

Bu makale aşağıda atf bilgisi verilen makalenin Türkçe çevirisidir.

Atf bilgisi: Nazifi, H. M., Pekşen, E., Gürbüz, E., Gülen, L. 2024. Time-lapse ground penetrating radar (GPR) imaging of used engine oil contamination. Bulletin of the Mineral Research and Exploration 173, 175-188. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.1282076>



Maden Tetkik ve Arama Dergisi

<http://dergi.mta.gov.tr>



Atık motor yağı kirliliğinin zaman serili yer radarı (GPR) ile görüntülenmesi

Time-lapse ground penetrating radar (GPR) imaging of used engine oil contamination

Hafız MOHAMMED NAZİFİ^{a*}, Ertan PEKŞEN^b, Ertuğrul GÜRBÜZ^a ve Levent GÜLEN^a

^a Sakarya Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye

^b Kocaeli Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye

Araştırma Makalesi

Anahtar Kelimeler:

Yer Radarı (GPR), Atık Motor Yağı (AMY), Kirlenme, Susuz Fazlı Hafif Sıvılar (SFHS), Çevre Jeofiziği.

ÖZ

Zaman serili yer radarı (GPR), laboratuvarda kumlu ortamlarda atık motor yağı (AMY) kirliliğini incelemek amacıyla kullanılmıştır. GPR elektromanyetik alanları kullanarak yeraltındaki malzemelerin farklı elektriksel özelliklerini ve dolayısıyla yeraltı yapılarını tespit edebilen jeofizik bir yöntemdir. Bu çalışmada, AMY'nin kumdaki göçünün saptanması, izlenmesi ve haritalanması amaçlanmıştır. Bu çalışmanın sonuçlarına göre AMY kirliliğinin homojen olarak serilmiş bir kum tabakası içinde gerçekleşen göçünün homojen olmadığı ortaya konmuştur. AMY'nin belirginleştiği alanlar, yansımaların arttığı yüksek genlikli GPR sinyalleri olarak tanımlanmıştır. Tank akifer sistemindeki kirliliğin artması, GPR sinyal genliklerinde zamana bağlı kademeli bir azalma (yansıma azalması) gözlemlenmiştir. GPR sinyal genliklerindeki bu azalmanın nedeni AMY'nin zaman içinde vadöz zondaki sıcaklığın artmasına bağlı olarak kısmen buharlaşması ve de biyolojik bozunmasıdır. Sonuç olarak, zaman serili GPR yönteminin laboratuvar ortamında kum tankı içindeki AMY'nin tespiti, göçünün izlenmesi ve haritalanması için etkili bir jeofizik teknik olduğunu kanıtlamıştır.

Geliş Tarihi: 29.10.2022

Kabul Tarihi: 12.04.2023

Keywords:

Ground Penetrating Radar (GPR), Used Engine Oil (UEO), Contamination, Light Non-Aqueous Phase Liquid (LNAPL), Environmental Geophysics.

ABSTRACT

Time-Lapse Ground Penetrating Radar (GPR) was employed to study used engine oil (UEO) contamination of sandy environment in laboratory setting. GPR is a near-surface geophysical method that uses electromagnetic field to provide image of the dielectric properties of earth materials to detect structures and changes in material properties within the subsurface. This research aimed to detect, monitor and map the migration of UEO contaminant in sand. The results of this study revealed that the migration of the UEO contamination in homogeneously laid sand is non-uniform. UEO plumes were identified as high amplitude signals with enhanced reflectivity. There was a progressive decrease in GPR signal amplitudes (reflection reduction) within the contaminated area of the tank with time. This decrease of GPR signal amplitudes was interpreted as caused by the evaporation of some portion of the UEO in the vadose zone as a result of temperature increase in time and also due to the occurrence of UEO biodegradation. The time-lapse GPR proved to be an effective technique for detecting, monitoring, and mapping UEO migration within sand tank in laboratory setting.

*Başvurulacak yazar: Hafız Mohammed NAZİFİ, mohammednazifi@gmail.com

1. Giriş

Günümüz dünyası, antropojenik faaliyetlerin bir sonucu olarak toprak ve yeraltı suyu kirliliği gibi çevre sorunları yaşamaktadır. AMY'nin doğaya atılması ciddi çevre sorunlarına neden olmaktadır. AMY, endüstriyel buhar kazanlarında, evsel yağ yakıcılarında, yardımcı buhar kazanlarında, atık imha fırınlarında ve döner çimento fırınlarında yardımcı yakıt olarak kullanılmaktadır (ATSDR, 1997). Ayrıca asfaltta bileşen olarak da kullanılmaktadır. AMY, jeofizik kuyu içi logu yapmak için yeniden rafine edilmektedir. Maceiras vd. (2017), dünyada her yıl 45 milyon ton (tahmini) AMY üretildiğini ve bu yağın sadece 18 milyon tonunun uygun şekilde toplanıp imha edildiğini belirtmiştir. El-Fadel ve Khoury (2001), 1995 yılında dünya genelinde AMY'nin %45'inden daha azının toplandığını ve AMY'nin yaklaşık %55'inin ya yanlış kullanıldığını ya da son kullanıcı tarafından çevreye atıldığını bildirmiştir.

Toprak ve su kaynaklarının AMY ile kirlenmesinden kaynaklanan sağlık riskleri ve bunların çiftlik hayvanları üzerindeki etkileri arasında kasılmalar, kas seğirmeleri, nörolojik bozukluklar, körlük, aşırı hassasiyet ve depresyon yer almaktadır. Ayrıca karaciğer veya böbrek hastalığı oluşumuna, kemik iliğinde olası hasara, kanser riskinde artışa, vücut fonksiyonlarının tamamen bozulmasına ve nihayetinde çiftlik hayvanlarında ölüme de sebep olmaktadır (Propst vd., 1999; Abioye vd., 2012; Nolin vd., 1990; El-Fadel ve Khoury, 2001; Osweiler vd., 1973; Sas, 1989; ATSDR, 1997). Toksinler, gıda zinciri yoluyla bitki ve hayvanlarda birikir ve insan sağlığını etkileyecek şekilde besin zincirinde yukarı doğru ilerleyebilirler.

AMY, Susuz Fazlı Hafif Sıvılar (SFHS'ler) olarak sınıflandırılır. SFHS'ler sudan daha hafif olan organik sıvılardır. SFHS'lerin diğer örnekleri arasında benzin, dizel ve jet yakıtı bulunmaktadır. SFHS'ler su tablasının üstünde ve çok az altında birikme eğilimindedir. Su ve SFHS'nin kimyasal ve fiziksel özelliklerindeki farklılıklar, sıvılar arasında iki sıvının karışımını engelleyen fiziksel bir ara yüz oluşmasına neden olmaktadır.

SFHS'den etkilenen sahaların araştırılması, yönetimi ve iyileştirilmesi, karmaşıklıkları nedeniyle

zordur (USEPA, 1993; Charbeneau vd., 1995; USEPA, 1996; Tomlinson vd., 2017; Ebrahimi vd., 2019; Boumaiza vd., 2022). Bu zorluklara rağmen, yeraltı SFHS araştırması ve tespitinde birçok başarılı çalışmalar bulunmaktadır. Kirlenmelerin kapsamını, göç modellerini ve SFHS ile kirlenmiş sahaların gelişimini tespit etme yöntemleri genel olarak iki kategori altında sınıflandırılmaktadır. Bunlar, kuyular veya çok seviyeli piyezometreler kullanılarak sıvıların ve toprağın ayrık nokta örnekleme ve yüzey veya sondaj kuyusu jeofizik teknikleri ile dolaylı ölçümdür. Jeofizik teknikler, SFHS ile kirlenmiş sahaların hasarsız bir şekilde incelenmesi için fırsatlar sunmaktadır.

Direnç, İndüklenmiş Polarizasyon, Elektromanyetik İndüksiyon, GPR ve Manyetik Duyarlılık ve diğerleri gibi farklı jeofizik yöntemlerle SFHS'nin doğrudan ve dolaylı tespiti mümkündür. Bu tespit, SFHS'nin türüne ve miktarına, toprak malzemesine (kil içeriği gibi), sulu faz dağılımına ve iyonik güce bağlıdır (Monier - Williams, 1995). Genel olarak, elektriksel iletkenlik ve GPR, kimyasal bileşiklerin neden olduğu toprak iletkenliğindeki değişiklikleri ölçerek organik atıkların varlığını doğrudan tespit edebilir. Jeofizik yöntemlerin kirlenmiş sahalarındaki organik atıkları tespit etme, tanımlama ve haritalama kabiliyeti kirlenmenin derinliğine bağlıdır. Ayrıca, jeofizik yöntemler kullanılarak daha küçük atık konsantrasyonları tespit edilebilir (USEPA, 2000; Arato vd., 2014; Ameen vd., 2014).

GPR'nin SFHS'nin haritalanmasında başarılı olduğu kanıtlanmış ve organik atıkları tespit etme kabiliyeti açısından elektriksel yöntemlerden sonra ikinci sırada yer almaktadır (Atekwana ve Atekwana, 2010). Yeni kirlenmiş sahalar gelişmiş GPR sinyal genliği ve temiz GPR yansıması üretirken, 'eski' kirlenmeler yüksek iletkenlik veya iletken bölgelerin altında, genellikle akiferlerin tepesinde GPR yansıma sinyali soğurulması ile tanımlanmaktadır. Yansıma bölgesindeki veya genlik soğurulma bölgesindeki azalmanın bir diğer nedeni de SFHS'lerdeki uçucu bileşenlerden kaynaklanan buhar basıncındaki artıştır (Olhoeft, 1992; Douglas vd., 1992; Daniels vd., 1995; Grumman ve Daniels, 1995; Maxwell ve Schmock, 1995; Bermejo vd., 1997; Kim vd., 2000; Atekwana vd., 2002; Werkema vd., 2003).

GPR kullanarak SFHS'leri tespit etmek ve izlemek için uygun olduğu bildirilen saha koşulları arasında yoğun atık havuzları, kil içermeyen, granüler topraklar, daha granüler malzemelerde azalan kılcal saçak kalınlıkları, sığ araştırma derinlikleri ve yüzeye yakın bölgede homojenlik bulunmaktadır (Olhoeft, 1986; Redman vd., 1994; Barber ve Morey, 1994; Grumman ve Daniels, 1995). SFHS atıklarının yeraltı dolaşım eğilimleri, yeraltı jeolojisi ve jeolojik yapıları içeren birkaç faktöre bağlıdır. Mineo vd. (2022)'ne göre, kaya kütlelerinin kırılması ve muhtemelen tektonik kökenli yeraltı yapılarının varlığı, insan faaliyetlerinin neden olduğu dinamik koşullar altında kirlenme zonunun seçici bir yol izlemesine neden olur. Dolayısıyla, atık dolaşımının izlenmesinde yeraltı jeolojisi ve jeolojik yapı oldukça önemlidir. SFHS'nin izleme kuyularına hareketini inceleyen Azimi vd. (2020), yeraltı suyu seviyelerindeki dalgalanmalara maruz kalan SFHS göçünün izlenmesinin karmaşık bir problem olduğunu belirtmiş ve SFHS'nin yeraltı dağılımını anlamak için akifer tane boyutları ve SFHS özellikleri gibi faktörlerin dikkate alınması gerektiğine dikkat çekmiştir.

Olhoeft (1992)'e göre, hidrokarbonların çoğu düşük bağıl dielektrik geçirgenliğe ve yüksek buhar basıncına sahip SFHS'lerdir. Bu SFHS'ler hem doğrudan kalın bir katmanın dielektrik kontrastından yansıma olarak, hem de kılcal saçakların düzleşmesi veya keskinleşmesinden kaynaklanan su tablası yansımasındaki bir değişiklik (genellikle daha yüksek yansıma) nedeniyle GPR ile tanımlanabilir. Yakın yüzeydeki SFHS'lerden gelen yansımalar, SFHS'ler ile ana malzeme arasındaki geçirgenlik kontrastının bir fonksiyonudur (Daniels vd., 1995). Cassidy (2007), herhangi bir SFHS kirlilik sahasında bir dizi GPR yanıtı bulmanın yaygın olduğunu, gölge bölgelerin 'parlak nokta' yansımaları ile çakıştığını ve sinyal azalmasının saha üzerinde önemli ölçüde değiştiğini belirtmiştir. Cassidy (2007)'nin bulguları, en yüksek sinyal soğurulmasının ya karışık faz ya da biyolojik olarak ayrılmış SFHS'lerin kirlenmiş gözenek ve yeraltı suyuyla bir arada bulunduğu lekeli bir bölge ile ilişkili olduğunu göstermektedir. Bertolla vd. (2014), petrol kirliliğini izlemek için GPR kullanımının etkinliğini test etmek amacıyla

kontrollü koşullarda bir deney gerçekleştirdikleri bir çalışma yapmıştır. Elde ettikleri sonuçlar, GPR'nin doymamış (kuru) kumdaki SFHS bulutunu izlemede etkili olmadığını, ancak doymuş (ıslak) kumda etkili olduğunu göstermiştir. Kirlenme bulutunu tespit etme kabiliyetinin suya doymuş kumun elektromanyetik özellikleri ile yeraltı suyu seviyesinde yüzen petrol SFHS'si arasındaki daha yüksek kontrasttan kaynaklandığı sonucuna varmışlardır. GPR verilerinin elde edilmesinin bir yağış döneminden kısa bir süre sonra gerçekleştirilmesini önermişlerdir.

AMY yaygın bir atık olmasına rağmen, AMY ile kirlenmiş toprakların ve akiferlerin tespiti, haritalanması ve izlenmesine yönelik araştırmalar şimdiye kadar göz ardı edilmiş ve ihmal edilmiştir. Nazifi vd. (2022) ve Lago vd. (2009), AMY kirliliğini haritalamak ve tanımlamak için jeofizik yöntemler kullanan yayınlanmış çalışmalardır. Nazifi vd. (2022) AMY kirliliğinin gelişimini izlemek için Elektrik Rezistivite Tomografi (ERT) yöntemini kullanırken, Lago vd. (2009) olgunlaşmış AMY atık sahasını haritalamak için GPR ve ERT kullanmıştır. Elde ettikleri sonuçlar, atık sahasının altındaki AMY'nin mikrobik bozunmaya uğradığını ve radargramlarının yüksek iletkenlik bölgesi veya iletken bölgelerin altındaki GPR yansıma soğurulması ile tanımlandığını ortaya koymuştur. Bu makalede, laboratuvar ortamında özel olarak tasarlanmış bir deney tankındaki AMY kirliliğinin zaman serili GPR kullanılarak 26 hafta boyunca incelenmesi rapor edilmektedir. Bu araştırmanın amaçları, kumlu bir ortamda AMY kirliliğini tespit etmek, atık maddenin göçünü zaman serili GPR kullanarak izlemek ve haritalamaktır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Atık Madde

Deney düzeneğini kirletmek için AMY kullanılmıştır. Yeni motor yağı ve AMY, SFHS olarak sınıflandırılır. SFHS'ler sudan daha az yoğun olan ve suyla karışmayan hidrokarbonlardır. SFHS'ler, yeraltında bulunan ve toprak ile yeraltı suyunu kirleten en yaygın organik atık maddelerdir (Tomlinson vd., 2017; Newell, 1995). AMY, yüksek ve düşük (C15-C50) moleküler ağırlıklı aromatik ve alifatik hidrokarbonlar, yağlama katkı maddeleri,

metaller ve çeşitli organik ve inorganik bileşiklerin bir karışımıdır (ATSDR, 1997). AMY'nin kimyasal bileşimi büyük ölçüde değişir ve yakıta eklenen katkı maddelerine bağlıdır. Genel olarak tam sentetik yağ, sentetik karışım veya yarı sentetik yağ, mineralli veya konvansiyonel yağ ve son olarak yüksek performanslı yağ olmak üzere dört tip motor yağı vardır.

Carey (1998), motor yağlarının oda sıcaklığındaki dielektrik sabitinin 2,1 ila 2,8 arasında değiştiğini bildirmiştir. Kardos ve Pietrikova (2016) yeni ve kullanılmış motor yağlarının dielektrik sabitinin sıcaklığa bağlı olarak 2,1 ila 2,4 arasında değiştiğini bildirmiştir. Dielektrik sabiti ayrıca yağın viskozitesine, parafinik veya naftenik içeriğine ve katık paketine de bağlıdır. Motor yağının viskozitesi sıcaklığa bağlıdır ve sıcaklık arttıkça viskozite azalmaktadır (Kardos ve Pietrikova, 2016).

Bu deneyde kullanılan AMY atık maddesi, çeşitli kullanılmış motor yağlarının bir karışımıdır. Kalsiyum, Çinko, Fosfor vb. gibi bazı elementler de içermektedir. Yağın 15°C'deki özgül ağırlığı 877,9 kg/m³ ve 40°C'deki kinematik viskozitesi 78,03 mm²/s'dir. AMY'nin kimyasal ve fiziksel özellikleri hakkında daha fazla bilgi için Çizelge 1'e bakınız.

2.2. Deney Düzenegi

Deney, özel olarak tasarlanmış pleksiglas bir tankta gerçekleştirilmiştir. Şekil 1'de gösterilen tank üç hazneden oluşmaktadır. Birinci ve üçüncü hazneler 10 cm x 60 cm x 50 cm boyutlarındadır ve sırasıyla su girişi ve su çıkışı içindir. İkinci (orta) hazne 270 cm x 60 cm x 50 cm boyutlarında olup kumu barındırmaktadır.

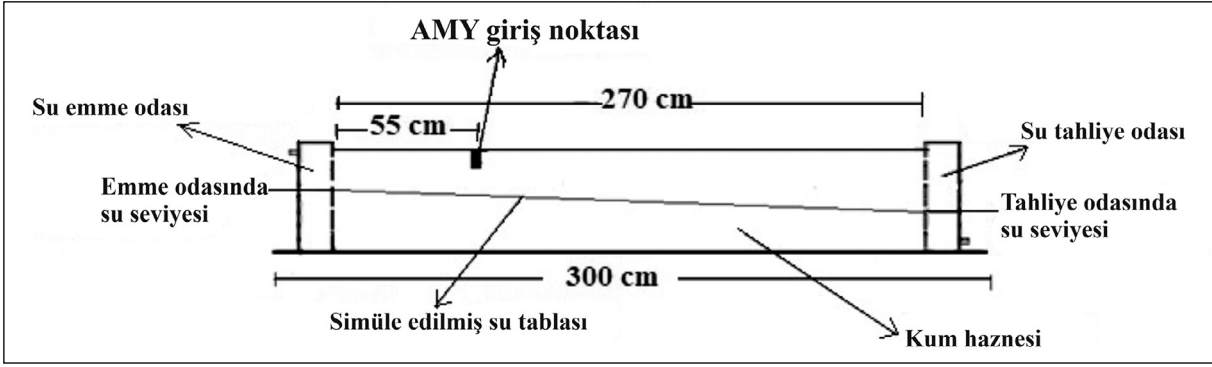
Tank (kum haznesi) tipik olarak Sakarya nehri kıyısında bulunan temiz bir kumla (Şekil 2) doldurulmuştur. Kum, doymuş ve doymamış bölge olarak modellenmiş ve kum modelinin derinliği tankın tabanından itibaren yaklaşık 45 cm olarak ayarlanmıştır. Musluk suyu tanktan akıtılmış ve giriş haznesindeki ve çıkış haznesindeki su seviyeleri sırasıyla 25 cm ve 15 cm sabit yükseklikte tutulmuştur.

Elek analizi standartlarına göre kumun %1,06'sı çok ince kum taneciklerinden, %72,05'i ince ve orta kum taneciklerinden ve %26,90'ı çakıldan oluşmaktadır. Kum, az miktarda çakıl içeren, iyi ayrılmış, temiz, düzgün bir kum olarak yorumlanmıştır.

Düzenek ilk olarak 15 cm derinlikteki bir çukur aracılığıyla 1,5 litre AMY ile kirletilmiştir. Ancak daha sonra atık maddenin tankın çıkış ucuna kadar

Çizelge 1- Deneyde kullanılan AMY'nin fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları.

Ölçülen Parametreler	Uygulanan Yöntem	Sonuçlar	Birimler
Metaller			
Demir	IP 501	59	mg/kg
Nikel	IP 501	4.2	mg/kg
Vanadyum	IP 501	<1	mg/kg
Alüminyum	IP 501	14	mg/kg
Kalsiyum	IP 501	2424	mg/kg
Çinko	IP 501	1170	mg/kg
Fosfor	IP 501	951	mg/kg
Silika	IP 501	11	mg/kg
Sodyum	IP 501	15	mg/kg
Karbon Kalıntı Yüzdesi Ağırlık (Mikro Yöntem)	TS EN ISO 10370	2.27	(m/m) %
Su içeriği Yüzdesi (Ağırlık)	TS EN 1428	0.1	(v/v) %
Toplam Asidite	ASTN D 664	4.46	mgKOH/g
API, yerçekimi/ağırlık/yoğunluk (60°F)	TS 1013 EN ISO 3697	29.6	API
15,0 °C'de özgül ağırlık		877.9	kg/m ³
40,0 °C'de Kinematik Viskozite	TS EN ISO 3104	78.03	mm ² /s



Şekil 1- Deney için kullanılan pleksiglas tankın yandan görünümü (enine kesit).



Şekil 2- Tankın üç haznesini ve profil çizgilerini (sarı çizgiler) gösteren pleksiglas tankın görüntüsü.

ilerlemesi için yeterli olmadığını fark edilmiştir. Bu nedenle, ilk kirlenmeden 1 hafta sonra, mevcut AMY'ye bağlı olarak, kumun aynı noktasına 2,5 litre daha AMY enjekte edilerek toplam 4 litreye ulaşılmıştır.

2.3. GPR Veri Toplama ve İşleme

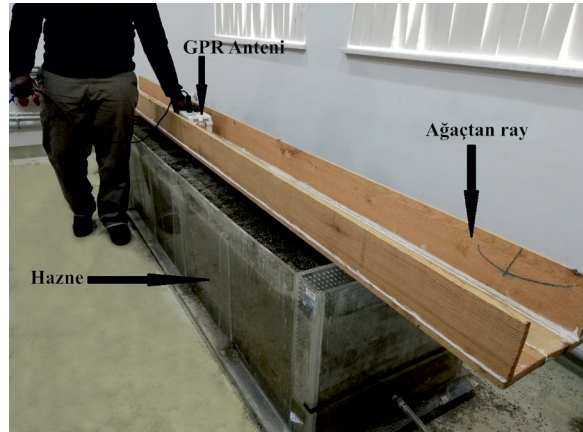
GPR, yer altındaki yüksek frekanslı (10 MHz ila 2 GHz) EM dalgalarının iletimini ve yansımalarını kullanan bir jeofizik yöntemdir. GPR sinyali, dielektrik geçirgenlik ϵ , elektrik iletkenliği σ ve manyetik geçirgenlik μ gibi toprağın özelliklerine bağlıdır (Knight, 2001). Temel prensipler hakkında daha fazla bilgiyi, Daniels vd. (1988), Davis ve Annan (1989); Knight (2001) yayınlarında bulabilirsiniz.

GPR araştırması Zond - 12e GPR advanced/ gelişmiş (Radar System Inc./Radar Sistemi AŞ) sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Beş grup GPR verisi toplanmış ve her veri grubu sekiz profilden (profillerin konumları için bkz. Şekil 2) ve toplamda

40 GPR profilinden oluşmuştur. Bunlar yaklaşık 92 m GPR profil verisi içermektedir. Veriler, her profil arasında 5 cm boşluk bırakılarak sekiz profilden oluşan gruplar halinde elde edilmiştir. Şekil 3, veri toplama sırasında çekilen bir fotoğrafı göstermektedir. Veriler, ilk kirlenmeden önce (26.02.2020), 1 saat sonra (26.02.2020), iki hafta sonra (04.03.2020), 4 hafta sonra (26.03.2020) ve 26 hafta sonra (19.08.2020) elde edilmiştir.

Veriler korumalı 2 GHz Zond anteni ile toplanmıştır ve toplama parametreleri 1024 numune/iz ve 40 tarama hızıdır. Anten, Şekil 3'te görüldüğü gibi veri toplama sırasında ahşap bir ray üzerine yerleştirilmiştir. Ahşap ray (Şekil 3) verilerin tekrar edilebilmesi için yardımcı olmuştur (Bertolla vd., 2014).

Veriler 0 ile 50 ns'ye (nanosaniye) eşdeğer olan 0 ile 1,88 m zaman aralığında kaydedilmiştir. Ancak bazı ölçümler 1,88 m'den biraz daha azdır. Sinyal-gürültü oranını iyileştirmek ve görselleştirmeyi



Şekil 3- Veri toplama sırasında pleksiglas tank, ahşap ray ve GPR anteni gösteren görüntü.

geliştirmek için veri işleme gerçekleştirilmiştir. Veri toplama ve veri işleme Prism 2/Prizma 2 yazılımı (Radar System Inc./Radar Sistemi AŞ) kullanılarak yapılmıştır. Veri işlemenin ilk adımı, AMY kirlenmesinden önce elde edilen veri setinin (bu veriler arka plan verileri olarak adlandırılır) kirlenmeden sonra elde edilen tüm veri setlerinden çıkarılmasıdır. Radar verilerinin işlenmesinde sıfır zaman, arka plan çıkarma, yatay alçak geçiren (LP) filtre, kayma zamanı düzeltmesi, göç Stolt (F-K) yöntemi ve otomatik kazanç kontrolü kullanılmıştır. Ahşap rayın ve ahşap ray ile kum yüzeyi arasındaki havanın etkisini ortadan kaldırmak için sıfır zaman uygulanmıştır. Radargramın arka planını etkin bir şekilde bastırmak için arka plan kaldırma işlemi uygulanmıştır. Hızlı sinyal değişkenlerinin bastırılması için yatay LP filtresi uygulanmıştır. Kayma zamanı düzeltmesi, sanki sinyal antenlerin ortasında bulunan bir noktaya yayılıyor ve girintiliymiş gibi bir profili modele geri kazandırmaktadır. Göç işleminde Prism 2/Prizma 2 yazılımının sağladığı Stolt (F-K) göç yöntemi kullanılmıştır. Deney tankı içindeki atıkların geçirgenliğinin belirlenmesinde hiperbol tekniği kullanılmıştır. Hiperbol tekniğinden, radargramın kirlenmiş bölümünün geçirgenliği 2,07 olarak verilmiştir. Kirlenmiş kesit boyunca sinyalin hızı 20,16 cm/ns olarak verilmiştir. Yazılım tarafından önerilen hiperbolün olası çevreleyen ortamı kar, buz, donmuş petrol ve petrol ürünlerinden oluşmaktadır. Yazılım tarafından önerilen petrol ürünü, toprağın AMY ile kirlenmiş olması nedeniyle 2,07 geçirgenlik değerinin iyi bir tahmin olmasından kaynaklanmıştır. Elde edilen geçirgenlik değeri geçiş adımında kullanılmıştır. Her ayrı iz için pencere genişliği dahilinde otomatik kazanç kontrolü uygulanmıştır. Bu izdeki tüm sinyalleri dengelemek için kullanılmış ve sinyalleri daha görünür hale getirmiştir.

2B profillerin hizalanması ve 3B radargramlara dönüştürülmesi için Prism 2/Prizma 2 programı kullanılmıştır. Sekiz GPR profilinden oluşan beş gruptan beş adet 3B radargram oluşturulmuştur. 3B GPR görselleştirmesi için Easy Prism yazılımı (Radar Systems Inc./Radar Sistemi AŞ) kullanılmıştır.

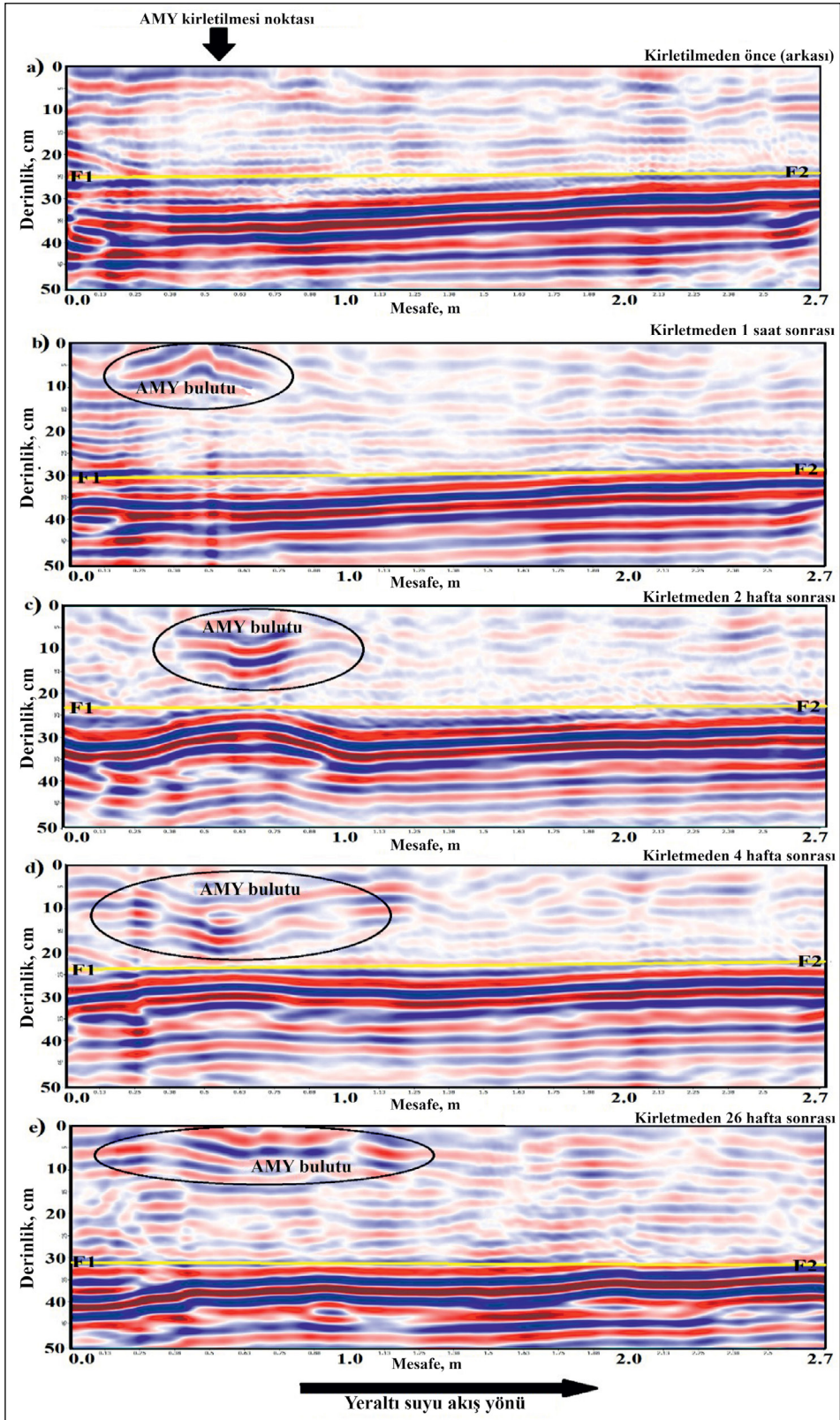
3. Sonuç ve Tartışma

Profil 5'ten alınan GPR radargramlarının 2B

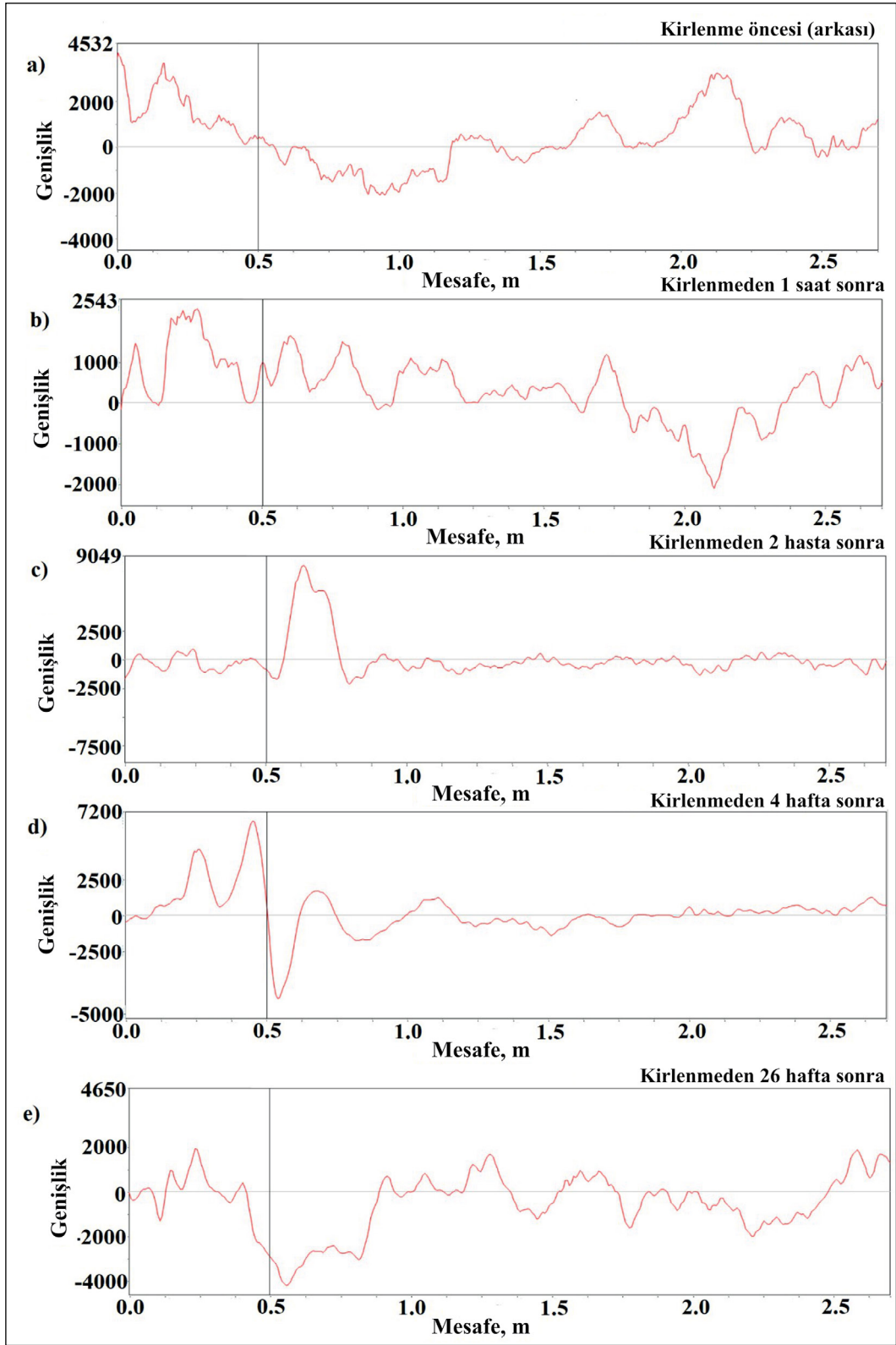
zaman serili dikey görünümü (Şekil 4 - XZ düzlemi), 15 cm derinlikteki 1B zaman serili yatay sinyal genliği grafikleri (Şekil 5), 50 cm noktasındaki 1B zaman serili dikey sinyal genliği ve soğurulma grafikleri (Şekil 6) ve 3B kesit radargramları (Şekil 7) seçilmiş ve bu makalede sunulmuştur. Şekil 4, 5, 6 ve 7'de gösterilen radargramlar sırasıyla arka plan, 1 saat, 2 hafta, 4 hafta ve ilk kirlenmeden 26 hafta sonrasına karşılık gelen a, b, c, d ve e olarak etiketlenmiştir.

Hem Şekil 4 hem de 7'den bir dizi yatay yansıtıcı (reflektör) görülebilmektedir ve Şekil 4'te F1 - F2 etiketli sarı çizgilerle gösterilmiştir. Yatay reflektör seti, simüle edilen yeraltı suyu seviyesine karşılık gelmektedir ve yaklaşık 24 cm ila 46 cm arasındadır. Reflektör, radargramları üst doymamış ve alt doymuş kısımlar olmak üzere iki kısma ayırmaktadır. Güçlü reflektörlere öncelikle doymamış kumdan doymuş kumlara geçişte, geçirgenliğin keskin değişimi neden olmaktadır. SFHS'ler olarak AMY, kapiler saçakların üzerindeki geçiş bölgesinden su ile yer değiştirebilir ve bu nedenle suya doymuş bölgenin tepesinde keskin bir arayüz oluşturabilirler (de Castro ve Branco, 2003). Şekil 4c ve 4d'deki yatay reflektörlerin yükselmesinin nedeni bu olabilir. İlk kirlenmeden bir saat sonra elde edilen sonuçların (Şekil 4b ve 7b) mesafe ekseninde 0,13-1,0 m noktaları arasında yeraltı suyu seviyesinde hafif bir bozulma gösterdiği gözlenmiştir. Yeraltı suyundaki bozulma, ilk kirlenmeden 2 hafta sonra, 2,5 litrelik ek bir kirlenmenin ardından çok daha belirgin hale gelmiştir (Şekil 4c ve 7c). AMY hem dikey hem de yatay olarak dolaşmış olabilir, bunun nedeni Şekil 7c ve 7d'nin hem dikey hem de yatay katmanında ortaya çıkan anomalilerdir. Ayrıca, daha sonra yeraltı suyu seviyesi reflektörünün arka plana kıyasla çok fazla bozulmadığı da görülebilmektedir. İlk AMY kirlenmesinden kaynaklanan bulut Şekil 4b'de derinlik ekseninde 0 - 17 cm arasında ve mesafe ekseninde 0,13-0,88 m arasında görülebilmektedir. Şekil 4c-d'deki anomaliler Şekil 4b'dekinden çok daha belirgindir. Bu anlaşılabilir bir durumdur, çünkü Şekil 4c-d'deki radargramlara karşılık gelen bulut Şekil 4b'dekinden daha büyüktür.

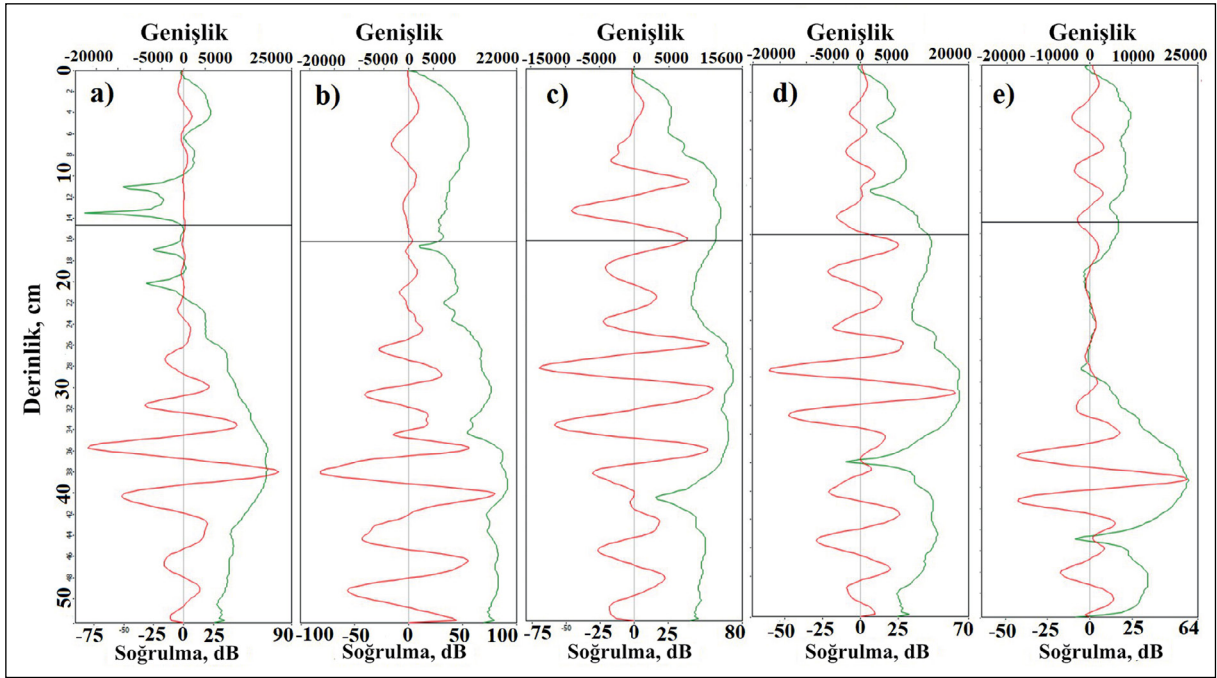
Şekil 7'de 3B zaman serili radar programlarında gösterilen yatay katman 25 cm derinlikte yer almaktadır. Bu, tank yüzeyinden 15 cm uzaklıkta olan kirlenme çukurunun 10 cm aşağısındadır. Arka plan



Şekil 4-5 numaralı profilden (XZ düzlemi) alınan GPR radargramlarının 2B zaman serili dikey görünümü. F1-F2 olarak belirtilen sarı çizgi doymamış ve doymuş kum arasındaki sınırları, siyah daireler AMY bulutunun uzantılarını, a), b), c), d) ve e) sırasıyla kirlenmeden önceki, 1 saatlik, 2 haftalık, 4 haftalık ve ilk kirlenmeden 26 hafta sonraki verilerin radargramlarını göstermektedir.



Şekil 5 - 15 cm derinlikte 1D zaman serili yatay sinyal genlik grafikleri. a), b), c), d) ve e) sırasıyla kirlenmeden önce, 1 saat, 2 hafta, 4 hafta ve ilk kirlenmeden 26 hafta sonra elde edilen radargramlardır.



Şekil 6 - 50 cm noktasındaki 1D zaman serili dikey sinyal genlik ve soğurulma grafikleri. Beyaz grafikler sinyal genliklerini, kırmızı grafikler ise sinyal soğurulmalarını göstermektedir. a), b), c), d) ve e) sırasıyla kirlenmeden önce, 1 saat, 2 hafta, 4 hafta ve ilk kirlenmeden 26 hafta sonra elde edilen radargramlarıdır.

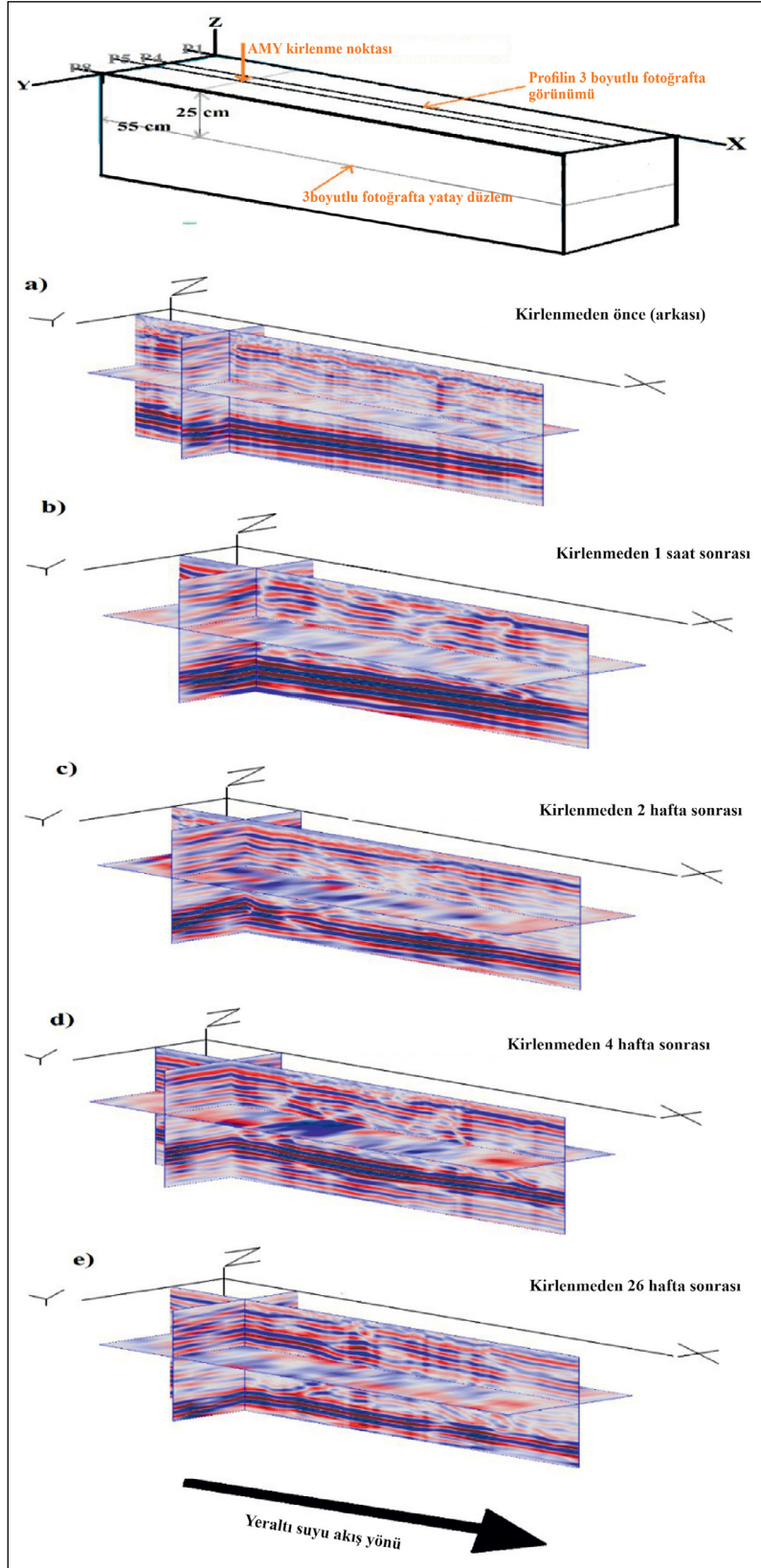
radargramı (Şekil 7a) ile karşılaştırıldığında, Şekil 7b'de (ilk kirlenmeden 1 saat sonra) küçük bir anomali olduğunu görebiliriz. Anomali, 1,5 litrelik ilk AMY kirlenmesinden 2 hafta ve 2,5 litre ek bir kirlenmeden bir hafta sonra elde edilen sonuçları gösteren Şekil 7c'de çok daha fazladır. AMY daha da aşağıya ve yatay olarak ilerlemiş ve Şekil 7d'nin hem yatay hem de dikey kesitinde görülmüştür. Hem Şekil 5e hem de Şekil 7e'deki anomaliler, kuru kuma kıyasla farklı dielektrik sabite sahip olan AMY bulutuna dayandırılmaktadır. Şekil 7a-d'deki sonuçlara ait veriler, sıcaklığın nispeten düştüğü ve vadoz zonun çok nemli olduğu kış sonu ve ilkbahar başında (Şubat ve Mart ayları arasında) toplanmıştır. Ancak Şekil 7e'deki sonuçların verileri, sıcaklığın Kış ve İlkbahar'a kıyasla çok daha yüksek olduğu Yaz (Ağustos) aylarında toplanmıştır. Yüksek sıcaklık üst vadoz zondaki buharlaşmayı artırarak AMY kalıntısının katılmasına ve kumun Şekil 7a-d'deki sonuçlara kıyasla daha kuru olmasına neden olabilmektedir.

Zaman serili 3B radargramlar (Şekil 7) AMY'nin hem dikey hem de yanal göçünü açıkça göstermektedir. 3B radargramlar 2B radargramlarla tutarlıdır. Hem 2B hem de 3B sonuçlar AMY'nin başlangıçta dikey

(ağırlıklı olarak) ve yatay olarak hareket ettiğini göstermektedir. Kirlenme aşağıya doğru süzüldükten sonra, yanal göç baskın hale gelmiştir.

AMY'nin homojen geçişini arttırmak için kum homojen bir şekilde serilmiş ve tank içinde yatay olarak düzeltilmiştir (Şekil 2'de gösterildiği gibi), ancak Şekil 4b-e ve Şekil 7b-e'den de görebileceğimiz üzere AMY bulutunun geçişi homojen değildir. Benzer durum Bano vd. (2009) tarafından da rapor edilmiştir.

Kirlenme alanının altında GPR sinyal genliğinin zaman içinde genellikle azaldığı gözlemlenmiştir (Şekil 5 ve 6). Şekil 4c-e ve Şekil 7c-e'den, Şekil 5 ve 6'da da görüldüğü gibi, kirlenme noktasının altındaki sinyal genliğinde kademeli bir düşüş görülmektedir. Bu gözlem Bertolla vd. (2014); Hagrey (2004); Bano vd. (2009); Kim vd. (2000); de Castro ve Branco (2003); Bermejo vd. (1997); Sulba Rao ve Chandrashekhan (2014) gibi birçok araştırmacı tarafından da yapılmıştır. Deney düzeneğinin doymamış kısımları (Şekil 4 ve 7) düşük yansıtma özelliğine sahip olup, çok da ıslak değildir. Kirlenme noktasının hemen altında görülen yansımalar vadoz



Şekil 7 - Profil 4'ün kesitini ve 25 cm derinlikten alınan yatay katmanı gösteren GPR radargramlarının 3B kesitsel zaman serili görüntüsü. P1, P4, P5, P8 sırasıyla 1, 4, 5 ve 8 numaralı profillerin konumlarıdır. a), b), c), d) ve e) sırasıyla, kirlenmeden önce, 1 saat, 2 hafta, 4 hafta ve ilk kirlenmeden 26 hafta sonra alınan radargramlardır.

zon içindeki AMY ile ilişkilidir. AMY'nin viskoz yapısı nedeniyle, petrolün su tablasına ulaşana kadar dikey yönde yavaşça ilerlemesi ve bu sırada kumun, petrolün bir kısmını emmesi mümkündür. Zaman geçtikçe, vadoz zon içerisindeki kirlenmiş alan, GPR sinyalinde azalma (yansımanın azalması) veya gölge zonuna dair kanıtlar göstermektedir. Ayrıca, düzeneğin doymuş kısmındaki bozulma zamanla daha küçük hale gelmiştir.

Jeofizik literatürde, yeni kirlenmiş sahalar ve laboratuvar deneyleri, güçlü GPR sinyal genliği ve temiz GPR sonuçları üretirken; eski kirlenmeler, genellikle akiferin tepesinde, iletken bölgelerin altında yüksek iletkenlik gölgesi veya GPR yansımasının azalması ile tanımlanmaktadır (Atekwena ve Atekwena, 2010). Bu deneyden elde edilen bulgular, nispeten kısa süreli olması (26 hafta) ancak eski kirlenme özellikleri göstermesi bakımından yukarıdaki ifadelerle bir istisna teşkil etmektedir. Burada rapor edilene benzer bir çalışma, Bertolla vd. (2014) tarafından gerçekleştirilmiş ve ıslak kumda alkil benzenin dolaşımı ve özellikleri incelenmiştir. Alt vadoz zonunun sinyal genliğinde hafif bir azalma olduğunu belirtmişlerdir. Campbell vd. (1996) ve DeRyck vd. (1993) parlak noktalarla ilişkili kirlenme bölgelerinin süzülen benzin mercerlerine işaret ettiğini bildirmiştir. Parlaklık, artan genlikten kaynaklanmaktadır (Campbell vd., 1996). Atekwena ve Atekwena (2010), ~80 gibi nispeten yüksek bir dielektrik geçirgenliğe sahip suyun, 2 gibi nispeten düşük bir dielektrik geçirgenliğe sahip benzinle yer değiştirmesinin, Campbell vd. (1996)'nin çalışmalarında ortaya konduğu gibi, parlak noktayla birlikte yüksek hızlı bir GPR katmanıyla sonuçlandığını öne sürmüştür.

Deney düzeneğinin kirlenmiş kısmından gelen GPR sinyallerinin azalmasının sonuçlarını, AMY atık maddesinin devam eden biyolojik bozunmasının sonuçları olarak yorumlanmıştır. Mikrobik faaliyetlerin elde edilen sonuçlara yol açmış olabilir, çünkü deney düzeneği doğal kum (mikrobik büyüme için iyi bir ortam), sürekli tatlı su akışı (besin kaynağı) ve bir karbon kaynağından (AMY) oluşmaktadır. Ayrıca, düzeneğin temizlenmesi sırasında, kirlenmiş kısımlardan kötü/çürük bir koku gelmekteydi. Bu koku kirlenmeden önceki AMY'nin yağlı kokusuna benzemiyordu.

Deneyimiz laboratuvar içindeki atmosfer koşullarının etkisine açık bir şekilde yürütülmüştür. Deneyimiz Kış (26.02.2020) ve Yaz (19.08.2020) ayları arasında gerçekleşmiştir ve sıcaklık değişimleri düzeneği etkilemiştir. Zhou ve Crawford (1995)'a göre, artan sıcaklık kısa zincirli alkanların ve diğer düşük moleküler ağırlıklı hidrokarbonların buharlaşmasını artırmaktadır. Ayrıca sıcaklıktaki artış hidrokarbonların viskozitesini ve toprak suyu fazındaki çözünürlüklerini de azaltmaktadır. Daha yüksek sıcaklık mikroorganizmalar için solvent/çözücü tipi membran/zar zehirlenmesine neden olmaktadır (Atlas, 1975). AMY düşük ve yüksek (C15-C50) moleküler ağırlıklı alifatik ve aromatik hidrokarbon, yağlama katkı maddeleri, metaller ve çeşitli organik ve inorganik bileşiklerin komplike bir karışımıdır (ATSDR,1997). Sıcaklıktaki artış AMY'nin viskozitesini azaltır ve AMY'nin düşük molekül ağırlıklı hidrokarbon bileşenlerinin buharlaşmasına neden olabilir. Ancak bu açıklama, GPR sinyalinin neredeyse arka plan seviyelerine düşmesini ve temizlik sırasında kirlenmiş kumun kötü/çürük kokusunu açıklamak için tatmin edici değildir.

Blume vd. (2002) tarafından mikrobik faaliyetlerin yüksek sıcaklıkta (Yaz), düşük sıcaklığa (Kış) kıyasla arttığı bildirilmiştir. Zekri ve Chaalal (2005), sıcaklıktaki artışın mikrobik büyümeyi arttırdığını ve bunun da hidrokarbonların bozunma süreçlerini arttırdığını tespit etmiştir. Deney boyunca sürekli tatlı su akışı kirlenmiş bölgeye besin sağlamış ve bu da AMY'nin biyolojik bozunmasının hızlanmasına yardımcı olmuş olabilir. Musluktan gelen tatlı su oksijen içerir ve çözücü olarak su, kumdaki azot ve fosfor gibi diğer besleyici maddeleri çözmüş ve mikropların beslenmesini ve hızlı üremesini sağlamış olabilir. Zhou ve Crawford (1995)'a göre, buhar ya da çözelti halinde sağlanan besinler topraktaki hidrokarbonların biyolojik olarak bozunmasını artırmakta ve uygun miktarda besin topraktaki hidrokarbon biyolojik bozunmasını teşvik etmektedir.

GPR sinyalinin zamanla azalmasının muhtemel açıklaması; mikropların AMY'de bulunan organik karbonu, tatlı su ve minerallerden itibaren çözülmüş elementlerden gelen besin maddelerini kullanmış olabileceğidir. Organik asitler (karbonik asitler) ve

iyonik bileşenler gibi metabolizma yan ürünlerinin oluşumu, kirlenmiş ortamın fiziksel özelliklerinde ve gözenek sıvısı kimyasında değişikliklere yol açmış olabilir, bu da ortamın dielektrik geçirgenliğini değiştirir ve ortamın elektrolitik ve ara yüzey iletkenliğini yükseltmektedir. GPR sinyalinin azalmasının ve penetrasyon derinliğinin elektrik iletkenliğine ve ortamın dielektrik geçirgenliğine bağlı olduğu ve dolayısıyla dielektrik geçirgenlikteki değişimin ve iletkenlikteki artışın sinyal azalmasında değişikliklere neden olduğu bilinmektedir. Bunlar GPR sinyalinin zamanla azalmasına yol açmış olabilir. Bu çalışmanın bulguları ve sonuçlarının yorumlanması, bu konuda araştırma yapan birçok yazarın bulguları ile örtüşmektedir. Sauck vd. (1998); Bradford (2007); Cassidy (2007), Lane vd. (2006); Atekwana ve Atekwana (2010), Schilling vd. (2010), SFHS'nin biyolojik bozunması sırasında çözünmüş iyonik bileşenlerdeki artışın elektriksel iletkenlikte artışa neden olduğunu ve bunun da zamanla GPR sinyalinin azalmasına yol açtığını gösteren verilerle hipotezi desteklemektedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışma, AMY ile kirlenmiş ortamların GPR tepkilerinin anlaşılmasında ilk adımdır. Zaman serili GPR'nin bir laboratuvar deney ortamında uygulanması, kumlu bir ortamda AMY tespiti, göçünün izlenmesi ve haritalanması için çok iyi sonuçlar vermiştir. Bildiğimiz kadarıyla GPR, AMY kirlenmesini laboratuvarında deneysel bir düzenele incelemek için ilk kez kullanılmaktadır. AMY bulutlarının varlığı, geliştirilmiş yansıtma özelliğine sahip yüksek genlikli sinyal olarak tanımlanmıştır. Ancak zamanla sinyal daha düşük genliklere inmiş ve bunun da vadoz zondaki AMY'nin bir kısmının buharlaşmasından ve AMY'nin biyolojik bozunmasından kaynaklı olduğu görülmüştür.

Bu makalede sunulan sonuçlar, kumlu bir ortamda AMY'nin GPR sinyal sonuçlarının zamanla değiştiğini göstermiştir. Ayrıca bulgularımız, AMY ile kirlenmiş sahaların tanımlanmasında GPR'nin faydasını göstermektedir. Bu çalışmanın sonuçları, AMY kirlenmeleri ile ilişkili çevresel sorunların ele alınmasında GPR jeofizik tekniğinin etkin olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Katkı Belirtme

Yazarlar, bu çalışmayı destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu'na [TÜBİTAK (Proje No: 119Y193)] ve Sakarya Üniversitesi Araştırma Fonu'na [BAPK (Proje No: 2019-7-25-37)] teşekkür etmektedir. Yazarlar, bu deney için laboratuvar alanı sağlayan Sakarya Üniversitesi Araştırma, Geliştirme ve Uygulama Merkezi'ne (SARGEM) minnettardır. Bu çalışmada kullandığımız AMY'nin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesi için TÜPRAŞ İzmit Rafinerisi Laboratuvarları personeline teşekkür ederiz. Dr. Halim MUTLU'ya editörlük işlemleri için ve anonim hakemlere makaleyi geliştiren yapıcı önerileri için teşekkür ederiz.

Araştırmaya katkıda bulunanlar: Hafız MOHAMMED NAZİFİ çalışmanın konsept ve tasarımına katkıda bulunmuş ve Prof. Dr. Levent GÜLEN tarafından denetlenmiştir. Veri toplama Hafız MOHAMMED NAZİFİ, Ertuğrul GÜRBÜZ ve Ertan PEKŞEN tarafından gerçekleştirilmiştir. Verilerin analizi ve yorumlanması Hafız MOHAMMED NAZİFİ tarafından gerçekleştirilmiş ve Levent GÜLEN ve Ertan PEKŞEN tarafından kontrol edilmiştir. Makalenin ilk taslağı Hafız MOHAMMED NAZİFİ tarafından yazılmış ve tüm yazarlar makalenin önceki versiyonları hakkında yorumda bulunmuştur. Tüm yazarlar makalenin son halini okumuş ve onaylamıştır.

Değinen Belgeler

- Abioye, O. P., Agamuthu, P., Abdul Aziz, A. R. 2012. Biodegradation of used motor oil in soil using organic waste amendments. *Biotechnology Research International*, 8.
- Ameen, N. N., Klueglein, N., Appel, E., Petrovský, E., Kappler, A., Leven, C. 2014. Effect of hydrocarbon-contaminated fluctuating groundwater on magnetic properties of shallow sediments. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 58(3), 442-460.
- Arato, A., Wehrer, M., Biró, B., Godio, A. 2014. Integration of geophysical, geochemical and microbiological data for a comprehensive small-scale characterization of an aged SFHS-contaminated site. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(15), 8948-8963.
- Atekwana, E. A., Atekwana, E. A. 2010. Geophysical signatures of microbial activity at hydrocarbon contaminated sites: A review. *Surveys in Geophysics*, 31(2), 247-283.

- Atekwana, E. A., Sauck, W. A., Abdel Aal, G. Z., Werkema Jr, D. D. 2002. Geophysical investigation of vadose zone conductivity anomalies at a hydrocarbon contaminated site: A implications for the assessment of intrinsic bioremediation. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 7(3), 103-110.
- ATSDR. 1997. Toxicological profile for used mineral-based crankcase oil.
- Atlas, R., 1975. Effects of temperature and crude oil composition on petroleum Biodegradation. *Applied Microbiology*, 30, 396-403.
- Azimi, R., Vaezihir, A., Lenhard, R. J., Hassanizadeh, S. M. 2020. Evaluation of SFHS behavior in water table inter-fluctuate zone under groundwater drawdown condition. *Water*, 12(9), 2337.
- Bano, M., Loeffler, O., Girard, J. F. 2009. Ground penetrating radar imaging and time-domain modelling of the infiltration of diesel fuel in a sandbox experiment. *comptes rendus Geoscience*, 341(10-11), 846-858.
- Barber, W., Morey, R. 1994. Radar detection of thin layers of hydrocarbon contamination. In *Fifth International on Ground Penetrating Radar* (pp. cp-300). European Association of Geoscientists & Engineers.
- Bermejo, J.L., Sauck, W.A., Atekwana, E.A. 1997. Geophysical discovery of a new SFHS plume at the former Wurtsmith AFB Oscoda, MI. *Ground Water Monitoring and Remediation*, 17, 131-137.
- Bertolla, L., Porsani, J. L., Soldovieri, F., Catapano, I. 2014. GPR-4D monitoring a controlled SFHS spill in a masonry tank at USP, Brazil. *Journal of Applied Geophysics*, 103, 237-244.
- Blume, E., Bischoff, M., Reichert, J.M., Moorman, T., Konopka, A., Turco, R.F. 2002. Surface and subsurface microbial biomass, community structure and metabolic activity as a function of soil depth and season. *Applied Soil Ecology*. 20 (3), 171-181.
- Bradford, J. H. 2007. Frequency-dependent attenuation analysis of ground-penetrating radar data. *Geophysics*, 72(3), J7-J16.
- Boumaiza, L., Chesnaux, R., Walter, J., Lenhard, R. J., Hassanizadeh, S. M., Dokou, Z., Alazaiza, M. Y. 2022. Predicting vertical SFHS distribution in the subsurface under the fluctuating water table effect. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 42(2), 47-58.
- Carey, A. A. 1998. The dielectric constant of lubrication oils. *Computational Systems Incorporated*.
- Campbell, L.D., Lucius, J.E., Maryla, D.P. 1996. Monitoring of a controlled SFHS spill using ground penetrating radar. *The Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, 511-517.
- Cassidy, N. J. 2007. Evaluating SFHS contamination using GPR signal attenuation analysis and dielectric property measurements: Practical implications for hydrological studies. *Journal of Contaminant Hydrology*, 94(1-2), 49-75.
- Charbeneau, R.J., Weaver, J.W., Lien, B.K. 1995. *The Hydrocarbon spill screening model (HSSM) Volume 2: Theoretical Background and Source Codes*. USEPA Publication EPA/600/R-94/039b. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency.
- Daniels, D. J., Gunton, D. J., Scott, H. F. 1988. Introduction to subsurface radar, In *IEE Proceedings F, Communications, Radar and Signal Processing* 135, 4, 278-320.
- Daniels, J. J., Roberts, R., Vendl, M. 1995. Ground penetrating radar for the detection of liquid contaminants, *Journal of Applied Geophysics*, 33(1-3), 195-207.
- Davis, J.L., Annan, A.P. 1989. Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysics Prospect*, 37, 531-551.
- de Castro, D. L., Branco, R. M. G. C. 2003. 4-D ground penetrating radar monitoring of a hydrocarbon leakage site in Fortaleza (Brazil) during its remediation process: a case history. *Journal of Applied Geophysics*, 54(1-2), 127-144.
- DeRyck, S. M., Redman, J. D., Annan, A. P. 1993. Geophysical monitoring of a controlled kerosene spill, In *6th Environmental and Engineering Geophysics Society Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, 5-19, 209.
- Douglas, D. G., Burns, A. A., Rino, C. L., Maresca, J. W. 1992. Study to determine the feasibility of using a ground-penetrating radar for more-effective remediation of subsurface contamination, PB-92-169382/XAB).
- Ebrahimi, F., Lenhard, R. J., Nakhaei, M., Nassery, H. R. 2019. An approach to optimize the location of SFHS recovery wells using the concept of a SFHS specific yield, *Environmental Science and Pollution Research*, 26(28), 28714-28724.
- El-Fadel, M., Houry, R. 2001. Strategies for vehicle waste-oil management: a case study. *Resources, conservation and recycling*, 33(2), 75-91.
- Grumman Jr, D. L., Daniels, J. J. 1995. Experiments on the detection of organic contaminants in the vadose zone. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 1(A), 31-38.
- Hagrey, S. A. 2004. GPR application for mapping toluene infiltration in a heterogeneous sand

- model. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 9(2), 79-85.
- Kardos, S., Pietriková, A. 2016. Evaluation of motor oil characteristics and degradation factors for possibilities of continuous diagnostics, *Acta Electrotechnica et Informatica*, 16(2), 20-24.
- Kim, C., Daniels, J. J., Holt, J. J., Guy, E. D. 2000. A physical model experiment of the GPR response over gasoline, In 13th Environmental and Engineering Geophysics Society Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, 200, 303-310 European Association of Geoscientists and Engineers.
- Knight, R. 2001. Ground penetrating radar for environmental applications. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 29(1), 229-255.
- Lago, A. L., Elis, V. R., Borges, W. R., Penner, G. C. 2009. Geophysical investigation using resistivity and GPR methods: a case study of a lubricant oil waste disposal area in the city of Ribeirão Preto, São Paulo, Brazil. *Environmental Geology*, 58(2), 407-417.
- Lane, J.W., Day-Lewis, F.D., Casey, C.C. 2006. Geophysical monitoring of a field-scale biostimulation pilot project, *Ground Water*, 44(3), 430-443.
- Maceiras, R., Alfonsín, V., Morales, F. J. 2017. Recycling of waste engine oil for diesel production. *Waste management*, 60, 351-356.
- Maxwell, M., Schmock, J. 1995. Detection and mapping of an SFHS plume using GPR: A case study, in proc. of the symposium on the application of geophysics to environmental and engineering problems, Environmental and Engineering Geophysics Society, Englewood, Colorado, p.15-23.
- Mineo, S., Dell'Aera, F.M.L., Rizzotto, M. 2022. Evolution of SFHS contamination plume in fractured aquifers. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81(4), 1-14.
- Monier-Williams, M. 1995. Properties of light non aqueous phase liquids and detection using commonly applied shallow sensing geophysical techniques. *The Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, 1-13.
- Nazifi, H. M., Gülen, L., Gürbüz, E., Pekşen, E. 2022. Time-lapse electrical resistivity tomography (ERT) monitoring of used engine oil contamination in laboratory setting. *Journal of Applied Geophysics*, 104531.
- Newell, C. J. 1995. Light nonaqueous phase liquids. United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Office of Solid Waste and Emergency Response.
- Noln, J.J., Harris, C., Cavanaugh, P.O. 1990. *Used Oil: Disposal Options, Management Practices, and Potential Liability*, third ed. Rockville, MD: Government Institutes.
- Olhoeft, G.R. 1986. Direct detection of hydrocarbon and organic chemicals with ground penetrating radar and complex resistivity, in Proc. of the NWWA/API Conference on Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water - Prevention, Detection and Restoration, Dublin, Ohio, 284-305.
- Olhoeft, G. R. 1992. Geophysical detection of hydrocarbons and organic chemical contamination. In 5th Environmental and Engineering Geophysics Society Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. European Association of Geoscientists & Engineers. 587-595.
- Osweiler, G., Buck, W., Lloyd, W. 1973. Epidemiology of lead poisoning in cattle - a five-year study in Iowa. *Clinical Toxicology*, 6(3), 367-376.
- Propst, T.L., Lochmiller, R.L., Qualis, C.W., McBee, K. Jr. 1999. In situ (mesocosm) assessment of immunotoxicity risks to small mammals inhabiting petrochemical waste sites. *Chemosphere*, 38, 1049-1067.
- Redman, J.D., DeRyck, S.M., Annan, A.P. 1994. Detection of SFHS pools with GPR: theoretical modelling and surveys of a controlled spill, in Proc. of the International Conference on Ground-Penetrating Radar, Kitchener, Ontario, Canada, 1283-1294.
- Sas, B. 1989. Secondary copper deficiency in cattle caused by molybdenum contamination of fodder: A case history. *Veterinary and Human Toxicology*, 31(1), 29-33.
- Sauck, W.A., Atekwana, E.A., Nash, M.S. 1998. High conductivities associated with an SFHS plume imaged by integrated geophysical techniques. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2, 203-212.
- Schillig, P.C., Tsoflias, G.P., Roberts, J.A., Patterson, E.M., Devlin, J.F. 2010. Ground-penetrating radar observations of enhanced biological activity in a sandbox reactor, *Journal of Geophysical Research*, 115, G00G10.
- Sulba Rao Ch., Chandrashekar, V. 2014. Detecting oil contamination by ground penetrating radar around an oil storage facility in Dhanbad, Jharkhand, India. *Journal of Indian Geophysical Union*, 18(4), 448-454.

- Tomlinson, D. W., Rivett, M. O., Wealthall, G. P., Sweeney, R. E. 2017. Understanding complex SFHS sites: Illustrated handbook of SFHS transport and fate in the subsurface. *Journal of Environmental Management*, 204, 748-756.
- US Department of Health and Human Services, Public Health Service PHS, Agency for Toxic Substances and Disease Registry
- USEPA (United States Environmental Protection Agency) 1993. Use of Airborne, Surface, and Borehole Geophysical Techniques at Contaminated Sites.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency) 1996. How to Effectively Recover Free Product at Leaking Underground Storage Tank Sites: A Guide for State Regulators.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency) 2000. Innovations in Site Characterization: Geophysical Investigation at Hazardous Waste Sites.
- Werkema Jr, D. D., Atekwana, E. A., Endres, A. L., Sauck, W. A., Cassidy, D. P. 2003. Investigating the geoelectrical response of hydrocarbon contamination undergoing biodegradation. *Geophysical Research Letters*, 30(12).
- Zekri, A. Y., Chaalal, O. 2005. Effect of temperature on biodegradation of crude oil. *Energy Sources*, 27(1-2), 233-244.
- Zhou, E., Crawford, R. L. 1995. Effects of oxygen, nitrogen, and temperature on gasoline biodegradation in soil. *Biodegradation*, 6(2), 127-140.

