



YER RADARI (GPR) İÇİN 3B SAYISAL MODELLEMEDE FİZİKSEL PARAMETRE ETKİLERİ: DNAPL ÖRNEĞİ

Kerem ÖZKAP*, Ertan PEKŞEN

Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 41380, Kocaeli, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Yer radarı,
Sayısal modelleme,
DNAPL,
gprMax.

Öz

Bu çalışmada, yer radarı (GPR) yönteminin sahadaki performansını doğrudan etkileyen fiziksel parametrelerin radargramlar üzerindeki etkisi üç boyutlu sayısal model kullanılarak irdelemiştir. Sayısal modelde ortam suya doygun kum olarak tasarlanmışken hedef gömülü kütle olarak yer altı suları için büyük tehlike arz eden yoğunluğu sudan fazla kirleticiler (DNAPL) olan Trikloroetilen (TCE), Tetrakloroetilen (PCE), Trikloroetan ve Dikloroetan kullanılmıştır. Kaynak olarak ise sayısal ortamda modellenmiş GSSI marka 1.5GHz merkez frekansına sahip GPR anteni kullanılmıştır. İlk aşamada ortama ait fiziksel parametreler değiştirilmiş, DNAPL kütlelerine ait parametreler ise sabit tutulmuştur. İkinci aşamada ise tam tersi olarak uygulanmıştır. Elde edilen yapay radargram incelendiğinde ortama ait göreceli dielektrik değerinin artışı ile DNAPL kütlelerinden kaynaklanan yansımaların radargramlarda daha geç geldiği gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra TCE'nin kayıtlarda en belirgin yansımalar neden olan ve tespiti en mümkün DNAPL türü olduğu görülmüştür. Elektriksel iletkenlik değerinin kademeli olarak artırıldığı testlerde ise elektromanyetik dalgaları sönmülenerek zayıf yansımalar olarak kayıtlara girmiştir. Manyetik geçirgenlik değerinin kademeli artışının ise kuvvetli ve çok belirgin tekrarlı yansımalar neden olduğu görülmüştür.

PHYSICAL PARAMETER EFFECTS ON 3D NUMERICAL MODELING OF GROUND PENETRATING RADAR (GPR): DNAPL CASE STUDY

Keywords

Ground penetrating radar,
Numerical modeling,
DNAPL,
gprMax.

Abstract

In this study, the effect of the physical parameters directly affecting the performance of the ground radar (GPR) method on the field was investigated by using a three-dimensional numerical model. While the medium was designed as saturated sand, the properties of dense non-aqueous phase liquids (DNAPL) were used as buried mass. Trichloroethylene (TCE), Tetrachlorethylene (PCE), Trichloroethane, and Dichloroethane were selected as DNAPL types. 1.5GHz center frequency GSSI brand GPR antenna was used as a source. In the first stage, while the physical parameters of the medium were gradually increased, the physical parameters of the DNAPL mass were kept constant. In the second stage, the opposite process was applied. When the radargrams were examined, it was observed that the reflections of the DNAPL mass were delayed due to the increase of the relative dielectric permittivity of the medium. In addition, TCE was the most detectable DNAPL type that causes the most obvious reflections. When the electrical conductivity value was increased gradually, electromagnetic energy was absorbed and recorded as weak reflections. It was observed that the gradual increase of the relative magnetic permeability value caused strong multiple reflections.

Alıntı / Cite

Özkap, K., Pekşen, E., (2021). Yer Radarı (GPR) İçin 3B Sayısal Modellemede Fiziksel Parametre Etkileri: DNAPL Örneği, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 9(2), 476-494.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

K. Özkap, 0000-0002-0456-8176
E. Pekşen, 0000-0002-3515-1509

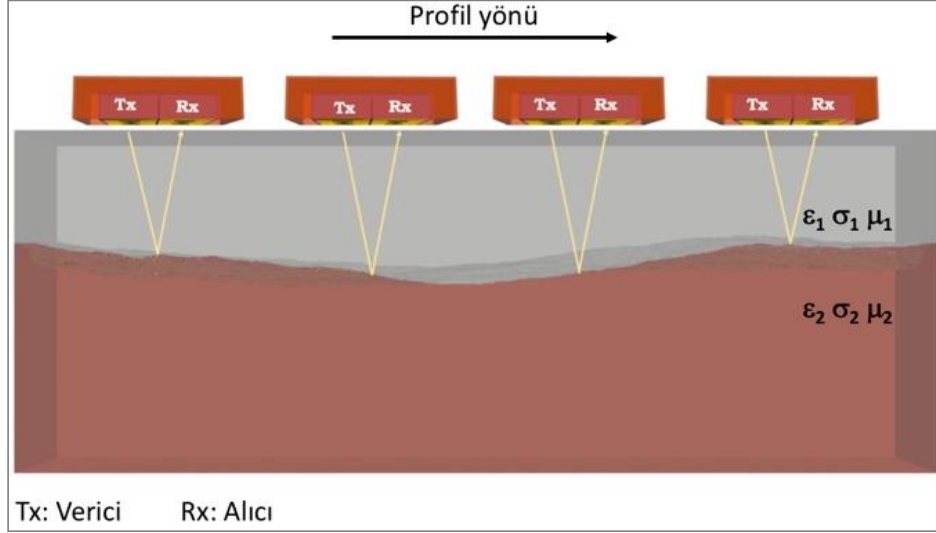
Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	16.01.2020
Revizyon Tarihi / Revision Date	26.01.2021
Kabul Tarihi / Accepted Date	22.02.2021
Yayın Tarihi / Published Date	20.06.2021

* İlgili yazar / Corresponding author: keremozkap@gmail.com

1. Giriş (Introduction)

Yer radarı yöntemi sığ yeraltı yapısını elektromanyetik dalgalar vasıtasıyla gözlemlemeye yarayan bir jeofizik yöntemdir. Yeraltında bulunan tabakaların ve gömülü nesnelerin yerini ve derinliğini belirlemede kullanılmakta olup son dönem teknolojik gelişmeler ışığında birçok mühendislik probleminin çözümüne katkı sunmaktadır. Bir verici anten aracılığıyla yeraltına gönderilen elektromanyetik dalgaların yansıtıcı ara yüzeylerden yansıyarak veya saçılarak alıcı anten tarafından kaydedilmesi ilkesine dayanmaktadır. Yer altında bulunan jeolojik yapılar ya da insan yapımı gömülü nesneler kendilerine özgü fiziksel özelliklere sahip olabilmektedirler. Yapılar arasındaki bu fiziksel farklılıkların, yer altında yayılan elektromanyetik dalgalara olan etkileri yer radarı yöntemi ile yapıların ayırt edilebilmesi ilkesinin temelini oluşturmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Yer radarı yönteminin çalışma prensibi (Ground penetrating radar method and its principle)

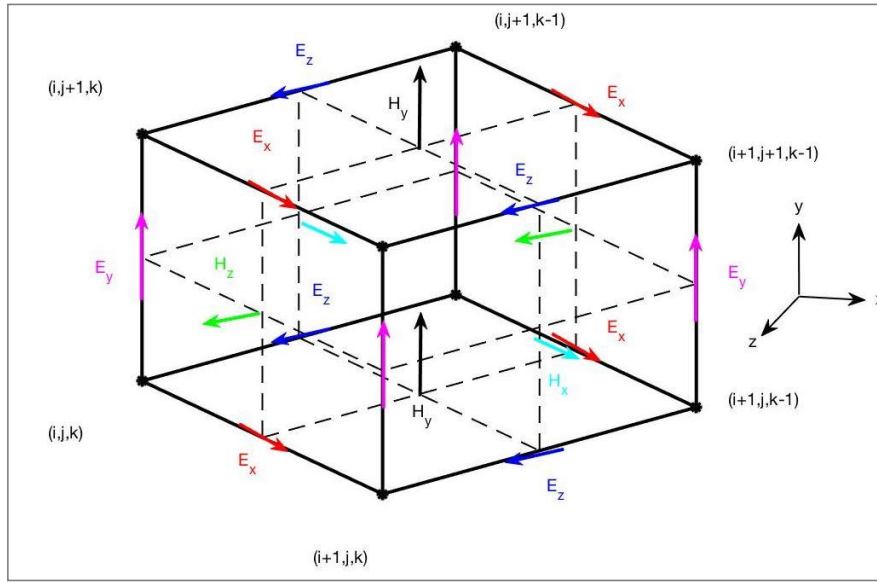
Yer radarı yöntemi kullanılarak yapılan çalışmalar günbegün çeşitlilik göstererek artmaktadır. Bu yöntem ile çalışılan başlıca alanlara; jeolojik araştırmalar (Kadioğlu ve Ulugergerli, 2012), arkeolojik incelemeler (Balkaya vd., 2018), DNAPL araştırmaları (Orlando ve Palladini, 2018; Özkap, 2019), mayın çalışmaları (Giannakis vd., 2015), adli uygulamalar (Schotsmans vd., 2014), otoyol-demiryolu araştırmaları (Bianchini vd., 2019; Bayrak vd., 2020), beton analizleri (Kaplanvural vd., 2018), fosil-kemik araştırmaları (Özkap vd., 2020), Ay yüzeyi (Feng vd., 2019) ve Mars (Hamran vd., 2020) araştırmaları örnek gösterilebilir.

Yer radarı yöntemi için sayısal modelleme çalışmaları ise uzun yıllardır araştırmacılar tarafından ele alınmakta olan bir araştırma konusudur. 1970'li yıllar ile birlikte, elektromanyetik dalgaların farklı göreceli dielektrik geçirgenlik değerine sahip ortamlarda ilerleyişi modellenmiş olsa da (Annan, 1973), yer radarı (GPR) yöntemi özelinde ilk sayısal modelleme çalışması Goodman (1994) ile mühendislik ve arkeolojik amaçlı yapılmıştır. Cai ve McMachen (1995) ve Zeng vd. (1995) çalışmalarında jeolojik tabakaları modellerken, (Carcione, 1996; Zeng vd., 1996) ise gömülü metal, plastik, fibergals ve pvc borular için modelleme çalışmaları gerçekleştirmiştir. Roberts ve Daniels (1997) ise yer radarı yöntemi için ilk 3B sayısal modelleme örneklerini sunmuştur.

Sayısal modelleme vasıtasıyla elektromanyetik dalgaların yer altındaki davranışlarını anlayabilmek daha kolay hale gelmiştir. Bunun yanı sıra yeni veri işlem tekniklerinin test edilmesinde de kullanışlı bir araçtır. Kurtulmuş ve Drahor (2008) çalışmalarında sayısal modelleme çalışmalarını, yorumlama olgusunu güçlendirmenin bir yolu olarak ifade etmektedirler.

2. Zaman Ortamında Sonlu Farklar Yöntemi (Finite-Difference Time-Domain Method)

Çalışmada sayısal modelleme tekniği olarak Zaman Ortamında Sonlu Farklar Yöntemi (FDTD) kullanılmıştır. FDTD yöntemi elektromanyetik dalga yayılımı problemlerinin çözümünde kullanılan en kullanışlı yöntemlerden biri olup, Maxwell denklemlerinin diferansiyel formunu ayrıklaştırarak çözümünü yapmaktadır. FDTD yöntemi Maxwell denklemleri için ilk kez Yee (1966) tarafından uyarlanmıştır. Yee hücresinin 3B gösterimi Şekil 2'de verilmektedir.



Şekil 2. Yee hücresi. (Yee cell)

E_x , E_y , E_z ve H_x , H_y , H_z değerleri x , y ve z için tanımlanmış elektrik alan ve manyetik alan bileşenleridir. i , j , k ise hesaplama ağındaki hücrenin konumu göstermektedir.

Sayısal modelleme çalışmalarında FDTD yönteminin sıkça tercih edilmesinde yöntemle dair birçok avantaj etkili olmaktadır. Bunlardan bazıları; kısmi diferansiyel denklem çözümünde kullanılan sayısal yöntemlerin en etkililerinden biri olması, sade, anlaşılabilir ve verimliliği yüksek bir yöntem olması sayılabilir (Giannopoulos, 2005).

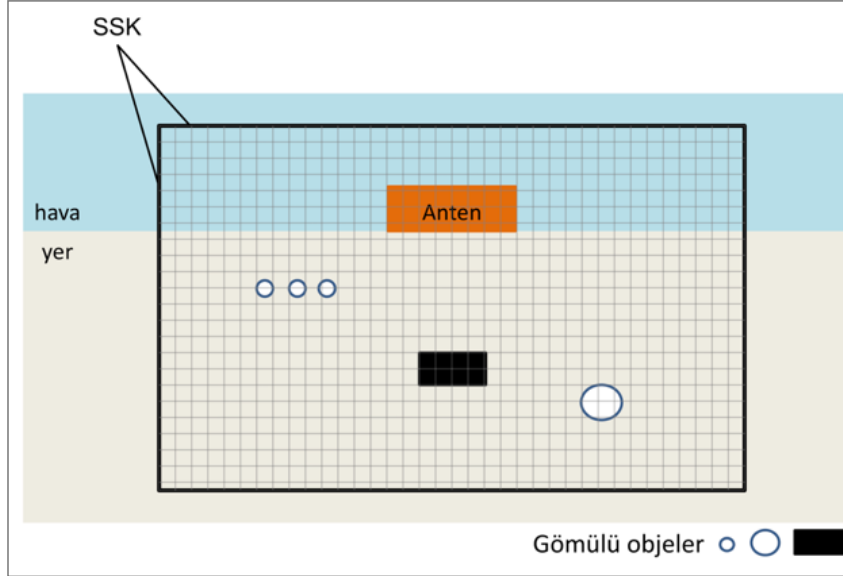
FDTD yönteminde elektromanyetik alanlar zaman-mekân ortamında ayrıklaştırılarak örneklenir. Örnekleme aralığı, çözümü kararlı kılabilmek için uygun olarak seçilmelidir. Bu koşul Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) koşulu olarak bilinmektedir (Elsherbeni ve Demir, 2016). Bu koşula göre, hesaplama alanını yeterli sayıda örnekleyip, hassas sonuçlar elde etmek için hesaplama aralıklarını (Δ_x , Δ_y , Δ_z) problemdeki en küçük dalga boyunu (λ_{\min}) aşmayacak şekilde seçmek gerekmektedir. Seçilecek en büyük zaman aralığı (Δ_t) sistemi kararlı kılabilmek için Δ_t ile Δ_x , Δ_y , Δ_z arasındaki ilişkiyi tanımlayan CFL koşuluna göre belirlenir (Çiydem ve Koç, 2014). Bu koşul;

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}} \quad (1)$$

burada c ; ışık hızını ifade etmektedir. CFL koşulu, FDTD yönteminin en önemli kısıtlamalarından biridir. Boyutları küçük veya ince nesnelerin çözülmesinde hücre ve zaman aralıklarının aynı oranda küçük seçilmesi gerekmektedir. Modellemede hücre aralıklarının küçük seçilmesi yüksek çözünürlükte çözüm yapma şansı sunarken bilgisayarların işlem yükünü de aynı oranda arttırmaktadır.

FDTD uygulamalarında en çok karşılaşılan hata, hücre aralıklarının CFL koşuluna uygun olarak seçilmemesi sonucunda sayısal dispersiyon meydana gelmesidir. Sayısal dispersiyon, elektromanyetik dalga hızlarının frekansa bağımlı olma durumu olarak açıklanabilmektedir. Bu durum gerçek hayatta kayıpsız bir ortam için elektromanyetik dalganın tüm frekanslar için aynı faz hızıyla ilerlemesi anlamına gelse de CFL koşuluna uygun tasarlanmamış bir FDTD modelinde sayısal faz hızının gerçek faz hızından farklı olduğu anlamına gelmektedir. Sayısal faz hızının gerçek faz hızından sapma eğilimi göstermesi hesaplama alanındaki en küçük dalga boyuna göre seçilmesi gereken hücre aralığına ve aynı zamanda sayısal model içerisindeki elektromanyetik dalgaların yayılma yönüne bağlıdır (Diamanti, 2008).

Sayısal modellerin FDTD yöntemi ile oluşturulabilmesi için gerçekte sınırları olmayan ya da çok geniş olan bölgenin yapay sınırlar ile sonlandırılması gerekir (Balkaya, 2010). Bu bağlamda FDTD hesaplamalarında kullanılacak model alanının gerçeğe yakın bir şekilde temsil edilebilmesi için model çeperi soğurucu sınırlar ile sınırlandırılmaktadır. Böylelikle hem model sınırlarından kaynaklanabilecek gerçekte var olmayan yansımaların önüne geçilmiş olacak hem de sonsuz alan benzetimi yapılmış olacaktır. Soğurucu sınırlar, sayısal modeli oluşturan tüm önemli bileşenleri (kaynak, alıcı, jeolojik yapı, gömülü nesne vb.) içerisine alacak şekilde belirlenmelidir (Şekil 3). Bu çalışmada gerçekleştirilen tüm sayısal modeller HORIPML sınır koşulları kullanılarak modellenmiştir (Giannopoulos, 2011).



Şekil 3. Soğurucu sınır koşulları (SSK) ile sınırlandırılmış 2B model ortamı. (Absorbing boundary condition and 2D bounded model domain)

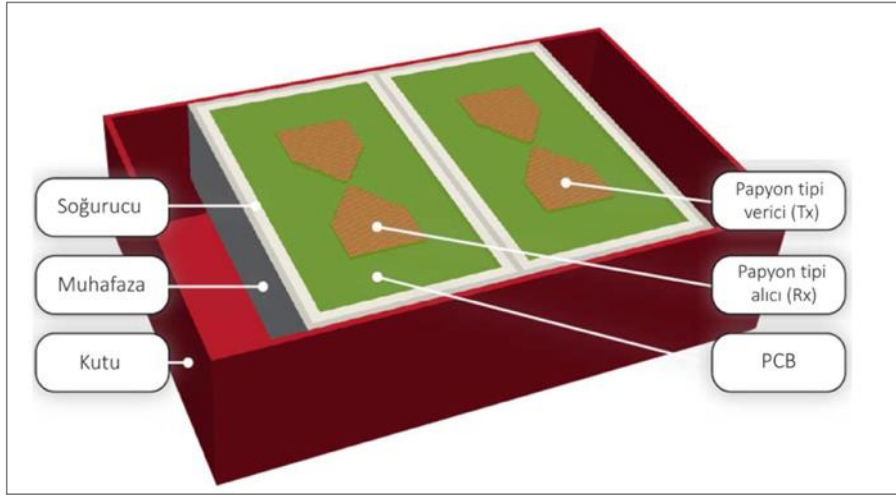
3. gprMax ile 3B Sayısal Modelleme (3D Numerical Modeling with gprMax)

FDTD yöntemi ile elektromanyetik dalga yayılım benzetimleri yapan çeşitli yazılımlar bulunmaktadır (Giannopoulos, 2005; Irving ve Knight, 2006). Bu çalışmada sayısal modelleme benzetimleri için gprMax yazılımı kullanılmıştır. gprMax, elektromanyetik dalga yayılımı benzetimi yapan açık kaynak kodlu ve kullanıcılar tarafından geliştirilebilen bir sayısal modelleme yazılımıdır (Warren vd., 2016). gprMax ile 2B ve 3B sayısal modellemeler gerçekleştirilebilmektedir. Bu çalışmada gprMax yazılımının tercih edilmesinde birçok teşvik edici etken bulunmaktadır. Bunlardan bazıları; yüksek kalitede 2B ve 3B sayısal modellemeye olanak sağlaması, yaygın olarak kullanılan işletim sistemlerine uygun olarak çalışması (Windows, Linux, Mac OS), yüksek hızda modelleme yapabilmesi (CPU ve GPU entegrasyonu), heterojen ve anizotropik model tasarımlarına olanak vermesi, piyasada bulunan bazı ticari antenleri kütüphanesinde modellenmiş olarak bulundurması (GSSI 400MHz, 1,5GHz ve MALA 1,2GHz) ve açık kaynak kodlu ücretsiz bir yazılım olması sayılabilir.

3.1. Kaynak Seçimi (Source Selection)

Bu çalışmadaki tüm sayısal modellemelerde kaynak olarak gprMax kütüphanesinde bulunan ve GSSI firması tarafından üretilen 1.5GHz (Model 5100) merkez frekansına sahip ticari yer radarı antenini temsil edecek şekilde modellenen anten kullanılmıştır (Şekil 4). Bu anten modeli Warren ve Giannopoulos (2011) çalışmasında tanıtılmıştır.

Ticari antenlerin sayısal olarak tasarlanması sırasında dikkat edilmesi gereken bazı önemli noktalar bulunmaktadır. Bunlardan ilki anteni oluşturan bileşenlerin fiziksel özelliklerinin bilinmesi gerekliliğidir. Şekil 4’de verilen görselde yer alan bileşenler ve bu bileşenlere ait fiziksel parametreler Tablo 1’de ayrıntılı olarak verilmektedir. Farklı firmaların ürettikleri farklı marka ve model antenlerde değişik türde malzemeler kullanılabilir.



Şekil 4. Ticari anten (GSSI 1.5GHz) krokisi. (A sketch of commercial antenna (GSSI 1.5GHz)). (Warren ve Giannopoulos., 2011)

Tablo 1. Anten modellemesinde kullanılan bazı malzemelerin göreceli dielektrik geçirgenlik ve elektriksel iletkenlik değerleri. (Relative dielectric permittivity and electrical conductivity values of some materials used in antenna modeling). (Warren ve Giannopoulos., 2011)

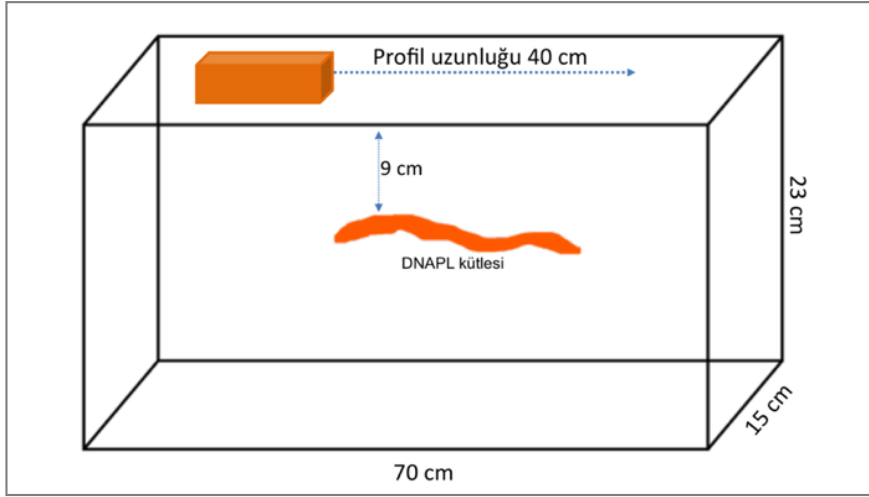
Bileşen	Malzeme türü	Göreceli Dielektrik Sabiti (ϵ_r)	Elektriksel İletkenlik (σ)[S/m]
Papyon	Bakır	1,00	$59,6 \times 10^6$
Muhafaza	Yüksek yoğunluklu polietilen	2,35	0
PCB	Fiberglass	3,00	0
Kutu	Polipropilen	2,26	0
Soğurucu	Köpük	1,58	0,05-1

Yer radarı yöntemi için sayısal modelleme çalışmalarında teorik kaynak yerine gerçeğine uygun olarak tasarlanmış anten modelleri tercih edilmeye başlanmıştır. Sayısal olarak tasarlanmış ticari anten modelleri kullanarak yapılan çalışmalar sahada elde edilen radagramlara daha yakın sonuçlar vermektedir. Bunun yanı sıra sentetik sonuçlar ve gerçek ölçümler iz bazında daha sağlıklı karşılaştırılabilmektedir. Bu amaçla çalışmada teorik kaynak yerine gerçeğine uygun olarak modellenmiş ticari anten modeli kullanılmıştır.

3.2. Sayısal Model Tasarımı (Numerical Model Design)

Fiziksel parametre değişimlerinin sayısal modelleme ile elde edilen sentetik radagramlara etkileri incelemek amacıyla bir model seti oluşturulmuştur. Oluşturulan 3B sayısal model 0,70 x 0,15 x 0,23 m boyutlarında olup içerisinde kum (duygun) ve kirlenici nitelikte DNAPL olacak şekilde tasarlanmıştır. DNAPL'ı temsil eden kütle maksimum yüksekliği 4 cm olup genişliği 1cm'dir. Bu kütle x eksenini boyunca 20 cm'den başlayarak 45 cm'ye kadar uzanmakta olup y ekseninde ise 7,5 cm'ye yani modelin tam ortasına gelecek şekilde yerleştirilmiştir. DNAPL kütlesi yüzeyden 9 cm derinde yer alacak şekilde sayısal model içerisinde konumlandırılmıştır (Şekil 5).

Antenin ilk ölçüm pozisyonunda orta noktası x eksenini üzerinde 10 cm'ye gelecek şekilde konumlandırılmıştır ve son ölçüm noktası 50 cm üzerindedir. Böylelikle 0,01 m aralıkla 40 iz hesaplanmıştır. Profiller y eksenini üzerinde 7,5 cm'den geçecek şekilde ve DNAPL'ı temsilen eden kütleyle paralel olarak toplanmıştır. Model-1'e ait detaylı bilgi Tablo 2'de verilmektedir.



Şekil 5. Model geometrisi içerisinde DNAPL kütlesi ve anten konumu. (DNAPL mass in the model geometry and the location of antenna)

Tablo 2. 3B sayısal modelde kullanılan parametreler (Parameters used in the 3D model)

Parametreler	Değerler
Boyut	0,70x0,15x0,23 m
Hücre aralığı	0,001x0,001x0,001 m
Anten modeli	GSSI (Model 5100)
Anten merkez frekansı	1,5 GHz
Zaman penceresi	10 ns
İz aralığı	0,01 m
İz sayısı	40

Yer radarı yönteminin performansını doğrudan etkileyen üç adet fiziksel parametre bulunmaktadır; göreceli dielektrik geçirgenlik (ϵ_r), elektriksel iletkenlik (σ) ve göreceli manyetik geçirgenlik (μ_r) değerleridir. Bu üç temel parametrenin değişimi elektromanyetik dalganın yer altındaki davranışlarını doğrudan etkilemektedir. Çalışmada yeraltı yapısını oluşturan ortama ve bu ortam içerisinde bulunan gömülü yapıya ait parametrelerin değişimi sonucu elde edilen sentetik radargramlar irdelenmiştir. Ortamdaki çevre malzeme olarak kum (doğru) kullanılırken gömülü yapı olarak ise Dense non-aqueous phase liquids (DNAPL) olarak adlandırılan suda çözünmeyen yoğunluğu sudan yüksek kimyasalları temsil eden bir kütle kullanılmıştır. DNAPL kütesinin ortama enjeksiyonundan belirli bir süre sonra aldığı şekil modellemelerde sabit kabul edilmiştir. DNAPL kütesinin yoğunluğundan dolayı geçirimsiz bir tabaka bulana kadar modelin tabanına doğru hareket edeceği gerçeği göz ardı edilmiştir. Modellemelerde DNAPL türleri olarak Trikloroetilen (TCE), Tetrakloroetilen (PCE), Trikloroetan ve Dikloroetan seçilmiştir. Bu kimyasallara ait göreceli dielektrik geçirgenlik değerleri Ajo-Franklin vd., (2006)'dan alınmıştır.

3.3. Fiziksel Parametrelerin İrdelenmesi (Examination of Physical Parameters)

Bu bölümde ortama ve DNAPL kütesine ait fiziksel parametre değişimlerini irdelemek amacıyla 5 adet test çalışması gerçekleştirilmiştir. Öncelikli olarak ortama ait fiziksel parametrelerin değişimine sonrasında ise gömülü yapıya yani bu çalışma özelinde DNAPL kütesine ait fiziksel parametrelerin değişimi ele alınmaktadır.

3.3.1. Ortama ait fiziksel parametrelerin değişimi (Change of physical parameters of the medium)

Ortamı oluşturan malzemenin göreceli dielektrik geçirgenlik (ϵ_0) ve elektriksel iletkenlik (σ_0) değerlerinin kademeli olarak artırılması ile sentetik radargramlardaki değişimler irdelenmiştir. Bu aşamada DNAPL kütesine ait parametreler (ϵ_d , σ_d ve μ_d) sabit tutulmuştur. Fiziksel parametrelerle birlikte verilen indislerden 'o' ortamı ifade ederken, 'd' ise DNAPL kütesini tanımlamaktadır.

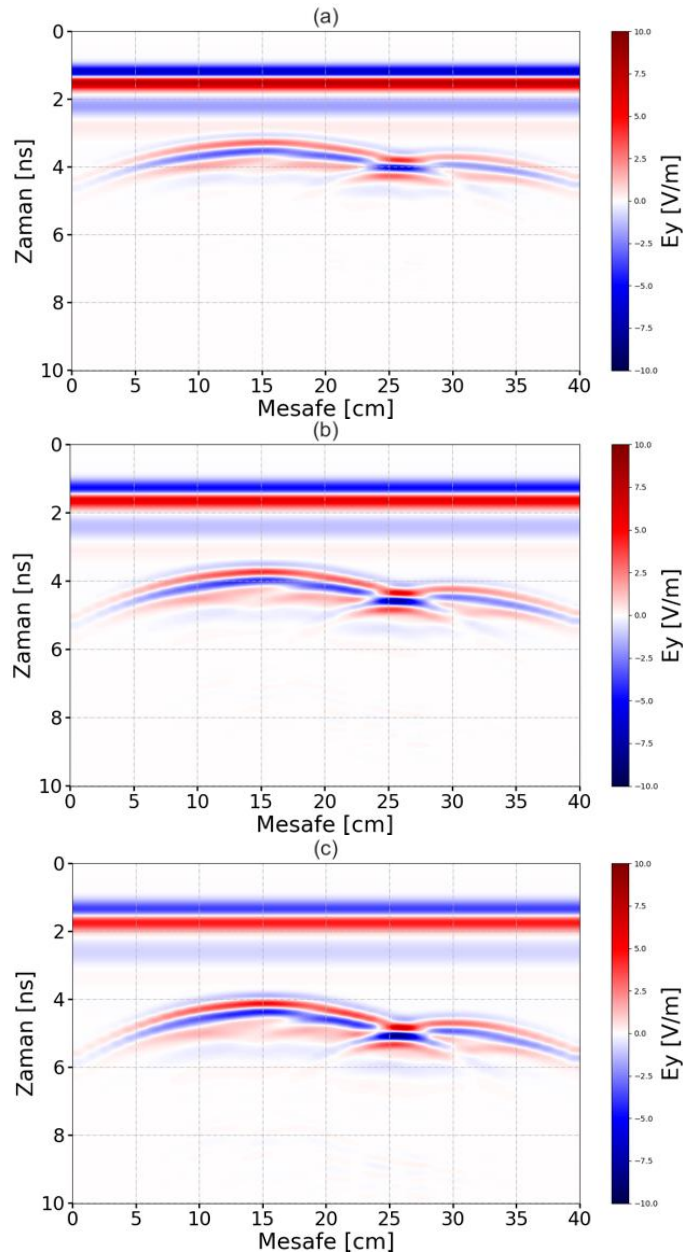
Öncelikle ortamın göreceli dielektrik geçirgenlik (ϵ_0) değerinin kademeli olarak artışının sentetik radargramlara olan etkisi incelenmiştir. Tablo 3, ortamın göreceli dielektrik geçirgenlik (ϵ_0) değerinin kademeli olarak artırıldığı

Test 1 benzetimlerine ait bilgileri içermektedir. (a), (b) ve (c) sırasıyla göreceli dielektrik geçirgenliğin aldığı değerleri ifade etmektedir.

Tablo 3. Test 1 çalışmasına ait fiziksel parametreler (Physical parameters of the Test 1 study)

Model 1	Test 1
Ortam göreceli dielektrik geçirgenlik (ϵ_0)	(a) 15, (b) 21, (c) 27
Ortam elektriksel iletkenlik (σ_0) (S/m)	0
Ortam göreceli manyetik geçirgenlik (μ_0)	1
DNAPL göreceli dielektrik geçirgenlik (ϵ_d)	3,409*
DNAPL elektriksel iletkenlik (σ_d) (S/m)	0
DNAPL göreceli manyetik geçirgenlik (μ_d)	1

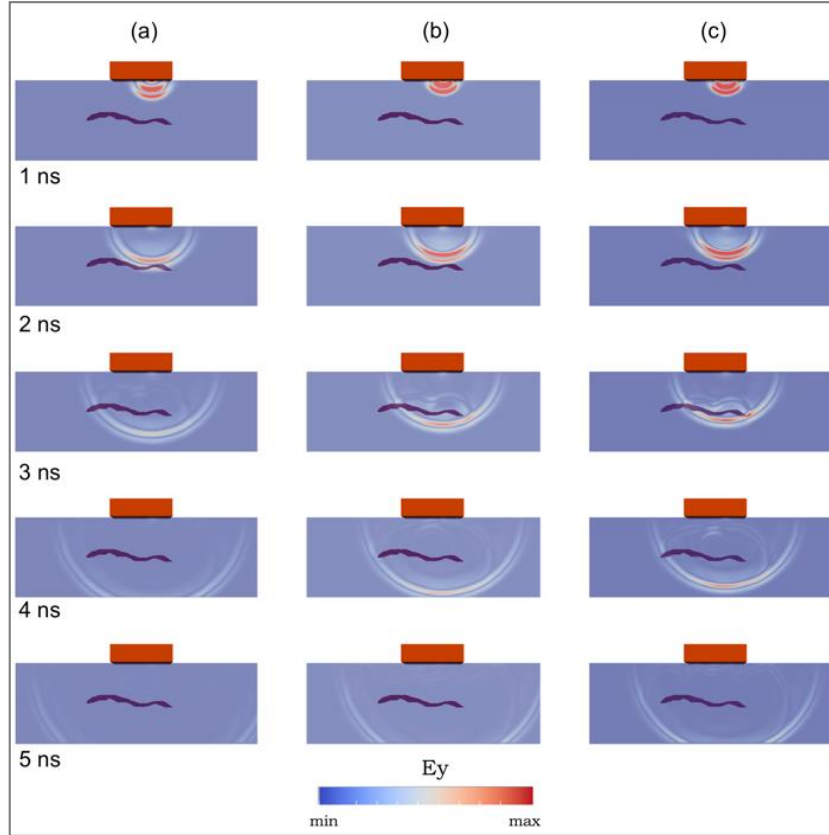
*Trikloroetilen (TCE) kirletici olarak kullanılmıştır.



Şekil 6. Test 1, ortama ait göreceli dielektrik değerinin artırılması ile elde edilen sentetik radargramlar a) $\epsilon_0=15$, b) $\epsilon_0=21$ ve c) $\epsilon_0=27$. (Test 1, synthetic radargrams obtained by increasing the relative dielectric permittivity value of the media with a) $\epsilon_0=15$, b) $\epsilon_0=21$ ve c) $\epsilon_0=27$, respectively)

Ortamın farklı suya doygunluk değerlerini ifade etmek için göreceli dielektrik geçirgenlik değerleri Annan (2003)'de verilen ve suya doygun kumu ifade eden aralıkta seçilmiştir. Ortamın göreceli dielektrik değerlerinin kademeli olarak artırılması sonucu elde edilen sentetik radargramlar Şekil 6'da verilmektedir. Şekil 6'da gösterilmekte olan sentetik radargramlar incelendiğinde, DNAPL kütesini temsil eden yapıdan gelen yansımaların, ortamda göreceli dielektrik değerinin artışıyla birlikte alıcılara daha geç geldiği görülmektedir.

Sayısal modelleme çalışmalarında elektromanyetik dalga yayılım davranışlarının bir diğer gözlemlenme şekli de anlık görüntülerin (snapshots) karşılaştırılmasıdır. Bu sayede ortama ait fiziksel parametrelerin değişiminin dalga yayılımına olan etkisi incelenebilmektedir. Şekil 7'de ortama ait farklı göreceli dielektrik değeri için elektromanyetik dalga yayınımlarının ilk 5 ns için 1 ns aralıkla anlık görüntülerini vermektedir.

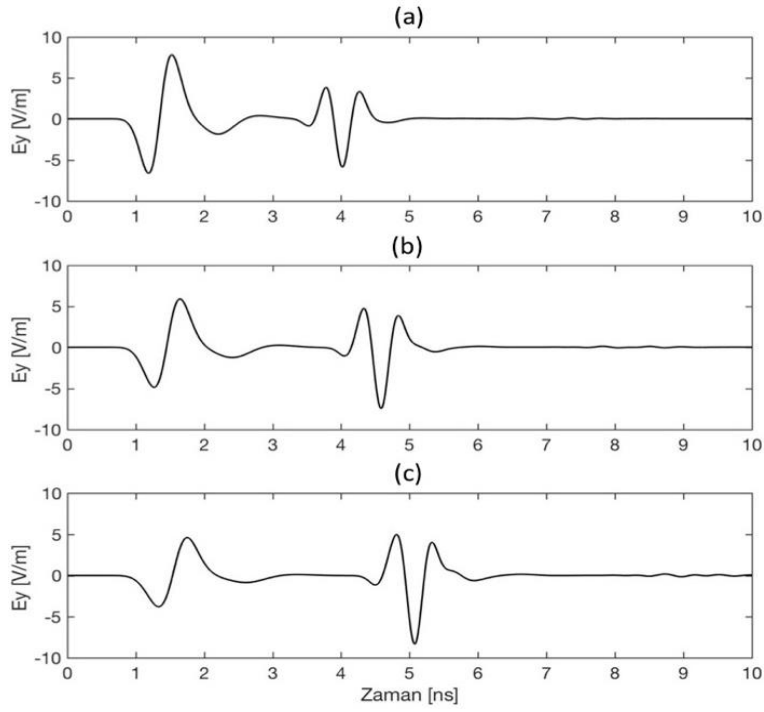


Şekil 7. Test 1, ortama ait göreceli dielektrik değerinin artırılması ile ilk 5 ns için elde edilen anlık görüntüler a) $\epsilon_0=15$, b) $\epsilon_0=21$ ve c) $\epsilon_0=27$. (Test 1, snapshots for the first 5 ns obtained by increasing the relative dielectric permittivity value of the media a) $\epsilon_0=15$, b) $\epsilon_0=21$, and c) $\epsilon_0=27$)

Şekil 7'de verilmekte olan anlık görüntülerde anten pozisyonu 25 numaralı atışı temsil etmektedir. 25 numaralı atış baz alınarak tek iz üzerinden de karşılaştırmalar yapılmıştır. Farklı göreceli dielektrik değerleri için elde edilen izlerin karşılaştırılması Şekil 8'de gösterilmektedir. İzler üzerinden yapılan karşılaştırmada da DNAPL kütesinden gelen yansımanın ortama ait göreceli dielektrik değerinin artışı ile kayıtlarda geciktiği görülmektedir.

Bundan sonraki testlerde de izlerin karşılaştırılması esnasında bu örnekte olduğu gibi 25 numaralı atışa ait izler baz alınmıştır.

Ortama ait parametrelerin irdelendiği ikinci test çalışmasında ise ortamın elektriksel iletkenlik değeri (σ_0) kademeli olarak artırılmıştır ve bu değişimlerin sentetik radargramlar üzerindeki etkileri incelenmiştir. Test 2'de ortama ait göreceli dielektrik geçirgenlik değeri ve DNAPL kütesine ait diğer parametreler sabit tutulmuştur. Tablo 4, ortamın elektriksel iletkenlik değerinin (σ_0) kademeli olarak artırıldığı Test 2 benzetimlerine ait bilgileri içermektedir. (a), (b), (c) ve (d) sırasıyla elektriksel iletkenlik için kullanılan değerleri ifade etmektedir.



Şekil 8. Test 1, 25 numaralı atışa ait, ortam için göreceli dielektrik geçirgenlik değerleri değişimi üzerinden elde edilen izlerin karşılaştırması a) $\epsilon_0=15$, b) $\epsilon_0=21$ ve c) $\epsilon_0=27$. (Test 1, comparison of the traces by obtained in media of various relative dielectric permeability values at the shot point of 25, a) $\epsilon_0=15$, b) $\epsilon_0=21$, and c) $\epsilon_0=27$)

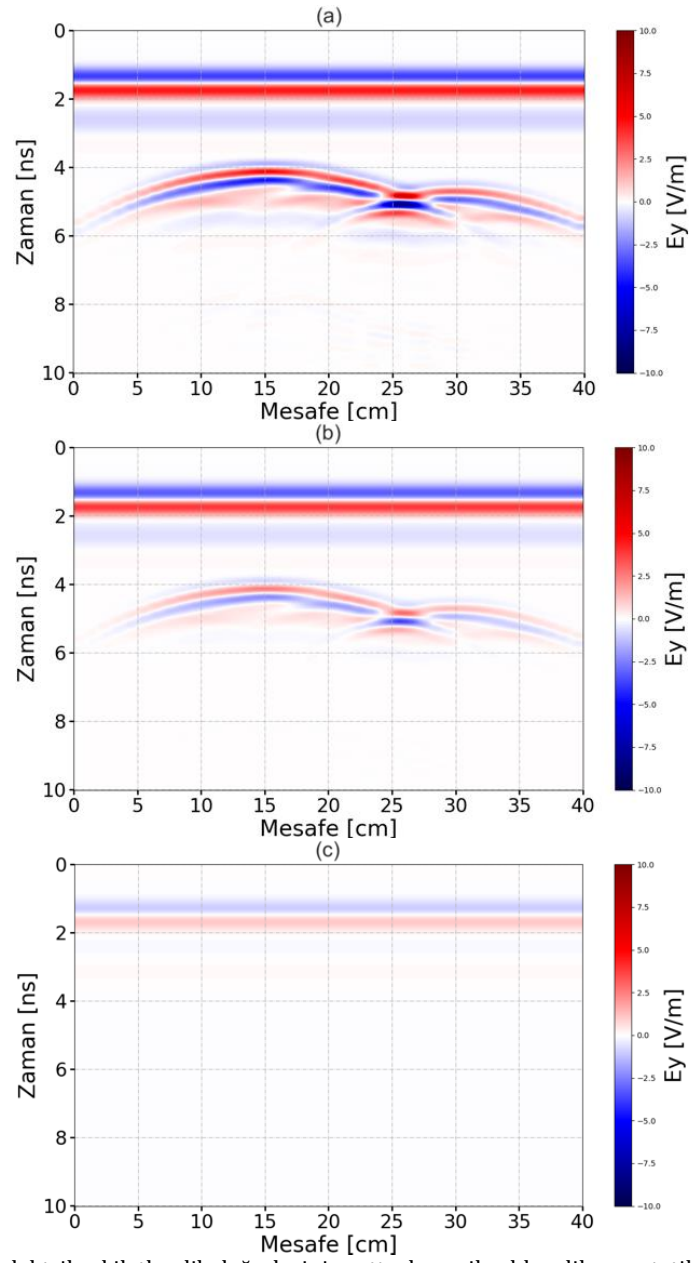
Tablo 4. Test 2 çalışmasına ait fiziksel parametreler (Physical parameters of the Test 2 study)

Model 1	Test 2
Ortam göreceli dielektrik geçirgenlik (ϵ_0)	27
Ortam elektriksel iletkenlik (σ_0) (S/m)	(a) 0,0001 (b) 0,001, (c) 1
Ortam göreceli manyetik geçirgenlik (μ_0)	1
DNAPL göreceli dielektrik geçirgenlik (ϵ_d)	3,409*
DNAPL elektriksel iletkenlik (σ_d) (S/m)	0
DNAPL göreceli manyetik geçirgenlik (μ_d)	1

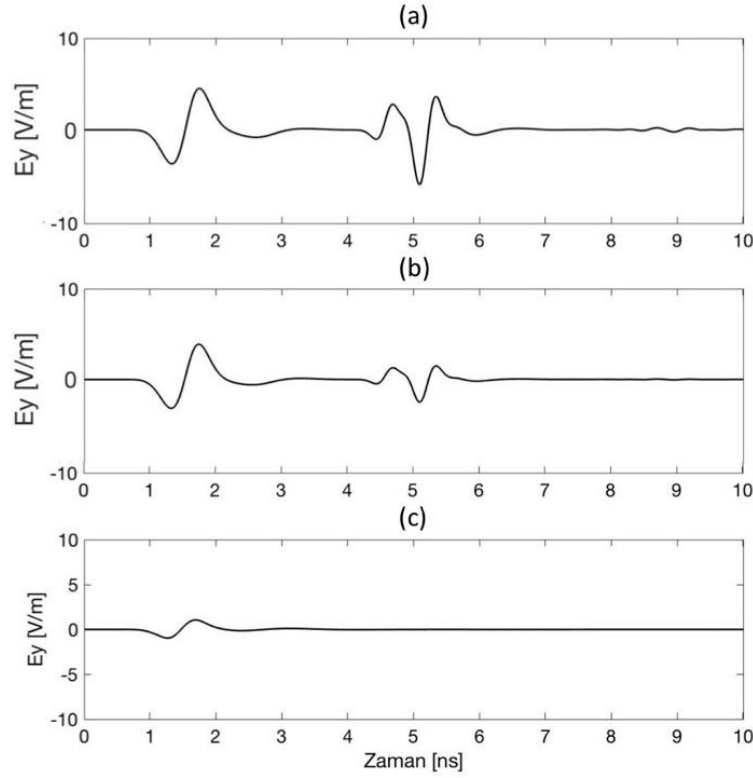
*Trikloroetilen (TCE) kirletici olarak kullanılmıştır.

Ortamın farklı suya doymuluk değerlerini ifade etmek için iletkenlik değerleri (a) ve (b) ile Annan (2003)'de verilen suya doymun kumu ifade eden aralıkta seçilmiştir, (c) ile ise yüksek iletkenliğin etkisi gözlemlemek istenmiştir. Ortamın elektriksel iletkenlik değerlerinin (σ_0) kademeli olarak artırılması sonucu elde edilen sentetik radargramlar Şekil 9'da verilmektedir.

Sentetik radargramların karşılaştırılmasının yanı sıra, 25 numaralı atış baz alınarak, tek iz üzerinden karşılaştırma yapılmıştır. Farklı elektriksel iletkenlik değerleri için elde edilen izlerin karşılaştırılması Şekil 10'da gösterilmektedir. Bu üç adet iz karşılaştırıldığında DNAPL kütlesinde kaynaklanan yansımanın ortamın elektriksel iletkenliğinin (σ_0) artışına bağlı olarak gücünü kaybederek yansılarda zayıfladığı açıkça görülmektedir. Ortamın yüksek elektriksel iletkenlik özellikleri, GPR ölçümlerinde tercih edilmeyen ve yöntemin başarısını kısıtlayan faktörlerden birisidir.



Şekil 9. Test 2, ortama ait elektriksel iletkenlik değerlerinin artırılması ile elde edilen sentetik radargramlar a) 0,0001 b) 0,001, c) 1 S/m (Test 2, synthetic radargrams obtained by increasing the electrical conductivity values of the media with a) 0,0001 b) 0,001, c) 1 S/m, respectively)



Şekil 10. Test 2, 25 numaralı atışa ait, ortam için elektriksel iletkenlik değerleri değişimi üzerinden elde edilen izlerin karşılaştırması a) $\sigma_0=0,0001$ b) $\sigma_0=0,001$, c) $\sigma_0=1$ S/m (Test 2, comparison of the traces by obtained in media of various electrical conductivity values at the shot point of 25, with a) $\sigma_0=0,0001$ b) $\sigma_0=0,001$, c) $\sigma_0=1$ S/m, respectively)

3.3.2. DNAPL kütlesine ait fiziksel parametrelerin değişimi (Change of physical parameters of the DNAPL mass)

Bu bölümde DNAPL kütlesinin göreceli dielektrik geçirgenlik (ϵ_d), elektriksel iletkenlik (σ_d) ve göreceli manyetik geçirgenlik (μ_d) değerlerinin kademeli olarak değiştirilmesi ile sentetik radargramlardaki değişimler incelenecektir. Bu bağlamda ortama ait parametreler sabit tutulmuştur. Tablo 5, DNAPL kütlesinin göreceli dielektrik geçirgenlik (ϵ_0) değerini belirlerken doğada kirletici olarak sıkça karşılaşılan DNAPL türleri olan; Trikloroetilen (TCE), Tetrakloroetilen (PCE), Trikloretan ve Dikloroetan'a ait göreceli dielektrik değerleri kullanılmıştır. Bu değerlerin yer aldığı Test 3 benzetimlerine ait bilgiler Tablo 5'de verilmektedir. (a), (b), (c) ve (d) sırasıyla bu kimyasallar için tanımlanan göreceli dielektrik geçirgenlik değerlerini ifade etmektedir.

Tablo 5. Test 3 çalışmasına ait fiziksel parametreler (Physical parameters of the Test 3 study)

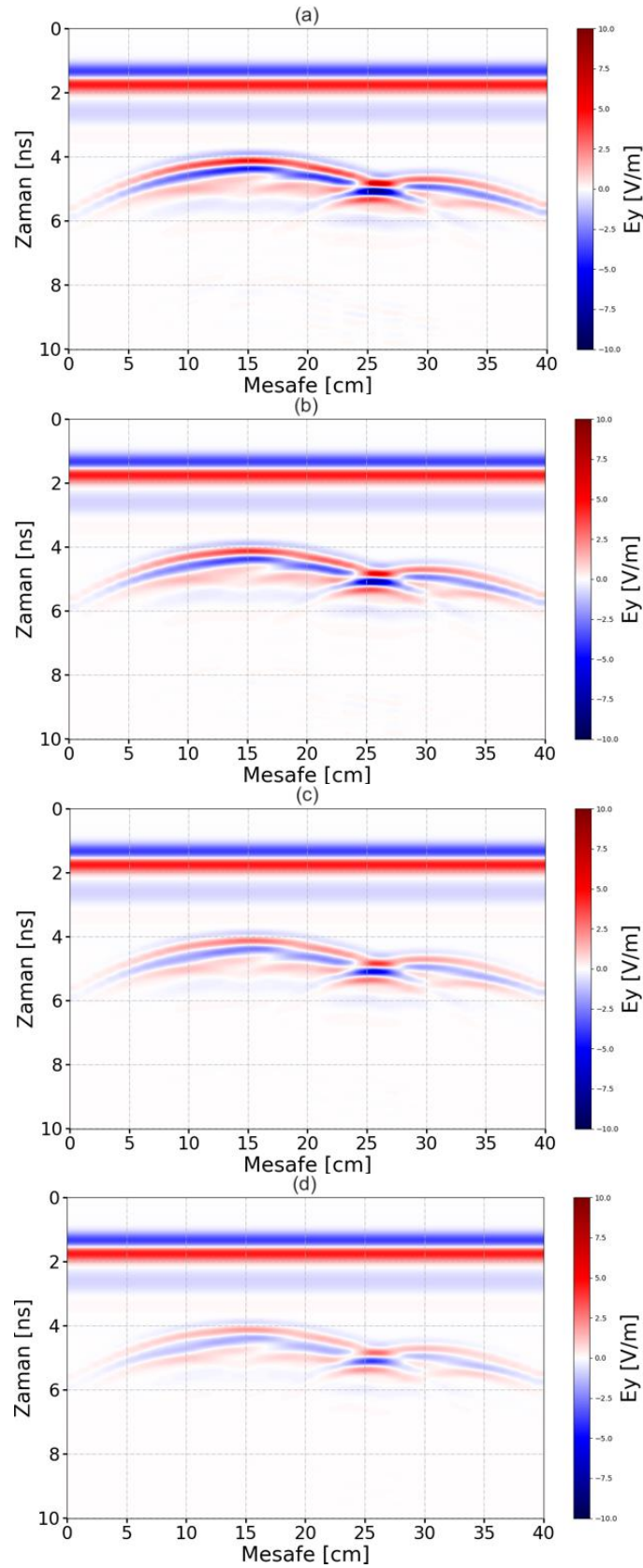
Model 1	Test 3
Ortam göreceli dielektrik geçirgenlik (ϵ_0)	27
Ortam elektriksel iletkenlik (σ_0) (S/m)	0
Ortam göreceli manyetik geçirgenlik (μ_0)	1
DNAPL göreceli dielektrik geçirgenlik (ϵ_d) *	(a) 3,409 (b) 4,660, (c) 7,252, (d) 10,080
DNAPL elektriksel iletkenlik (σ_d) (S/m)	0
DNAPL göreceli manyetik geçirgenlik (μ_d)	1

*Trikloroetilen (TCE), Tetrakloroetilen (PCE), Trikloretan ve Dikloroetan kirletici olarak sırasıyla kullanılmıştır.

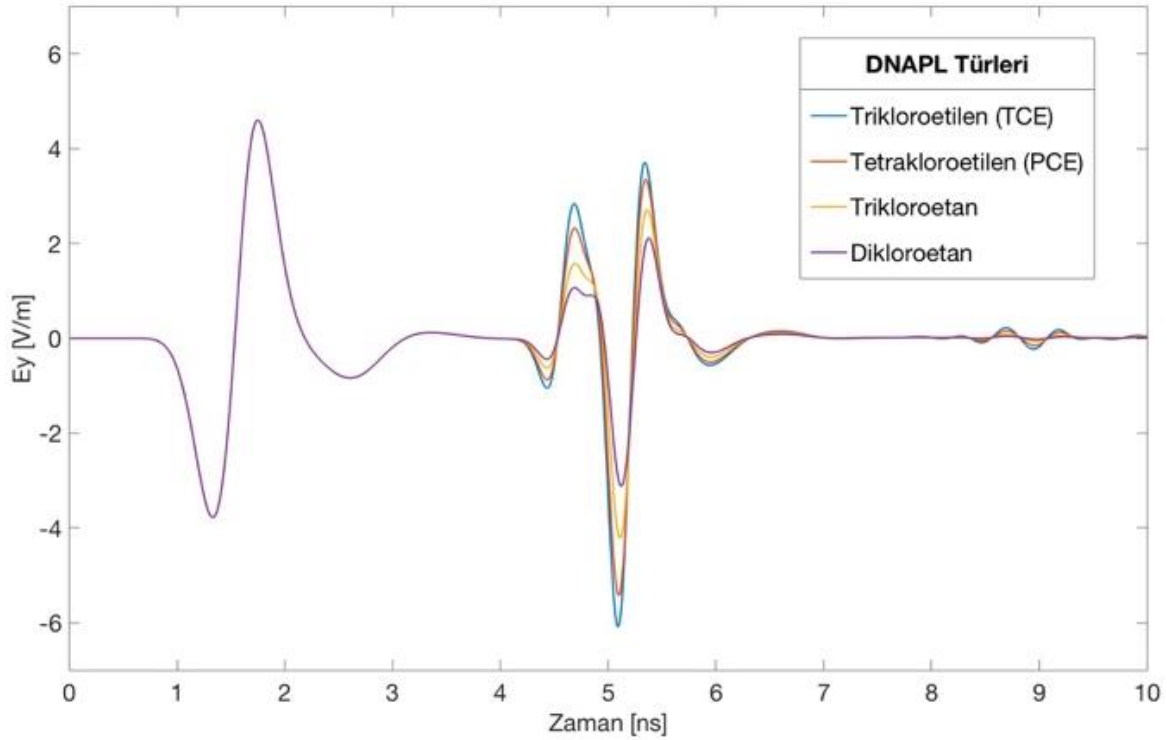
Farklı türde DNAPL kullanılarak elde edilen sentetik radargramlar Şekil 11'de verilmektedir.

25 numaralı atış baz alınarak, tek iz üzerinden karşılaştırmalar Test 3 için de yapılmıştır. Farklı türde DNAPL kirleticilerin kullanılması sonucu elde edilen izlerin karşılaştırılması Şekil 12'de gösterilmektedir. Şekil 12 incelendiğinde DNAPL kütlesi için seçilen kirleticilerin göreceli dielektrik değerleri (ϵ_d) arttıkça, sentetik radargramlardaki yansımalar doğru orantılı olarak zayıflamaktadır. Bunun nedeni ortamın göreceli dielektrik geçirgenlik değeri (ϵ_0) ile DNAPL kütlesinin göreceli dielektrik geçirgenlik değeri (ϵ_d) arasındaki zıtlığın

azalmasından kaynaklanmaktadır. Trikloroetilen (TCE) en güçlü yansımayı verirken, Dikloretan ise en zayıf yansıma neden olmaktadır.



Şekil 11. Test 3, DNAPL kütlesine ait göreceli dielektrik değerlerinin artırılması ile elde edilen sentetik radargramlar a) Trikloroetilen, b) Tetrakloroetilen, c) Trikloroetan ve d) Dikloretan (Test 3, synthetic radargrams obtained by increasing the relative dielectric values of the DNAPL mass a) Trichloroethylene, b) Tetrachlorethylene, c) Trichloroethane and d) Dichloroethane)



Şekil 12. Test 3, 25 numaralı atışa ait farklı DNAPL türleri için göreceli dielektrik geçirgenlik değerleri değişimi üzerinden elde edilen izlerin karşılaştırması (Test 3, comparison of the traces obtained in various type of DNAPL regarding with different relative dielectric permeability values at the shot point of 25)

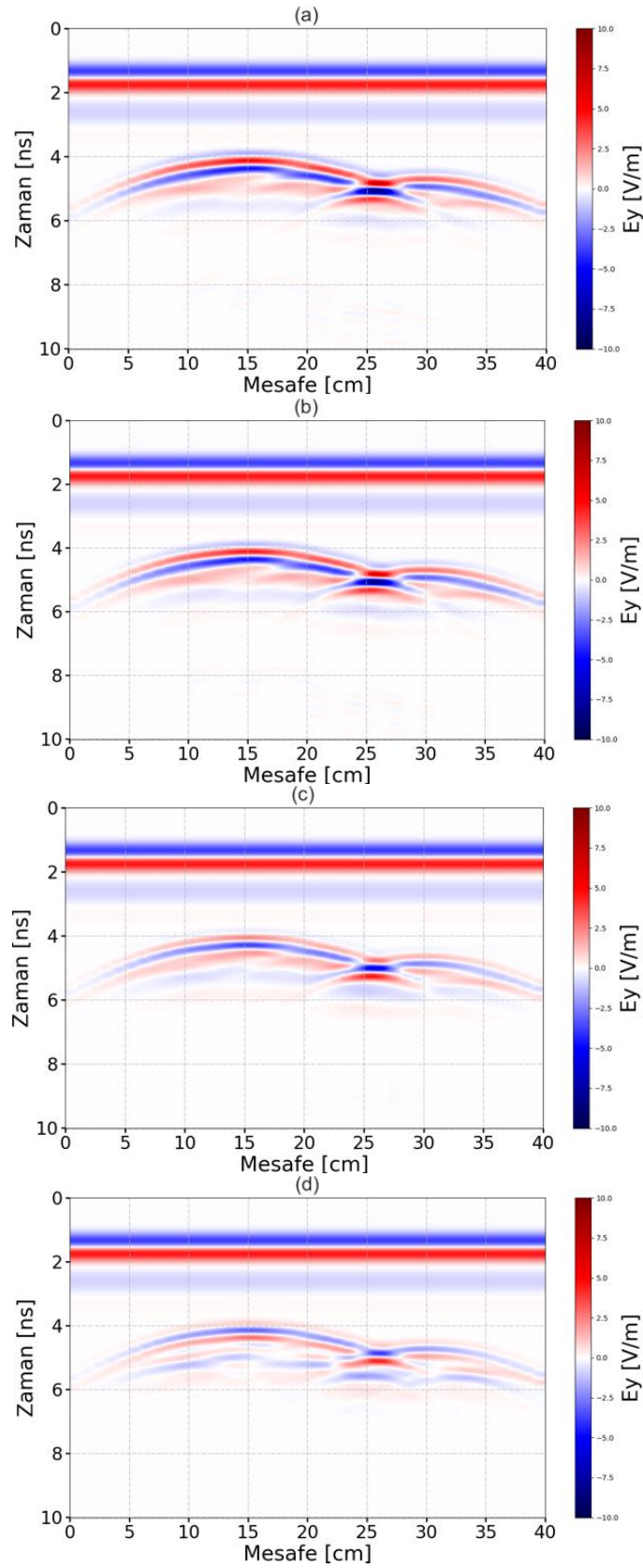
DNAPL kütlesine ait parametrelerin irdelendiği dördüncü test çalışmasında ise DNAPL kütlesinin elektriksel iletkenlik değeri (σ_d) kademeli olarak arttırılmıştır ve bu değişimlerin sentetik radargramlar üzerindeki etkileri incelenmiştir. Tablo 6 DNAPL kütlesinin elektriksel iletkenlik (σ_d) değerinin kademeli olarak arttırıldığı Test 4 benzetimlerine ait bilgileri içermektedir. (a), (b), (c) ve (d) sırasıyla elektriksel iletkenlik için kullanılan değerleri ifade etmektedir.

Tablo 6. Test 4 çalışmasına ait fiziksel parametreler (Physical parameters of the Test 4 study)

Model 1	Test 4
Ortam göreceli dielektrik geçirgenlik (ϵ_0)	27
Ortam elektriksel iletkenlik (σ_0) (S/m)	0
Ortam göreceli manyetik geçirgenlik (μ_0)	1
DNAPL göreceli dielektrik geçirgenlik (ϵ_d)	3,409 *
DNAPL elektriksel iletkenlik (σ_d) (S/m)	(a) 0, (b) 0,0001, (c) 0,001, (d) 0.01
DNAPL göreceli manyetik geçirgenlik (μ_d)	1

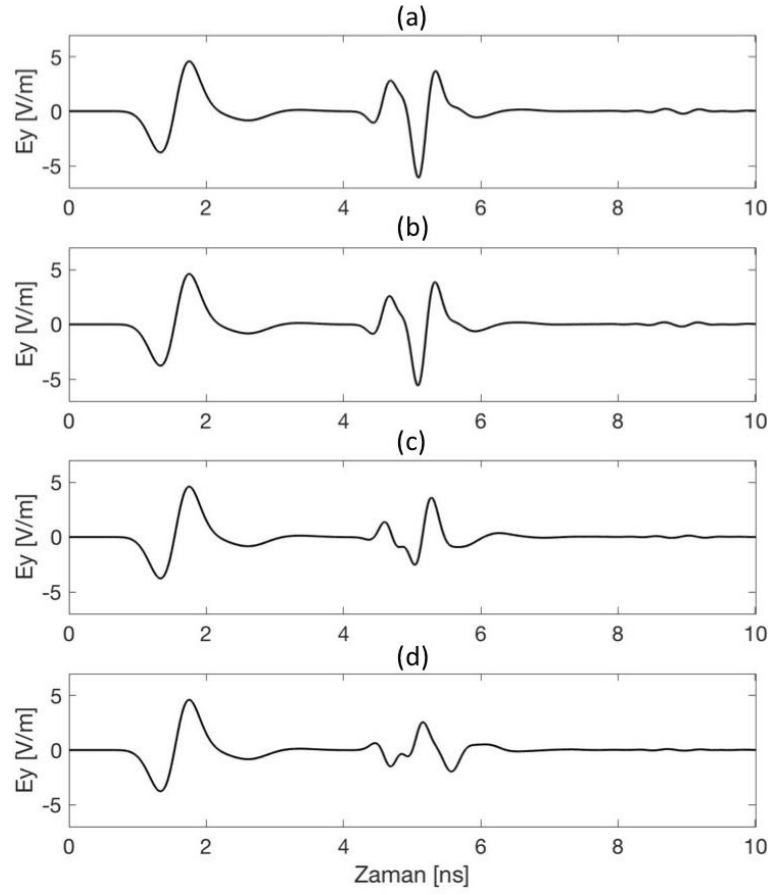
*Trikloroetilen (TCE) kirletici olarak kullanılmıştır.

DNAPL kütlesinin elektriksel iletkenlik değerlerinin (σ_d) kademeli olarak arttırılması sonucu elde edilen sentetik radargramlar Şekil 13'de verilmektedir.



Şekil 13. Test 4, DNAPL kütlesine ait elektriksel iletkenlik değerlerin arttırılması ile elde edilen sentetik radargramlar a) $\sigma_d=0$, b) $\sigma_d=0,0001$, c) $\sigma_d=0,001$, d) $\sigma_d=0,01$ S/m (Test 4, synthetic radargrams obtained by increasing the electrical conductivity values of the DNAPL mass with a) $\sigma_d=0$, b) $\sigma_d=0,0001$, c) $\sigma_d=0,001$, d) $\sigma_d=0,01$ S/m, respectively)

25 numaralı atış baz alınarak, tek iz üzerinden karşılaştırma Test 4 için yapılmıştır. DNAPL kütlesinin farklı elektriksel iletkenlik değerleri (σ_d) için elde edilen izlerin karşılaştırılması Şekil 14'de gösterilmektedir. DNAPL kütlesinin elektriksel iletkenlik değerinin (σ_d) arttırılmasıyla DNAPL kütlesinden yansiyarak gelen yansımaların gücünün azaldığı ve kayıtlarda zayıfladığı gözlemlenmektedir.



Şekil 14. Test 4, 25 numaralı atışa ait farklı DNAPL türleri için elektriksel iletkenlik değeri değişimi üzerinden elde edilen izlerin karşılaştırması a) $\sigma_d = 0$, (b) $\sigma_d = 0,0001$, (c) $\sigma_d = 0,001$, (d) $\sigma_d = 0.01$ S/m (Test 4, comparison of the traces obtained in media with various electrical conductivity value for different DNAPL types of shot 25 with a) $\sigma_d = 0$, (b) $\sigma_d = 0,0001$, (c) $\sigma_d = 0,001$, (d) $\sigma_d = 0.01$ S/m, respectively)

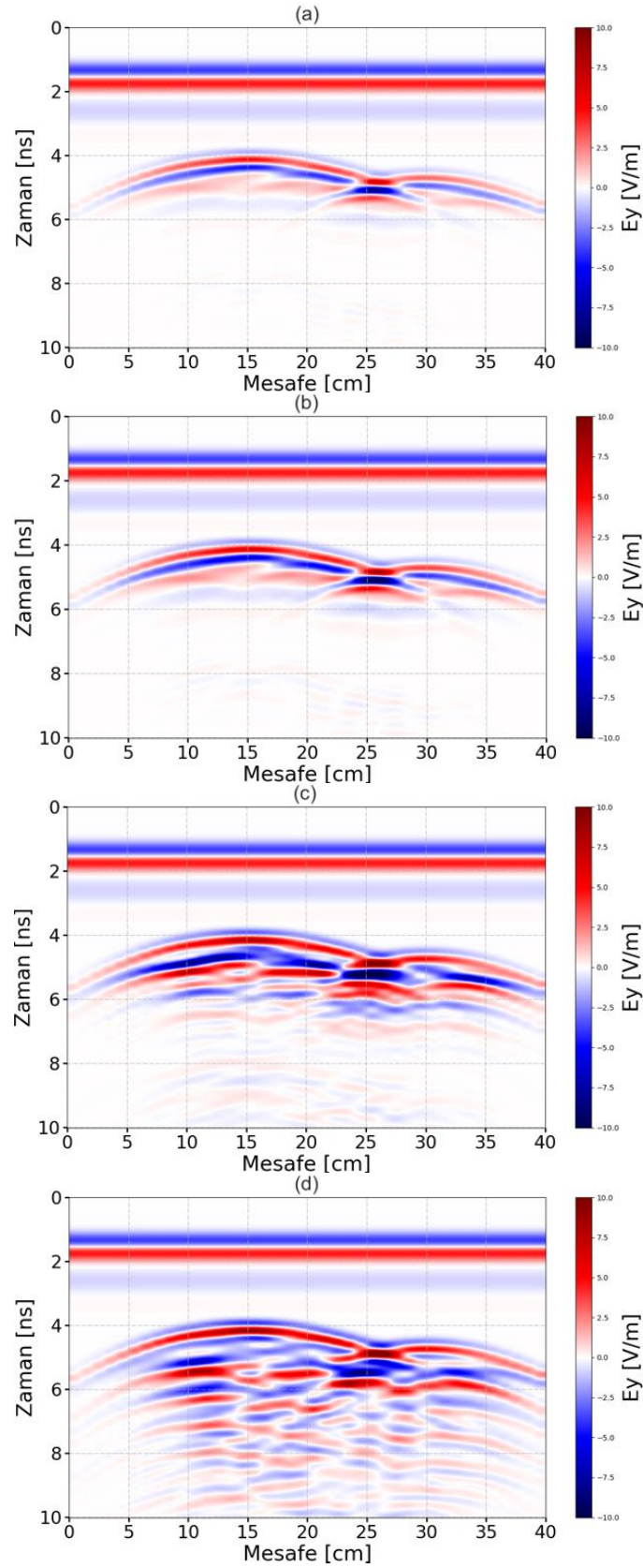
Bu bölümün son test çalışmasında, göreceli manyetik geçirgenlik (μ_d) değeri değişimlerinin sentetik radargramlara etkisi incelenmiştir. Bu bağlamda DNAPL kütesine ait göreceli manyetik geçirgenlik (μ_d) değeri kademeli olarak arttırılmıştır. Ortama ve DNAPL kütesine ait diğer parametreler ise değiştirilmemiştir. Tablo 7 DNAPL kütesinin göreceli manyetik geçirgenlik (μ_d) değerinin kademeli olarak arttırıldığı Test 5 benzetimlerine ait bilgileri içermektedir. (a), (b), (c) ve (d) sırasıyla göreceli manyetik geçirgenlik için tanımlanan değerleri ifade etmektedir.

Tablo 7. Test 5 çalışmasına ait fiziksel parametreler (Physical parameters of the Test 5 study)

Model 1	Test 5
Ortam göreceli dielektrik geçirgenlik (ϵ_o)	27
Ortam elektriksel iletkenlik (σ_o) (S/m)	0
Ortam göreceli manyetik geçirgenlik (μ_o)	1
DNAPL göreceli dielektrik geçirgenlik (ϵ_d)	3,409 *
DNAPL elektriksel iletkenlik (σ_d) (S/m)	0
DNAPL göreceli manyetik geçirgenlik (μ_d)	(a) 1, (b) 2, (c) 10, (d) 30

*Trikloroetilen (TCE) kirletici olarak kullanılmıştır.

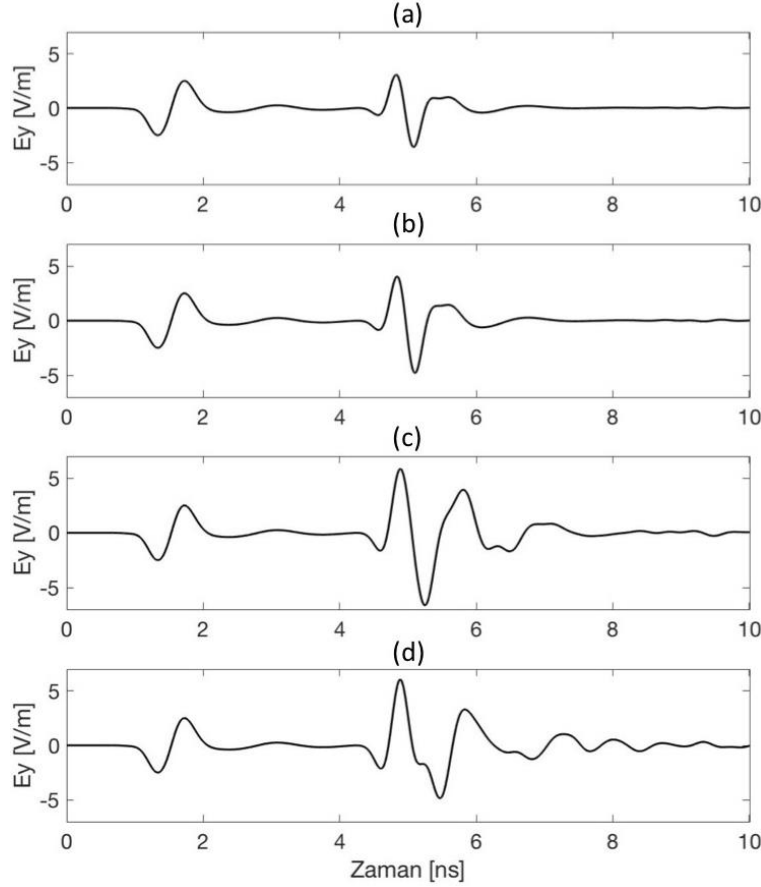
DNAPL kütesinin göreceli manyetik geçirgenlik (μ_d) değerinin kademeli olarak arttırılması sonucu elde edilen sentetik radargramlar Şekil 15'de verilmektedir.



Şekil 15. Test 5, DNAPL kütlesine ait göreceli manyetik geçirgenlik değerinin artırılması ile elde edilen sentetik radargramlar (a) $\mu_d=1$, (b) $\mu_d=2$, (c) $\mu_d=10$, (d) $\mu_d=30$ (Test 5, synthetic radargrams obtained by increasing the relative magnetic permeability value of the DNAPL mass with (a) $\mu_d=1$, (b) $\mu_d=2$, (c) $\mu_d=10$, (d) $\mu_d=30$, respectively)

İncelenen son parametre olan göreceli manyetik geçirgenlik değerinin (μ_d) artışının diğer parametrelerin artışından çok daha belirgin farklar meydana getirdiği gözlemlenmiştir.

25 numaralı atış baz alınarak, tek iz üzerinden karşılaştırma Test 5 için de yapılmıştır. DNAPL kütlelerinin farklı göreceli manyetik geçirgenlik değerinin (μ_d) için elde edilen izlerin karşılaştırılması Şekil 16'da gösterilmektedir.



Şekil 16. Test 5, 25 numaralı atışa ait DNAPL kütle için göreceli manyetik geçirgenlik değeri değişimi üzerinden elde edilen izlerin karşılaştırması a) $\mu_d=1$, b) $\mu_d=2$, c) $\mu_d=10$ ve c) $\mu_d=30$ (Test 5, comparison of the traces obtained in media with various relative magnetic permeability for the DNAPL mass at the shot point of 25 with a) $\mu_d=1$, b) $\mu_d=2$, c) $\mu_d=10$ ve c) $\mu_d=30$, respectively)

4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu araştırma çerçevesinde gerçekleştirilen testler ile ortama ve gömülü kütleye ait fiziksel parametreler değişimlerinin etkileri ayrıntılı bir şekilde ortaya konmuştur. Göreceli dielektrik geçirgenlik, elektriksel iletkenlik ve göreceli manyetik geçirgenlik parametrelerinin kademeli olarak artırılması sonucunda hem ortam hem de DNAPL kütle için meydana gelen değişimler 5 farklı test ile incelenmiştir.

Test 1 ile ortamın göreceli dielektrik geçirgenlik değerinin artışı sonucunda DNAPL kütlelerinden yansıyan dalgaların alıcıya gecikerek ulaştığı görülmüştür. Ortam için göreceli dielektrik geçirgenlik değerinin 15, 21, 27 seçildiği senaryolarda DNAPL kütlelerinden geri dönen yansımaların kayıtlara sırasıyla 3,5ns, 3,9ns ve 4,3ns'de ulaştığı görülmüştür. Bu durum, göreceli dielektrik geçirgenlik değerinin artışı ile ortamdaki elektromanyetik dalga hızlarının azalmasından kaynaklanmaktadır.

Test 2'de ortam için elektriksel iletkenlik değeri sırasıyla 0,0001, 0,001 ve 1 S/m seçilmiştir. Ortamda elektriksel iletkenlik değerinin artışı ile yer içerisinde doğrudan gelen dalgalar da dahil olmak üzere, DNAPL kütlelerinden yansıyan enerjinin soğrulduğu görülmüştür. Ortam için elektriksel iletkenliğin abartılı bir şekilde 1 S/m seçildiği test sonucunda ise elektromanyetik dalgaların ortamda ilerleyemediği gözlemlenmiştir. Benzer durum saha çalışmalarında yüksek iletkenliğe sahip koşullarda (suya içeriği bulunan killi ortamlar ya da tuzluluk oranı yüksek sahalar) karşılaşılan önemli bir problemdir.

DNAPL kütlelerine ait göreceli dielektrik değerinin arttırıldığı Test 3 çalışmasında dört farklı DNAPL türüne ait özellikler kullanılmıştır. Sentetik radargramlar incelendiğinde en güçlü yansımaların TCE'den en zayıf yansımaların ise Dikoloroetan'ın kullanıldığı senaryolarda elde edildiği görülmüştür. Bunun nedeni ortama ait göreceli dielektrik değeri 27 seçildiği bu testte, göreceli dielektrik geçirgenlik değeri 3,409 olan TCE'nin ortam ile kontrastının diğer kirleticilere göre en yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Dikoloroetan (10,080) için bu kontrast en düşük seviyededir.

Test 4’de DNAPL kütlesine ait elektriksel iletkenlik değerinin artışı sonucunda yansımaların varış zamanlarında kayda değer bir değişiklik olmazken soğurulma etkisi ile özellikle DNAPL kütlesini alt sınırından gelen yansımaların zayıflayarak kayıtlara ulaştığı gözlenmiştir.

Son olarak Test 5’de DNAPL kütlesine ait göreceli manyetik geçirgenlik değerinin artışı ile radagramların incelenen diğer iki parametreden çok daha farklı sonuçlara neden olduğu görülmüştür. Radar dalgalarının DNAPL kütlesine ulaşması ile birlikte yüksek göreceli manyetik geçirgenlik değerleri için (10 ,30) baskın ve tekrarlı yansımalar meydana gelmiştir. Göreceli manyetik geçirgenlik değerinin 1 olarak kabul edildiği testte DNAPL kütlesine ait belirgin yansımalar 6ns’de sonlanırken, bu değer 30 seçildiği senaryoda ise baskın ve tekrarlı yansımaların kayıt süresi olan 10ns boyunca devam ettiği görülmüştür.

Arazi çalışmalarından veya laboratuvar ortamında deneysel amaçlı yapılan yer radarı uygulamalarından önce yapılan sayısal modelleme çalışmaları ile; çalışma için uygun anten frekansı, veri işlem aşamalarında kullanılacak parametreler ve ölçümler esnasında karşılaşılabilecek muhtemel problemleri önceden tespit etme şansı elde edilebilir. Bu çalışma ile laboratuvar ortamında DNAPL tespiti konusunda yapılacak ölçümler öncesinde ön bilgiler elde edilmiş ve yer radarı yöntemi için belirleyici olan fiziksel parametrelerin etkisi ayrıntılarıyla ortaya konmuştur.

Bu çalışma ile gösterilmiş olan modelleme senaryoları benzer şekilde arkeolojik çalışmalar, adli uygulamalar, yapı-donatu araştırmaları, jeolojik incelemeler ve benzeri araştırmalar için gerçekleştirilebilir.

Açıklamalar (Acknowledgement)

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TUBİTAK) Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı (BİDEB) 2214/A-Yurt dışı Sırası Araştırma Burs Programı Desteği ile İskoçya'nın Edinburgh Üniversitesi'nden gerçekleştirilen araştırma çalışmasının bir kısmını içermektedir. Katkılarından dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

Bu çalışmanın ön sonuçları 7. Yer Elektrik Çalıştay’ında sözlü sunu olarak sunulmuştur.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Ajo-Franklin, J. B., Geller, J. T., Harris, J. M., 2006. A survey of the geophysical properties of chlorinated DNAPLs. *Journal of Applied Geophysics*, 59(3), 177-189.
- Annan, A. P., 1973. Radio interferometry depth sounding: Part I—Theoretical discussion. *Geophysics*, 38(3), 557-580.
- Annan, A. P., 2003. *Ground Penetrating Radar Principles, Procedures & Applications*, Sensors and software, Mississauga, ON, Canada.
- Balkaya Ç., 2010. Karşılıklı Kuyu Yer Radarı Verisinin İki Boyutlu Seyahat Zamanı Tomografisi. Doktora Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 283667.
- Balkaya, Ç., Kalyoncuoğlu, Ü. Y., Özhanlı M., Merter, G., Çakmak, O., Güven, I. T., 2018. Ground-penetrating radar and electrical resistivity tomography studies in the biblical Pisidian Antioch city, southwest Anatolia. *Archaeological Prospection*, 25(4), 285-300.
- Bayrak, M. Ç., Tigdemir, M., Kardeşin, M., Çakmak, O., 2020. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(2), 572-581.
- Bianchini C. L., Tosti, F., Economou, N., Benedetto, F., 2019. Signal Processing of GPR Data for Road Surveys. *Geosciences*, 9(2), 96.
- Cai, J., McMechan, G. A., 1995. Ray-based synthesis of bistatic ground-penetrating radar profiles. *Geophysics*, 60(1), 87-96.
- Carcione, J. M., 1996. Ground-radar numerical modeling applied to engineering problems. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 1, 65-81.
- Çiydem M., Koç S., 2014. Zaman-Uzayda Sonlu Farklar Yöntemin Dezavantajları İçin Geometrik Optik Yöntemlerin Kullanımı. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(1).
- Diamanti N., 2008. An efficient ground penetrating radar finite-difference time-domain subgridding scheme and its application to the non-destructive testing of masonry arch bridges. Doktora Tezi. The University of Edinburgh, UK.
- Elsherbeni A. Z., Demir V., 2016. The finite-difference time-domain method for electromagnetics with MATLAB simulations. *ACES Series on Computational Electromagnetics and Engineering*.
- Feng, J., Su, Y., Li, C., Dai, S., Xing, S., Xiao, Y., 2019. An imaging method for Chang’e- 5 Lunar Regolith Penetrating Radar. *Planetary and Space Science*, 167, 9-16.
- Giannakis, I., Giannopoulos, A., Warren, C., 2015. A realistic FDTD numerical modeling framework of ground penetrating radar for landmine detection. *IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, 9(1), 37-51.

- Giannopoulos A., 2005. Modelling ground penetrating radar by GprMax, *Construction and Building Materials*, 19(10), 755-762.
- Giannopoulos, A., 2011. Unsplit implementation of higher order PMLs. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 60(3), 1479-1485.
- Goodman, D., 1994. Ground-penetrating radar simulation in engineering and archaeology. *Geophysics*, 59(2), 224-232.
- Hamran, S. E., Paige, D. A., Amundsen, H. E., Berger, T., Brovoll, S., Carter, L., ...Øyan, M. J., 2020. Radar imager for Mars' subsurface experiment—RIMFAX. *Space Science Reviews*, 216(8), 1-39.
- Irving J., Knight R., 2006. Numerical modeling of ground-penetrating radar in 2-D using MATLAB. *Computers and Geosciences*, 2006, 32(9),1247-1258.
- Kadioglu, S., Ulugergerli, E. U., 2012. Imaging karstic cavities in transparent 3D volume of the GPR data set in Akkopru dam, Mugla, Turkey. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 27(3), 263-271.
- Kaplanvural, İ., Pekşen, E., Özkap, K., 2018. Volumetric water content estimation of C-30 concrete using GPR. *Construction and Building Materials*, 166, 141-146.
- Kurtulmuş T., Drahor M., 2008. Yer radarı modellenmesinde fiziksel ve geometrik parametre etkilerinin araştırılması, *Yerbilimleri*, 29(2), 37-52.
- Orlando, L., Palladini, L., 2019. Time-lapse laboratory tests to monitor multiple phases of DNAPL in a porous medium. *Near Surface Geophysics*, 17(1), 55-68.
- Özkap, K., 2019. Yer radarı yöntemi ile gelişmiş üç boyutlu DNAPL modelleme. Doktora Tezi. Kocaeli Üniversitesi, Türkiye, 599062.
- Özkap, K., Pekşen, E., Kaplanvural, İ., Çaka, D., 2020. 3D scanner technology implementation to numerical modeling of GPR. *Journal of Applied Geophysics*, 179, 104086.
- Roberts, R. L., Daniels, J. J., 1997. Modeling near-field GPR in three dimensions using the FDTD method, 62(4), 114-1126.
- Schotsmans, E. M., Fletcher, J. N., Denton, J., Janaway, R. C., Wilson, A. S., 2014. Long-term effects of hydrated lime and quicklime on the decay of human remains using pig cadavers as human body analogues: field experiments. *Forensic science international*, 238, 141-e1.
- Warren C., Giannopoulos A., 2011. Creating finite-difference time-domain models of commercial ground-penetrating radar antennas using Taguchi's optimization method. *Geophysics*, 76(2), G37-G47.
- Warren C., Giannopoulos A., Giannakis I., 2016. gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar. *Computer Physics Communications*, 209, 163-170.
- Yee, K., 1966. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 14(3), 302-307.
- Zeng, X., McMechan, G. A., Cai, J., Chen, H. W., 1995. Comparison of ray and Fourier methods for modeling monostatic ground-penetrating radar profiles. *Geophysics*, 60(6), 1727-1734.
- Zeng, X., McMechan, G. A., 1997. GPR characterization of buried tanks and pipes. *Geophysics*, 62(3), 797-806.