

Karşılıklı kuyu yer radarı verilerinin modellenmesi Modeling of crosshole ground-penetrating radar data

Çağlayan BALKAYA^{1*}, Gökhan GÖKTÜRKLER²

¹Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye.
caglayanbalkaya@sdu.edu.tr

²Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye.
gokhan.gokturkler@deu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 16.09.2015, Kabul Tarihi/Accepted: 07.12.2015
* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2015.45712
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Uygulamalı jeofiziğin girişimsel olmayan elektromanyetik yöntemlerinden biri olan yer radarı sığ yeraltının oldukça yüksek çözünürlükle görüntülenmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bir yer radarı çalışmasında iki önemli unsur olan çözünürlük ve derinlik, zeminlerin su, kil, çözülebilir tuz içeriklerinden ve antenin merkez frekansından etkilenir. Elektriksel iletkenliğin yüksek olduğu alanlarda istenilen çözünürlük ve hedeflenen derinlikte iyi bir yeraltı görüntüsü elde etmek zor olabilir. Bu nedenle, karşılıklı kuyu dizilimine dayanan bir yer radarı çalışması daha detaylı bir yeraltı radar hız dağılımının elde edilmesi için iyi bir alternatif yaklaşım olabilir. Bu çalışmada, karşılıklı kuyu yer radarı veri kümelerinin tomografik ters çözümü için gerekli olan ilk varış seyahat süreleri Maxwell denklemlerinin zaman ortamı sonlu farklar ve gridlenmiş bir hız alanı boyunca Eikonal denkleminin sonlu farklar çözümünden hesaplanmıştır. Modellemede iki kuramsal yeraltı modeli kullanılmıştır. İlk modelde yeraltı iki tabakadan oluşmaktadır. İkinci model tekdüze bir ortam içerisinde gömülü düşük ve yüksek hızlı bloklar içermektedir. Yer-hava arayüzünün modellemedeki etkisi ve bir kuyu içi radar çalışmasında kuyuların derinliği ve mesafesi arasındaki oranının önemi test çalışmalarında gösterilmiştir. Tüm alıcı konumlarında zamanda kaydedilmiş elektrik alanın düşey bileşenini (Ez) içeren radargramlar zaman ortamı sonlu farklar modellemesinden elde edilmiştir. Farklı derinlikteki kaynak konumları için seyahat süresi kontur haritaları hızlı bir sonlu farklar Eikonal çözücüsünden elde edilmiştir. Daha sonra, minimum seyahat süresine sahip ışın yolları alıcıdan kaynağa en dik iniş doğrultusunda izlenerek hesaplanmıştır. Sonuç olarak, her iki modelleme yaklaşımından elde edilen seyahat süreleri birbirleriyle oldukça uyumludur. Zaman ortamı sonlu farklar modellemesi ilk varışlarla ilişkili dalga fazlarının belirlenmesi ve değerlendirilmesi için önemli bir araçtır. Diğer taraftan, Eikonal denklemi temelli modelleme ilk varış sürelerinin doğrudan hesaplanması için oldukça etkili bir yaklaşım sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Eikonal çözücü, Modelleme, Karşılıklı kuyu, Seyahat zamanı, Sonlu farklar, Yer radarı

Abstract

The ground-penetrating radar (GPR) that is one of the non-invasive electromagnetic methods of applied geophysics is widely used to image shallow subsurface with extremely high resolution. The resolution and depth being two important aspects in a GPR survey are affected by the water, clay, soluble salt contents of soils and the center frequency of antenna. It may be difficult to obtain a good subsurface image at desired resolution and targeted depth in the areas characterized by high electrical conductivity. Therefore, a GPR survey based on the crosshole configuration can be a good alternative approach to achieve more detailed subsurface radar velocity distribution. In this study, first-arrival traveltimes being essential for tomographic inversion of crosshole GPR data sets were calculated by a finite-difference time-domain (FDTD) solutions of Maxwell's equations and finite-difference solution of the Eikonal equation throughout a gridded velocity field. Two theoretical subsurface models were used in modeling. In the first model, the subsurface divided into two layers. The second model includes low- and high-velocity blocks embedded in a homogenous medium. The effect of ground-air interface in modeling and the importance of the ratio between separation and depth of boreholes in a crosshole radar survey were also shown during the test studies. Radargrams consisting of the vertical component of the electric field (Ez) recorded in time at the entire receiver locations were acquired from FDTD modeling. Traveltime contour maps for source locations with different depths were obtained from a fast finite-difference Eikonal solver. Raypaths having the minimum traveltime were then calculated by following the steepest gradient direction from the receiver to the transmitter. As a result, the first-arrival traveltimes obtained from both modeling approaches are quite compatible with each other. FDTD modeling is an important tool to determine and evaluate of the wave phases corresponding to the first arriving wave. On the other hand, Eikonal-equation-based modeling presents an approach being highly effective for directly computing first-arrival traveltimes.

Keywords: Eikonal solver, Modeling, Crosshole, Traveltime, Finite differences, Ground-penetrating radar

1 Giriş

Yer radarı (ground-penetrating radar, ground-probing radar, GPR), sığ yeraltının ve yeraltındaki metalik/metalik olmayan hedeflerin (ör., metalik ve plastik borular) yüksek çözünürlükte görüntülenmesinde kullanılan girişimsel olmayan (noninvasive), tahribatsız (nondestructive) bir uygulamalı jeofizik yöntemdir. Yöntem günümüzde; buzul araştırmaları [1],[2], boşluk, düden araştırmaları ve mağaraların olası uzanımlarının belirlenmesi [3]-[5], arkeolojik prospeksiyon [6],[7], sedimantoloji [8], zemin su içeriği ve porozitesinin belirlenmesi [9],[10], inşaat mühendisliği uygulamaları [11],[12] ve çevre problemleri [13],[14] gibi farklı alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte yöntem; adli

araştırmalar [15], kültürel ve mimari mirasın korunması ve restorasyonuna yönelik çalışmalar [16]-[18] ve ağaç köklerinin, kök biyokütlesinin ve ağaçlardaki çürümemin belirlenmesinde de [19]-[21] son zamanlarda etkin kullanım alanı bulmuştur.

Yer radarı yönteminde kaynak olarak kullanılan radyo dalgalarının zemin içerisinde ilerlemesi ve yeraltındaki nesne ve/veya yapılardan yansması temel olarak sismik yansıma yönteminde kullanılan ses dalgasının davranışlarıyla güçlü bir benzerlik göstermektedir. Bu nedenle bir GPR çalışmasında, sismik yansıma yönteminde kullanılan veri toplama ve değerlendirme teknikleri benzer olarak kullanılabilir [22]. Örneğin, sismik yöntemde olduğu gibi iki farklı düzende; hem yüzeyde hem de kuyu içinde GPR araştırmaları gerçekleştirilebilir. Yer yüzeyinde gerçekleştirilen GPR

ölçümlerinde kirlenmiş su, kil, silt ve tuz içeriği yüksek olan iletken ortamlarda elektromanyetik (EM) sinyalin ayrımlılığı kullanılan antenin merkez frekansına da bağlı olarak hızlı bir şekilde azalır [23]. Ayrıca, hidrojeolojik alanlarda genel olarak derinlik arttıkça zeminin nem ve su içeriğindeki artış da bir yer radarı görüntüsünde çözünürlüğün azalmasına neden olur. Bu nedenle, özellikle hidrojeofizikte zemindeki su içeriği ve miktarının belirlenmesi gibi çalışmalarda kuyu içinde gerçekleştirilen GPR çalışmaları tercih edilmektedir [24]. Tek bir kuyu (borehole) içerisinde ya da karşılıklı iki kuyu arasında (crosshole) gerçekleştirilen kuyu içi yer radarı ölçümleri, çoğunlukla kırık, boşluk ve tünel araştırmalarında [25],[26] ve hidrojeolojide [27]-[29] etkin olarak kullanılmaktadır.

Karşılıklı iki kuyu, verici ve alıcı kuyuları, arasında kalan alanda radar hız dağılımını belirleyebilmek için yaygın olarak ilk varış seyahat sürelerinin ters çözümü esasına dayanan seyahat zamanı tomografisi (traveltime tomography) kullanılmaktadır [30]. Bu yaklaşımda, ilk varışların doğru olarak belirlenmesi yer radarı ve/veya sismik tomogramların kalitesini doğrudan etkilemektedir. İlk varış seyahat süreleri; manuel (el ile), otomatik veya her ikisinin birleşimini kullanan çeşitli yaklaşımlardan elde edilebilmektedir. Bununla birlikte, günümüzde bilgisayar bilimi ve teknolojisindeki gelişmeler neticesinde toplanan veri sayısındaki artış, hızlı ve otomatik ilk varış işaretlemelerini sunan algoritmaların geliştirilmesini sağlamıştır [31]. Bu çalışmada, karşılıklı kuyu yer radarı verisinden tomografik ters çözüm için gerekli olan ilk varış seyahat süreleri; (i) manuel olarak, Maxwell denklemlerinin zaman ortamı sonlu farklar (finite-difference time-domain, FDTD) çözümünden ve (ii) otomatik olarak, Eikonal denkleminin sonlu farklarla çözümünden elde edilmiştir.

Kane Yee [32] tarafından önerilen ve EM alan analizinin temeli olarak kabul edilen FDTD algoritması izleyen yıllarda Allen Taflove tarafından popüler hale dönüştürülmüştür [33]-[35]. Bu yaklaşımda, modellenecek olan yapının boyutları belirlendikten ve alan birim Yee hücrelerine bölüldükten sonra belirlenen bir kaynak noktasından bir EM sinyal uygulanmaktadır. Sınır şartları da dikkate alınarak ilgilenilen elektrik ve manyetik alan bileşeninin değerleri uygun bir zaman adımında (time step) ve belirli bir süre boyunca yinelemeli olarak alıcılarda kaydedilmektedir. Taflove ve Simpson [36], Yee'nin bu yaklaşımından günümüze değin üretilen birçok alternatif yaklaşımdan hiçbirinin Yee'nin algoritması kadar uzun ömürlü ve de yeni bir bakış açısı doğuracak kadar etkili olmadığını vurgulamaktadır.

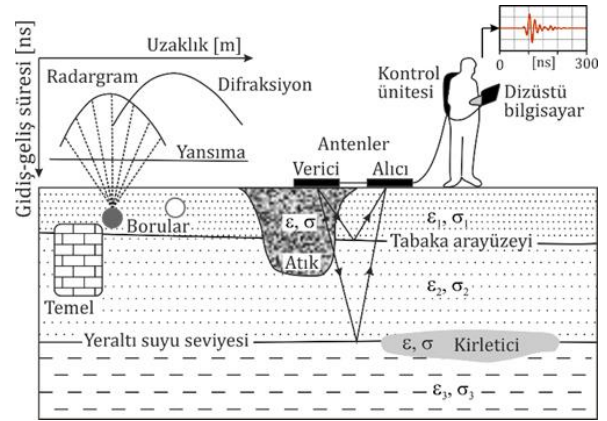
İlk varış sürelerini temel alan seyahat zamanı tomografisinde ilk akla gelen, klasik ışın izleme yaklaşımı [37],[38] olmakla birlikte Eikonal denkleminin sonlu farklar çözümü de [39]-[42] yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yaklaşımda ışınlardan ziyade dalga cepheleeri izlenmekte ve seyahat süreleri bir hız gridi üzerinde Eikonal denkleminin sonlu farklarla çözümlenmesinden elde edilmektedir [39]. Bu yaklaşımın karşılıklı kuyu yer radarı verilerinin tomografik ters çözümünde ilk uygulamasından sonra [24],[43] kullanımı yaygınlaşmıştır [44]-[48].

Bu çalışmada, yukarıda değinilen iki farklı temele dayanan modelleme yaklaşımı öncelikle yatay iki tabakadan oluşan bir yer modeli üzerinde irdelenmiştir. Daha sonra, tekdüze bir ortam içerisinde (0.1 m/ns) görece düşük (0.08 m/ns) ve yüksek hızlı (0.12 m/ns) iki bloktan oluşan bir kuramsal test modelinin tomografik ters çözümü için gerekli ilk varış seyahat süreleri her iki yaklaşımdan elde edilmiştir. İlk varış seyahat

sürelerinin Eikonal denklemi temelli çözümden doğrudan elde edilmesi hesaplama zamanı açısından daha verimliken Maxwell denklemlerinin FDTD ile çözümü dalga fazlarının izlenmesi ve belirlenmesi açısından oldukça yararlıdır.

2 Yer radarı yöntemi

Yer radarı yöntemi, yüksek frekanslı bir EM sinyalin (radar sinyali) bir verici antenden yere iletilmesi ve tabaka sınırlarından ve/veya gömülü nesnelere yansımalar/şaçılarak geri gelen ve şekil değiştiren bu sinyalin alıcı antenler tarafından varış süresinin bir fonksiyonu olarak kaydedilmesi esasına dayanır (Şekil 1). Böylece, radar dalgalarının gidiş-geliş sürelerinden (two-way travel time, twt) yararlanılarak yer için elektrik özelliklerindeki değişimleri temsil eden bir görüntü (radar kesitleri) elde edilebilir.



Şekil 1: Yer radarı yönteminin genel çalışma sistemi ([49], s. 284'den düzenlenmiştir).

Herhangi bir ortam içerisinde EM dalgaların (radyo dalgaları) hızı; bağıl dielektrik geçirgenlik (ϵ_r), elektriksel iletkenlik (σ) ve bağıl manyetik geçirgenlik (μ) ile boşlukta ışığın hızına ($c \cong 0.2998 \text{ m/ns}$) bağlıdır [50] ve izleyen eşitlikle verilmektedir.

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r \frac{1 + \sqrt{1 + (\sigma/\omega\epsilon)^2}}{2}}} \quad (1)$$

Burada, $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ dielektrik geçirgenlik, ϵ_0 boşluğun dielektrik geçirgenliği ($8.854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$), $\omega = 2\pi f$ açısal frekans, f frekans ve $\sigma/\omega\epsilon$ terimi de kayıp faktörünü göstermektedir. Manyetik olmayan ($\mu_r = 1$) düşük kayıplı malzemelerde ($\sigma/\omega\epsilon \approx 0$) EM dalgaların yayınım hızı aşağıda verilen eşitliğe indirgenir.

$$v = c/\sqrt{\epsilon_r} \quad (2)$$

EM dalga havada ışık hızıyla ilerlerken yer içinde; jeolojik birimlerin bileşimleri, EM özellikleri (ϵ_r , σ ve μ_r) ve ortamdaki su içeriği gibi etmenler nedeniyle hızı azalır. Şekil 2a bağıl dielektrik geçirgenlik (ϵ_r) ve radar hızları (v) arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Buradaki en düşük ve en yüksek bağıl dielektrik geçirgenlik değerleri sırasıyla hava ($\epsilon_r = 1$) ve suya ($\epsilon_r = 81$) aittir. Jeolojik birimler, genel olarak, 3–30 aralığında değerler alırken radar hızları görece geniş bir aralıkta ($\approx 0.06\text{--}0.175 \text{ m/ns}$) değişmektedir [50]. Jeolojik birimlerdeki gözeneklerin su ile dolu olması radar hızlarının azalmasına neden olurken hava ile dolu olması hız değerlerini arttırmaktadır (bk. Şekil 2b). Bağıl dielektrik geçirgenlik ve

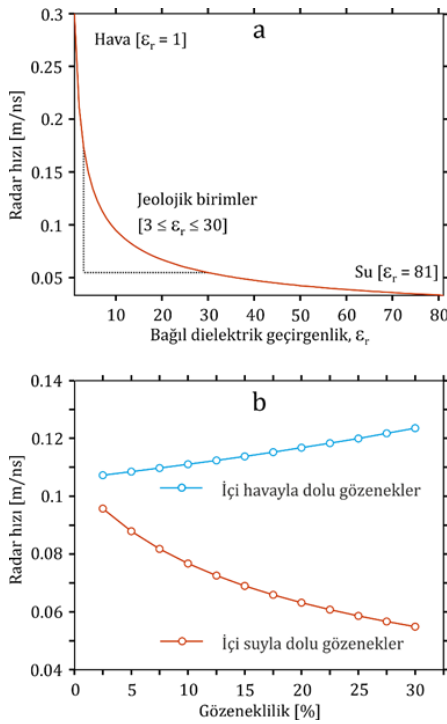
gözeneklilik arasındaki ilişki Parkhomenko [51] tarafından verilmiştir.

$$\varepsilon_r = (1 - \phi)\varepsilon_m + \phi\varepsilon_w \quad (3)$$

Burada, ϕ gözenekliliği, ε_m ve ε_w ise sırasıyla kaya matrisi ve gözenek suyunun bağıl dielektrik geçirgenliklerini göstermektedir. Denklem 3'ün Denklem 2'de yerine konulmasıyla,

$$v = c/\sqrt{[(1 - \phi)\varepsilon_m + \phi\varepsilon_w]}, \quad (4)$$

radar hızlarıyla gözeneklilik arasındaki ilişkiyi gösteren eşitlik elde edilir [50]. Şekil 2b, gözeneklerin su ($\varepsilon_r = 81$) ve havayla dolu olması ($\varepsilon_r = 1$) durumlarında ve gözenekliliğin %2–30 oranlarında artmasıyla radar hızlarının nasıl değiştiğini göstermektedir.



Şekil 2: (a): Radar dalga hızları ve bağıl dielektrik geçirgenlik arasındaki ilişki, (b): Radar hızlarının, hava ve suya doygun malzemeler için gözenekliliğin bir fonksiyonu olarak değişimi.

3 Tomografik ters çözüm amaçlı veri toplama

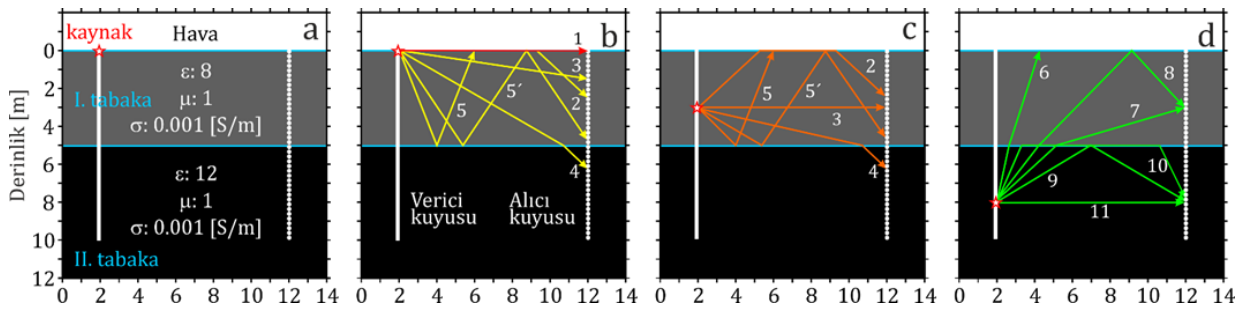
GPR yönteminin prensipte sismik yöntemle benzer özellikler göstermesi nedeniyle yansıma sismisinde kullanılan veri toplama, veri işlem ve modelleme teknikleri GPR yöntemi

içinde uygulanabilmektedir [22]. Bir GPR çalışması, sismik yöntemde olduğu gibi iki farklı düzende; yüzeyde ve kuyu içinde gerçekleştirilebilir. Yer yüzeyinde gerçekleştirilen çalışmalarda, bir GPR sinyalinin ayrımlılığı; kullanılan antenin merkez frekansı, yeraltı suyu seviyesi ve jeolojik birimlerin elektriksel özellikleri gibi etmenlere bağlı olarak derinlikle hızlı bir şekilde azalır. Bu nedenle, yeraltının ayrıntılı çalışılmasının gerektiği ve özellikle yeraltı suyu seviyesinin sığ olduğu alanlarda karşılıklı kuyu dizilimini temel alan bir GPR çalışması daha uygundur [24],[52]. Bu dizilim için genel bir gösterim yatay iki tabakadan oluşan bir yer modeli [53] üzerinde gösterilmiştir (Şekil 3a).

Bu düzende, verici kuyusunda belirli bir derinlikte konumlanan verici antenden gönderilen radar sinyali, alıcı kuyusunda yine belirli bir derinlikte konumlanan alıcı anten tarafından kaydedilir. Sonra, verici anten aynı konumunda kalırken alıcı anten kuyu içerisinde önceden belirlenen sabit bir aralıkta sonraki ölçüm noktalarına taşınarak ölçümler gerçekleştirilir. Böylece, verici antenin mevcut derinliği için çalışma tamamlanır. Daha sonra, verici anten kuyu boyunca bir sonraki ölçüm noktasına taşınırken alıcı kuyusunda her bir derinlikteki alıcı antenler için yukarıda açıklanan adımlar tekrar edilir. Bu dizilimde, yer-hava arayüzünde kırılan dalganın direkt varışları maskeleymesini önlemek için kuyu derinliğinin verici ve alıcı kuyular arasındaki mesafenin iki katından büyük ($h > 2x$) olmasına dikkat edilmelidir [54].

Şekil 3a'da sunulan ve manyetik özelliği bulunmayan yatay iki tabakalı yer modelinde, 5 m kalınlığındaki ilk tabaka, ikinci tabakaya göre görece düşük bir bağıl dielektrik geçirgenlik değerine sahiptir (sırasıyla $\varepsilon_r = 8$ ve 12). Tabakaların elektriksel iletkenliklerinin ($\sigma = 1$ mS/m) birbirine eşit olarak tasarlandığı model (14 m x 12 m) ayrıca 2 m kalınlığında bir hava tabakası da içermektedir. Modelde, verici ve alıcı kuyuları yatay doğrultuda sırasıyla 2. ve 12. metrelere yerleştirilmiştir. Verici ve alıcı kuyuların uzunluğu 10 m'dir, dolayısıyla yukarıda belirtilen koşula uymamaktadır. Alıcı kuyusunda yer yüzeyinden itibaren 0.25 m aralıklarla toplamda 41 adet alıcı konumlandırılmıştır.

Bir kuyu içi radar çalışmasında yukarıda açıklanan düzende veri toplanması durumunda; doğrudan gelen, yansıyan veya kırılan dalgalar gibi farklı dalga fazları görülebilmektedir. Arayüzeyler (jeolojik tabaka arayüzeyleri, yer-hava arayüzeyi veya yeraltı suyu tablası gibi), farklı dielektrik özelliklere sahip olmaları nedeniyle yansıtıcı veya kırıcı gibi davranabilir [30]. Şekil 3b-d, kaynağın verici kuyusunda; (i) yüzeye (Şekil 3b), (ii) I. tabaka içerisinde 3 m derinliğe (Şekil 3c) ve (iii) II. tabaka içerisinde 8 m derinliğe (Şekil 3d) yerleştirilmesi durumunda gözlenecek dalga fazlarının ışın yollarını göstermektedir. Numaralandırılmış ışın yolları Tablo 1'de açıklanmıştır.



Şekil 3: (a): Yatay iki tabakalı model ve model parametreleri [53]. Kaynağın sırasıyla, yüzeyde, (b): 3. m'de, (c): 8. m'de, (d): konumlandırılmasıyla gözlenebilecek ışın yolları.

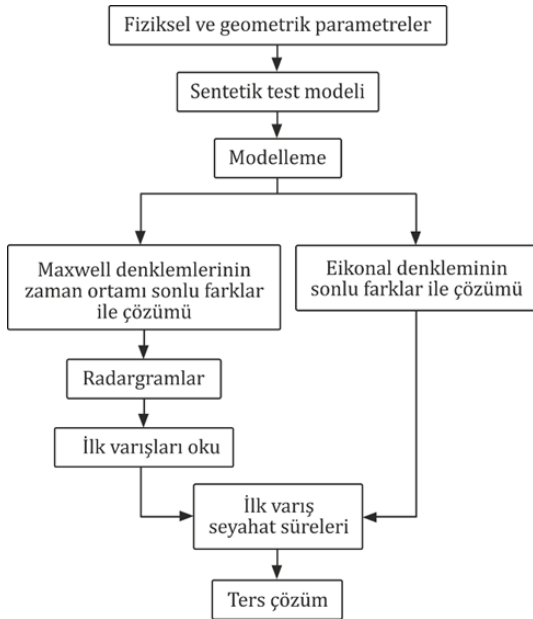
Tablo 1: Işın yolları ve tanımlamaları.

Işın	Açıklama
1	Hava dalgası,
2	Yer-hava arayüzeyinde kritik açıda kırılmış dalga/yer dalgası (ground wave),
3	I. tabakada doğrudan gelen dalga,
4	Tabaka arayüzeyinden kırılarak II. tabakaya iletilen dalga,
5	Tabaka arayüzeyinden yansıyan dalga,
5'	Yer-hava arayüzeyinden çoklu yansıma,
6	Yer-hava arayüzeyinden yansıyan dalga,
7, 8	Tabaka arayüzeyinden kırılarak I. tabakaya iletilen dalga,
9	Tabaka arayüzeyinden kırılarak yer-hava arayüzeyinden yansıyan dalga,
10	Tabaka arayüzeyinden yansıyan dalga,
11	Tabaka arayüzeyinden kritik açıda kırılan dalga,
12	II. tabakada doğrudan gelen dalga.

4 Modelleme algoritmaları

Karşılıklı kuyular arasında kalan alanda sığ yeraltının EM hız yapısının yüksek çözünürlükte görüntülenmesi amacıyla kullanılan ilk varış radar tomografisinde (first-arrival crosshole radar tomography) doğrudan varışların seyahat süreleri kullanılarak gerçekleştirilen ters çözüm tekniği (traveltime tomography) yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu teknikte, her bir yinelemede güncellenen yer modeline ait ilk varış seyahat sürelerini elde etmek için;

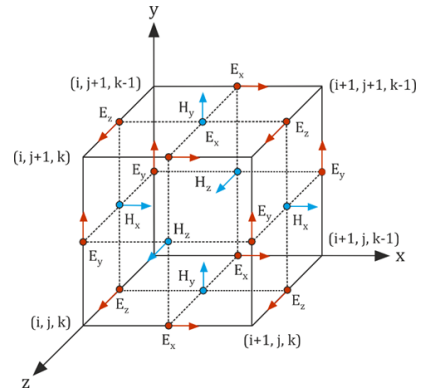
- Maxwell denklemlerinin zaman ortamı sonlu farklar (Finite-Difference Time-Domain, FDTD) ve
- Eikonal denkleminin sonlu farklar çözümleri olmak üzere iki farklı yaklaşım sentetik ve/veya arazi veri kümelerinin değerlendirilmesinde kullanılabilir. Ters çözümde kullanılacak olan ilk varış seyahat sürelerinden oluşan veri kümelerinin elde edilmesinde izlenecek adımları gösteren basitleştirilmiş bir akış şeması Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4: Tomografik ters çözüm için karşılıklı kuyu yer radarı verilerinden ilk varış seyahat sürelerinin iki farklı sonlu farklar modellemesinden hesaplanması.

4.1 Maxwell denklemlerinin zaman ortamı sonlu farklarla çözümü

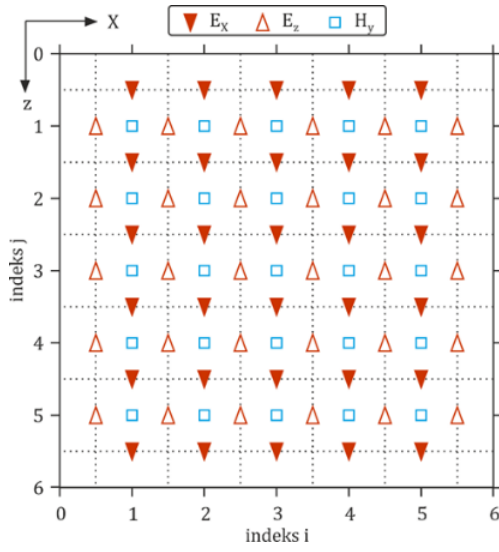
Matematiksel olarak elektromanyetiğin fiziğini tanımlayan Maxwell denklemleri aynı zamanda bir EM dalga olan GPR sinyallerinin de nicel olarak tanımlanması için bir temel oluşturmaktadır [55]. Bu bağlamda, FDTD algoritması, Maxwell denklemleriyle elektrik ve manyetik alan vektör bileşenlerini hem diferansiyel hem de integral olarak her iki biçimde de gösterebilen bir geometri sunmaktadır [36]. EM alan analizinin temeli olarak kabul edilen FDTD algoritması [32]; bir dalga denklemiyle, sadece elektrik veya sadece manyetik alanı çözmekten ziyade birleştirilmiş Maxwell denklemlerini kullanarak zaman ve uzay ortamında bu alanları birlikte çözmektedir. Her iki alan bilgisinden elde edilen çözüm yalnız birini kullanarak elde edilenden daha kararlı olmaktadır. Bu yaklaşımda, her bir elektrik alan bileşeni dört manyetik alan bileşeniyle çevrilmiştir. Benzer olarak, her manyetik alan bileşeninin etrafında da dört elektrik alan bileşeni bulunmaktadır [36]. Yee algoritmasında, model öncelikle eşit büyüklüklerde çok sayıda küple tanımlanmaktadır. Her bir Yee hücresinde, hesap uzayındaki konumları (i, j, k) indisleriyle tanımlanan üç elektrik ve üç manyetik alan bileşeni bulunur. Şekil 5, elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin birim Yee hücreindeki konumlarını göstermektedir.



Şekil 5: Elektrik ve manyetik alan vektör bileşenlerinin Yee'nin [32] hesaplama ağı üzerindeki konumları ([56]'dan [43] tarafından düzenlenmiştir).

Kuyu içi radar çalışmalarında kullanılan verici ve alıcılar dipol antenlerdir ve bunlar kuyu eksenine (z yönünde) aynı doğrultudadır. Bu çalışmalarda, verici ve alıcı antenlere paralel, iletilen elektrik alan bileşeniyle ilgilendiğinden karşılıklı kuyu yer radarı verilerinin modellenmesinde Maxwell denklemlerinin TE-modu eşitliklerinin kullanılması daha uygundur [57]-[59]. TE-modunda elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin kartezyen koordinatlardaki konumları Şekil 6'da gösterilmektedir.

FDTD kullanılarak gerçekleştirilecek bir modellemede, modelin boyutları belirlendikten ve birim Yee hücreleriyle tanımlandıktan sonra belirlenen bir kaynak noktasından bir EM sinyal uygulanmaktadır. Bilindiği gibi, FDTD yönteminde sayısal modellemenin gerçekleştirilmesi için hesaplama alanı yapay olarak sınırlandırılır. Modellemede, bu yapay sınırlardan kaynaklanan gerçekte olmayan yansımaların ve grid sınırlarında oluşan istenmeyen yansıtıcı dalgaların soğurulabilmesi için sınır koşulları uygulanır. Sınır şartları da dikkate alınarak, ilgilenen elektrik ve manyetik alan bileşeninin değerleri, toplam kayıt süresince uygun bir zaman adımında (time step) yinelemeli olarak alıcılarda kaydedilir.



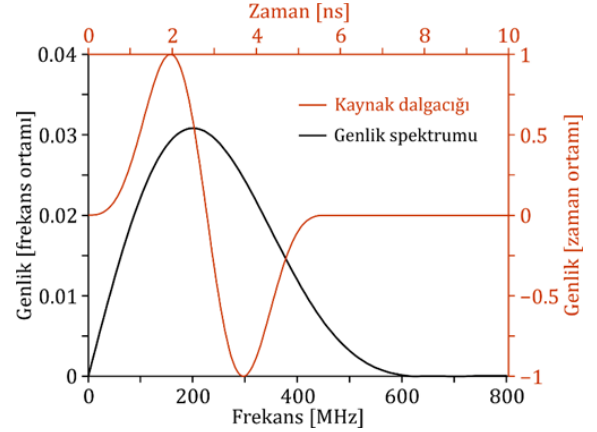
Şekil 6: TE-modu sayısal modellemesi için elektrik ve manyetik alan vektör bileşenlerinin sonlu farklar ağındaki yapılandırılması ([60],[61]'den [43] tarafından düzenlenmiştir). Bu çalışmada, FDTD sayısal modellemesiyle dalga alanlarının yayılımı, MATLAB programlama dilini kullanan 2B'lu bir FDTD algoritmasından elde edilmiştir [61]. Bilindiği gibi, modellemede en uygun zaman adımının (Δt) belirlenmesi; EM dalga yayılımının hem zaman hem de uzaklık ortamında doğru bir şekilde örneklenmesi ve sonlu farklar yaklaşımının kararlı çözümler üretmesi açısından önemlidir. Algoritmada maksimum zaman adımı izleyen ve Courant ölçütü olarak tanımlanan bir kararlılık koşulu dikkate alınarak hesaplanmaktadır [62].

$$\Delta t_{max} = \frac{6}{7} \sqrt{\frac{\mu_{min} \varepsilon_{min}}{\left(\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}\right)}} \quad (5)$$

Burada, μ_{min} ve ε_{min} sırasıyla minimum bağıl manyetik geçirgenliği ve minimum bağıl dielektrik sabitini göstermektedir. Δx ve Δz konum örnekleme adımlarıdır. Algoritma, kaynak sinyali olarak Blackman-Harris pencere fonksiyonunun [63] birinci türevini [64] ve evrimsel mükemmel uyumlu katman (convolutional perfectly matched layer, CPML) [65] soğurucu sınır koşulunu kullanmaktadır. Bilindiği gibi, modelleme çalışmalarında genel olarak tercih edilen Ricker, Gabor ve Klauder gibi sıfır fazlı simetrik dalgacıkların arazi uygulamalarında üretilebilmeleri mümkün değildir. Sıfır zamanında bir maksimum değere sahip olan bu dalgacıklar dolayısıyla sıfır zamanından önce bir enerjiye sahiptirler. Bu dalgacıkların sıfır zamanından önce bir enerjiye sahip olmaları onların nedensel olmayan bir özellik kazanmalarına sebep olur, bu da gerçekçi olmayan bir durumdur. Bu nedenle, modelleme çalışmalarında genel olarak yukarıda değinilen bu dalgacıkların minimum faz eşlenikleri tercih edilmektedir. Bu çalışmada kullanılan ve kabaca Ricker dalgacığına benzeyen Blackman-Harris penceresinin birinci türevi de minimum fazlı bir dalgacık kapsamında değerlendirilebilir. Ayrıca, bu çalışma kapsamında, kuyu içi radar veri kümelerinin tomografik ters çözümü amaçlandığından minimum fazlı dalgacıklarla yapılan çözümler ilk yarı zamanı okumaları için daha uygun radargramlar üretmektedir. Denklem 6, Blackman-Harris pencere fonksiyonunu tanımlamaktadır.

$$f(t) = \begin{cases} \sum_{n=0}^3 a_n \cos\left(\frac{2n\pi t}{T}\right), & \text{eğer } 0 < t < T \\ 0, & \text{diğer koşullarda} \end{cases} \quad (6)$$

Burada, a_n , katsayılar ($a_0 = 0.35322222$; $a_1 = -0.488$; $a_2 = 0.145$; $a_3 = 0.01022222$); t , zaman [ns]; T , kaynak fonksiyonunun süresi ($T = 1.14/f_c$) ve f_c ise merkez frekansıdır [63]. Şekil 7, 200 MHz merkez frekans kullanılarak toplam 10 ns'lik bir kayıt uzunluğu için hesaplanan kaynak dalgacığını (fonksiyonu) ve onun genlik spektrumunu göstermektedir.



Şekil 7: Modellemede kullanılan 200 MHz merkez frekansına sahip kaynak fonksiyonu (Blackman-Harris penceresinin birinci türevi) ve genlik spektrumu.

4.1.1 Yatay iki tabaka modelinde FDTD uygulaması

Şekil 3a'da verilen ve EM özellikleri yukarıda açıklanan hava tabakası da içeren yatay iki tabakalı yer modeli seçilerek hem ilk varışlarla ilgili dalga fazlarının daha ayrıntılı izlenmesi ve irdelenmesi hem de bu çalışmada kullanılan algoritmanın test edilmesi amaçlanmıştır. Modellemede, merkez frekansı 200 MHz olan Blackman-Harris penceresinin birinci türevi kaynak dalgacığı olarak kullanılmıştır (bk. Şekil 7). Simulasyonda konum (Δx ve Δz) ve zaman (Δt) örnekleme adımları birbirine eşit ve sırasıyla $\Delta x = \Delta z = 0.02 m$ ve $\Delta t = 0.02 ns$ olarak alınmıştır. Toplam kayıt süresi 200 ns'dir. Şekil 8, sayısal modellemeden elde edilen ve üç farklı derinlikteki kaynaklardan (sırasıyla $z = 0, 3$ ve $8 m$) yayılan elektrik alanının düşey bileşeninin (E_z) çeşitli zaman adımlarında kaydedilen (sırasıyla 24, 56, 88 ve 120 ns) anlık görüntülerini (snapshots) göstermektedir. Dalga cephelelerinin önündeki sayılar genel olarak Şekil 3b-d'de sunulan ve Tablo 1'de açıklanan ışın yollarıyla ilişkilidir.

Kaynak noktasının yüzeyde olduğu durumda (Şekil 8a-d), $t = 24 ns$ anında; EM dalga görece yüksek hızlı ($v = 0.106 m/ns$) ilk tabaka içerisinde ilerlerken; (i) hava dalgasıyla (1) birlikte (ii) yer-hava arayüzünde kritik açıda kırılmış dalga (2) ve (iii) I. tabakada doğrudan gelen dalga (3) oluşmaktadır. Bir sonraki zaman adımındaysa ($t = 56 ns$); (3) tabaka arayüzünden yansırken (5), aynı zamanda tabaka arayüzünden kırılarak görece düşük hızlı ($v = 0.086 m/ns$) II. tabakaya iletilmekte (4) ve (2) ilk tabakadaki alıcılara ulaşmaktadır. Benzer EM dalga yayılımı Şekil 8c'de $t = 88 ns$ anında da izlenirken (2)'nin artık II. tabakadaki alıcılara ulaştığı görülmektedir. Son zaman adımında, (4)'te alıcılarda kaydedilirken (5)'in yer-hava arayüzüne ulaşmasıyla bu arayüzeyden çoklu yansıma (5') gerçekleşmektedir.

Şekil 8e-h'de, kaynak verici kuyusunda ilk tabaka içerisinde 3. m'ye yerleştirilmiştir. Kaynağın yüzeyde olması durumundan farklı olarak, (3) yer-hava arayüzünden yansımaktadır (6) (Şekil 8f). Ayrıca, yansıyan bu dalga, tabaka arayüzüne ulaştığında tekrar yansımakta (6') ve aynı zamanda da kırılarak II. tabakaya iletilmektedir (6'') (Şekil 8g, h). Kaynağın 8. m'de ve II. tabakada olması durumunda (Şekil 8i-l), $t = 56 \text{ ns}$ anında (Şekil 8j), II. tabakada doğrudan gelen dalga (12) tabaka arayüzüne ulaştığında buradan yansımakta (10) ve kırılarak I. tabakaya iletilmektedir (7). Sonraki zaman adımı olan $t = 88 \text{ ns}$ anında, (7) yer-hava arayüzüne ulaşırken tabaka arayüzünden kritik açıda kırılan dalga da (11) çok belirgin olmamakla birlikte izlenmektedir. Şekil 8l'de sunulan son zaman adımındaysa ($t = 120 \text{ ns}$), (7) yer-hava arayüzünden yansırken (9), aynı zamanda ilk tabaka içerisindeki alıcılarda kaydedilmektedir (8).

4.2 Eikonal denkleminin sonlu farklarla çözümü

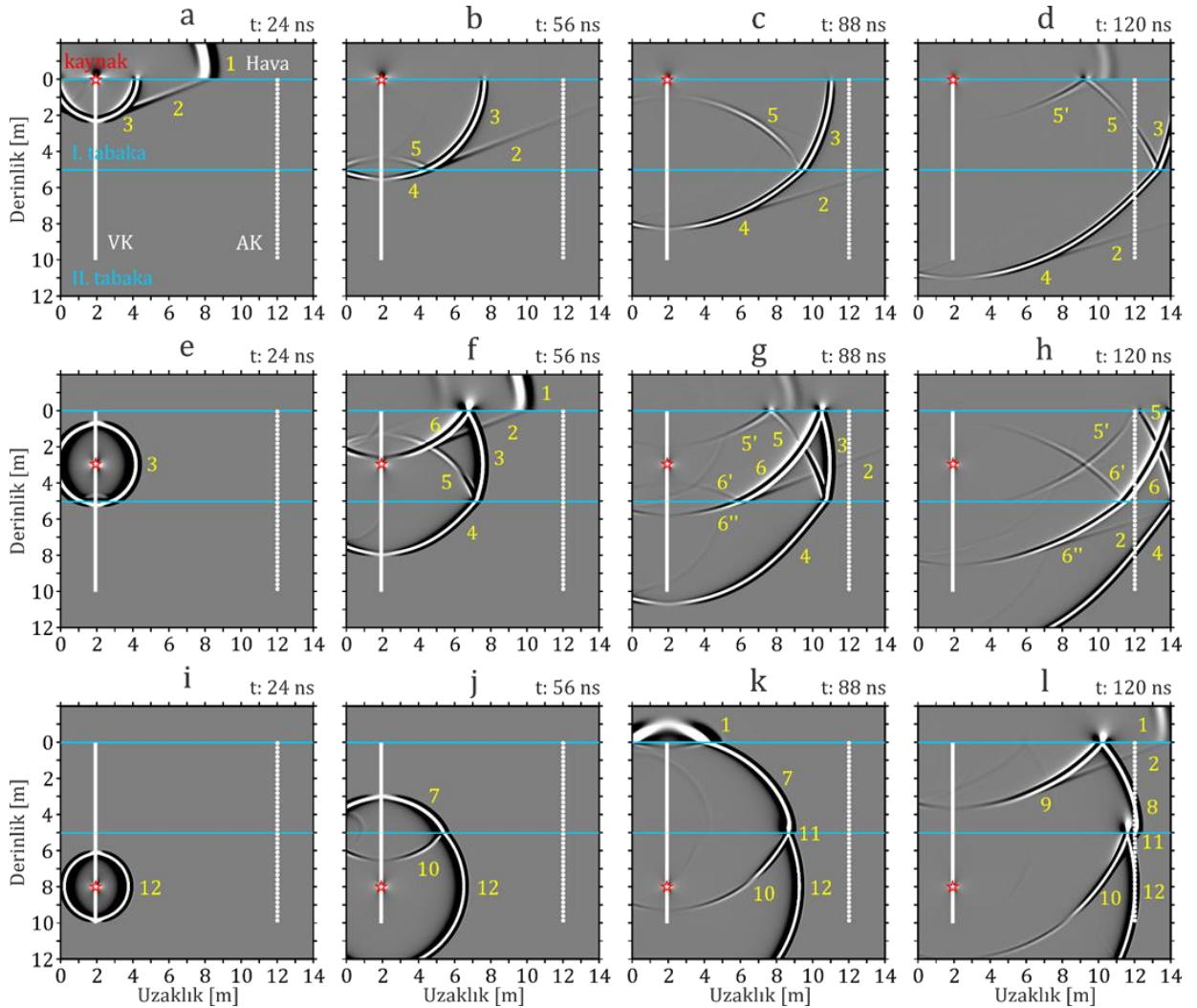
Vidale [39], Eikonal denklemini (Denklem 7) bir hız gridi üzerinde sonlu farklar yaklaşımıyla çözerek; doğrudan gelen, kırılarak gelen ve difraksiyondan (kırınım) oluşan ilk varışlara ait seyahat sürelerinin hesaplanması için günümüzde yaygın olarak 'Eikonal çözücü' (Eikonal solver) olarak tanımlanan bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntemde; (i) seyahat süreleri tüm

grid noktaları için hesaplanarak ışın izlemenin (ray tracing) gerektirdiği yüksek CPU süresi azaltılmakta ve (ii) ışın yerine dalga cepheleri izlenerek (wavefront tracing) doğrudan gelen ışınlarla erişilemeyen gölge zonlara (shadow zones) nüfuz edilebilmesi amaçlanmaktadır [39],[66]. İzleyen yıllarda, araştırmacılar, bu yaklaşımı temel alan yeni yöntemler geliştirerek çeşitli jeofizik problemlerine uygulamışlardır [40],[41],[67]-[70].

İki boyutlu (2B) bir ortamda dalga yayılımının seyahat süresi izleyen Eikonal denklemi (seyahat sürelerinin kısmi türevi) ile tanımlanmaktadır.

$$\left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial z}\right)^2 = s(x, z)^2 \quad (7)$$

Yukarıdaki denklemde; x ve z uzay koordinatları, $t(x, z)$ seyahat süresi alanı ve $s(x, z)$ ise yavaşlık alanıdır. Vidale'in yöntemi, 2B'lu bir ortamda, eşit yatay ve düşey örnekleme aralıklarında konumlanan hız düğüm noktalarının oluşturduğu kare şeklindeki bir grid için tanımlanmıştır. Aşağıda, Vidale [39] tarafından önerilen yaklaşıma ait ayrıntılar verilmektedir. Yöntemle ilgili daha detaylı bilgiler [43]'te bulunabilir.



Şekil 8: FDTD modellemesinden elde edilen elektrik alanının düşey bileşeninin (E_z) çeşitli zaman adımlarındaki anlık görüntüleri. (a-d): Kaynak yüzeyde ($z = 0 \text{ m}$), (e-h): Kaynak I. tabakada ve 3 m derinlikte, (i-l): Kaynak II. tabakada ve 8 m derinlikte.

Şekil 9a ve b'de gösterilen A noktası, sismik ya da bu çalışmada olduğu gibi EM dalga yayılımı için kaynak noktası olarak kabul edilir ve bu noktadaki seyahat süresinin değeri sıfır olarak atanır. A noktasını çevreleyen ve $B1, B2, B3$ ve $B4$ olarak belirtilen dört düğüm noktasının (Şekil 9a) seyahat süreleri; (i) A noktasındaki seyahat süresi, (ii) kaynak, (iii) bu noktalar arasındaki mesafeler ve (iv) ortamın hızı bilindiğinden aşağıda verilen denklem uygulanarak hesaplanabilir.

$$t_i = \frac{h}{2}(s_{B_i} + s_A) \quad (8)$$

Burada, h düğüm noktaları arasındaki mesafe, s_A A noktasındaki yavaşlık (hızın çarpmaya göre tersi) ve s_{B_i} ise B_i noktasındaki yavaşlıktır. Her bir hücrenin köşesindeki dördüncü düğüm noktalarındaki ($C1 - C4$) seyahat süreleri ise dış değer bulma yöntemiyle geliştirilen iki bağıntıyla hesaplanmaktadır. Dalga cephelerinin küresel olduğu durumlarda (kaynak noktasına yakın noktalar), Denklem (9a), düzlemsel olması durumunda (kaynak noktasından uzak noktalar) ise Denklem (9b)'de verilen eşitliklerden hesaplanan seyahat süresi (t_3) en iyi tahmin değerini vermektedir [38].

$$t_3 = t_s + s\sqrt{(x_s + h)^2 + (z_s + h)^2} \quad (9a)$$

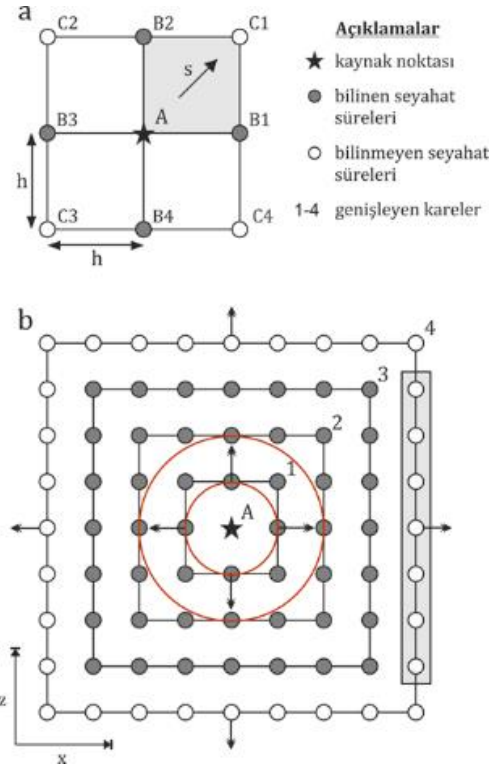
$$t_3 = t_0 + \sqrt{2(h\bar{s})^2 - (t_2 - t_1)^2} \quad (9b)$$

Denklem 9a'da, x_s kaynak noktasının x koordinatı, z_s kaynak noktasının z koordinatı ve t_s kaynak için orijin süresini göstermektedir. Küresel bir dalga cephesi bu üç bileşenle birlikte tanımlanmaktadır. Kaynak noktası, küresel dalga cephesinin merkezinde bulunmaktadır. Denklem 9b'de, \bar{s} dikkate alınan dört düğüm noktası için ortalama yavaşlığı tanımlarken t_0, t_1 ve t_2 , sırasıyla orijin, $B1$ ve $B2$ noktalarının seyahat süreleridir.

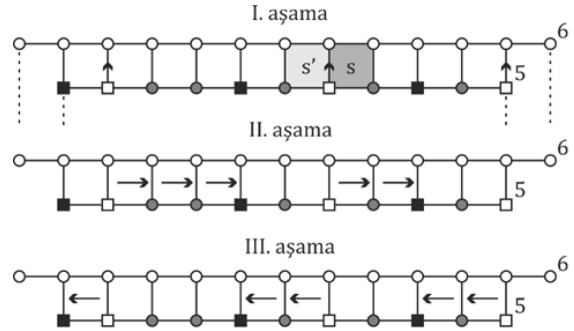
Kaynak noktası etrafındaki yarıçap artırılarak yeni karenin düğüm noktalarındaki seyahat süreleri benzer adımlarla hesaplanmaktadır. Şekil 9b, seyahat sürelerinin, Vidale'in genişleyen kare yöntemiyle (kaynak noktası A etrafındaki yarıçap artırılarak) nasıl hesaplandığını göstermektedir. Dikdörtgen içerisinde kalan düğüm noktalarının seyahat süreleri, bir önceki kareden bilinen komşu seyahat sürelerinden izleyen üç aşama uygulanarak hesaplanmaktadır. Şekil 10, bu aşamaları daha iyi açıklamak için sırasıyla 11 ve 13 düğüm noktasından oluşan 5. ve 6. genişleyen kareleri göstermektedir. İlk aşamada, 5. genişleyen karenin düğüm noktaları için yerel minimumlar bulunmaktadır. Daha sonra, bu yerel minimumların önündeki 6. karenin düğüm noktaları için aşağıdaki bir diğer Eikonal denkleminin sonlu farklar tahmini uygulanmaktadır.

$$t_3 = t_0 + \sqrt{(h\bar{s})^2 - 0.25(t_2 - t_1)^2} \quad (10)$$

Burada, \bar{s} daha önce belirtildiği gibi yine yavaşlığın ortalamasını göstermektedir. İkinci aşamada ise kalan noktalardaki seyahat süreleri, yerel minimum noktalarından sağa doğru bir sonraki yerel maksimuma ya da bir köşe noktasına ulaşıncaya kadar tekrar Denklem 8 kullanılarak hesaplanır. Üçüncü aşamada, seyahat süreleri bu kez yerel minimum noktalarından sola doğru benzer olarak hesaplanır. Doğal olarak, yerel maksimumlarda iki adet seyahat süresi bulunmaktadır. Ancak, en küçük değer, seyahat süresi olarak kaydedilir ve bu adımlar tekrar edilerek $2B$ 'lu gridin tüm seyahat süreleri hesaplanır [39].



Şekil 9: Vidale'in genişleyen kare (expanding square) yöntemi ([39] ve [69]'dan [43] tarafından düzenlenmiştir). (a): A noktasındaki kaynağın etrafındaki (içi dolu yıldız) dört köşede ($C1 - C4$) seyahat sürelerini hesaplamak için kullanılan sonlu farklar gridinin genel gösterimi. $C1$ noktasındaki bilinmeyen seyahat süresi, kaynak noktası (A) ve komşu iki noktanın ($B1$ ve $B2$) bilinen seyahat sürelerinden hesaplanmaktadır. (b): Genişleyen kare yönteminin şematik gösterimi. İçi boş dairelerdeki seyahat süreleri, içi dolu dairelerdeki seyahat sürelerinden hesaplanmaktadır.



Açıklamalar

- bilinen seyahat süreleri 5-6 genişleyen kareler
- bilinmeyen seyahat süreleri $s - s'$ yavaşlık
- yerel minimum ↑ → seyahat sürelerinin hesaplama yönleri
- yerel maksimum ←

Şekil 10: Şekil 9b'deki dikdörtgen içerisinde kalan düğüm noktalarındaki (burada 5. ve 6. genişleyen kareler gösterilmiştir) seyahat zamanlarının yerel minimumdan yerel maksimuma hesaplama adımları (I-III. aşamalar) ([39] ve [70]'den [43] tarafından düzenlenmiştir).

Bu çalışmada, dalga cephelerinin modellenmesinde Podvin ve Lecomte [41] tarafından önerilen ve bir sonlu farklar gridi üzerinde Huygens prensibinin uygulanması esasına dayanan bir algoritma kullanılmıştır. Vidale'in yukarıda açıklanan genişleyen kare yaklaşımına benzer olarak bu algoritmada da hesaplama gridinin her bir düğüm noktasındaki ilk varış süreleri komşu noktalardan daha önce belirlenen seyahat sürelerinden elde edilmekte ve kabaca en hızlı dalga cephesinin yayılımı takip edilmektedir. Bununla birlikte, algoritma, hesaplama aşamasında daha fazla koşulu dikkate aldığından yüksek hız zıtlığına sahip ortamlarda da seyahat sürelerini doğru olarak belirleyebilmektedir [24].

4.2.1 Yatay iki tabaka modelinde Eikonal çözücü uygulaması

Şekil 11a-c, yukarıda açıklanan Eikonal denklemi temelli algoritma kullanılarak yatay iki tabakalı yer modeli için elde edilen seyahat zamanı kontur haritalarını göstermektedir. FDTD uygulamasında olduğu gibi kaynağın; (i) yüzeyde (Şekil 11a), (ii) 3 m ve (iii) 8 m derinlikte (sırasıyla Şekil 11b, c) olduğu durumlar için, dalga cepheleri hava tabakası bilgisi de eklenerek modellenmiştir. Seyahat zamanı kontur aralığı 4 ns'dir. İlk durumda, dipol kaynağın yüzeyde olması ve yer-hava arayüzündeki yüksek hız zıtlığı nedeniyle, ilk varışlar hem I. hem de II. tabakadaki alıcılar için yer-hava arayüzünde kritik açıda kırılmış dalgadan (yer dalgası, ground wave) elde edilmektedir. İkinci durumda, $z = 3 m$ derinliğindeki kaynaktan yayılan dalga cephesinin küreselliği, yer-hava ve görece yüksek ve düşük hızlı tabakaların arayüzlerine ulaştığında bozulmaktadır. İlk tabakadaki alıcılarda, önce yer dalgası (2), daha sonra doğrudan gelen dalga (3) kaydedilmektedir. İkinci tabakada ise alıcılarda kaydedilen ilk varışlar doğrudan gelen dalganın tabaka arayüzünden kırılmasıyla (4) ulaşan dalga olmaktadır. Üçüncü durumda (Şekil 11c), genel olarak ilk varışlar II. tabaka için doğrudan gelen dalgadan (12) kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, bu dalganın görece düşük hızlı ortamdan görece yüksek hızlı I. tabakadaki ortama geçmesinden kaynaklanan baş dalgası (arayüzeyde kritik açıyla kırılan dalga) tabaka arayüzünün altındaki ilk birkaç alıcıda kaydedilen ilk varışları oluşturmaktadır. Benzer olarak, ilk katmanın yaklaşık 1.5 m derinliğine kadar olan alıcılara ilk olarak ulaşan yer-hava arayüzünde oluşan baş dalgasıdır. Diğer ilk varışlar, (12)'nin tabaka arayüzünde kırılmasıyla oluşan dalgalardan (7, 8) kaynaklanmaktadır. Genel olarak, II. tabakadaki görece yüksek bağıl dielektrik geçirgenlik değerine sahip düşük hızlı ortama ulaşan dalga cephelerinin ilerlemesi yavaşlarken seyahat zamanı konturları sıklaşmaktadır.

EM alanlar dalgalar olarak yayıldığında dalga cepheleri ve ışın yollarıyla karakterize edildiğinden ışın yollarının dalga cepheleriyle birlikte değerlendirilmesi EM alanların kavranması için oldukça yararlıdır [54]. Eikonal denklemi temelli algoritmada ışın izleme modellemenin bir parçası olmamasına rağmen, ışın yolları, bu yaklaşımdan elde edilen ve yukarıda yorumlanan; (i) dalga cephelerinin seyahat zamanı kontur haritaları ve (ii) her bir düğüm noktasındaki seyahat sürelerinin bilgisi kullanılarak alıcılardan kaynağa yani geriye doğru en dik iniş (steepest descent) yönünde hesaplanabilmektedir [39].

Şekil 11d-f, Şekil 11a-c'de sunulan seyahat zamanı kontur haritaları için hesaplanan ışın yolları örtüsünü (ray coverage) göstermektedir. Verici-alıcı kuyu derinliğinin (h) bu kuyular arasındaki mesafeye (x) eşit olması nedeniyle, yer-hava arayüzünde kırılan dalga, özellikle kaynağın yüzeyde ve/veya

yüzeye yakın olması durumunda ($z = 0$ ve $z = 3 m$) doğrudan gelen dalgalardan daha önce ilk tabakadaki alıcılara ulaşmaktadır. Bu nedenle, model $h = 2x$ olacak şekilde yeniden tasarlanarak alıcı kuyusu yatay doğrultuda 7. m'ye yerleştirilmiştir. Şekil 11g-i, bu düzende Eikonal temelli yaklaşım uygulanarak elde edilen ışın yolları örtüsünü göstermektedir. Buradan da açıkça görüldüğü gibi, alıcılarda ilk varış olarak kaydedilen yer dalgasının etkisi büyük ölçüde azaltılmıştır. Bu nedenle, karşılıklı kuyu radar çalışmalarında bu koşula dikkat edilerek h ve x 'in belirlenmesinin yanında ilk kaynak ve ilk alıcının yüzeyin birkaç metre altına yerleştirilmesi gerekmektedir.

5 Test çalışmaları

5.1 Test modeli ve modelleme parametreleri

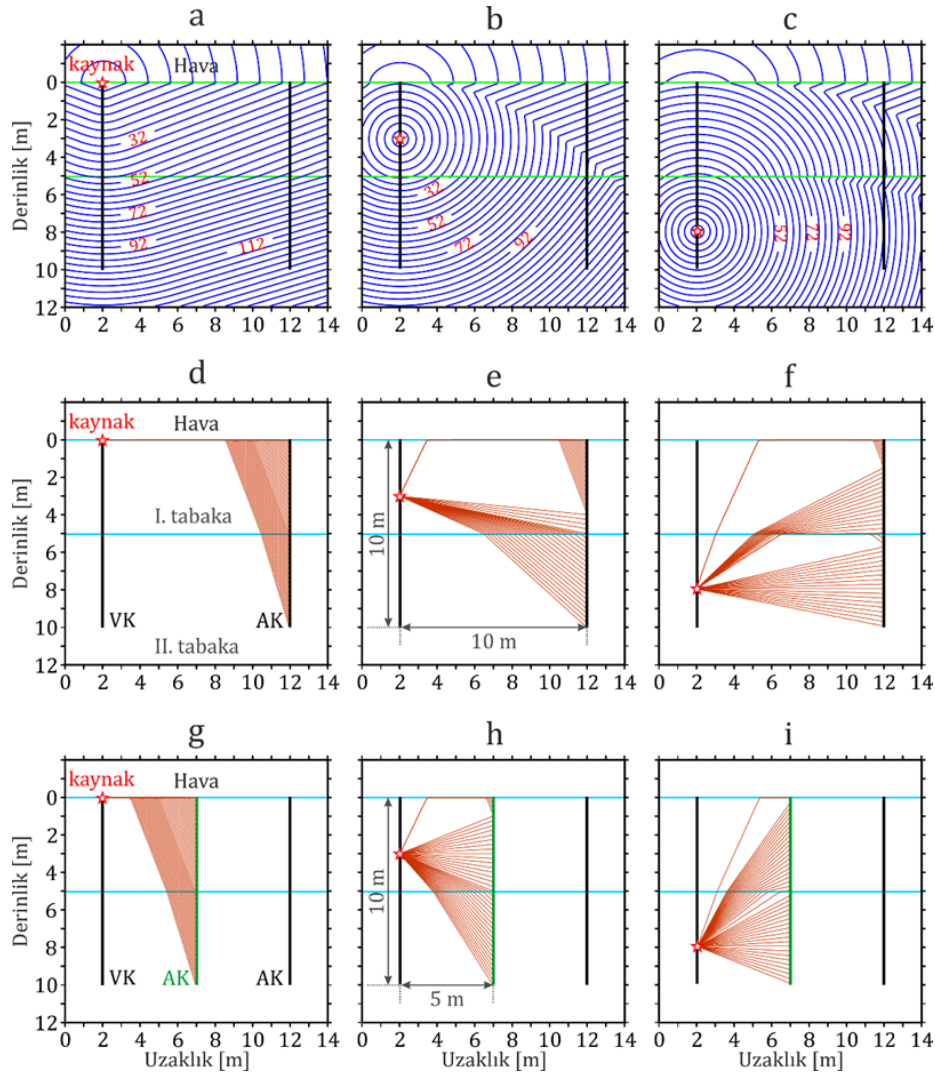
Ters çözümde kullanılacak ilk varış seyahat sürelerinin yukarıda açıklanan iki farklı modelleme yaklaşımı uygulanarak elde edilmesi amacıyla, bu çalışma kapsamında kullanılan test modeli [24] Şekil 12'de verilmiştir. Test modeli, tekdüze bir ortam ($0.1 m/ns$) içinde gömülü, görece düşük ($0.08 m/ns$) ve yüksek hızlı ($0.12 m/ns$) iki bloktan oluşmaktadır. Ammon ve Vidale'in [71] çalışmasına benzer olarak tekdüze ortam ve bloklar arasındaki hız zıtlığı %20 olarak belirlenmiştir. Modelde, EM dalga yayılımı sırasında izlenecek olayların daha belirgin ve anlaşılır olması amacıyla [24] tarafından sunulan çalışmaya kıyasla görece daha büyük bloklar kullanılmıştır. Bu nedenle, bu çalışmada blokların bir kenarı 1.75 m'dir. Yüksek hızlı blok düşeyde 3-4.75 m, düşük hızlı blok ise 6.25-8 m'ler arasında konumlandırılmıştır. Her iki blok yatay yönde 2.125-3.875 m'ler arasındadır. Düz modelleme parametreleri Tablo 2'de verilen test modeli ($6 m \times 11 m$), hücre boyutları yatay ve düşey yönde 0.25 m olan toplam 1056 hücreden oluşmaktadır. Modellemede, hesaplama alanı, alıcı ve verici grupları arasında kalan $5 m \times 10 m$ 'lik alan olup yukarıda belirtilen koşulu büyük ölçüde sağlamaktadır. Şekil 12'den de görüldüğü gibi, modelde 40 verici ve her bir verici başına 40 alıcı, düşey yönde 0.25 m aralıklarla 0.625-10.375 m'ler arasında konumlandırılmıştır. Dolayısıyla, bu çalışmada uygulanacak modelleme yaklaşımlarının her birinden toplamda 1600 ilk varış süresinden oluşan bir veri kümesi elde edilecektir.

Tablo 2: Modellemede kullanılan temel parametreler.

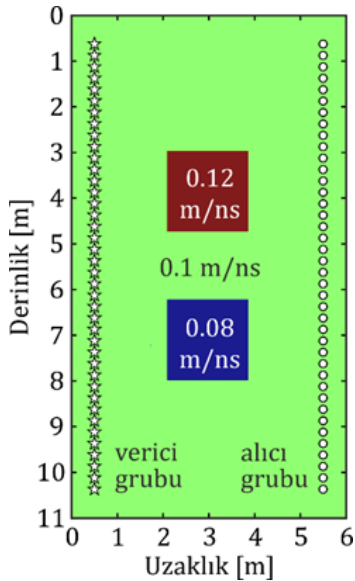
Parametreler	Model
Model boyutları	$6 m \times 11 m$
Hücre sayısı	1056
Hücre boyutu	$0.25 m \times 0.25 m$
Hesaplama alanı	$5 m \times 10 m$
Hesaplama alanındaki hücre sayısı	800
İlk varış sayısı	1600

5.2 FDTD modellemesi

Şekil 13a-h ve Şekil 14a-h, kaynakların verici kuyusunda sırasıyla 2.375 ve 6.375 m (8 ve 24. kaynaklar) derinlikte olduğu durumlar için, FDTD modellemesinden elde edilen elektrik alanın düşey bileşeninin (E_z) değişik zaman adımlarında kaydedilen dalga alanlarının anlık görüntülerini göstermektedir. Kaynak dalgacığının merkez frekansı, iki tabakalı yer modelinde uygulandığı gibi 200 MHz'dir. Modellemede, $\Delta x = \Delta z = 0.025 m$ ve $\Delta t = 0.1 ns$ olarak alınmıştır. Toplam kayıt süresi 130 ns'dir.



Şekil 11: (a-c): Yatay iki tabakalı yer modelinin hava tabakası bilgisile modellenerek elde edilen seyahat zamanı kontur haritaları ve (d-f): Işın yolları örtüsü, (g-i): Verici kuyusunun yatay doğrultuda 7. m'de olması durumunda ($x = 5$ m) hesaplanan ışın yolları örtüsü.



Şekil 12: Test modeli ([24]'den değiştirilmiştir).

Bu test çalışmasında, FDTD modellemesinden elde edilecek radargramlardan seyahat sürelerinin belirlenmesini kolaylaştırmak için yer-hava arayüzeyi modellenmemiştir. Her iki şekilde görüntüler genel olarak incelendiğinde, FDTD modellemesiyle; doğrudan gelen dalga, saçılmış dalga alanları ve bloklara ulaşan dalga alanlarının geri yansımaları izlenmektedir. Kaynaktan yayılan EM dalga tekdüze ortam içerisinde küresel dalga alanları (doğrudan gelen dalga) olarak izlenmektedir. Bu dalga alanları bloklara ulaştığında bu blokların kenarlarından geri yansımalar, köşe noktalarından da saçınımlardan (difraksiyon) oluşan dalga alanları oluşmaktadır. Ayrıca, EM dalga alanı tekdüze ortamdan yüksek hızlı bloka ve/veya düşük hızlı bloktan tek düze ortam sınırına ulaştığında bunlar arasındaki arayüzeylerde baş dalgaları oluşmaktadır.

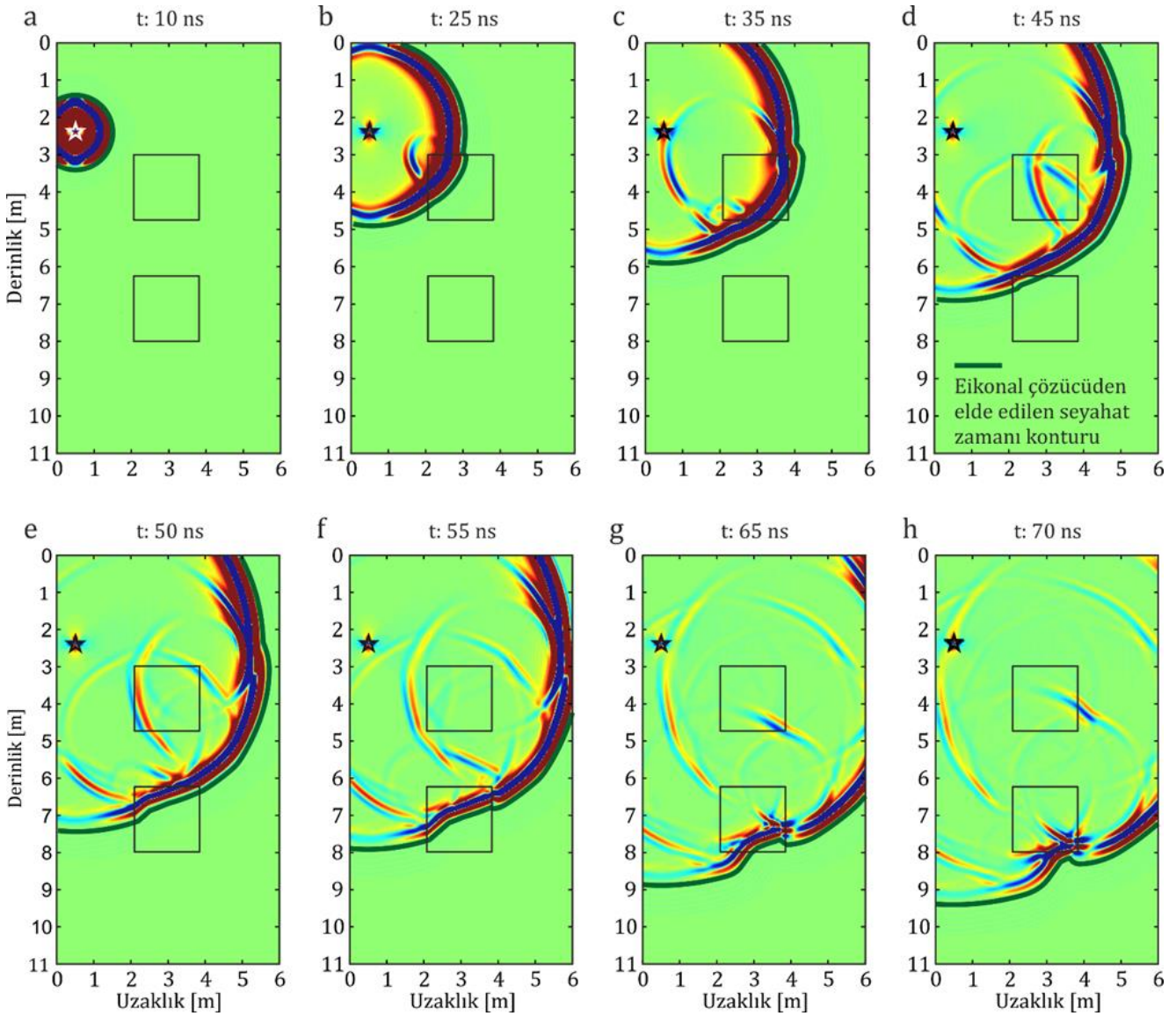
5.3 Eikonal denklemi temelli modelleme

Şekil 15, sırasıyla 1 ($z = 0.625$ m), 5 ($z = 1.625$ m), 8 ($z = 2.375$ m), 16 ($z = 4.375$ m), 20 ($z = 5.375$ m), 24 ($z = 6.375$ m), 32 ($z = 8.375$ m), ve 40 ($z = 10.375$ m) numaralı kaynak noktaları için Eikonal denklemi temelli modellemeden elde edilen seyahat süresi kontur haritalarını göstermektedir.

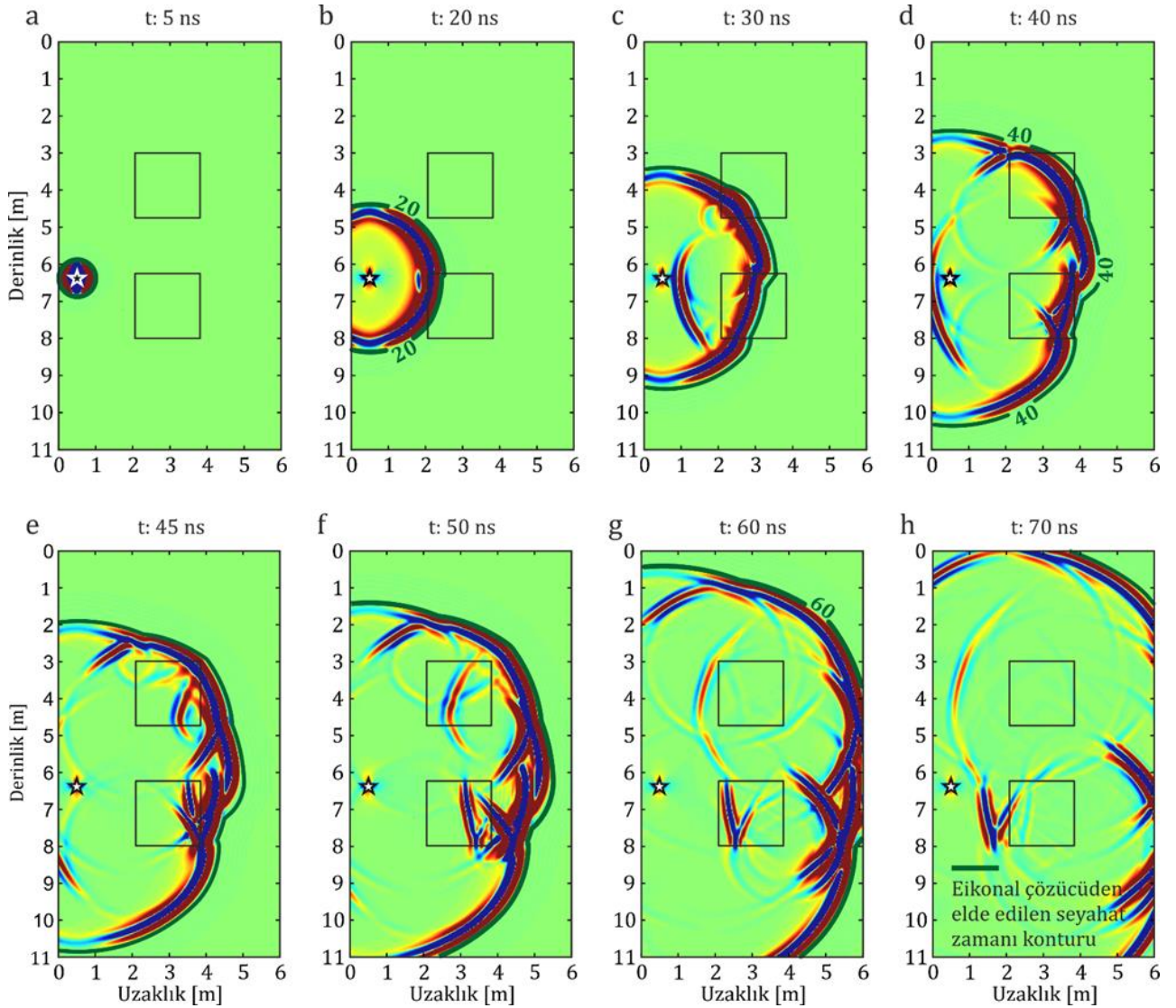
Seyahat zamanlarının kontur aralığı 5 ns'dir. Şekilden de açıkça görüldüğü gibi, ilk varışlar, yüksek hızlı ortamlar içerisinde iletilen dalgalar ve/veya yapının köşe noktalarından saçınımlar ya da ara yüzeylerde baş dalgaları olarak gözlemlenmektedir. Dalga cepheleri, blokların köşe noktalarına ulaştığında her bir köşe noktası ikinci bir kaynak gibi davranmakta ve blokların bu köşeli yapısından dolayı saçınımlar oluşmaktadır. Yüksek hızlı blok içerisinde dalga cephelerinin hızı artarken düşük hızlı blok içerisinde hız azalmaktadır. Bunun bir sonucu olarak, düşük hızlı blok içerisinde konturlar birbirine yakınlaşırken yüksek hızlı blok içerisinde birbirinden uzaklaşmaktadır.

Eikonal denklemi temelli modellemelerden elde edilen sonuçlar ayrıca FDTD modellemesinden elde edilenlerle karşılaştırılmıştır. Bunun için, Şekil 13 ve Şekil 14'te sunulan anlık dalga alanı görüntülerinin üzerine FDTD modellemesindeki zaman adımlarıyla aynı olan dalga cephesi konturları (yeşil sürekli çizgi) çizdirilerek her iki yaklaşımdan elde edilen sonuçların uyumu gösterilmiştir.

Şekil 15a, d, f ve h'de verilen seyahat süresi kontur haritalarından yukarıda açıklandığı gibi izlenen ışın yolları Şekil 16'da sunulmuştur. Buradan da görüldüğü gibi, doğrudan gelen varışlar tek düze ortam içinde izlenen ışınlarla aittir (Şekil 16a-d). Bununla birlikte, ilk varışların çoğu, ışınların yüksek hızlı blok kenarlarından kırılması ve her iki bloğun köşe noktalarına ulaşan ışınların saçınarak alıcılara ulaşmasından elde edilmektedir. Kırılmalar, beklendiği gibi, ışının geçtiği ortamdaki hızın büyüklüğüne bağlı olarak normale yaklaşarak ve/veya normalden uzaklaşarak gerçekleşmektedir. Işınlar genel olarak daha fazla ilerleyebildiği yüksek hızlı blok içerisinde yoğunlaşırken düşük hızlı blok içerisinde hiçbir ışın izlenmemiştir. Tomografik ters çözüm çalışmalarında yüksek hız yapılarının düşük hız yapılarına göre daha başarılı görüntülenmesi bu durumun doğal bir sonucudur.



Şekil 13: Verici kuyusunda 8. kaynak noktası ($z = 2.375 m$) için FDTD modellemesinden elde edilen elektrik alanının düşey bileşeninin (E_z) değişik zaman adımlarında kaydedilen dalga alanlarının anlık görüntüleri. Yüksek ve düşük hızlı bloklar her bir görüntüde çizdirilmiştir.

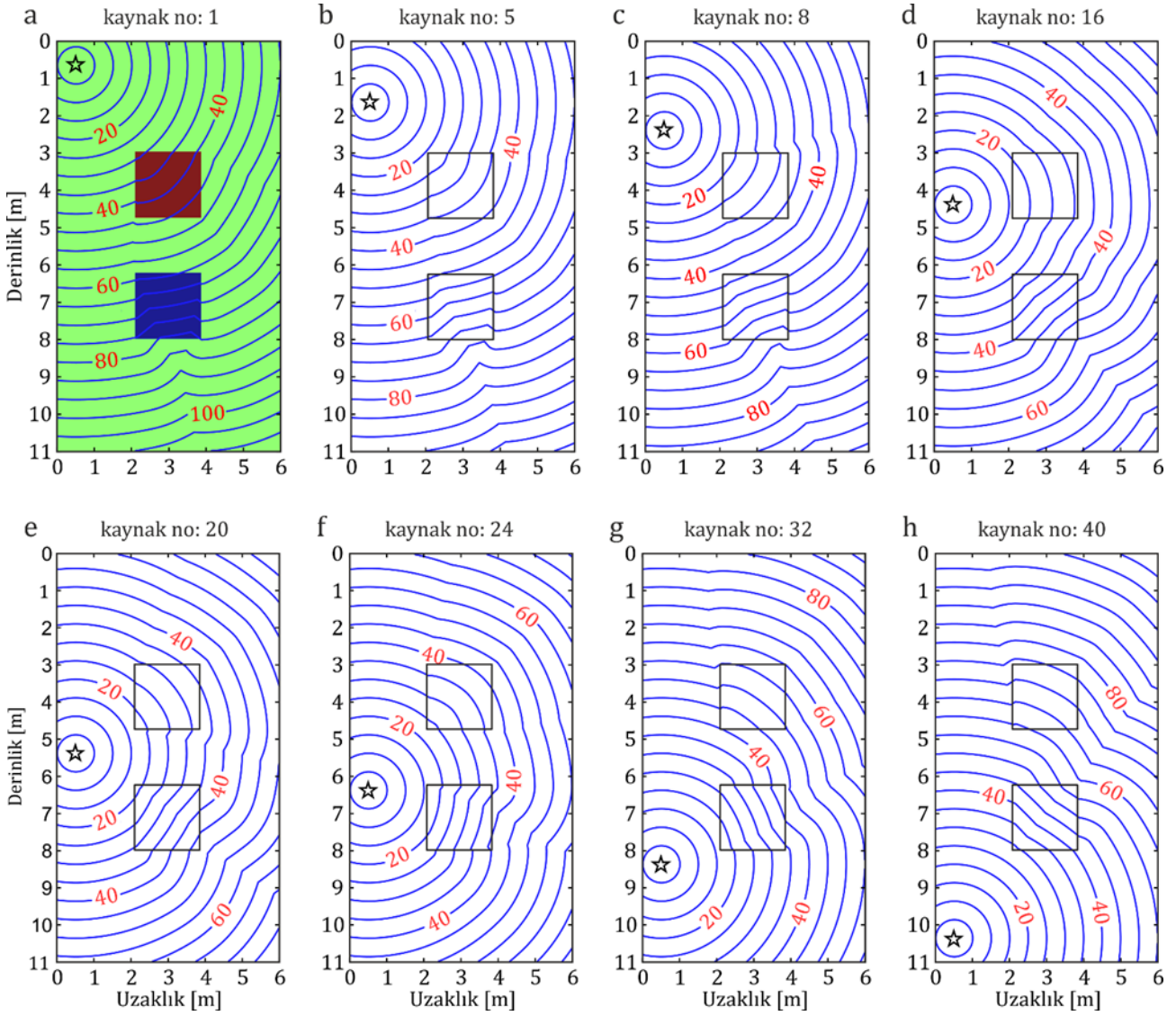


Şekil 14: Verici kuyusunda 24. kaynak noktası ($z = 6.375 \text{ m}$) için FDTD modellemesinden elde edilen elektrik alanın düşey bileşeninin (E_z) değişik zaman adımlarında kaydedilen dalga alanlarının anlık görüntüleri. Yüksek ve düşük hızlı bloklar her bir görüntüde çizdirilmiştir.

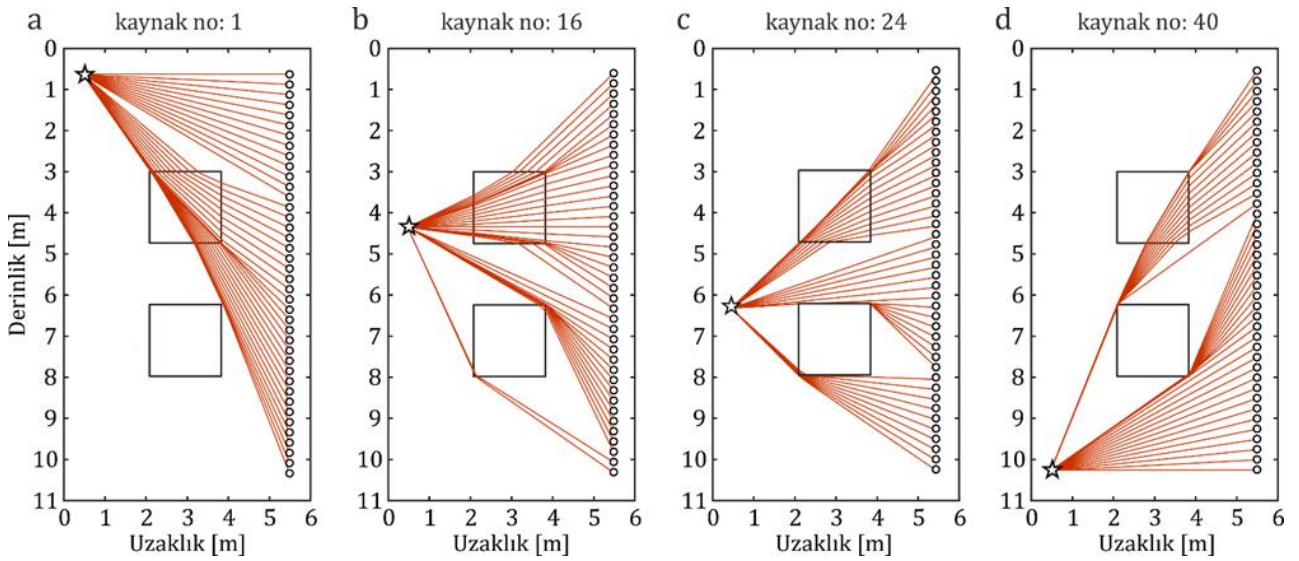
5.4 Modelleme yaklaşımlarından elde edilen ilk varış sürelerinin karşılaştırılması

Test modelinin her bir kaynak noktası dikkate alınarak FDTD ile modellenmesinden sonra, her bir kaynak noktası için radargramlar veya ortak kaynak toplulukları (common source gathers) elde edilmektedir. Şekil 15'te gösterilen kaynak noktaları için FDTD'den elde edilen radargramlar Şekil 17'de verilmiştir. Bu radargramlar üzerinde ilk varış sürelerinin okunmasıyla, karşılıklı kuyu yer radarı ilk varış tomografisiyle iki kuyu arasında kalan alandaki radar hız dağılımının görüntülenmesinde kullanılacak veri kümesi elde edilir. Radargramlar üzerindeki kırmızı düz çizgiyle gösterilen eğriler Eikonal denklemi temelli modellemeden elde edilen ilk varış sürelerini göstermektedir. Bu eğrilerdeki ilk varış sürelerinin radargramlar üzerindeki her bir izin ilk kırılmalarıyla (first break) oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Bu bize karşılıklı kuyu radar ilk varış tomografisinde gerekli olan ilk varış sürelerinin her iki yaklaşımdan da eşdeğer olarak elde edilerek kullanılabileceğini açıkça göstermektedir.

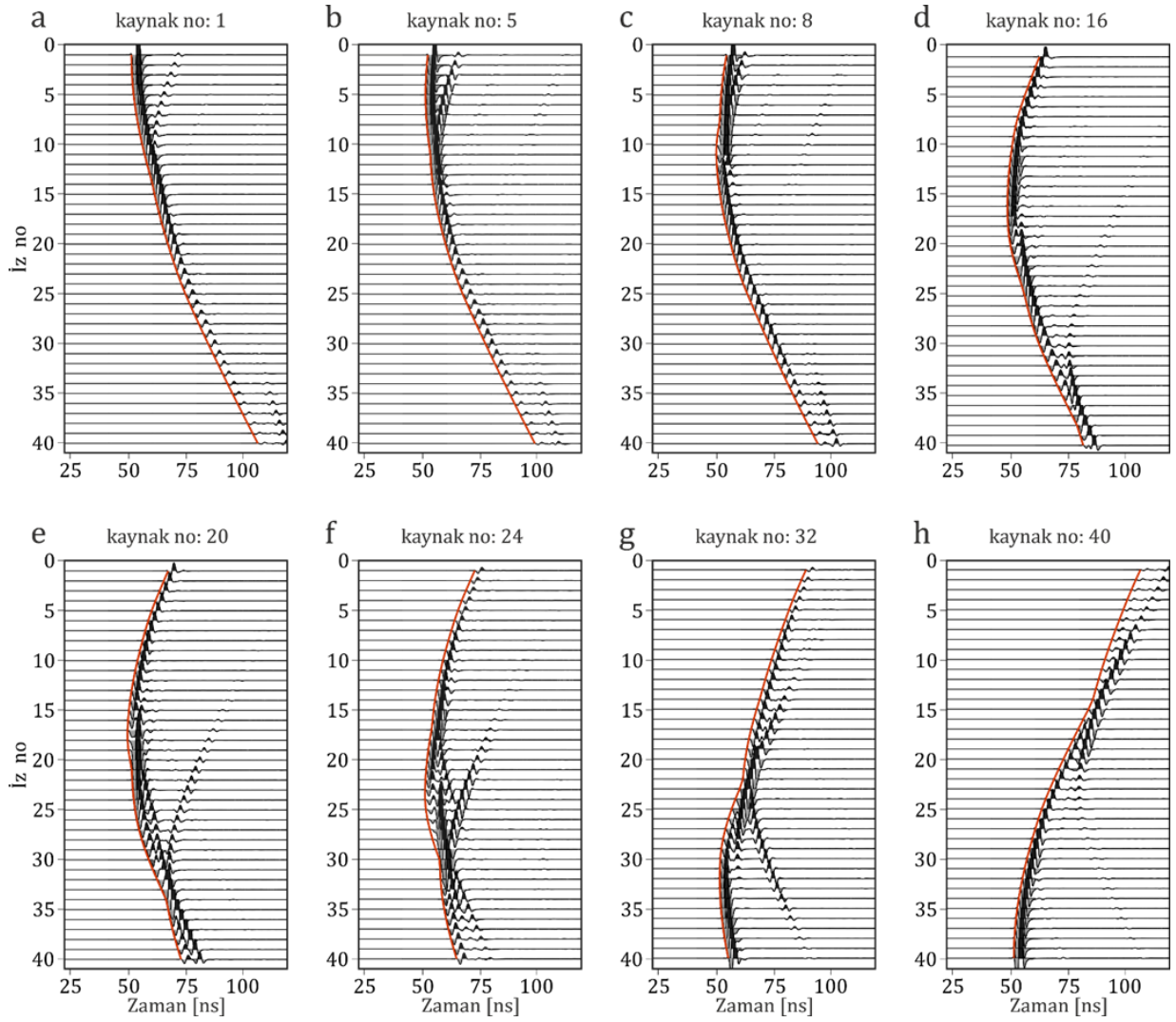
Bu çalışmada, karşılıklı kuyu yer radarı tomografisi için gerekli olan ilk varış seyahat süreleri iki farklı temelli sonlu farklar algoritmasından elde edilmiştir. Şekil 18a-d, bu çalışmanın genel olarak bir özetini sunmaktadır. İki kuyu arasında kalan yapıların ve/veya tabakaların EM özellikleri belirlendikten sonra oluşturulan test modeli (Şekil 18a), bu çalışmada irdelenen yaklaşımlarla modellenerek (Şekil 18b, c) karşılıklı kuyu yer radarı verilerinin tomografik ters çözümü için gerekli olan ilk varış seyahat süreleri elde edilmektedir (Şekil 18d). Şekil 18b, FDTD modellemesinden elde edilen $t=40 \text{ ns}$ anındaki dalga alanının zarfıyla Eikonal denklemi temelli yaklaşımdan elde ettiğimiz ve bu zaman adımına ait dalga cephesinin seyahat süresi konturunun (Şekil 18c) uyumunu göstermektedir. Şekil 18c'de, verici kuyusundaki 24. kaynak noktası için seyahat süresi konturları ve bu kaynak noktası için hesaplanan ışın yolları birlikte çizilerek dalga cephesi ve ışın yolları arasındaki diklik ilişkisi ayrıca gösterilmiştir. Sonuç olarak, her iki algoritmadan uyumlu ve birbirine oldukça yakın ilk varış seyahat süreleri hesaplanmıştır (Şekil 18d).



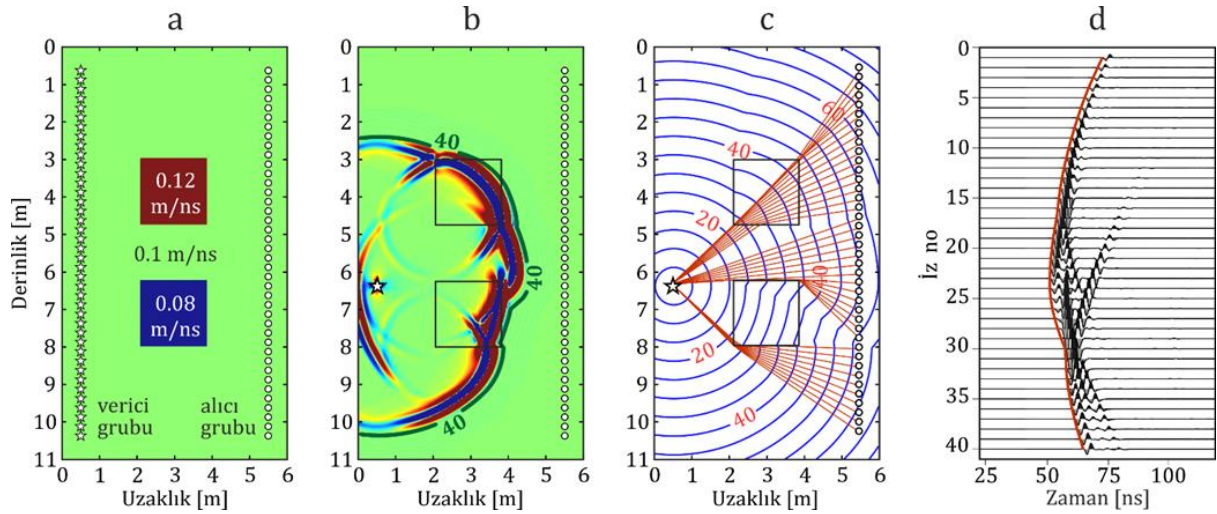
Şekil 15: Eikonal denklemi temelli modellemeden elde edilen çeşitli kaynak noktalarına ait seyahat süresi kontur haritaları. Kaynak noktaları her bir şeklin üzerinde belirtilmiş ayrıca yüksek ve düşük hızlı bloklar her bir haritada çizdirilmiştir.



Şekil 16: Eikonal denklemi temelli modellemeden elde edilen çeşitli kaynak noktalarına ait ışın yolları örtüsü.



Şekil 17: Çeşitli kaynak noktalarına ait FDTD'den elde edilen radargramlar. Kırmızı düz çizgi Eikonal denkleminin sonlu farklar çözümünden elde edilen ilk varış seyahat sürelerini göstermektedir.



Şekil 18: (a): Test modeli [24]. Kaynak ve alıcı düzenleri model üzerinde gösterilmiştir, (b): FDTD ile elde edilen aynı kaynak noktasına ait $t = 40$ ns zaman adımıdaki anlık dalga alanı görüntüsü. Yeşil düz çizgi bu zaman adımıdaki seyahat süresi konturunu göstermektedir, (c): Eikonal denklemini temelli modellemeye elde edilen 24. kaynak noktasına ait seyahat zamanları kontur haritası ve ışın yolları örtüsü, (d): Aynı kaynak noktasına ait FDTD'den elde edilen radargram. Kırmızı düz çizgi Eikonal denkleminin sonlu farklar çözümünden elde edilen ilk varış seyahat sürelerini göstermektedir.

6 Sonuçlar

Bu çalışmada, iki farklı temele dayanan modelleme yaklaşımının uygulanmasıyla ilk varış seyahat süreleri elde edilerek her iki yaklaşımın da karşılıklı kuyu yer radarı tomografisinde kullanılabileceği gösterilmiştir. Maxwell denklemlerinin FDTD ile çözümü ilk varış dalga fazlarının izlenmesi ve belirlenmesi açısından oldukça yararlıdır. Ancak bu yaklaşımda, ilk varış sürelerinin sayısal modellemeye elde edilen radargramlardan manuel olarak belirlenmesi oldukça zaman alıcı bir süreçtir. İlgilenilen değerlerin n_s mertebesinde hızlar olması nedeniyle de ilk varış sürelerinin elde edilmesindeki küçük hatalar bile tomografik ters çözümde elde edilecek çözümün başarısını ve kalitesini düşürecektir. Diğer taraftan, Eikonal denklemi temelli algoritma kullanarak seyahat süreleri doğrudan ve çok daha kısa bir zamanda hesaplanmaktadır. Bu nedenle, bu yaklaşımın karşılıklı kuyu yer radarı verilerinin modellenmesinde kullanılması FDTD modellemesine göre hesaplama maliyeti açısından daha ekonomiktir.

Bu çalışma ayrıca, test ve/veya arazi çalışmasında karşılıklı kuyular arasındaki mesafeyle, verici-alıcı kuyularının derinliği arasındaki ilişkiye uygun olarak belirlenmesinin özellikle yüzeye yakın alıcılarda ilk varış dalga fazlarının yer-hava arayüzeyinden kaynaklanmasını engellemek açısından ne kadar önemli olduğunu açıkça göstermiştir. Bu çalışmayla ilişkili olarak, sentetik ve arazi çalışmalarından elde edilen karşılıklı kuyu yer radarı verilerinin çeşitli tomografik ters çözüm algoritmaları ve yaklaşımlarıyla değerlendirilmesinin yakın gelecekte sunulması hedeflenmektedir.

7 Teşekkür

Görüş ve eleştirileriyle bu çalışmanın gelişmesine önemli katkılar sağlayan Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Yayın Kuruluna ve anonim iki hakeme teşekkür ederiz. Bu çalışma kısmen "I. Yerbilimleri Sempozyumunda (Isparta, Ekim 2012)" sunulmuştur.

8 Kaynaklar

- [1] Murray T, Booth A, Rippin DM. "Water-content of glacier-ice: Limitations on estimates from velocity analysis of surface ground-penetrating radar surveys". *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 12(1), 87-99, 2007.
- [2] Singh KK, Kulkarni AV, Mishra VD. "Estimation of glacier depth and moraine cover study using ground penetrating radar (GPR) in the Himalayan region". *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 38(1), 1-9, 2010.
- [3] Gizzi FT, Loperte A, Satriani A, Lapenna V, Masini N, Proto M. "Georadar investigations to detect cavities in a historical town damaged by an earthquake of the past". *Advances in Geosciences*, 24, 15-21, 2010.
- [4] Şeren A, Babacan AE, Gelişli K, Öğretmen Z, Kandemir R. "An investigation for potential extensions of the karaca cavern using geophysical methods". *Carbonates Evaporites*, 27(3), 321-329, 2012.
- [5] Nouioua I, Boukelloul ML, Fehdi C, Baali F. "Detecting sinkholes using ground penetrating radar in Drâa Douamis, Cherea Algeria: A case study". *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 18, 1337-1349, 2013.
- [6] Conyers LB. "Innovative ground-penetrating radar methods for archaeological mapping". *Archaeological Prospection*, 13(2), 139-141, 2006.
- [7] Piro S, Campana S. "GPR investigation in different archaeological sites in Tuscany (Italy). Analysis and comparison of the obtained results". *Near surface Geophysics*, 10, 47-56, 2012.
- [8] Neal A. "Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress". *Earth-Science Reviews*, 66(3-4), 261-330, 2004.
- [9] Huisman JA, Hubbard SS, Redman JD, Annan AP. "Measuring soil water content with ground penetrating radar: A review". *Vadose Zone Journal*, 2(4), 476-491, 2003.
- [10] Turesson A. "Water content and porosity estimated from ground-penetrating radar and resistivity". *Journal of Applied Geophysics*, 58(2), 99-111, 2006.
- [11] Daniels DJ. *Ground Penetrating Radar*. 2nd ed. London, United Kingdom, The Institute of Electrical Engineers, 2004.
- [12] Benedetto A, Pajewski L. *Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar*. Switzerland, Springer International Publishing, 2015.
- [13] Knight R. "Ground penetrating radar for environmental applications". *Annual Review of Earth Planetary Sciences*, 29, 229-255, 2001.
- [14] Porsani JL, Filho WM, Elis VR, Shimeles F, Dourado JC, Moura HP. "The use of GPR and VES in delineating a contamination plume in a landfill site: a case study in SE Brazil". *Journal of Applied Geophysics*, 55(3-4), 199-209, 2004.
- [15] Novo A, Lorenzo H, Rial FI, Solla M. "3D GPR in forensics: Finding a clandestine grave in a mountainous environment". *Forensic Science International*, 204(1-3), 134-138, 2011.
- [16] Capizzi P, Martorana R, Messina P, Cosentino PL. "Geophysical and geotechnical investigations to support the restoration project of the roman 'Villa del Casale', Piazza Armerina, Sicily, Italy". *Near Surface Geophysics*, 10(2), 145-160, 2012.
- [17] Kadioglu S. *Imaging and Radioanalytical Techniques in Interdisciplinary Research - Fundamentals and Cutting Edge Applications*. Editor: Kharfi F. Transparent 2d/3d Half Bird's-Eye View of Ground Penetrating Radar Data Set in Archaeology and Cultural Heritage, 107-138, Rijeka, Croatia, Intech, 2013.
- [18] Pérez-Gracia V, Caselles JO, Clapés J, Martínez G, Osorio R. "Non-destructive analysis in cultural heritage buildings: Evaluating the Mallorca cathedral supporting structures". *NDT & E International*, 59, 40-47, 2013.
- [19] Butnor JR, Barton C, Day FP, Johnsen KH, Mucciardi AN, Schroeder R, Stover DB. *Measuring Roots*. Editor: Mancuso S. Using Ground-Penetrating Radar to Detect Tree Roots and Estimate Biomass, 213-245, Berlin, Germany, Springer Berlin Heidelberg.
- [20] Zhu S, Huang C, Su Y, Sato M. "3D ground penetrating radar to detect tree roots and estimate root biomass in the field". *Remote Sensing*, 6(6), 5754-5773, 2014.
- [21] Nicolotti G, Socco LV, Martinis R, Godio A, Sambuelli L. "Application and comparison of three tomographic techniques for detection of decay in trees". *Journal of Arboriculture*, 29(2), 66-78, 2003.
- [22] Fisher E, McMechan GA, Annan AP. "Acquisition and processing of wide-aperture ground-penetrating radar data". *Geophysics*, 57(3), 495-504, 1992.

- [23] Topp CG, Davis JL, Annan AP. "Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines". *Water Resource Research*, 16(3), 574-582, 1980.
- [24] Göktürkler G, Balkaya Ç. "Traveltime tomography of crosshole radar data without ray tracing". *Journal of Applied Geophysics*, 72(4), 213-224, 2010.
- [25] Sato M, Miwa T. "Polarimetric borehole radar system for fracture measurement". *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, 1(1), 161-175, 2000.
- [26] Serzu MH, Kozak ET, Lodha GS, Everitt RA, Woodcock DR. "Use of borehole radar techniques to characterize fractured granitic bedrock at AECL's underground research laboratory". *Journal of Applied Geophysics*, 55(1-2), 137-150, 2004.
- [27] Hubbard SS, Peterson JE, Roberts J, Wobber F. "Estimation of permeable pathways and water content using tomographic radar data". *The Leading Edge*, 16(11), 1623-1628, 1997.
- [28] Peterson JE, Majer E, Knoll MD. "Hydrogeological property estimation using tomographic data at the Boise hydrogeophysical research site". *Proceedings SAGEEP'99*, Oakland, CA, USA, 14-18 March 1999.
- [29] Rucker DF, Ferré TPA. "Correcting water content measurement errors associated with critically refracted first arrivals on zero offset profiling borehole ground penetrating radar profiles". *Vadose Zone Journal*, 3(1), 278-287, 2004.
- [30] Troncke J, Tweeton DR, Dietrich P, Appel E. "Improved crosshole radar tomography by using direct and reflected arrival times". *Journal of Applied Geophysics*, 47(2), 97-105, 2001.
- [31] Wikipedia. "First Break Picking". https://en.wikipedia.org/wiki/First_break_picking (27.11.2015).
- [32] Yee KS. "Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 14(3), 302-307, 1966.
- [33] Taflove A, Brodwin ME. "Numerical solution of steady-state electromagnetic scattering problems using the time-dependent Maxwell's equations". *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique*, 23(8), 623-630, 1975.
- [34] Taflove A. "Review of the formulation and applications of the finite-difference time-domain method for numerical modeling of electromagnetic wave interactions with arbitrary structures". *Wave Motion*, 10(6), 547-582, 1988.
- [35] Taflove A, Hagness SC. *Computational Electrodynamics: The Finite-difference Time-domain Method*. 3rd ed. London, United Kingdom, Artech House Publishers, 2005.
- [36] Taflove A, Simpson J. *Computational Electrodynamics: The Finite-difference Time-domain Method*. Editors: Taflove A, Hagness SC. Introduction to Maxwell's Equations and the Yee Algorithm, 51-106, London, United Kingdom, Artech House Publishers, 2005.
- [37] Červený V. *Seismic Tomography - With Applications in Global Seismology*. Editor: Nolet G. Ray Tracing Algorithms in Three-dimensional Laterally varying Layered Structures, 99-133. Dordrecht, Holland, Springer, 1987.
- [38] Červený V. *Seismic Ray Theory*. New York, USA, Cambridge University Press, 2001.
- [39] Vidale J. "Finite-difference calculation of travel-times". *Bulletin of the Seismological Society of America*, 78(6), 2062-2076, 1988.
- [40] Vidale JE. "Finite-difference calculation of traveltimes in three dimensions". *Geophysics*, 55(5), 521-526, 1990.
- [41] Podvin P, Lecomte I. "Finite-difference computation of traveltimes in very contrasted velocity models: a massively parallel approach and its associated tools". *Geophysical Journal International*, 105(1), 271-284, 1991.
- [42] Afnimar, Koketsu K. "Finite difference traveltime calculation for head waves travelling along an irregular interface". *Geophysical Journal International*, 143(3), 729-734, 2000.
- [43] Balkaya Ç. Karşılıklı Kuyu Yer Radarı Verisinin İki Boyutlu Seyahat Zamanı Tomografisi. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2010.
- [44] Balkaya Ç, Akçığ Z, Göktürkler G. "A comparison of two travel-time tomography schemes for crosshole radar Data: Eikonal-equation-based Inversion versus ray-based inversion". *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 15(4), 203-218, 2010.
- [45] Wang F, Liu S, Qu X. "Crosshole radar tomographic inversion without ray tracing". *14th International Conference on Ground Penetrating Radar*, Shanghai, China, 4-8 June 2012.
- [46] Wang F, Liu S, Qu X. "Ray based crosshole radar traveltime tomography using Multistencils Fast Marching Method". *11th SEGJ International Symposium*, Yokohama, Japan, 18-21 November 2013.
- [47] Wang F, Liu S, Qu X. "Ray-based crosshole radar traveltime tomography using MSFM method". *Proceedings of the 15th International Conference on Ground Penetrating Radar*, Brussels, Belgium, 30 June - 4 July 2014.
- [48] Wang F, Liu S, Qu X. "Crosshole radar traveltime tomographic inversion using the fast marching method and the iteratively linearized scheme". *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 19(4), 229-237, 2014.
- [49] Blindow N, Eisenburger D, Illich B, Petzold H, Richter T. *Environmental Geology*. Editors: Knödel K, Lange G, Voight H-J. Ground Penetrating Radar, 283-335, Hannover, Germany, Springer Berlin Heidelberg New York, 2007.
- [50] Reynolds JM. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Chichester, United Kingdom, John Wiley & Sons Ltd, 1997.
- [51] Parkhomenko EI. *Electrical Properties of Rocks*. New York, USA, Plenum Press, 1967.
- [52] Clement WP, Barrash W. "Crosshole radar tomography in a fluvial aquifer near Boise, Idaho". *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 11(3), 171-184, 2006.
- [53] Wang D, McMechan GA. "Finite-difference modeling of borehole ground penetrating radar data". *Journal of Applied Geophysics*, 49(3), 111-127, 2002.
- [54] Annan AP. *Hydrogeophysics*. Editors: Rubin Y, Hubbard SS. GPR Methods for Hydrogeological Studies, 185-213, Dordrecht, The Netherlands, Springer, 2005.
- [55] Annan AP. *Ground Penetrating Radar Principles, Procedures & Applications*. Mississauga, On, Canada, Sensors & Software Inc., 2004.
- [56] Giannopoulos A. "Modelling ground penetrating radar by GprMax". *Construction and Building Materials*, 19(10), 755-762, 2005.
- [57] Belina FA, Ernst JR, Holliger K. "Inversion of crosshole seismic data in heterogeneous environments: Comparison of waveform and ray-based approaches". *Journal of Applied Geophysics*, 68(1), 85-94, 2009.

- [58] Ernst JR, Green AG, Maurer H, Holliger K. "Application of a new 2D time-domain full-waveform inversion scheme to crosshole radar data". *Geophysics*, 72(5), J53-J64, 2007.
- [59] Holliger K, Bergmann T. "Numerical modeling of borehole georadar data". *Geophysics*, 67(4), 1249-1257, 2002.
- [60] Chen HW, Huang TM. "Finite-difference time-domain simulation of GPR data". *Journal of Applied Geophysics*, 40(1-3), 139-163, 1998.
- [61] Irving J, Knight R. "Numerical modeling of ground-penetrating radar in 2-D using MATLAB". *Computers & Geosciences*, 32(9), 1247-1258, 2006.
- [62] Georgakopoulos SV, Birtcher CR, Balanis CA, Renaut RA. "Higher-order finite-difference schemes for electromagnetic radiation, scattering, and penetration, Part 1: Theory". *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 44(1), 134-142, 2002.
- [63] Harris FJ. "On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform". *Proceedings of the IEEE*, 66(1), 51-83, 1978.
- [64] Chen YH, Chew WC, Oristaglio ML. "Application of perfectly matched layers to the transient modeling of subsurface EM problems". *Geophysics*, 62(6), 1730-1736, 1997.
- [65] Roden JA, Gedney SD. "Convolution PML (CPML): An efficient FDTD implementation of the CFS-PML for arbitrary media". *Microwave and Optical Technology Letters*, 27(5), 334-339, 2000.
- [66] Mo LW, Harris JM. "Finite-difference calculation of direct-arrival traveltimes using the eikonal equation". *Geophysics*, 67(4), 1270-1274, 2002.
- [67] Aldridge DF, Oldenburg DW. "Two-dimensional tomographic inversion with finite-difference traveltimes". *Journal of Seismic Exploration*, 2, 257-274, 1993.
- [68] Hole JA, Zelt BC. "3-D finite-difference reflection travel-times". *Geophysical Journal International*, 121(2), 427-434, 1995.
- [69] Lecomte I, Gjoystdal H, Dahle A, Pedersen OC. "Improving modelling and inversion in refraction seismics with a first-order Eikonal solver". *Geophysical Prospecting*, 48(3), 437-454, 2000.
- [70] Qin FH, Luo Y, Olsen KB, Cai WY, Schuster GT. "Finite-difference Solution of the Eikonal equation along expanding wavefronts". *Geophysics*, 57(3), 478-487, 1992.
- [71] Ammon CJ, Vidale JE. "Tomography without rays". *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83(2), 509-528, 1993.