

- Versari, A., Parpinello, G.P. ve Galassi, S., 2002. Chemometric survey of italian bottled mineral waters by means of their labelled physico-chemical and chemical composition. *Journal of Food Composition and Analysis*, 15: 251-264.
- Warburton, D., Harrison, B., Crawford, C., Foster, R., Fox, C., Gour, L. ve Krol, P., 1998. A further review of the microbiological quality of bottled water sold in Canada: 1992-1997 survey results. *International Journal of Food Microbiology*, 39: 221-226.
- WHO (World Health Organization), 1996. *Guidelines for Drinking-Water Quality*. 2nd ed. Vol. 2., Health criteria and other supporting information, Geneva, 973 s.
- Yongjian, L. ve Mou, S., 2003. Simultaneous determination of trace level bromate and chlorinated haloacetic acids in bottled drinking water by ion chromatography. *Microchemical Journal*, 75: 79-86.

Petrol Türevleri Tarafından Kirlenmiş Akiferlerde Uygulanan Yerinde İyileştirme Teknolojileri

In-Situ Remediation Technologies Applied for Petroleum Hydrocarbon Contaminated Aquifers

Cüneyt GÜLER, Musa ALPASLAN

Mersin Üniversitesi, Çiftlikköy Kampüsü, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 33343 Mersin

e-posta: cguler@mersin.edu.tr, malpaslan@mersin.edu.tr

ÖZ

Yaşamımız için gerekli olan enerji ihtiyacının büyük bir kısmını karşıladığımız petrol türevlerinin, kaza ve sızıntı gibi nedenlerle oluşturduğu yeraltı suyu kirlilikleri, gerek insan gerekse çevre sağlığı açısından çok ciddi sorunlar doğurmaktadır. Temelde iki ana gruba ayrılan petrol türevlerinden birincisi, suda yüzen ve hafif susuz faz sıvılar olarak adlandırılan bileşenlerdir. İkincisi ise, sudan daha yoğun olan ve ağır susuz faz sıvılar olarak adlandırılan petrol türevleridir. Hafif faz sıvıların oluşturduğu kirlilikler ağır susuz faz sulara göre göreceli olarak daha kolay bir şekilde temizlenebilirken, ağır susuz faz suların temizlenmesi için daha karmaşık temizleme yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir. Akiferin suya doygun ve doygun olmayan zonlarında oluşabilen petrol türevi kirliliklerinin temizlenmesi amacıyla geliştirilen çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bunlar arasında en yaygın olanları; gaz enjeksiyonu, toprak gazı ekstraksiyonu, yönlü kuyular, kuyu içi havalandırma, ikili faz ekstraksiyonu, kimyasal oksidasyon, termal iyileştirme, çatlak geliştirme ve geçirgen reaktif bariyer yöntemleridir. Temizleme işleminin etkin bir şekilde yapılabilmesi için, herhangi bir yöntem uygulanmadan önce yapılacak en önemli şey akifer ve kirliletiçi karakteristiklerinin ve kirliletiçi yayılımının belirlenmesi olmalıdır. Her bir yöntem, kirlenmiş akifer özelliklerine göre belirli avantajlar içerirken, yine akiferin özelliklerine bağlı olarak her birinin belirli dezavantajları da bulunmaktadır. Bundan dolayı, petrol kirliliği gözlenen akiferlerde çoğu zaman tek bir yöntem yerine iki veya daha fazla yöntemin birlikte uygulanması daha etkin bir temizleme sağlamaktadır.

Anahtar kelimeler: Akifer, Kirlilik, Petrol, Vadoz zon.

ABSTRACT

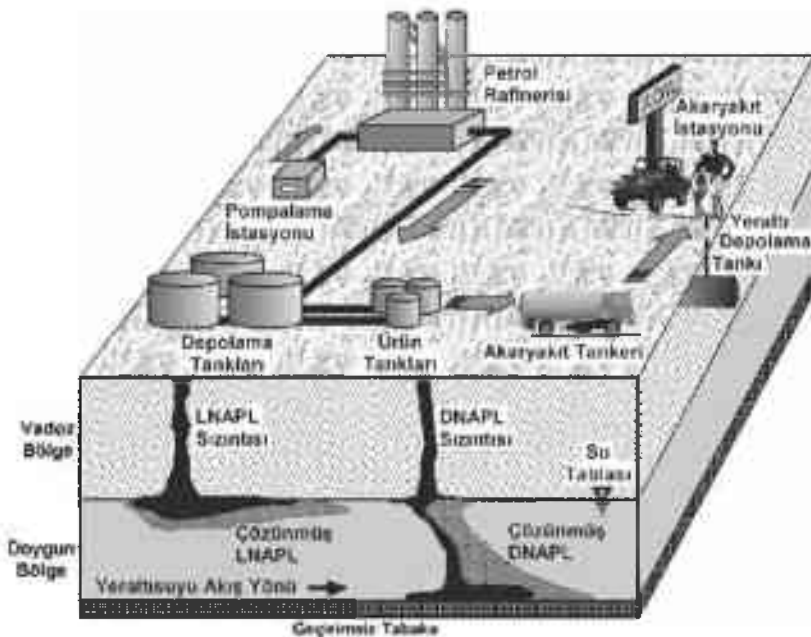
Petroleum hydrocarbons are used to meet a big portion of energy demand that is needed to sustain the human life. Accidental release and leakage of petroleum hydrocarbons may cause groundwater contamination and can have extremely serious consequences from both human and environmental health perspectives. Basically, petroleum hydrocarbons can be divided in two major groups. First group is called light non-aqueous phase liquids which float on water. Second group of petroleum hydrocarbons is called dense non-aqueous phase liquids and they are denser than water. Contaminations caused by light non-aqueous phase liquids can be relatively more easily remediated when compared to dense non-aqueous phase liquids and contaminations caused by dense non-aqueous phase liquids generally require application of more complex remediation technologies. There are different methods exist for the remediation of petroleum hydrocarbon contamination in the saturated and unsaturated zones of the aquifers. Among these, most frequently used ones are; gas/air injection, soil vapor/gas extraction, directional wells,

in-well aeration, dual phase extraction, chemical oxidation, thermal treatment, fracturing enhancement and permeable reactive barrier technologies. Before the application of any method, the most important thing to do is to define aquifer and contaminant characteristics and spatial extent of the contaminant for an effective treatment process. Each one of these methods has several advantages and disadvantages that are resulted directly from properties of the contaminated aquifers. For this reason, in the petroleum hydrocarbon contaminated aquifers generally not a single method is used but a combination of two or more methods are applied for a more effective treatment.

GİRİŞ

Kullandığımız enerji kaynaklarının en önemlilerinden birisi olan petrol türevleri yada yaygın olarak kullanılan adıyla akaryakıt (benzin, motorin, fuel-oil, gazyağı, v.b.), ham petrolün rafinerilerde damıtılması sonucu elde edilen yüzlerce değişik hidrokarbon bileşiğinin karışımından oluşmaktadır. Genellikle boru hatları vasıtasıyla taşınan bu ürünler belirli bir süre yeraltı veya yerüstü depolama tanklarında depolandıktan sonra akaryakıt istasyonlarına tankerler vasıtasıyla dağıtılmaktadırlar (Şekil 1). Bu ürünlerin depolanması veya taşınması sırasında oluşabilecek çeşitli sızıntılar ve kazalar giderilmesi zor çevre

problemlerinin yaşanmasına neden olabilmektedir. Kirlenmiş toprağın ve yeraltı suyunun rehabilitasyonu özellikle endüstrileşme sürecini tamamlamış ülkeler arasında yaygın bir sorun olup, maliyet ve zaman tasarrufu açısından yeni geliştirilmekte olan teknolojilerin kullanımını gerektirmektedir. Akaryakıtların sızıntı veya kaza sonucu çevreye yayılması toprağın ve yeraltı suyunun NAPL adı verilen birçok hidrokarbon bileşiği tarafından kirlenmesine neden olmaktadır. NAPL'lar tek bir çeşit hidrokarbondan oluşabileceği gibi (Örn. benzen yada tolüen), yüzlerce değişik hidrokarbon çeşidinden oluşan kompleks karışımlar şeklinde de olabilmektedirler.



Şekil 1. Petrol türevlerinin üretim, depolama ve taşıma aşamalarını gösteren şematik çizim

Figure 1. Schematic drawing showing production, storage and transport of petroleum hydrocarbons

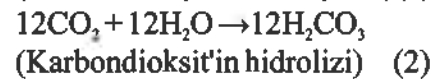
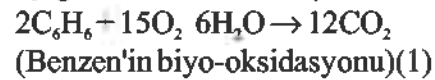
Örneğin, benzin 150-500 arası farklı çeşit hidrokarbondan oluşabilen kompleks bir NAPL karışımıdır. NAPL'lar suya göre olan yoğunluklarına göre hafif veya ağır NAPL'lar olmak üzere iki genel sınıfa ayrılırlar. Bunlardan hafif NAPL'lar (LNAPL) sudan daha az yoğun, ağır NAPL'lar (DNAPL) ise sudan daha yoğundur (Bedient vd., 1999). Yeraltı ortamına oluşacak bir sızıntı sonucu, LNAPL'lar sudan daha hafif olduklarından su tablası üzerinde yüzmeye eğilimliken, DNAPL'lar sudan daha ağır olduklarından akifer tabanına doğru hareket ederek orada birikirler (Şekil 1).

Petrol kirliliğine uğramış akiferlerde NAPL'lar suya doygun olmayan kesimde (vadoz zon yada bölge) dört farklı fazda bulunurlar: 1) taneler arası boşluklarda uçucu (buhar) fazda, 2) akiferi oluşturan malzemeye absorbe olarak, 3) suda çözülmüş olarak, ve 4) saf sıvı NAPL fazda (serbest faz) (DiGiulio ve Cho, 1990). Bu dört fazdan insan sağlığı açısından en tehlikeli olanı yeraltı suyunda çözülmüş olarak bulunan NAPL'lardır. Özellikle, içme suyu ihtiyacının yeraltı sularından karşılandığı bölgelerde oluşan NAPL kirlilikleri insan sağlığı açısından ciddi tehditler oluşturmaktadır. Bunlar arasında, BTEX (benzen, tolüen, etil benzen ve ksilen) olarak adlandırılan bazı benzin bileşenleri, NAPL'lar içerisinde insan ve çevre sağlığı açısından en tehlikelileridir. İnsan sağlığı açısından tehlikeli kabul edilen sınırların (WHO, 1998) 400 ile 180,000 katı suda çözünürlüğe sahip olan bu aromatik bileşikler insanlarda yüksek derecede kanserojen etkiye sahiptirler.

NAPL ile kirlenmiş akiferlerde kirliliğin yayılımı; kirleticinin yoğunluğu, buhar basıncı, viskozitesi ve hidrofobik olup olmaması gibi taşınma özellikleri ile akifer ortamının jeolojisi, mineralojisi ve hidrolojisi arasındaki etkileşimlerle

belirlenmektedir. Kirleticinin taşınması ise temel olarak, adveksiyon, dispersiyon ve difüzyon mekanizmalarıyla oluşmaktadır. Adveksiyon; kirleticinin basınç gradyanına bağlı olarak hareketini tanımlarken, dispersiyon, akış hızındaki mikro ölçekli değişimler sonucunda kirleticinin yayılması, karışması ve dağılmasını ve difüzyon ise kirleticinin yüksek konsantrasyon bölgesinden düşük konsantrasyon bölgesine göçünü tanımlamaktadır (Fetter, 1999).

Çoğu hidrokarbonlar, aerobik koşullarda, akifer ortamında doğal olarak bulunan mikroorganizmalar tarafından kolaylıkla parçalanırlar. Bu süreç kirleticinin yayılmasını yavaşlatan önemli bir etmendir (Borden, 1994; Rifai vd., 1995; Chapelle, 1999). Mikroorganizmalar, aerobik parçalanmada, hidrokarbonları (NAPL) metabolize ederek organik karbon gibi zararsız ürünlere ayrıştırır ve enerjiye dönüştürürler. Karbon-karbon ve karbon-hidrojen kovalent bağlarının parçalanmasını gerektiren bu süreç, topraktaki bir bakteri grubu (*Nocardia*, *Pseudomonads*, *Acinetobacter*, *Flavobacterium*, *Micrococcus*, *Anthrobacter*, *Corynebacterium*) tarafından gerçekleştirilmektedir (Riser-Roberts, 1992; Chapelle, 1993). Hidrokarbonların parçalanmasıyla ilişkili mikrobiyolojik aktivitelerin artışı sonucunda, NAPL ile kirlenmiş yeraltı suyu sistemleri tipik olarak düşük pH ve çözülmüş oksijen (DO) değerlerine sahiptir. Örneğin, benzenin bakteriler tarafından parçalanması sonucu aşağıda belirtilen reaksiyonlar oluşur.



Ancak, bakteri aktivitelerini sınırlayıcı özellikte ortam koşullarına sahip bazı bölgelerde, kirliliğin yayılması yukarıda belirtilen doğal süreçlerle engelleneme-

mektedir. Bu bölgelerde, kirleticilerin insan ve çevre üzerindeki etkilerini azaltmak için ek önlemler ve yöntemler uygulanması gerekmektedir. Su ve toprak kirliliğinin giderilmesi için uygulanan en basit (geleneksel) yöntem kirlenmiş toprağın hafriyatını ve suyun pompalanarak temizlenmesini içermektedir. Toprağın hafriyatı hem zor hem de maliyet açısından oldukça pahalı bir yöntemdir. Suyun pompalanarak temizlenmesi işlemi ise; kirleticilerin akiferi oluşturan malzemeye absorbe olması gibi etmenlerden dolayı oldukça uzun bir temizlenme sürecini gerektiren yüksek maliyetli bir yöntemdir. Bu makalede, NAPL ile kirlenmiş akiferlerin temizlenmesinde uygulanan yerinde (in-situ) fiziksel ve kimyasal iyileştirme yöntemleri ve teknolojileri aktarılacaktır.

YERİNDE FİZİKSEL VE KİMYASAL İYİLEŞTİRME TEKNOLOJİLERİ

Son yıllarda, NAPL kirliliğinin giderilmesi için geleneksel yöntemlerden daha etkin ve daha ekonomik yeni yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler, kirlenen bölgelerin temizlenmesinde üç temel strateji uygulamaktadırlar. Bu stratejilerden her biri ayrı ayrı uygulanabildiği gibi değişik kombinasyonlar şeklinde de uygulanabilmektedirler. Bunlar;

- Kirleticinin parçalanması veya bozunması,
- Kirleticinin kirlenen ortamdan ayrılması,
- Kirleticinin hareketsiz hale getirilmesidir.

Bu stratejileri kullanan teknolojiler aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Gaz enjeksiyonu,
- Toprak gazı ekstraksiyonu
- Yönlü kuyular,
- Kuyu içi havalandırma

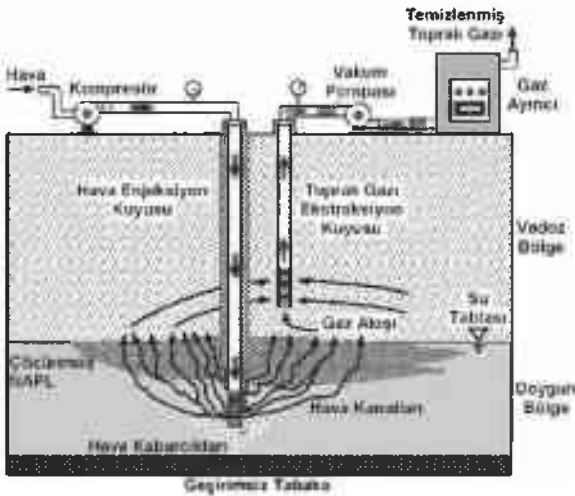
- İkili faz ekstraksiyonu,
- Kimyasal oksidasyon,
- Termal iyileştirme,
- Çatlak geliştirme,
- Geçirgen reaktif bariyer.

Gaz Enjeksiyonu

Gaz enjeksiyonu (IAS), doymuş zondaki toprak ve yeraltı suyunu kirleten NAPL'ların temizlenmesi amacıyla geliştirilmiş ve ilk olarak 1985'te Almanya'da uygulanmıştır (Marley vd., 1992; Leonard ve Brown, 1992; Johnson vd., 1993; Adams ve Reddy, 2000). Bu yöntem doymuş zonda açılmış olan bir kuyu içerisine basınçlı gazın (hava, oksijen, hidrojen ve bazen de propan) enjekte edilmesi ilkesine dayanmaktadır (Brown ve Jasiulweicz, 1992). Enjekte edilen hava yada gazlar yanal ve düşey yönde hareket ederek yüzeye doğru yükselmekte ve kirlenmiş zondaki kirleticileri gaz fazına alarak vadoz zona doğru hareket ettirmektedir (Şekil 2). Gaz enjeksiyonuyla toprak ve yeraltı suyunun temizlenmesi iki temel mekanizmayla gerçekleşmektedir (Brown vd., 1994; Johnson, 1998);

- 1) Enjekte edilen gaz, yeraltı suyunda çözülmüş olan NAPL'ların, serbest fazdaki NAPL'ların ve toprak matrikse absorbe olmuş NAPL'ların uçucu gaz fazına geçmesini sağlar,
- 2) Kirlenmiş vadoz zon matriksi ve yeraltı suyuna oksijen eklenmesi, yeraltı su tablası altındaki ve üstündeki kirleticilerin bakteri aktiviteleri sonucu parçalanmasını hızlandırır.

Bu yöntem genellikle, vadoz zondaki toprakta oluşan gaz fazı kirliliğini gidermek için toprak gazı ekstraksiyonu sistemi (soil vapor/gas extraction yada SVE) ile birlikte uygulanmaktadır. Bu birleşik iyileştirme sistemi (IAS+SVE), doymuş zon içerisinde açılmış olan gaz enjeksiyon kuyuları ve



Şekil 2. Yerinde gaz enjeksiyonu ve toprak gazı ekstraksiyonu teknolojilerinin birlikte uygulanışını gösteren şematik çizim (BATTELLE, 1997; EPA, 1994; ESTCP 2001; Department of Defense, 2002'den birleştirilerek çizilmiştir)

Figure 2. Schematic drawing showing combined application of in-situ gas injection and soil vapor extraction technologies (Modified from BATTELLE, 1997; EPA, 1994; ESTCP, 2001; Department of Defense, 2002)

vadoz zona yerleştirilmiş olan toprak gazı ekstraksiyonu kuyularından oluşmaktadır (Şekil 2). Enjekte edilen gazın etkilediği toprak kesimi "etkilenme zonu" olarak tanımlanmakta ve bu bölgenin yayılımı büyük ölçüde toprağın permeabilitesi tarafından kontrol edilmektedir. Gerekli görüldüğü takdirde kirlenmiş hava, toprak gazı ekstraksiyonu sistemi içerisinde, karbon filtreleri ve/veya yakma gibi geleneksel hava temizleme yöntemleriyle temizlenerek atmosfere bırakılmaktadır.

Gaz enjeksiyonunun, buharlaştırma ve biyolojik parçalanma süreçleri şu kirleticileri etkilemektedir:

- Benzin, motorin, jet yakıtı gibi çeşitli yakıtlar,
- Benzen, tolüen, etil benzen ve ksilen (BTEX),
- Madeni yağlar,

- Klorlu çözücüler (DCE, PCE, TCE, v.b.).

Genelde gaz enjeksiyonu, göreceli olarak iri taneli (orta-yüksek permeabilite) ve homojen jeolojik malzemenin aerobik koşullarda biyolojik olarak parçalanabilen uçucu organik kirleticilerle kirlendiği alanlara uygulanmaktadır. İnce taneli ve düşük permeabiliteye sahip topraklar, enjekte edilen gazın etkisini ve oluşan uçucu fazın ortamdaki uzaklaşmasını sınırlamaktadır (Anderson, 1995). Ayrıca, bu teknolojinin başarıyla uygulanabilmesi için kirlenen alandaki suya doymun zonun göreceli olarak kalın olması ve yeraltı suyu derinliğinin 150 cm'den fazla olması gerekmektedir.

Gaz enjeksiyonu teknolojisinin avantajları:

Gaz enjeksiyonu yöntemi doğru dizayn edildiğinde düşük maliyetli bir yerinde iyileştirme yöntemidir ve sistemin uygulandığı alanlardaki diğer aktiviteler (tarım, ulaşım, v.b.) en az düzeyde etkilenir. Kirletici konsantrasyonlarını zararsız düzeylere indirmek için gereken zaman oldukça kısa sayılabilir (genellikle uygun koşullarda 1 ile 3 yıl arası). Gaz enjeksiyonunun diğer avantajları ise şu şekilde sıralanabilir:

- Varolan gözlem kuyuları gaz enjeksiyonu için kullanılabilirliğinden maliyet azalmaktadır.
- Gaz enjeksiyonu, kapiler zonda ve/veya yeraltı suyu tablası altındaki kirliliğin giderilmesinde kullanılabilir.
- Enjekte edilen gaz, akiferin hidrolik iletkenliğini azalttığından kirleticilerin kirlenmemiş bölgelere göçünü sınırlamaktadır.
- Oluşan uçucu gaz fazı doğrudan atmosfere verilebilir.

Gaz enjeksiyonu teknolojisinin dezavantajları:

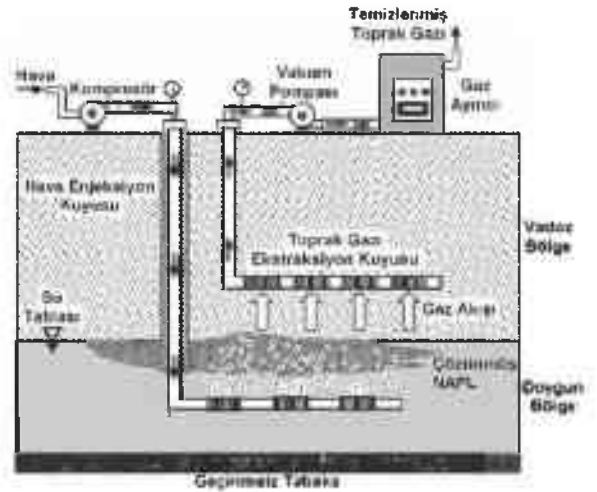
Bu yöntemin uygulanabilirliğini ve etkisini sınırlayan faktörler ise şöyle sıralanabilir.

- Gaz enjeksiyonu kuyuları, kirlenen alanın özel koşullarına göre dizayn edilmelidir. Dizayn sırasında kirleticilerin derinliği ve kirli alanın jeolojisi mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır.
- Toprak matriksiyle bileşikler oluşturan kirleticiler buharlaşma hızını azaltabilmektedir.
- Enjekte edilen hava, yeraltı suyunun oksijen konsantrasyonunu arttırdığından çökelen demir ve oluşan bakteriler akiferin permeabilitesini düşürebilmektedir.
- Enjekte edilen gaz, enjeksiyon kuyusunun etrafında yeraltı suyu seviyesinde ani yükselime oluşturabildiğinden kirleticinin istenmeyen bir şekilde yayılımına neden olabilmektedir.
- Büyük miktarda serbest faz NAPL içeren bölgelerde gaz enjeksiyonu yöntemi genellikle uygulanamamaktadır.
- Bu teknoloji, düşük uçucu özellikli kirleticiler için genellikle uygulanamamaktadır. Ancak, kirletici bileşikler bakteri aktivitesi sonucu parçalanabilme özelliğine sahiptirler uygulanabilmektedir.
- Tabakalanma, heterojenlik ve anizotropi gibi jeolojik koşullar düzenli hava akımını engellediğinden gaz enjeksiyonunun etkisini azaltabilmektedir.

Yönlü (Yatay) Kuyular

Kirlenen bölgenin bina, yol ve benzeri yapıların altında olması durumunda kirleticilere düşey kuyularla ulaşmak

mümkün olmayabilir. Bu gibi durumlarda, yönlü kuyu açma teknolojisi kullanılarak kuyular yatay veya yatayla düşük bir açı yapacak şekilde açılır. Yönlü kuyu teknolojisi, gaz enjeksiyonu ve/veya toprak gazı ekstraksiyonu teknolojilerine başarılı bir şekilde uygulanabilir. Bu yöntemde, doymun zon içerisinde açılmış yatay kuyulardan hava veya gaz enjekte edilir (Şekil 3). Hava, kirli bölgeden geçerken uçucu hidrokarbonları buharlaştırır. Bu işlem homojen toprak koşullarında en iyi sonucu vermektedir. Ancak, kırıklar, kil tabakaları ve kil mercekleri performansı azaltıcı yönde etki ederler. Ayrıca, yönlü kuyu teknolojisi, ardalanmalı, ince ve süreksiz kil tabakalarının varlığında da etkili bir yöntemdir. Yatay kuyular, özellikle kirletici yayılımının büyük alanlar kapladığı ve düzgün bir geometriye sahip olduğu bölgelerde veya yüzeydeki yapılaşmanın



Şekil 3. Yerinde gaz enjeksiyonu ve toprak gazı ekstraksiyonu teknolojilerinin yönlü (yatay) kuyu teknolojisiyle uygulanışını gösteren şematik çizim (www.frtr.gov/matrix2/section4/D01-4-36.html'den değiştirilerek çizilmiştir)

Figure 3. Schematic drawing showing application of in-situ gas injection and soil vapor extraction technologies with directional (horizontal) well technology (Modified from www.frtr.gov/matrix2/section4/D01-4-36.html)

yoğun olduğu durumlarda uygulanmaktadır. Bunun yanı sıra, bu teknoloji en etkin şekilde, kirlenen toprak ve yeraltı suyunun göreceli olarak yüzeye yakın olduğu bölgelerde uygulanır. Yatay kuyuların en önemli özelliklerinden birisi de kuyu filtrelerinin kirlenmiş ortamın büyük bir kısmıyla temasta olmasıdır. Ayrıca, yeraltı suyu iletimi yatay doğrultuda düşey doğrultudakinden daha iyi olduğundan bu kuyuların konfigürasyonu doğal koşullar için daha uygundur. Bu özellik, yatay kuyulardaki buhar fazının ve/veya yeraltı suyunun daha etkin geri kazanımını sağlamaktadır.

Yönlü kuyu teknolojisinin avantajları:

- Kirletici yayılımının geniş bir alanı kaplaması durumunda tek bir yatay kuyu birçok düşey kuyunun yerini alabilmekte ve böylelikle kuyu açma aliyeti azalmaktadır.
- Yönlü kuyu teknolojisi belirli bir kirletici grubuna değil kirleticilerin tümüne birden uygulanabilmektedir.
- Özellikle de kirli bölgede yapılaşma nedeniyle düşey kuyuların açılmadığı durumlarda yönlü kuyular büyük bir avantaj sağlar.

Yönlü kuyu teknolojisinin dezavantajları:

- Kuyularda, düşey yükler nedeniyle, potansiyel çökmeler oluşabilmektedir.
- Özel sondaj ekipmanı gerektirmektedir.

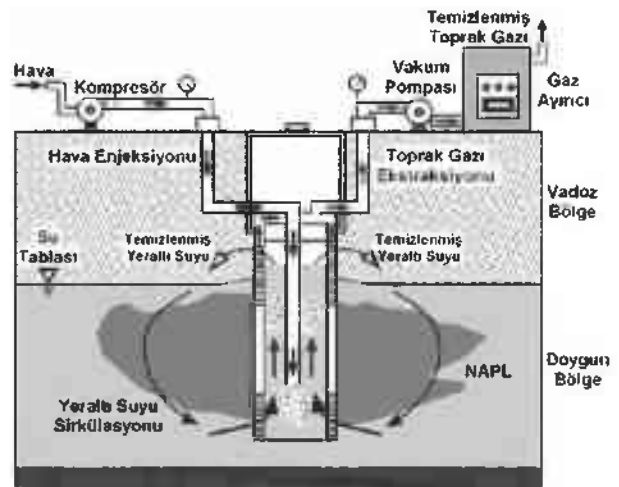
Şekil 4. Kuyu içi havalandırma teknolojisinin uygulamasını gösteren şematik çizim (BATTELLE, 1997; Hinchee, 1994 ve GWRTAC, 1997'den değiştirilerek çizilmiştir)

Figure 4. Schematic drawing showing application of in-well aeration technology (Modified from BATTELLE, 1997; Hinchee, 1994 and GWRTAC, 1997)

- Yönlü kuyu açma tekniklerinde deneyimli sondajcının bulunması zordur.
- Kuyuların istenilen noktaya ulaşım ulaşılmadığını belirlemek zordur.
- Bu teknoloji 15 metreden daha az derinliklerle sınırlıdır ve pahalı bir yöntemdir.

Kuyu İçi Havalandırma

Kuyu içi havalandırma yöntemi (IWA), yeraltı suyunun üç boyutlu dolaşımı (sirkülasyonu) ilkesine dayanan yüzey altı iyileştirme yöntemidir (Gonen ve Gvirtzman, 1997). Bu teknoloji, iki farklı derinlikte filtrelenmiş düşey bir kuyuya hava enjekte edilmesi prensibine dayanır (Şekil 4). Üstteki filtre vadoz zonda, alttaki filtre ise doymun zonda yer alır. Basınçlı hava, su tablası altındaki filtreden enjekte edilir ve su havalandırılır. Havalandırılmış su, kuyu içerisinde yükselir ve üstteki filtreden sistemin dışına atılır. Kirlenmiş su, alt filtre noktasından sisteme geri döner. Uçucu organik bileşikler, kuyu içerisinde yükselen hava kabarcıkları tarafından buharlaştırılarak vadoz zona taşınırlar. Oluşan bu uçucu buhar fazı toprak gazı ekstraksiyonu sistemiyle uzaklaştırılır. Yeraltı suyu, kuyu içi havalandırma sisteminde dolaşımında olduğu



sürece kirletici konsantrasyonları kademeli olarak azalmaya devam eder. Kuyu içi havalandırma sisteminin etkili olabilmesi için kirleticiler yeterli derecede çözünebilir ve hareketli olmalıdır (Gvirtzman ve Gorelick, 1992).

Kuyu içi havalandırma yönteminin avantajları:

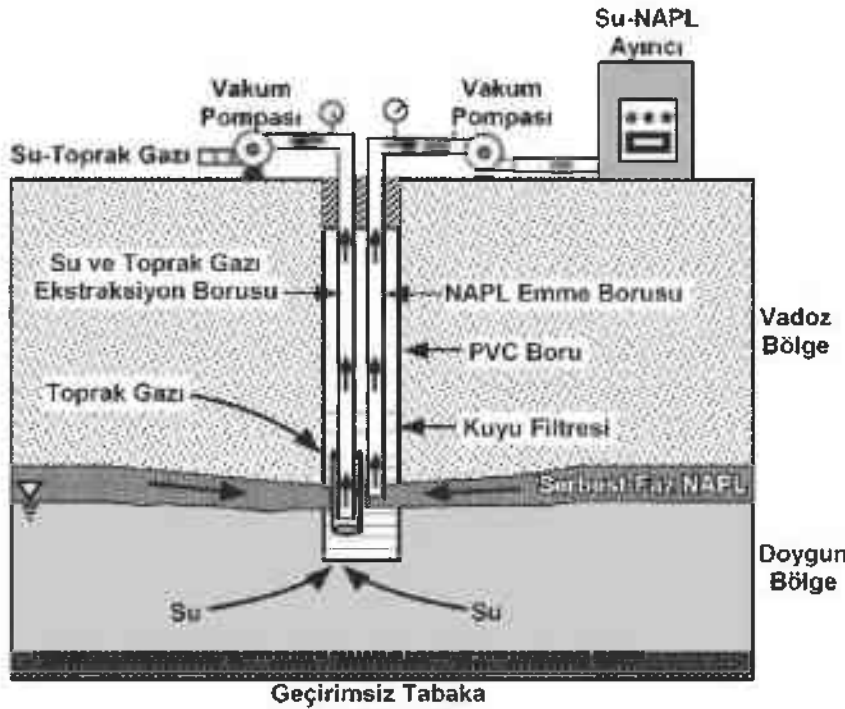
- Serbest ve basınçlı akiferlerde uygulanabilmektedir.
- Bu yöntem geniş bir permeabilite aralığına sahip jeolojik birimlere uygulanabilmektedir.
- Tek bir kuyu, uçucu gaz fazın ekstraksiyonu ve yeraltı suyunun iyileştirilmesi için yeterli olabilmektedir.
- Yöntemin maliyeti düşüktür.

Kuyu içi havalandırma yönteminin dezavantajları:

- Genelde kuyu içi havalandırma teknolojisi yüksek uçuculuğa sahip çözülmüş kirleticilerin yüksek konsantrasyonda görüldüğü yerlerde daha etkindir.
- Yüksek derecede oksitlenme özelliğine sahip bileşenler kuyu filtresinin tıkanmasına neden olabilmektedir.
- Sığ akiferler yöntemin etkinliğini sınırlayabilmektedir.
- Kirleticinin yayılmasını önlemek için kuyu açılmadan önce kirlenmiş bölgenin sınırlarının iyi bir şekilde belirlenmiş olması gerekmektedir.
- Kuyu içi havalandırma teknolojisi yatay hidrolik iletkenliğin 10^{-5} cm/sn'den büyük olduğu yerlerde uygulanmaktadır. Düşük iletkenliğe sahip merceksi yapıların bulunduğu alanlarda uygulanması önerilmemektedir.

İkili Faz Ekstraksiyonu

İkili faz ekstraksiyonu (DPE), kirlenmiş yeraltı suyunu, serbest faz olarak bulunan petrol ürünlerini ve yüzey altındaki hidrokarbon buharının değişik kombinasyonlarını uzaklaştırmak için yüksek vakum kullanan bir teknolojidir. İki ayrı pompanın kullanıldığı bu sistemde, bir pompa yeraltı suyunu uzaklaştırmak için su tablası altına, diğeri de serbest faz NAPL'ı çekmek için NAPL içeren seviyeye yerleştirilir (Şekil 5). Kalın bir NAPL tabakasının varlığı, yeraltı suyuna göre daha yüksek oranda NAPL'ın dışarı alınmasına olanak sağlar (Connolly vd., 1995). Etkin uygulama için, NAPL'ın pompanın emme ucunun tümünü kaplaması gereklidir. Pompalamaya bağlı olarak NAPL seviyesi düşmeye başladığında sistem, gaz fazı uçucu NAPL ekstraksiyonuna başlar. Uçucu gaz fazın ekstraksiyonu, vadoz zonda hava akımının oluşmasına ve dolayısıyla oksijen içeriğinin artmasına olanak sağlar (Barnes ve McWhorter, 1995). Bu teknoloji, vadoz zona artan oranda oksijen sağladığından petrol bileşenlerinin biyolojik parçalanmasına da yardımcı olur. Yeraltı suyu ve diğer ürünlerin uzaklaştırılmasıyla ilişkili olan ikili faz ekstraksiyonu, özellikle tabakalı, ince taneli topraklarda daha başarılıdır (Blake ve Gates, 1986; Blake vd., 1990; Bruce vd., 1992). Uygulanan vakum ne kadar yüksek olursa buhar ve sıvı fazların ortamdaki uzaklaştırılması o derece artar. Bunun sonucunda da doygun ve vadoz zonda hidrokarbonların konsantrasyonları azaltılır. Kirleticilerin uzun zincirli hidrokarbonları içerdiği durumlarda ikili faz ekstraksiyonu yöntemi hava enjeksiyonu ve biyolojik iyileştirme teknolojileriyle birlikte uygulanır.



Şekil 5. İkili faz ekstraksiyonu teknolojisinin uygulamasını gösteren şematik çizim (BATTELLE, 1997 ve Place vd., 2003'ten değiştirilerek çizilmiştir)

Figure 5. Schematic drawing showing application of dual phase extraction technology (Modified from BATTELLE, 1997 and Place et al., 2003)

İkili faz ekstraksiyonu teknolojisinin avantajları:

- Geniş bir koşul aralığında istenilen performansı sağlar.
- Temizleme süresi kısadır (uygun koşullarda genellikle 6 ay ile 2 yıl arası).
- Serbest faz NAPL ürünleriyle kirlenmiş bölgelere diğer yöntemlerle birlikte uygulanabilir.
- Vakum ekstraksiyon kuyusu içerisinde NAPL fazının buhar fazına geçişi sağlandığından yeraltı suyu temizleme maliyetlerini düşürmektedir.

İkili faz ekstraksiyonu teknolojisinin dezavantajları:

- Yüksek verimli akiferlerde diğer teknolojilerle birlikte uygulanması gerekebilmektedir.
- İkili faz ekstraksiyonu, hem su hem de buhar fazının yüzeye alındıktan sonra

temizlenmesini gerektirir. Bu durum da maliyeti yükseltmektedir.

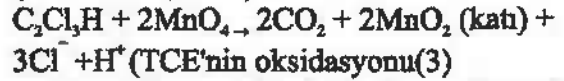
- İkili pompa sistemleri düşük permeabiliteli topraklarda etkili olmayabilir.
- Su tablasının düşey yönde salınım yaptığı yerlerde bu yöntemin uygulanması zordur.
- İşletim sırasında karmaşık gözlemler ve daimi kontrol gerektirebilmektedir.

Kimyasal Oksidasyon

Yerinde kimyasal oksidasyon (ISCO) vadoz zon ve/veya yeraltı suyu içerisine kimyasal oksitleyicilerin enjekte edilerek organik kirlenmelerin oksitlenmesi ilkesine dayanmaktadır (Şekil 6). Bu yöntem, BTEX (benzen, tolüen, etil benzen ve ksilen), tetrakloretilen (PCE), trikloretilen (TCE), dikloretilen (DCE), vinil klorür, metil-tert-bütil-eter (MTBE), poliaromatik hidrokarbon (PAH) bileşikler, organik pestisitlere ve diğer birçok organik

kirleticilerin temizlenmesinde kullanılmaktadır (Siegrist, 1998). Potasyum permanganat (KMnO_4), hidrojen peroksit (H_2O_2), sodyum hipoklorit (NaOCl), klordioksit (ClO_2) ve ozon (O_3) yaygın olarak kullanılan oksitleyici kimyasallardır. Kimyasal oksidasyon reaksiyonları tipik yükseltgenme-indirgenme reaksiyonlarıdır. Bu reaksiyonlar tehlikeli kirleticileri zararsız veya daha az toksik ürünlere dönüştürmektedir (CO_2 , H_2O ve inorganik Cl gibi). Açığa çıkan yeni ürünler daha duraylı, daha hareketsiz ve daha az reaktiftir. Redoks reaksiyonları bir bileşikten diğere elektron transferini gerektirmektedir. Bu reaksiyon sırasında bir bileşik elektron kaybederek okside olurken diğeri de elektron kazanarak indirgenir. Kullanılan oksitleyici kimyasallar genellikle TCE ve benzen gibi kirleticiler için %90'lara varan temizlenmeyi dakikalarla ölçülen kısa bir zaman aralığında sağlar. Örneğin, TCE'nin kimyasal oksidasyonu

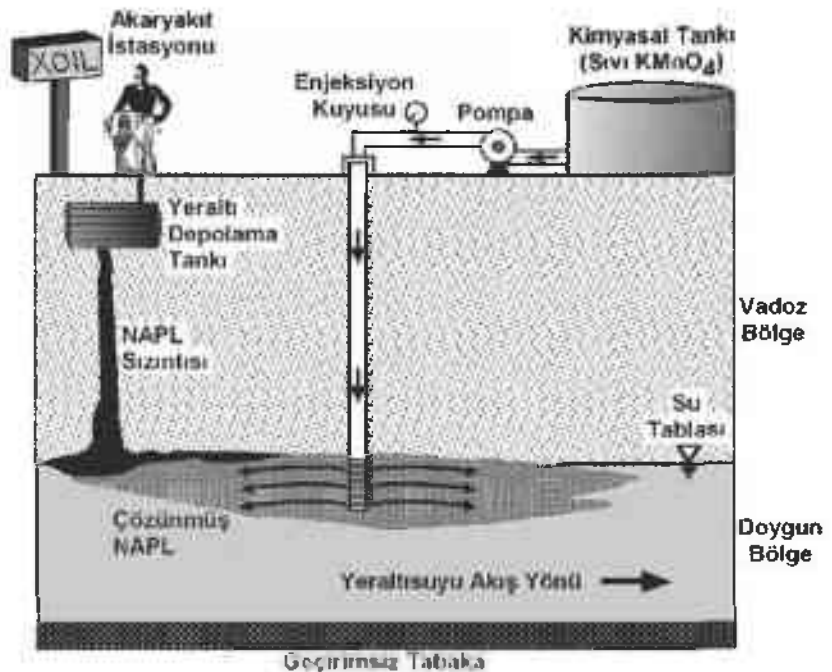
aşağıda verilen reaksiyon yoluyla gerçekleşir (Schnarr vd., 1998).



Temizlenmenin istenilen düzeyde gerçekleşmesi için kirleticiye uygun oksitleyicinin ve oksitleyici verme yönteminin seçilmesi gerekir. Oksitleyiciler geleneksel kuyu enjeksiyon yöntemleriyle verilebildiği gibi hidrolik çatlak geliştirme veya geçirgen reaktif bariyerler gibi yeni yöntemler kullanılarak da verilebilir (ITRC, 2005). Yeraltı suyunda istenen düzeyde temizlenme sağlanabilmesi için, enjeksiyon/ekstraksiyon kuyuları ile gözlem kuyularının sayısı ve yerleşimi iyileştirme/temizleme zonunu maksimum düzeyde kapsayacak biçimde seçilmelidir. Kimyasal oksidasyon teknolojisi, ozon hariç sulu faz teknolojisidir ve oksitleyici, suya doygun veya doygunu yakın toprak matrikse uygulanmalıdır.

Şekil 6. Kimyasal oksidasyon teknolojisinin uygulamasını gösteren şematik çizim (www.frtr.gov/matrix2/section4/D01-4-30.html'den değiştirilerek çizilmiştir)

Figure 6. Schematic drawing showing application of chemical oxidation technology (Modified from www.frtr.gov/matrix2/section4/D01-4-30.html)



Kimyasal oksidasyon teknolojisinin avantajları:

- Kimyasal reaksiyonlar iyi bilinmektedir ve atık su temizleme uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.
- $KMnO_4$ kullanılarak yerinde kimyasal oksitleme, hava enjeksiyonu ve biyolojik temizleme yöntemlerine göre daha agresif bir temizleme yöntemi olduğundan yüksek konsantrasyonlardaki kirleticilerin temizlenme süresi çok daha kısadır.
- Kirleticilerin oksidasyonu patlama riski olan uçucu organik bileşikler oluşturmaz.
- Geniş bir kirletici grubu için etkilidir.

Kimyasal oksidasyon teknolojisinin dezavantajları:

- Hidrokarbonları oksitlemek için tehlikeli ve zararlı oksitleyici kimyasallardan fazla miktarda kullanmak gerekebilir.
- Bazı hidrokarbonlar oksidasyona dirençli olabilir.
- Oksitleyicinin verildiği ortamdaki heterojenlikler oksitleyicinin düzenli dağılımını engelleyebilir.
- Metal oksitlerin çökeline bağlı olarak akiferin etkin porozitesi azalabilir.
- Akifer ortamındaki doğal organik maddeler oksitleyici kullanımını ve dolayısıyla maliyeti artırabilir.
- Kirleticilerin düşük konsantrasyonlarda bulunması durumunda (<5 mg/l) etkili değildir.

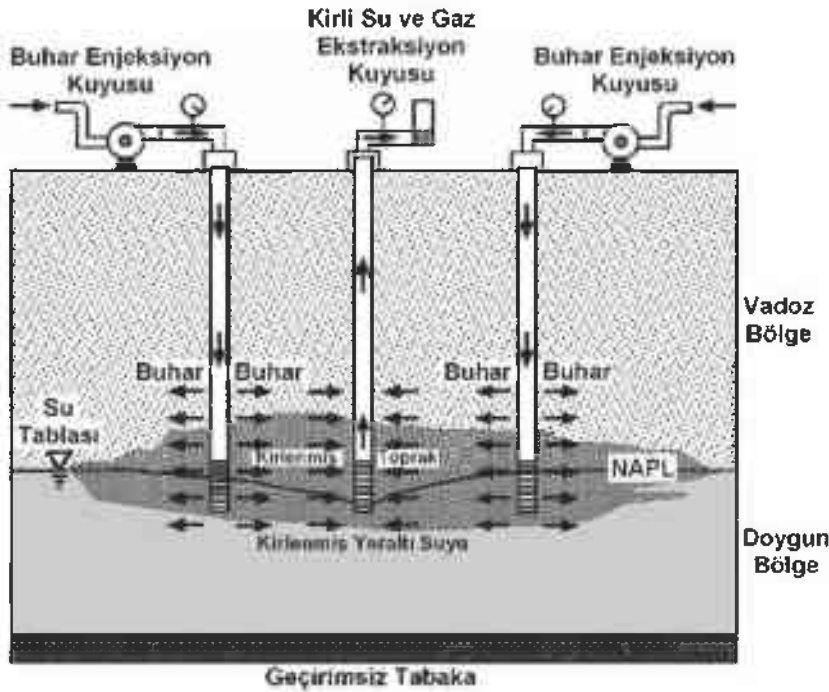
Termal İyileştirme

Formasyondaki kirleticileri hareketlendirmek ve ısıtmak için kondüksiyon, konveksiyon ve radyasyonla

ısı enerjisi verilmesi prensibine dayanan birçok termal iyileştirme yöntemi geliştirilmiştir (Davis, 1997). Bu yöntemlerle ısıtılan kirletici kimyasallar, toprak ve yeraltı suyu ortamında mobilize olmaya zorlanarak ekstraksiyon kuyularına doğru hareket etmeleri sağlanır. Kuyulardan pompalanan kirli yeraltı suyu, daha sonra temizlenmek üzere ayırıcılara gönderilir. Termal iyileştirme yöntemleri, petrol kuyularında verimi arttırmak için öteden beri uygulanan değişik yöntemlerin bir çeşididir. Yaygın olarak kullanılan bu yöntemlerin başlıcaları: sıcak su, buhar ve sıcak hava enjeksiyonu ve radyofrekans ısıtma olarak sayılabilir. Sıcak su, buhar ve sıcak hava konveksiyonla ısıtma sağlarken, radyofrekansla ısıtma, radyasyon enerjisi yoluyla ısıtma sağlar.

Sıcak su enjeksiyonu

Bu yöntem kirletici hareketini kontrol etmek için sıcak su enjeksiyonunu kullanır. Sıcak su akımının ısısı hidrokarbonlu bileşiklerin viskozitesini düşürür ve DNAPL, ekstraksiyon kuyularına doğru hareket eder. Sıcak su enjeksiyonu DNAPL'lar için geliştirilmişse de LNAPL'lar için de etkili olabilmektedir. Sıcak su, gözenekli ortama girerken gözenekli ortamın ve taneler arası akışkanların ısısını yükseltir. Sıcak su sistemi, üç farklı derinlikte, buhar, sıcak su ve soğuk suyun aynı anda enjekte edildiği karmaşık bir kuyu sistemi gerektirmektedir (Smith ve Hinchee, 1993). Buhar, DNAPL'ları ısıtmak için kirlenmiş kısmın altına enjekte edilir. Sıcaklığın yükselmesi DNAPL'ın yoğunluğunu suyun yoğunluğunun altına düşürür ve DNAPL sıcak suyla birlikte yukarı doğru hareket eder. Kirlenmiş zonu çevreleyen bölgeye enjekte edilen sıcak su, kirli zonu yanal olarak sınırlar ve DNAPL'ları ekstraksiyon kuyularına doğru hareketlendirir. Kirlenmiş zonun üst kesimlerine enjekte edilen soğuk su ise bir absorpsiyon tabakası veya soğuk



Şekil 7. Buhar enjeksiyonu ile yüzeyaltı termal iyileştirme (BATTELLE, 1997 ve EPA, 2005'ten değiştirilerek çizilmiştir)

Figure 7. Subsurface thermal treatment process with steam injection (Modified from BATTELLE, 1997 and EPA, 2005)

kapan oluşturur. Bu absorpsiyon tabakası yükselen boşluk sıvılarının düşey yönde sınırlandırılmasına neden olur ve ısıtılmış kirli zondan yükselen buhar fazını yoğunlaştırır.

Buhar/sıcak hava enjeksiyonu

Buhar/sıcak hava enjeksiyonu herhangi bir hafriyata gerek kalmadan toprak ve yeraltı suundaki uçucu ve yarı-uçucu tehlikeli kirleticileri uzaklaştırır (Şekil 7). Buhar enjeksiyonu, sıcak hava enjeksiyonu ile birlikte de uygulanabilmektedir. Buhar, toprak içerisindeki kirleticilerin topraktan ayrılmasını sağlar ve bazı durumlarda kirlenmiş yeraltı suyunu hareketlendirmek için de kullanılmaktadır. Buhar enjeksiyonu toprak-buhar fazı ekstraksiyonuyla yeterli derecede uzaklaştırılamayan uçuculuğu düşük organik bileşenlerin buhar basıncını arttırarak temizlenmesini kolaylaştırmaktadır (Smith ve Hinchee, 1993).

Radyofrekansla ısıtma

Radyofrekansla (RF) ısıtma tekniği büyük hacimlerdeki toprağı hızlı ve düzenli bir şekilde ısıtmak için kullanılır (Smith ve Hinchee, 1993). Bu teknik, toprağı ısıtırken uçucu ve yarı-uçucu bileşikler toprak gözenegi içerisindeki gaz fazına geçerler. Daha sonra da açılan havalandırma kuyuları ile bu gazlar gözeneklerden alınır. Alınan bu gazlar patlayıcı özellik gösterdiklerinden yakılarak veya diğer yöntemlerle temizlendikten sonra atmosfere bırakılmalıdır. Radyofrekansla ısıtma, radyofrekans bandındaki elektromanyetik enerjinin kullanılmasıyla gerçekleştirilir. Bu enerji, toprağın termal iletkenliğiyle ilişkili olmadığından açılmış olan kuyulara yerleştirilmiş elektrotlar yardımıyla toprak içerisine verilir. Isı oluşum mekanizması mikrodalga fırınlarındaki ısıtma şekliyle benzerdir. Uygulanacak olan radyofrekans topraktaki kirliliğin yayılımına ve toprağın dielektriksel özelliğine bağlı olarak belirlenir. Toprağın elektriksel özellikleri ısıtma sırasında büyük ölçüde değiştiğinden

enerji transferinin istenilen düzeyde gerçekleşmesi için sistemin devamlı olarak gözlenmesi ve gerekli düzenlemelerin yapılması gereklidir (Smith ve Hinchee, 1993).

Termal iyileştirme teknolojisinin avantajları:

- Termal iyileştirme yöntemleri, büyük miktardaki yağlı atıkların uzaklaştırılmasında kullanılabilir.
- Organik kirleticilerin yanal ve düşey yöndeki hareketlerini sınırlamaktadır.
- Bu yöntemler sıg ve derin zonlara uygulanabilmektedir.

Termal iyileştirme teknolojisinin dezavantajları:

- Toprak türü, kirletici karakteristikleri ve konsantrasyonları, jeoloji ve hidrojeoloji yöntemin başarısını önemli ölçüde etkilemektedir.
- Yöntemin uygulama maliyeti yüksektir ve karmaşık ekipmanlar gerektirmektedir.

- Radyofrekans sisteminden sızan radyo dalgaları iletişim hatlarında parazite neden olabilmektedir.

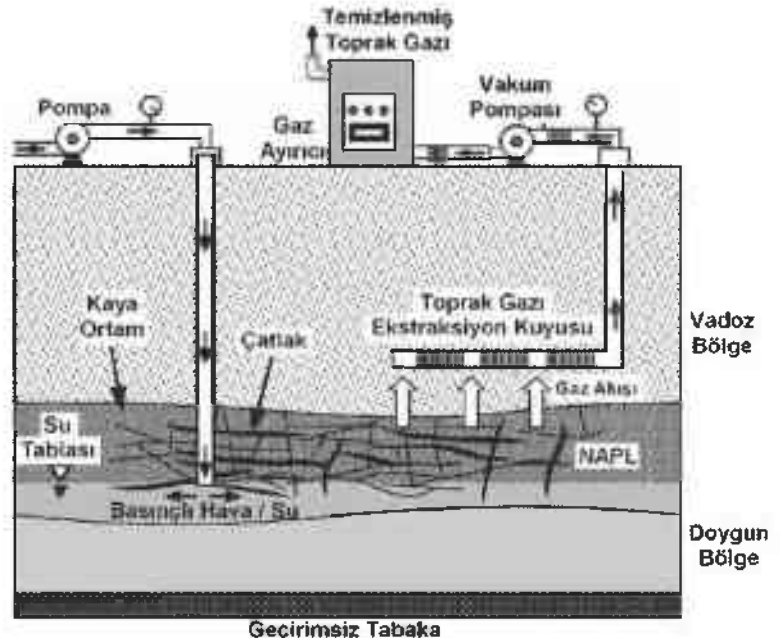
Çatlak Geliştirme

Çatlak geliştirme yöntemi (FE), akifer permeabilitesini arttırmak ve kirleticinin ortamdaki uzaklaştırılmasını hızlandırmak üzere geliştirilmiştir (Banerjee, 1993). Bu yöntem, özellikle buhar fazı ekstraksiyonu, biyolojik parçalanma ve termal iyileştirme yöntemleri ile birlikte daha etkin bir temizleme sağlamaktadır. Bu yöntemle akiferde oluşturulan kırık ve çatlaklar, oksitleyici sıvıların akiferin her bölümünü homojen bir şekilde etkilemesini ve kirleticilerin hızlı bir şekilde ekstraksiyonunu sağlamaktadır (Şekil 8). Hidrolik ve pnömatik çatlak geliştirme gevşek malzemeye de uygulanabilmektedir. Patlatma yoluyla çatlak geliştirme ise sadece kaya ortamına uygulanmaktadır.

Hidrolik çatlak geliştirme, sondaj borusunun tabanından yüksek basınçla su verilmesiyle akiferi oluşturan malzeme içerisinde çatlak oluşturulması ilkesine

Şekil 8. Hidrolik ve pnömatik basınç kullanılarak çatlak geliştirmeyi gösteren şematik çizim (GWRIAC, 2000'den değiştirilerek çizilmiştir)

Figure 8. General schematic drawing of hydraulic and pneumatic fracturing (Modified from GWRIAC, 2000)



dayanmaktadır. Pnömatik çatlak geliştirmede ise pekişmiş (konsolide) sedimanlar içerisinde bulunan kırık veya çatlakların yüksek basınçlı hava enjeksiyonuyla genişletilerek ikincil çatlak ağlarının oluşması sağlanmaktadır. Patlatma yoluyla çatlak geliştirme yönteminde ise, çatlaklı kayalarda patlayıcı maddelerin kuyu içerisinde patlatılarak kırık yoğunluğunun artırılması sonucunda kirlenmiş yeraltı suyunun ortamdaki daha kolay uzaklaştırılması sağlanmaktadır.

Çatlak geliştirme teknolojisinin avantajları:

- Çatlak geliştirme yöntemi, kil ve kilsilttaşı ardalanmasından oluşan birimlere de uygulanabilmektedir.
- Bu yöntem, kaya ortamın yanı sıra, gevşek sedimaner birimlere de özel jeller kullanılarak uygulanabilmektedir.

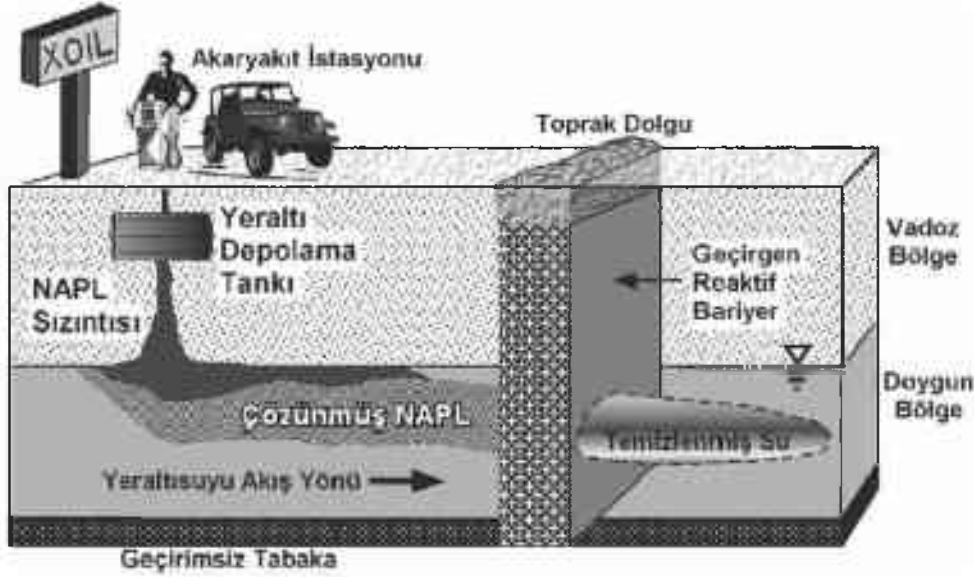
Çatlak geliştirme teknolojisinin dezavantajları:

- Bu yöntemin uygulanması sismik aktiviteye duyarlı bölgelerde önerilmemektedir.
- Çatlak geliştirme teknolojisini kullandığı bölgelerde yeraltı yapılarının (kablo, borular, kanalizasyon yapıları, v.b.) bulunmaması gerekmektedir.
- Kirleticiler, yeni açılan kırıklar nedeniyle temiz bölgelere yayılabilmektedir.
- Akifer içerisinde yöntemin etkilemediği düşük permeabiliteli zonlar gözlemlenebilir.
- Oluşturulan kırıkların boyutları ve yayılımı kontrol edilemeyebilir.
- Kırıklar litostatik basınçtan dolayı zamanla kapanabilmektedir.

Geçirgen Reaktif Bariyer

Geçirgen reaktif bariyer (PRB) yöntemi, yeraltı suyunu kirleten kirleticilerin reaktif malzemeler yardımıyla yerinde temizlenmesi için geliştirilmiştir (Reynolds vd., 1990; Gillham ve O'Hannesin, 1992). Bu yöntem, kirlenmiş yeraltı suyunun akım yönünde kazılan uzun ve dar bir hendek içerisine yerleştirilen geçirgen reaktif malzemenin, kirleticilerle fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçler yardımıyla temizlenmesi ilkesine dayanır. Kazılan hendek reaktif malzemeyle doldurulduktan sonra üzeri toprakla kapatılır ve genellikle yüzeyde belirgin değildir. Bu bariyerler, yeraltı suyunun geçişine izin verirken kirleticilerin bariyerin diğer tarafına geçişini engeller (Şekil 9). Reaktif malzeme olarak, kirleticinin cinsine göre, elementel demir (Fe^0), kireçtaşı, zeolit, talaş tozu, bentonit, turba ve aktif karbon kullanılmaktadır. Reaktif malzemeler yeraltı suyunun akışını kolaylaştırmak için kumla karıştırılabilir. Bu yöntem, çeşitli organik ve inorganik kirleticilerin temizlenmesinde başarıyla uygulanabilmektedir. Örneğin, çözünmüş organik maddeler (hidrokarbonlar), metaller (Cr^{6+} , Ni ve Pb gibi), radyoaktif maddeler ve nitrat kirliliği bu yöntemle temizlenebilmektedir.

Ortamın hidrojeolojik özellikleri yöntemin uygulanmasında kritik bir öneme sahip olup jeolojik malzemenin permeabilitesinin yüksek olması ve sığ bir derinlikte geçirimsiz bir katmanın (tercihen killi) bulunması gerekmektedir. Bu yöntemde, kirlenmiş yeraltı suyu bariyerin reaktif zonuna yönlendirilir. Bariyerin etkin bir temizleme yapabilmesi için kirlenmiş yeraltı suyunun bariyerin üstünden, altından veya yanlarından geçmemesi sağlanmalıdır (Gavaskar vd., 1988). Böyle bir sistemde oluşan reaksiyonlar; yükseltgenme/indirgenme potansiyeli, pH ve kirleticiler konsantrasyonu gibi bir dizi parametre ile



Şekil 9. Tipik bir geçirgen reaktif bariyeri gösteren şematik çizim (EPA, 1998; ESTCP, 2003 ve GWRTAC, 1996'dan değiştirilerek çizilmiştir)

Figure 9. Schematic drawing showing a typical permeable reactive barrier (Modified from EPA, 1998; ESTCP, 2003 and GWRTAC, 1996)

ilişkilidir. Bu nedenle bu yöntemin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için kirlenmelerin, yeraltı suyu akış rejiminin ve akifer jeolojisinin yeterli düzeyde karakterize edilmesi gerekmektedir.

Geçirgen reaktif bariyer teknolojisinin avantajları:

- Kirlenici, yeraltı suyunun doğal akışıyla bariyere doğru taşındığından herhangi bir pompalama gerektirmez.
- Yöntem herhangi bir bakım gerektirmez.
- Bariyer içerisine yerleştirilen reaktif materyaller yeraltı suyu veya insanlar için zararsızdır.
- Yüzeyle ilgili faaliyetleri (tarım, ulaşım, v.b.) etkilemez.
- Birçok kirlenicinin aynı anda veya ayrı ayrı temizlenmesine yönelik uygun reaktif malzemeler bulunmaktadır.

Geçirgen reaktif bariyer teknolojisinin dezavantajları:

- Uzun vadede (en az 10 yıl) bariyer reaktif özelliğini kaybedebilir.
- Bariyerin genişliği, derinliği ve hacmi maliyeti etkilemektedir.
- Bu yöntemin etkin bir şekilde uygulanabilmesi için bariyer uygun derinlikteki geçirimsiz bir katman üzerine yerleştirilmelidir.
- Biyolojik aktivite veya kimyasal çökelme, pasif bariyerin geçirimsizliğini azaltabilir.
- Bariyer kurulduktan sonra bunun taşınması veya değişiklik yapılması çok zor ve pahalı olduğundan bariyerin yerleştirileceği ilk yerin yeraltı suyu akış rejimine uygun seçilmesi gereklidir.

SONUÇLAR

Enerji kaynağı olarak yaşamımızın vazgeçilmezlerinden birisi olan petrol türlerinin nihai kullanıcıya ulaşmadan önce (üretim-taşıma-depolanma) değişik yollarla (yangın, kaza, sızıntı, v.b.)

oluşturdukları kirlilik, insan ve çevre sağlığı açısından önemli ölçüde olumsuz etkiler yapabilmektedir. Petrol türevlerinden kaynaklanan kirliliğin etkilerini en aza indirmek için ucuz ve hızlı temizleme sağlayan yöntemlerin uygulanması gerekmektedir. Kirliliği gidermede uygun yöntem ve/veya yöntemlerin seçiminden önce, kirlenmiş ortamın ve kirleticilerin detaylı bir şekilde karakterize edilmesi gerekmektedir. Kirlenen ortamın jeolojisi, mineralojisi, hidrojeolojisi ve hidrojeokimyasal parametrelerinin doğru şekilde saptanması, uygulanacak yöntemin seçiminde ve yöntemin başarısında son derece önemli bir yer tutmaktadır. Kirliliğin giderilmesinde, ortamın özel şartlarından dolayı bazen tek bir yöntem etkili olamamakta ve birkaç yöntemin birlikte uygulanması gerekebilmektedir. Akiferin özelliklerinin herhangi bir temizleme yöntemine izin vermediği durumlarda, kirliliğin doğal temizlenme sürecine bırakılması da bir yöntem olarak önerilmektedir.

Bu makalede, avantajları ve dezavantajlarıyla birlikte verilen yöntemler dünyada son yıllarda petrol kirliliğinin giderilmesiyle ilgili olarak test edilen ve kullanılan yöntemler olup ülkemizde bu tip sorunlarla karşılaşılan bölgelerdeki (Örn. Mersin) petrol kirliliğinin giderilmesi ile ilgili çalışmalarda yararlı olacağı düşünülmektedir.

DEĞİNİLEN BELGELER

- Adams, J.A. and Reddy, K.R., 2000. Removal of dissolved- and free-phase benzene pools from ground water using in situ air sparging: *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, 126 (8), 697-707.
- Anderson, W.C., 1995. Vacuum vapor extraction: WASTECH Innovative site remediation technology series, Vol. 8. American Academy of Environmental Engineers, Annapolis, MD., 224 p.
- Banerjee, P., 1993. Technology evaluation and applications analysis report: University of Cincinnati/Risk Reduction Engineering Laboratory - Hydraulic fracturing technology: U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EPA/540/R-93/505 (NTIS PB94100161), 160 p.
- Barnes, D.L. and McWhorter, D.B., 1995. Mechanics of vacuum-enhanced recovery of hydrocarbons: In: R.E. Hinchee, J.A. Kidel and H.J. Reisinger (eds), *Applied bioremediation of petroleum hydrocarbons*. Battelle Press, Columbus, OH, 361-370.
- BATTELLE, 1997. Engineering evaluation and cost analysis for bioslurper initiative (A005), Columbus, Ohio, 87 p.
- Bedient, P.B., Rifai, H.S. and Newell, C.J., 1999. *Ground water contamination: Transport and remediation (2nd Edition)*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 604 p.
- Blake, S., Hockman, B. and Martin, M., 1990. Applications of vacuum dewatering techniques to hydrocarbon remediation: In: *Proceedings of NWWA/API Conference on Petroleum hydrocarbons and organic chemicals in ground water: Prevention, detection, and restoration*. October 31 - November 2, Houston, Texas, 211-226.
- Blake, S.B. and Gates, N.M., 1986. Vacuum enhanced hydrocarbon recovery: A case study: In: *Proceedings of NWWA/API Conference on petroleum hydrocarbons and organic chemicals in ground water: Prevention, detection, and restoration*. November 12-14, Houston, Texas, 709-721.
- Borden, R.C., 1994. Natural bioremediation of hydrocarbon-contaminated ground water. *Handbook of Bioremediation*, Lewis Pub., Boca Raton, FL, 177-199.
- Brown, R. and Jasiulweicz, F., 1992. Air sparging: A new model for remediation: *Pollution Engineering*, 52-55.
- Brown, R.A., Hicks, R.J. and Hicks, P.M., 1994. Use of air sparging for in situ bioremediation: In: R.E. Hinchee (ed), *Air sparging for site remediation*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, 38-55.

- Bruce, L., Hockman, B., James-Deanes, R., King, J. and Laws, D., 1992. Vacuum recovery barrier wall system dewater contaminated aquifer: A solution based on proper evaluation of hydrogeologic parameters: In: Proceedings of the NGWA/API Conference on petroleum hydrocarbons and organic chemicals in ground water: Prevention, detection, and restoration. November 4-6, Houston, Texas, 303-311.
- Chapelle, F.H., 1993. Ground-water microbiology and geochemistry. John Wiley, New York, 424 p.
- Chapelle, F.H., 1999. Bioremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated ground water - The perspectives of history and hydrogeology: *Ground Water*, 37(1), 122-132.
- Connolly, M., Gibbs, B. and Keet, B., 1995. Bioslurping applied to a gasoline and diesel spill in fractured rock: In: R.E. Hinchee, J.A. Kittel and H.J. Reisinger (eds), *Applied bioremediation of petroleum hydrocarbons*. Battelle Press, Columbus, OH, 371-377.
- Davis, E.L., 1997. How heat can enhance in-situ soil and aquifer remediation: Important chemical properties and guidance on choosing the appropriate technique: Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, EPA/540/S-97/502, Washington, DC.
- Department of Defense, 2002. Multi-site air sparging, Battelle Press, Columbus, Ohio, 105 p.
- DiGiulio, D.C. and Cho, J.S., 1990. Conducting field tests for evaluation of soil vacuum extraction application: In: Proc. Fourth Natl. Outdoor Action Conf. on Aquifer restoration, ground water monitoring, and geophysical methods. Natl. Ground Water Assoc., Dublin, OH, 587-601.
- EPA, 1994. Assessing UST corrective action technologies: Lessons learned about in situ air sparging at the Denison Avenue Site, Cleveland, Ohio, EPA/600/R-95/040, 98 p.
- EPA, 1998. Permeable reactive barrier technologies for contaminant remediation, EPA/600/R-98/125, 94 p.
- EPA, 2005. A citizen's guide to in situ thermal treatment methods, <http://www.envirottools.org/factsheets/Remediation/insitutherm.shtml>
- ESTCP, 2001. Use of cometabolic air sparging to remediate chlorethene-contaminated ground water aquifers, ESTCP cost and performance report (CU-9810), U.S. Department of Defense, 51 p.
- ESTCP, 2003. Evaluating the longevity and hydraulic performance of permeable reactive barriers at Department of Defense sites, Cost and Performance Report (CU-9907), U.S. Department of Defense, 57 p.
- Fetter, C.W., 1999. Contaminant hydrogeology (2nd Edition). Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 500 p.
- Gavaskar, A.R., Gupta, N., Saas, B.M., Janosy, R.J. and O'Sullivan, D., 1988. Permeable barriers for groundwater remediation: Design, construction, and monitoring. Battelle Press, Columbus, OH.
- Gillham, R.W. and O'Hannesin, S.F., 1992. Metal-catalyzed abiotic degradation of halogenated organic compounds: In: IAH Conference, Modern trends in hydrogeology, Hamilton, Ontario, May 10-13, 1992. International Association of Hydrogeologists, Markham, Ontario, Canada, 94-103.
- Gonen, O. and Gvirtzman, H., 1997. Laboratory-scale analysis of aquifer remediation by in-well vapor stripping: 1. Laboratory results: *Journal of Contaminant Hydrology*, 29, 23-39.
- Gvirtzman, H. and Gorelick, S., 1992. The concept of in-situ vapor stripping for removing VOCs from groundwater, *Transport in Porous Media* 8. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 71-92.
- GWRTAC, 1996. Treatment walls: Technology evaluation report TE-96-01, 38 p.
- GWRTAC, 1997. In-well vapor stripping, Technology overview report TO-97-01, 17 p.
- GWRTAC, 2000. Technology status report hydraulic, pneumatic and blast-enhanced fracturing, Pittsburgh, PA, 48 p.