proses esnasında dioksin oluşumuna neden olabilir. Yerinden alınarak vitrifikasyon uygulamasının tam ölçekli performansına dair yeterli veri bulunmamaktadır [8]. Yerinde vitrifikasyon prosesinin ise geniş aralıktaki pestisit, herbisit, dioksin, PCB, arsenik, cıva ve kurşun içeren

toprakların ve atıkların temizlenmesinde tam ölçekli olarak başarısı kanıtlanmıştır. Bu proses ile % 99,9999 mertebesinde giderim verimi sağlanabilir. Vitrifiye ürün içerisinde organik madde kalıntısı bulunmaz, organikler tamamen yok edilmektedir. Proses esnasında uçucu hale geçen organik maddelerin emisyonlarının sahada izlenmesi ve arıtılması gerekmektedir [9].

Kısıtlamalar: Yerinde S/S prosesinin etkinliğinde kirlilik derinliği, kirletici çeşidi ve toprağın fiziksel özellikleri önemlidir. Bazı prosesler hacim artışına (orijinal hacmin iki katına kadar) neden olabilir. Bu teknolojinin seçiminde arıtılabilirlik çalışmaları gerekmektedir. Yerinde uygulamalarda reaktifin beslenmesi ve etkin karıştırma, yerinden alınarak gerçekleştirilen uygulamalara göre daha zordur. Ayrıca yerinde olmayan temizleme teknolojilerine göre daha zor kontrol numunesi alınabilir. Katılaşan malzeme sahanın ilerideki kullanımlarını kısıtlayabilir. Su tablasının altındaki kirliliğin temizlenmesi için susuzlaştırma yapılması gerekli olabilir. *Yerinden alınarak* yapılan uygulamada çevre şartları kirleticilerin uzun dönem hareketsiz kalmasını zorlaştırabilir. Organik maddeler, genellikle immobilize edilemez. Yerinden alınarak gerçekleştirilen uygulamalarda, pek çok kirletici/proses kombinasyonunun uzun dönem etkinliği kanıtlanmamıştır. Proses etkinliğinin takip edilmesi için süzüntü testleri ile izleme gerçekleştirilmesi gerekir.

Süre: Katılaştırma ve stabilizasyon prosesinin tamamlanması haftalar ile aylar arasında sürebilir. Prosesin ne kadar zaman alacağı ise pek çok faktöre bağlıdır. Kirlenmiş alanın geniş veya derin olması, toprağın yoğun, kayaçlı, bağlayıcı madde ile karışımını zorlaştıracak nitelikte olması, aşırı soğuklar ve yağış temizleme süresini uzatabilir. Yüzey üzerinde gerçekleşen karıştırma işlemi de hafriyat oluşumu nedeniyle sürede uzamaya neden olur. Yerinde S/S prosesi kısa-orta vadeli bir teknolojidir, vitrifikasyon ise kısa dönem teknolojidir [2].

Maliyet: Kullanılan reaktif ajan miktarı, türleri ve kirleticilerin kimyasal yapısı maliyeti etkiler. Auger karıştırma uygulama maliyetleri sığ topraklarda 50-80 USD/metreküp, sığ olmayan topraklarda ise 190–330 USD/metreküp'tür. Bu proses ile ortalama işleme miktarı ise; sığ topraklarda 36-72 ton/saat, sığ olmayan topraklarda ise 18-45 ton/saat arasında değişmektedir. Proje maliyetinin büyük kısmını taşıma maliyetleri oluşturur. Yerel veya bölgesel kaynakların bulunmaması durumunda taşıma maliyetlerinden dolayı S/S kolaylıkla ekonomik olmayan bir seçenek haline dönüşebilir. Derz dolgu (grout) enjeksiyon yönteminin maliyetleri sahaya özel koşullara göre değişiklik gösterecektir. Sondaj maliyetleri, 164 – 492 USD/metre'dir. Derz dolgu maliyetleri de 164-246 USD/metre arasında değişir. Bu maliyetlere mobilizasyon, bertaraf ve olumsuz saha koşullarına bağlı maliyetler dâhil edilmemiştir. Yerinde vitrifikasyon prosesi ortalama maliyetlerine ekipman kurulum ve kaldırma maliyetleri arıtılabilirlik maliyetleri ve analiz maliyetlerinin de eklenmesi gerekmektedir. Vitrifikasyon işletme maliyetleri elektrik sarfiyatı, su miktarı ve proses derinliğine göre farklılık gösterebilir. Temizlenen ton toprak başına 375 USD-425 USD'dir. Bir diğer yaklaşık değer ise 349 USD/metreküp'tür.

Yerinden alınarak gerçekleştirilen uygulamalarda, temizlenecek atığın türü ve nem içeriği maliyeti etkileyen önemli etmenlerdir. Nem içeriğinin artması maliyetleri de arttırır. Kirleticinin konsantrasyonu ve türü istenen temizleme standardının yakalanması için eklenecek olan reaktiflerin türünü ve miktarını belirler.

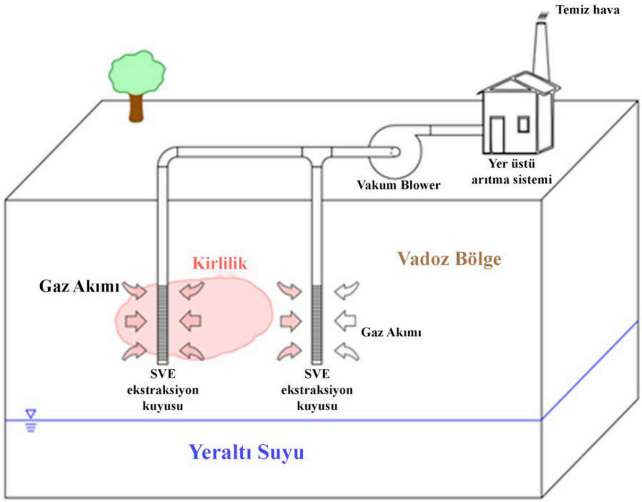
Uygulama sırasında dikkat edilecek konular: Yerinde yapılan S/S uygulaması sonrasında sahanın kullanımı stabilize edilen bölgeyi havalandırabilir ve kirleticilerin hareketsizliği olumsuz etkilenebilir. S/S prosesinde kullanılan kimyasallar çoğunlukla inşaat benzeri faaliyetlerde kullanılan malzemelerdir, uygun şekilde yönetildiğinde bu maddeler çalışanlara ve halka tehlike arz etmez. Karışma esnasında tozuma olmaması için köpük veya su uygulanabilir. Gerekli olursa atıklar tank içerisinde karıştırılabilir veya karıştırma alanının üzeri toz ve buharları engellemek için örtülebilir. Katılaştırılmış maddelerin gücü ve dayanıklılığı da test edilmelidir. İnce partikül yapısı solidifikasyon prosesinde kurulum ve müdahale sürecini uzatır ve daha büyük boyuttaki partikülleri çevreleyerek S/S esnasında oluşan bağların gücünü zayıflatır. Yerinde gerçekleştirilen uygulamalarda uzun dönem ufalanma, yeraltı suyuna sızma, ve gelecekteki kontrolsüz saha kullanımı stabilize kütlenin bütünlüğünü ve kirletici hareketini laboratuvar testlerinde öngörülemeyen şekilde etkileyebilir. S/S yöntemlerinin farklı kombinasyonları uzun vadeli test edilmediğinden, yağmur veya diğer etmenler kirleticileri çözerek uzun zaman sonra süzüntü oluşturabilir ve yeraltı suyuna veya yer üstü su kaynaklarına karışabilir. Bu nedenle uzun dönemli izleme yapılması gerekir. Yakındaki yerleşimler ve işyerleri ekipmanların ve eklentilerin sahaya taşınması esnasında ve temizlenen atığın bir düzenli depolama alanına taşınmasında artan kamyon trafiğine maruz kalabilir. Hafriyat ve karıştırma esnasında da iş makinalarından kaynaklanan gürültü kirliliği olabilir [2][14].

4.2.14. Toprak Gazı Ekstraksiyonu

Toprak Gazı Ekstraksiyonu	
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinde
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Toprak
Proses Türü	Fiziksel
Uygulanabilecek kirletici türleri	VOC* Yakıtlar
Maliyet	405 – 1485 USD/metreküp
Süre	1 – 3 yıl
Diğer	Doygun olmayan bölgede etkilidir Dizel, kerosen gibi ağır petrol ürünleri için uygulanamaz

*VOC kirliliğinde başarısı kanıtlanmış, önerilen teknolojidir.

Tanım: Toprak gazı ekstraksiyonu (SVE) toprağa vakum uygulanarak kontrollü hava akımı sağlanması prensibine dayanır. Böylelikle uçucu ve yarı uçucu kirleticilerin topraktan ayrılaraz gaz fazında serbest kalması sağlanır.SVE yöntemi toprağa, su tablasının üzerine, yüzeyin yaklaşık 1 metre altına bir veya daha fazla ekstraksiyon bacasının açılmasını içeren bir yöntemdir. Dikey ekstraksiyon bacaları, tipik olarak 1,5 metre derinlikte veya daha derin uygulamalarda kullanılabilir ve 91 metre derinliğe kadar başarıyla uygulanabilir. Yatay ekstraksiyon bacaları ise kirlenmiş bölgenin dağılım geometrisine bağlı olarak, sondaj makinaları yardımı ile kullanılabilir. Ekstraksiyon bacalarına blower veya vakum pompası gibi ekipmanlar bağlanarak vakum emişi sağlanır. Şekil 4.31'de verilen basit örnekte SVE için kullanılan ekstraksiyon bacalarının vakum emişli sisteme bağlantısı gösterilmektedir.



Şekil 4.31 Toprak Gazı Ekstraksiyonu Örnek Gösterim

Vakum emişi sayesinde hava ve buharın topraktan geçişi sağlanır ve bacadan yüzeye arıtım için çıkartılır. Genellikle ekstrakte edilen kirletici buharının (çıkış gazı) arıtılması gereklidir. Arıtma için çoğunlukla aktif karbon sistemleri tercih edilir. Aktif karbon dışında biyofiltrasyon ve ısıl desorpsiyon da tercih edilen sistemlerdir.

Uygulanabilirlik: SVE, doygun olmayan bölgede uygulanan, su tablasının üzerinde yer alan VOC ve bazı yakıtların gideriminde etkili bir teknolojidir. Özellikle benzin gibi hafif (uçuculuğu yüksek) petrol ürünlerinin temizlenmesine daha başarılıdır. Yeraltında depolanan tanklar nedeniyle kirlenen sahalarda topraktaki VOC kirliliğinin gideriminde etkili olduğu pek çok tam ölçekli çalışma ile kanıtlanmıştır. Benzinden daha az uçucu olan dizel yakıt, ısıtma yağları, ve kerosen SVE yöntemi ile giderilemez [5] Bu tekniğin başarıyla uygulanabileceği uçucu organikler tipik olarak Henry sabiti 0,01'den büyük olan veya buhar basıncı 0,5 mm Hg'dan büyük olan bileşiklerdir. SVE prosesi ile SVOC grubuna giren kirleticiler arıtılamaz fakat proses gereği topraktan sürekli olarak geçen hava akımıyla birlikte SVOClerin biyolojik olarak parçalanması desteklenebilir. Toprak geçirgenliği SVE'nin etkinliğini belirleyen en önemli parametredir. Geçirgenliği yüksek, nem içeriği az ve organik madde miktarı çok yüksek olmayan toprak koşullarında SVE daha iyi verimle çalışabilir. Kirlenmiş sahanın civarındaki binaların altında yer alan kirlilik dağılımlarının temizlenmesinde, diğer temizleme teknolojilerine göre çok avantajlı biçimde, başarıyla giderim sağlayabilir. SVE ve hava enjeksiyonu çoğunlukla birlikte kullanılan iki yöntemdir [15].

Kısıtlamalar: Bu teknolojinin uygulanabilirliği için gerekli veriler kirliliğin derinliği ve alansal yayılımı, su tablasına kadar olan mesafesi, toprak tipi ve özellikleridir. Yüksek silt ve kil içeriği toprağın yumuşamasına, genleşmesine yol açabilir ve buhar ekstraksiyonu esnasında geçirgenliği düşürürerek proses verimini azaltır. Toprağın geçirgenliğinin ve katman yapılarının çok değişken olduğu sahalarda, ekstraksiyon kuyularının açılması öncesinde sahada çok geniş çaplı bir inceleme yapılması gerekmektedir. Aksi takdirde gaz akışı dağılımı homojen olmayabilir ve esas kirliliğin olduğu bölgelerde yeterli gaz hareketi sağlanamayabilir. Yüksek organik içerikteki veya aşırı derecede nemli topraklarda giderim verimi düşüktür. Sistemde çıkış gazı arıtımını neticesinde katı ve sıvı atıklar oluşacaktır. Ekstraksyion bacalarına dair, etki çapı, gaz akım hızları, uygulanacak optimal vakum ve kirletici kütle giderim hızlarının saha için tasarlanabilmesi amacıyla önceden pilot çalışma yapılması gereklidir.

Süre: Yerinde SVE prosesi orta ile uzun süreli bir prosestir. Genellikle SVE prosesleri 1-3 yıl arasında tamamlanmış olur. Temizleme süresini etkileyen faktörler: (1) kirletici konsantrasyonları, (2) kirleticinin yayılım alanı, (3) toprağın yapısı ve içeriğidir. Kirletici konsantrasyonlarının yüksek olduğu durumlarda, kirlenmiş alanın geniş veya derin olması halinde veya yöntemin uygulandığı toprağın yoğun yapıda, nemli bir ortam olması halinde buhar geçişi yavaşlayacaktır. Çok büyük ölçekli ve zor şartlarda hayata geçirilen standart dışı projeler 3 yıldan fazla da sürebilir.

Maliyet: Genel olarak uygulama maliyeti 405 – 1485 USD/metreküp kirlenmiş toprak olarak varsayılabilir. Temizlenen madde miktarının maliyet üzerinde çok büyük etkisi vardır. Ayrıca toprak tipi de gerekli olabilecek kuyu sayısını ve yöntemin verimini etkilediğinden maliyet üzerinde önemli bir etkendir. Doygunluğu fazla ve ince parçacık yapısına sahip topraklarda (kil-silt) daha yüksek vakum etkisi gerekli olacak ve maliyetler yükselecektir ve/veya bu durum SVE prosesinin çalışmasını

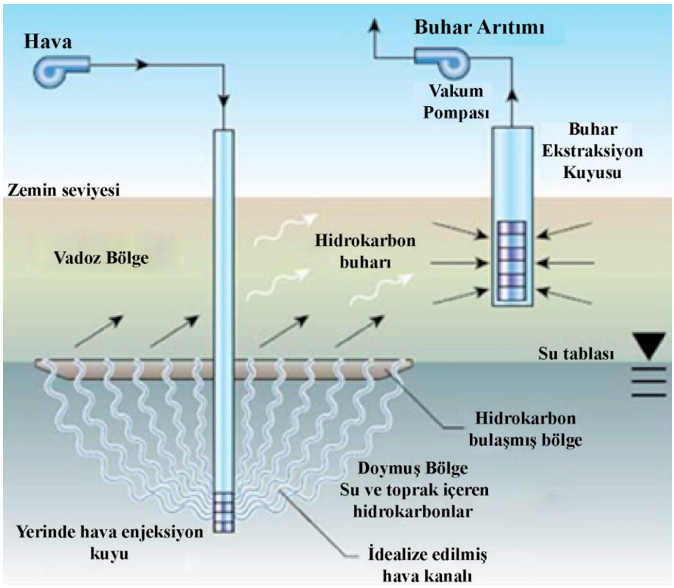
engelleyebilir. Çıkış gazının arıtılmasına dair maliyetlerin de ayrıca hesaplanması gerekir. Proses esnasında su çekilmesi durumuna da yaygınlıkla rastlanmaktadır, bu durumda çekilen suyun da arıtılması gerekir ve maliyetlerde artış meydana gelir [2].

Uygulama sırasında dikkat edilecek konular: Doğru şekilde tasarlandığında ve işletildiğinde, SVE sahada çalışanlara ve civar halka düşük derecede güvenlik riski oluşturur. Uygulama sahası yakınlarında SVE ekipmanının taşınması esnasında kamyon trafiğinde artış olabilir, aynı şekilde ekipmanın kurulumu/sökümü aşamalarında da trafik yoğunluğu yaşanacaktır. SVE sistemi çıkış gazlarının, çevreye ve civardaki insanlara zarar vermemesi bakımından arıtıma tabi tutulması gerekir. Arıtma tesisi işletmesinden kaynaklanan gürültüyü en aza indirmek için arıtma alanını kapsayan prefabrik yapılar kurulabilir. Sistem çalışmasından sorumlu kişilerin, sistemin işlerliğini izlemek üzere sahayı düzenli olarak kontrol etmesi gerekir. İşletme sırasında ekstrakte edilen kirletici miktarında daha fazla artış gözlenemiyorsa, sistem kesikli işletmeye alınabilir [15]. Bu şekilde vakumla çekilen kirletici derişimleri arttırılarak süre/maliyet dengesinde avantaj sağlanmış olur. SVE işlemi ile temizleme hedeflerine ulaşılamadıysa, kalıntı kirliliğin gideriminde varolan kuyulardan hava verilerek (hava kabarcıklı arıtım) biyoremediasyon yapılması ciddi bir ek maliyet getirmeksizin ikincil bir teknoloji olarak değerlendirilebilir. Toprak yüzeyinde, jeomembran örtüler kuyuların etkinlik yarıçapını arttırmak ve gaz akımında kısa devre oluşmasını engellemek için kullanılır. Jeomembran örtü ayrıca zeminden yukarıya buhar çıkışını da engellemiş olur. SVE doygun bölgede etkin olmamasına rağmen, çeşitli yöntemlerle (ör. yeraltı suyu depresyon pompaları) su tablası aşağıya çekilerek daha fazla kirlenmiş ortamın SVE ile temizlenmesi sağlanabilir [2].

4.2.15. Hava Kabarcıklı Arıtım

Hava Kabarcıklı Arıtım	
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinde
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Yeraltı suyu
Proses Türü	Fiziksel
Uygulanabilecek kirletici türleri	VOC Yakıtlar
Maliyet	24 – 84 USD/metreküp
Süre	1 Yıl - 3 Yıl

Tanım: Hava kabarcıklı arıtım, su tablasının altında yeraltı suyuyla birlikte toprak katmanına bir veya birkaç tane enjeksiyon kuyusu ile girilerek, enjeksiyon kuyularına yüzey üzerindeki kompresörler yardımıyla hava pompalanıp yeraltının havalandırılmasıdır. Hava kompresörlerinden yeraltına verilen hava ile yeraltı suyunda oluşturulan kabarcıklar kanallardan yatay ve dikey olarak toprağa erişir ve kirleticileri topraktan sıyırarak gaz fazına geçirir ve kirletici buharını su tablası üzerindeki toprak katmanına taşır [15]. Böylelikle kirleticiler doygun olmayan bölgeye geçiş yapmış olur. Bu aşamadan sonra doygun olmayan bölgedeki hava ve kirletici buharı karışımı toprak gazı ekstraksiyon sistemi ile topraktan çekilir. Bu nedenle hava kabarcıklı arıtım ve toprak gazı ekstraksiyonu genellikle birlikte kullanılan teknolojilerdir. Şekil 4.32'de kirlenmiş yeraltı suyunun hava kabarcıklı arıtımı ve SVE entegre sistemi ile temizlenmesi gösterilmiştir.



Şekil 4.32 Hava Kabarcıklı Arıtım Uygulaması Örneği

Hava kabarcıklı arıtım yeraltı suyu ve toprak arasındaki teması arttırmak ve kabarcıklar yardımıyla yeraltı suyundan daha çok kirleticiyi sıyırmak için yüksek akış hızlarında çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Su tablasının altında veya üstündeki kirleticilerin biyolojik ayrışması da kirlenmiş yer altı suyuna ve vadoz bölgeye oksijen ekleyerek arttırılabilir. Sistemin çıkış gazı arıtımı ise genel olarak hava su ayırıcısının ardından aktif karbon ile gerçekleştirilmektedir.

Uygulanabilirlik: Bu teknoloji yeraltı suyu tablasının altındaki ve üstündeki VOC'lerin gideriminde etkili bir yöntemdir. Klorlu organiklerin ko-metabolizmasını (mikroorganizmaların başka bir besin kaynağını kullanırken kirleticinin de bozunmasını sağlamasını) geliştirmek için enjekte edilen suya metan eklenebilir. Ayrıca yakıtların gideriminde de kullanılabilir. SVE yöntemi ile birlikte özellikle kirliliğin, faaliyet sahası civarındaki binaların altına kadar yayılmış olması durumunda, komşu tesis ve yerleşimlere mümkün olan en az rahatsızlığı vererek, hayatın doğal akışını bozmaksızın temizleme gerçekleştirilmesine olanak tanıyan bir yöntemdir. Tam ölçekle başarısı kanıtlanmış, 2005 yılından bu yana yaygın olarak kullanılan bir teknolojidir. Örneğin ABD'de, PCE ile kirlenmiş sahalarda %99 civarında giderim sağlanabilmiştir .

Kısıtlamalar: Temizleme etkinliğinde; kirletici derinliği ve alansal jeoloji önemlidir. Hava enjeksiyon kuyuları bölgeye özgü koşullar için tasarlanmış olmalıdır. Saha karakterizasyonu çok dikkatli yapılmalıdır. Vadoz bölge gaz geçirgenliği, yeraltı su tabakasının derinliği, yer altı suyu akısı, püskürtmenin radyal çapı/etkisi, düşük geçirgenlik tabakalarının varlığı, DNAPL varlığı, kirlilik derinliği, kirleticilerin uçuculuğu ve çözünürlüğü sistem verimini etkileyecektir. Toprağın heterojen yapısı, hava enjeksiyonunun etkisini düşürebilir.

Süre: Hava kabarcıklı arıtım süreleri SVE teknolojisi ile benzerdir. Bir kaç yıla kadar sürebilen uzun süreli bir teknoloji olarak kabul edilir. Uygun şartlar oluştuğunda 1 yıl ile 3 yıl arasında zaman alacağı varsayılabilir. Kirletici konsantrasyonları yüksek, kirlenmiş alan geniş ve derin olduğunda temizleme işlemi daha uzun sürebilir. Ayrıca yoğun veya nemli toprak, buharların hareketini yavaşlatacağından temizleme süresini uzatacaktır.

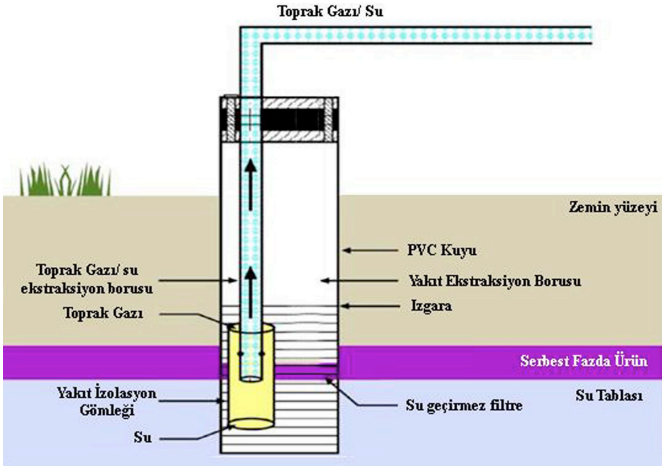
Maliyet: Kirliliğin yüzey alanı birincil maliyet etmenidir ve doğrudan hava enjeksiyon noktalarının sayısını etkiler. Derinde yer alan kirletici katmanına bağlı olarak sondaj maliyeti de artacaktır. Yaklaşık maliyetler 24 – 84 USD/m3' tür [2].

Uygulama Sırasında dikkat edilecek konular: SVE teknolojisinde bahsedilen hususlar bu teknoloji için de geçerlidir. Uygun şekilde tasarlanmış ve çalıştırılan sistemler işçiler veya toplum için çok az risk oluşturmaktadır. Arıtmanın devamında uygulanan ekstraksiyonda kullanılan kimyasal maddelerin buharına maruz kalınmamalıdır. Sistemin montajı, sondaj teçhizatlarının kullanımını ve kuyuları, hava körüğünü, arıtma ekipmanlarını kurmak için de bazen diğer ağır makinelerin kullanımını gerektirir. Sistem işleyişinin düzenli olarak izlenmesi ve hava akımının düzenli olarak kontrol edilmesi prosesin önemli bir parçasıdır. Hava akışı, doygun bölge içinde her yerde aynı olmayabilir, bu durum da potansiyel olarak kirletici içeren buharın kontrolsüz olarak hareket etmesi anlamına gelebilir [15].

4.2.16. Sıvı-Gaz Emişli Arıtım

Sıvı-Gaz Emişli Arıtım	
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinde
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Yeraltı suyu
Proses Türü	Fiziksel
Uygulanabilecek kirletici türleri	Yakıtlar SVOC HSVOC
Maliyet	15 USD/litre LNAPL
Süre	1 Yıl - 3 Yıl
Diğer	Yüksek su tablası ve ince taneli yapıdaki ortamlarda uygulanamaz

Tanım: Bu teknoloji ile; aynı anda serbest fazda ürün geri kazanımı ve biyohavalandırma tekniklerinin avantajlarından yararlanılarak büyük miktarlarda yeraltı suyunu çekmeksizin serbest ürün geri kazanımı, toprak gazı arıtımı ve yeraltı suyu temizlenmesi sağlanabilir. Emiş kuyusu, LNAPL (su ile karışmayan sudan hafif madde) fazın bulunduğu akiferde açılarak kuyudan dışarıya yeraltı suyuyla karışık kirletici ve hava çekilmeye başlar. Kuyudan çekilen sıvı yağ/su ayırıcısına gönderilerek serbest ürün (ör. yakıt) geri kazanılır, ayrılan yeraltı suyu ise arıtılarak deşarj edilebilir. Bu esnada kuyudan çekilen hava ise hava/sıvı ayırıcısına sevk edildikten sonra buradan hava arıtımı sistemine iletilir. Emiş tüpünden geçen gazların uzaklaştırılması bir taraftan yeraltında vakum etkisi yaratarak ekstraksiyon kuyusuna doğru hava akımı sağlayacaktır. Bu sayede vadoz bölgede biyohavalandırma ile toprağın havalanması sağlanmış olur ve vadoz bölgede ve kılcal saçakta biyoventilasyon prosesinde olduğu gibi aerobik biyobozunmayı destekleyici derecede oksijen artışı meydana gelebilir. Prosesin çalışma yöntemi şematik olarak aşağıdaki şekilde (Şekil 4.33) verilmiştir.



Şekil 4.33 Sıvı-Gaz Emişli Biyolojik Arıtım Prosesi Örnek Gösterim

Belirli bir süre gaz giderimi sonrasında vakum kaynaklı basınca tepki olarak sıvı seviyesinde slurp tüpü seviyesine kadar yükselme meydana gelir ve tekrar kuyuda ürün ve yeraltı suyu ekstraksiyonu başlar. Yeraltı suyu/serbest ürün ve toprak gazı ektraksiyonu arasındaki bu döngü bioslurping teknolojisinin temelini oluşturur [2].

Uygulanabilirlik: Hava emişli biyolojik arıtım petrol hidrokarbonlarıyla kirlenmiş toprakları iyileştirmek için başarıyla kullanılabilir. Bu teknoloji uygun maliyetli bir saha temizleme teknolojisi olup aynı anda LNAPL giderimi ve vadoz bölgedeki toprak iyileştirmesini gerçekleştirir. Ayrıca derin yeraltı su tablası (> 9 metre) olan sahalarda da uygulanabilir. Çoğunlukla ince - orta arası büyüklükte taneli yapıya sahip ortamlarda kullanılmıştır. Kırıklı kaya katmanında orta – iri taneli yapılarda da kullanılabilir [16]. Sıvı-Gaz emişli arıtım düşük geçirgenliğe sahip topraklarda daha az etkilidir. Yüksek su tablası, yüksek toprak nemi ve ince taneli zeminlerde uygulaması olanaksızdır. ABD'de özellikle hava kuvvetlerine ait uçak yakıtıyla kirlenmiş sahalarda tercih edilmiş bir teknolojidir [2].

Kısıtlamalar: Sıvı-Gaz Emişli arıtma sistemlerinin tasarımı öncesinde incelenmesi gereken saha karakteristikleri LNAPL üzerinde BTEX analizleri ve hidrokarbonların kaynama noktasıdır. Toprağın partükül boyut dağılımı, kaba yoğunluğu, nem içeriği, BTEX ve TPH içeriği belirlenmelidir. LNAPL geri kazanım hızının belirlenmesi için seviye düşürme (baildown) testleri gerçekleştirilmelidir. Ekstraksiyon kuyularının etki çapında toprak gazı geçirgenlik testleri ve biyobozunma hızlarının belirlenmesi için yerinde respirasyon testleri de yapılmalıdır. Düşük toprak nemi biyodegradasyonu ve biyoventilasyon etkinliğini sınırlandırabilir. Temizleme verimi, düşük sıcaklıklarda azalır. Temizleme sisteminden kaynaklanan çıkış gazlarının deşarj edilmeden önce arıtılması gerekir. Benzer şekilde büyük miktarda suyla çalışan sistemlerde, suyun içerisindeki kirletici konsantrasyonuna bağlı olarak arıtılması gerekebilir. Doygun topraklardaki kalıntı kirliliği gideremez [16].

Süre: Bu teknolojinin işletme ve bakım süreleri saha koşullarına bağlı olarak 1 yıl ile 3 yıl arasında değişebilir. Kısa-Orta vadeli bir teknoloji olarak kabul edilir.

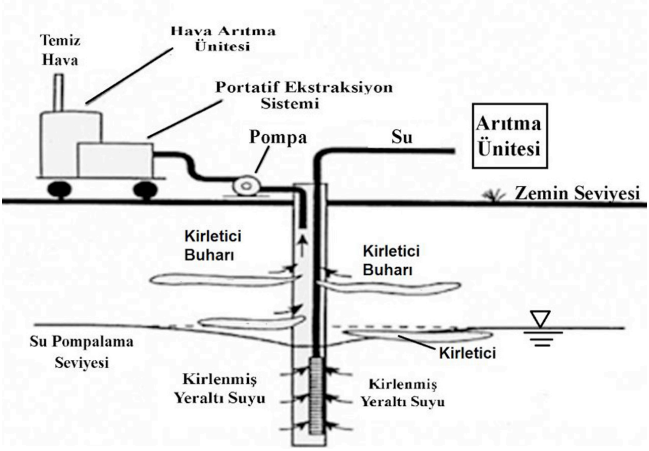
Maliyet: Bu teknoloji ile yeteri kadar çeşitli uygulamaya ait maliyet verisi bulunmadığından aralık belirlenememiştir. Ancak, maliyet örneği olarak ABD'de uçak yakıtı ile kirlenmiş bir sahadaki uygulamada bu sistemle LNAPL geri kazanımında, çekilen her bir litre LNAPL 15 USD harcanmıştır. Bu yöntemle toplam 24.600 Litre LNAPL geri kazanılmıştır [2].

Uygulama Sırasında dikkat edilecek konular: Fizibilite çalışması ve pilot ölçekli test sırasında, arıtma etkisi ve ekstraksiyon kuyusu sayısı etki alanının belirlenmesi, tam ölçekli uygulamaların yerleşim tasarımı için kritik öneme sahiptir. Toprak tane büyüklüğü ve toprak nemi önemli ölçüde toprak gazı geçirgenliğini etkiler. Aşırı nemli topraklarda hava geçirgenliği ve oksijen transfer kapasitesini azalarak proses çalışmaz hale gelebilir. Çok az nem ise mikrobiyal aktiviteyi olumsuz etkileyeceği için tercih edilmez. Sahada büyük hafriyat gerektirmediğinden çevreye az rahatsızlık verir. Sıvı-Gaz Emişli arıtım sisteminin performansının izlenmesinde önemli parametreler; çekilen sıvı ve gazların hacmi, toprağın farklı seviyelerinde kalan sıvı ve gazların bileşenleri. Slurp kuyularında ve civarındaki toprakta vakum seviyeleri. Temizleme sahasında yeraltı suyu seviyeleridir [17].

4.2.17. Çift Faz Ekstraksiyonu

Çift Faz Ekstraksiyonu	
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinde
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Yeraltı suyu
Proses Türü	Fiziksel
Uygulanabilecek kirletici türleri	VOC, SVOC HVOC, HSVOC Yakıtlar
Maliyet	30 – 72 USD/metreküp
Süre	1 Yıl -10 Yıl
Diğer	Düşük geçirgenliğe sahip formasyonlarda önerilmez

Tanım: Çift faz ekstraksiyonu, kirlenmiş yeraltı suyundaki, serbest fazdaki petrol ürününü ve hidrokarbon buharını aynı anda uzaklaştırmak için kullanılan yüksek vakum sistemidir. Çıkarılan buhar ve sıvılar, toplanır ve ayrı ayrı arıtılır. Bu yöntem ile su tablasının üstündeki ve altındaki kirleticileri ortadan kaldırmak mümkündür. Sistem, kuyunun etrafındaki su tablasını düşürerek, daha fazla alanı vakuma maruz bırakır. Böylelikle ortaya çıkan doymamış bölgedeki kirlilikler buhar ekstraksiyonu için erişebilir hale gelir. Aynı zamanda, yüksek debili akiferlerde, yeraltı suyunu geri kazanmak için pompalama ve arıtma teknolojileri ile kullanılabilir. Çift faz ekstraksiyon prosesinin çalışma prensibi Şekil 4.34'te görülebilir.



Şekil 4.34 Çift Faz Ekstraksiyon Çalışma Prensibi

Uygulanabilirlik: Çift Faz Ekstraksiyon teknolojisinin hedef kirletici grupları VOCler ve yakıtlardır. Bu teknoloji heterojen yapıdaki kil ve ince kumlu toprak formasyonlarında SVE'ye göre daha etkilidir. Ancak, düşük geçirgenliğe sahip formasyonlarda, çözünmemiş, izole bölgeler kalma olasılığı bulunduğundan, bu tip formasyonlar için kullanılması önerilmez. Çift fazlı ekstraksiyon teknolojisi; biyolojik

yöntemler, hava enjeksiyonu veya bioventilasyon ile birleştirilebilir; bu teknolojilerle birlikte kullanımı sahada temizleme süresini kısaltabilir. Özellikle kirletici maddeler tespit edilmesinden sonra, acil müdahale ile kaynağın ve ürünün geri kazanılması ve uzaklaştırılmasında etkili bir yöntemdir. Çeşitli ülkelerde petrol boru hatları, solventler ve çeşitli yakıtlarla kirlenmiş yeraltı sularının temizlenmesinde başarıyla uygulanmıştır.

Kısıtlamalar: Ekstrakste edilen kirleticinin fiziksel ve kimyasal özellikleri (ör. viskozite, yoğunluk, kompozisyon, derinlik ve çözünürlük); toprak özellikleri (ör. kapiler kuvvetler, gözenek yapısı, nem içeriği, organik içerik, hidrolik iletkenlik); kirlilik salınımı yapısı; jeoloji (ör. serbest ürünün farklı noktalarda kümelenmesine olanak sağlayacak katman yapısı tercih edilmez); hidrojeolojik rejim (ör. geçirgenlik, su tablasının yüksekliği, yeraltı suyu akış yönü ve eğimi) bu teknolojinin etkin şekilde gerçekleştirilmesinde önemli unsurlardır.

Süre: Saha koşullarına, ekstrakte edilecek kirleticinin özelliklerine göre büyük değişkenlik gösterir. Temizlemenin 1 Yıldan az sürmesi beklenmez ancak sahanın durumuna göre 10 yıldan fazla da sürebilir.

Maliyet: Çift faz ekstraksiyonu yaklaşık maliyetleri, ek prosesler ve oluşacak atıkların bertarafını dâhil etmeksizin 30 – 72 USD/metreküp olarak tahmin edilmiştir. Toprak geçirgenliği maliyeti belirleyen önemli bir etkendir. Çift faz ekstraksiyonu geçirimi yüksek kum - silt karışımlarında iyi performans gösterir. Geçirimsiz (kil) veya aşırı geçirgen (çakıl/kum) topraklarda temizleme zorlaşmaktadır. Kirliliğin taban derinliği çift faz ekstraksiyonu için diğer bir önemli parametredir. Kirlenmiş yer altı suyu derinliği ve kirlilik kalınlığı arttıkça proses maliyetleri artış gösterecektir.

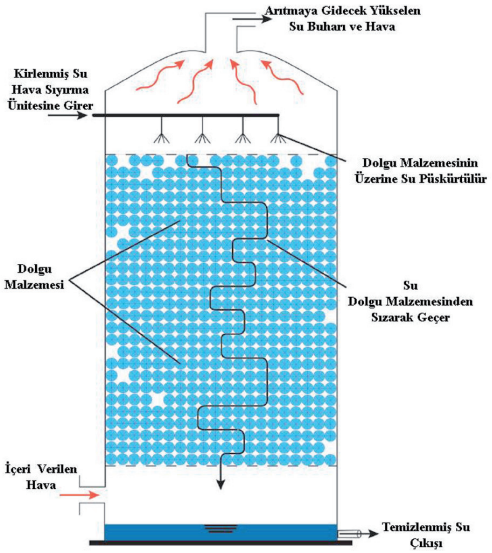
Uygulama Sırasında dikkat edilecek konular: Yüksek debili akiferlerden yeraltı suyunu geri kazanabilmek için başka tamamlayıcı teknolojilerle (örneğin pompaj ve arıtma) birlikte kullanılması gereklidir. Proses sonucunda su ve buhar arıtımının yapılması ve proses çıktılarının izlenmesi önemlidir [2].

4.2.18. Havalı Sıyırma

Hava İle Sıyırma	
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinden alınarak
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Yeraltı suyu
Proses Türü	Fiziksel/Kimyasal Arıtma
Uygulanabilecek kirletici türleri	VOC* HVOC
Maliyet	0,13 -0,9 USD/metreküp
Süre	En az 1 yıl

*VOClerle kirlenmiş sahalarda başarısı kanıtlanmış, önerilen teknolojidir.

Tanım: Hava ile sıyırma, uçucu organik kirleticilerin sudan havaya transferini sağlayan bir teknolojidir. Yeraltı suyu pompalanarak yerinden alındıktan sonra, uçucu organikler ile havanın temas alanı arttırılar bu transfer gerçekleştirilir. Farklı system konfigurasyonları için çeşitli havalandırma yöntemleri mevcuttur. Yeraltı suyunun temizlenmesinde bu proses dolgu kule veya havalandırma tankı şeklinde uygulanabilir [2].



Şekil 4.35 Havalı Sıyırma Prosesi Gösterim Şeması

Dolgu kule tipi sıyırıcılar beton plakalar üzerinde kalıcı yapılar halinde olabileceği gibi, taşınabilir yapı üzerinde de kurulabilir. Havalandırma tankının avantajı dolgu kulelere göre (5–12 metre) daha düşük yüksekliklere sahip olmasıdır (2 metreden kısa). Yüksekliğin problem teşkil edebileceği durumlarda, bu özelliği ile ve ayrıca performansının giriş suyu kompozisyonuna göre modifiye edilebilir olması dolayısıyla tercih edilen bir yöntemdir [18]. Sistemden açığa çıkan havanın ayrıca

arıtıma tabi tutulması gerekir. Özellikle yatay ve dikey eksendeki alan kazanımları nedeniyle yeraltı suyu arıtımında oldukça tercih edilen bir yöntemdir.

Uygulanabilirlik: Hava ile sıyırma tipik olarak VOClerle kirlenmiş yeraltı suyunun temizlenmesinde kullanılır. İnorganik kirleticiler için etkili değildir. Hava ile sıyırmanın etkisinin belirlenmesinde Henry sabiti kullanılır. Genellikle 0,01 atm-m3/mol'den büyük sabite sahip organik bileşiklerin hava ile sıyırmaya uygun olduğu kabul edilir. Hava ile sıyırma yoluyla sudan başarıyla ayrılabilen bileşiklere örnek olarak BTEX, kloroetan, TCE, DCE, ve PCE verilebilir. Aynı prensiple kirlenmiş yeraltı suyunun yüzeye çıkartılmadan yerinde temizlenmesi, "kuyu-içi havalı sıyırma" teknolojisi olarak geliştirilmiştir [2].

Kısıtlamalar: Ekipmanın inorganik (5 ppm'den büyük demir ve 800 ppm'den büyük sertlik olması durumunda) veya biyolojik kaynaklı bozulması sözkonusu olabilir. Bu nedenle ön arıtma ve periyodik kolon temizlemesi gerekir. Sadece havaya geçebilecek kirleticilerle kirlenmiş olan sularda etkilidir. Kulede kullanılan dolgu maddesinin tipi ve miktarı dikkatle seçilmelidir. Ortam sıcaklığında düşük uçuculuğa sahip bileşiklerin temizlenmesi için yeraltı suyunun ön arıtma olarak ısıtılması gerekebilir [18].

Süre: Hava ile sıyırma yoluyla temizleme sistemi onlarca yıl sürebilir. Temizleme süresi tüm kirliliğin yeraltı suyundan alınmasının alacağı süreye bağlıdır.

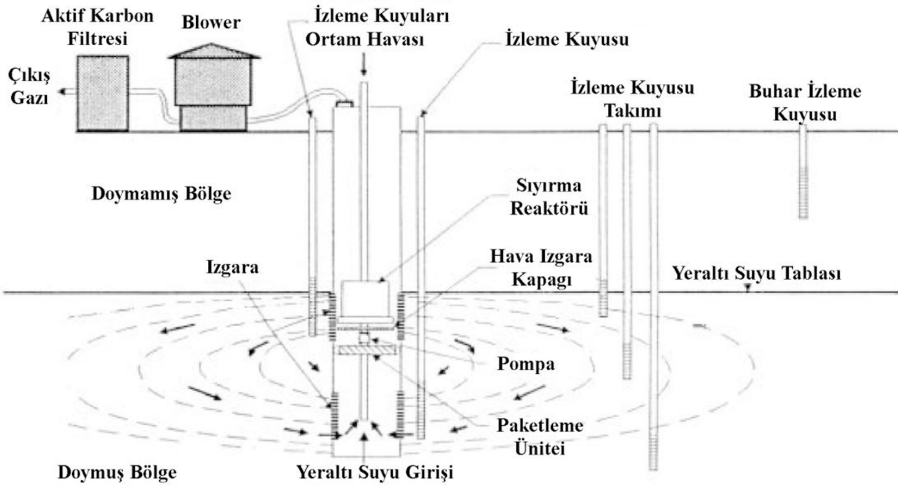
Maliyet: Proses enerji maliyetleri çok yüksektir. Maliyeti etkileyen etmenler, giren yeraltı suyu debisi, kirleticinin uçuculuğu ve çıkış gazı arıtım ihtiyacıdır. Hava ile sıyırıcılar için en büyük maliyet kalemi yeraltı su pompası, deşarj pompası ve blower için elektrik maliyetleridir.

Uygulama sırasında dikkat edilecek konular: 4,6 – 6 metre boyundaki dolgu kule için giderim verimleri %99 civarındadır. Giderim verimi birinci üniteye seri olarak ikincil hava sıyırma ünitesi bağlayarak, kirlenmiş suyu ısıtarak, konfigurasyonu ya da dolgu malzemesini değiştirerek arttırılabilir. Hava sıyırıcı ünitelerinden kaynaklanan emisyonların giderimi için kullanılan ısıl birimler ısı kaynağı olarak kullanılabilir. Havalandırma tanklarının performansı ise tank tasarımına bağlı olarak odalar eklenerek, hava beslemesini fazlalaştırarak arttırılabilir. Dolgu kule hava sıyırma ünitelerinde yaşanan en büyük sorun dolgu malzemesinde tortu birikmesi/bozunmasıdır. Tortulaşma nedeniyle, hava akış hızında düşüş meydana gelir. Tortulaşma, besleme suyundaki minerallerin (demir, mangan vb.) oksitlenmesi ve kalsiyum nedeniyle çökelmesi veya dolgu malzemesi üzerinde mikroorganizmanın birikmesiyle olur. Çıkış gazlarının arıtılması ilgili mevzuat çerçevesinde değerlendirilmelidir [18] [2] .

4.2.19. Kuyu içi Havalı Sıyırma

Kuyu İçi Havalı Sıyırma	
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinde
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Yeraltı suyu
Proses Türü	Fiziksel/Kimyasal Arıtma
Uygulanabilecek kirletici türleri	HVOC SVOC Yakıt VOC
Maliyet	Yeterli veri bulunmamaktadır
Süre	En az 1 yıl
Diğer	Sığ akiferlerde etkinliği sınrlıdır

Tanım: Kuyu içi havalı sıyırma teknolojisi, iki farklı perde ile üst ve alt katmanlara ayrılan dikey bir kuyuya iki farklı derinlikten hava enjekte edilmesi ile kuyudaki su seviyesinin üstteki perdeye kadar yükseltilmesi ve aynı anda alt perdeden suyun çekilmesi işlemidir. Alt perde yeraltında doygun bölgeye, üst perde doygun olmayan (vadoz) bölgeye yerleştirilir. Kirlenmiş yeraltı suyu sisteme alt perdeden giriş yapar. Basınçlı hava su tablasının altından enjekte ederek suyu havalandırır. Havalandırılan su kuyuda yükselir ve sistemden üst perdeden çıkış yapar. Kirlenmiş yeraltı suyundaki VOCler, kuyu içerisinde hava kabarcıkları ile sıvı fazdan buhar fazına transfer edilir. Kirletici yüklü hava kuyuda yükselerek su yüzeyine çıkar, buradan SVE sistemi ile çekilir ve arıtılır. Basınçlı kuyu içi havalı sistemlerde, kirletici yüklü havadaki kirleticilerin, hava toprağa verilerek mikroorganizmalar yardımıyla biyobozunması sağlanır [2].



Şekil 4.36 Kuyu içi Hava ile Sıyırma Prosesi Gösterim Şeması

Kısmi olarak arıtılan yeraltı suyu yüzey üzerine kesinlikle çıkartılmaz, yeraltı suyunun düzenli sirkülasyonu sağlanarak temizlenmesi tamamlanmayan su doygun olmayan bölgede kalmaya zorlanır. Yeraltı suyu, arıtma sistemi içerisinde sirküle edilirken kirletici konsantrasyonları kademeli olarak azalır. Bu sistemin geliştirmeleri (yer altı suyuna biyolojik aktiviteyi arttıracak nutrient gibi maddelerin eklenmesi, metal stabilizasyonu sağlayacak kimyasal maddelerin eklenmesi gibi) de mevcutttur.

Uygulanabilirlik: Tipik olarak, kuyu içi havalı sıyırma sistemleri VOC ile kirlenmiş yeraltı sularının temizlenmesinde, derin su tablası olan kısımlarda suyun yüzeye çıkartılmasını gerektirmediğinden maliyet etkin yöntemlerdendir. Bu teknoloji için hedef kirleticiler, halojen içeren VOCler, SVOCler ve yakıtlardır. Teknolojinin bazı halojen içermeyen VOCler, SVOCler, pestisitler ve inorganikler için türevleri kullanılabilir. Genellikle, yüksek konsantrasyonlarda, yüksek Henry sabitine sahip çözünmüş kirleticiler içeren sahalarda en etkilidir. Sığ akiferlerde kullanımı etkin olmayabilir. Yeraltı suyu akış hızının yavaş olduğu durumlarda verimli çalışan bir sistemdir.

Kısıtlamalar: Sadece sıyırma kuyusundaki suyu arıtır. Çökelti içeren oksitlenmiş bileşenlerin sızması ile sistemde tortulaşma oluşabilir. Yeraltı suyu akış hızının yüksek olduğu yerlerde verimli çalışmayabilir. Kirliliğin yayılmaması için sahadaki kirletici bulutunun sınırlarının iyi tanımlanmış olması gerekmektedir.

Süre: Kirletici konsantrasyonları, Henry sabiti, etki yarıçapı ve saha hidrojeolojisine bağlı olarak kısa-uzun dönem arası zaman alır.

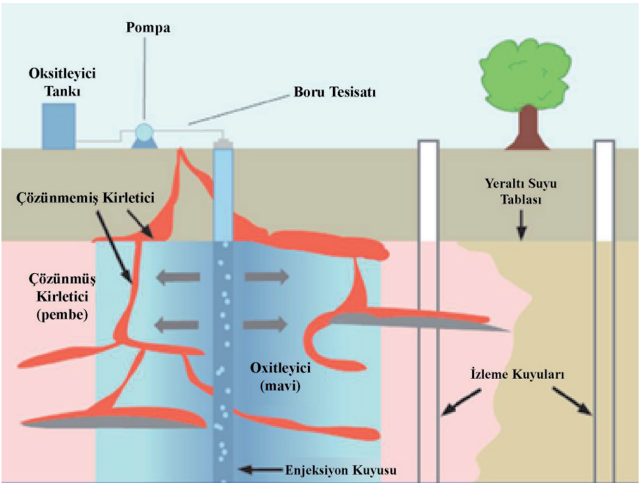
Maliyet: Bu teknoloji için maliyet verisi bulunmamaktadır.

Uygulama Sırasında Dikkat Edilecek Konular: Suda çözünmeyen maddelerin (NAPL) bulunduğu sahalara sirkulasyon kuyusu tipi işletme türü (kirleticilerin bulaşarak yayılması tehlikesine karşı) uygulanmamalıdır [18] [2].

4.2.20. Kimyasal Oksidasyon

Kimyasal Oksidasyon		
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinde	Yerinde
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Toprak	Yeraltı suyu
Proses Türü	Kimyasal	Kimyasal
Uygulanabilecek kirletici türleri*	VOC, HVOC HSVOC Patlayıcılar	VOC, HVOC HSVOC Patlayıcılar
Maliyet	Yeterli veri bulunmamaktadır	0,82 – 4,62/metreküp
Süre	En çok 1 yıl	En çok 1 yıl

Tanım: Yerinde kimyasal oksidasyon, kaynakta ve kirletici bulutunda kütle azaltılmasında kullanılan bir tekniktir. Şekil 4.37'te yeraltı suyunun temizlenmesinde kimyasal oksidasyon işlemi süreci özetlenmektedir.



Şekil 4.37 Kimyasal Oksidasyon yöntemi ile Yeraltı Suyu Temizleme Gösterimi

Toprak ve yeraltı suyunu yerinde temizlemek için oksitleyici maddeler yeraltına kuyular yoluyla pompalanarak enjekte edilir. Oksitleyici, kuyulara pompalandığında civarındaki toprağa ve yeraltı suyuna yayılarak kirleticileri yok eden ve zararsız yan ürünler oluşturan kimyasal tepkimeler meydana gelir, tehlikeli kimyasallar tehlikesiz veya daha stabil, az hareketli, ve/veya inert, daha az toksik bileşenlere dönüştürülür. Bu sistemin avantajı pek çok kirletici türünün gideriminde hızlı reaksiyon gerçekleştirmesidir. Sistemin başarısında kritik konu oksitleyici maddenin niteliği ve sahaya iletim sistemidir. En çok kullanılan oksitleyici maddeler ozon, hidrojen peroksit, permanganat, hipklorit, klor ve klordioksittir. Kuyular kaynak alanında mümkün olduğunca çok çözünmüş ve çözünmemiş kirliliğe erişebilmek için farklı derinliklere yerleştirilir. Kimyasal oksidasyon yönteminin uygulanmasından sonra,

kalan düşük miktardaki kirleticilerin gideriminde, pompalama arıtma veya izlemeli doğal giderim gibi diğer temizleme yöntemleri gerçekleştirilebilir [2].

Uygulanabilirlik: Bu teknik ile yakıtlar, solventler, pestisitler gibi pek çok kirletici grubu temizlenebilmektedir. Kimyasal oksidasyon, genellikle kirlilik kaynağının yerinde temizlenmesine yönelik olarak kullanılan, kirleticilerin çoğunu toprağı kazmak veya yeraltısuyunu yüzeyüstüne çıkartmak gerekmeden temizler. Bu yöntem, toprak/yeraltı suyu kirliliğini, kirleticilerin ilk olarak yayılmaya bağladığı kirlilik kaynağına müdahale ederek temizlemeyi hedefler. Kaynak alan henüz yeraltı suyunda çözünmemiş kirleticiler içerebilir [19]. Oksitleyici sevkiyatı yatay ve dikey enjeksiyon kuyuları kullanılarak ve oksidantı düzenli olarak yüzeyaltına hareket ettirecek dağıtım noktalarından gerçekleştirilir. Genellikle oksitleyici maddeler, doygun olmayan alifatik (trikloroetilen) ve aromatik bileşikler üzerinde çok seri reaksiyon hızlarında (dakika içerisinde %90 parçalama) yüksek arıtma verimine erişme kapasitesine sahiptir (%90 ve üzeri). Tam ölçekli başarısı kanıtlanmış, yaygın kullanımı olan bir tekniktir. Bir sahaya basit şekilde entegre edilebilir ve günümüzde kolaylıkla temin edilebilir ekipmanlar ile uygulanabilir .

Kısıtlamalar: Kimyasal oksidasyonun etkinliğini sınırlandıran faktörler şunlardır: Yüksek miktarlarda tehlikeli oksitleyici kimyasalların, sahadaki yüksek miktardaki kirliliğin gideriminde kullanılmak üzere sahada (kimi zaman oksitleyicilerin verimsiz kullanılması sebebiyle de yüksek miktarlarda) muhafaza edilmesi gerekmektedir. Bazı kimyasallar oksidasyona direnç gösterebilir. Yeraltı suyunun temizlenmesinde bu teknolojinin kullanılması büyük miktarlarda kimyasal maddelerin yönetimini gerektirmektedir. Yeraltı suyunun temizlenmesinde hedef kirleticilerin bozunma hızı ve derecesi kimyasalın yapısı ve oksidatif bozunma yatkınlığının yanı sıra, ortam şartları, özellikle pH, sıcaklık, oksitleyici konsantrasyonu ve organik maddeler ve indirgenen mineraller, karbonat ve diğer serbest radikaller gibi oksitleyici tüketen maddelerin konsantrasyonu bilinmelidir.

Süre: Yerinde kimyasal oksidasyon bir sahayı hızlı sayılabilecek bir sürede temizler. Temizleme işlemi bir kaç ay ile yıl arasında zaman alabilir. Saha özelliklerine bağlı olarak değişmekle birlikte kirlilik kaynağı alan büyük olduğunda, kirleticiler çatlaklar veya kil gibi erişilmesi güç alanlarda hapsolduğunda, toprak veya kayanın oksitleyicinin hızlı ve eşit şekilde dağılmasını engellediği durumlarda, yeraltı suyu akışının yavaş olduğu durumlarda, oksitleyicinin yeraltında uzun süre kalmaması durumunda temizleme süresi artar [2].

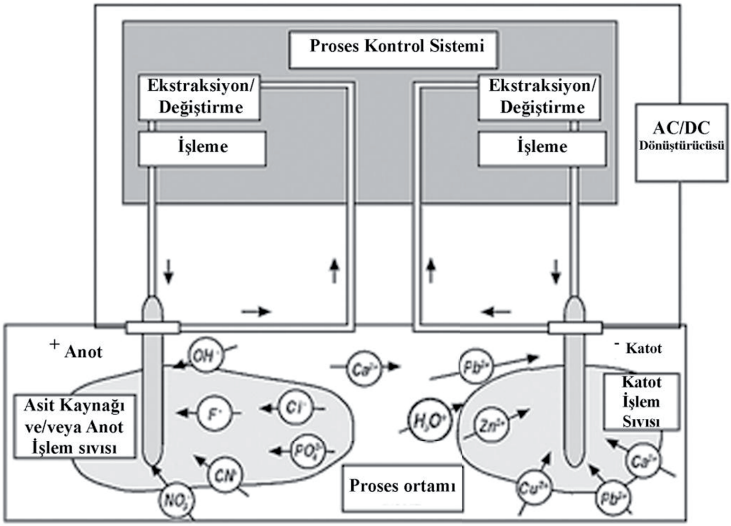
Maliyet: Malzeme miktarının maliyetler üzerinde büyük etkisi bulunmaktadır. Toprak kirliliğinde ise nem miktarı arttıkça maliyetlerde az da olsa bir artış gözlenir. Yeraltı suyu kirliliğinin temizlenmesinde çok yüksek ve düşük konsantrasyonlar temizleme maliyetini arttırır. Yeraltı suyunun bu yöntemle temizlenmesinde maliyet yönünden verimliliği arttırılmaya çalışılmaktadır.

Uygulama Sırasında dikkat edilecek konular: Yerinde kimyasal oksidasyon prosesi saha civarında ikamet eden kişilere çok az risk teşkil eder. Kimyasallarla çalışıldığından dolayı işçiler, koruyucu kıyafetler giymelidir. Kirlilik, yeraltında temizlendiği için bu proses işçileri veya sahaya yakın olan diğer kişileri kirlilik maruziyeti altında bırakmaz. Prosesin verimli olarak çalıştığının test edilmesi için işçilerin düzenli olarak toprak ve yeraltı suyundan numuneler alması gerekmektedir. Yakında ikamet edenler ve işyerleri sondaj makinaları ve kamyonlardan kaynaklanan trafiğe şahit olabilir. Ayrıca civar sakinleri arıtma cihazlarının sesini, işletme esnasında duyabilir. Ayrıca, işçi eğitimlerine ve proses kimyasallarının dikkatlice yönetimine büyük önem verilmelidir. Bunun yanısıra proses sonrasında açığa çıkacak temizleme atıklarının uygun şekilde yönetilmesi önemlidir. Prosesin tasarımı ve kurulumu karakterizasyon testlerinde ve tepkime taşınım modellemelerine bağlı olarak, ayrıca laboratuvar ve saha ölçeğinde arıtılabilirlik çalışmaları ile desteklenmelidir. Yeraltı suyunun yerinde oksidasyonla temizlenmesinin avantajları, hedef kimyasallar ile seri ve kapsamlı reaksiyonları pek çok biyo-rekalsitrant organiklerle ve yeraltındaki çeşitli ortamlarda verebilmesidir. Ayrıca, yerinde kimyasal oksidasyon sahaya kolaylıkla bulunabilir ekipmanlarla kolaylıkla adapte edilebilir [19]. Doğru oksitleyici madde ve hedef kirleticinin eşleştirilmesi bu sistemin performans hedefleri ve kurulumu için ana etmendir. Permanganat yüzey altında daha stabil ve kalıcı olduğu için yeraltı suyunda difuzyon prosesleri ile göç edebilir. Oksidasyonun sistem üzerindeki etkileri çok iyi izlenmelidir. Üç oksidasyon reaksiyonu da (ozon, peroksit, permanganat) uygun şekilde tamponlanmadığında sistem pH'sını düşürebilir. Oksidasyon prosesi kaynaklı olarak kolloid oluşumu dolayısıyla toprak geçirgenliği azalabilir, topraktaki soğurulmuş metaller hareketlenebilir, bazı toksik yan ürünler ortaya çıkabilir. Ayrıca ısı ve gaz çıkışı olabilir, biyolojik aktiviteler etkilenebilir. Bu nedenle, kimyasal oksidasyon prosesinin çok titizlikle izlenmesi ve kontrolü gerekir [2].

4.2.21. Elektrokinetik Ayırma

Elektrokinetik Ayırma	
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinde
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Toprak
Proses Türü	Kimyasal
Uygulanabilecek kirletici türleri	İnorganikler
Maliyet	117 USD/metreküp
Süre	Yaklaşık 1 yıl
Diğer	Düşük geçirgenlikteki nemli toprakta etkilidir.

Tanım: Elektrokinetik temizleme yöntemi düşük yoğunluktaki doğru akımın seramik anot ve katot elektrotlar ile topraktan geçirilmesi ile kirleticilerin topraktan ayrılması prensibine dayanır. Bu yöntem yüklü parçacıkları harekete geçirir; pozitif yüklü bileşenler (metal iyonları, amonyum iyonları ve pozitif yüklü organik bileşikler) katota doğru hareket eder, negatif yüklü bileşenler (klor, siyanür, flor, nitrat gibi anyonlar ve negatif yüklü organik bileşikler) ise anota doğru hareket eder. Akım sayesinde anot önünde asit tabakası, katot önünde ise baz tabakası oluşmuş olur. Bu şekilde bir asidik durum yaratılması toprakta soğurulmuş olan metallerin de hareketlenmesine ve katot etrafında toplanmasına yardımcı olur. Prosesin şematik gösterimi Şekil 4.38'te verilmiştir.



Şekil 4.38 Elektrokinetik Ayırma İşlemi Çalışma Prensibi

Elektrokinetik temizleme için iki farklı yöntem söz konusudur: "İyileştirilmiş Giderme" ve "Giderme olmaksızın arıtma". "İyileştirilmiş giderme" kirleticilerin

polarize olan elektrotlara elektrokinetik olarak taşınmasıyla meydana gelir, kirleticileri sonraki aşamada ortamdan uzaklaştırmak üzere konsantre eder. Bu teknik metallerle kirlenmiş topraklarda sıklıkla uygulanmaktadır. "Giderme olmaksızın arıtma" yöntemi ise kirleticilerin elektrotlar arasındaki arıtma alanlarından elektro ozmotik taşınımı ile sağlanır. Elektrotların polaritesi periyodik olarak değiştirilerek kirleticilerin arıtma alanında ileri ve geri hareketi sağlanır. Bu şekilde konsantre edilen kirleticiler takip eden bir proses ile ortamdan uzaklaştırılmalıdır.

Uygulanabilirlik: Elektrokinetik ayırma teknolojisinin hedef kirleticileri ağır metaller, anyonlar, ve polar bileşiklerdir. Temizlenebilir konsantrasyonlar bir kaç ppm ile on binlerce ppm arasında değişebilmektedir. Elektrokinetik yöntemler en çok düşük geçirgenlikteki topraklarda etkindir. Bu topraklar özellikle doygun ve kısmi doygun kil ve siltli kil karışımlarıdır ve bünyesindeki suyu kendiliğinden dışarı vermez. Özellikle kil partiküllerin üzerindeki negatif yüzey yükleri nedeniyle en etkin şekilde kil yapıdaki topraklarda çalışır. Maksimum çalışma verimi %14 - %18 nem içeriği olması halinde gerçekleşir. By tekniğin Avrupa'da ve ABD'de az da olsa tam ölçekli gerçekleşen uygulamalar mevcuttur. Bunlar özellikle ağır metaller (Pb, Cr) ve TCE, BTEX ile kirlenmiş sahalardır.

Kısıtlamalar: Yükseltgenme/İndirgenme reaksiyonları istenmeyen ürünlerin açığa çıkmasına (klor gazı) neden olabilir. Gömülü olan metal veya izole etme malzemeleri elektrik iletkenlikte değişkenliklere yol açabilir, bu nedenle doğal jeolojik değişkenler çalışma öncesinde tanımlanmalıdır. Ayrıca, proses esnasında oluşan çok yüksek elektriksel iletkenlik içeren kalıntılar da tekniğin etkisiz hale gelmesine neden olabilir. %10'un altındaki nem içeriğine sahip atıklarda verim büyük oranda düşer.

Süre: Çok sayıda uygulama ile bu teknolojiyle temizleme süresi hakkında fazla veri bulunmamakla birlikte, bir yıla yakın temizleme süresi beklenmelidir [1].

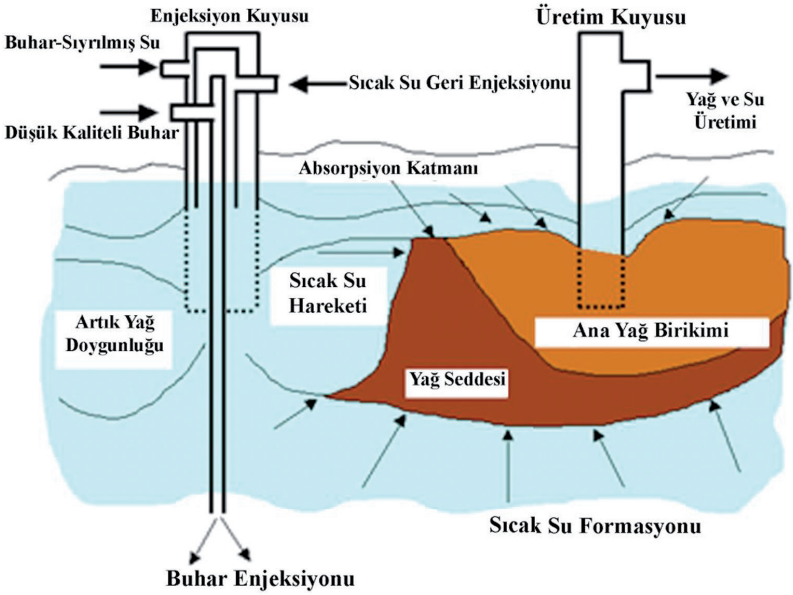
Maliyet: Temizlenecek toprağın miktarı, iletkenliği, kirleticinin türü, elektrotların birbirine uzaklığı ve yerleşimi maliyet üzerinde etkisi olan faktörlerdir. 0,03USD/ kilowatt.saat kadar standart enerji tüketimi varsayımıyla, doğrudan maliyet 15 USD/ metreküp olarak tahmin edilebilir. Proses geliştirmeleriyle birlikte maliyetler 50 USD/ metereküp ve üzerine çıkabilir. Tam ölçekli uygulama maliyetleri yaklaşık 117 USD/ metreküp olarak tahmin edilmektedir. Metallerle kirlenmiş olan ince yapıdaki ve heterojen yüzeyaltı kalıntılarını temizlemek için başka bir yerinde arıtım teknolojisi mümkün olamıyorsa, bu tekniğin kullanılması avantajlı olabilir.

Uygulama Sırasında dikkat edilecek konular: Asidik durumlar metal giderimine yardımcı olsa da, elektrotlardaki aşırı pH değerleri ve proses elektrot reaksiyonları nedeniyle indirgenme/yükseltgenme değişimleri elektrokinetic giderim etkinliğini engelleyebilir. Karbon, grafit, platin gibi inert elektrotlar kullanıldığında temizlenen toprak kütlesine bir kalıntı bırakılmamış olur. Bu nedenle, bu tip elektrotlar tercih edilmelidir. Elektroliz sonucunda metalik elektrotlar çözünebilir ve toprak kütlesinde korozif nitelikte kalıntılar bırakabilir [2].

4.2.22. Isıl Arıtım

Isıl Arıtım	
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinde
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Yeraltı Suyu
Proses Türü	Kimyasal Arıtma
Uygulanabilecek kirletici türleri	HVOC, SVOC, HSVOC Yakıtlar
Maliyet	38 – 230 USD/metreküp
Süre	6 aydan kısa
Diğer	Sığ veya derin kirliliklerde kullanılabilir

Tanım: Kirlenmiş yeraltı suyunun ısıl işlemle temizlenmesi durumunda enjeksiyon kuyuları yardımıyla akifere buhar zerk edilir böylelikle uçucu ve yarı uçucu kirleticiler buharlaştırılır. Gaz fazına geçen bileşikler doygun olmayan bölgeye doğru hareket eder ve buradan ekstrakte edilerek arıtmaya gönderilir. Uygulamada sıcak su veya buhar içeren farklı sistemler mevcuttur. Sistemin gösterimi Şekil 4.39'da yapılmıştır.



Şekil 4.39 Yeraltı Suyunda Isıl İşlem Uygulaması Örnek Gösterim

Uygulanabilirlik: Yeraltı suyunun ısıl olarak temizlenmesinde hedef kirletici grupları SVOC ve yakıtlardır. Bu teknoloji ile VOC giderimi de gerçekleştirilebilir ancak, VOC türündeki kirleticiler için daha uygun maliyetli alternatifler olabilir [2].

Bu prosesin ardından yerinde biyolojik temizleme uygulanabilir böylelikle istenen organik giderimi hedefine ulaşılması mümkündür. Isıtma prosesi yardımıyla NAPL niteliğindeki bileşikler (çözücüler, petrol ve kreosot) yeraltı suyundan kolayca ayrılabilir. Bu teknoloji ahşap işleme tesisleri, petrol rafinerileri, kömür katranı, pentaklorofenol, kreosot ve petrol yan ürünleri gibi LNAPL-DNAPL kirliliği beklenen sahalarda kullanılabilir [20]. Yeraltı suyunun temizlenmesi uygulamalarında, bu proses büyük miktarlarda yakıt kirliliğinin giderilmesinde ve organik kirleticilerin yatay ve dikey olarak sahadan uzaklaşmasını geciktirmek için kullanılır. Bu proses, kirliliğin sığ veya derin olduğu alanlarda kullanılabilir. Mobil üniteler ile temizleme yapılması mümkündür. Başka teknolojilerle temizleme performansının verimli olmadığı silt ve killi yapılarda kullanılabilir. Ayrıca, derinde yer alan veya bina altlarında bulunan kirliliğe de erişebilen bir yöntemdir. Bu sayede yer altına kazılarak inilip temizlenmesinin yaratacağı çok yüksek maliyetlerin önüne geçilmiş olur. Doygun bölgede kullanılamayan bir teknolojidir ancak su tablasının düşürülmesi ile kullanımı mümkün olacaktır. Bu prosesin uygulanmasından sonra, yüzey altı koşulları kalıntı kirleticilerin biyobozunma yöntemiyle giderimi için de çok elverişli hale gelir. Yeraltı suyunın ısıl desorpsiyonla temizlenmesi ise henüz pilot ölçekli olup gelişmeye devam etmektedir [2].

Kısıtlamalar: Yeraltı suyunun temizlenmesinde prosesin etkinliğini ve uygulanabilirliğini sınırlandıran etmenler; toprak tipi, kirletici karakteristiği ve konsantrasyonları, jeolojik ve hidrojeolojik yapıdır.

Süre: Kısa süreli bir teknolojidir. Birkaç hafta ile birkaç ay arasında değişebilir.

Maliyet: Yeraltı suyunun bu yöntemle temizlenmesinde en önemli etken işletme hızıdır. mobil üniteler kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalarda, temizleme süresi toprak yapısı, atığın yapısı ve sistem verimine bağlı olarak ortalama %70 verimle çalışan bir sistemde 76–230 USD/metreküp maliyet geçerli sayılabilir. Sabit arıtma sistemlerinde ise birim alana kurulan kuyu sayısına bağlı olarak yaklaşık maliyetler 38-230 USD/metreküp olarak tahmin edilmektedir.

Uygulama sırasında dikkat edilecek konular: Yerinde ısıl desorpsiyon, doğru işletildiğinde saha çalışanlarına veya yakındaki halka tehdit oluşturmaz. Isıl işlem alanı genellikle ısıyı ve buharı aşağıda tutabilmek için beton, asfalt vb. geçirimsiz yüzey kaplaması ile kapatılır. Bu kapatma işlemi aynı zamanda kimyasal buharın kontrolsüz şekilde yüzeye çıkmasını da engeller. Bunun yanı sıra gaz kaçışını tespit etmek için düzenli olarak hava numuneleri alınmalıdır. Sistemin kurulumu aşamasında ağır iş makinaları ve sondaj ekipmanı çalışacaktır, ayrıca buhar arıtımında da gürültü çıkarabilecek teçhizatların çalışması söz konusudur. Temizleme sahasının hemen yakınındaki yerleşimler kamyon trafiğine ve ekipman gürültüsüne maruz kalacaktır [20]. Proses sonucu açığa çıkan katı/sıvı atıkların bertaraf edilmesi gerekir. Yüksek değişkenlikte geçirgenliğe sahip topraklarda kirlenmiş bölgelere verilen gaz akımı eşit olmayabilir. Saha jeolojisi iyi bilindiğinde, daha az kuyu kurularak ilk kurulum maliyetinin azaltılması mümkündür [2].

4.2.23. Pasif/Reaktif Arıtma Bariyerleri

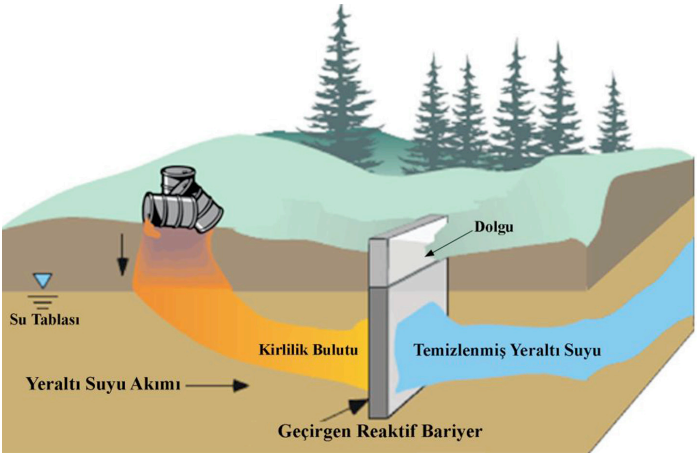
Pasif/Reaktif Arıtma Bariyerleri	
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinde
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Yeraltı Suyu
Proses Türü	Fiziksel/Kimyasal
Uygulanabilecek kirletici türleri	VOC, HVOC SVOC, HSVOC
Maliyet	1267 – 2580 USD/metreküp
Süre	En çok 3 yıl

Tanım: Kirletici maddelerin akış yoluna yerleştirilen bir reaksiyon duvarı ile suyun pasif bir şekilde duvarın içinden geçerken temizlenmesini sağlayan bir yöntemdir. Bu bariyerler su geçişine izin verirken, kirletici geçişine sıfır değerlikli metaller, şelatlar, sorbentler, mikroorganizmalar ve benzeri maddelerin etkisiyle izin vermezler. Reaktif maddelere bağlı olarak kirleticiler farklı mekanizmalarla temizlenir. Kirleticiler bozunmuş halde ya da bariyer malzemesi tarafından tutularak konsantre bir formda bulunurlar. Duvar göreceli tehlike teşkil etmeyen kirleticiler için kalıcı bir muhafaza görevi görebilir ya da bir sonraki temizleme aşaması için daha az hacimde konsantre kirletici ortamı sağlayabilir. Arıtılacak suyun PRB içerisinden akarak geçmesi gerekmektedir. Bariyerin içindeki "reaktif" maddeler ya zararlı kirleticileri bariyerde hapseder veya daha az zararlı hale getirir. Arıtılan su bariyerin diğer tarafından akışına devam eder. PRB genellikle kirlenmiş yeraltı suyu akışının yönünde uzun dar bir hendek kazılarak kurulur. Kazılan hendek, istenen temizleme hedefine yönelik olan reaktif malzeme (sıfır değerlikli demir, kireç taşı, karbon, malç) ile doldurulur. Bu malzeme, bariyeri daha geçirgen hale getirmek için kumla karıştırılabilir, böylelikle temizlenecek su bariyerin etrafını dolaşmak yerine doğrudan içerisinden geçer. Kil gibi geçirimsiz malzemelerle doldurulmuş yanal duvarlar PRB'ye açılı olarak yerleştirilir, böylelikle kirlenmiş yeraltı suyunun reaktif malzemelere göre akışı yönlendirilir. Dolgulu hendeklerin üstü toprak ile örtülür, yüzeyden görünmesi mümkün değildir [2].

Tablo 4.3 PRB ile Kirletici Giderim Mekanizmaları

Giderim Mekanizması	Örnek Durum
Soğurulma/Tutunma	Petrol ürünleri, PRB'den geçerken karbon partiküllerine tutunur.
Çöktürme	Çözünmüş kurşun ve bakır, kireç taşı ve deniz kabuğu partikülleri ile çökelir.
Tepkime	Demir partikülleri ve bazı sanayi tipi çözücüler, PRB'deki reaktif maddelerle tepkimeye girerek daha az zararlı formlarına dönüştürülür.
Biyobozunma	Reaktif olarak organik malç (ör. kompost, odun parçacıkları) kullanılır. Malç içerisindeki mikroorganizmalar kirleticileri parçalayıp su ve inorganik gazlara dönüştürür. Ayrıca, malç duvarından açığa çıkan organik karbon akımı bariyerin hemen arkasındaki bölüm için de reaktif vazifesi görür.

Uygulanabilirlik: Pasif iyileştirme duvarları için hedef kirletici grupları VOCler, SVOCler ve inorganiklerdir. Bazı yakıt kaynaklı hidrokarbonların iyileştirilmesinde de kullanılabilir, ancak yakıt bazlı kirliliğin giderimi konusunda alternatiflerine göre daha az etkilidir. Yeraltı suyunun doğal akışına uyum sağladığı için enerji gerektirmemektedir. Yüzeyüstünde ayrıca bir ekipmana ihtiyac duyulmamaktadır, bu sayede yerüstündeki işletme PRB kurulumu gerçekleştirmeden önceki işlevine devam edebilir [21]



Şekil 4.40 Geçirgen Reaktif Bariyer Uygulamasi Örnek Gösterimi

Kısıtlamalar: Sistem tasarımı için gerekli parametreler; hidrolik eğim, kirletici karakteristikleri, yeraltı suyu derinliği, geçirgen olmayan PRB bağlantı noktasına olan derinlik, saha stratigrafisi; yeraltı suyu hidrolojisi, su kalitesi, akış hızı ve yönü, toprak geçirgenliği ve tamponlama kapasitesidir. Pasif duvarların geçirgenliği metal tuzlarının çökelmesi, biyolojik etkinlik veya diğer kimyasal çökelme tepkimeleri nedeniyle azalabilir. Kazı ekipmanlarının çalışma koşulları nedeniyle, bariyerler 15 metreden daha derine yerleştirilememektedir. Bu da teknolojinin bir kısıtlamasıdır. Daha derine bariyer yerleştirilmesi, daha kısa bir bariyerin, büyük çaplı sondaj deliklerinin açılması ve çatlatmayla genişletme yapılması sonrası yerleştirilmesi ile mümkün olabilir [2].

Süre: PRB ile yeraltı suyunun temizlenmesi birkaç yıla kadar sürebilir. Temizleme süresi sahaya özel koşullara bağlı olarak değişim gösteririr. Yeraltı suyunun akışının yavaş olduğu, kirleticilerin yeraltı suyunda çözünmediği bu nedenle yerlerinde sabit kaldıkları, çözünmüş kirleticilerin (ör. sızıntı yapan solvent tankı) ana kaynağının kaldırılmadığı durumlarda PRB ile temizleme süresi daha da uzayacaktır [21].

Maliyet: Sistem için gerekli olan reaktif malzeme miktarının maliyet üzerinde büyük bir etkisi vardır. Ayrıca iyileştirilecek olan kirlilik alanının genişliği, temizleme için destek malzemelerinin, ünitelerinin kullanılması ve yasal olarak yapılması gereken ek gözlemler/analizler de maliyeti etkileyen diğer etmenlerdir. Passif/Reaktif Bariyerler

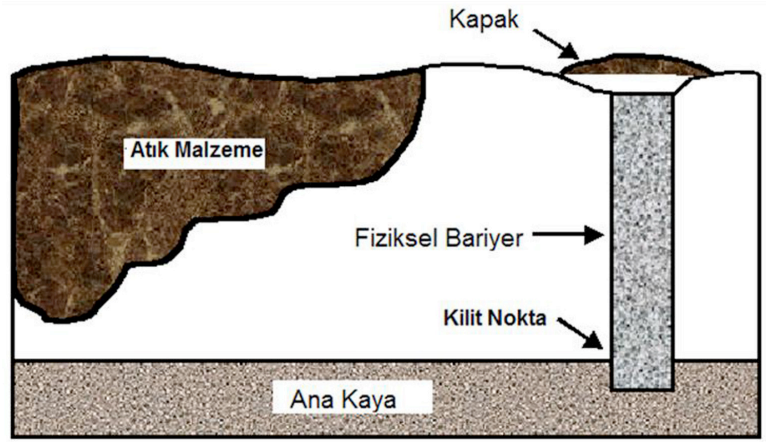
yeraltı suyunun temizlenmesinde göreceli olarak uygun maliyetli tekniklerdir. Bu sistemde kireçtaşı, deniz kabuğu katkıları, malç gibi malzemeler temizleme sahasına yakında bulunabiliyorsa, kullanımı çok ucuza maledilebilir.

Uygulama Sırasında dikkat edilecek konular: PRB içerisine yerleştirilen reaktif maddeler yeraltı suyuna veya insanlara zararlı değildir. Temizleme işlemi yerin altında gerçekleştiğinden, sahada görevli işçiler kirleticiye maruz kalmamış olur. Hendek kazılması esnasında kirlenmiş toprağa denk gelinebileceği için işçilerin koruma giysileri giymesi gerekir. Ayrıca, tozuma ve havaya yayılmanın engellenmesi için gevşek yapıdaki toprak bertaraf edilmeden önce sıkıştırılmalıdır. PRB'nin düzgün çalışıp çalışmadığının tespit edilmesi için yeraltı suyu düzenli olarak izlenmelidir. PRB inşaatı esnasında yakında ikamet eden kişiler iş makinası ve kamyon trafiğindeki artışa maruz kalabilir. Kurulumdan sonra PRB, gürültü kirliliği oluşturmaz. Temizleme işçilerinin yeraltı suyu ve toprak numuneleri almak üzere sahayı düzenli olarak ziyaret etmesi gerekir. Bir süre sonra bariyer içerisindeki reaktif maddelerin etkinliği azalabilir. Bu şekilde arıtma veriminde azalma gözlemlendiğinde reaktif maddenin kazılarak çıkartılması, bertarafa gönderilmesi ve yenilenmesi gerekir [21] [2].

4.2.24. Fiziksel Bariyerler

Fiziksel Bariyerler	
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinde
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Yeraltı suyu
Proses Türü	Fiziksel
Uygulanabilecek kirletici türleri	Tüm kirletici tiplerine uygulanabilir
Maliyet	540 – 750 USD/metrekare
Süre	Kalıcı bir teknolojidir

Tanım: Fiziksel bariyerler (ya da siluri duvarlar) kirlenmiş yeraltı sularını kontrol altına almak, kirlenmiş yeraltı suyunun içme suyuna karışmasını önlemek, kirlenmemiş yeraltı suyunun yönünü değiştirmek ve/veya yeraltı arıtma sistemi için bir bariyer sağlamak amacıyla kullanılır. Fiziksel bariyerler, içi çamur (bentonit ve sudan oluşan siluri) ile doldurulan dikey kazılmış hendeklerden oluşmaktadır. Siluri, hidrolik olarak hendeğin çökmesini engeller ve yeraltı suyu akışını azaltmak için bir filtre görevi görür. Siluri duvarlar genel olarak kirliliğin arıtma işlemi için çok büyük olduğu durumlarda ve çözülebilir ve hareketli bileşenlerin içme suyuna yakın tehdit oluşturduğu yerlerde kullanılır.



Şekil 4.41 Fiziksel Bariyer Uygulama Örneği

Uygulanabilirlik: Siluri duvarlar, yeraltı suyunu tutma vazifesi görürler. Belirli bir hedef grup kirletici özelinde kullanılmaz. Fiziksel bariyerler yıllardır kullanılmaktadır. Bu teknik için kullanılan ekipman ve yöntemler kolaylıkla piyasada bulunabilir. Ancak, duvar malzemelerinin karıştırılması ve spesifik kimyasalların geliştirilmesi henüz iyileştirme aşamasındadır. Hendeğin kazılması ve geri doldurulması işlemi kritiktir ve uzmanlık gerektirir.

Kısıtlamalar: Sürecin etkin olarak uygulanmasında; maksimum geçirgenlik, beklenen hidrolik eğimler, gerekli duvar gücü, kullanılacak olan bentonitin uygunluk ve derecesi, kirliliğin sınırları, kirletici ve atıkların kullanılacak olan duvar malzemesi ile uyumu, duvarın yerleştirileceği alt yüzeyin karakteristik (derinlik, geçirgenlik, süreklilik) özellikleri dolgu malzemesinin karakteristik özellikleri ve saha yapısı ve yerleşim planının bilinmesi gerekmektedir.

Süre: Kalıcı bir teknolojidir, malzeme ömrü boyunca işlevini sürdürebilir.

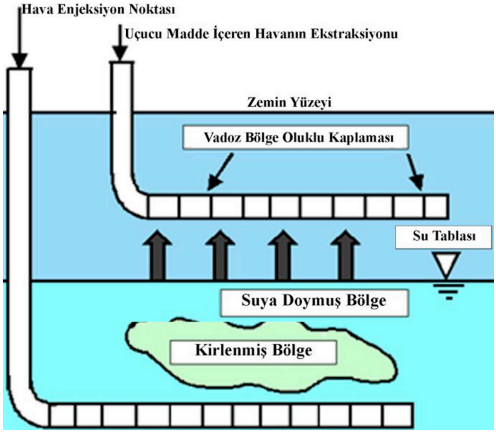
Maliyet: Yumuşak ve orta toprak aralığında kurulacak bir bentonit-toprak duvarın muhtemel maliyeti metrekare başına 540-750 USD aralığındadır. Bu maliyetler, kimyasal analizler, fizibilite veya uyumluluk testi için gerekli olan değişken maliyetleri içermemektedir. Toprak-bentonit siluri duvar kurulumunda kirleticilerin türü, aktivitesi ve dağılımı, duvarın derinlik, uzunluk ve genişliği, jeolojik ve hidrojeolojik karakterler, malzeme ve ekipman kaynağından uzaklık, duvarın korunması ve bakımı için gerekenler, kullanılacak olan siluri ve dolgu türü, ilk saha değerlendirmesinde tanımlanan sahaya özgü gereksinimler (kirleticilerin ve döküntülerin varlığı). planlama, izin alma, yasal girişimler ve saha restorasyonu, maliyet üzerinde etkisi olan faktörlerdir.

Uygulama sırasında dikkat edilecek konular: Toprak - bentonit siluri duvarların yapımında uygulama, iş makinaları ve ağır yapılarla çalışma gerektirmektedir. Teknoloji sadece belirli bir alandaki kirleticileri kontrol altına alır. Toprak - bentonit dolgular, kirlenmiş yeraltı suyunda bulunabilecek kuvvetli asitler, bazlar, tuz çözeltiler ve bazı organik kimyasallara karşı dayanıklı değildir. Belirli kimyasallara karşı dirençli olması açısından başka siluri karışımları geliştirilebilir. Siluri duvarların zaman geçtikçe aşınma ve bozunma potansiyeli vardır. Bu teknolojinin kullanılması gelecekte daha kirlenmiş saha ile ilgili temizleme çalışmalarının gerekli olmayacağı anlamına gelmez [2]

4.2.25. Yönlü Kuyular

Yönlü Kuyular	
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinde
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Yeraltı suyu
Proses Türü	Fiziksel Arıtma
Uygulanabilecek kirletici türleri	Tüm kirletici grupları
Maliyet	60 – 330 USD/metre sondaj 164 USD/metre borulama
Süre	1 yıldan az
Diğer	15 metreden az derinlikler için kullanılır

Tanım: Yönlü kuyular, yeraltı suyu pompalama, biyoventilasyon, SVE, toprak yıkama ve kuyu içi havalı sıyırma gibi teknolojilerin geliştirilmesinde kullanılabilir. Doğrudan dikey sondaj ile erişilemeyecek kirleticilere erişebilmek için kuyuları yatay olarak ya da belirli bir açı ile yerleştirmek için farklı sondaj teknikleri kullanılır. Tüm kirletici gruplarına uygulanabilen; mevcut yapıların dikey kuyularla çakışması halinde özellikle işlevsel olan bir teknolojidir. 15 metreden sığ derinliklerde kullanılabilir.



Şekil 4.42 Yönlü Kuyular Prosesi Örnek Uygulama Gösterimi

Kısıtlamalar: Kuyuların yıkılma potansiyeli olması, kurulum için özel ekipman gerektirmesi, kuyuların tam olarak doğru noktaya yerleştirilmesinin uzmanlık gerektirmesi bu prosesi zorlaştıran etmenlerdir .

Süre ve Maliyet: Bir yıldan kısa sürede tamamlanabilecek bir uygulamadır. Sondaj maliyeti 60–330 USD/metre arasında değişmektedir. Küçük-orta ölçekli PVC veya HDPE borulama maliyeti ise 164 USD/metre'dir. Özellikle yatay kuyuların yerleştirilmesi yüksek maliyetlidir.

Uygulama sırasında dikkat edilecek konular: Kuyuların yerleşiminde stabiliteye özellikle dikkat edilmelidir [2] .

4.2.26. Hafriyat ve Saha Dışına Taşıma

Hafriyat Ve Saha Dışına Taşıma	
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinden alınarak
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Toprak
Proses Türü	Fiziksel
Uygulanabilecek kirletici türleri	Tüm kirleticiler
Maliyet	Kirlenmiş alana göre fazlaca değişkenlik gösterebilir
Süre	En çok 6 ay
Diğer	Uçucu kirleticiler hafriyat nedeniyle havaya karışabilir

Tanım: Kirletilmiş ortamın yerinden alınarak temizlenmek üzere taşınması işlemidir. Hafriyat ve saha dışında bertaraf özel bir kirletici ayırt etmeksizin tüm kirletici tiplerinde tercih edebilir bir yöntemdir. Bu yöntemin seçilmesinden önce toprak karakterizasyonu ve bertarafa yönelik atık analizlerinin yapılması gerekmektedir. Tek başına kirlenmiş toprağın temizlenmesinde kullanılamaz. Yerinden alınan toprağın uygun bir şekilde bertarafı gerekmektedir.

Uygulanabilirlik: Toprak ortamındaki tüm kirletici tiplerine uygulanabilir. Yerinden alınarak toprak temizleme uygulamalarının tümünde ilk bileşen olan uygulamadır. Hafriyat ve saha dışına taşıma diğer tekniklere göre prosedürleri basit, işçi ihtiyacı fazla olan bir uygulamadır [2].

Kısıtlamalar: Hafriyat gerektiren malzemenin derinliği ve muhteviyatı değerlendirilmelidir. Toprağın yoğun yerleşime sahip yerlerden nakledilmesinde halkın kabul edebilirliği önemli bir kriterdir.

Süre ve Maliyet: Hafriyat hızı, çalışan yükleyici ve kamyonların sayısına bağlı olarak değişecektir. Standart 18200 ton kirlenmiş sahanın hafriyatı yaklaşık 2 ay alabilir. Toprak karakterizasyonu ve analitik çalışmalar gibi maliyeti arttıracak diğer etmenler de bulunmaktadır. En yakın lisanslı bertaraf tesisinin sahaya uzaklığı maliyetler üzerinde etkilidir [22].

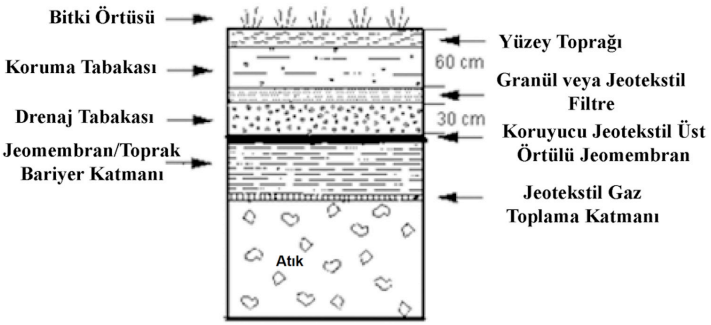
Uygulama sırasında dikkat edilecek konular: Temizleme esnasında emisyon kaçakları problem teşkil edebilir ve titizlikle değerlendirilmelidir. Hafriyat sonrası, sahanın doldurulması için kullanılan temiz toprağın, uygunluğunun analiz edilmesi gerekmektedir [2].

4.2.27. Yüzey Kapatma

Yüzey Kapatma	
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinde
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Toprak
Proses Türü	Fiziksel Arıtma
Uygulanabilecek kirletici türleri	Tüm kirleticilere uygulanabilir
Maliyet	43 USD/metrekare – 56 USD/metrekare
Süre	Süre bilgisi bulunmamaktadır
Diğer	Kullanılan kaplama malzemesinin niteliği ve kalitesi önemlidir Zemin ve kirletici hareketi şartları çok iyi bilinmelidir. Tasarım öncesinde laboratuvar testleri gerçekleştirilmelidir

Tanım: Kirletici kaynağının kontrol edilmesinde kullanılan bir teknolojidir. Bu teknolojinin kullanılması; kirlenmiş alanın yüzeyindeki maruziyeti en aza indirir, kontamine süzüntü suyu oluşturmak üzere suyun dikey şekilde atıktan süzülerek geçmesini önler, temizleme işlemi sürerken atığı kontrol altında tutar, altta yer alan atıktan kaynaklanan gaz emisyonlarını kontrol altına alır, bitkilendirme için ve başka amaçlar için kullanılabilecek yüzeyin oluşturulmasını destekler. Temizleme sahasında insanlar ve ekoloji üzerine olan riskleri etkin bir biçimde yok eder [23].

Yüzey kapatma tekniklerinin tasarımı, sahaya özel olarak gerçekleştirilir ve sistemin amacına göre şekillenir. Bu sistemler, bitkilendirilmiş toprak katmanından oluşan tek katmanlı yapılardan, toprak katmanları ve jeosentetiklerden oluşan çok katmanlı yapılara kadar farklılaşabilmektedir. Genellikle kuru iklimlerde basit tasarımlar, nemli iklimlerde daha karmaşık tasarımlar tercih edilir. Yüzey kapatma işleminde kullanılacak olan malzemeler düşük ve yüksek geçirgenlik özelliklerine sahip jeosentetik ürünlerdir. Düşük geçirgenlik özelliğine sahip malzemeler suyu yönlendirerek, atığın içerisine girişini engellemektedir. Yüksek geçirgenlikli malzelemer ise kaplama içerisine süzülen suyun dışarı atılmasını sağlar. Diğer malzemeler eğim stabilitesini sağlamak için kullanılabilir. Yüzey kapatmanın en kritik bileşenleri, bariyer drenaj katmanlarıdır. Bariyer katmanı, düşük geçirgenlikte toprak (kil) ve/veya jeosentetik kilden olabilir. Bariyer katmanının üzerine esnek jeomembran yerleştirilir.

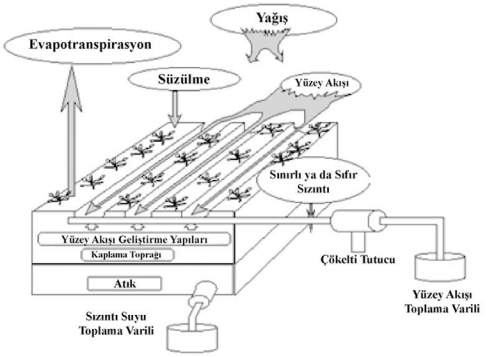


Şekil 4.43 Yüzey Kaplama İşlemi Örnek Gösterimi

Bariyer maddesi olarak kullanılan topraklar genellikle hidrolik iletkenliği 1 x 10^{-6}cm/sn oluncaya kadar sıkıştırılmış kil yapıdadır. Kompozit bariyer ise toprak ve jeomembran örtünün ikisinin de avantajlarından faydalanmak için kullanılır. Jeomembran geçirimsizdir ancak, delinme veya yırtılma kaynaklı sızıntı yaptığında, toprak bileşeni aşağıdaki atığa büyük miktarda sızıntı olmasını engeller. Çürüyebilen atıkların olduğu birimlerde metan, karbondioksit, sera gazlarının kontrolü tesis tasarımının ve işletmesinin bir parçası olmalıdır. Bu teknolojinin farklı tasarımları da uygulanabilir ancak, yukarıda açıklanan temel özellikleri karşılamalıdır. Yüzey kapatma performansının iyileştirilmesi için geliştirme alternatifleri bulunmaktadır. Yüzey kapatmanın üzerine düşen yağış, yüzeyden akış, toprakta birikme, evapotranspirasyon ve süzülme ile dengelenir. Süzüntü oranını düşürmek için yüzey suyu ve/veya evapotranspirasyon kontrolu gerçekleştirmek amacıyla su toplama ve bitki örtüsü yöntemleri yaygınlıkla kullanılır.

Bitki Örtüsü: Bitki örtüsü tekniği ise toprağın nemini bitkiler yoluyla (bünyeye katılım ve evapotranspirasyon) azaltır. Bitki örtüsü ayrıca toprak erozyonunu önler. Doğal malzemelerle uyum içerisinde olduğu için daha stabil bir yapıdadır, uzun ömürlü bir tekniktir.

Su Toplama: Su toplama tekniği kaplama altındaki alanın su dengesini yöntemek için yüzey suyu akıntısını toplama prensibine dayanır. Bu geliştirme tekniği kaplama yüzeyini eğime paralel olarak yerleştirilen metal yağmur tutucu oluklarla örtülmesini içermektedir. Oluk alanı arttıkça yüzey suyu miktarı da artacaktır. Fakat %40'ın üzerindeki alan artışının yüzey suyu toplanmasına etkisi azdır [2].



Şekil 4.44 Yüzey Kaplamanın Su Toplama ile Geliştirilmesi

Uygulanabilirlik: Yüzey kaplama tekniği, geçici bir süre için veya kalıcı olarak uygulanabilir. Geçici kaplamalar sahada temizleme işleminin sonlandırılmasından hemen önce daha iyi bir temizleme tekniği geliştirilenece kadar süzüntü oluşmasını önlemek için kullanılır. Özellikle alt tabakadaki kirletici yığınının çökme halinde olması durumunda infiltrasyonu engellemek için kurulur. Bu şekilde son saha örtüsünün daha stabil bir temele oturması sağlanarak kapatma sonrası bakım ihtiyacı maliyetleri azaltılabilir. Yüzey kapatma, diğer arıtım tekniklerinin uygulanmasının mümkün olamayacağı kadar büyük atık kütlelerinde bir çözüm olarak kullanılabilir. Örneğin maden sahalarında yüzey kapatma tekniği cevher artığı yığınlarının suya geçişini minimize etmek için ve bitki örtüsüne uygun bir zemin hazırlamak için kullanılır. Su yönlendirme ve tutma yapılarıyla birlikte yüzey kaplama tekniği erozyonu engellerken ayrıca yüzeydeki suyu atık alanından uzaklaştırmak için uygulanır. Yüzey kaplama tekniği altta yer alan atıkların çoğunun su tablası üzerinde

olması durumunda en etkili performansı gösterir. Geliştirme teknikleri, geleneksel düzenli depolama, yüzey seddeleri, atık yığınları, çamurlar ve maden artıkları için uygulanmaktadır. Henüz oldukça yenidir, henüz deneme aşamasındadır. Basit tasarıma sahip, mevcut düzenli depolama üzerinde kurulumu kolay ve gelecekte sahanın farklı amaçlar için kullanımı söz konusu olduğunda kaldırılması kolaydır. İzlemesi zor bir yöntemdir [2].

Depolama teknikleri ile KOKların mobilitesinin engellenmesi amaçlanır. Kontrollü düzenli depolama, KOKları yok etmediği için kalıcı bir çözüm olarak düşünülemez. İleri tarihte daha uygulanabilir teknolojiler geliştikçe depolanan KOKların temizlenmesi için bu teknolojiler değerlendirmeye alınmalıdır. Uygun zemin ve yüzey kaplamalarının yanı sıra hapsetmenin başarılı olduğunun izlenmesi önemlidir. KOKların depolandığı alanlardan her an sızma riski bulunmaktadır. Tesisin varlığı boyunca kirletici maddelerin çevresel matrislerde (ör. yeraltı suyu, toprak, hava) izlenmesi gerekmektedir [24].

Kısıtlamalar: Yüzey kapatma kendi başına yeraltı suyunun kirlenmiş katmandan yatay olarak geçişini engelleyemez, sadece dikey karışmanın önüne geçebilir. Yatay karışmayı önlemek için yüzey kaplama ile birlikte dikey duvarların kullanılması gerekmektedir. Yüzey kaplama işleminde kullanılan tüm malzemelerin uygunluğunun laboratuvar testleri ile kanıtlanması gerekmektedir. Bu testler; toprağın tanecik boyutu analizi, atterberg limiti ve sıkışma karakteristiğidir. Proses için önemli diğer parametreler ise kayma mukavemeti ve hidrolik iletkenliktir. Bu tekniğin performansını belirleyen en önemli etmenler kullanılan inşaat malzemesinin kalitesi ve özellikleri olduğundan kaplama malzemelerinin kalite güvencesi olması çok önemlidir. Geliştirme uygulandığında bitki yapısının mevsimsel etmenlerden etkilendiği unutulmamalıdır .

Süre: Süre ile ilgili genel bir çıkarıma yönelik detaylı bilgi bulunmamaktadır.

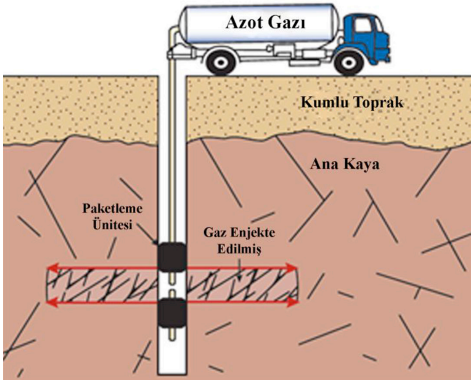
Maliyet: İnsan sağlığı ve ekolojik risklerin azaltılmasında en ucuz yöntem sayılabilir. Kabaca maliyetler 43,2 USD/metrekare - 55,6 USD/metrekare arasında değişmektedir. Yüzey kaplamanın basit tasarımı maliyette çok az artış iyi hapsetme verimi elde edilmesini sağlar. Maliyetler, sahaya özel olarak değişebilen tasarım ihtiyaçlarına ve inşaat malzemesinin bulunabilirliğine göre belirlenmelidir. Konvansiyonel bariyerlere göre daha basit yapıda ve yerel kaynak kullanımı ile gerçekleştirildiği için daha az maliyetlidir [2].

Uygulama Sırasında dikkat edilecek konular: Önceden kurulmuş olan yüzey kaplamaların performansının izlenmesi oldukça zordur. İzleme kuyuları ve izleme sistemleri ile bazı bilgiler elde edilebilir ancak; süzüntü suyunun yüzey suyundan mı yoksa yeraltı suyundan mı kaynaklandığı bilinemez. Daha iyi performans ölçümü için ileride kurulacak kaplamalara pan lizimetreleri yerleştirilmelidir. Tüm yüzey kaplama malzemeleri "küvet" etkisini önleyecek şekilde tasarlanmalıdır. "Küvet etkisi" daha çok geçirimli bir katmanın daha az geçirimli bir örtü/toprak katmanı üzerine yerleştirilmesi nedeniyle oluşur. Bu nedenle kapatılan alan küvet gibi dolar. Depolama instabilitesi doğal ve sentetik tüm malzeme katmanları arasındaki arayüz sürtünme özelliklerinin bilinmesi ile çözülebilir. Kaplama bileşenlerinin (yüzey örtüsü dâhil) etkin ömrü uzun dönem takip ve bakım ile uzatılabilir. Kök salma eğilimi nedeniyle bitkiler yüzey kapatma alanından temizlenmelidir. Ayrıca, sahadaki kullanım faaliyetleri nedeniyle kaplamanın bütünlüğünün bozulmadığından emin olunmalıdır, gerekli önlemler alınmalıdır [2] [23].

4.2.28. Çatlaklama

Çatlaklama	
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinde
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Toprak
Proses Türü	Fiziksel
Uygulanabilecek kirletici türleri	VOC, HVOC SVOC, HSVOC Patlayıcılar, Yakıtlar
Maliyet	9 – 13 USD/ton
Süre	Bir kaç gün

Tanım: Çatlaklama işlemi yeraltı suyu iyileştirme yöntemlerinin iyi çalışabilmesi için ana kayada veya kil gibi sıkışmış toprak yapısında açıklık yaratan veya açıklıkları genişleten bir tekniktir. Açılan çatlaklar toprak ve yeraltı suyundaki kirleticilerin yerinde temizlenebilmesi için veya arıtılmak üzere yüzeye çıkartılması için taşınım yolu vazifesi görür. Çatlaklama sayesinde, erişilmesi zor ve maliyetli olan derin kirliliğe erişilmesi sağlanır. Doğru kullanıldığında, temizleme yöntemlerinin daha verimli ve hızlı olmasını sağlayan bir tekniktir [25].



Şekil 4.45 Örnek Çatlaklama Uygulaması Gösterimi

Uygulanabilirlik: Genellikle yerinde temizleme işlemleriyle birlikte kullanılır. Çatlaklama işlemi tamamlandıktan sonra, vakum ile toprak buharı çekilir. Kirletici niteliği ayırd edilmeksizin pek çok kirlenmiş toprakta kullanılabilir bir teknolojidir. Özellikte silt, kil, şist ve anakaya üzerine uygulanır.

Kısıtlamalar: Bu teknoloji yüksek sismik aktiviteye sahip olan alanlarda kullanılmamalıdır. Kil yapısında olmayan topraklarda çatlaklar kapanır. Muhtemel yeraltı yapılarının veya sıkışmış serbest ürünün varlığı önceden bilinmelidir. Çatlaklama, toprağı ve anakayayı etkileyen bir proses olduğundan, bina temellerini ve yeraltı tesisatını etkileyebileceği durumlarda kullanılmamalıdır.

Süre: Çatlaklama işlemi birkaç günde tamamlanabilir.

Maliyet: Pnömatik (havalı) çatlatma maliyeti 9 – 13 USD/ton'dur.

Uygulama sırasında dikkat edilecek konular: Bu teknolojinin uygulaması esnasında kirleticilerin istenmeyen şekilde dağılması için yeni yollar da açılabilir (ör. DNAPL). Çatlakların özellikle gevşek toprak yapılarında yeniden kapanabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Çatlaklama işleminin civardaki yapılara zarar vermediğinden emin olmak için zemin hareketlerini takip eden özel izleme cihazları kullanılmalıdır. Sığ seviyelerde çatlaklama gerçekleştirildiğinde delikler etrafında yer seviyesinde birkaç santimetre yükselme olabilir ama çatlağın içeriden sabitlenmemiş olması durumunda bu yükselme zamanla eski haline döner. Temizlenen sahanın civarında ikamet eden kişiler veya işyerleri ekipmanların taşınması esnasında kamyon trafiğinde artış gözlemleyebilir. Ayrıca, patlayıcıların ateşlenmesi ve yeraltına su/hava enjekte edilmesi esnasında gürültü kirliliği oluşabilir [2][25].

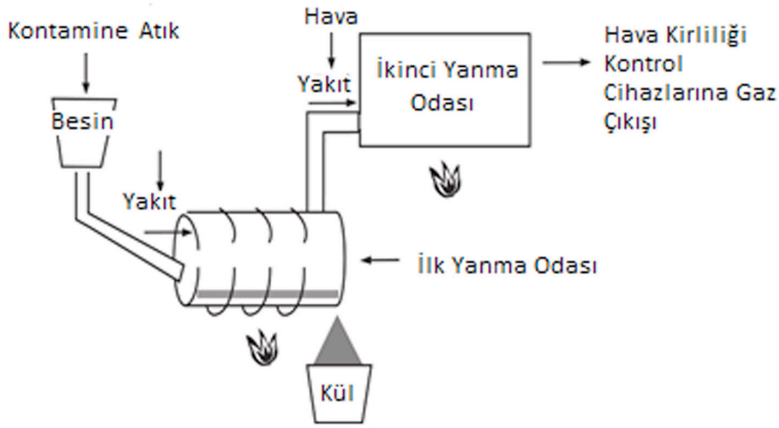
4.3. Termal Prosesler

4.3.1. Yakma

Yakma	
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinden alınarak
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Toprak
Proses Türü	Kimyasal
Uygulanabilecek kirletici türleri	VOC*, HVOC HSVOC, SVOC Yakıtlar, Patlayıcılar
Maliyet	914 – 1540 USD/metreküp
Süre	Birkaç hafta – birkaç yıl
Diğer	Yakılacak toprağın içeriğine göre baca gazı emisyonlarının arıtımı önem kazanır. Topraktaki ağır metal, sodyum ve potasyum içeriği oluşan külü ve işletimi olumsuz etkiler. KOKlar üzerinde uygulanabilir bir teknolojidir.

*VOCler (özellikle yakıt) ve ahşap koruma/kaplama sanayinde organiklerle kirlenmiş sahalarda başarısı kanıtlanmış, önerilen teknolojidir.

Tanım: Yüksek sıcaklıklarda, tehlikeli maddeleri yakarak parçalama işlemi yakma yoluyla bertaraf olarak adlandırılmaktadır. Yüksek ısı (870°C-1200°C) zararlı atıkların içindeki halojenli ve ısıya dayanıklı organikleri parçalamak ve yakmak için kullanılır. Yanmayı başlatmak ve sürdürmek için ek yakıt kullanımı yaygındır. Farklı atık yakma tasarımları, döner fırın, sıvı enjeksiyon, akışkan yatak, ve kızıl ötesidir. Günümüzde bu yöntemlerin hepsi tam ölçekte başarılı olarak kullanılabilmektedir.



Şekil 4.46 Yakma Prosesi Örnek İşletme Şeması

Uygulanabilirlik: Yakma teknolojisi kullanılarak başarıyla yok edilebilecek maddeler arasında solventler, PCB ve pestisitler sayılabilir. Özellikle patlayıcı ve tehlikeli atıklar, klorlu hidrokarbonlar, PCBler ve dioksin ile kirlenmiş toprakların arıtımında etkilidir. Yakma teknolojisi ile metal kirliliği giderimi yapılamaz. Yakma işlemi, çeşitli yüksek konsantrasyondaki kirleticiyi yok edebilir ve depolama ile bertaraf edilmesi gereken madde miktarını ciddi oranda azaltır. Küçük boyuttaki kirlenmiş sahalar için hafriyat ve sahadışı bir yakma fırınına transfer hızlı bir temizleme yaklaşımı olabilir. Kirlenmiş sahanın acil olarak temizlenmesi gerektiği durumlarda avantajlı bir sistemdir. Sistemin çıkış gazları ve yakma kalıntılarının ayrıca arıtılması/bertaraf edilmesi gerekmektedir [26].

KOK gideriminde tam ölçekte uygulamaları gelişmiş bir teknolojidir. KOK içeren atıklar ve KOK kaynaklı ısıl bozunma ürünleri yüksek sıcaklıklara yeteri kadar uzun süre maruz kaldığında tamamen yok edilebilir. KOKlar ile kirlenmiş toprakların yakma yoluyla temizlenmesi, kirlenmiş toprağın içerisindeki metallerin türüne ve konsantrasyonlarına bağlı olarak değişkenlik gösterir [12]. İyi işletilen yakma tesisleri KOKları % 99,99'un üzerinde yok edebilir [9]. Ahşap işleme sanayi kaynaklı toprak kirliliğinde, PCDD/PCDF, PCP, PAH, ve diğer halojenli ve halojensiz VOClerin ve SVOClerin gideriminde kullanılabilir. Özellikle stok halinde KOKların gideriminde ekonomik yönden tercih edilebilir bir prosestir. Saha hazırlama, taşıma, izin, işletme maliyetleri, iş gücü, ek üniteler ve ek yakıt maliyetleri dahil, 140 – 360 USD/m3'tür. Bertaraf edilecek atığın yapısına ve özelliklerine bağlı olarak yakma öncesinde geçici depolama yöntemleri de ayrıca özel olarak geliştirilmek durumundadır. Prosesin en büyük dezavantajı ise dioksin ve furan oluşma riskidir. Bu riskin ortadan kaldırılması, uygun yakma koşulları (ör.1100°C'nin üstünde en az 3 saniye bekleme süresi) ve baca gazı arıtma teknolojileri (ör. aktif karbon) ile sağlanabilir. Yakma tesislerinde teknik arızalar, inşaat malzemelerinin hasarlanması, sensör arızaları, operatör hataları, ve güç kesintileri sıklıkla karşılaşılan sorunlardır. Bu sorunlar PCDD/PCDF/KOK oluşumunu beraberinde getirir. İnorganik bileşenler yok edilmez, taban külünde kalır [8]. Bazen oluşan yan ürünler, yakılan asıl kirleticiden daha toksik özellikte olabilir. Ayrıca KOK içeren toprağın hafriyatı ve taşınması esnasında KOK içeren partikül maddeler kaynaklı salınım riski ortaya çıkabilir.

Kısıtlamalar: Kirleticilerin niteliği, konsantrasyonları, toprağın nem içeriği, sınıflandırması, füzyon sıcaklığı ve ısınma değerinin tasarım aşamasında bilinmesi gerekir. Hava kirliliği kontrol ekipmanlarının uygun şekilde tasarlanması için, sisteme yüklenecek toz miktarının belirlenebilmesine yönelik yakılan madde üzerinde elek analizi yapılmalıdır. PCB ve dioksinlerin yakımında sadece saha dışında olan yakma tesisleri tercih edilmelidir. Uygulanabilirlik veya maliyeti etkileyebilecek belirli besleme boyutu ve malzeme taşıma gereksinimleri saha özelinde büyük oranda değişiklik gösterebilir. Atığın içerisindeki ağır metaller stabilize etme gerektiren nitelikte taban külü üretebilir. Kurşun, kadmiyum, cıva ve arsenik gibi uçucu ağır metaller yakma ünitesinde baca gazına geçerler. Metaller besleme sürecinde klor ve sülfür gibi diğer elementlerle etkileşime girebilir ve orjinal kirleticiden daha uçucu ve zehirli bileşimler meydana getirebilir. Bu bileşikler, ileri arıtım yapılarak kostik reaksiyonla yok edilebilir.

Süre: Yakma teknolojisinin süreci kısadan uzun döneme kadar yayılmaktadır. Bir sahadaki tüm kirlenmiş toprağın yakılması bir kaç hafta ile birkaç yıl arası sürebilir. Temizleme süresini, miktar (kirlenmiş toprak miktarı fazla ise, kazı işlemi daha fazla

zaman gerektirir), içerik (kirlenmiş toprak homojen nitelikte değilse, örneğin büyük kayalar veya döküntüler içeriyorsa yakma işleminden önce bunların atıktan temizlenmesi zaman alacaktır) ve yakıcının kapasitesi etkiler. Yakma işlemi, öğütme veya büyük kayaların ve kalıntıların çıkarılması veya fazla suyun giderilmesi gibi ön hazırlık gerektirebilir.

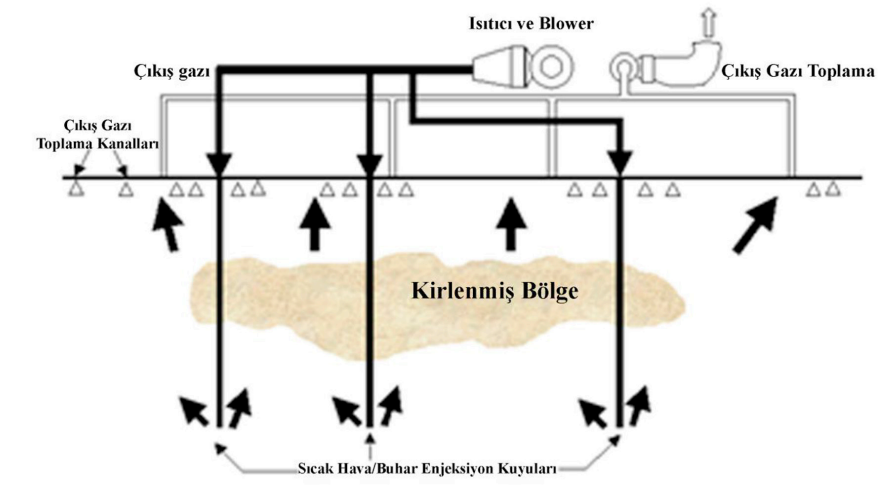
Maliyet: Yakma yoluyla bertaraf maliyetine etki eden temel unsurlardan biri yakılacak kirlenmiş toprağın niteliğidir. Nem miktarının az, kalorifik değerinin yüksek olması yakma için tercih edilir bir durumdur. Kalorifik değer azaldıkça ve nem miktarı arttıkça, yakma maliyetinde de artış meydana gelir. Bertaraf birim maliyetinin kirlenmiş toprak miktarına oranla değişmesi beklenmez. Bu bağlamda, yakma yoluyla bertaraf edilmesi planlanan toprakların hedeflenen bertaraf tesisine olan uzaklığı ve taşıma maliyetlerinin etkisi çalışmaya başlamadan önce doğru analiz edilmelidir. Farklı senaryolar için metreküp başına bertaraf maliyeti düşünüldüğünde, 950 USD – 1.600 USD kabul edilebilir bir maliyet aralığıdır. Bu maliyete baca gazı arıtımı dâhil değildir.

Uygulama Sırasında dikkat edilecek konular: Saha dışında bir yakma fırını kullanıldığında, hafriyat sırasında oluşabilecek tehlikeli madde emisyonları ve atıkların taşıma esnasında topluma karşı olan potansiyel riski göz önüne alınmalıdır. İdeal şartlarda kirlenmiş toprağın yakma fırınına taşınması sırasında emisyonların engellenmesi için havayla teması olmamalıdır. Yakma tesisinde tam yanma için uygun sıcaklık muhafaza edilmelidir ve hava kirliliği kontrol ekipmanı performansı, tüm kirliliğin çıkış gazının giderildiğine emin olmak için izlenmelidir. Sodyum ve postasyum, düşük ergime noktasına sahip küller meydana getirerek tuğla cidarına zarar verir, gaz bacalarını tıkayan yapışkan partiküller oluşturur. Küçük parçacık boyutu ayrıca döner fırın tipi yakma tesislerinde türbülansa neden olarak çıkış gazlarında yüksek partikül yüklerine neden olur [26, 2].

4.3.2. Isıl Arıtım

Isıl Arıtım	
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinde
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Toprak
Proses Türü	Termal
Uygulanabilecek kirletici türleri	VOC, SVOC HVOC, HSVOC Yakıtlar
Maliyet	20 – 47 USD/metreküp
Süre	1 Yıl – 3 Yıl arası

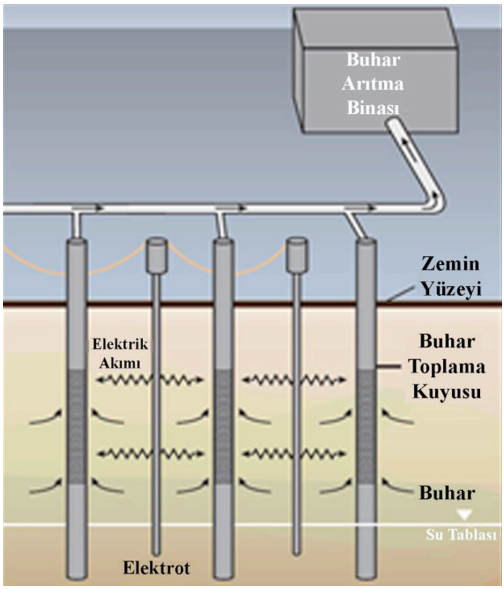
Tanım: Toprakta ısıl arıtma teknolojisinin uygulanması ile SVE yönteminin etkinleştirilmesi hedeflenmektedir. Isıl işlem, yarı uçucu organik maddeleri (SVOC) daha uçucu hale getirerek ekstraksiyonunu kolaylaştırmak için kullanılır. Isıtma işlemi için elektrik direnci, elektromanyetik, fiber optik, radyo frekans gibi farklı yöntemler kullanılabilir. Prensip olarak standart SVE prosesine benzerlik göstermekle birlikte, ısıya dayanıklı ekstraksiyon kuyularının kurulması bakımından SVE'den farklıdır. Yüksek nem içeriği, SVE'yi sınırlandıran bir parametre olmasına rağmen ısıl desorpsiyon ile bu problem aşılabilir. Özellikle radyo frekanslı ısıtma ve elektrik direnç tipi ısıtma kullanılarak yüksek nem içerikli topraklardaki nemin buharlaştırılması sağlanarak temizleme gerçekleştirilebilir. *Sıcak Hava enjeksiyonlu ısıl desorpsiyonda* sıcak hava veya buhar kirlenmiş bölge altına enjekte edilerek, kirli toprak ısıtılır. Bazı VOC ve SVOCler ısıyla kirlenmiş bölgeden sıyrılır ve yüzeye çıkartılır.



Şekil 4.47 Toprakta Isıl İşlem Uygulaması Örnek Gösterim

Elektrik dirençli ısıl desorpsiyonda kil ve ince taneli topraklar gibi daha az geçirgen bölgeleri ısıtmak için elektrik akımı kullanılır. Böylece iletken bölgeler içinde sıkı

su ve kirletici maddeler buharlaşır ve vakum ekstraksiyonu için hazır olur. Elektrot yöntemi ile ısıtma sıcak toprağı kurutarak kırılmasına sebep olur. Bu kırılmalar toprağı daha geçirgen hale getirerek kirletici maddelerin ekstrakte edilmesini kolaylaştırır.



Şekil 4.48 Toprakta Elektrik Dirençli Isıl İşlem Uygulaması

Radyo frekanslı/elektromanyetik ısıtma, elektromanyetik enerji ile toprak 300 °C üzerinde ısılara yükseltilir. Bu sayede; (1) kirletici maddenin buhar basıncı ve difüzivitesi ısıtma ile artmıştır, (2) toprak geçirgenliği kurutma ile artar, (3) su buharından sıyrılarak meydana gelen yerinde buharın oluşturduğu kirletici madde hareketlenmesinde bir artış olur; ve, (4) hareketlilik artar, viskoziteyi azalır [2].

Uygulanabilirlik: Bu teknoloji ahşap işleme tesisleri, petrol rafinerileri, kömür katranı, pentaklorofenol, kreosot ve petrol yan ürünleri gibi LNAPL-DNAPL kirliliği beklenen sahalarda kullanılabilir. Isıtma prosesi yardımıyla NAPL (çözücüler, petrol ve kreosot (ahşap koruyucu) giderimi kolaylaştırılabilir. Yüksek sıcaklıklar ayrıca ısıtılan alandaki kimyasalların bir bölümünü ısı nedeniyle yok edebilir [27]. Bu proses SVOClerin giderimine yönelik tasarlanmıştır ancak, sonuçta VOC giderimi de gerçekleştirir. Başka teknolojilerle temizleme performansının verimli olmadığı silt ve killi yapılarda kullanılabilir. Ayrıca, derinde yer alan veya bina altlarında bulunan kirliliğe de erişebilen bir yöntemdir. Bu sayede yer altına kazılarak inilip temizlenmesinin yaratacağı çok yüksek maliyetlerin önüne geçilmiş olur. Doygun bölgede kullanılamayan bir teknolojidir ancak su tablasının düşürülmesi ile kullanımı mümkün olacaktır. Bu prosesin uygulanmasından sonra, yüzey altı koşulları kalıntı kirleticilerin biyobozunma yöntemiyle giderimi için de çok elverişli hale gelir. Toprağın ısıl olarak geliştirilmiş SVE ile temizlenmesi, yaygın olarak kullanılan tam ölçekli uygulamaları mevcut bir teknolojidir.

Kısıtlamalar: SVE prosesin kısıtlamaları bu proses için de geçerlidir. Ayrıca çıkılabilen en yüksek sıcaklığa ve toprağın organik karbon içeriğine bağlı olarak kirleticilerin ekstraksiyon veriminin değişeceği unutulmamalıdır.

Süre: Yerinde ısıl desorpsiyon ile bir sahanın toprak iyileştirilmesi birkaç aydan birkaç yıla kadar sürebilir. 18200 ton standart kirlenmiş toprak için yaklaşk dokuz aylık bir temizleme süresi gerekeceği varsayılmaktadır. Ortalama olarak, yaklaşıl bir yıl ile üç yıl arası uygulama süresi bu teknoloji için makul kabul edilebilir. Temizleme süresinin uzamasına neden olan faktörler (1) Kirletici konsantrasyonlarının yüksek olması, (2) Kirlenmiş alanın geniş ve derin olması, (3) Zeminin düzensiz ısınmasına neden olan çeşitli toprak tiplerinin varlığıdır.

Maliyet: Bu teknolojinin maliyetlerini etkileyen en önemli faktör toprak tipidir. Toprağın geçirgenliği yapısına bağlı olarak değişim gösterir. Toprağın yüksek nem içeriğine sahip olması ve/veya sıkışık yapıda olması hava geçişini engellediği için daha yüksek vakum/sıcaklık ihtiyacına sebep olur ve enerji gereksinimi/maliyetler artar. Isıl işlem için, düşük geçirgenliğe sahip topraklar (silt/silt-kil) daha az gaz akımı gerektirdiği için daha az maliyetli olacaktır. İkinci maliyet etmeni ise, kirlenmiş bölgenin derinliği ve kalınlığıdır. Derinlik arttıkça ve kirli bölge kalınlığı fazlalaştıkça maliyetler artar. Toprak temizlenmesi için tipik arıtma maliyetleri 20 – 47 USD/ metreküp olarak kabul edilebilir.

Uygulama Sırasında dikkat edilecek konular: Yerinde ısıl desorpsiyon, doğru işletildiğinde saha çalışanlarına veya yakındaki halka tehdit oluşturmaz. Örneğin elektrik akımı yoluya yapılan ısıtmada akımın yüzeyden veya temizleme sahasının dışına çıkışı engellenmelidir. Isıl işlem alanı genellikle ısıyı ve buharı aşağıda tutabilmek için beton, asfalt vb. geçirimsiz yüzey kaplaması ile kapatılır. Bu kapatma işlemi aynı zamanda kimyasal buharın kontrolsüz şekilde yüzeye çıkmasını da engeller. Bunun yanı sıra gaz kaçışını tespit etmek için düzenli olarak hava numuneleri alınmalıdır. Sistemin kurulumu aşamasında ağır iş makinaları ve sondaj ekipmanı çalışacaktır, ayrıca buhar arıtımında da gürültü çıkarabilecek teçhizatların çalışması söz konusudur. Temizleme sahasının hemen yakınındaki yerleşimler kamyon trafiğine ve ekipman gürültüsüne maruz kalacaktır [20]. Proses sonucu açığa çıkan katı/sıvı atıkların bertaraf edilmesi gerekir. Yüksek değişkenlikte geçirgenliğe sahip topraklarda kirlenmiş bölgelere verilen gaz akımı eşit olmayabilir. Sığ kirliliklerde toprağın çatlamasını önlemek için daha az basınçlı uygulama ve yakın kuyuların kurulması gerekir. Derin kirliliklerde yüksek işletme basıncı ve geniş kuyu aralığı gerekmektedir. Saha jeolojisi iyi bilindiğinde, daha az kuyu kurularak ilk kurulum maliyetinin azaltılması mümkündür [2].

4.3.3. Isıl Desorpsiyon

Isıl Desorpsiyon	
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinden alınarak
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Toprak
Proses Türü	Fiziksel/Kimyasal Arıtma
Uygulanabilecek kirletici türleri	VOC, SVOC HVOC, HSVOC Yakıtlar, Patlayıcılar
Maliyet	44 -252 USD/metreküp
Süre	6 Ay – 1 Yıl
Diğer	Ön-işlem gerektirir Kil içerikli topraklarda uygulanması tavsiye edilmez KOKlarla kirlenmiş topraklarda uygulanabilir

*VOCler ve ahşap koruma/kaplama sanayinde organiklerle kirlenmiş sahalarda başarısı kanıtlanmış, önerilen teknolojidir.

Tanım: Isıl desorpsiyon yöntemi kirlenmiş toprağın yerinden kazılarak alınıp organik kirleticilerin topraktan ısıtılarak ayırılmasını sağlar. Desorber ünitesi sahada çalıştırılmak üzere temizlenecek alanda kurulmuş olabilir veya temizlenecek malzeme taşınarak saha dışındaki bir ısıl desorpsiyon tesisine götürülebilir. Desorber ünitesinde ısı yardımıyla gerçekleşen buharlaşma, kirleticileri gaz fazına geçirir ve böylelikle kirletici maddeler topraktan ayrılmış olur. Bir taşıyıcı gaz veya vakum sistemi ile su buharı ve uçucu organikler gaz arıtma sistemine taşınır. Bu sistemlerde tasarlanan yatak sıcaklığı ve bu sıcaklıkta kalma süreleri seçilmiş kirleticileri buharlaştırır ama oksitlemez. Tüm termal desorpsiyon sistemleri çıkış gazının arıtılmasını gerektirmektedir. Partikül maddeler konvansiyonel partikül giderim yöntemleri (ıslak yıkayıcılar veya torbalı filtreler) ile uzaklaştırılır. Kirleticiler desorbe edildikten sonra yoğuşturularak ayrılır ve karbon soğurması ile ya da ikinci yakma odası veya katalitik oksitleyici ile parçalanır. Bu ünitelerin pek çoğu taşınabilirdir [28].

Yaygın olarak kullanılan iki termal desorpsiyon tasarımı döner kurutucu ve termal burgudur. Temizleme öncesinde toprağı arıtıma hazırlamak için, büyük kaya parçaları ve diğer büyük kalıntılar kırılmalı veya ayrılmalıdır. Küçük parça boyutu ısının daha kolay bir şekilde ve eşit olarak katı malzemenin içerisindeki kirleticileri ayırmasını sağlar. Eğer malzeme çok nemli ise, arıtma verimini iyileştirmek için suyun uzaklaştırılması gerekebilir. Sistemden uzaklaştırılan suyun arıtılması gerekli olabilir. Desorberın çalışma sıcaklığına dayalı olarak termal desorpsiyon süreçleri iki gruba ayrılabilir: yüksek sıcaklık termal desorpsiyon (HTTD) ve düşük sıcaklık termal (LTTD) desorpsiyon. Düşük ısılı desorpsiyon yönteminde katı maddeler VOC giderimi için 93°C-315°C'a kadar ısıtılır. Yarı-uçucu organik bileşiklerin ortamda bulunması halinde yüksek ısılı desorpsiyon yöntemi tercih edilmelidir, bu durumda 315°C – 537°C derecelere kadar ısıtma yapılabilir. Kirletici içeren çıkış buharı gaz toplama ekipmanları ile tutulur. Çıkış gazı arıtılır. Geriye kalan organik buhar ise genellikle ısıl oksitleyici kullanarak, karbondioksit ve su buharına dönüşünceye kadar yüksek sıcaklıklara dek ısıtılır. Bazı sahalarda organik buharların çok fazla olması durumunda, buhar yoğuşturulup, sıvı hale getirilebilir. Sıvılaştırılmış kimyasallar geri kazanılabilir veya yakma yöntemiyle bertaraf edilebilir. Kirletici konsantrasyonun düşük olduğu ve toz emisyonlarının sorun teşkil etmediği durumlarda buhar,

arıtılmadan atmosfere salınabilir. İlgili yönetmelikler çerçevesinde buna karar verilebilir. Temizlenen toprak sahadaki hafriyatın doldurulması için kullanılabilir. Temizlenmiş toprakta uçucular dışında uçucu olmayan kirleticiler de varsa uygun bir düzenli depolama alanında bertaraf edilebilir [2].

Uygulanabilirlik: Pek çok organik kirletici ısıl desorpsiyon yöntemi ile topraktan ayrılabilir. Bu kirleticiler uçucu organik bileşikler ve yarı uçucu organik bileşikler sınıfına girmektedir. Çözücüler, benzin gibi uçucu organik bileşikler çok çabuk buharlaşırken, yarı uçucu maddelerin (dizel yakıt, kreosot, kömür katranı ve pek çok pestisit) daha yüksek ısılara kadar ısıtılması gerekmektedir. Isıl desorpsiyon yöntemi metallerin gideriminde genellikle kullanılmaz, ancak, kısmi olarak da olsa cıva ve arsenik gibi ısıl desorpsiyon işlemi esnasında uygulanan sıcaklıklarda buharlaşabilecek metalleri de giderebilir. Termal desorpsiyon sistemlerinin organik kirletici madde spektrumuna karşı değişken etki dereceleri vardır. LTTD için hedef kirletici grupları kazılarak erişilebilecek derinlikte olan halojensiz VOC ve yakıtlarla kirlenmiş topraklardır. Teknoloji daha düşük bir verimle de olsa, SVOC artımı için de kullanılabilir. Isıl desorpsiyon yöntemi özellikle kirletici konsantrasyonunun yoğun olduğu yerlerde diğer yöntemlere göre daha başarılı bir performans gösterir. HTTD için hedef kirleticiler SVOC'ler (ör. PAHlar), PCBler ve böcek ilaçlarıdır; uçucu metaller yüksek sıcaklıklı termal desorpsiyon sistemleri ile temizlenebilir. Süreç rafineri atıkları, kömür katranı atıkları, ahşap işleme atıkları, kreosot ile kirlenmiş topraklar, hidrokarbonla kirlenmiş topraklar, karma (radyoaktif ve tehlikeli) atıklar, sentetik kauçuk işleme atıkları, böcek ilaçları ve boya atıklarından organik maddelerin ayrılması için uygulanabilir. HTTD'nin belirlenen hedef kirletici maddeler için topraktaki kirletici seviyesini 5mg/kg altına indirebildiği kanıtlanmıştır. HTTD çoğunlukla sahaya özgü koşullara bağlı olarak, yakma ve solidifikasyon/stabilizasyon veya dehalojenasyon ile birlikte kullanılır. LTTD'nin topraktaki her türlü petrol hidrokarbonları ile kirlenmenin iyileştirilmesinde başarılı olduğu kanıtlanmıştır. Arıtılmış toprak fiziksel özelliklerini korur. LTTD, kendi sıcaklık aralığındaki en yüksek sıcaklıkta çalıştırılmadığı sürece toprağın içindeki organik bileşenlere zarar vermez. Böylece temizlenmiş toprak biyolojik aktiviteyi destekleyecek özelliklerini korur. Superfund sahalarında kullanılan bir teknolojidir. Pek çok uygulama ekipmanı, halihazırda piyasada bulunabilir. 1950 yılından beri kauçuk ve yapıştırıcı üretiminden kaynaklı SVOC, PCB ve arsenik ile kirlenmiş toprakların temizlenmesinde kullanılmasına yönelik dünya çapında uygulamalar mevcuttur [28][2].

Yerinde ısıl desorpsiyon ile yüksek kaynama noktasına (300°C üzeri) sahip bileşikler, (PCB, PAH, pestisit ve herbisit, dioksin, furanlar dahil olmak üzere SVOCler) arıtılabilir. PCB ve kalıntı olarak bulunan dioksin-furanın giderilmesinde pilot ve tam ölçekli başarı örnekleri bulunmaktadır. Bu örnekler haricindeki KOKların (aldrin, dieldrin, endrin, klordan, heptaklor, DDT, mirex, hekzaklorobenzen, toksafen) gideriminde performansı hakkında yeterli veri bulunmamaktadır. Her kirletici aynı sıcaklıkta giderilmemekte, örneğin PCBlerin ısıl desorpsiyon ile giderimi için 450°C kadar yüksek sıcaklıklara çıkılması gerekmektedir. Isıl desorpsiyon teknolojisi kirleticileri yok etmediği için, peşisıra başka bir teknoloji ile temizleme işleminin tamamlanması gerekir. Proses esnasında PCDD/PCDF oluşum riski bulunmaktadır . Bu nedenle, ısıl desorpsiyon ile temizlenen klorlu KOKlar ile kirlenmiş sahaların, dioksin ve furan konsantrasyonu bakımından temizleme öncesinde PCDD/F belirlenmemiş olsa bile işlem sırasında oluşabileceğinden ölçülerek izlenmesi gerekir.

KOK ile kirlenmiş topraklarda uygulanan ısıl desorpsiyon prosesinden kaynaklanan emisyonların kontrol edilmesi ve arıtımı özellikle önemlidir [9].

Bu sistemlerle KOK giderimine dünya çapında örnekler bulunmaktadır;1991 yılında bir liman sahasında VOC, SVOC, metaller ve PCBler ile kirlenmiş bir sahada ısıl desorpsiyon ve kimyasal halojensizleştirme yöntemleri birlikte kullanılmıştır. Bu sahada yaklaşık 253 ton kirlenmiş toprak temizlenmiştir. Sahadaki ortalama PCB konsantrasyonu 9173 mg/kg'dan 2 mg/kg mertebesine düşürülmüştür. İşlem sonucunda toprağın pH'ı PCB emisyonlarının azaltılması için $NaHCO_3$ eklenmesine bağlı olarak; 8,59'dan, 11,35'e yükselmiştir. Genel değerlendirmede %99,9999 mertebesinde giderim verimleri tespit edilmiştir. Bir başka örnek ise 1998 yılında PCB (0,15 - 860 mg/kg) ve PCDD/Fs (3,2 mg/kg) ile kirlenmiş siltli-kil arazide bu proses ile %99,99 giderim sağlanmasıdır. [8].

Kısıtlamalar: İşlenecek malzemenin uygun partikül büyüklüğüne getirilmesi için ön işlem gerektiren bir prosestir. Kabul edilebilir toprak nemi içeriğine ulaşmak için susuzlaştırma işlemi gerekebilir. Isıl desorpsiyona gönderilen malzemenin yüksek aşındırıcılığı işleme ünitesine zarar verme potensiyeline sahiptir. Kirlenmiş toprağın içinde ağır metal varsa, ısıl desorpsiyon sonrasında toprağın stabilize edilmesi gerekebilir. Killi, siltli topraklar ve hümik içerikli topraklar kirleticilerin bağlanması sonucu reaksiyon süresini arttırabilir. Çoğu ısıl desorber saatte 25 ton civarında kirletici madde işleyebilir. Reaktörün küçük olması temizlenebilir madde miktarını sınırlandırır.

Süre: Isıl desorpsiyon bir kaç hafta ile bir kaç yıl arasında sürebilir. İşlemin ne kadar zaman alacağını belirleyen birkaç faktör bulunmaktadır. Kirlenmiş alanın geniş ya da derin olması ve kirletici konsantrasyonunun yüksek olması durumunda temizleme süresi artar. Standart 18200 ton kirlenmiş toprak için HTTD ile temizlenme süresi 4 ay olarak belirtilmiştir.

Maliyet: Arıtılmış malzeme miktarının, maliyetin belirlenmesinde büyük etkisi vardır. Ayrıca nem içeriği arttıkça temizleme için gerekli ısı ihtiyacı da artacağından, nem muhteviyatındaki artış yakıt tüketimini arttıracaktır.

Uygulama Sırasında dikkat edilecek konular: Topraktaki kirleticilerin niteliğini ve konsantrasyonlarını belirlemenin yanı sıra toprağın nem miktarı ve toprak karakterizasyonunun da ısıl sistemlerin tasarlanması için analiz edilmesi gerekir. Ayrıca, temizlenecek kimyasalların kaynama noktalarının belirlenmesi ve arıtılabilirlik testlerinin gerçekleştirilmesi de farklı sıcaklıklarda ve bekleme sürelerinde ısıl işlem veriminin belirlenmesi için gereklidir. Düzgün bir tasarım ve hava kirliliği kontrol ekipmanı tasarımı için bir elek analiziyle sisteme giren toz miktarının belirlenmesi gereklidir.

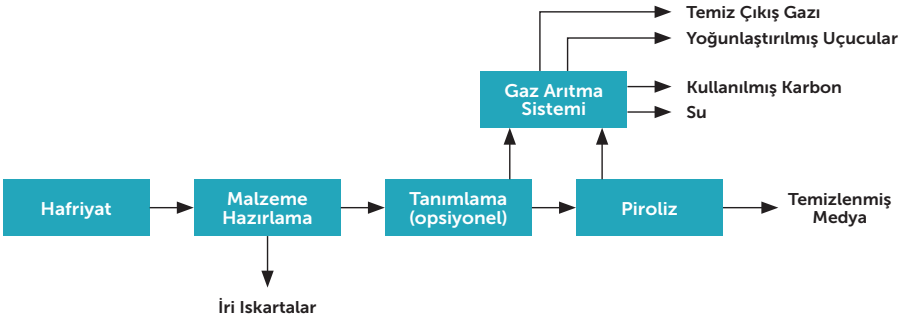
İşçiler, hafriyat ve arıtma sırasında toz ve buharı kontrol etmek için gevşek toprağı kapatma gibi önlemler almalıdır. Gerekirse desorber ünitesinin içinde üretilen gaz toplanır ve arıtılır. Hafriyat işlemleri esnasında ve diğer saha araçlarının ve ağır iş makinalarının kullanımı süresince gürültü kirliliği oluşur. Toprağın kazılması, havaya toz ve buhar salınımına neden olabilir ancak bu durum sistemi kapatma, köpük ya da su ile kontrol altına alma gibi tekniklerle giderilebilir. Kazı ekipmanlarının ve desorber ünitelerinin sahaya getirilmesi süresince yakında ikamet edenler ve

işletmeler kamyon trafiğinin artışına maruz kalabilir. Kullanılan desorberin saha dışında olması durumunda ise, kamyon dolusu kirli toprağın saha dışına taşınması gerekeceğinden, kamyon trafiği oluşacaktır. Toprak depolama yığınları ve besleme ekipmanı, genellikle toprak nem içeriğini en aza indirmek, yağmurdan korumak ve malzeme taşıma sorunlarını önlemek için örtülür. Toprağın su içeriği %20-25'in üzerinde ise desorberin verimini arttırmak ve desorbere malzeme taşınmasını kolaylaştırmak için bir kurutucu kurmak gerekebilir. Kurutucuda kirleticilerin bazıları gaz faza geçebilir, bu durumda ısıl arıtma ünitesine yönlendirme yapılır. Taşıma sistemlerinin günlük olarak bakımdan geçmesi gerekmektedir, aksi halde taşıma sistemi kaynaklı, bütün operasyonu durduran hatalar olabilmektedir. Büyük sistemlerdeki toprak konveyörlerinin küçük sistemlere göre başarı oranı daha düşüktür. Sisteme girişte klor içeriğinin yüksek olması, kurşun gibi bazı metallerin buharlaşmasını etkileyebilir. Kil içerikli toprak yapısı, ısıl desorpsiyon teknolojisinde kek oluşumu nedeniyle performansı olumsuz etkilemektedir [28][2] .

4.3.4. Piroliz

Piroliz	
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinden alınarak
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Toprak
Proses Türü	Fiziksel/Kimyasal Arıtma
Uygulanabilecek kirletici türleri	VOC, HVOC SVOC, HSVOC Yakıtlar
Maliyet	330 USD/ton
Süre	Yeterli bilgi mevcut değildir.

Tanım: Piroliz, oksijen yokluğunda ısı ile organik maddelerde indüklenen kimyasal ayrışma olarak tanımlanır. Piroliz işleminde organik maddeler oksijen bulunmayan ortamda ısıyla kimyasal bozunmaya uğrar, gaz, kok ve kül haline dönüşür. Piroliz zararlı organik malzemeleri gaz halinde bileşenler, küçük miktarlarda sıvı ve sabit karbon ve kül ihtiva eden katı artık madde haline dönüştürür. Pratik uygulamada tamamiyle oksijensiz bir atmosfer oluşturulamadığından, yakmada ihtiyaç olandan göreceli daha az oksijen ile pirolitik sistemler çalıştırılır. Organik maddelerin pirolizi karbon monoksit, hidrojen, metan ve diğer hidrokarbonlar gibi yanabilir gazlar oluşturur. Eğer çıkış gazları soğutulursa, sıvılar yoğunlaşarak bir yağ/katran kalıntısı ve kirlenmiş su oluşturur. Piroliz, tipik olarak basınç altında ve 430°C üzerinde sıcaklıklarda gerçekleşir. Kirlenmiş toprakların pirolizinde döner fırın, döner tabanlı fırın ya da akışkan yataklı fırın gibi geleneksel ısıl işlem yöntemleri kullanılır.



Şekil 4.49 Piroliz Prosesi Akım Şeması

Uygulanabilirlik: Piroliz için hedef kirletici grupları VOCler ve pestisitlerdir. Bu işlem rafineri, kömür katranı, ahşap-işleme atıklarının, kreosot/hidrokarbon bulaşmış toprakların, karışık (radyoaktif ve tehlikeli) atıkların, sentetik kauçuk işleme atıklarının ve boya atıklarının organik maddelerden ayrılması için uygulanabilir.

Piroliz inorganikleri kirletilmiş ortamdan fiziksel olarak ayırmak ya da yok etmek için etkili değildir. Uçucu metaller işlemle ilişkili yüksek sıcaklıkların bir sonucu olarak giderilebilir, ancak parçalanamaz. PCB, dioksin ve diğer organikleri içeren tehlikeli atıkların temizlenmesinde kullanılan pirolitik sistemlerle ilgili sınırlı veri mevcuttur. Elde edilen verilerin kalitesi henüz belirlenmemiştir. Piroliz teknolojisinin geliştirilmesi için saha karaterizasyonu ve arıtılabilirlik çalışmalarının gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Piroliz, 1000 °C civarındaki yüksek sıcaklıklarda, yüksek toksisiteye sahip KOKların ör. PCBlerin yok edilmesini sağlayan bir teknolojidir. Tehlikeli atıkların bertarafında tam ölçekli uygulamaları mevcuttur. Ayrıca plasma arc gibi modifikasyonları geliştirilmiştir. Bu yöntem sıvı KOKlar ve PCBler için etkili olabilir [9]. PCB ve dioksin ile kirlenmiş sahalarda piroliz teknolojisi ile %99,999 verimlilikte temizleme gerçekleştirilebildiği bilinmektedir [8]. Bu teknoloji en etkili olarak kirlilik kaynağına yakın yerlerde ve yüksek miktarlarda PCB ve POP içeren kirliliklerde kullanılmaktadır [9].

Kısıtlamalar: Yeterli toprak nem içeriğini (<%1) elde etmek için toprağın kurutulması gerekir. Temizlenen ortam ağır metaller içeriyorsa temizleme sonrası stabilizasyon işlemi gerekli olabilir. Kirletici konsantrasyonu, nem içeriği, toprak klasifikasyonu ve toprak füzyon sıcaklığı gibi veriler tasarım aşamasında bilinmelidir.

Süre: Piroliz ile kirlenmiş toprakların temizlenme süresi ile ilgili yeterli bilgi mevcut değildir.

Maliyet: 18.200 ton standart kirlenmiş alanın temizlenmesi maliyeti yaklaşık 330USD/ton'dur. Nem miktarındaki artış kurutma gereksinimini arttıracağından maliyetleri arttırır [2]. Bu teknolojinin yaklaşık kurulum maliyeti kurulum maliyeti 1 milyon USD ve KOKlarla kirlenmiş topraklar için işletme maliyeti 1.200 USD/ton'dur [9].

Uygulama sırasında dikkat edilecek konular: Hafriyat ve arıtma sırasında toz ve gaz çıkışını kontrol etmek için sahanın üstünü kapatma gibi önlemler almalıdır. Hafriyat işlemleri esnasında ve diğer saha araçlarının ve ağır iş makinalarının kullanımı süresince gürültü kirliliği oluşması beklenmektedir. Toprağın kazılması, havaya toz ve uçucu kirleticilerin salınımına neden olabilir ancak bu durum kapatma, köpük ya da su ile kontrol altına alma gibi tekniklerle giderilebilir. Halojenli organikleri içeren toprakların temizlenmesi sırasında ısının etkisiyle dioksin oluşum potansiyeli olabilir [2].

4.3.5. Açık Yakma/Açık Patlatma

Açık Yakma/Açık Patlatma	
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinden alınarak
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Toprak
Proses Türü	Kimyasal Arıtma
Uygulanabilecek kirletici türleri	Patlayıcılar
Maliyet	Saha ve malzeme koşullarına göre çok değişkenlik gösterir
Süre	6 Aydan az

Tanım: Açıkta yakma uygulamalarında patlayıcı maddeler veya muhimmatlar dışarıdan tutuşturma kaynağıyla yakıp kendiliğinden kontrol altında yanmaya bırakılır. Bu durumda dışardan bir yakıt eklenerek yanma desteklenebilir. Açık patlatma uygulamalarına ise patlatılabilecek nitelikteki patlayıcı ve muhimmat malzemeler dışarıdan patlatmayla yok edilir. Patlatma prosesinde patlatma kutusu zeminden düşük kotta yerleştirilebilir, hatta üzeri toprakla örtülerek emisyon minimizasyonu hedeflenebilir.

Uygulanabilirlik: Bu proses ile pek çok patlayıcı nitelikte atık imha edilebilir. Bu süreç artık son kullanım ömrünü tamamlamış, kullanılamaz durumdaki muhimmatı, bileşenleri, enerjetik malzemelerle kirlenmiş ortamın temizlenmesinde kullanılır. Tipik olarak kullanım ömrünü tamamlamış mühimmat için uygulanır, ancak alternatif teknolojiler üretilmeye çalışılmaktadır.

Kısıtlamalar: Güvenlik sebebiyle, minimum uzaklık standartları sağlanmalıdır. Bu proseste emisyonları yakalayıp arıtmak zordur, bu nedenle emisyon standartlarının sıkı olduğu durumlarda tercih edilmez. Açık yakma/patlatma işlemleri kum fırtınası, kar fırtınası veya elektrik yüklü fırtınalar esnasında, statik yükle kendiliğinden zamanından önce ateşleme olasılığı olduğu için kullanılamaz. İşletme esnasında emisyon kontrolü kritik bir parametredir.

Maliyet ve Süre: Prosesin maliyet ve süresine yönelik yeterli veri bulunmamaktadır. Saha koşulları ve malzeme miktarına göre değişkenlik gösterir.

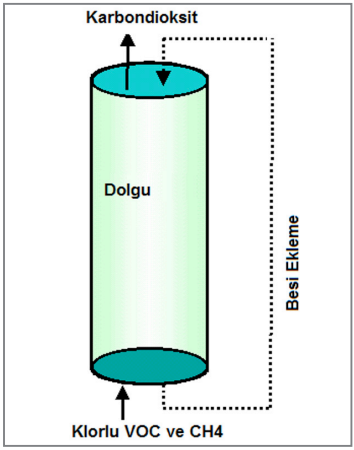
Uygulama Esnasında Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar: Açık yakma prosesi gerçekleştirilmeden önce bu tip tecrübesi olan personele danışılması, özellikle primer patlayıcıların yoğun olduğu durumlarda şarttır. Açık yakma ve açık patlatma elektrik, yakma veya enerjetik yüklü yakma sistemleri ile ateşlenebilir. Genellikle, elektrikli sistemler ateşleme süresini daha iyi ayarlanabilir olduğu için tercih edilmektedir. Açık yakma/patlatma işlemlerinde sahadan geçen rüzgarlar komşu sahalara kıvılcım, alev, duma ve toksik buhar taşıyabilir [2].

4.4. Proses Kaynaklı Çıkış Gazlarının Arıtılması

Toprak veya yeraltı suyu temizleme çalışmaları sırasında oluşabilecek olan emisyon ve çıkış gazlarının arıtımının gerektiği unutulmamalıdır. Çıkış gazların arıtma gereksinimi ve verimi, ilgili mevzuat incelenerek belirlenmelidir. Bir temizleme yönteminin sahada oluşturması muhtemel emisyonların tahmin edilmesi önceden gerçekleştirilen modelleme çalışmaları ile mümkün olabilmektedir. Sahada hafirat vb. çalışma yapıldığında VOC ve partikül madde emisyonları, çalışma yapılmayan bir sahaya oranla birkaç misli daha yüksek olabilir. Saha kirlilik önleme stratejisi geliştirmeden önce, "bozulmuş" ve "bozulmamış" sahadan kaynaklanacak olası emisyonların anlaşılması gerekmektedir. Temizleme sistemlerinden kaynaklanacak emisyonlar (ör. SVE veya yakma tesisleri) toprak kirletici konsantrasyonları ve debi ve giriş hızı verileri kullanılarak tahmin edilebilir. Çıkış gazlarının ısıl parçalanması (yakma) ve oksidasyon ile arıtılması planlanıyorsa, etkili olarak arıtım gerçekleştirilebilmesi için gaz arıtma sistemine yeterli miktarda hava/oksijen sağlanmalıdır.

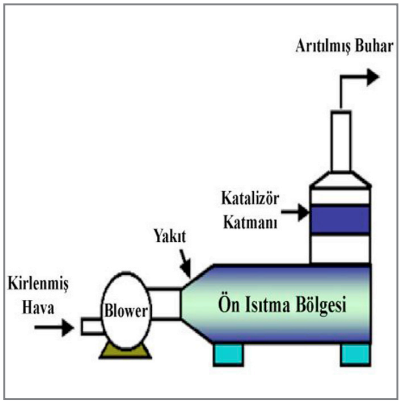
Bu teknolojilerden; biyofiltrasyon, oksidasyon, ıslak/kuru yıkayıcılar ve buhar faz karbon adsorpsiyonu, aşağıda kısaca özetlenmiştir. Yüksek enerjili parçalama, membran ile ayırma v.b. gibi diğer yöntemler de uygulanabilmekle birlikte burada ele alınmamıştır.

Biofiltrasyon: Gaz fazındaki organik kirleticiler toprak yatağından pompalanarak, gözenekli yapıdan geçer, toprakta soğurulur ve topraktaki mikroorganizmalar tarafından biyolojik olarak parçalanır. Biyofiltrasyon düşük maliyetli ve yüksek etkinliğe sahip bir hava kirliliği kontrol teknolojisidir. Tüm biyolojik arıtma sistemleri gibi, biyofiltrasyon prosesi de kirleticilerin biyobozunurluğuna bağlıdır. Biyofiltreler seçilen kirleticileri uygun şartlar altında zararsız ürünlere dönüştürür. Biyofiltrasyon öncelikli olarak halojen içermeyen VOClerin ve yakıt hidrokarbonların gideriminde kullanılır. Halojenli VOCler de bu prosesle daha düşük verimde de olsa giderilebilir. Biyofiltreler kompost yığınlarından kaynaklanan kokuların giderilmesinde başarıyla kullanılmaktadır. Biyorejenerasyon ile maksimum adsorpsiyon kapasitesinin sürekli olarak mevcut olması sağlanır, böylelikle kütle transfer bölgesi sabit ve kısa kalabilir. Filtrenin rejenere edilmesi gerekmez ve gerekli yatak uzunluğu büyük ölçüde kısalır. Bu özellikler ana maliyet ve işletme maliyetlerinin düşürülmesini sağlar. Kirleticiler granül aktif karbon prosesinde sadece gaz fazından ayrılırken, bu teknoloji ile parçalanarak yok edilir.



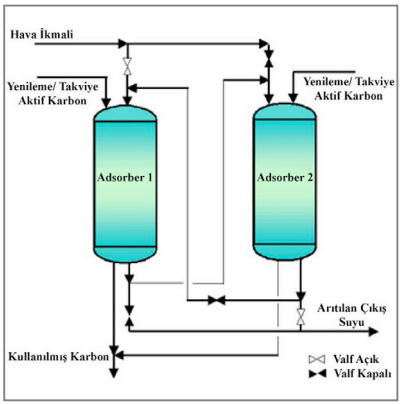
Şekil 4.50 Biyofiltrasyon Prosesi

Oksidasyon: Oksidasyon ekipmanı (termal veya katalitik) hava ile sıyırıcılar ve SVE prosesinden kaynaklanan çıkış gazlarındaki kirleticilerin temizlenmesinde kullanılan bir teknolojidir. Organik kirleticiler yüksek sıcaklıktaki (1000°C) yakma sisteminde yok edilir. Eser miktarda organikler bulunduğunda ise daha düşük sıcaklıklarda (450 °C) oganikler yok edilir. Daha sonra, hava karışımı katalizörden geçirilerek katalitik oksidasyon sağlanır. Daha sonra, hava karışımı katalizörden geçirilerek katalitik oksidasyon sağlanır. Katalitik oksidasyon, yakın zamanda kullanılmaya başlanan bir alternatiftir.



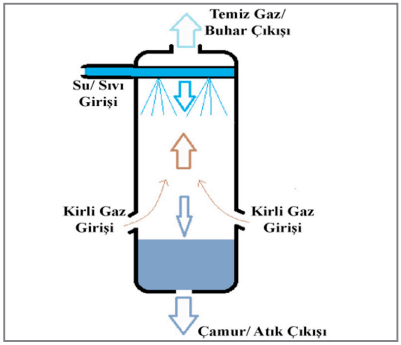
Şekil 4.51 Oksidasyon Prosesi

Buhar Faz Karbon Adsorpsiyonu: Kirleticiler aktif karbon parçacıkları üzerinde fiziksel soğurulma ile havadan ayrılır. Doygun hale gelen karbonun periyodik olarak değiştirilmesi veya yeniden kullanılmak üzere geri kazanılması gerekmektedir. Granül yapıdaki aktif karbonun kullanıldığı sıkıştırılmış dolgulu yatak tipi reaktörlerde, kirlenmiş hava, çıkış konsantrasyonunda mevzuata göre kabul edilebilir emisyon değerini yakalayıncaya dek sistem içerisinden geçirilir. Aktif karbon sistemi halojenli çözücülerin de arıtılabilmesi için yoğuşturma ile birlikte kullanılabilir [2].



Şekil 4.52 Buhar Faz Karbon Adsorpsiyonu

Islak/kuru yıkayıcılar: Çıkış gazı içerisindeki partikül halinde veya çözünmüş halde bulunan kirleticileri uygun yıkama karışımları ile yıkayarak gaz fazının temizlenmesini sağlayan bir teknolojidir. Islak ve kuru yıkayıcılar olarak iki genel türü bulunmaktadır.



Şekil 4.53 Islak Yıkayıcı Sistemi

4.5. Örnek Temizleme Süreçleri

4.5.1. Toprakta Uygulanabilir Örnek Temizleme Süreçleri

Kılavuzun çeşitli kısımlarında teknoloji seçiminde dikkat edilmesi gereken kriterlerden bahsedilmiştir. Her kirlenmiş sahanın kendine özgü koşullarının olduğu hiçbir zaman unutulmamak kaydıyla, her seferinde bir kirlenmiş saha için çok çeşitli teknolojilerin en başından değerendirilmesi de ciddi insan gücü ve zaman kaybı olabilmektedir. Bu durumdan hareketle, sahanın temizlenmesine karar verildikten sonra, sahaya özgü bilgiler elde edilerek, daha önce benzer sahalarda aynı kirleticiler için uygulanmış olan teknikleri ortaya koyulmuştur. Aşağıda bu gruplar ve başarısı kabul görmüş teknolojiler verilmektedir [29].

Halojenli (TCE, vinil klorür, klorobenzen, vb) veya halojensiz VOClerle (BTEX gibi aromatikler, keton/furanlar, vb.) kirlenmiş topraklar için (1) Toprak Gazı Ekstraksiyonu (SVE), (2) Isıl Desorpsiyon (3) Yakma, "başarısı kabul görmüş" teknolojilerdir.

Belirtilen teknolojiler, SVE için %85'in, diğerleri için %95'in üzerinde VOC giderim verimini tutarlılıkla sağladığından önerilmektedir. Halojensiz ve halojenli VOClerle kirlenmiş topraklar için SVE'nin sahaların çok büyük çoğunluğunda uygulandığı, diğer yandan göreceli çok daha az sayıda sahada termal desorpsiyon ve yakma uygulanabilmektedir. [47]

Ahşap işleme bölgelerinde organik bileşiklerle kirlenmiş olan kirlenmiş sahalarda ise (1) Geliştirilmiş Biyoremediasyon (2) Isıl Desorpsiyon (3) Yakma "başarısı kabul görmüş" teknolojiler olarak belirlenmiştir: [48]

Biyoremediasyon saha içi veya dışı olarak uygulanabilmekte ve PAHlar için %64-95, klorofenoller için %78-98 giderim sağlandığından önerilmektedir. Termal desorpsiyonun verimi % 82-99, yakmanın ise % 90-99 olabilmektedir.

İnorganiklerle kirlenmiş sahalarda ise sadece solidifikasyon/stabilizasyon "başarısı kabul görmüş" teknoloji olarak belirlenmiştir. Bu teknoloji ile inorganiklerin giderim verimi %80-90'dır. [29]

Kirletici grupları bazında kirlenmiş toprakta en yaygın olarak uygulanan teknolojiler:

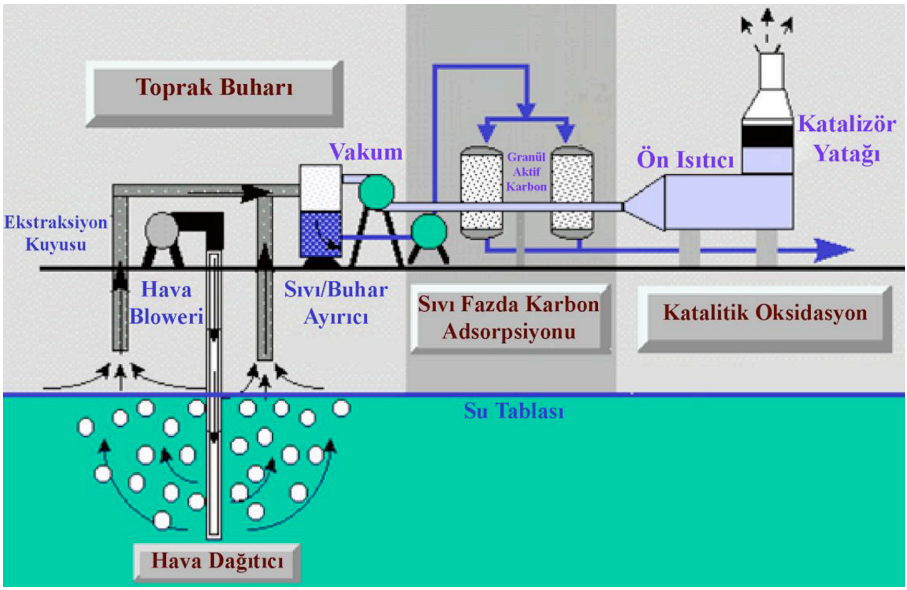
Her kirlenmiş saha kendine özgü özellikler barındırır ve gerek ortam, gerek kirletici ve gerekse de diğer tüm etmenlerin etkisi birlikte değerlendirilerek teknoloji seçimi yapılmalıdır. Bir teknoloji, yaygınlıkla uygulanıyor ve belli bir kirletici ve ortam için "uygulanan teknoloji" konumuna geliyorsa, bu bilginin teknoloji seçimi aşamasında değerlendirilmesi önemlidir. Bu bağlamda, toprağın 2.bölümde açıklanan kirletici grupları ile kirlenmiş olduğu sahalarda uygulanan teknolojiler Tablo 4.4'de verilmektedir. Tipik olarak, hiçbir teknoloji tek başına bir sahanın temizlenmesi için yeterli değildir. Bu nedenle her zaman teknolojiler çeşitli kombinasyonlarda kullanılarak en uygun temizleme süreci ortaya konmaya çalışılmalıdır [2].

Tablo 4.4 Kirlenmiş Topraklarda Yaygınlıkla Kullanılan İyileştirme Teknolojileri

VOC	HVOC	SVOC	HSVOC	Yakıt	İnorganik	Patlayıcı
SVE* Isıl desorpsiyon* Yakma* Biyoventilasyon	SVE* Isıl desorpsiyon* Yakma* Biyoventilasyon	Biyoremediasyon Biyoventilasyon Kompost Arazide ıslah Siluri Faz Biyolojik Arıtma Yakma Hafriyat, ve saha dışına taşıma	Biyoremediasyon Biyoventilasyon Kompost Arazide Islah Siluri Faz Biyolojik Arıtma Halojensizleştirme Yakma Hafriyat, ve saha dışına taşıma	Biyoventilasyon* Biyoremediasyon Kompost Sıvı-Gaz Emişli Arıtım Biyoyığın Arazide Islah Siluri Faz Biyolojik Arıtma Yakma SVE Düşük Sıcaklıkta Isıl Desorpsiyon	Solidifikasyon* Hafriyat, ve saha dışına bertaraf Kimyasal ekstraksiyon (asit)	Biyoreaktör Kompost Arazide Islah Fitoremediasyon Biyoremediasyon

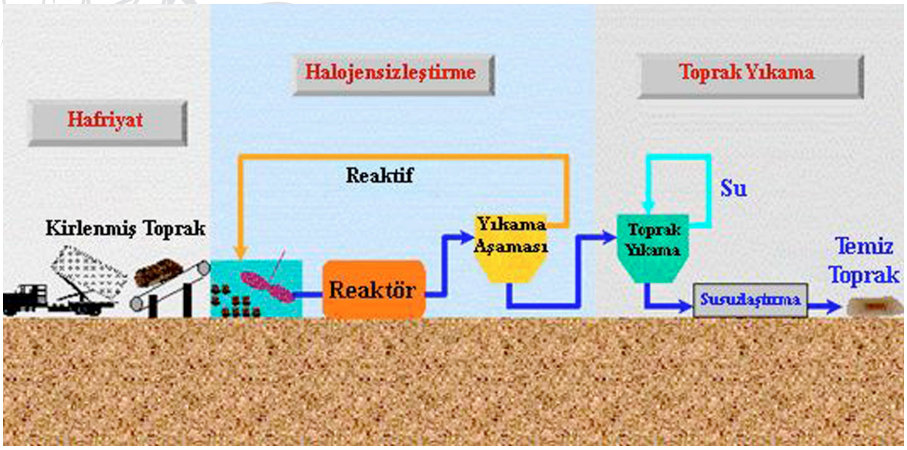
* Bu tip kirlilikte genel olarak başarısı kabul görmüş teknolojidir. VOCler ve HVOClerle kirlenmiş topraklar için çok büyük çoğunlukla SVE teknolojisinina uygulandığı, diğer yandan göreceli çok daha az sayıda sahada termal desorpsiyon ve yakma uygulandığı bilinmektedir.

Örnek temizleme süreci: Halojen içeren veya içermeyen VOClerle kirlenmiş toprağın bulunduğu bir saha için örnek bir arıtma süreci aşağıda verilmiştir. Aşağıda tarif edilen temizleme sürecinde, toprak buhar ekstraksiyon sistemi kirlenmiş topraktan VOC buharını çekmek için kullanılır. Hava enjeksiyonu ile su tablasının altından hava verilerek biyoremediasyon verimi geliştirilmiş olur. VOC ile kirlenmiş su ve gaz, sıvı/gaz ayırıcısından geçtikten sonra sıvı faz granül aktif karbon sisteminden geçirilir. GAC sistemi sudaki VOCleri giderir. Çıkış suyu deşarj edilir veya sıvı geri kazanım şeklinde geri pompalanır. Bu esnada gaz fazında olan VOCler katalitik oksitlenme ile tamamen yok edilir. Karbondioksit ve su buharı oksidasyonun nihai ürünleri olarak atmosfere salınır [2].



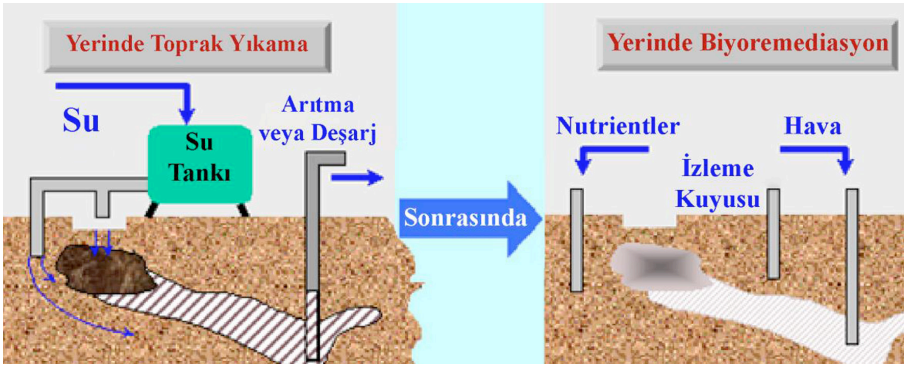
Şekil 4.54 VOC veya HVOC'lerle Kirlenmiş Topraklar için Örnek Temizleme Süreci

Örnek temizleme süreci: Halojen içeren yarı-uçucu VOC'lerle kirlenmiş toprağın bulunduğu bir saha için örnek bir arıtma süreci aşağıda verilmiştir. Temizleme sürecinde kirlenmiş toprak hafriyatı gerçekleştirilecrek bertaraf tesisine taşınmıştır. İlk olarak kirlenmiş toprağa halojensizleştirme işlemi uygulanmıştır. Bu proseste, toprak kimyasal reaktif maddeler ile karıştırılarak SVOC ile reaktiflerin tepkimesinin gerçekleştirildiği reaktöre beslenmiştir. Halojensizleştirme işleminden sonra, fazla kimyasal reaktifler topraktan ayrılıp geri kazanılarak karıştırıcıya geri döndürülür. Arıtılan toprak, kalıntı olabilecek kirleticileri gidermek için yıkama prosesinde su ile temizlenir. Temiz toprak susuzlaştırmadan sonra bertaraf edilebilir [2].



Şekil 4.55 HSVOC'lerle Kirlenmiş Topraklar için Örnek Temizleme Süreci

Örnek temizleme süreci: Yakıtlarla kirlenmiş toprağın bulunduğu bir saha için örnek bir arıtma süreci aşağıda verilmiştir. Yakıtlarla kirlenmiş toprak ilk olarak toprak yıkama prosesinden geçirilerek arıtılmıştır. Bu işlem kirlenmiş sahanın üzerinden su enjeksiyonu ile gerçekleşir. Yüzey aktif maddeler veya diğer eklentiler toprağın yıkama etkisini iyileştirmek için kullanılabilir. Kirli su, yeraltı suyu akış yönünün altından ekstraksiyon kuyularından, daha fazla arıtılmak için dışarı alınır. Toprakta ise, yerinde biyolojik temizleme prosesi uygulanır. Biyoremediasyon verimini arttırmak için sahaya nütrient ve hava enjekte edilebilir. Toprağın yıkanmasından sonra yeraltından çekilen su ise, endüstriyel nitelikte atıksuların arıtımına uygun prosesler yardımı ile arıtılır [2].



Şekil 4.56 Yakıtlarla Kirlenmiş Topraklar için Örnek Temizleme Süreci

4.5.2. Yeraltı Suyunda Uygulanabilir Örnek Temizleme Süreçleri

Yeraltı suyunun temizlenmesinde kullanılabilecek, "uygun olduğu varsayılan" temizleme teknolojileri,

Çözünmüş organik bileşikler, uçucular, yarı-uçucu ve diğerleri için:

- Hava ile Sıyırma
- Granül Aktif Karbon
- Kimyasal/UV Oksidasyonu (siyanür bileşikleri için de)
- Aerobik biyolojik reaktörler

Çözünmüş metaller için :

- Kimyasal Çöktürme
- İyon değişimi
- Elektrokimyasal yöntemler (sadece metallerin var olduğu durumlarda)
- Metallerin havalandırılması

Hem organik hem inorganik bileşenlerin birlikte olduğu durumlarda toprağın temizlenmesinde yukarıda sıralanan teknolojilerin kombinasyonları kullanılabilir.

Kirletici grupları bazında kirlenmiş yeraltı suyunda en yaygın olarak uygulanan teknolojiler:

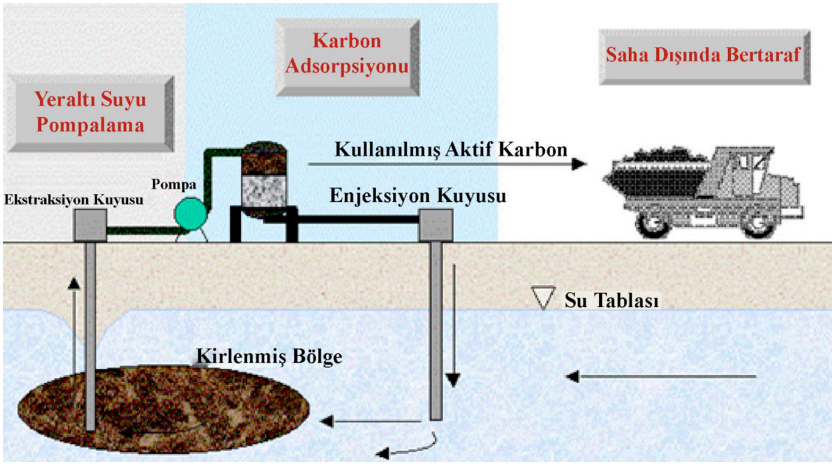
Her kirlenmiş saha kendine özgü özellikler barındırır ve gerek ortam, gerek kirletici ve gerekse de diğer tüm etmenlerin etkisi birlikte değerlendirilerek teknoloji seçimi yapılmalıdır. Bir teknoloji, yaygınlıkla uygulanıyor ve belli bir kirletici ve ortam için "uygulanabilir teknoloji" konumuna geliyorsa, bu bilginin teknoloji seçimi aşamasında değerlendirilmesi önemlidir. Bu bağlamda, yeraltı suyunun 2.bölümde açıklanan kirletici grupları ile kirlenmiş olduğu durumlarda tipik olarak uygulanan teknolojiler Tablo 4.5'te verilmektedir.

Tablo 4.5 Kirlenmiş Yeraltı Suyunda Yaygın Olarak Kullanılan İyileştirme Teknolojileri

VOC	HVOC	SVOC**	HSVOC**	Yakıt	İnorganik	Patlayıcı
Havalı Sıyırma* Karbon adsorpsiyonu* Ayırma, membran pervoporasyon	Havalı Sıyırma* Karbon adsoprsiyonu* Ayırma, membran pervoporasyon	Karbon adsorpsiyonu UV oksidasyonu	Karbon adsorpsiyonu UV oksidasyonu	Havalı Sıyırma Karbon adsorpsiyonu Çift Faz Ekstraksiyon Sıvı/Gaz ekstraksiyonu Sıvı-Gaz Emişli Arıtım Hava enjeksiyonu	Çöktürme/ Yumaklaştırma / Flokülasyon Ayırma, filtrasyon İyon değişimi	Karbon adsorpsiyonu UV oksidasyonu

* Bu tip kirlilikte genel olarak başarısı kabul görmüş teknolojidir.
** Yeraltı suyunda belirtilen kirletici grupları için yerinde temizleme teknolojileri yaygın olarak kullanılmamaktadır.

Örnek temizleme süreci: Halojen içeren VOClerle kirlenmiş toprağın bulunduğu bir saha için olası örnek bir arıtma süreci aşağıda gösterilmiştir. Aşağıda verilen temizleme sürecinde kirlenmiş yeraltı suyunu yüzeye çıkarmak için pompalama sistemi kullanılmıştır. VOC ile kirlenmiş sular sıvı faz granül aktif karbon adsorpsiyon sisteminden geçirilir. GAC sistemi sudaki VOCleri giderir ve çıkış suyu deşarj edilir veya yeraltına geri beslenir. Ömrü tamamlanan GAC geri kazanım veya bertaraf amacıyla yerinden alınır [2].



Şekil 4.57 HVOC'lerle Kirlenmiş Yeraltı Suları için Örnek İyileştirme Süreci

5. İZLEME

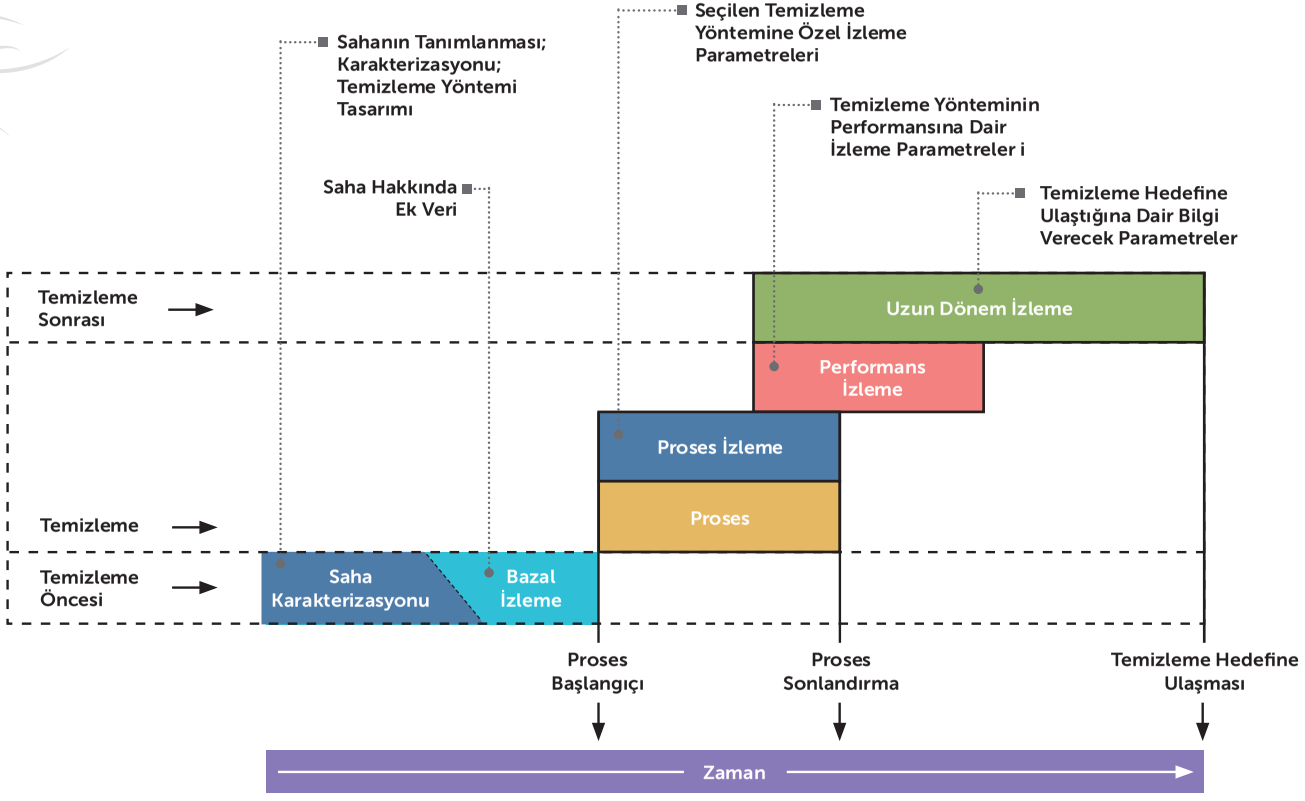
İzleme, bir kirlenmiş sahada temizleme faaliyetine karar vermeden önce, faaliyet sırasında ve temizlemenin tamamlanmasından sonra; sahadaki kirlilik probleminin analiz edilmesi, uygulanan teknolojinin performans ve etkinliğinin değerlendirilmesi, temizleme işleminin hedefine ulaştığının belirlenmesi için objektif veri sağlar. İzleme çalışmaları, planlama aşamasından itibaren saha temizleme projesinin bir parçası olarak görülmelidir. Bu kapsamda ele alındığında temel olarak üç şekilde izleme yaklaşımı mevcuttur. Bu üç yaklaşım; sahanın kirlilik durumunun belirlendiği *"Temizleme Öncesi İzleme"* (ön izleme, bazal izleme), temizleme işleminin planlandığı gibi işleyip işlemediğinin takip edildiği *"Temizleme Sırasında İzleme"* ve temizleme faaliyetlerinin sonlandırılmasını müteakiben sahanın temiz kalmaya devam edip etmediğini, insan ve çevreye olan risklerin azaltıldığının teyit edilmesi için gerçekleştirilen *"Temizleme Sonrası İzleme"* işlemleridir. Her bir izleme uygulamasında, temizleme sürecinde farklı amaçlara hizmet etmek üzere özel göstergeler ve parametreler izleme planında tanımlanır [30]. Farklı süreçlerde gerçekleştirilen izleme faaliyetlerinin amaçları Tablo 5.1'de özetlenmiştir.

Tablo 5.1 İzleme Faaliyetlerinin Amacı

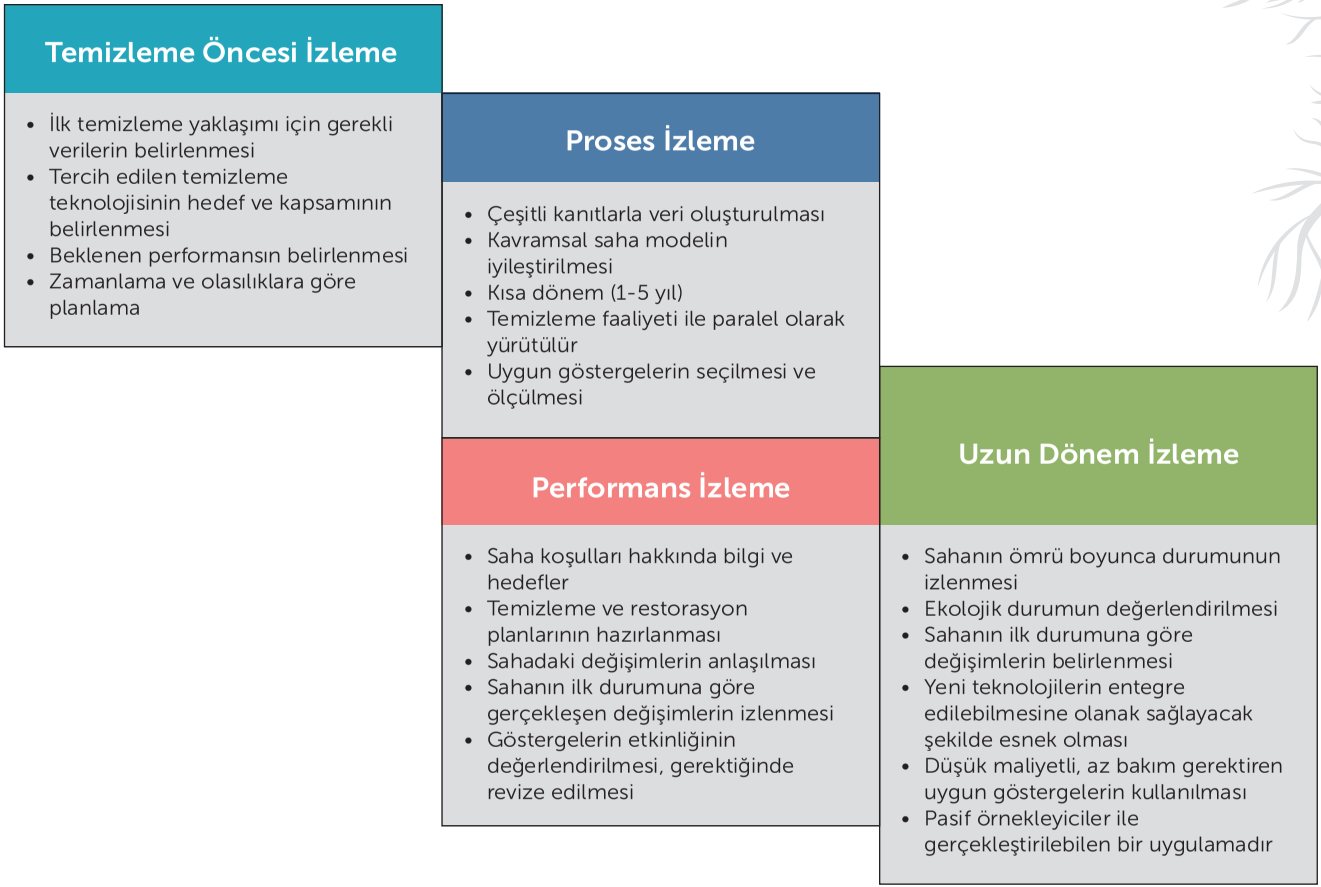
İzleme Türü		İzleme Faaliyetinin Amacı
Temizleme Öncesi İzleme	Bazal İzleme	Seçilen teknolojinin uzun süreli etkin olacağının belirlenmesi ve nihai hedef ile karşılaştırılmak üzere baz veri elde edilmesi
Temizleme Esnasında İzleme	Proses İzleme	Temizleme faaliyetinin tasarım ve arıtma performans standartlarına uyumunun değerlendirilmesi
	Performans İzleme	Hedef kirletici derişimine erişmede kısa süreli iyileştirme performans ve etkinliğinin değerlendirilmesi
Temizleme Sonrası izleme	Uzun Dönem İzleme	Çevresel ve insan sağlığına oluşan risklerin azaltılmasında uzun dönem iyileştirme etkinliğinin değerlendirilmesi

İzleme aşamaları, temizleme sürecine paralel olarak ilerlemekte ve temizleme sürecinin farklı aşamalarına karşılık gelmektedir. Temizleme esnasında izleme, Toprak Kirliliğinin Kontrolü ve Noktasal Kaynaklı Kirlenmiş Sahalara Dair Yönetmelik kapsamında; "Performans İzlemesi" olarak adlandırılır ve iyileştirme çalışmalarının uygulanması sırasında hayata geçirilir. Temizleme sonrası izleme işlemine ise Yönetmelik, "Sonlandırma sonrası izleme" tanımını yapmaktadır [31]. İzleme çalışmalarının seçilen genel bir teknoloji öncesinde, sırasında ve sonrasındaki zamansal durumuna göre şematik gösterimi Şekil 5.1'de verilmektedir Seçilen teknoloji özelinde sürelerin değişiklik göstereceği unutulmamalıdır.

Tablo 5.1'de verilen tüm izleme süreçleri şematik olarak Şekil 5.2'de gösterilmektedir. Herbir süreç ile ilgili detaylar bir sonraki bölümde açıklanmaktadır.



Şekil 5.1 Temizleme Süreci ve Sonrası İzleme Aktiviteleri -Örnek Zaman Çizelgesi



Şekil 5.2 İzleme Aşamalarının Kapsamı

5.1. Temizleme Öncesi İzleme

Temizleme işlemi öncesi izlemede, saha karakterizasyonundan farklı olarak bir sahanın tanımlanması için gerekli tüm ölçümler gerçekleştirilmez. Temizleme öncesi izleme tasarımı, karakterizasyon çalışması ile sahanın takip edilmesi gereken fiziksel, kimyasal, biyolojik şartları belirlendikten ve hangi bölgelerin izleneceğine karar verildikten sonra gerçekleştirilir. İzleme programı kapsamında takip edilecek değişkenler belirlenir. Bu değişkenler fiziksel (ör. su debisi değişimleri), biyolojik (ör. reseptör olarak belirlenen canlılardaki değişimler) ve kimyasal öğeler (ör. su kalitesindeki değişimler) içerebilir. Temizleme öncesi izleme özellikle iyileştirme sonrasında sahanın kirletici derişimi bakımından ilk halinden daha iyi bir noktaya geldiğinin kanıtlanması için önemlidir.

Tipik olarak, kavramsal saha modelinin geliştirilmesi aşamasında kapsamlı bir saha karakterizasyon çalışması yapılır. Seçilen teknolojinin uzun vadede etkin olacağının anlaşılabilmesi için ek bazı bilgilere ihtiyaç duyulabilir. Bu aşamada çeşitli fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçler ölçütlerin geliştirilmesi için kullanılabilir. Kirlenmiş sahadan etkilenmesi beklenmeyen ve etkilenmesi beklenen bölgelerden alınan numuneler, izleme verilerinin anlaşılması ve uzun dönemde sahada gerçekleşen değişimlerin değerlendirilebilmesi amacıyla kullanılır. Sahadaki kirliliğin değişim göstermesi (örneğin mevsimsel değişimler, bir kimyasalın mevsimsel üretimi vb. gibi durumlar) söz konusu ise, temizleme öncesi izlemenin bu mevsimsel değişiklikleri öngörerek planlanması gerekir. Temizleme sonucu, temizleme öncesi izleme esnasında elde edilen sonuçlarla karşılaştırılacaksa verilerin yaz/kış veya yağışlı/kurak mevsim verilerinin, aynı koşulları yansıttıklarından emin olunmalıdır. Aynı koşulları sağlamayan durumlarda elde edilen bulgular karşılaştırılmamalıdır. Bu tip durumlar etkinlik değerlendirmesinde hatalı sonuçlara götürebilir [30].

5.2. Temizleme Esnasında İzleme

Temizleme esnasında izleme, genellikle temizleme sisteminin kurulumundan hemen sonra başlatılır, bu sayede temizlemenin tasarım kriterini yakalayıp yakalayamadığı takip edilir. Temizleme sırasında gerçekleştirilen izlemede iyileştirmenin temel hedefleri (kirletici kütle ve derişiminde azalma, kirletici hareketliliği ve toksisitesinde azalma, kirleticinin efektif şekilde hapsedilmesi ve taşınma yolu ve reseptörlerin etkin yönetimi) gözetilmelidir. Bu bağlamda, seçilen iyileştirme teknolojisi/lerinin etkinliğinin değerlendirmesi için izleme yapılması zorunludur. Temizleme teknolojisinin etkinliğinin değerlendirilmesi, uygulanan prosesin izlenmesi ve temizleme sisteminin performans izlenmesi olarak iki faz şeklinde düşünülebilir. Proses izlemesi, sistem girdi ve çıktılarında kullanılan sisteme göre farklılaşan gösterge parametrelerin ölçülmesi ile gerçekleştirilir. Proses izleme planının hazırlanmasında, teknolojinin tasarımı esas alınmaktadır. Kirlenmiş sahaya yapılacak olan etkinin tasarlandığı şekilde yapıldığının anlaşılması hedeflenir. Proses izlemesi "İzlemeli Doğal Giderim" yöntemi için kullanılamaz. İzlemeli Doğal Giderim tekniğinde sadece temizleme performansı izlemesi gerçekleştirilmektedir. Temizleme performansının izlenmesi; belirlenen saha temizleme hedefine ulaşılma durumu

hakkında bilgi verirken, ek temizleme faaliyetlerine veya farklı bir teknolojiye geçilip geçilmemesi durumunun değerlendirilmesi amacıyla da kullanılır.

Proses izleme aşamasında, kavramsal saha modeli çerçevesinde proses göstergeleri belirlenir. Göstergelerin prosesin işlerliğini tutarlı ve doğru şekilde gösterdiğinden emin olunması gerekir. Gösterge proses parametreleri belirlenen zaman aralıklarında numuneler alınarak takip edilir. Performans izleme aşamasında ise sahadaki hedef kirletici konsantrasyona ulaşılıp ulaşılmadığını anlamak için kirlenmiş ortam üzerinde ve gerekirse reseptörlerde izleme çalışmaları gerçekleştirilir. Burada hedef kirleticinin azalmasını göstermenin yanısıra, dağılmasının engellendiği ve eğer saha içi kirleticinin parçalanmasını hedefleyen bir süreç seçilmişse (ör. biyoremediasyon veya kimyasal oksidasyon) daha tehlikeli yan ürünlere dönüşümünün olmadığına emin olunmalıdır [30]. Literatürde farklı teknolojiler için proses izlemesine yönelik olarak oluşturulmuş izleme planı örnekleri Tablo 5.2 ve Tablo 5.6 arasındaki tablolarda incelenebilir.

Tablo 5.2 Yerinde Yeraltı Suyu Biyoremediasyonu Örnek İzleme Planı

	İzleme Sıklığı	İzlenen Parametre	İzleme Noktası
Başlangıç (1-2 Hafta)	En az günde bir	Ekstraksiyon hacmi	Ekstraksiyon ve enjeksiyon kuyu başlıkları ve çıkışları
		Enjeksiyon hacmi	
	Her 2-3 günde	Elektron alıcı konsantrasyonu	İzleme kuyuları
		Yer altı suyu seviyeleri	İzleme Kuyuları
Temizleme	Haftalık	Yer altı suyu seviyeleri	İzleme kuyuları
		Ekstraksiyon ve enjeksiyon akım hızı	Ekstraksiyon ve enjeksiyon kuyu başlıkları ve çıkışları
	Üç ayda bir	Elektron alıcı konsantrasyonu, amonyak, fosfat, nitrat, pH ve iletkenlik	İzleme kuyuları Ekstraksiyon ve enjeksiyon ve izleme kuyuları
		Toprak ve yer altı suyundaki bileşen konsantrasyonları	Toprak numune noktaları

Tablo 5.3 Biyoventilasyon Sistemi İzleme Önerileri

	İzleme Sıklığı	İzlenen Parametre	İzleme Noktası
Başlangıç	En az günlük	Akış Vakum ölçümleri VOCler Karbon dioksit Oksijen	Ekstraksiyon bacaları Manifold Çıkış gazı bacası
Temizleme	Haftalık – İki haftada bir	Akış Vakum VOCler Karbondioksit Oksijen	Ekstraksiyon bacaları Manifold Çıkış gazı bacası

Tablo 5.4 Çift Faz Ekstraksiyonu Örnek İzleme Planı

	İzleme Sıklığı	İzlenen Parametre	İzleme Noktası
Başlangıç (7-10 Gün)	En az günde bir	Akış Vakum ölçümleri Buhar konsantrasyonu Karbondioksit Oksijen	Ekstraksiyon bacaları Manifold Çıkış bacası
Temizleme	Haftada bir – İki haftada bir	Akış dengeleme Akış Vakum Buhar konsantrasyonu Karbondioksit Oksijen	Ekstraksiyon bacaları Manifold Çıkış bacası

Tablo 5.5 Toprak Buhar Ektraksiyonu İzleme Önerileri

	İzleme Sıklığı	İzlenen Parametre	İzleme Noktası
Başlangıç (7-10 Gün)	Her gün	Akış Vakum Buhar konsantrasyonu	Ekstraksiyon havalandırması Manifold Çıkış bacası
Temizleme	Haftalık – Aylık	Akış Vakum Buhar konsantrasyonu	Ekstraksiyon havalandırması Manifold Çıkış bacası

Tablo 5.6 Düşük Sıcaklıkta Isıl Desorpsiyon Temizleme Programı Örnek İzleme Planı

Aşama	İzleme Sıklığı	İzleme Noktası	İzlenen Parametre
Hafriyat	Hafriyatın sonunda	Hafriyat Duvarları Hafriyat Tabanı	TPH, hedef kirleticiler
Temizleme İşlemi	Beslenen ve temizlenen her 76 m^3 toprak başına	Beslenen toprak Arıtılmış Toprak	TPH, hedef kirleticiler

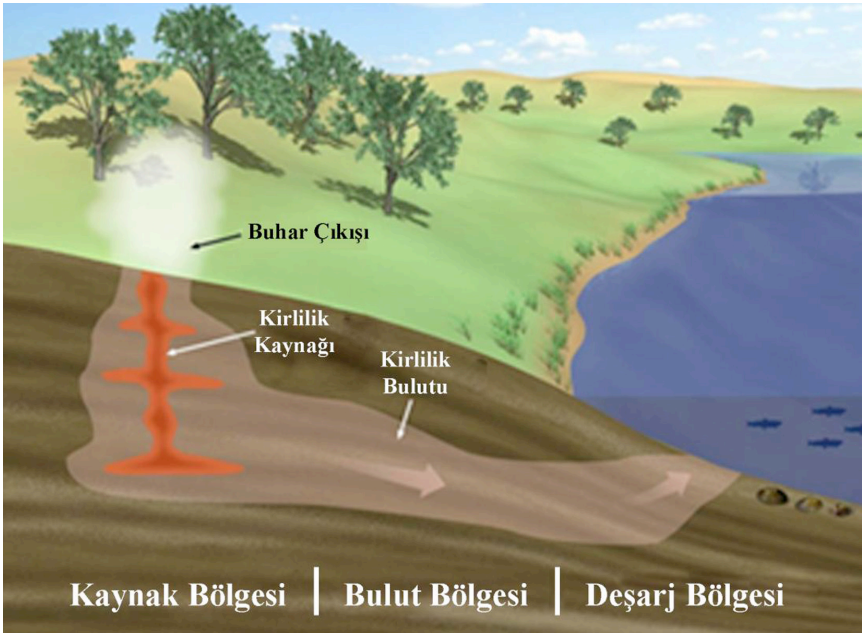
Performans izlemesine yönelik olarak uygun olabilecek saha göstergeleri [4]:

- Laboratuvar analizlerini destekleyici ve modeldeki tahminleri kontrol etme amaçlı saha ölçümleri,
- Temizlenen malzemenin yeri ve hacmini gösteren veri,
- Temizlenen alanın civarında ve ötesinde kirleticilerin yayılımına ilişkin durumun niceliğini belirlemek için ek numune alma çalışmaları. Kirleticilerin hareketsizleştirildiğine dair veriler. Kirlilik bulutunu takip etmek için jeofiziksel değerlendirme verisi. Fiziksel bariyerlerin stabilitesinin tespiti
- Ara ve nihai yıkım ürünlerine ait veriler (Ör. Biyobozunma esnasında karbondioksit yıkımı),
- Sisteme özel bileşenlerin konsantrasyonları ve/veya sistem içi göstergeler, proses parametreleri (Ör. Ph, sıcaklık, nem içeriği),
- Toprak toksisitesinin azaldığının gösterilmesi için biyotahlil zehirlilik belirleme çalışmaları,
- Biyolojik prosesleri destekleyici nütrientlerin ve/veya elektron alıcı/vericilerin konsantrasyonları.

- Toprak kullanım veya su kullanım sınırlandırmalarının olup olmadığına dair altyapının (Ör. Çitler, sınırlar, işaretler) incelenmesi.

Bütün bu kıstaslar düşünüldüğünde, izleme sisteminin sadece arıtma sistemi giriş-çıkış parametrelerinden ibaret bir "analiz" olmaktan çok, kirliliğin kaynağını, taşıyıcı ortamda/ortamla birlikte yayılımını, ulaştığı/ulaşması muhtemel alıcı ortamı ve reseptörleri de içerisine alan bütüncül bir takip süreci olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 5.3'te kirlenmiş saha örneğinde izleme için düşünülmesi gereken bileşenlerin yalnızca kirlenmiş toprak ve yeraltı suyu olmadığı gösterilmektedir. Şekildeki durumda, kaynak "kirlilik kaynağı", taşınım yolları "Buhar çıkışı" ve "Kirlilik Bulutu", alıcı ortamlar "hava" ve "yüzey suyu", reseptörler ise "bitkiler ve sucul canlılar" olarak resmedilmiştir. Performans izleme ve temizleme sonrası izleme kapsamında bir sistemi oluşturan bu ögelerin bütününün izlenmesi gerektiği unutulmamalıdır .



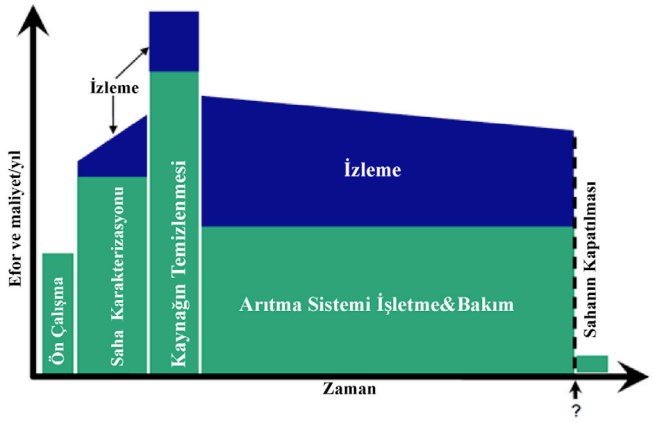
Şekil 5.3 İzleme Kapsamındaki Bileşenlerin Gösterimi

Tablo 5.7'de biyoyığın ve arazide ıslah prosesleri örneğinde performans izlemesinin hangi farklı ortamlarda gerçekleştirilmesi gerektiği, her bir ortamda değişken numune alma sıklıkları ve bu ortamlarda/sıklıkta takip edilmesi gereken gösterge parametreler açıklanmıştır.

Tablo 5.7 Biyoyığın/Arazide Islah Prosesleri Remediasyon İzleme Planı Örneği

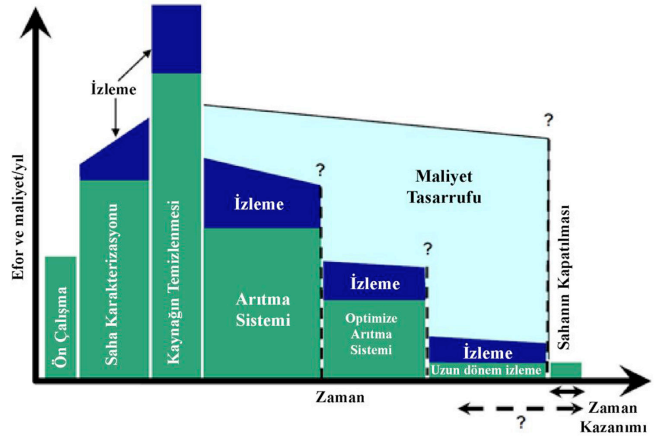
İzlenen Ortam	Amaç	Örnekleme Sıklığı	İncelenecek Parametre
Bioyığın içindeki toprak	Bozunma ve biyobozunma bileşenlerinin belirlenmesi	İşletme süresince Ayda- Üç ayda bir	Bakteri populasyonu, Bileşen yoğunluğu, pH, amonya, fosfor, nem miktarı, diğer hızı sınırlayan şartlar
Bioyığından çekilen hava	Bozunma ve biyobozunma bileşenlerinin belirlenmesi	İşletmenin ilk 3 ayında her hafta, sonrasında ayda bir veya üç ayda bir	CO_2, O_2, CH_4, H_2S, VOCs
Hava	Saha personeli ve halka yönelik sağlık tehditlerini belirlemek	İşletmenin ilk iki haftasında ikişer kere, daha sonra üç haftada bir veya hava kalitesi ihtiyaçlarını sağlamaya yönelik	Uçucu bileşenler, partiküller
Yüzey Suyu	Çözünebilen ve askıdaki bileşenler	İlgili mevzuata göre gerek görülürse	Tehlikeli organiklere yönelik, ilgili mevzuatta belirtilen parametreler
Bioyığın altındaki toprak	Bileşenlerin yer değiştirmesini gözlemlemek	Her biyoyığın döneminde iki kere veya sadece üç ayda bir	Tehlikeli bileşenler
Bioyığının aşağı akısında kalan yeraltı suyu	Çözünebilen bileşenlerin yer değişimini gözlemlemek	Biyoyığın döneminde bir kere (yıllık)	Tehlikeli, çözünebilen bileşenler

Temizleme esnasında izleme, planlanan temizleme hedefine planlanan süre ve maliyetler çerçevesinde ulaşılıp ulaşılamayacağını gösteren önemli bir bileşendir. Temizleme aktivitesinin başlangıcında karakterizasyon ve kaynağın kaldırılması işlemleri için büyük emek sarf edilir. İzleme için sarfedilen emek nispeten daha düşük seviyede kalmaktadır. Proje olgunlaştıkça, kaynakların çoğu izleme, işletme ve bakım için harcanmaya başlar. Şekil 5.4'te kirlenmiş bir sahada tipik bir konvansiyonel temizleme çalışmasının zaman maliyet ilişkisi gösterilmektedir. Şeklin sonundaki kesikli çizgi, temizlemenin ne kadar zaman sonra nihayete ereceğinden emin olunamamasından kaynaklanmaktadır [32].



Şekil 5.4 Temizleme/İyileştirme Faaliyetlerinde İş Gücü/Maliyet ve Zaman Grafiği

Bu şekilde işletilen bir sistemin, arzu edilen temizleme hedefine ulaşılıncaya kadar ne kadar daha kaynak sarfiyatı yapacağının öngörülmesi zordur. Bu nedenle, temizleme optimizasyon çalışmalarının hayata geçirilmesi gereklidir. İzleme esnasında elde edilen bulgular geliştirme konusunda uygulayıcıya büyük oranda destek sağlar. Temizleme sürecini takip eder ve temizlemenin ne zaman sonlandırılabileceği ile ilgili sürekli olarak güncellenen bir tahmin yaklaşımı sunar. İzlemenin sunduğu yaklaşımlardan faydalanarak sistem maliyetleri ve hedefe ulaşmak için gerekli olan süre düşürülebilir. Bu yönde bir yaklaşım örneği ve maliyeti/süreyi nasıl iyileştirebildiğinin şematik bir anlatımı Şekil 5.5'de gösterilmiştir.



Şekil 5.5 İzleme Geri Bildirimi Kullanılarak Sistem Optimizasyonu Yaklaşımı

İzleme programları, seçilen temizleme yönteminden bağımsız olarak tüm temizleme sahalarında optimizasyona dâhil edilebilir. İzlemeden elde edilen verilerin analiz edilmesi, temizleme faaliyetinin değerlendirilmesinde ve takip edilmesinde kilit parametredir. Bu nedenle izleme ağının da kontrol edilmesi ve güncel tutulması çok önemli bir husustur. İzleme sisteminin değerlendirilmesi: (1) İzleme noktalarının sayıları, (2) İzleme noktalarının kaynaklar, temizleme bileşenleri, mevzuata uyum için belirlenen noktalar, kirlilik bulutunun sınırları ile alansal (yatay ve dikey) ilişkileri, (3) İzleme sıklığı, (4) Hedeflenen analitik parametreler, (5) Numune alma ve analiz protokollerini kapsamaktadır.

İzlemenin sadece, bir dizi analizle sınırlı kalmaması; seçilen temizleme teknolojisi/lerine uygun olarak tasarlanmış; temizleme sürecinin gelişimini takip eden ve güncellemelere açık, doğru noktalarda yeterli sayıda izleme noktasından, yeterli aralıklarda/sıklıkta, doğru şekilde numune alınıp, gösterge niteliği taşıyan parametrelerin doğru analiz edildiği bir sistem olması gerekmektedir.

Yukarıda açıklanan kriterlerden de anlaşılabileceği gibi, izleme süreci pek çok farklı bileşeni bir arada bulunduran, dikkatle tasarlanması, uygulanması ve takip edilmesi gereken bir süreçtir. Tüm bu unsurların bir arada bulunamadığı durumlarda, izleme çalışmaları da etkin bir fayda sağlamamış olur. İzleme konusunda sahaya ve kirlilik şekillerine özgü dikkat edilmesi gereken pek çok husus vardır. Literatürden elde edilebilecek saha çalışması örneklerinin bu kapsamda incelenmesi, olası karşılaşılabilecek durumları anlamak için faydalı olacaktır [32].

5.3. Temizleme Sonrası İzleme

Temizleme sonrası izleme (diğer adıyla uzun dönem izleme), temizleme işleminin uygulanmasından sonra başlar ve temizleme hedefi sağlanana kadar devam eder. Burada, elde edilen periyodik ölçüm sonuçlarının temizleme hedefi ile kıyaslanması sonucunda belirlenen temizleme hedeflerine ulaşıldığının kanıtlanması gerekir. Temizleme sürecindeki izlemeye benzer şekilde, temizleme sonrasında da uygulanan temizleme tekniğine bağlı olarak performans izleme ve etkinlik izleme olarak iki yöntem mevcuttur. Performans izleme, temizlemenin yeraltında bölge bölge istenen temizleme hedefine ulaşıp ulaşmadığını takip etmeyi hedeflerken, etkinlik izleme ise tüm sistemin alıcı ortam ve reseptörler dâhil olmak üzere hedeflenen temizlik derecesine ulaşıp ulaşmadığını belirlemektedir. Etkinlik izleme kapsamında alıcı ortamdan ve reseptörlerden de numune alınması (balık dokuları, bentik organizmalar vb.) izleme programı dâhilindedir. Yukarıdaki bölümde performans izleme detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Bu bölümde ise etkinlik izlemesinin önemli unsurları ve uygulama örnekleri açıklanmaktadır.

İzleme gerçekleştirilirken, kirlenmiş sahanın etkileşim içerisinde olduğu tüm çevresel ortamlar ve canlılar gözetilerek izleme planları oluşturulur. Yerüstü flora/fauna, yeraltı suyunun beslediği yüzey suyu kaynakları, yüzey suyu kaynaklarında yaşayan flora/fauna, yeraltı veya yüzey suyunun içme suyu amacıyla kullanılması sözkonusu ise insan, uzun dönem izleme faaliyetlerinin takip noktalarıdır. Tablo 5.8 ve Tablo 5.9'de iki farklı temizleme teknolojisi için önerilen izleme parametreleri ve numune alma aralıkları gösterilmiştir [33].

Tablo 5.8 Aerobik Biyoremediasyon İzleme Parametreleri ve Örnekleme Aralıkları

Parametre	Numune Alma Sıklığı			Amaç
	Başlangıç (7-10 gün)	Temizleme Esnası/ Uzun Dönem İzleme Aşaması		
	Günlük	Haftalık - Aylık	3 Ayda bir – Yılda bir	
Yeraltı Suyu				
Çözünmüş Oksijen	X	X		Temizleme alanındaki oksijen dağıtım etkinliğini ve aerobik şartları sürdürme kabiliyetini belirlemek Sistem performansını iyileştirmek için veri sağlar
Redox Potansiyeli	X	X		Sistemin yüzeyaltı aerobik şartlarını geliştirme kabiliyetini gösterir
pH	X	X		pH'ın mikrobiyal biyoremediasyon için uygunluğunu, stabilitesini tespit eder ve risk teşkil edebilecek durumları gösterir
H_2O_2 / Ozon	X	X		Sisteme oksijen sağlayan bu kaynakların yok olmadan önce temizleme sisteminde ne kadar mesafe kat edebildiğini tespit eder
Biyo-nutrient			X	Yeraltı suyuna enjekte edilen biyonütrientlerin biyoremediasyon esnasında yok olup olmadığı, birikme durumu, ve yeraltı suyu kalitesini düşürüp düşürmediğini belirler
Hedef Kirleticiler (Petroleum COCs)			X	Temizleme durumunun gelişimini gösterir

Tablo 5.9 Kimyasal Oksidasyon İzleme Parametreleri ve Örnekleme Aralıkları

Parametre	Numune Alma			Amaç
	Başlangıç Aşaması (7-10 gün)	Temizleme/İşlem Sonrası Uzun Dönem İzleme Aşaması		
	Günlük	Haftalık - Aylık	3 Ayda bir – Yılda bir	
Yeraltı Suyu				
Çözünmüş Oksijen	X	X		Eklenen oksitleyicilerin çözünmüş oksijen miktarına etkisini ve aerobik biyobozunmaya katkısını gösterir
Redox Potansiyeli	X	X		Sistemin yüzeyaltı aerobik şartlarını geliştirme kabiliyetini gösterir
pH	X	X		pH'ın Fenton Reaksiyonu için uygunluğunu, stabilitesini tespit eder ve risk teşkil edebilecek durumları gösterir
H_2O_2 / Ozon veya Permanganat	X	X		Sisteme oksijen sağlayan bu kaynakların yok olmadan önce temizleme sisteminde ne kadar mesafe kat edebildiğini tespit eder
Hedef Kirleticiler			X	Temizleme durumunun ilerlemesini gösterir
Bozunma yan ürünleri (örn. TBA)			X	Tamamlanmayan oksitlenme prosesinin bir göstergesi olabilir
Su Tablası Seviye Değişimleri	X	X		Hidrolik şartların (yeraltı suyu akışı) tasarım amacına uygun olup olmadığını tespit eder ve kimyasal oksidasyonun bu şartlara etkisi olup olmadığını belirler.
Toprak Buharı				
Karbon dioksit	X	X		Kimyasal oksidasyon gerçekleşmesini kanıtlar
Oksijen	X	X		Sisteme verilen oksijenin doymamış bölgedeki kayıp potansiyelini gösterir
Uçucu Petrol Kirleticileri	X	X		Topraktaki kalıntı kaynakları veya temizleme çalışmasına bağlı olarak kaçak emisyonları tespit eder
Kaçak Ozon veya Hidroken Peroksit	X	X		Yüzey altına verilen oksijen oluşturan reaktiflerin kayıplarını belirler
Toprak				
Petrol Kaynaklı Kedef Kirleticiler			X	Temizleme gelişimi ölçüsünü, kirletici kütle azaltımını ve adsorplanan kirleticilerin kimyasal oksidasyon sınırını belirtir,

Yukarıdaki tablolarda uzun süreli izleme ile prosesin başlangıç aşamasındaki izlemede takip edilen parametreler ve izleme amaçlarının farkları görülmektedir. Uzun süreli izleme, teknolojinin işletim parametrelerine odaklanmaz. Genel sistemin çalışması ve temizleme etkinliğini gözeten bir programı takip eder. İzleme çeşitlerinin aralarındaki bir diğer önemli fark da, kısa süreli izleme programlarında, parametrelerin sıklıkla kontrol edilmesi gerektiğidir. Uzun süreli izleme gerçekleştirilirken, genellikle 3 aylık ya da yıllık takip planları oluşturulur. Çoğunlukla, uzun süreli izleme, sahaya gitmek gerekmeksizin, pasif numune alma cihazları ile gerçekleştirilir. Sahaya yerleştirilen pasif örnekleyici, analiz zamanı geldiğinde sahadan alınarak, ilgili parametreler çerçevesinde analiz edilir.

5.4. İzleme Aktivitelerinin Bileşenleri ve Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar

İzleme faaliyetleri, temizleme süreci içerisinde, temizlemeden bağımsız fakat sürecin tamamında gerek planlanan temizleme hedefine ulaşılması, gerek proje maliyetlerinin yönetilmesi gerekse de, temizleme işleminin kirlenmiş saha üzerindeki olumlu/olumsuz etkilerinin belirlenmesi açısından temizleme ile birebir ilişkili faaliyetlerdir. İzleme faaliyetleri, bazen bir temizleme faaliyetinin en yüksek maliyetli kısmını oluşturabilir [2, 31]. Halihazırda kullanılan izleme yaklaşımları noktasal kaynak bazlı yeraltı suyu izleme kuyularından numune alma şeklindedir, oysa bu oldukça düşük verimli, maliyetli ve insan gücü gereksinimi yüksek bir yöntemdir. Bu nedenle temizleme için nasıl güncel teknolojiler takip ediliyor ve zamanla daha verimli/uygun maliyetli sistemlere geçiş yapılıyorsa, izleme çalışmalarının da zamanla iyileştirilebileceği düşünülmelidir. Tüm temizleme çalışmalarında, izleme gereksinimleri önceden tanımlanmış zaman aralıklarında hedeflenenler ve gereklilikler ile ilişkilendirilmelidir. Bu özellikle temizlenmiş sahaların yeniden farklı bir aktivite için kullanılması veya temizleme hedefine ulaşma süresinin net bilinemediği durumlarda önem kazanmaktadır. Bu nedenle izleme programlarının dikkatle planlanması gerekir. Bu planlama izleme hedeflerinin oluşturulması, izleme hedeflerinin yerine getirilmesi için gereken ölçümlerin belirlenmesi, numune alma ve izleme sınırlarının belirlenmesi, hedeflerin yerine getirilmesinde elde edilecek verilerin nasıl kullanılacağının belirlenmesi, belirsizliğin değerlendirilmesi ve izleme programının tasarlanmasını içermektedir [1]. İzleme programının tasarlanması için yedi ana bileşen göz önünde bulundurulmalıdır [4]:

1. *Kirletici ve ilgili diğer parametrelerin belirlenmesi* : Çoğu remediasyon projesinde temel izleme parametreleri, temizlemenin tasarlanması aşamasında belirlenen hedef kirleticiler ve kirlilik bulutunun hareketini, iyileştirme performansını ve kirleticinin akıbetini yansıtan jeokimyasal parametrelerdir. Bu parametreler bioyolojik/abiyotik giderime dair göstergeler veya diğer inorganik göstergeler olabilir. Örneğin organik

hedef kirleticilerin varlığında bazı metaller mobilize olabilir ve bunların ortamdaki varlığı organik kirleticilerin de varlığına işaret edebilir. Hedef kirleticilerin sahanın kullanım geçmişine ve risk değerlendirmesinin sonucunda göre özel olarak seçilmiş olması gerekmektedir. Ayrıca, hedef kirleticilerin ortamdaki konsantrasyonlarının standart analitik yöntemlerde "ölçülebilir" olması önemlidir. Belirli bir hedef kirletici için, ölçülebilir minimum değerin ne olduğu bilinmelidir ve temizleme hedefi koyulurken de hedefin analitik ölçümlerle saptanabilir olmasına dikkat edilmelidir. Tablo 5.10'da izleme sisteminin tasarımında kirleticilerin temel özelliklerine dair sorgulanması gereken hususlar listelenmiştir.

Tablo 5.10 İzlemeye Yönelik Örneklemede Önemli Kirletici Madde Özellikleri

ÖZELLİK	AÇIKLAMA
Suda çözünürlük	Kirleticinin hareketine veya çözünmesine dair gösterge sağlar
Su ile karışmama/ emülsiyon oluşturma	NAPL özelliğindeki kirleticilerin yerinin tespit edilmesi veya örneklenmesi zor olabilir ve yeraltı suyuna çözünmüş fazda kirletici salınımına neden olabilirler. Yerinde temizlemenin izlenmesi esnasında, kirletici derişimi önce azalsa da sonra yükselmesi (sekme etkisi) dikkate alınmalıdır.
Toprakta (kil ve organik madde) soğurulma	Soğurulma, tersinir bir prosestir, pH ve redoks gibi çevresel parametrelerin değişimi sonucunda soğurulma kapasitesinde değişimler meydana gelir. Desorpsiyon sahada "sekme etkisi" ni arttırabilir.
Uçuculuk	İzleme programı gaz fazına geçme yoluyla faz değişimini de gözetmelidir. Uçucu kirleticiler (ör. benzin, vinil klorür) gibi maddelerden oluşabilecek zararları önlemek için kütle dengesi kontrol edilmelidir.
Farklı değerliklerde bulunabilme	Cr^{6+}/Cr^{3+} Örneğinde olduğu gibi, kirleticilerin bir formdan daha zehirli olduğu başka bir forma geçme olasılığı izlenmelidir. Bu geçişler tersinir de olabilir.
Bozunabilme	Temizleme tekniğinin bir sonucu olarak veya doğal süreçler gereği yıkım ürünleri açığa çıkabilir. Yıkım ürünlerinin oluşması, temizleme işleminin başarısına işaret edebilir. Aynı zamanda oluşan ürünlerin tehlikeli/zararlı olmadığının da takip edilmesi gereklidir.

Diğer önemli analitik parametreler ise, yeraltına enjekte edilen maddelerdir (iz bileşikleri, biyolojik besi maddeleri, oksitleyici maddeler vs.) Seçilen temizleme teknolojilerine özel olarak parametreler de izleme için önemli olabilir. Örneğin VOClerin biyoyığın teknolojisi ile temizlenmesi aşamasında toprak özellikleri (mikroorganizma nüfus yoğunluğu, pH, nem miktarı, toprak sıcaklığı, nütriyent derişimleri, toprak türü, amonyak, fosfor), çekilen havanın özellikleri (karbon dioksit, oksijen, metan, hidrojen sülfür, VOCler), temizleme bölgesindeki dış ortam havası (VOCler, partikül madde), biyoyığın altındaki toprak (kirletici derişimi) ve biyoyığının altından geçen yeraltı suyu (kirletici derişimi) özelliklerinin izlenmesi beklenir [5]. Tablo 5.11'de bu parametrelerden bazı örnekler gösterilmiştir.

Tablo 5.11 İzleme Çalışmaları için Önemli Gösterge Parametrelerin Özellikleri

Parametre Niteliği	Örnek Gösterge Parametre	Kullanılan İzleme
Fiziksel	Akış hızı, partikül boyutu, sıcaklık, rüzgar yönü	Temizleme Öncesi İzleme Proses izleme
Kimyasal	Yüzey toprağı/suları, sisteme giriş çıkış yapan su gibi belirli ortamlardaki kimyasalların konsantrasyonları	Temizleme öncesi izleme Performans izleme
Biyolojik	Mevcut organizmaların tipi, sayısı ve çeşitliliği	Temizleme öncesi izleme Performans izleme
Biota	Hedef kirleticilerin yüzey sularındaki bitkilerde, flora/faunadaki konsantrasyonları	Uzun dönem izleme/etkinlik izleme
Biyodeğerlendirme	Biyolojik, kimyasal ve ekolojik etkileri ölçmek için gerçekleştirilen jeokimyasal ve fizikokimyasal testler	Performans izleme

2. *Ne zaman örnekleme yapılacağının belirlenmesi*: Yukarıdaki bölümlerde, farklı temizleme teknolojilerinin uygulamalarıyla ilgili verilen izleme planı örneklerinde de görülebileceği gibi, örnekleme sıklığı: Günlük, haftada bir, iki haftada bir, ayda bir, üç ayda bir, yılda bir gibi periyodik şekilde belirlenebileceği gibi, prosese özel olarak; örneğin kesikli işletilen proseslerde dolum/boşaltımda, veya sistemde elektrik kesintisi gibi beklenmeyen durumlar oluştuktan sonra vb. şekilde de belirlenebilir. Genellikle prosesle ilişkili parametreler günlük/haftalık veya aylık olarak takip edilirken, taşıyıcı ortamla ilgili parametreler günlük/haftalık veya iki haftada bir, alıcı ortam/reseptörlere ilişkin parametreler ve aylık/üç ayda bir veya yılda bir izlenmektedir.

3. *İzleme yapılacak/numune alınacak bölge, tasarım ve medyanın tanımlanması*: İzleme senaryolarının oluşturulmasında sistem bazlı düşünülerek zorlu çevresel koşulların tüm bileşenlerinin dâhil edildiğine emin olunması gerekir. Entegre sistem bazlı izleme; doygun olmayan bölge, yeraltı suyu, yeraltı suyu–yüzey suyu

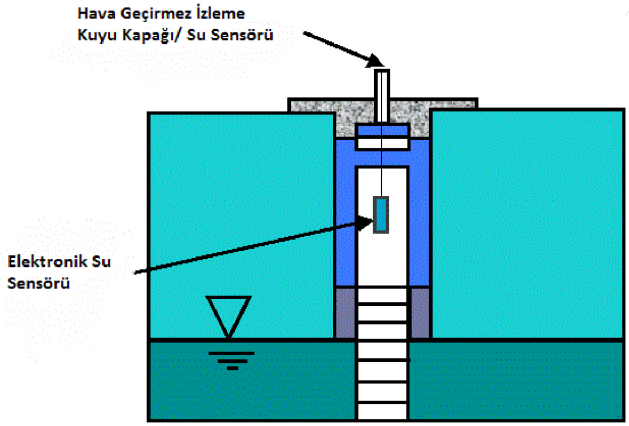
arayüzeyi, yüzey suyu gibi farklı bileşenleri ve potansiyel olarak izlenen sahaya yakın olan diğer kirletici unsurları ve bunların olası etkilerini göstermelidir. İzleme ağı, kirlenmiş sahanın öncesinde (kirliliğin yukarısında) gözlem ve performans izleme kuyularını barındırmalıdır. Ayrıca, yeraltında dinamik bir sistem olduğu gözetilerek, izleme kuyularının görevleri/rolleri çalışma esnasında tekrar gözden geçirilmelidir. İzleme kuyularının görevleri proses esnasında değişebilir, yeni kuyuların açılması gerekli olabilir veya bazı kuyular artık izleme işlevini yitirmiş olabilir.

4. ***İzleme/numune alma işlerinin süre ve sıklığının belirlenmesi:*** İzleme ağının performansı ve yeterliliğini belirlemek için farklı yöntemler bulunmaktadır (istatistiksel analizler, jeostatik yöntemler, coğrafi bilgi sistemleri kullanılarak veri modellemesi). İzleme yapılacak yerin sistemdeki rolu aynı zamanda izleme sıklığınının belirlenmesinde de önemlidir. Örneğin, kaynağın yukarısında ve doğrudan kirletici kaynağında gerçekleştirilen ölçümlerin yeterince sık olmaması sonradan yapılacak değerlendirme çalışması için yeterli veri sağlanamamasına neden olabilir. Kirlilik bulutu ile çakışan kuyularda ise kirliliğin hareketinin gözlemlenmesi ve olası kirletici kaçaklarının belirlenmesi için daha sık ölçüm yapılması gerekli olabilir. Kirleticinin bir gözlem kuyusuna doğru ya da sonlandırma işleminde kirleticinin en son ulaşacağı noktayı temsil eden kuyuya kadar genişlediğinin tespit edilmesi için çok ara vermeksizin ölçümler yapılması önemlidir. Genellikle, sistem performans izlemelerinde, temizleme sisteminin çalıştırmasını takip eden bir buçuk iki yıl boyunca üç ayda bir hedef kirletici ve su seviyesi izleme verileri gerekli olmaktadır. Bu ilk aşama takip edildikten sonra, daha düşük bir izleme frekansı (senede iki kere veya bir kere) uzun süreli izleme hedefleri için uygun veri sağlayabilir.

5. *Numune sayısının belirlenmesi :* Genellikle bir izleme ağında aşağıdaki hususları sağlamak koşuluyla izleme kuyuları tespit edilmelidir:

1. Sahanın geçmişi ve kirliliğin etkisinde olmayan bölgedeki durum
2. Çözünmüş ve NAPL kirlilik bulutlarının dikey ve yatay olarak yayılımı
3. Sahanın potansiyometrik haritalarının (yeraltı su seviyeleri) çıkartılması için kuruluma elverişli noktaların yeraltı suyu seviyeleri
4. Aktif (insan desteği ile işletilen) ve pasif (kurulumdan sonra çalışması için destek gerektirmeyen) temizleme yöntemlerinin performans geri bildirimi
5. Hedeflenen temizleme aşamalarının kat edildiğine dair göstergeler
6. Yeraltı suyu ile yakındaki yüzey suları (örn. yağmur suyu kanalları) arasındaki etkileşim
7. Enjekte edilen ek maddelerin etki yarı çapı
8. Yerinde temizleme sistemlerinin yakalama ve temizleme bölgeleri

6. ***Elde edilecek verinin hedef doğrultusunda kullanılabilecek bir veri olabilmesi için kalite temin/kalite kontrol yöntemlerinin belirlenmesi:*** Standart bir izleme kuyusunun yapısı ve bileşenleri Şekil 5.6'da gösterilmektedir.



Şekil 5.6 Standart Bir İzleme Kuyusundaki Bileşenlerin Gösterimi

Yeraltı suyundan numune alınırken, temizleme alanındaki kuyulardan numune alınmasına, ekstraksiyon kuyuları kullanıldıysa bu noktalardan numune alınmamasın dikkat edilmelidir. Aynı şekilde, oksijen dağıtım kuyularından da numune alınmamalıdır çünkü bu kuyular sistemin sadece bir bölüme yoğunlaşmış özelliklerine dair bilgi sağlayabilir.

Toprak gazından numune alınıyorsa, numuneler doymamış bölgede yer alan izleme kuyularından ve topraz gazı ekstraksiyon kuyularından alınmalıdır. Oksijen dağıtım kuyularından numune alınmamalıdır.

Toprak numuneleri jeoprob kullanılarak temizleme alanının civarından en sondajı açarak alınabilir. Toprak numuneleri daha önceki numunelerle karşılaştırılabilir olması bakımından aynı derinlikte ve mevkideki aynı stratigrafi aralığına sahip yerden alınmalıdır [5] .

Parametre ölçümlerinde, spesifik bir kirleticiyi hedef almayan karbon aralıklarının (ör. toplam petrol hidrokarbonları) veya toplam metallerin (örneğin toplam krom) hedef kirleticilerin (örneğin benzin veya altı değerlikli krom) izlenmesinde genellikle yeterli olmamaktadır. Bazı durumlarda, izleme süresince hedeflenen bir/bir kaç parametre hiç gözlemlenmiyorsa izleme analiz programından çıkartılabilir. Bazı durumlarda ise sistemdeki kimyasalların değişimi sonucunda zehirlilikte meydana gelen değişikliklerin takip edilebilmesi için yeni analiz parametreleri de eklenmesi gerekli olabilir. İzleme maliyetlerini düşürmek için, takip edilmesi hedeflenen durumun göstergesi olacak farklı parametreler (ör. Analiz maliyeti daha düşük veya tespit edilmesi daha kolay) tercih edilebilir. Yalnız, böylesi bir değişiklikte veya izleme sıklığının değiştirilmesinde, ilk tasarım evraklarının gözden geçirilmesi ve izleme planının yeniden oluşturulması gerektiği unutulmamalıdır.

7. Uzun dönem izleme ve bakım gereksinimlerinin belirlenmesi: Temizleme hedefleri ile ilişkilendirme yapıldığında oluşturulacak izleme ve bakım planı aşağıdaki öğeleri içermelidir [4]:

1. İzleme ve bakım faaliyetlerinin kapsam ve içeriği, temizleme hedefleri ve henüz gerçekleşmemiş hedefler
2. Yapılacak işin detaylı açıklanması
3. Yapılacak işle ilgili yetki ve sorumlulukların tanımlanması
4. Yapılacak izlemenin yer, sıklık ve süresi
5. Gerçekleştirilecek analizlerin detayları
6. Veri değerlendirme aşamasının kriterleri (izlemenin ne zaman durdurulacağına ilişkin de burada bilgi olmalıdır)
7. İzleme ve bakım faaliyetlerinin değerlendirilmesi için öneriler
8. Kayıt tutma ve raporlama ile ilgili beklentiler
9. Temizleme hedeflerine ulaşılamadığının tespit edilmesi durumunda yapılacak olanlar
10. Öngörülmemiş durumların nasıl ele alınacağına ilişkin karar mekanizması (Örn. Onarım, değiştirme, ilgili taraflarla iletişim gibi)

İzleme faaliyetleri, önceden belirlenmiş olan temizleme hedeflerine ulaşıldığının gösterilmesi ile sonlandırılır.

EKLER

EK-1 TEKNOLOJİ İSİMLERİ SÖZLÜĞÜ

İNGİLİZCE	TÜRKÇE
Absorption/Adsorption	Absorpsiyon/Adsorpsiyon
Advanced Oxidation Process	İleri Oksidasyon Prosesi
Air Sparging	Hava Kabarcıklı Arıtım
Air Stripping	Havalı Sıyırma
Biofiltration	Biyofiltrasyon
Biopiles	Toprak Biyoyığınları
Bioreactors	Biyoreaktör
Bioslurping	Sıvı-Gaz Emişli Arıtım
Bioventing	Biyoventilasyon
Chemical Extraction	Kimyasal Ekstraksiyon
Chemical Oxidation	Kimyasal Oksidasyon
Chemical Reduction /Oxidation	Kimyasal İndirgenme/Yükseltgenme
Constructed Wetlands	Yapay Sulak Alan
Compost	Kompostlama
Deep Well Injection	Derin Kuyu Enjeksiyonu
Dehalogenation	Halojensizleştirme
Directional Wells	Yönlü Kuyular
Dual Phase Extraction	Çift Faz Ekstraksiyonu
Electrokinetic Separation	Elektrokinetik Ayırma
Enhanced Bioremediation	Geliştirilmiş Biyoremediasyon
Excavation, Retrieval and Off-site	Hafriyat, saha dışına taşıma
Fracturing	Çatlaklama
Granulated Activated Carbon	Granül Aktif Karbon
Groundwater Pumping/Pump and Treat	Yeraltı Suyu Pompalama/Pompaj ve Arıtım
High Energy Destruction	Yüksek Enerjili Parçalama
Incineration	Yakma
In-Well Air Stripping	Kuyu İçi Havalı Sıyırma
Ion Exchange	İyon değişimi
Landfarming	Arazide Islah
Landfill Cap	Yüzey Kapatma
Membrane Separation	Membran Filtre
Monitored Natural Attenuation	İzlemeli Doğal Giderim

Open Burn / Open Detonation	Açık yakma/Açık patlatma
Oxidation	Oksidasyon
Passive/Reactive Treatment Walls	Pasif/Reaktif Arıtım Duvarları
Physical Barriers	Fiziksel Arıtım Bariyeri
Phytoremediation	Fitoremediasyon
Precipitation / Coagulation/Flocculation	Yumaklaştırma/Topaklaştırma/Çöktürme
Pyrolysis	Piroliz
Scrubbers	Islak Sıyırıcı
Separation	Ayırma
Slurry Phase Biological Treatment	Siluri (Bulamaç) Faz Biyolojik Arıtma
Solidification/Stabilization	Solidifikasyon/Stabilizasyon
Soil Flushing	Toprak Yıkama (yerinde)
Soil Vapor Extraction	Toprak Gazı Ekstraksiyonu
Soil Washing	Toprak Yıkama (yerinden alınarak)
Sprinkler Irrigation	Yağmurlama Sulama
Thermal Desorption	Isıl Desorpsiyon
Thermal Treatment	Isıl Arıtım
Vapor Phase Carbon Adsorption	Gaz Faz Karbon Adsorpsiyonu

EK-2 JENERİK KİRLETİCİLERİN KİRLETİCİ GRUPLARINA GÖRE SINIFLANDIRILMASI*

Jenerik Kirleticiler	CAS No	VOC	HVOC	SVOC	HSVOC	Yakıt	İnorganik	Patlayıcı
Organikler								
Akrilamid	79-06-1			●				
Akrilonitril	107-13-1	●						
Akrolein	107-02-8	●						
Aldrin	309-00-2				●			
Antrasen	120-12-7			●		●		
Asenaften	83-32-9			●		●		
Aseton (2-Propanon)	67-64-1	●						
Atrazin	1912-24-9				●			
Benz(a)antrasen	56-55-3			●		●		
Benzen	71-43-2					●		
Benzidin	92-87-5			●				
Benzo(a)piren	50-32-8			●		●		
Benzo(b)floranten	205-99-2			●		●		
Benzo(k)floranten	207-08-9			●		●		
Benzoik asit	65-85-0			●				
Bis(2-etilhekzil)fitalat	117-81-7			●				
Bis(2-kloroetil)eter	111-44-4				●			
Bis(2-kloroetoksi)metan	111-91-1				●			
Bis(klorometil)eter	542-88-1				●			
Bromodiklorometan	75-27-4		●					
Bromoform	75-25-2		●					
Butanol	71-36-3	●						
Butil benzil fitalat	85-68-7			●				
DDD	72-54-8				●			
DDE	72-55-9				●			
DDT	50-29-3				●			
Dibenz(a,h)antrasen	53-70-3					●		
1,2-Diklorobenzen	95-50-1				●			
1,4-Diklorobenzen	106-46-7				●			
3,3'-Diklorobenzidin	91-94-1				●			
1,1-Dikloroetan	75-34-3		●					
1,2-Dikloroetan	107-06-2		●					
1,1-Dikloroetilen	75-35-4		●					
1,2-cis-Dikloroetilen	156-59-2		●					
1,2-trans-Dikloroetilen	156-60-5		●					
2,4-Diklorofenol	120-83-2				●			
2,4-Diklorofenoksi asetik asit	94-75-7		●		●			
1,2-Dikloropropan	78-87-5		●					
1,3-Dikloropropen	542-75-6		●					

Jenerik Kirleticiler	CAS No	VOC	HVOC	SVOC	HSVOC	Yakıt	İnorganik	Patlayıcı
Dieldrin	60-57-1				●			
Dietilfitalat	84-66-2			●				
1,2-Difenilhidrazin	122-66-7			●				
2,4-Dimetilfenol	105-67-9					●		
Dimetilfitalat	131-11-3			●				
Di-n-butil fitalat	84-74-2			●				
4,6-Dinitro-o-kresol	534-52-1	●		●				
2,4-Dinitrofenol	51-28-5			●				
2,4-Dinitrotoluen	121-14-2							●
2,6-Dinitrotoluen	606-20-2							●
Di-n-oktil fitalat	117-84-0			●				
Endosülfan	115-29-7				●			
Endrin	72-20-8				●			
Etilbenzen	100-41-4					●		
Fenol	108-95-2					●		
Floranten	206-44-0					●		
Fluoren	86-73-7			●		●		
Furan	110-00-9	●		●				
α-HCH (α-BHC)	319-84-6				●			
β-HCH (β-BHC)	319-85-7				●			
γ-HCH (Lindan)	58-89-9				●			
Hekzakloro-1,3-bütadien	87-68-3		●		●			
Hekzaklorobenzen	118-74-1				●			
Hekzakloroetan	67-72-1		●					
Hekzaklorosiklopentadien	77-47-4		●		●			
Heptaklor	76-44-8				●			
Heptaklorepoksit	1024-57-3				●			
Hidrokinon	123-31-9			●				
Indeno(1,2,3-cd)piren	193-39-5			●		●		
İzoforon	78-59-1			●				
Karbaril	63-25-2			●				
Karbazol	86-74-8			●				
Karbofuran	1563-66-2			●				
Karbon disülfid	75-15-0	●						
Karbon tetraklorit	56-23-5		●					
Klordan	57-74-9				●			
p-Kloroanilin	106-47-8				●			
Klorobenzen	108-90-7				●			
Klorodibrometan	124-48-1		●					
2-Klorofenol	95-57-8				●			
Kloroform	67-66-3		●					
Klorometan	74-87-3		●					

Jenerik Kirleticiler	CAS No	VOC	HVOC	SVOC	HSVOC	Yakıt	İnorganik	Patlayıcı
beta-Kloronaftalin	91-58-7				●			
m-Kresol	108-39-4					●		
o-Kresol	95-48-7					●		
p-Kresol	106-44-5					●		
Krizen	218-01-9			●		●		
Ksilen, karışım	1330-20-7	●				●		
m-Ksilen	108-38-3					●		
o-Ksilen	95-47-6					●		
Maneb	12427-38-2			●				
MCPA	94-74-6				●			
Metil bromür	74-83-9		●					
Metil tersiyer-bütil eter (MTBE)	1634-04-4	●				●		
Metilen klorür	75-09-2		●					
Metoksiklor	72-43-5				●			
Naftalin	91-20-3			●		●		
Nitrobenzen	98-95-3	●						
2-Nitrofenol	88-75-5			●				
4-Nitrofenol	100-02-7			●				
N-Nitrozodimetilamin	62-75-9			●				
N-Nitrozo-di-N-propilamin	621-64-7			●				
N-Nitrozodifenilamin	86-30-6			●				
PCB	1336-36-3				●			
Pentaklorobenzen	608-93-5				●			
Pentaklorofenol	87-86-5				●			
Piren	129-00-0			●		●		
Piridin	110-86-1					●		
Siklohekzanon	108-94-1	●						
Stiren	100-42-5	●						
1,2,4,5-Tetraklorobenzen	95-94-3				●			
2,3,7,8-Tetraklorodibenzo-p-Dioksin	1746-01-6				●			
1,1,2,2-Tetrakloroetan	79-34-5		●					
Tetrakloroetilen	127-18-4		●					
Tetraetil kurşun	78-00-2	●				●		
Toksafen	8001-35-2				●			
Toluen	108-88-3					●		
Toplam Petrol Hidrokarbonları (Alifatik) (EC5 - EC8)	0-01-0					●		
Toplam Petrol Hidrokarbonları (Alifatik) (EC8> - EC16)	0-01-1					●		
Toplam Petrol Hidrokarbonları (Alifatik) (EC16> - EC35)	0-00-9					●		

Jenerik Kirleticiler	CAS No	VOC	HVOC	SVOC	HSVOC	Yakıt	İnorganik	Patlayıcı
Toplam Petrol Hidrokarbonları (Aromatik) (EC5 - EC9)	0-01-3					●		
Toplam Petrol Hidrokarbonları (Aromatik) (EC9> - EC16)	0-01-4					●		
Toplam Petrol Hidrokarbonları (Aromatik) (EC16> - EC35)	0-01-2					●		
Tributiltin oksit	56-35-9			●				
Triklorobenzen	120-82-1				●			
1,1,1-Trikloroetan	71-55-6		●					
1,1,2-Trikloroetan	79-00-5		●					
Trikloroetilen	79-01-6		●					
2,4,5-Triklorofenol	95-95-4				●			
2,4,6-Triklorofenol	88-06-2				●			
Vinil asetat	108-05-4	●						
Vinil klorür (kloroetilen)	75-01-4		●					
İnorganikler								
Antimon	7440-36-0						●	
Arsenik	7440-38-2						●	
Bakır	7440-50-8						●	
Baryum	7440-39-3						●	
Berilyum	7440-41-7						●	
Civa	7439-97-6						●	
Çinko	7440-66-6						●	
Gümüş	7440-22-4						●	
Kadmiyum	7440-43-9						●	
Kalay	7440-31-5						●	
Kobalt	7440-48-4						●	
Krom (III)	16065-83-1						●	
Krom (VI)	18540-29-9						●	
Krom (toplam)	7440-47-3						●	
Kurşun	7439-92-1						●	
Molibden	7439-98-7						●	
Nikel	7440-02-0						●	
Selenyum	7782-49-2						●	
Talyum	7440-28-0						●	
Titanyum	7440-32-6						●	
Vanadyum	7440-62-2						●	
Siyanür	57-12-5						●	
Tiyosiyanat	463-56-9						●	

(*) Bu tablonun oluşturulmasında kaynak [2]'den yararlanılmıştır.

EK-3 TEMİZLEME TEKNOLOJİLERİ MATRİSİ*

TEKNOLOJİ KARŞILAŞTIRMA MATRİSİ																
			Kirletici Sınıfları							Kriterler						
	Yerinde (I) / Yerinden Alınarak (E)	Ortam (T-toprak Y-yeraltı suyu)	VOC	HVOC	SVOC	HSVOC	Yakıt	İnorganik	Patlayıcı	Tek Başına Uygulanabilirlik	Bakım Sıklığı	Güvenilirlik ve Takip	Yatırım Maliyeti	Genel Maliyet	Zaman	
4.1. Biyolojik																
Kompost	E	T	◖	◖	◖		●		●	●	●	●	●	●	◖	
Toprak Biyoyığınları	E	T	●	●	◖		●			●	●	●	●	●	◖	
Arazide Islah	E	T	◖	◖	●	◖	●			●	●	●	●	●	◖	
Siluri Faz Biyolojik Arıtım	E	T	◖	●	●		●		●	○	○	◖	○	◖	◖	
Biyoventilasyon	I	T	●		●		●			●	●	●	●	●	◖	
Fitoremediasyon	I	T	◖	◖	◖		◖	◖		●	●	○	●	●	○	
Fitoremediasyon	I	Y	◖	◖	◖	◖	◖			●	●	○	●	●	○	
Geliştirilmiş Biyoremediasyon	I	T	●	●	●		●		●	●	○	◖	◖	●	◖	
Geliştirilmiş Biyoremediasyon	I	Y	●		●		●		◖	●	○	◖	◖	●	◇	
İzlemeli Doğal Giderim	I	Y	●	◖	◖	◖	●			●	○	◖	◖	●	◇	
Biyoreaktör	E	Y	●	●	●		●		●	●	◖	◖	○	●	◖	
Yapay Sulak Alan	E	Y	◖	◖	◖		◖	●	●	●	◖	◇	○	◖	◇	
4.2. Fiziksel/Kimyasal																
Yeraltı Suyu Pompalama	E	Y	◖	◖	◖		◖	◖	◖	◖	○	●	○	○	○	
Yağmurlama Sulama	E	Y	●	●						●	●	●	●	○	○	
Ayırma	E	Y	●	●	●	●	●			◖	○	●	○	○	●	
Kimyasal Ekstraksiyon	E	T	◖	◖	●	●	◖	●		○	○	◖	○	◖	◖	
Halojensizleştirme	E	T		●		●			◖	◖	○	○	○	○	◖	
Kimyasal İndirgenme/Yükseltgenme	E	T	◖	◖	◖	◖	◖	●	◖	◖	◖	●	○	◖	●	
İleri Oksidasyon	E	Y	●	●	●	●	●		●	◖	○	◖	○	◖	○	
İyon değişimi	E	Y						●		◖	○	●	○	◖	○	
Yumaklaştırma/Topaklaştırma/Çöktürme	E	Y						●		◖	◖	●	○	◖	○	
Adsorpsiyon/Absorpsiyon	E	Y	◖	◖	◖	◖		●		●	○	◖	◖	○	○	
Granül Aktif Karbon	E	Y	●	●	●	●	●			◖	○	●	◖	◖	○	
Toprak Yıkama	I	T	●	●	◖	◖	◖	●		●	○	◖	◖	◖	◖	
Toprak Yıkama	E	T	◖	◖	◖	◖	◖	◖		○	○	●	○	◖	●	
Solidifikasyon/Stabilizasyon	I/E	T			◖	◖		●		●	◖	●	○	●	●	
Toprak Gazı Ekstraksiyonu	I	T	●	●			●			○	○	●	◖	●	◖	
Hava Kabarcıklı Arıtım	I	Y	●	◖	◖	◖	●			●	●	●	●	●	●	
Sıvı-Gaz Emişli Arıtım	I	Y	◖	◖	●	●	●	◖		◖	●	◖	●	●	◖	
Çift Faz Ekstraksiyonu	I	Y	●	●	●	●	●			○	○	◖	○	◖	◖	
Havalı Sıyırma	E	Y	●	●						◖	○	●	◖	●	○	
Kuyu içi Havalı Sıyırma	I	Y	◖	◖	◖		◖			◖	◖	◖	○	◖	○	
Kimyasal Oksidasyon	I	T/Y	◖	◖		◖			◖	●	○	◖	◖	◖	●	
Elektrokinetik Ayırma	I	T	◖	◖	◖	◖		●		○	○	◖	◖	○	◖	
Isıl Arıtım	I	Y	◖	●	●	●	●			○	○	◖	○	◖	●	
Pasif/Reaktif Arıtma Bariyerleri	I	Y	●	●	●	●	◖		●	●	◖	●	○	◖	○	
Fiziksel Bariyerler	I	Y	●	●	●	●	●	●	●	●	◖	●	○	●	○	
Yönlü Kuyular	I	Y	◖	◖	◖	◖	◖	◖	◖	●	◖	◖	○	◖	◖	
Hafriyat, saha dışına taşıma	E	T	◖	◖	◖	◖	◖	◖	◖	●	●	●	●	◇	●	
Yüzey Kapatma	I	T	◖	◖	◖	◖	◖	◖	◖	●	◖	●	○	●	○	
Çatlaklama	I	T	◖	◖	◖	◖	◖			◖	◖	◖	○	◖	◖	

			Kirletici Sınıfları							Kriterler					
	Yerinde (I) / Yerinden Alınarak (E)	Ortam (T-toprak Y-yeraltı suyu)	VOC	HVOC	SVOC	HSVOC	Yakıt	İnorganik	Patlayıcı	Tek Başına Uygulanabilirlik	Bakım Sıklığı	Güvenilirlik ve Takip	Yatırım Maliyeti	Genel Maliyet	Zaman
4.3. Termal Prosesler															
Yakma	E	T	●	●	●	●	●		●	●	○	◖	○	○	●
Isıl Arıtım	I	T	●	●	●	●	●			○	○	●	○	◖	●
Isıl Desorpsiyon	E	T	●	●	●	●	●		●	●	○	◖	○	◖	●
Piroliz	E	T	◖	◖	●	●	◖			●	○	○	○	○	●
Açık Yakma/Açık Patlatma	E	T							●	●	○	●	○	●	●

Açıklamalar	
Yerinde/Yerinden Alınarak	Teknolojinin yerinde mi yerinden alınarak mı uygulandığını gösterir. E: Yerinden Alınarak I: Yerinde uygulanan
Ortam	Teknolojinin uygulandığı gösteren parametredir. T: Toprakta uygulanan teknoloji Y: Yeraltı suyunda uygulanan teknoloji
Tek Başına Uygulanabilirlik	Teknolojinin tek başına mı uygulandığı yoksa bir arıtma sisteminin parçası olarak diğer sistemlerle birlikte mi kullanılması gerektiği
Bakım Sıklığı	Teknolojinin işletilmesinde ne kadar sıklıkla bakıma ihtiyaç duyduğuna ilişkin gösterge
Güvenilirlik ve Takip Etme	Teknolojinin güvenilirliği kanıtlanmış mıdır ve işletme için sürekli olarak bir personelin kontrolüne ihtiyaç duyulur mu?
Yatırım Maliyeti	Teknolojinin ilk yatırım maliyetini belirtir
Genel Maliyet	Listelenen teknolojilerin tasarım, kurulum, işletme ve bakım ihtiyaçlarının maliyetlerinin birbirlerine göre kıyaslanması
Zaman	Teknoloji ile "standart" bir sahanın temizlenmesinin alacağı yaklaşık süre
Kirletici Sınıfları	VOC; HVOC; HSVOC; SVOC; İnorganikler, Yakıtlar ve Patlayıcılar altında sınıflandırılan kirleticileri ifade etmektedir

		Ortalama Üstü ●	Ortalama ◖	Ortalama Altı ○	Diğer ◇
Tek Başına Uygulanabilirlik		Kendi başına uygulanabilir veya tek bir tek teknolojiyle uygulanır, karmaşık olmayan teknoloji	İki-üç aşamalı arıtma sistemleri ile basitçe uygulanabilir, yaygın teknoloji	Karmaşık şekilde, farklı temizleme teknolojileriyle birlikte kullanılabilir	Bu konudaki etkinlik, kirletici türüne, kirliliğin dağılımına ve tasarıma bağlı olarak değişim gösterir
Bakım Sıklığı		Nadir bakım ihtiyacı	Ortalama bakım ihtiyacı	Sık bakım ihtiyacı	
Güvenilirlik ve Takip Etme		Kanıtlanmış güvenilirliği olan ve düşük takip etme gerektiren sistem	Orta derecede güvenilirliği olan ve orta derecede takip etme gerektiren sistem	Güvenilirliği düşük olan ve sürekli takip edilmesi gerekli olan sistem	
Yatırım Maliyeti		Düşük ana yatırım maliyeti	Ortalama ana yatırım maliyeti	Yüksek ana yatırım maliyeti	
Genel Maliyet		Diğer alternatiflere kıyasla düşük genel maliyet	Diğer alternatiflere kıyasla ortalama genel maliyet	Diğer alternatiflere kıyasla yüksek genel maliyet	
Zaman	Yerinde Toprak Temizleme	1 Yıldan az	1 - 3 Yıl	3 Yıldan fazla	
	Yerinden Alınarak Toprak Temizleme	6 Aydan az	6 Ay - 1 Yıl	1 Yıldan fazla	
	Yeraltı Suyu Temizleme	3 Yıldan az	3 - 10 Yıl	10 Yıldan fazla	
Kirletici Sınıfları		Tam veya pilot ölçekte başarıyla yapılabilir, kanıtlanmış Tam veya pilot ölçekte başarıyla yapılabilir, kanıtlanmış	Pilot veya tam ölçekte başarısı sınırlı olarak kanıtlanmış	-	

(*) Bu tablonun oluşturulmasında kaynak [2] temel alınmıştır

KAYNAKLAR

1. UNIDO. (2014) . Survey of Soil Remediation Technology
2. US Federal Remediation Technologies Roundtable, Rem. Technologies Screening Matrix and Reference Guide, web site (https://frtr.gov/matrix2/top_page.html) Erişim Tarihi: Şubat, 23 2016.
3. USEPA, 2013, 14th Superfund Remedy Report, Rapor Numarası: 542-R-13-016
4. UK Environmental Agency. (2010). Verification of remediation of land contamination, ISBN 978-1-84911-175-1
5. USEPA. (2004) A Guide for Corrective Action Plan Reviewers How to Evaluate Alternative Cleanup Tech. for Underground Storage Tanks, EPA 510-R-04-002
6. USEPA. (2012). A Citizen's Guide to Phytoremediation, EPA 542-F-12-016
7. USEPA. (2012)., A Citizen's Guide to Bioremediation, EPA 542-F-12-003
8. Loretta Li, Remediation Treatment Technologies: Reference Guide For Developing Countries Facing Persistent Organic Pollutants, University of British Columbia
9. UNEP Secretariat of the Basel Convention. (2002). Destruction and Decontamination Technologies for PCBs and other POPs Wastes Under The Basel Convention: Volume A, ISSN: 1020-8364
10. USEPA. (2012). A Citizen's Guide to Monitored Natural Attenuation, EPA 542-F-12-014
11. USEPA. (2012). A Citizen's Guide to Pump and Treat, EPA 542-F-12-017
12. Zinoviev, S., Fornasiero, P., Lodolo, A., Miertus, S.(2007) Non-combustion Technologies for POPs Destruction: Review and Evaluation,
13. USEPA. (2012). A Citizen's Guide to Activated Carbon Treatment, EPA 542-F-12-001
14. USEPA. (2012). A Citizen's Guide to Solidification Stabilisation, EPA 542-F-12-019
15. USEPA. (2012). A Citizen's Guide to SVE and Air Sparging, EPA 542-F-12-018
16. US Department of Defence.(2004). Cost and Performance Report ESTCP
17. Miller, R. (1996) Bioslurping Technology Overview Report, GWRTAC, O series TO-96-05
18. USEPA. (2012). A Citizen's Guide to Air Stripping, EPA 542-F-12-002
19. USEPA. (2012). A Citizen's Guide to In Situ Chemical Oxidation, EPA 542-F-12-0011
20. USEPA. (2012). A Citizen's Guide to In Situ Thermal Treatment, EPA 542-F-12-O13

21. USEPA. (2012). A Citizen's Guide to Permeable Reactive Barriers, EPA 542-F-12-015
22. USEPA. (2012). A Citizen's Guide to Excavation of Contaminated Soil, EPA 542-F-12-007
23. USEPA. (2012). A Citizen's Guide to Capping, EPA 542-F-12-004
24. UNIDO, Persistent Organic Pollutants: Contaminated Site Investigation and Management Toolkit
25. USEPA. (2012). A Citizen's Guide to Fracturing for Site Cleanup, EPA 542-F 12-008
26. USEPA. (2012). A Citizen's Guide to Incineration, EPA 542-F-12-010
27. USEPA. (2012). A Citizens Guide, In Situ Thermal Treatment, EPA-542-F-12-013
28. USEPA. (2012). A Citizen's Guide to Thermal Desorption, EPA 542-F-12-020
29. USEPA. (1996). Presumptive Response Strategy and Ex-Situ Treatment Technologies for Contaminated Ground Water at CERCLA Sites. Final Guidance, Belge Numarası. EPA-540-R-96-023
30. ITRC. (2014). Contaminated Sediments Remediation: Remedy Selection for Contaminated Sediments, web site (http://www.itrcweb.org/contseds_remedy-selection/Content/7Monitoring.htm) Erişim Tarihi: 1 Mart 2016
31. Toprak Kirliliğinin Kontrolü ve Noktasal Kaynaklı Kirlenmiş Sahalara Dair Yönetmelik, Resmi Gazete Tarihi: 08.06.2010 Resmi Gazete Sayısı: 27605
32. ITRC , 2004, Remediation Process Optimization:Identifying Opportunities for Enhanced and More Efficient Site Remediation
33. New Jersey Department of Environmental Protection. (2012). Monitored Natural Attenuation Technical Guidance Ver. 1.0
34. URL[1] http://www.fao.org/docrep/007/y5104e/y5104e07.htm , adresinden 02.02.2016 tarihinde alınmıştır.
35. URL[2] http://www.oil-gasportal.com/remediation-of-hydrocarbon-contaminated-soils, adresinden 05.03.2016 tarihinde alınmıştır.
36. URL[3]http://www.biocyclopedia.com/index/biotechnology/biotechnology_and_environment/environmental_biotechnology/biotech_eb_exsitu_bioremediation.php#bb , adresinden 14.03.2016 tarihinde alınmıştır.
37. Dadrasnia, A., Emekine, C.U., Shahsavari, N. (, 2013). Remediation of Contaminated Sites, DOI: 10.5772/5191
38. URL[4] http://toxics.usgs.gov/pubs/eos-v82-n5-2001-natural/ adresinden 05.03.2016 tarihinde alınmıştır.
39. URL[5] http://infohouse.p2ric.org/ref/07/06188/; adresinden 25.02.2016 tarihinde alınmıştır.
40. URL[6]http://www.navfac.navy.mil/navfac_worldwide/specialty_centers/exwc/products_and_services/ev/erb/tech/rem/soilmix-insitu.html, adresinden 25.02.2016 tarihinde alınmıştır.

41. URL[7] http://www.globalspec.com/reference/9391/349867/use-air-sparging-and-vapor-extraction-to-remediate-subsurface-organics, adresinden 05.03.2016 tarihinde alınmıştır.

42. URL [8] http://www.bmpcoe.org/bestpractices/internal/rmsc/grf_rmsc_06.html

43. US Department of Energy. (2002). In-Well Vapor Stripping Technology, DOE/EM-0626

44. URL [9] http://www.globalspec.com/learnmore/manufacturing_process_equipment/air_quality/scrubbers , adresinden 05.03.2016 tarihinde alınmıştır.

45. Bunn, A., Wellman, D. (2011). Scientific Opportunities for Monitoring of Environmental Remediation Sites, Environmental Management section of U.S. Department of Energy

46. Space and Naval Warfare Systems Center Pacific and ENVIRON International Corporation. (2010). Long-Term Monitoring Strategies For Contaminated Sediment Management, Final Guidance Document

47. USEPA. (1996).User Guide to the VOCs in Soils. Presumptive Remedy, Belge Numarası: EPA-540-F-96-008.

48. USEPA. (1995).Presumptive Remedy for Soils, Sediments, and Sludges at Wood Treater Sites, Belge Numarası: No. EPA-540-R-95-128.

TABLOLARIN KAYNAKLARI

	Tablo Adı	Kaynak
2.1	Teknoloji Gruplarının Uygulanmasında Avantajlar ve Kısıtlamalar	Uyarlamadır
2.2	Toprak Kirliliğinin Temizlenmesinde Etkili Temel Parametreler	[2]
2.3	Yeraltı Suyu Kirliliğinin Temizlenmesinde Etkili Temel Parametreler	[2]
2.4	Halojenli/Halojensiz VOC ve SVOC'lerin Fazlara Göre Dağılımı	[2]
3.1	Toprak Tiplerinin Sınıflandırması	[1]
3.2	Kirlilik Derinliği Sınıflandırması	[1]
3.3	Temizleme Süresi Sınıflandırması*	[1]
4.1	Alternatif Sorbent Maddeler ve Soğurdukları Bileşikler	[2]
4.2	Farklı Yıkama Sıvılarının Etkilediği Kirleticiler	[2]
4.3	PRB İle Kirletici Giderim Mekanizmaları	[21]
4.4	Kirlenmiş Topraklar İçin Kirletici Gruplarına Göre Yaygın Olarak Kullanılan Temizleme Teknolojileri	[29, 47, 48]
4.5	Kirlenmiş Yeraltı Suyu İçin Kirletici Gruplarına Göre Yaygın Olarak Kullanılan Temizleme Teknolojileri	[29, 47, 48]
5.1	İzleme Faaliyetlerinin Amacı	[45]
5.2	Yerinde Yeraltı Suyu Biyoremediasyonu Örnek İzleme Planı	[5]
5.3	Biyoventilasyon Sistemi İzleme Önerileri	[5]
5.4	Çift Faz Ekstraksiyonu Örnek İzleme Planı	[5]
5.5	Toprak Buhar Ektraksiyonu İzleme Önerileri	[5]
5.6	Düşük Sıcaklıkta Isıl Desorpsiyon Temizleme Programı Örnek İzleme Planı	[5]
5.7	Biyoyığın/Arazide Islah Prosesleri Remediasyon Programı İzleme Planı Örneği	[5]
5.8	Geliştirilmiş Aerobik Biyoremediasyon İzleme Parametreleri Ve Numune Alma Aralıkları	[5]
5.9	Kimyasal Oksidasyon Performans İzleme Parametreleri & Örnekleme Aralıkları	[5]
5.10	İzlemeye Yönelik Numune Alımında Önemli Olan Kirletici Madde Özellikleri	[4]
5.11	İzleme Çalışmalarında Dikkate Alınan Gösterge Parametreler Ve Özellikleri	[4]

GÖRSELLERİN KAYNAKLARI

	Şekil Adı	Kaynak
2.1	Toprak Temizlemesinde Yaygın Olarak Kullanılan Teknolojiler	[29, 47, 48]
2.2	Yeraltı Suyu Temizlemesinde Yaygın Olarak Kullanılan Teknolojiler	[29, 47, 48]
2.3	VOC Kirliliğinin Temizlenmesine Kullanılan Teknolojiler	[2]
2.4	SVOC Kirliliğinin Temizlenmesinde Kullanılan Teknolojiler	[2]
2.5	HVOC Kirliğinin Temizlenmesine Kullanılan Teknolojiler	[2]
2.6	HSVOC Kirliliğinin Temizlenmesinde Kullanılan Teknolojiler	[2]
2.7	Yakıt Kirliliğinin Temizlenmesinde Kullanılan Teknolojiler	[2]
2.8	İnorganik Kirliliğin Temizlenmesinde Kullanılan Teknolojiler	[2]
2.9	Patlayıcı Kirliliğinin Temizlenmesinde Kullanılan Teknolojiler	[2]
4.1	Kompost İşletmesi Örneği	[34]
4.2	Toprak Biyoyığınları Prosesi Örneği	[35]
4.3	Arazide Islah Yöntemi Kesit Gösterimi	[5]
4.4	Arazide Islah Yöntemi İşletme Örneği	[5]
4.5	Lagün tipi Siluri Faz Biyolojik Arıtım Örneği	[36]
4.6	Tam Karıştırmalı Tank Reaktör tipi Siluri Faz Biyolojik Arıtım Örneği	[36]
4.7	Biyoventilasyon Proses Şeması	[2]
4.8	Fitoremediasyon mekanizmaları	[37]
4.9	Biyoremediasyon Çalışma Prensibi	[7]
4.10	İzlemeli Doğal Giderim Mekanizmalarının Temsili Gösterimi	[38]
4.11	İzleme Kuyusu Ağı İle Kirletici Dağılımının Durumuna Genel Bir Örnek	[33]
4.12	Döner Biyodisk tipi Biyoreaktör Prosesi Genel Arıtım Şeması	[2]
4.13	Yapay Sulak Alan Temsili Gösterimi	[2]
4.14	Su Tablasının Baskılanması ile Pompala-Arıt Tekniği	[11]
4.15	Pompalama ve Arıtma Tekniği ile Serbest Ürün Geri Kazanımı	[2]
4.16	Yağmurlama Sulama Yönteminin Arıtma Sistemine Entegrasyonuna Örnek	[2]
4.17	Yeraltı Suyunun Filtrasyon ile Ayrılması Şematik Gösterim	[2]
4.18	Kimyasal Ekstraksiyon Prosesi Akım Şeması	[2]
4.19	Halojensizleştirme Prosesi Şematik Gösterim	[2]
4.20	Kimyasal İndirgenme/Yükseltgenme Prosesi Şematik Gösterim	[2]
4.21	İleri Oksidasyon Prosesi Şematik Gösterim	[2]
4.22	İyon Değişimi Prosesi Şematik Gösterimi	[2]
4.23	Koagülasyon/Flokülasyon ve Çöktürme Prosesi Gösterimi	[2]
4.24	Absorpsiyon Ve Adsorpsiyon Prensipleri	Uyarlamadır
4.25	Sabit Yataklı Aktif Karbon İle Arıtma Sistemi Örneği	[2]
4.26	Yerinde Toprak Yıkama Şematik Gösterim	[39]
4.27	Yerinden Alınarak Toprak Yıkama Şematik Gösterim	[39]
4.28	Yerinden Alınarak Solidifikasyon Prosesi Akış Şeması	[2]
4.29	Auger Metodu ile Solidifikasyon/Stabilizasyon Uygulanması	[40]
4.30	Yerinde Vitrifikasyon Prosesi Bileşenleri	[2]
4.31	Toprak Gazı Ekstraksiyonu Örnek Gösterim	[35]
4.32	Hava Kabarcıklı Arıtım Uygulaması Örneği	[41]

	Şekil Adı	Kaynak
4.33	Sıvı Gaz Emişli Biyolojik Arıtım Prosesi Örnek Gösterim	[16]
4.34	Çift Faz Ekstraksiyonu Çalışma Prensibi	[18]
4.35	Havalı Sıyırma Prosesi Gösterim Şeması	[43]
4.36	Kuyu içi Hava ile Sıyırma Prosesi Gösterim Şeması	[19]
4.37	Kimyasal Oksidasyon yöntemi ile Yeraltı Suyu Temizleme Gösterimi	[2]
4.38	Elektrokinetik Ayırma İşlemi Çalışma Prensibi	[2]
4.39	Yeraltı Suyunda Isıl İşlem Uygulaması Örnek Gösterim	[21]
4.40	Geçirgen Reaktif Bariyer Uygulaması Örnek Gösterimi	[2]
4.41	Fiziksel Bariyer Uygulama Örneği	[2]
4.42	Yönlü Kuyular Prosesi Örnek Uygulama Gösterimi	[2]
4.43	Yüzey Kaplama İşlemi Örnek Gösterimi	[2]
4.44	Yüzey Kaplamanın Su Toplama ile Geliştirilmesi	[2]
4.45	Örnek Çatlaklama Uygulaması Gösterimi	[25]
4.46	Yakma Prosesi Örnek İşletme Şeması	[26]
4.47	Toprakta Isıl İşlem Uygulaması Örnek Gösterim	[2]
4.48	Toprakta Elektrik Dirençli Isıl İşlem Uygulaması	[27]
4.49	Piroliz Prosesi Akım Şeması	[2]
4.50	Biyofiltrasyon Prosesi	[2]
4.51	Oksidasyon Prosesi	[2]
4.52	Buhar Faz Karbon Adsorpsiyonu	[2]
4.53	Islak Yıkayıcı Sistemi	[44]
4.54	Halojen içeren veya içermeyen VOC'lerle Kirlenmiş Topraklarda Uygulanabilecek Örnek Temizleme Süreci.	[2]
4.55	Halojenli Yarı Uçucu VOC'lerle Kirlenmiş Topraklarda Uygulanabilecek Örnek Temizleme Süreci	[2]
4.56	Yakıtlarla Kirlenmiş Topraklarda Uygulanabilecek Örnek Temizleme Süreci	[2]
4.57	Halojen İçeren VOC'lerle Kirlenmiş Yeraltı Sularında Uygulanabilecek Örnek Temizleme Süreci	[2]
5.1	Temizleme Sürecinde ve Sonrası İzleme Aktivitelerini Gösteren Örnek Zaman Çizelgesi	[46]
5.2	İzleme Aşamalarının Kapsamı	[45]
5.3	İzleme Kapsamındaki Bileşenlerin Gösterimi	[45]
5.4	Temizleme/İyileştirme Faaliyetlerinde İş Gücü/Maliyet ve Zaman Grafiği	[32]
5.5	İzleme Geri Bildirimi kullanılarak Sistem Optimizasyonu Yaklaşımı	[32]
5.6	Standart bir İzleme Kuyusundaki Bileşenlerin Gösterimi	[2]



