

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**KARŞIT-KUYU RADAR VERİLERİNİN
İKİ BOYUTLU TOMOGRAFİSİ**

Esra Ezgi BAKSI

JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANKARA
2023**

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

KARŞIT-KUYU RADAR VERİLERİNİN İKİ BOYUTLU TOMOGRAFİSİ

Esra Ezgi BAKSI

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Selma KADIOĞLU

Yer radarı yöntemi yakın yüzey araştırmalarda hasar vermeden yüksek çözünürlüklü sonuç üreten elektromanyetik yöntemdir. Ancak ortam içinde aranan süreksizlikleri belirlemek önemli olsa da ortamın elektromanyetik (EM) dalga hızını sabit kabul etmek yöntemin zayıf bölümüdür. Karşit-Kuyu radar yöntemi ile yüzeye yakın yeraltı radar hızını veya dielektrik katsayısı değişimini daha ayrıntılı haritalamak tezin başlıca amacıdır. Bu amaçla kaynak noktasından alıcı noktasına gelen radar dalga alanının ilk varış zamanları kullanılarak ters çözüm işlemi yapılmıştır. Tez kapsamında MATLAB ve FORTRAN programlama dilleri kullanılarak işlem adımları için kodlar hazırlanmıştır.

Bu tezde, karşılıklı kuyular arasındaki ortamı tanımlayan içinde farklı boyut, hız ve özellikte süreksizlikler içeren yapay veriler oluşturularak öncelikle veri toplama düzeneği ile modelleme ve seyahat zamanı hesaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Seyahat zamanı hesabı için ikinci dereceden sonlu farklar yaklaşımı ile iki boyutlu (2B) Eikonal denklemin çözümü yapılmıştır. Ters çözüm adımı ise, sönümlü en küçük kareler ve OCCAM ters çözüm teknikleri kullanılmıştır. Her iki ters çözümde de normal denklem eşlenik gradyen tekniği ile çözülmüştür. OCCAM ters çözüm yönteminin, sönümlü en küçük kareler çözümünden daha iyi sonuçlar verdiği yapay veriler ile gösterilmiştir.

Eylül 2023, 98 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Radar, karşit-kuyu, Eikonal denklem, tomografi, OCCAM, sönümlü en küçük kareler, eşlenik gradyan.

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

TWO-DIMENSIONAL TOMOGRAPHY OF CROSSHOLE RADAR DATA

Esra Ezgi BAKSI

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Geophysical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Selma KADIOĞLU

Ground penetrating radar (GPR) is an electromagnetic method that offers high resolution for near-surface image without damage. Although it is important that the method can identify discontinuities in the medium with high sensitivity, the weakness of the method is that the electromagnetic (EM) wave velocity of the medium is assumed as a constant. The main objective of this thesis is to map the subsurface radar velocity or dielectric coefficient variations in more detail using the crosshole radar method. For this purpose, the inversion process was performed using the first arrival times of the radar wave field from the source point to the receiver point. Within the scope of the thesis, MATLAB and FORTRAN programming languages were used to develop codes for the process steps.

In this thesis, firstly, modelling and travel time calculation were performed with the data collection system by creating synthetic datas containing discontinuities of different sizes, velocities and properties that define the environment between the two wells. For the travel time calculation, the two-dimensional (2D) Eikonal equation was solved by second order finite difference approach. In the inversion step, damped least squares and OCCAM inversion techniques were used. In both inverse solutions, the equation was solved by the conjugate gradient technique. It has been shown with synthetic data that the OCCAM inversion method gives better results than the damped least squares solution.

September 2023, 98 Pages

Key Words: Radar, crosshole, Eikonal equation, tomography, OCCAM, damped least squares, conjugate gradient.

TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında bana yardımcı olan, bilgi ve desteğini benden esirgemeyen, tezin oluşumunda önemli katkılarda bulunan danışman hocam Prof. Dr. Selma KADIOĞLU (Ankara Üniversitesi)'na teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarımı yürüttüğüm süre içerisinde, bilgi birikimi, yakın ilgi ve tecrübesi ile beni yönlendiren, yardım ve desteklerini esirgemeyen ve zorlandığım anlarda bana yol gösteren Değerli Hocam Prof. Dr. M. Emin CANDANSAYAR (Ankara Üniversitesi)'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Yine bu süreç içerisinde, değerli fikirleri ile tez çalışmamın olgunlaşmasında büyük katkıları olan tez izleme komitesi üyesi Değerli Hocam Prof. Dr. Asım Egemen YILMAZ (Ankara Üniversitesi)'a öneri, eleştiri ve katkılarından dolayı ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım yürüttüğüm süre zarfında her konuda bana destek olan Değerli Hocam Jeofizik Mühendisliği Anabilimdalı Başkanı Prof. Dr. Bülent KAYPAK (Ankara Üniversitesi)'a, fikirleriyle tezime katkı sağlayan, bunaldığım anlarda yanımda olan, moral desteklerini esirgemeyen, her aşamasında yanımda olan ve görüşlerini aldığım sevgili arkadaşlarım Aslı Zeynep YAVUZOĞLU, Burcu TURHAN ve Tolga KARABIYIKOĞLU'na teşekkür ederim.

Ayrıca, tüm bu süre içerisinde beni destekleyen ve daima yanımda olarak başarıya ulaşmamı sağlayan Ailem'e, desteğini ile bana güç veren eşim Ozan BAKSI ve canım kızım Beste BAKSI'ya sonsuz teşekkürler ederim.

Esra Ezgi BAKSI
Ankara, Eylül 2023

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI	
ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
SİMGELER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. YER RADARI (GPR) YÖNTEMİ.....	8
2.1 GPR Yönteminin Tarihçesi	8
2.2 EM Dalga Yayınımı	8
2.3 Maxwell Denklemleri.....	10
3. KARŞIT KUYU RADAR YÖNTEMİ.....	14
3.1 Karşıt-Kuyu Radar Yönteminde Veri Toplama	17
3.2 Karşıt Kuyu Radar Yönteminde 2B Düz Çözüm.....	21
3.3 Fermat Prensibi Tabanlı Doğrudan Seyahat Zamani Hesaplama Yöntemi	40
3.4 Düz Çözüm Algoritmasının Test Edilmesi.....	46
4. KARŞIT KUYU RADAR VERİLERİNİN TERS ÇÖZÜMÜ	49
4.1 Sönümlü En Küçük Kareler Yöntemi	49
4.3 Kısmi Türevler Dizeyinin Hesaplanması	52
4.4 Kısmi Türevler Dizeyinin Broyden Güncellemesi İle Hesabı	55
4.5 Düzgünleyici Parametre λ 'nın Seçimi	56
4.6 Doğrusal Olmayan Problemlerin Eşlenik Türev (CG) Yöntemi İle Ters Çözümü	56
4.7 EM Dalga Hızı ile İlişkili Diğer Parametreler	57
5. GELİŞTİRİLEN RADAR TOMOGRAFİ ALGORİTMASININ TEST EDİLMESİ	58
5.1 Model 1	59
5.2 Model 2.....	61
5.3 Model 3.....	63
6. TARTIŞMA VE SONUÇ	66
KAYNAKLAR	70
EKLER.....	74
EK 1 Modelleme Uygulamaları.....	75
EK 2 Ters Çözüm Uygulamaları	81
EK 3 Radar Tomografisinde Kullanılan Anten Frekansı ve Kuyu Mesafesinin Etkisi	93
ÖZGEÇMİŞ.....	97

SİMGELER DİZİNİ

Ψ	Açı
a	Anten Aralığı
ϵ_b	Bağıl Dielektrik Sabiti
D	Derinlik
ϵ	Dielektrik Katsayısı
$S(m)$	Durağanlaştırıcı
Φ	Düşey Eksen İle İki Komşu Grid Noktasından Geçen Çizgi Arasındaki Açı (Grup Açısı)
z	Düşey Kartezyen Koordinat Eksen
A	Düzgünleştirici Parametresi
σ	Elektriksel İletkenlik
m	Hesaplanacak Model Parametre Değeri
s	Hızın Ters Şeklinde Tanımlanan Yavaşlık
R_x	Kuyu İçi Alıcı Anten Konumu
T_x	Kuyu İçi Verici Anten Konumu
λ	Lamda Operatörü
μ	Manyetik Geçirgenlik
l	Mesafe
g ya da c	Ortamın EM Dalga Hızı
t ya da T	s Yavaşlık Değeri İle Ortamda Belirli Bir Kaynak Noktasından Yayılan EM Dalga Enerjisinin Seyahat Zamanı
θ_w	Toprak Nemlilik Miktarı (Su İçeriği)
v_{toprak}	Toprağın EM Dalga Hızı
R	Yansıma Katsayısı
x	Yatay Kartezyen Koordinat Eksen
ω	Yavaşlığın Karesi
l	Yineleme Katsayısı

$T_{rw,x}$	x Mesafesi İçin Yansıyan Dalganın Alıcıya Varış Zamanı
Δx	x Yönündeki Grid Aralığı
Δz	z Yönündeki Grid Aralığı

Kısaltmalar

1B	Bir Boyutlu
CG	Conjugate gradient yöntemi
E	Elektrik Alan
EM	Elektromanyetik
GA	Genetik algoritma
GHz	Giga Hertz
2B	İki Boyutlu
BGPR	Kuyu içi radar (Borehole Ground Penetrating Radar)
H	Manyetik Alan
MT	Manyetotellürik
m	Metre
m/ns	Metre/nanosaniye
OCCAM	OCCAM Ter Çözüm Yöntemi
RMS	Root Mean Square
ZOP	Sıfır ofset profili (Zero Offset Profile)
SA	Simulated annealing
SEKK	Sönümlü En Küçük Kareler
SVD	Tekil değer ayrışımı
3B	Üç Boyutlu
GPR	Yer Radarı (Ground Penetrating Radar)
FDTD	Zaman Ortamında Sonlu Farklar

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1	Elektrik ve manyetik alanın gösterimi	9
Şekil 2.2	Yayıma doğrultularına dik E elektrik alan ve H manyetik alan yayılma düzlemleri.....	9
Şekil 3.1	Kuyu içi radar uygulamasında a. Kuyu içi yansıma profili, b. Düşey radar profili, c. Karşıt kuyu radar profili	17
Şekil 3.2	Sıfır ofset kuyu içi radar ölçü alım tekniği.....	18
Şekil 3.3	Çok ofsetli kuyu içi radar ölçü alım tekniği	18
Şekil 3.4	a. Sıfır ofsetli kuyu içi radar uygulaması sırasında iletilen dalgalar, b. Meydana gelen dalgaların zaman-derinlik kesitindeki görüntüsü	20
Şekil 3.5	İlk adımda hesaplanacak grid noktalarının ($B_1, B_2, B_3, B_4, C_1, C_2, C_3, C_4$) ve kaynak noktasının (A) basit gösterimi.....	23
Şekil 3.6	İkinci adımda, daha önce hesaplanmış $B_1, B_2, B_3, B_4, C_1, C_2, C_3, C_4$ grid noktaları dışında hesaplanacak grid noktalarının ve kaynak noktasının (A) basit gösterimi	25
Şekil 3.7	Dalga cephesi yayılımı yönteminde (düz çizgi dalga cephesini temsil etmektedir), a. Çözüm bölgesi ve içi boş daire içinde içi dolu daire ile gösterilen minimum seyahat zamanı noktası, b. Minimum seyahat zamanı noktasına bitişik olan içi boş karelerle gösterilen komşu noktalara doğru çözüm bölgesinin yayılımı, c. Yeni çözüm bölgesi ve yeni hesaplanan noktalar arasındaki minimum seyahat zamanı noktası.....	27
Şekil 3.8	Son çözüm bölgesine ait seyahat zamanları bilinen noktalar ve bir sonraki adım için seyahat zamanları hesaplanacak olan noktalar	29
Şekil 3.9	a. Üretilen test modeli, b. En küçük kareler yöntemi kullanılarak elde edilen.....	36
Şekil 3.10	Basit yatay tabakalı hız modeli ve kaydırılan anten çifti konumları.....	37
Şekil 3.11	Modelleme aşamasına ait program akış şeması.....	39
Şekil 3.12	a. Basit seyahat zamanı hesabı, b. Yayılan dalga için olabilecek açılar.....	41
Şekil 3.13	Fermat prensibine göre gerçekleştirilen işleme ait programın akış şeması.....	43
Şekil 3.14	a. Yüksek hızlı bir ortam içinde gömülü olan düşük hızlı bir cismin bulunduğu yer modeli için modelleme ile elde edilen seyahat zamanı kontur haritası, b. Giroux vd. (2007)'nin geliştirdiği Matlab tabanlı program sonucu, c. Fermat Prensibi tabanlı doğrudan seyahat zamanı hesaplama yöntemi ile elde edilen seyahat zamanı kontur haritası.....	45
Şekil 3.15	a. Homojen ortam için modelleme ile elde edilen seyahat zamanı kontur haritası, b. Giroux vd. (2007)'nin geliştirdiği Matlab tabanlı program sonucu..	47
Şekil 3.16	a. Düşey fay modeli için modelleme ile elde edilen seyahat zamanı kontur haritası, b. Giroux vd. (2007)'nin geliştirdiği Matlab tabanlı program sonucu..	48

Şekil 5.1	a. Gerçek hız modeli, b. SEKK ters çözüm sonucu, c. OCCAM ters çözüm sonucu, d. SEKK için model MISFIT kesiti. e. OCCAM çözümü için model MISFIT kesiti.....	59
Şekil 5.2	SEKK ve OCCAM ters çözümde her yinelemede RMS değerleri	61
Şekil 5.3	a. Gerçek hız modeli, b. SEKK ters çözüm sonucu, c. OCCAM ters çözüm sonucu, d. SEKK için model MISFIT kesiti, e. OCCAM çözümü için model MISFIT kesiti.....	62
Şekil 5.4	SEKK ve OCCAM ters çözümde her yinelemede RMS değerleri	63
Şekil 5.5	OCCAM Ters çözüm yöntemi sonucu ile ortamın dielektrik sabiti ve su içeriği değişim kesitleri.....	64



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 5.1	SEKK ve OCCAM ters çözüm yöntemlerinin yineleme sayısı, RMS değeri ve hesaplama süreleri.....	60
Çizelge 5.2	SEKK ve OCCAM ters çözüm yöntemlerinin yineleme sayısı, RMS değeri ve hesaplama süreleri.....	63



1. GİRİŞ

Yer radarı yöntemi (GPR-Ground Penetrating Radar) yüksek frekanslı elektromanyetik (EM) yöntemidir. Bir yer radarı sistemi, verici anten, alıcı anten ve kayıtcıdan oluşmaktadır. Verici anten ile yer içine yüksek frekanslı EM kaynak dalga gönderilir. Yer içine gönderilen dalga herhangi bir nesne ya da ara yüzey ile karşılaştığında yansıma ve saçılmaya uğrar. Bu yansıyan ve saçılan dalgalardan yüzeydeki alıcı antene ulaşanlar kaydedilir. Varış zamanının fonksiyonu olarak kaydedilen dalgalar grubuna dalga alanı adı verilir. Yere gönderilen EM dalga, harmonik bir yapıda olup merkez bir frekans içermektedir. Bu frekansın değeri, nüfuz derinliğini, soğrulma miktarını ve saçılma derecesini belirler.

GPR, yerin yakın yüzeyine ait yüksek çözünürlüklü üç boyutlu (3B) görüntülerin elde edilmesini sağlayabilen bir jeofizik yöntemdir. Gelişen GPR teknolojisi, yerin onlarca metre derinliğine kadar olan geniş bir alanda görüntüleme yapılmasına izin vermektedir. Gelişmiş GPR sistemleri ile yeraltı suyu kaynakları, minerallerin tespiti, arkeolojik çalışmalar gibi birçok alanda uygulamalar yapılmaktadır.

Yakın yüzeye ait kirleticilerin taşınması ve sonları ile ilgili tahmin yürütme ve yer saptama işlemleri, yerin fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerinin doğru bir modellenmesini gerektirmektedir. GPR yöntemlerinin yer yüzeyinden inceleme yapmasına ek olarak, kuyu içi radar sistemleri ile de bunu yapabilmek mümkündür.

GPR yöntemi yüksek frekanslı Elektromanyetik (EM) dalgaları kullanan ve yerin yaklaşık 30 m derinliğine kadar dielektrik özelliklerinin yüksek çözünürlüklü olarak görüntülenmesini sağlayabilen bir yakın yüzey jeofizik yöntemidir. GPR araştırmalarında genelde 10 MHz'den 2 GHz'lik frekanslara kadar değişen aralıktaki antenler kullanılır. Yöntem, yüzeye yakın fay ve kırıkların araştırılması, haritalanması, jeolojik birimlerin tespiti, toprak stratigrafisinin belirlenmesi, yeraltındaki boşlukların aranması ve yeraltı suyu tablasının derinliğinin belirlenmesi gibi yapısal araştırmalarda uygulanmaktadır.

Bunun yanı sıra günümüzde çok yaygın olan tapınak, mezar, duvar gibi tarihi yapıların ortaya çıkartılması amaçlı arkeojeofizik araştırmalarda ve yeraltında görülmeyen boru, boru hattı, su ve akaryakıt tankı, metalik ve endüstriyel atıkların tespiti gibi metalik malzeme arama araştırmalarında da kullanılmaktadır. Ayrıca, yol, havaalanı, baraj, demiryolu, asfalt, yerleşim alanları zemin etüdleri gibi zemin araştırmaları, su tünelleri ve tüp geçitlerin duvarlarının sağlamlılık derecesinin belirlenmesi gibi tünel araştırmaları ve yeraltındaki canlı kalıntıların tespiti ve toplu mezarların ortaya çıkartılması gibi araştırmalar bu yöntem ile yapılan uygulamalar olarak sayılabilir.

Toprak özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmış çalışmalarda ise, bu özelliklerin ortaya konulabilmesi için toprak ve kayaçlar arasındaki fiziksel özelliklerin ilişkisi ve hidrolik parametrelerin belirlenmesi ve tanımlanması gerekmektedir. Son yıllarda, özellikle hidrojeolojik amaçlı araştırmalarda, hidrojeofizik yöntemlerin kullanılması giderek artmaktadır. Akiferlerle çevrelenmiş formasyonların jeolojik olarak haritalanması, akiferlerin iç özellikleri ve geometrik karakterlerinin belirlenmesi, suya doymun zondaki süzölme ya da suyun sızma alanının haritalanması ya da yeraltı suyu atıklarıyla ilgili çalışmak için (tuzlu su girişine bağılı ya da gömölü boş depoların sızıntıları) hidrojeofizik yöntemler kullanılmaktadır. Hidrojeofizik yöntemlerden biri olarak kullanılan GPR yöntemi, büyük alanlarda yapılan çalışmalarda geleneksel su içeriğı ölçme yöntemleri ile karşılaştırıldığında daha hızlı bir şekilde su içeriğinin belirlenmesini sağlayabilen yöntemlerden biri olduğı anlaşılmaktadır (Grote vd. 2003, Gue'rin 2005). GPR yöntemi, büyük alanlarda yapılan çalışmalarda geleneksel su içeriğı ölçme yöntemleri ile karşılaştırıldığında daha hızlı bir şekilde su içeriğinin belirlenmesini sağlayabilecek yöntemlerden biri olarak görölmektedir (Grote vd. 2003).

Uygulamaları içerisinde radar verisi, yakın yüzeye ait katı ve sıvı bileşenlerin diğerlerinden farklı dielektrik özelliklere sahip olanlarının çoğı, atık hidrolojisi ve sıvı organik atıkların varlığının tespit edilmesi için kullanılabilir. Yakın yüzeye ait hidrojeolojik modellerin geliştirilmesinde kullanılabilen radar görüntölleme yöntemlerinin metre ölçekli çözünürlüğü atıkların taşınması ve bu taşınma sırasında meydana gelenlerin tahmin edilmesi için gereklidir. GPR görüntölteri, yakın yüzeyin

büyük ölçekli mimarisinin modellerini elde etmek ve su içeriği, porozite (gözeneklilik) ve permeabilite (geçirimsizlik) gibi hidrojeolojik özelliklerin belirlenmesinde yardımcı olmak için yorumlanırlar. Bu özelliklerin belirlenebilmesi için yakın yüzeyi tanımlamada kullanılan geleneksel yöntemlere alternatif olarak GPR yöntemini etkileyici bir yöntem olarak gösterilmektedir. GPR yönteminin kullanıldığı çevre uygulamaları günümüzde atık hidrojeolojisi alanı içine giren uygulama yöntemlerinin kayda değer gelişmeler göstermesine ışık tutar. Yakın yüzeye ait atıkların iletimi ve bu iletim sırasında meydana gelen olayların tahminleri ve yerlerinin saptanması, yerin fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri açısından doğru bir model kullanmayı gerektirir. GPR yakın yüzeyi görüntüleme anlamında önemli bir yöntemdir (Knight 2001).

GPR yöntemi ile bir elektromanyetik sinyal yani radar sinyali yer içerisine yönlendirilir. Bunu takiben geçen zaman ölçülür. Radar sinyali verici anten tarafından yer içerisine gönderilir ve yer içinde derinlere doğru ilerler. Sinyalin bir kısmı gömülü ve farklı özellikteki bir obje ile karşılaşınca yansır ve geri yeryüzüne döner. Burada alıcı anten tarafından kaydedilir. Farklı derinliklerden gelen yansımaların ürettiği sinyal izi, zamana bağlı radar dalga genliğinin bir fonksiyonudur. Radar dalgaları, düz bir yol boyunca ilerler ve verici antenden alıcı antene gelene kadar hava yer ara yüzeyinde kırılan dalgalar ilerler. Anten frekansı, toprak nemlilik şartları, kil içeriği, tuzluluk ve demir oksit miktarı sinyalin nüfuz ettiği derinliğe kadar olan kısımda, etkili olduğu mesafe bu özelliklere bağlıdır. Materyalin dielektrik sabiti, materyal içerisinde ilerleyen radar sinyali için hızı yönetir. Uyumsuzluk özellikleri gösteren yüzeylerdeki dielektrik sabiti farklılıkları yansıyan radar enerjisinin miktarını kontrol eder ve radar dalgasının genliği değişerek yüzeye döner. Sonuçta, radar sinyali genliği verisi, yakın yüzeyin özelliklerini ve bulunduğu konumdaki bilgiyi elde etmek ya da yeraltındaki değişimi ortaya koymak amaçlı derinliklere göre çizdirilir ya da haritalanır.

Standart bir GPR araştırması, bir araştırma hattı boyunca, belirli mesafe aralıklarıyla, alıcı ve verici antenlerin hareket ettirilmesi şeklinde yapılmaktadır. Anten çifti, araştırmanın hedefine göre, belirli aralıktaki istasyonlar arasında hareket ettirilir. Her istasyondaki kısa titreşim ya da dalgacık olarak adlandırılan EM dalga enerjisi verici

anten tarafından yer içerisine gönderilir. GPR görüntüsü, karmaşık olarak, uzaysal değişim ve iletilen EM enerjisi arasındaki etkileşimin bir tanımıdır. Yerin frekans bağımlı EM özellikleri; dielektrik katsayısı ϵ , elektriksel iletkenlik σ ve manyetik geçirgenlik μ şeklinde sıralanır (Knight 2001).

Diğer yöntemlerde olduğu gibi GPR yöntemini de avantaj ve dezavantajları vardır. Avantajları; antenler kolay bir şekilde çekilerek hızlı ve seri bir biçimde veri toplanabilir. Yüksek çözünürlüklü çalışıldığında, kullanılan anten frekansına bağlı olarak çalışma alanındaki küçük yapılar da ortaya konulabilir. Görüntüleme için kullanılan özel teknikler sayesinde yorumlama ve karşımızdakilere var olanı anlatma ve ortaya koyma daha kolaydır. Dezavantajları ise yöntemin uygulanması sırasında bazı sınırlamalar getirmesidir. Bunlar kısaca; araştırma derinliğinin zeminlerin su, kil, çözülebilir tuz içeriklerinden dolayı elektriksel iletkenliğinin yüksek olması ve antenin merkez frekansından etkilenmesidir.

GPR yönteminde modelleme genellikle, 2B EM dalga denkleminin çözülmesi ya da ışın izleme yöntemleri kullanılarak yapılmaktadır. Günümüze kadar yapılan çalışmalara bakıldığında; basit, bir boyutlu (1B), sentetik olarak elde edilen radargramları (Annan ve Chua 1992), 2B dalga denklemi ile yapılan çözümler sonucu elde edilen modeller ve ışın izleme yöntemi ile elde edilen çözümler takip etmiştir (Cai ve McMechan 1995, Zeng vd. 1995, Goodman 1994). 2B modelleme çalışmaları (Powers ve Olhoeft 1994, Casper ve Kung 1996) ardından 3B modelleme çalışmaları da yapılmıştır (Wang ve Tripp 1996, Alumbaugh ve Newman 1994).

Son yıllarda bilgisayar teknolojisinin ilerlemesiyle yer radarı yönteminde modelleme çalışmaları hız kazanmıştır. Karmaşık jeolojik yapıların olduğu ortamların sayısal olarak modellenmesi problemlerinde ise, Zaman Ortamında Sonlu Farklar (FDTD) (Yee 1966, Wang ve Tripp 1996, Bourgeois ve Smith 1996, Holliger ve Bergmann 2002, Carcione 1996, Irving 2006), ışın yolu izleme (Goodman 1994, Cai ve McMechan 1995), frekans ortamında sonlu farklar (Zeng vd. 1995), integral yöntemleri

(Ellefsen 1999), sonlu elemanlar ve melez yöntemleri ile de birçok modelleme çalışmaları yapılmıştır.

Ters çözüm işlemi, modelleme ile doğrudan ilişkilidir. Doğru model seçimi ya da doğru modelin oluşturulması yapılacak olan araştırma için önemlidir. Ölçülen ve hesaplanan jeofizik yanıtlar uygun bir optimizasyon yöntemi kullanılarak karşılaştırılır ve ölçülen ile hesaplanan veri arasındaki fark minimize edilmeye çalışılır. Öncelikle oluşturulan yer modeli için bir hesaplama yapılır. Hesaplanan bu değerler kullanılarak optimizasyon yöntemi yardımıyla yeni parametreler hesaplanır. Bu hesaplanan parametreler teorik modelde yerine konularak yeni teorik model yanıtı hesaplanır ve bir önceki yanıt ile karşılaştırılır. Kabul edilebilir bir hata miktarı ise bulunan parametreler doğru kabul edilir. Eğer kabul edilebilir bir hata miktarı değilse, o zaman bulunan parametrelerle elde edilen teorik model, ters çözüm işlemi için yeni bir giriş oluşturur ve aynı işlemler tekrarlanarak yeni teorik model parametreleri ve yeni teorik model yanıtı hesaplanır. Buradan elde edilen hata miktarı tekrar kontrol edilir. Hata minimum olana kadar bu yineleme işlemine devam edilir (Treitel ve Lines 1999).

Yeryüzeyinden etkilenen yüzey radarı yöntemlerine ek olarak, kuyu radarı sistemlerini uygulamak da modern ya da var olan kuyular kullanılarak yakın yüzeyi modellemek mümkündür. Son yıllarda gelişen teknoloji ile açılan kuyularda yapılan kuyu jeofiziği çalışmaları ile test amaçlı ya da araştırma amaçlı olarak açılan kuyuların bulunduğu alanlardaki kayaçların fiziksel özellikleri ortaya çıkartılmakta, su içerikleri ve kırık ya da çatlak zonlar belirlenmektedir. Kuyu jeofiziği yöntemleri, kuyu verileri yorumu, kayaç, kırık ve çatlak zonların litolojisi, geçirimsizlik ve gözeneklilik, su kalitesi gibi fiziksel özellikler hakkında bilgi elde etmek amacıyla yapılan yeraltı suyu ve çevresel araştırmalarda kullanılmaktadır. Bu tür bir ölçüm tekniği ile yani kuyu açılarak veri toplamak, bu parametrelerin elde edilmesinde büyük önem taşımaktadır. Bunun en önemli nedeni, özellikle çevresel ve yeraltı suyu amaçlı yapılan çalışmalar için yakın yüzey şartlarının ve kritik noktaların yani yorumlamada zorluk çıkarabilecek noktaların daha iyi anlaşılabilmesinde daha sağlıklı bilgi veren yöntem kuyu açılarak veri toplanan yöntemlerdir. Kuyu verisi ile elde edilen sonuçların yanı sıra kuyudan alınan

örneklerle daha büyük hacimli örnekler sağlanır ve ele alınan olayın sürekliliği takip edilebilir.

Son yıllarda gelişen bu teknolojiyle, açılan tek bir kuyuda, alıcı ve verici anten aynı kuyu içinde; açılan tek bir kuyuda, verici anten kuyu içinde ve alıcı anten yüzeyde veya karşılıklı açılan iki kuyu içinde, alıcı anten bir kuyuda iken verici anten diğer kuyuda olacak şekilde, düşey yönde ölçümler gerçekleştirilebilmektedir. Tomografi amaçlı yapılan yer radarı ölçümleri, yüksek frekanslı elektromanyetik dalga iletimi sağlanabilmesi için kuyu içine yerleştirilen alıcı ve verici antenler aracılığı ile gerçekleştirilir. Tek kuyu içinde yapılan ölçümler daha çok kırık ve çatlakların yönlerini belirlemede, karşılıklı iki kuyuda yapılan ölçümler ise kırık ve çatlak zonlarını tanımlamaya yardımcı olur. Kırık ve çatlak zonları içerisinde ilerlemeye çalışan tuz ya da benzeri sıvı hareketleri de kuyu radarı ile görüntülenebilir.

Karşıt kuyu radar verilerinin iki boyutlu (2B) hız tomografisi genelde “Sönümlü En Küçük Kareler Yöntemi (SEKK)” ile çözülmektedir. Bu tezin amacı, karşıt kuyu radar verilerinin 2B OCCAM ters çözümünü yapan bir algoritma geliştirmektir. Geliştirilen algoritma ile kuyu içi radar verilerinin geleneksel SEKK ters çözümü ile OCCAM Ters Çözümünden elde edilen sonuçları karşılaştırarak radar tomografisinde bu yöntemlerin birbirine göre üstün ve zayıf yönlerini araştırmaktır.

Tez kapsamında, MATLAB programlama dili kullanılarak algoritma geliştirilmiştir. Algoritmanın düz çözüm bölümünde, 2B EM hız modeli için Eikonal denklem sonlu farklar ile çözülmüştür. Ters çözümde algoritma SEKK ve OCCAM ters çözüm teknikleri ayrı ayrı kullanılabilir. Algoritmada her iki ters çözüm yönteminde, dizey denklemi yinelemeli bir dizey denklemi çözüm yöntemi olan eşlenik gradyen (non-linear conjugate gradient) yöntemi kullanılmıştır.

Tezin izleyen bölümlerinde, karşıt-kuyu radarı verilerinin minimum seyahat zamanı hesaplama (modelleme, düz çözüm) için Sonlu Farklar Yaklaşımı ile 2B Eikonal Denkleminin Çözümü anlatılmıştır. İkinci bölümde SEKK ve OCCAM ters çözüm

teknikleri anlatılmıştır. Tezin izleyen bölümünde tabakalı ve 2B hız modelleri için yapay veriler hesaplanmıştır. Bu verilere gürültü eklenerek ters çözümleri SEKK ve OCCAM yöntemleri ile yapılmıştır.

Ayrıca tez kapsamında, elde edilen EM hız modelilleri kullanılarak, Topp Denklemi (Topp vd. 1988) yardımı ile su içeriği ve nemlilik miktarıda elde edilmiştir. Bu tür bir çalışma ile toprak fiziksel özelliklerinin belirlenmesinin yanı sıra, yeraltında düşey yöndeki kırık ve çatlakların tayini de kolaylıkla yapılabilmektedir.



2. YER RADARI (GPR) YÖNTEMİ

2.1 GPR Yönteminin Tarihçesi

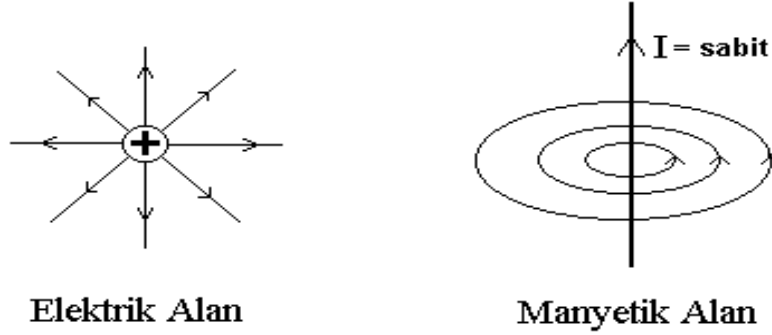
Radarın bulunuşuna ilk adımı 1886 yılında Alman fizikçisi Heinrich R. Hertz atmıştır. Hertz EM dalgaların ışık gibi yayılmasını ve yansımalarını ispatlamıştır. 1904 yılında, Christian Hülsmeyer gemilerin birbiriyle çarpışmasını önlemek amacıyla, EM dalgalar ile gemilerin yerini belirlemekte kullanılabilen sistemi bulmuştur. Hülsmeyer, EM dalgalar ile gemilerin yerini belirlemekte kullanılabilen icadını, Ren nehrinde bulunan buharlı bir geminin yerinin tespiti için denemiştir. Denemeler sonunda geminin resmi ortaya çıkmıştır, böylece geliştirdiği cihazın kullanılabilişliğini kanıtlamıştır. 1925 yılında, Merle A. Tuve, Amerika'da darbeler halinde EM dalga oluşturunca, bugünkü anlamda radara geçiş sağlanmıştır. 1939 yılında başlayan İkinci Dünya Savaşı esnasında Alman, Fransız, İngiliz ve Amerikan fizikçilerin radar konusu ile ilgili çalışmaları artmıştır. 1940 yılında 180 km mesafedeki hedefi hassas bir şekilde tespit edebilecek radarlar yapılmıştır. 1940 yılında İngiliz fizikçilerin keşiflerinden sonra, radar gücü birkaç bin misli arttırılmış, Almanların savaşı kaybetmelerinde büyük rolü olan bu buluş ile modern radarların yapımına geçilmiştir. Bu dönemde ilk kez yer altındaki nesnelerin belirlenmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca bu dönemde kutuplardaki buz tabakası kalınlığını belirlemede ve gezegen araştırmalarında kullanılmıştır.

1970'den günümüze kadar doğal yer altı koşullarının ve özelliklerinin sürekliliğini ve varlığını araştıran, gömülü objelerin derinliğini ve yerini belirlemek amacıyla kullanılan bir yöntem haline gelmiştir (Kurt 2009).

2.2 EM Dalga Yayınımı

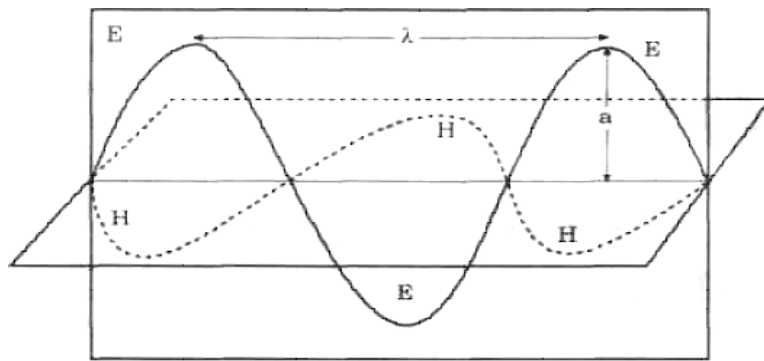
Durgun bir yük sadece E elektrik alanı oluştururken, hareketli bir yük elektrik alanı ek olarak bir de manyetik alan oluşturur. Eğer zamanla değişim yoksa elektrik alan ve

manyetik alan birbirlerinden bağımsız olarak bulunabilirler (Şekil 2.1). Yani durgun bir yük veya düzgün doğrusal hareket yapan bir yük, elektromanyetik dalga oluşturmaz.



Şekil 2.1 Elektrik ve manyetik alanın gösterimi

EM dalga oluşması için yükün ivmelenmesi gerekir. Zamanla değişim gösteren durumlarda, elektrik alan ve manyetik alan birbirine tamamen bağlıdır. Yani elektrik alan değişimi, manyetik alan oluşturur; manyetik alan değişimi de elektrik alan oluşturur. Değişken bir manyetik alan oluşturmak için, iletkenin alternatif akım geçmesi yeterlidir. Yani alternatif akım geçen bir iletkenin çevresinde hem elektrik alan hem de manyetik alan oluşur. Bu da çevreye EM dalga yayıldığını gösterir.



Şekil 2.2 Yayılma doğrultularına dik E elektrik alan ve H manyetik alan yayılma düzlemleri

EM dalgayı oluşturan elektrik alan ve manyetik alan birbirlerine diktir. EM dalganın ilerleme yönü her iki alana da dik doğrultudadır (Şekil. 2.2). EM dalgalar boşlukta ışık hızıyla yayılır ve Maxwell denklemleriyle tanımlanır.

EM dalgaların farklılığı dalga boylarının farklı olmasından kaynaklanır. Gama ışınları, X ışınları, morötesi ışınlar, mikrodalga, radyo dalgaları, televizyon ve radar dalgaları gibi çeşitleri vardır. Bu da 100 Hz ile 10^{22} Hz arasında geniş bir frekans bandı demektir (Koçaslan 2008).

2.3 Maxwell Denklemleri

Gauss Kanunu : Bir yüzey parçası üzerindeki $\vec{E}$ alanının akısı (yani $\int \vec{E} \cdot d\vec{S}$), o yüzeyi kesen çizgilerin sayısı ile orantılıdır. Bir yükü çevreleyen kapalı bir yüzeyden geçen akı q/ϵ_0 olur.

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (2.1)$$

Burada q yükü kapalı yüzey içinde kalan yüklerin toplamıdır. Bu yüzeyin dışında kalan bir yükün akıya katkısı sıfır olur çünkü, bu yüklerin alan çizgileri yüzeyin bir yerinden girip, başka bir yerinden çıkar.

Gauss kanununda verilen $\oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon_0}$ ifadesine diverjans teoremi uygulanırsa ;

$$\oint_{\text{yüzey}} \vec{E} \cdot d\vec{S} = \int_{\text{hacim}} (\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) \cdot dV = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (2.2)$$

olur. Burada $q = \int \rho \cdot dV$ olduğundan

$$\int (\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) dV = \frac{\int \rho dV}{\epsilon_0} \Rightarrow \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.3)$$

elde edilir. Manyetizma için Gauss kanunu, doğada izole edilmiş manyetik kutupların var olamayacağını ifade eder. Yani herhangi bir kapalı yüzey boyunca manyetik akı sıfırdır.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (2.4)$$

Bu ifade için diverjans teoremi alınırsa $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$ olur.

Faraday Kanunu: Sabit bir manyetik alan içinde hareket ettirilen iletken çerçevede indüklenen gerilim $E = -\frac{d\phi}{dt}$ ile verilir. $\oint \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = -\frac{d\phi}{dt}$, Faraday kanununun integral ifadesidir. Stokes teoremine göre;

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = \int (\vec{\nabla} \times \vec{E}) \cdot d\vec{S} = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \cdot \int \vec{B} \cdot d\vec{S} = -\int \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \quad (2.5)$$

Buna göre; $\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ olur ve manyetik alan değişimi elektrik alan meydana getirir.

Amper kanununa göre;

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 \cdot I \text{ 'dır.} \quad (2.6)$$

$I = \int_s \vec{J} \cdot d\vec{S}$ olduğundan, Stokes teoremine göre ;

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \int (\vec{\nabla} \times \vec{B}) \cdot d\vec{S} = \mu_0 \cdot \int \vec{J} \cdot d\vec{S} \quad (2.7)$$

olur. Buradan;

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{J} + \mu_0 \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.8)$$

elde edilir. Buna göre ya elektrik alanının değişimi ya da akımın varlığı manyetik alan oluşturur. Böylece;

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.9)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.10)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.11)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{J} + \mu_0 \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.12)$$

ile dört Maxwell denklemi elde edilmiş olur. Yalıtkan ($\sigma = 0$) ortamda EM dalga denklemleri;

$$\nabla^2 \vec{E} - \epsilon_0 \cdot \mu_0 \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.13)$$

$$\nabla^2 \vec{H} - \epsilon_0 \cdot \mu_0 \cdot \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.14)$$

ile verilir. Bu denklemler $\nabla^2 f - \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} = 0$ gibi bir klasik dalga denklemi olup, v hızıyla ilerleyen bir dalganın hareketini belirler. E ve H için ayrı ayrı elde edilen dalga denklemlerinde v hızının değeri ;

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} = 299.792.458 \text{ m/s m/sn.} \quad (2.15)$$

dir. Bu hız, ışık hızına eşittir ve elektromanyetik dalganın ışık hızında yayıldığını gösterir. Ortam içinde kaynak yoksa, yani ortam içinde serbest yük ve serbest akım yoğunluğu bulunmuyorsa burada dalga hızı;

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}} \quad (2.16)$$

olur. Burada;

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \text{ ve } \mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (2.17)$$

olduğundan, elektromanyetik dalganın yayılma hızı, maddenin elektrik ve manyetik özelliklerine bağlıdır ve bu hız elektromanyetik dalganın boşluktaki hızı olan ışık hızından daha küçüktür.

Bağıl dielektrik katsayısı (ϵ_r), 1-81 arasında değerler alır. Buradaki en düşük ve en yüksek değerler sırası ile hava ve suya aittir. Jeolojik malzemelerin çoğu için dielektrik katsayısı 3-30 aralığında yer alırken, bu malzemelerin radar hızları ise geniş bir aralıkta (0,06-0,175 m/ns) değişmektedir (Balkaya 2010).

Buna göre (2.10) ve (2.11) ifadelerinin frekans ortamındaki karşılığı;

$$\nabla^2 \vec{e} + \omega^2 \epsilon \mu \cdot \vec{e} = 0 \quad (2.18)$$

$$\nabla^2 \vec{h} + \omega^2 \epsilon \mu \cdot \vec{h} = 0 \quad (2.19)$$

şeklindedir (Kurt 2009).

3. KARŞIT KUYU RADAR YÖNTEMİ

Yüzey GPR araştırması, belirlenen profiller boyunca, alıcı ve verici antenlerin belirli mesafe aralıklarıyla kaydırılarak ölçü alınması şeklinde uygulanmaktadır. Verici-alıcı anten çiftinin, belirli aralıklardaki her bir konumunda, EM dalga enerjisi verici anten tarafından yer içerisine gönderilir (Knight 2001). Günümüzde, yüzey GPR yöntemine ek olarak, kuyu radarı sistemlerini uygulayarak da yakın yüzeyi modellemek mümkündür. Son yıllarda gelişen teknoloji ile açılan tek bir kuyuda ya da karşılıklı iki kuyuda yapılan kuyu radarı çalışmaları ortamın fiziksel özellikleri ortaya çıkartılmakta, kayaçların su içerikleri ve kırık ya da çatlak zonları belirlenebilmektedir. Bu tür bir ölçüm tekniğinde, kuyu açılarak veri toplamak yöntemin temelinde yatmaktadır. Özellikle çevresel ve yeraltı suyu amaçlı yapılan çalışmalar için yorumlamada zorluk çıkarabilecek noktaların daha iyi anlaşılabilmesinde ve daha sağlıklı bilgi verilebilmesinde kullanılan en etkin yöntemin, kuyu açılarak veri toplanan yöntemler oldukları belirtilmektedir.

Tez çalışması kapsamında, karşılıklı iki kuyu içinde toplanan kuyu radar verileri kullanılarak, yakın yüzeye ait geçirimsizlik, gözeneklilik, su içeriği ve kalitesi, nemlilik miktarı, elektriksel iletkenlik, dielektrik katsayısı gibi ortamın fiziksel özelliklerinin belirlenmesi ve seyahat zamanı yöntemi kullanılarak karşıt-kuyu radarının 2B tomografisi yapılması amaçlanmaktadır. Modelleme ve ters çözüm çalışmaları sonucunda, ortamdaki süreksizlikler ve kayaçların fiziksel özellikleri; ortamın elektromanyetik dalga hızına, iletkenlik ve geçirgenlik parametrelerine bağlı olarak belirlenebilir. Bu şekilde elde edilen sonuçlar yeraltının yorumlanması açısından da araştırmacıya kolaylık sağlayacaktır.

Tez çalışması kapsamında karşıt-kuyu radarı yönteminin kullanılmasındaki başlıca neden; yüzeyden yapılan ölçümlerde araştırma derinliğinin kullanılan anten frekansına göre sınırlı olmasına karşılık, karşıt-kuyu radarında daha çok kuyu derinliğine bağlı olarak değişim göstermesidir. Karşıt-Kuyu radarında da iki kuyu arası mesafe kullanılan anten frekansına bağlıdır. Derinlik bilgisi arttırılmak istendiğinde kuyu radarı daha etkin bir yöntemdir.

İncelenen ortamı temsil eden gerçek parametre değerlerine ulaşmak için ters çözüm işleminin yapılması gerekmektedir. Hesaplanan veriden yakın yüzey özelliklerinin belirlenmesi ters çözüm problemi olarak adlandırılır. Bunun için, ters çözüm problemine giriş olarak verilecek olan seyahat zamanı hesaplamalarında bir yer modeli oluşturulmalı ve belirlenen her bir ölçüm noktası için o modele ait ışının seyahat zamanları hesaplanmalıdır. Ters çözüm işlemi, modelleme ile doğrudan ilişkilidir. Doğru model seçimi ya da doğru modelin oluşturulması yapılacak olan araştırma için önemlidir. Ölçülen ve hesaplanan jeofizik yanıtlar uygun bir optimizasyon yöntemi kullanılarak karşılaştırılır ve ölçülen ile hesaplanan veri arasındaki fark minimize edilmeye çalışılır (Treitel ve Lines 1999).

Doktora tez çalışması kapsamında, karşılıklı iki kuyu içinde toplanan kuyu radarı verilerinin tomografisi çalışmasının yapılması amaçlanmıştır. Bu çalışma ile hedeflenen karşılıklı iki kuyu arasındaki yeriçi dielektrik sabiti değişiminin, yeraltı EM dalga hız değişiminin ve buna bağlı parametrelerin belirlenmesidir. Bu doktora tezi ile amaçlanan; Karşıt Kuyu Radar verilerinin 2B seyahat zamanı modellemesi ve tomografisine ilişkin yeni yaklaşımların geliştirilmesi ve farklı yöntemlerin karşılaştırılmasıdır.

Karşıt-Kuyu Radarı yönteminde, EM dalgasının verici antenden alıcı antene ulaşması için geçen seyahat zamanına bağlı ters çözüm işlemi “Seyahat Zamanı Tomografisi” olarak adlandırılmaktadır. Tez çalışmasında, EM dalgalarının seyahat zamanları kullanılarak hesaplanan dielektrik sabiti ve buna bağlı parametrelerin değişimini ortaya koyan, modelleme için FORTRAN ile ters çözüm için MATLAB programlama dilleri kullanılarak algoritmalar geliştirilmiş ve üretilen yapay verilerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Tomografi konusunda yapılan çalışmalara bakıldığında yüzey radarı tomografisine göre kuyu tomografisi uygulamaları daha çok göze çarpmaktadır. Bunun nedeni, kuyu radarı uygulamalarının seyahat zamanı hesaplamaları açısından kolaylık göstermesidir.

Tomografi yöntemi ile yapay verilerle oluşturulan ortam içindeki farklılıkları belirleyerek tabaka sınırlarını gösteren arayüzeyler, gömülü nesnelerin konumları, fiziksel parametreleri, ortamın dielektrik sabiti, EM dalga hızı değişimi ve bununla ilişkilendirilmiş olan bağıntılar kullanılarak ortam su içeriği, suya doygunluğu ve gözenekliliği gibi parametreler elde edilmiştir (Göktürkler ve Balkaya 2010, Wang vd. 2014)

Yöntemin temelinde, vericiden alıcıya giden ışın yolu yatmaktadır. Verici ve alıcı arasındaki bölge hücrelere ayrılır ve her bir hücreye bir EM dalga hızının tersi olarak tanımlanan yavaşlık değeri ve ortamın elektriksel özelliklerinden olan dielektrik sabiti, manyetik geçirgenlik ve elektriksel iletkenlik gibi parametre değerleri atanır (Balkaya ve Göktürkler 2016). Kaydedilen seyahat zamanı ışın yolunun integrali ile tanımlanabilir. Doğrusal denklem sistemleri, yavaşlık vektörünün verici-alıcı arasındaki mesafeyi içeren dizey ile çarpımı sonucunda seyahat zamanlarını içeren vektör elde edilir.

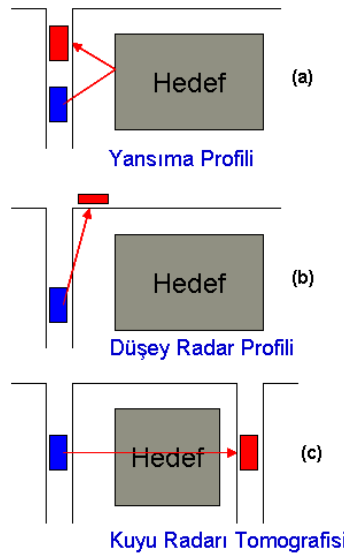
Modelleme kapsamında oluşturulan yapay bir yer modeli için, alıcı antenden çıkıp verici antende kaydedilen ışının seyahat zamanı değerleri, 2B Eikonal denklemlerin sonlu farklar yaklaşımı kullanılarak hesaplanmıştır. Modelleme çalışmalarına içerisinde ayrıca 2. dereceden ileri ve geri fark operatörleri kullanılarak seyahat zamanları hesaplanmıştır. Modelleme çalışmalarında ilk olarak tüm düğüm noktalarına yavaşlık değerleri atanmış, Neumann ve Dirichlet Sınır Koşulları uygulanmıştır. Kullanılan modellerin sağ, sol ve alt kısımlarındaki hücre sayıları arttırılarak algoritma buna göre düzenlenmiş ve farklı yer altı modellerine ait seyahat zamanı kontur haritaları çizdirilmiştir.

Ters çözüm işlemi ile probleme giriş olarak verilecek olan seyahat zamanı hesaplamaları için bir yer modeli oluşturularak, belirlenen her bir ölçüm noktası için o modele ait ışının alıcıdan vericiye gidiş-geliş yani seyahat zamanları hesaplanmıştır.

2B tomografi çalışmaları kapsamında, EM dalgasının verici antenden alıcı antene ulaşması için geçen seyahat zamanına bağlı ters çözüm işlemi doğrusal olmayan problemlerin çözümünde yinelemeli düzey denklemi çözüm yöntemi olarak kullanılan eşlenik gradyan (conjugate gradient) çözümü kullanılarak (SEKK) ve OCCAM Ters Çözüm Yöntemi hesabı yapılmıştır. Ters çözüm işlemi sırasında hesaplanması gereken kısmi türev düzeyi hesabı zaman alıcı bir işlem olduğundan, hesaplama kolaylığı sağlayabilmek için Broyden Güncellenmesi kullanılmış, geliştirilen algoritma basit ve karmaşık yeraltı hız modellerinden oluşan farklı yapay veriler üzerinden test edilmiş ve yapılan uygulama sonuçları irdelenmiştir.

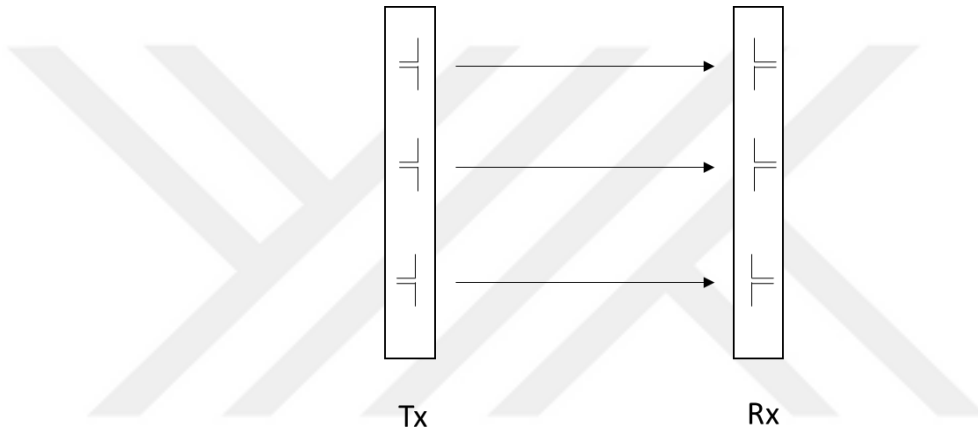
3.1 Karşıt-Kuyu Radar Yönteminde Veri Toplama

Kuyu radarı ölçümleri için, antenler düşeyde ilerleyebilecekleri bir biçimde tüpler içerisine yerleştirilirler. Alıcı-verici anten çifti, aynı anda tek bir kuyuda aralarındaki anten mesafesi sabit tutularak ilerletilir. Bu kuyu içi yansımada profili şeklindeki ölçü alma şeklidir (Şekil 3.1.a). Verici anten kuyu içinde, alıcı anten yeryüzünde olacak şekilde ölçü toplanabilir. Buna da düşey radar profili denir (Şekil 3.1.b). Son olarak da, karşılıklı açılan iki kuyudan birine verici, diğerine alıcı anten yerleştirilerek ölçü alınır (Şekil 3.1.c).

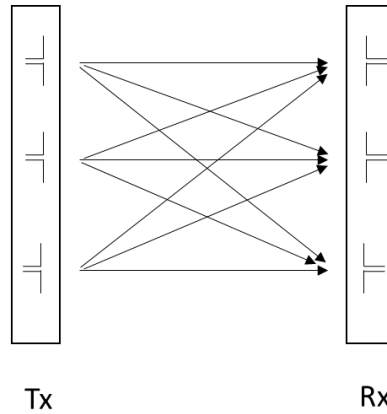


Şekil 3.1 Kuyu içi radar uygulamasında a. Kuyu içi yansımada profili, b. Düşey radar profili, c. Karşıt kuyu radar profili

Karşıt kuyu veri toplamada, sıfır ofsetli profil (zero-offset profile, ZOP) ve çok ofsetli profil (multi-offset gather, MOG) olmak üzere 2 farklı ölçü alım tekniği vardır (Huisman vd. 2003, Balkaya 2010). Bunlardan ilkinde, alıcı ve verici bir istasyondan diğerine eşzamanlı olarak hareket eder (Şekil 3.2). İkinci düzende ise verici anten, verici kuyusunda bir istasyonda sabit kalırken alıcı kuyusundaki alıcı anten sabit istasyon aralıkları ile kuyu içinde ilerler. Daha sonra, verici anten kuyu boyunca bir sonraki istasyona ilerlerken, alıcı anten ilk istasyondan itibaren aynı adımları tekrarlar (Şekil 3.3). Her iki teknik avantaj ve dezavantajlara sahiptir (Huisman vd. 2003, Balkaya 2010).



Şekil 3.2 Sıfır ofset kuyu içi radar ölçü alım tekniği



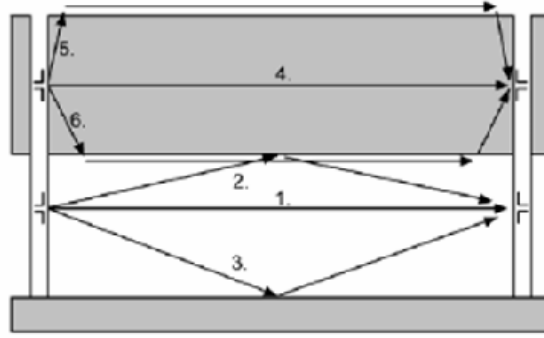
Şekil 3.3 Çok ofsetli kuyu içi radar ölçü alım tekniği

Veri toplama esnasında yer-hava arayüzeyinde kırılan dalganın, doğrudan varışları maskeleymesini önlemek için kuyu derinliğinin verici ve alıcı kuyular arasındaki mesafenin 2 katından büyük ($h \geq 2x$) olmasına dikkat edilmelidir.

Kuyu radarı çalışmaları sonucunda elde edilen kesiti yorumlamak oldukça zordur. Bunun nedeni; iki kuyu arasında ilerleyen EM dalgasının, yakın zamanlarda, yansıyan veya saçılan dalga alanlarını birbirinden ayırt etmesindeki zorluktur. Ancak sismik kırılma yönteminde de olduğu gibi doğrudan gelen ve kırılan dalga alanları kuyu radarında kolayca belirlenebilir. Bu nedenle daha doğrudan gelen ve kırılan dalgalardan yararlanarak, bunların geçtiği ortama ait yerçi parametrelerini belirleme teknikleri geliştirilmiştir (Farmani vd. 2008, Binder vd. 2009).

Karşıt-kuyu radar yönteminin çalışma prensibi, karşılıklı açılan kuyulara yerleştirilmiş olan, verici anten ile yer içinde v hızına sahip bir ortamda ilerleyen sinyalin, diğer kuyudaki alıcı antende kaydedilmesine dayanır. Işın yolu boyunca seyahat eden dalganın karşılıklı açılan iki kuyu arasındaki ortamdaki hızını belirlemek ve belirli bir konumdaki verici antene doğrudan gelen dalganın varış zamanını belirlemek için tomografik ters çözüm yöntemi bir yaklaşım olarak uygulanmaktadır (Huisman vd. 2003). Bu çalışmada ele alınacak yöntem, ışın yolu izleme tabanlı bir yaklaşımdır. Kayıt işlemi, açılan kuyu boyunca birbirinden farklı tüm Alıcı anten (Rx) ve verici anten (Tx) konumları için alınır. Böylece iki kuyu arasındaki tüm alanı tarayan ışın yolları belirlenmiş olur.

Bu yöntemde, kuyular arası mesafe ve sinyalin vericiden alıcıya geliş zamanı bilindiğinden, ortamın hızı, dielektrik sabiti ve toprak su içeriği ya da nemlilik miktarı belirlenebilir. Özellikle çok ofsetli veri toplama yöntemi tomografi amaçlı çalışmalarda kullanılmaktadır. Bu tür uygulamalar için şekil 3.4'deki gibi bir model örneği için elde edilen zaman-derinlik kesitindeki görüntüsü görülmektedir. Modelde, birinci ve üçüncü tabakalar düşük hıza, ikinci tabaka ise yüksek hıza sahiptir. Böyle bir yer modeli için karşılıklı olarak açılan iki kuyuda, sıfır ofset kuyu içi radar ölçümü yapılırsa, numaralandırılan dalgalar zaman-derinlik kesitinde şekilde görüldüğü gibi görüntülenir.



Şekil 3.4 Sıfır ofsetli kuyu içi radar uygulaması sırasında iletilen dalgalar (Huisman vd. 2003)

Şekil 3.4’te görüldüğü üzere; Huismann (2003)’e göre yapılan deneyde üstteki tabaka hızının düşük alttaki tabaka hızının yüksek olduğu kabulü yapılmış, üstteki ve alttaki tabakalar için ayrı ayrı verici ve alıcı antenler arasında iletilen EM dalganın durumu irdelenmiştir. Yüksek hızlı ortam yani ikinci tabaka için, en erken gelecek olan dalga 1 numaralı doğrudan gelen dalgadır. Bunun dışında bu tabaka içerisinde 2 ve 3 numara ile gösterilen yansımalar daha geç gelecektir. Yansıma ve doğrudan gelen dalga dışında başka bir dalga oluşmaz. Kırılma dalgalarının oluşmama sebebi, ortam hızının alttaki ve üstteki tabakadan yüksek olmasıdır. Bir üstteki düşük hızlı tabaka yani birinci tabaka için, ilk bakışta en erken gelecek dalga 4 numaralı dalga gibi düşünülebilir , ancak düşük hızlı bu tabaka içerisinde en erken gelen dalganın 5 numaralı yeryüzüne doğru ilerleyen ve burada kritik açı ile kırılan dalga olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, oluşan dalga düşük hızlı bir ortam içinde ilerleyen dalganın, yüksek hıza sahip havakatı arayüzüne çarpmasıdır. 5 numaralı dalgadan sonra 6 numara ile gösterilen kırılma dalgası alıcıya gelmektedir. Bu dalganın 5 numaralı dalgadan sonra gelmesinin sebebi, alttaki yüksek hızlı ikinci tabaka hızının havanın hızına göre düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Bu tabaka için son olarak, 4 numaralı doğrudan gelen dalga oluşur ve diğerlerine göre alıcıya en geç gelen dalga budur.

Burada belirli bir z derinlik değeri için hız hesabı yapılabilir. Hız-derinlik profil eğrisi için $v(z)$ ifadesi Hammon vd. (2003) tarafından aşağıdaki gibi verilir;

$$v(z) = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{c^2} + \frac{1}{4v'(z)^2}}} \quad (3.1)$$

$v'(z)$, şekil 3.4’de görülen ışınlar için çizilecek X-T grafiğinden belirlenen doğru eğimlerinden ya da eğrilerin bir noktasından çizilen teğetler yardımıyla hesaplanan dz/dt değerlerinden yani eğimlerinden hesaplanabilir. Bu hız değerinden yararlanarak yine dielektrik katsayısı ve buradan da su içeriği hesabı yapılır (Huisman vd. 2003).

EM dalga yayılımının temel değişkenleri olan manyetik geçirgenlik, dielektrik sabiti ve elektriksel iletkenlik gibi başlıca parametrelere yani toprağın elektriksel özelliklerine bağlıdır. Sonuçta ulaşılmak istenen ortam hızıdır. Bu hızdan yararlanarak dielektrik katsayısı hesabı yapılır. Dielektrik katsayısı kullanılarak da Topp vd. (1980)’nin geliştirdiği Denklem (3.2)’de verilen deneysel formül ile toprak nemlilik miktarı ya da su içeriği hesaplanabilmektedir.

$$\theta_w = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \epsilon_r - 5.5 \times 10^{-4} \epsilon_r^2 + 4.3 \times 10^{-6} \epsilon_r^3 \quad (3.2)$$

3.2 Karşıt Kuyu Radar Yönteminde 2B Düz Çözüm

Modelleme çalışması ile, bu ışın yollarından yalnızca alıcı antene doğrudan gelen dalgaya ait minimum seyahat zamanı süresi hesaplanır. Hesaplanan minimum zamanlar, daha sonra seyahat zamanı tomografisi hesaplamalarında kullanılmaktadır. Tomografinin amacı, hıza bağlı değişimi elde etmek ya da diğer bir deyişle iki kuyu arasındaki yavaşlığın tersini elde etmektir (Irving 2006).

Modelleme aşamasında hedeflenen, gerçeğe uygun bir arazi çalışmasına ait yapay verinin oluşturulması ve programın çalıştırılarak modelleme sonuçlarının karşılaştırılması ve doğruya ne derece yakın sonuçlar bulunduğu ortaya konulmasıdır.

Bir yer modeli için, vericiden çıkıp ortamda ilerleyerek alıcıya ulaşan EM dalganın seyahat zamanı süresi hesaplanmasında, yaygın olarak kullanılan ve hızlı şekilde problemi çözüme ulaştıran, ilk varış seyahat zamanı hesabı yapan yöntem, 2B Eikonal denklemin sonlu farklar algoritması ile çözümüdür (Vidale 1988, 1990, Podvin ve Lecomte 1991, Sava ve Fomel 2000, Zhao 1996, Hanafy ve Hagrey 2006). Karşıt-kuyu radar verisi modellemesinde, seyahat zamanının hesabının sonlu farklar yöntemi ile çözümü, problemin oldukça hızlı bir şekilde sonuca ulaşmasını sağlar (Zhao 1996, Vidale 1990). Karşıt-Kuyu radarı tomografisinde seyahat zamanı ters çözümü, radar hızlarının belirlenmesi için yapılır. Bu teknik genellikle, seyahat zamanı hesabı için ışın izleme algoritmaları gerektirir. Seyahat zamanlarının doğru hesaplanması ve her bir hücredeki ışın yolları uzunluklarını içeren dizeylerin doğru hesaplanması için seyahat zamanı tomografisi ışın izlemenin önemli bir parçasıdır. Işın izleme yapmadan seyahat zamanı ve ilk varışların tomografisi için Ammon ve Vidale (1993) bir algoritma geliştirilmiştir. Bu da seyahat zamanı hesabı için 2B Eikonal denklemin sonlu farklarla çözümü temeline dayanır. Vidale (1988, 1990), 2B Eikonal denklemin çözümünü sonlu farklar yaklaşımı ile çözülmüştür.

$$\left(\frac{\partial t}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial t}{\partial z} \right) = s^2(x, y) \quad (3.3)$$

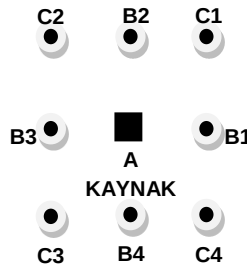
Işın izleme için 2B Eikonal (3.3) denkleminin yinelemeli çözümü seyahat zamanının türevi ile ilişkilendirilir. Bu denklemde s hızın tersi şeklinde tanımlanan yavaşlık; t , s yavaşlık değeri ile ortamda belirli bir kaynak noktasından yayılan EM dalga enerjisinin seyahat zamanı; x ve z ise kartezyen koordinat eksenleridir. Öncelikle yavaşlık modeli hücrelere bölünür. Her bir (i,j) hücresi bir $s(i,j)$ yavaşlık değerine sahip olmalıdır (Şekil 3.3). Her bir hücredeki her bir noktadan geçebilecek ışınların seyahat zamanları hesaplanır.

Seyahat zamanı tomografisi, çoğu durumda ışın izleme yöntemleri ile başarılı ve doğru olarak hesaplanır. Fakat bazı durumlarda, ışın izleme ile hesaplanan seyahat zamanları gerçek ilk varış zamanlarını vermeyebilirler. Bu durum, gölge zonunun olduğu

durumlarda daha da artabilir. Işınlardan emilerek kaybolduğu düşük hız zonları gölge zonları olarak tanımlanırlar. İlk varışların seyahat zamanlarının Eikonal denklemle hesaplanması yöntemi geleneksel ışın izleme yöntemlerinden daha hızlı ve daha doğru çalışan bir yöntemdir (Qin vd. 1992) ve Eikonal denklem, elastik ortam için sismik dalga cephesinin yayılımını tanımlar ve Huygens ilkesine dayanır.

Sonlu farklarla Eikonal denklem çözümü, çok karmaşık olmayan modeller için en uyumlu çözüm yöntemlerindendir. Yöntemin işleyişi, hızlı çalışması ve doğru sonuçlara ulaşılması arasında iyi bir denge kurmuştur. Uygulamalı jeofiziğin birçok alanında, seyahat zamanı hesabı uygulanmaktadır. Seyahat zamanı hesaplanmasında kullanılan tüm yöntemler grid tabanlıdır. Düzenli gridlerle hız ya da yavaşlık modeli oluşturulur. Her bir gridin her bir noktası için seyahat zamanları hesaplanır (Leidenfrost vd. 1999).

Denklem (3.3)' de belirtildiği gibi, sonlu farklarla Eikonal denklemin çözümü ilk olarak Vidale (1988) tarafından geliştirilmiştir. Vidale (1988) yöntemi, hücreler arası hız geçişleri olmayan yumuşak modellere de uygulanabilir. Bu yöntemde, çözüm bölgesi gridler boyunca geliştirilmiştir. Bu durum hücreler arası büyük hız geçişlerine sahip modellerde bizi hatalı sonuçlara götürmektedir. Vidale (1988)'e göre; modellemenin ilk adımında, kaynak noktasını A olarak seçelim. B₁, B₂, B₃ ve B₄ şeklinde tanımlanan 4 nokta için varış zamanları, A kaynak noktası ve B_i noktaları arasındaki ortalama yavaşlık ve aralarındaki h mesafesi kullanılarak hesaplanabilir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 İlk adımda hesaplanacak grid noktalarının (B₁, B₂, B₃, B₄, C₁, C₂, C₃, C₄) ve kaynak noktasının (A) basit gösterimi

Şekil 3.5’de gösterildiği gibi, tanımlanan Bi noktaları A kaynak noktasının üst, alt, sağ ve sol tarafında bulunmaktadır. Daha sonra da 4 tane Ci köşe noktaları tanımlanır. Böylece gridin belirli bir konumundaki kaynak noktasının etrafındaki 8 grid noktası tanımlanmış olur. Öncelikle Bi noktalarına ait seyahat zamanları daha sonra da Ci noktalarına ait seyahat zamanları aşağıda verilen formüllerle hesaplanır.

$$T_{Bi} = h \frac{(s_{Bi} + s_A)}{2} \quad (3.4)$$

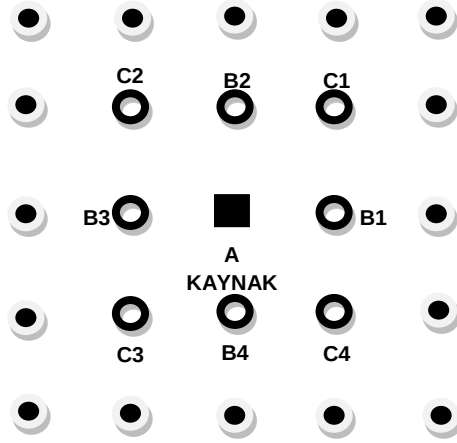
$$T_{Ci} = T_A + \sqrt{2(h\bar{s}_i)^2 - (T_{Bi+1} - T_{Bi})^2}, \quad i = 4, \quad T_{Bi+1} = T_{B1} \quad (3.5)$$

Denklem (3.4)’de h mesafesinin yanında verilen çarpan ifadesi aslında bize ortalama yavaşlık değerini vermektedir. Denklem (3.5)’deki i indisi hem B noktaları hem de C noktaları için sırasıyla 1, 2, 3 ve 4 değerlerini alacaktır. Ancak ifadedeki B noktası için, verilen T_{Bi+1} seyahat zamanı değeri, i indisinin 4 olması halinde T_{B5} ’e karşılık gelmektedir. Yöntemde bu şekilde bir tanımlama olmadığından, T_{B5} ifadesinin sayısal değerinin T_{B1} ’in sayısal değerine eşit olduğu kabulü yapılır. Ci hesabının yapıldığı denklemdeki s_i yavaşlık değeri ise aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\bar{s}_i = \frac{1}{4}(s_A + s_{Ci} + s_{Bi} + s_{Bi+1}), \quad i = 4, \quad s_{Bi+1} = s_{B1} \quad (3.6)$$

Denklem (3.6)’de tanımlanmış olan s_{Bi+1} ifadesi de Denklem (3.5)’deki durum gibidir. Burada da i indisinin 4 olması halinde, s_{Bi+1} yavaşlık değeri s_{B5} ’e karşılık gelmektedir. Yöntem uygulanırken 5. bir nokta olmadığından, s_{B5} ifadesinin sayısal değerinin s_{B1} ’in sayısal değerine eşit olduğu kabulü yapılır.

Modellemenin ikinci adımında ise, Şekil 3.5’te görülen tüm grid noktalarına ait seyahat zamanları hesaplandıktan sonra, Şekil 3.6’da gösterilen içi dolu dairelerle tanımlanmış grid noktalarına ait seyahat zamanlarının hesabı yapılır.



Şekil 3.6 İkinci adımda, daha önce hesaplanmış B_1 , B_2 , B_3 , B_4 , C_1 , C_2 , C_3 , C_4 grid noktaları dışında hesaplanacak grid noktalarının ve kaynak noktasının (A) basit gösterimi

Şekil 3.6 incelendiğinde, içi boş dairelerin, ilk adımda seyahat zamanları hesaplanmış olan B_1 , B_2 , B_3 , B_4 , C_1 , C_2 , C_3 , C_4 grid noktaları olduğu görülmektedir. İçi boş olan daireler ise ikinci adımda seyahat zamanları hesaplanacak olan grid noktalarıdır.

Kenar boyunca tüm grid noktaları için seyahat zamanları hesaplanır ve minimum olan değerle ilişkilendirilir. En küçük seyahat zamanına sahip noktadan başlayarak, sonlu farklar yöntemi kullanılarak, köşedeki noktaya ulaşana dek zaman değerlerinin hesaplanmasına devam edilir. Bu şekilde ağ üzerinde tanımlanan herhangi bir alıcıdaki seyahat zamanları hesaplanmış olur. Ancak, yöntemde dışa doğru genişleyen bir karesel alan boyunca hesaplama yapıldığı için ağ üzerindeki noktalarda doğru seyahat zamanlarının elde edilebilmesi özellikle karmaşık hız yapılı ortamlarda mümkün olamamaktadır.

Burada problem, bu durumun her türlü model için geçerli olmayacağıdır. Büyük hız geçişlerinin olduğu durumlarda yöntem çalışmayabilir. Bu problemle karşılaşmamak için modelde verilen hızlar arasında belirli bir oran olmalıdır. Örneğin; İki tabakalı bir ortamda, 1. tabakanın hızının 2. tabakanın hızına oranının arcsinüsünün, 45° 'den küçük olması gerekmektedir. Bu ifade;

$$\arcsin\left(\frac{v_1}{v_2}\right) = 45^\circ \quad (3.7)$$

ya da

$$\left(\frac{v_1}{v_2}\right) < \frac{\sqrt{2}}{2} \quad (3.8)$$

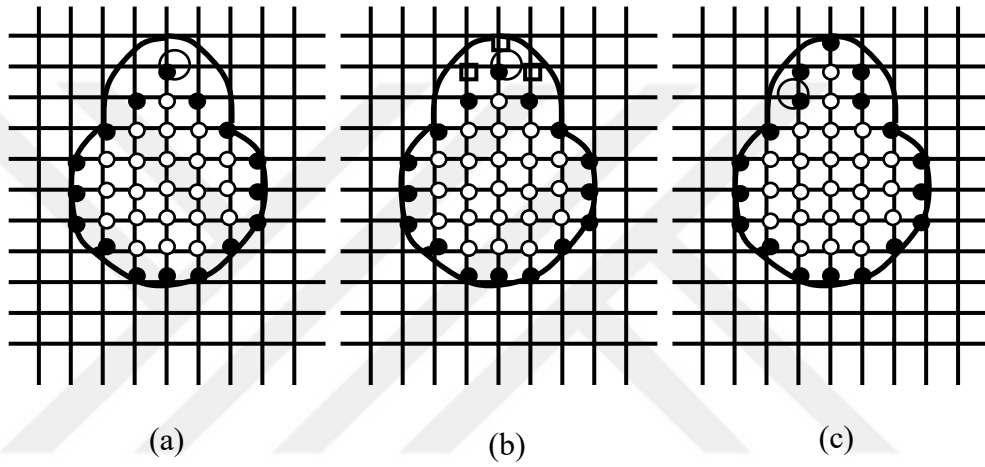
şeklinde verilir.

Büyük hız kontrastının olması ve yöntemin çalışmaması halinde, bu eksikliği gidermek için Qin vd. (1992) tarafından yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Qin vd. (1992) bir adım ileri giderek Genişleyen Dalga Cephesi yöntemini ortaya atmıştır. Yöntemin temeli Genişleyen Kareler Yöntemi ile benzer şekilde Eikonal denklemin sonlu farklar yöntemi ile çözümüne dayanmaktadır. Bu yöntemde, Eikonal denklemin dalga cephesi ile yayılımının daha doğru sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Yöntemin uygulanma aşamaları 2 adımdan oluşmaktadır. İlk adımda, aynı Vidale (1988)'in tanımlamış olduğu, Denklem (3.4) ve (3.5) kullanılarak kaynak noktası etrafındaki 8 grid noktası için seyahat zamanı değerleri hesaplanır. Bu tanımlanan sınırın dışındaki grid noktaları için, hesaplanan 8 tane seyahat zamanı değeri bir sonraki adımda kullanılmak üzere bir dizinde saklanır.

İkinci adımda, dizinde saklanan seyahat zamanı değerlerinden global minimumu veren seyahat zamanı noktası bulunur. Bunun anlamı, kaynaktan çıkarak ilerleyen dalga cephesinin ilk olarak hangi noktaya ulaşacağını göstermesidir. Böylece, hesaplama yapılacak çözüm bölgesi de ilk olarak bu noktadan ilerlemeye başlayacaktır. Bundan sonra, global minimumu veren noktanın yanındaki seyahat zamanları bilinmeyen tüm noktalar için sonlu farklar yöntemi kullanılarak hesaplamalar yapılır. Böylece yeni bir çözüm bölgesi oluşur. Eski çözüm bölgesine ait saklanan seyahat zamanı değerlerinin yerine yeni oluşan çözüm bölgesine ait grid noktalarında hesaplanan yeni seyahat zamanı değerleri yerleştirilerek yine aynı dizinde saklanır. Saklanan değerler kullanılarak aynı işlemler tekrarlanır ve yeni gridler için yeni seyahat zamanları belirlenir. Yani her adımda, seyahat zamanlarının saklandığı dizinin içi sıfırlanarak

yeni hesaplanan değerler yerleştirilir. Her yeni hesaplamada oluşan yeni çözümler bölgesi ile dalga cephesi bir sonraki seyahat zamanının minimum olduğu noktaya ilerlemiş olur. Modeldeki tüm grid noktaları için bu işlem tekrarlanır.

Bu adımda, belirli bir t anındaki yayılımda, çözüm bölgesinde seyahat zamanları hesaplanmış ve hesaplanacak olan grid noktalarının olduğunu varsayalım ve Şekil 4.3'deki gibi bir model düşünelim. Şekil 4.3'de içi dolu ve boş daireler bulunmakta ve aynı zamanda t anındaki dalga cephesi eğrisel bir çizgi olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.7 Dalga cephesi yayılımı yönteminde (düz çizgi dalga cephesini temsil etmektedir), a. Çözüm bölgesi ve içi boş daire içinde içi dolu daire ile gösterilen minimum seyahat zamanı noktası, b. Minimum seyahat zamanı noktasına bitişik olan içi boş karelerle gösterilen komşu noktalara doğru çözüm bölgesinin yayılımı, c. Yeni çözüm bölgesi ve yeni hesaplanan noktalar arasındaki minimum seyahat zamanı noktası

Bir önceki adımda hesaplanmış ve dizinde saklanmış olan seyahat zamanı değerleri Şekil 3.7'de içi dolu dairelerle gösterilmektedir. Minimum seyahat zamanına sahip nokta ise içi boş daire içinde olan içi dolu bir daire ile gösterilmektedir. Minimum seyahat zamanını veren noktaya komşu 3 nokta içi boş kareler şeklinde Şekil 3.7.b'de verilmiştir. Sonlu farklar kullanılarak bu noktalar için seyahat zamanları hesaplanır. Böylece yeni bir çözüm bölgesi oluşur ve yeni hesaplanan seyahat zamanları ile yeni bir dizin oluşturulur. Dizin elemanları içinde minimum seyahat zamanını veren nokta bulunur (Şekil 3.7.c) ve aynı işlem tekrarlanır (Qin vd. 1992).

Global minimumu veren noktanın etrafındaki noktalarda, bilinmeyen seyahat zamanlarının hesaplanması için sonlu farklar yöntemi kullanılmaktadır. Yöntemin uygulamalarında ileri farklar, geri farklar ve merkezi farklar kullanılarak hesaplamalar yapılmaktadır. Bu çalışmada, ileri ve geri fark operatörleri kullanılarak sonlu farklarla 2B Eikonal denklemin çözümü yapılmış ve hesaplama yapılan grid noktalarına ait seyahat zamanları hesaplanmıştır. 2B Eikonal denklem içerisinde yer alan türev operatörleri, ileri ve geri farklarla tanımlanmıştır.

h iki nokta arasındaki mesafe olmak üzere, herhangi bir f fonksiyonunun türevi için tanımlanan ileri ve geri fark operatörleri ile sonlu farklar yaklaşımı;

$$f' = \frac{f_{i+1} - f_i}{2h} \quad (\text{İleri Fark Operatörü}) \quad (3.9)$$

$$f' = \frac{f_i - f_{i-1}}{2h} \quad (\text{Geri Fark Operatörü}) \quad (3.10)$$

şeklinde verilmektedir. 2B Eikonal denklem ifadesinde yer alan T seyahat zamanı değişkeninin x yönünde ve z yönündeki türevlerinin hesaplanmasında tanımlanan bu operatörler kullanılmaktadır.

$$\frac{\partial T(x,z)}{\partial x} = \frac{T_{i+1} - T_i}{2\Delta x} \quad (3.11)$$

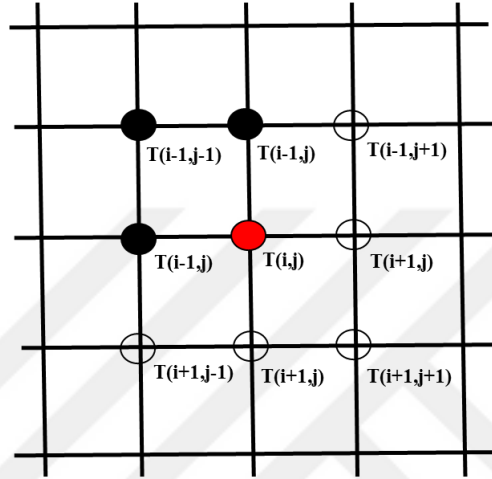
$$\frac{\partial T(x,z)}{\partial x} = \frac{T_i - T_{i-1}}{2\Delta x} \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial T(x,z)}{\partial z} = \frac{T_{j+1} - T_j}{2\Delta z} \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial T(x,z)}{\partial z} = \frac{T_j - T_{j-1}}{2\Delta z} \quad (3.14)$$

Denklem (3.11) ve (3.12)'de x 'e göre türev için sırasıyla ileri ve geri fark operatörleri; Denklem (3.13) ve (3.14)'de ise z 'ye göre türev için sırasıyla ileri ve geri fark operatörleri verilmiştir. Formüllerdeki Δx , x yönünde iki nokta arasındaki mesafe; Δz ise z yönünde iki nokta arasındaki mesafedir.

Formüllerde, x yönü i indisi, z yönü j indisi ile tanımlanmıştır. Belirli bir (x,z) noktası (i,j) indisleri ile tanımlanmış olsun. Herhangi bir (i,j) noktası için $T(i,j)$ seyahat zamanı değerinin ilk adımda hesaplanmış olduğunu ve minimum değere sahip olduğunu düşünelim. Bu aşamadan sonra yapılacak olan, işleyişin son adımında anlatılmış olan 2B Eikonal denklemin sonlu farklarla çözümü ile bilinmeyen seyahat zamanı hesaplamalarıdır.



Şekil 3.8 Son çözüm bölgesine ait seyahat zamanları bilinen noktalar ve bir sonraki adım için seyahat zamanları hesaplanacak olan noktalar

Şekil 3.8’de de gösterildiği gibi, (i,j) konumunun etrafındaki noktalardan farkı en son çözüm bölgesine ait minimum zaman değeri olmasıdır. İçi dolu daireler ile gösterilenler yine bir önceki çözüm bölgesine ait bilinen seyahat zamanlarıdır. İçi boş daireler ise sonlu farklar kullanılarak hesaplanacak olan seyahat zamanlarına ait noktaları göstermektedir. Bilinen $T(i,j)$ seyahat zamanı değeri etrafındaki, seyahat zamanları bilinmeyen noktalar için ilerleme yönüne göre kullanılacak olan ileri ve geri fark operatörleri değişmektedir. Buna göre (i,j) noktası etrafındaki diğer noktalar için kullanılacak operatörler aşağıda sıralandığı gibi olmalıdır.

(i,j) noktası ve bu noktadaki seyahat zamanı değeri biliniyor ise;

- $(i,j+1)$ noktasındaki seyahat zamanı, x ’e göre türev için ileri farklar, z ’ye göre türev için geri fark operatörleri kullanılarak hesaplanır.

- $(i+1,j)$ noktasındaki seyahat zamanı, x 'e göre türev için geri farklar, z 'ye göre türev için ileri fark operatörleri kullanılarak hesaplanır.
- $(i+1,j-1)$ noktasındaki seyahat zamanı, x 'e göre türev için geri farklar, z 'ye göre türev için ileri fark operatörleri kullanılarak hesaplanır.
- $(i-1,j+1)$ noktasındaki seyahat zamanı, x 'e göre türev için ileri farklar, z 'ye göre türev için geri fark operatörleri kullanılarak hesaplanır.
- $(i+1,j+1)$ noktasındaki seyahat zamanı, x 'e göre türev için geri farklar, z 'ye göre türev için ileri fark operatörleri kullanılarak hesaplanır.

(i,j) noktası için 2B Eikonal denklem;

$$\left(\frac{\partial T(i,j)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T(i,j)}{\partial z}\right)^2 = s(i,j)^2 \quad (3.15)$$

şeklinde. Yukarıdaki açıklamalara bir örnek vermek gerekirse; (i,j) noktasındaki $T(i,j)$ minimum değeri bilinen bir durum için, $(i,j+1)$ noktasındaki $T(i,j+1)$ hesabında; x 'e göre türev için ileri farklar, z 'ye göre türev için geri fark operatörleri kullanılır. Buna göre 2B Eikonal denklemde kullanılmak üzere hesaplanması gereken x 'e ve z 'ye göre türevler aşağıdaki gibi bulunur.

$$\frac{\partial T(i,j)}{\partial x} = \frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{2\Delta x} \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial T(i,j)}{\partial z} = \frac{T_{i,j} - T_{i-1,j}}{2\Delta z} \quad (3.17)$$

Denklem (3.16) ve (3.17)'in kareleri alınırsa;

$$\left(\frac{\partial T(i, j)}{\partial x}\right)^2 = \frac{T(i, j+1)^2 + T(i, j)^2 - 2T(i, j+1)T(i, j)}{4\Delta x^2} \quad (3.18)$$

$$\left(\frac{\partial T(i, j)}{\partial z}\right)^2 = \frac{T(i, j)^2 + T(i-1, j)^2 - 2T(i, j)T(i-1, j)}{4\Delta z^2} \quad (3.19)$$

Denklem (3.18) ve (3.19) bulunur. Burada $T(i, j+1)$ hesaplanmak istenen parametre, $T(i, j)$ ve $T(i-1, j)$ daha önceden hesaplanmış ve dizin içerisinde saklanan parametrelerdir. Denklem (3.18) ve (3.19), Denklem (3.15)'de yerlerine konulursa;

$$\frac{T(i, j+1)^2 + T(i, j)^2 - 2T(i, j+1)T(i, j)}{4\Delta x^2} + \frac{T(i, j)^2 + T(i-1, j)^2 - 2T(i, j)T(i-1, j)}{4\Delta z^2} = s(i, j)^2 \quad (3.20)$$

ifadesi elde edilir. $T(i, j+1)$ in hesaplanabilmesi için, Denklem (3.20)'de gerekli işlemler yapılır ve ifade ikinci dereceden bir bilinmeyenli bir hale getirilir.

$$T(i, j+1)^2 - 2T(i, j)T(i, j+1) - \left(\frac{4\Delta x^4 \Delta z^2 s(i, j)^2}{\Delta x^2 \Delta z^2} - \frac{\Delta z^2 \Delta x^2 T(i, j)^2}{\Delta x^2 \Delta z^2} - \frac{\Delta x^4 T(i, j)^2}{\Delta x^2 \Delta z^2} - \frac{\Delta x^4 T(i-1, j)^2}{\Delta x^2 \Delta z^2} + \frac{2\Delta x^4 T(i, j)T(i-1, j)}{\Delta x^2 \Delta z^2} \right) = 0 \quad (3.21)$$

Yukarıda verilen ikinci dereceden bir bilinmeyenli denklemin kökleri diskriminant hesabı ile bulunur. Buna göre a, b ve c katsayıları;

$$a = 1 \quad (3.22)$$

$$b = -2T(i, j) \quad (3.23)$$

$$c = -\left(\frac{4\Delta x^4 \Delta z^2 s(i, j)^2}{\Delta x^2 \Delta z^2} - \frac{\Delta z^2 \Delta x^2 T(i, j)^2}{\Delta x^2 \Delta z^2} - \frac{\Delta x^4 T(i, j)^2}{\Delta x^2 \Delta z^2} - \frac{\Delta x^4 T(i-1, j)^2}{\Delta x^2 \Delta z^2} + \frac{2\Delta x^4 T(i, j)T(i-1, j)}{\Delta x^2 \Delta z^2} \right) \quad (3.24)$$

şeklindedir. a, b ve c değerleri hesaplanarak, oluşturulan bir bilinmeyenli denklemin çözümü yapılarak $(i, j+1)$ noktasına ait $T(i, j+1)$ seyahat zamanı değeri hesaplanmaktadır. Tez içerisinde bu hesaplama ek olarak, 2. dereceden ileri ve geri fark operatörleri kullanılarak fonksiyonun 1. türevleri yani seyahat zamanı değerleri hesaplanarak daha hassas çözümler elde edilmiştir.

h iki nokta arasındaki mesafe olmak üzere, herhangi bir f fonksiyonunun türevi için tanımlanan 2. dereceden iki nokta kullanılarak ileri ve geri fark operatörleri ile sonu farklar yaklaşımı;

$$f' = \frac{4f_{i+1} - 3f_i - f_{i+2}}{2h} \quad \text{İleri Fark Operatörü} \quad (3.25)$$

$$f' = \frac{-4f_{i-1} + 3f_i + f_{i+1}}{2h} \quad \text{Geri Fark Operatörü} \quad (3.26)$$

şeklinde verilmektedir. 2B Eikonal denklem ifadesinde yer alan T seyahat zamanı değişkeninin x yönünde ve z yönündeki türevlerinin hesaplanmasında tanımlanan bu operatörler kullanılmaktadır.

$$\frac{\partial T(x, z)}{\partial x} = \frac{4T_{i+1} - 3T_i - T_{i+2}}{2\Delta x} \quad (3.27)$$

$$\frac{\partial T(x, z)}{\partial x} = \frac{-4T_{i-1} + 3T_i + T_{i+1}}{2\Delta x} \quad (3.28)$$

$$\frac{\partial T(x, z)}{\partial z} = \frac{4T_{i+1} - 3T_i - T_{i+2}}{2\Delta z} \quad (3.29)$$

$$\frac{\partial T(x, z)}{\partial z} = \frac{-4T_{i-1} + 3T_i + T_{i+1}}{2\Delta z} \quad (3.30)$$

Denklem (3.27) ve (3.28)'de x'e göre türev için sırasıyla ileri ve geri fark operatörleri; Denklem (3.29) ve (3.30)'da ise z'ye göre türev için sırasıyla ileri ve geri fark operatörleri verilmiştir. Formüllerdeki Δx , x yönünde iki nokta arasındaki mesafe; Δz ise z yönünde iki nokta arasındaki mesafeyi göstermektedir. Ayrıca, x yönü i indisi, z yönü j indisi ile tanımlanmıştır. Bilinen $T(i, j)$ ve $T(i, j+1)$ seyahat zamanı değerleri

etrafındaki, seyahat zamanları bilinmeyen noktalar için ilerleme yönüne göre ileri ve geri fark operatörleri kullanılarak (i,j) noktası için $T(i,j)$ ve $(i,j+1)$ noktası için $T(i,j+1)$ minimum değerleri bilinen bir durum için, $(i,j+2)$ noktasındaki $T(i,j+2)$ seyahat zamanı değeri hesaplanabilmektedir. Örnek vermek gerekirse; $(i,j+2)$ noktasındaki $T(i,j+2)$ hesabında; x 'e göre türev için ileri farklar, z 'ye göre türev için geri fark operatörleri kullanılır. Buna göre 2B Eikonal denklemde kullanılmak üzere hesaplanması gereken x 'e ve z 'ye göre türevler aşağıdaki gibi bulunur.

$$\frac{\partial T(i, j)}{\partial x} = \frac{4T_{i,j+1} - 3T_{i,j} - T_{i,j+2}}{2\Delta x} \quad (3.31)$$

$$\frac{\partial T(i, j)}{\partial z} = \frac{-4T_{i,j-1} + 3T_{i,j} + T_{i+2,j}}{2\Delta z} \quad (3.32)$$

Denklem (3.31) ve (3.32)'nin kareleri alınırsa;

$$\left(\frac{\partial T(i, j)}{\partial x} \right)^2 = \frac{16T(i, j+1)^2 + 9T(i, j)^2 - 24T(i, j+1)T(i, j) - T(i, j+2)^2 - 4T(i, j+2)T(i, j+1) - 6T(i, j-2)T(i, j)}{4\Delta x^2} \quad (3.33)$$

$$\left(\frac{\partial T(i, j)}{\partial z} \right)^2 = \frac{16T(i, j-1)^2 + 9T(i, j)^2 - 24T(i, j-1)T(i, j) + T(i+1, j)^2 - 8T(i+1, j)T(i, j-1) + 6T(i+1, j)T(i, j)}{4\Delta z^2} \quad (3.34)$$

Denklem (3.33) ve (3.34) bulunur. Burada $T(i,j+2)$ hesaplanmak istenen parametre, $T(i,j+1)$ bir önceki adımda hesaplanmış olan seyahat zamanı değeri, diğer T değerleri ise, $T(i-1,j)$ daha önceden hesaplanmış ve dizin içerisinde saklanan parametrelerdir. Denklem (3.33) ve (3.34), 2B Eikonal denklem ifadesinde yerlerine konulursa;

$$\begin{aligned} & \frac{16T(i, j+1)^2 + 9T(i, j)^2 - 24T(i, j+1)T(i, j) - T(i, j+2)^2 - 4T(i, j+2)T(i, j+1) - 6T(i, j-2)T(i, j)}{4\Delta x^2} \\ & + \frac{16T(i, j-1)^2 + 9T(i, j)^2 - 24T(i, j)T(i, j-1) + T(i+1, j)^2 - 8T(i+1, j)T(i, j-1) + 6T(i+1, j)T(i, j)}{4\Delta z^2} = s(i, j)^2 \end{aligned} \quad (3.35)$$

ifadesi elde edilir. $T(i,j+1)$ in hesaplanabilmesi için, Denklem (3.35)'de gerekli işlemler yapılır ve ifade ikinci dereceden bir bilinmeyenli bir hale getirilir.

$$T(i, j+2)^2 + 4T(i, j+1)T(i, j+2) + \left(\begin{aligned} &4\Delta x^2 \Delta z^2 .s(i, j)^2 - (16\Delta x^2 \Delta z^2 T(i, j+1) + 9\Delta x^2 \Delta z^2 T(i, j)^2 - 24\Delta x^2 \Delta z^2 T(i, j+1)T(i, j)) \\ &- 6\Delta x^2 \Delta z^2 T(i, j-2)T(i, j) + 16\Delta x^2 \Delta z^2 T(i, j-1)^2 + 9\Delta x^2 \Delta z^2 T(i, j)^2 - 24\Delta x^2 \Delta z^2 T(i, j-1)T(i, j) \\ &+ \Delta x^2 \Delta z^2 T(i+1, j)^2 - 8\Delta x^2 \Delta z^2 T(i+1, j)T(i, j-1) + 6\Delta x^2 \Delta z^2 T(i+1, j)T(i, j) \end{aligned} \right) \quad (3.36)$$

Yukarıda verilen ikinci dereceden bir bilinmeyenli denklemin kökleri diskriminant hesabı ile yapılır. Buna göre a, b ve c katsayıları;

$$a = 1 \quad (3.37)$$

$$b = 4T(i, j+1) \quad (3.38)$$

$$c = \left(\begin{aligned} &4\Delta x^2 \Delta z^2 .s(i, j)^2 - (16\Delta x^2 \Delta z^2 T(i, j+1) + 9\Delta x^2 \Delta z^2 T(i, j)^2 - 24\Delta x^2 \Delta z^2 T(i, j+1)T(i, j)) \\ &- 6\Delta x^2 \Delta z^2 T(i, j-2)T(i, j) + 16\Delta x^2 \Delta z^2 T(i, j-1)^2 + 9\Delta x^2 \Delta z^2 T(i, j)^2 - 24\Delta x^2 \Delta z^2 T(i, j-1)T(i, j) \\ &+ \Delta x^2 \Delta z^2 T(i+1, j)^2 - 8\Delta x^2 \Delta z^2 T(i+1, j)T(i, j-1) + 6\Delta x^2 \Delta z^2 T(i+1, j)T(i, j) \end{aligned} \right) \quad (3.39)$$

şeklinde. Bu ifadeler kullanılarak denklemin kökü hesaplanır. Hesaplanan bu değer aslında $T(i, j+2)$ 'ye karşılık gelen seyahat zamanı değeridir. Bu şekilde hesaplama yapılarak yeni çözüm bölgesi elde edilir ve dizinde saklanır. Seyahat zamanları arasından minimum olanı belirlenerek yeniden bilinmeyen noktalar için hesaplamalara benzer şekilde devam edilerek, her bir verici-alıcı konumu için istenilen alıcıya ulaşan ışının seyahat zamanı hesaplanmış olur.

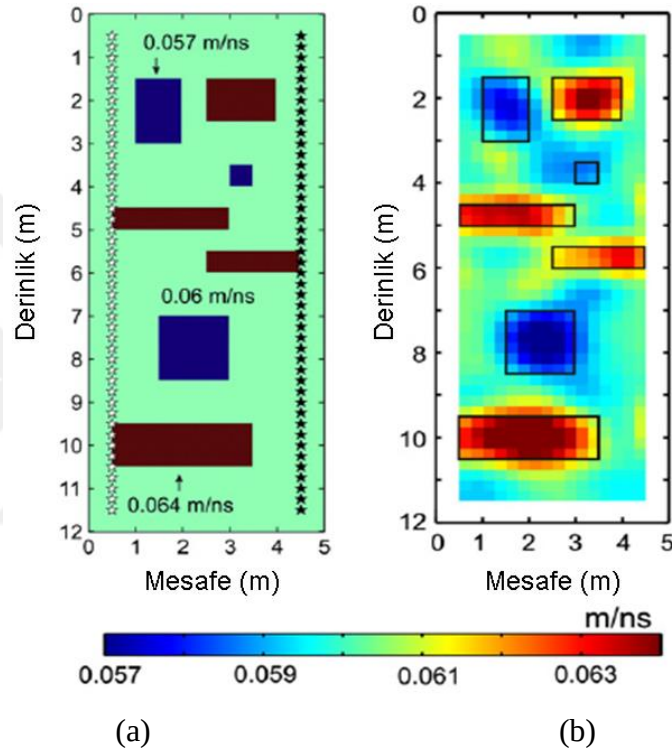
Bu ifadeler kullanılarak denklemin kökü hesaplanır. Hesaplanan bu değer aslında $T(i, j+1)$ 'e karşılık gelen seyahat zamanı değeridir. Bu şekilde hesaplama yapılarak yeni çözüm bölgesi elde edilir ve dizinde saklanır. Seyahat zamanları arasından minimum olanı belirlenerek yeniden bilinmeyen noktalar için hesaplamalara benzer şekilde devam edilerek, her bir verici-alıcı konumu için istenilen alıcıya ulaşan ışının seyahat zamanı hesaplanmış olur.

Model sınırına gelindiğinde bir grid noktası zaman değeri hesaplanırsa, bu değer çözüm bölgesi içinde yeni bir nokta olarak düşünülmemelidir. Hesaplama gridi sınıra ulaştığında hesaplama duracaktır.

Karşıt–Kuyu radar tomografi çalışmalarında, ilk adım basit bir başlangıç modeli üretmektir. Bilinen yer modeli ile deneysel bir tomografi sonucu elde edilir. Modellemede, farklı seyahat zamanı tomografi algoritmalarını test etmek için Eikonal denklemin sonlu farklar yaklaşımını (Vidale, 1990) kullanmışlardır. Eikonal denklem, gridlenmiş bir alandaki hız bilgisine göre ilerleyen dalga'nın ilk varış seyahat zamanlarını hesaplar. Hesaplamalarda kullanılan bilgisayar programı için hazırlanan algoritma, Vidale (1988)'in tanımlamasına göre yapıldığında, bazı hesaplama hataları ile karşılaşılabilir ve bilgisayar programının hesaplama süresi uzun olabilir. Bunun nedeni, her bir adımda çözüm bölgesinin tek bir noktaya doğru ilerlemesi ve çözüm bölgesi sınırı boyunca yeni bir minimum seyahat zamanı hesabının bulunması için araştırma yapılmasıdır. Hesaplama süresini azaltmak için, algoritma farklı bir şekilde geliştirilmiştir (Qin vd., 1992). İşleyişe göre; belirli bir adımdaki hesaplama sırasında çözüm bölgesi belirlenir. Çözüm bölgesi sınırındaki noktalara ait hesaplamalar bir dizine atılır ve burada saklanır. Tüm değerler incelenerek minimum seyahat zamanı belirlenir. Böylece çözüm bölgesi ilk olarak, dizin içinde bulunan minimum seyahat zamanına sahip noktadan ilerlemeye başlar. δt , önceden belirlenmiş bir değer olmak üzere, hesaplanan seyahat zamanının değeri, $t_{min} + \delta t$ değerinden daha büyük olduğu zaman dalga'nın ilerleyişi durdurulur. Böylece yeni bir çözüm bölgesi elde edilmiş olur. Bu işlem modelin tüm noktaları için bu şekilde uygulanmaya devam edilir. Homojen ortamlar için, çözüm bölgesi sınırı daireler şeklindedir. Bu işlemle hesaplama zamanı düşürülebilmektedir.

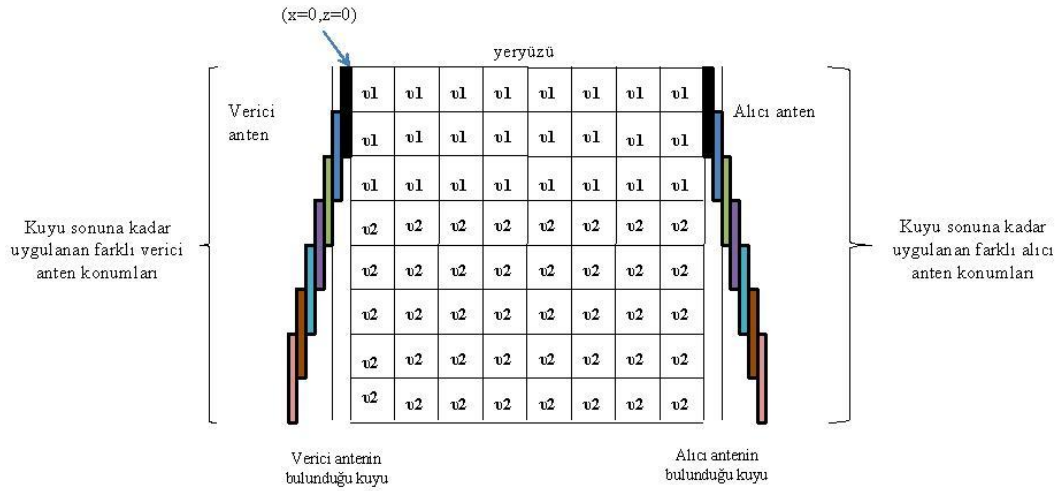
Bu tür bir çalışma için örnek olarak Göktürkler ve Balkaya (2010)'nın karşılıklı iki kuyudaki radar verisi için geliştirdikleri seyahat zamanı tomografisi hesaplamaları sonucu elde ettikleri modeli verebiliriz. Bu çalışmalarında, Göktürkler ve Balkaya (2010), karşılıklı kuyularda toplanan radar verisi için en küçük kareler seyahat zamanı ters çözüm algoritmasını geliştirmişlerdir. Seyahat zamanı hesabı için Eikonal denklem ve sonlu farklar yaklaşımı kullanılmıştır. Çözümler, yinelemeli doğrusal ters çözüm

yaklaşımı ile elde edilmiştir. Modellemedeki seyahat zamanı hesapları, sonlu farklar Eikonal denklem çözümü ile gerçekleştirilmiştir. Algoritmalarında Huygen's prensibinin sonlu farklar yöntemi ile çözümü kullanılmıştır. Uygulanan modellerden biri; Göktürkler ve Baklaya (2010)'nın makalelerinde vermiş oldukları Model 2'dir. Modeldeki yapıların hızları 0.057 ile 0.064 m/ns arasında değişmektedir. 45'er noktada alıcı ve verici için veriler toplanmıştır. 2025 tane seyahat zamanı hesabı yapılmıştır. Sonlu farklar modelinde grid aralığı 0.025m, zaman aralığı ise 0.2 ns'dir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9 a. Üretilen test modeli, b. En küçük kareler yöntemi kullanılarak elde edilen tomogram (Göktürkler ve Balkaya, 2010)

Şekil 3.9.a'daki test modeli düşük ve yüksek hızların olduğu karmaşık bir modeldir. Şekil 3.9.b'de verilen tomografi sonucu en küçük kareler ters çözümü ile elde edilmiştir. Seyahat zamanı tomogramı 10 yinleme sonucunda hesaplanarak çizdirilmiş ve giriş modeline uyan bir sonuç elde edilmiştir.



Şekil 3.10 Basit yatay tabakalı hız modeli ve kaydırılan anten çifti konumları

Modelleme çalışmaları kapsamında algoritmada, oluşturulan modele ait hız bilgisi bir dosyaya yazdırılır. Modelde her bir gride bir hız ataması yapılır (Şekil 4.6). Bu işlem aynı zamanda, hızların ait oldukları gridin köşe noktalarına ait hızlar olduklarını göstermektedir. Hazırlanan dosyada, her bir köşe noktasına ait hız değerleri bulunmaktadır. Modelleme çalışması için tez kapsamında yazılan koda ilişkin akış diyagramı şekil 3.11’de gösterildiği gibi ve algoritması da aşağıda açıklandığı gibidir.

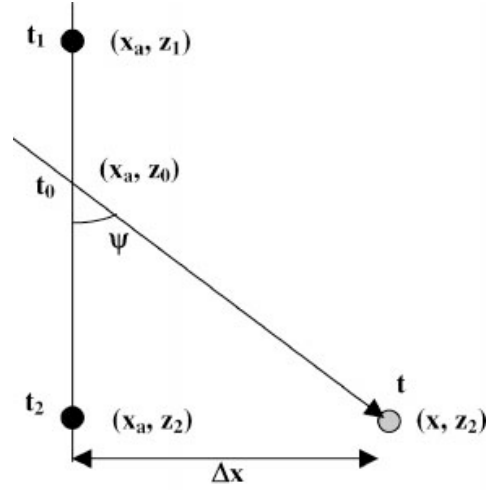
- Modelde tanımlanan tüm grid noktaları için seyahat zamanları başlangıçta sıfıra eşitlenir.
- Yer modelinin tanımlandığı hız değerlerini içeren dosya okutulur.
- Hız değerleri her bir grid noktası için yavaşlığa dönüştürülür.
- Yatay ve düşey yöndeki grid uzunlukları h_x ve h_z olarak tanımlanan mesafe değişkenlerine atanır ve bir gridin bir köşe noktasından diğer bir köşe noktasına gidecek olan ışının alacağı yol için $h_x z$ mesafesi olarak tanımlanan parametre hesaplanır.
- A kaynak noktası olarak tanımlanan grid noktasından başlayarak, bu grid noktasının üst-alt-sağ-sol tarafındaki grid noktalarına ait seyahat zamanları hesaplanır. Daha sonra da, A noktasının üst sağ-sol köşesinde ve alt sağ-sol köşesinde bulunan grid noktalarına ait seyahat zamanları hesaplanır.
- Hesaplanan seyahat zamanı değerleri bir dosyaya yazdırılır.

- Dosyaya yazdırılan seyahat zamanı değerlerinin her biri birbiri ile karşılaştırılır. Eğer bütün değerler birbirine eşit ise, seyahat zamanları hesaplanan grid noktalarının konum olarak en büyük x değerlerine sahip tüm sütunları ve konum olarak en büyük z değerlerine sahip tüm satırlarına ait grid noktalarının kaynak gibi davranacağı kabul edilerek Adım 5'e dönülür ve her biri için aynı yol izlenerek, yeniden seyahat zamanları hesaplanır.
- Eğer hesaplanan seyahat zamanları birbirine eşit değilse ve içlerinden bir tanesi minimum seyahat zamanı değerine sahipse, bu durum çözüm bölgesinin değişeceğini gösterir. Bu aşamadan sonra minimum seyahat zamanı değeri kullanılarak etrafındaki grid noktaları için sonlu farklar yöntemi ile Eikonal denklem çözümü hesabı yapılır.
- Hesaplanan yeni seyahat zamanı değerleri dosyaya yazdırılır.
- Dosyaya yazdırılan seyahat zamanları birbirleri ile karşılaştırılarak yeniden bir minimum seyahat zamanı bulunmaya çalışılır.
- Bulunan en küçük seyahat zamanı değeri için x ve z koordinat değerlerinin kontrolü yapılır.
- Eğer modelin son grid noktasına ulaşılmışsa Adım 14'e gidilir ve daha sonra algoritma sonlandırılır.
- Eğer modelin son grid noktasına ulaşılmamışsa tekrar Adım 8'e gidilerek belirlenen minimum seyahat zamanı değerine ait noktanın etrafındaki noktalar için seyahat zamanı hesabına ve minimum seyahat zamanının belirlenmesi işlemine devam edilir.
- Hesaplanan seyahat zamanı değerlerinin tümü dosyaya yazdırılarak çizdirilmek üzere saklanır.
- Algoritma durdurulur.

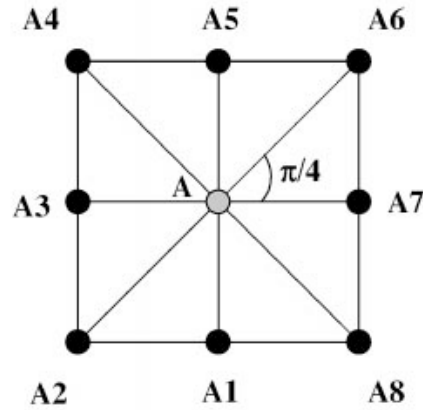
3.3 Fermat Prensibi Tabanlı Doğrudan Seyahat Zamanı Hesaplama Yöntemi

Basit jeolojik modeller için uygulanan Eikonal çözümler oldukça hızlı sonuç veren yöntemlerdir. Ancak bu algoritmaların çoğu çok yüksek hız kontrastlarının olduğu ortamlarda doğru seyahat zamanı değerlerinin hesaplanmasında yanıltıcı olurlar. Işın tabanlı ve sonlu farklar yöntemleri ile yapılan çözümlerde karşılaşılan bu tür problemler nedeni ile seyahat zamanının doğrudan hesaplanması yöntemi gittikçe popüler olmaya başlamıştır. Bunun üzerine Schneider vd. (1992) izotropik bir ortamda seyahat zamanı hesabı için Fermat Prensibine dayanan bir yöntem önermiştir. Gridin her bir düğüm noktasındaki seyahat zamanı 8 kez hesaplanır ve minimum zaman değeri hafızada tutulur. Yöntem sadece ilk varışları hesaplayan ve benzer yöntemlere göre oldukça doğru sonuçlar veren bir yöntemdir.

Schneider vd. (1992) seyahat zamanı hesabı için basit matematik tabanlı bir yöntem kullanmış ve hız yumuşatma ile ilgili herhangi bir yaklaşımda bulunmamıştır. Seyahat zamanı hesabı, en yakın kaynak noktasına ait başlangıç değerlerinin hesaplanması ile başlar. Burada hesabı yapılacak olan düğüm noktasının öncesindeki iki komşu düğüm noktasına ait seyahat zamanı değerleri kullanılarak her bir düğüm noktası için yeni seyahat zamanları hesaplanır. Her bir grid noktası için yapılan 8 tane hesaplama sona minimum zaman değeri o gride atanmaktadır. Yani, üçüncü bir grid noktasındaki seyahat zamanı hesabı için t_1 ve t_2 gibi daha önce hesaplanmış ve bilinen iki seyahat zamanı değeri kullanılır. Burada belirli açılarda gelen ışınlar da dikkate alınmıştır (Şekil 3.12.a). Bu nedenle hesap yapılacak noktanın düşey ve yatay yöndeki hesaplamalarının dışında köşe noktalarına ait seyahat zamanı değerleri de kullanılmaktadır (Şekil 3.12.b).



(a)



(b)

Şekil 3.12 a. Basit seyahat zamanı hesabı, b. Yayılan dalga için olabilecek açılar

Şekil 3.12.a'da noktalarındaki seyahat zamanları aşağıdaki formüllerle tanımlanmıştır (Schneider vd. 1992, Faria ve Stoffa 1994).

$$t_1 = s_a (x_a^2 + z_1^2)^{1/2} \quad (3.40)$$

$$t_2 = s_a (x_a^2 + z_2^2)^{1/2} \quad (3.41)$$

Burada s_a , kaynaktan (x_a, z_1) ve (x_a, z_2) noktalarına ilerleyen dalganın ortalama yavaşlık değeridir. Bu iki denklemden yararlanarak s_a şöyle tanımlanmaktadır;

$$s_a^2 = \frac{t_2^2 - t_1^2}{z_2^2 - z_1^2} = \omega \quad (3.41)$$

Yukarıdaki denklemde yer alan ω ortalama yavaşlığın karesine karşılık gelmektedir. (x_a, z_0) noktası için seyahat zamanı değeri;

$$t_0^2 = t_1^2 + \omega(z_0^2 - z_1^2) \quad (3.43)$$

denklemini ile hesaplanmaktadır. Aynı denklem Δx grid aralığı ve Ψ açısı terimleri cinsinden yazılırsa;

$$t_0^2 = t_1^2 + \omega((z_2 \pm \Delta x \cot \Psi)^2 - z_1^2) \quad (3.44)$$

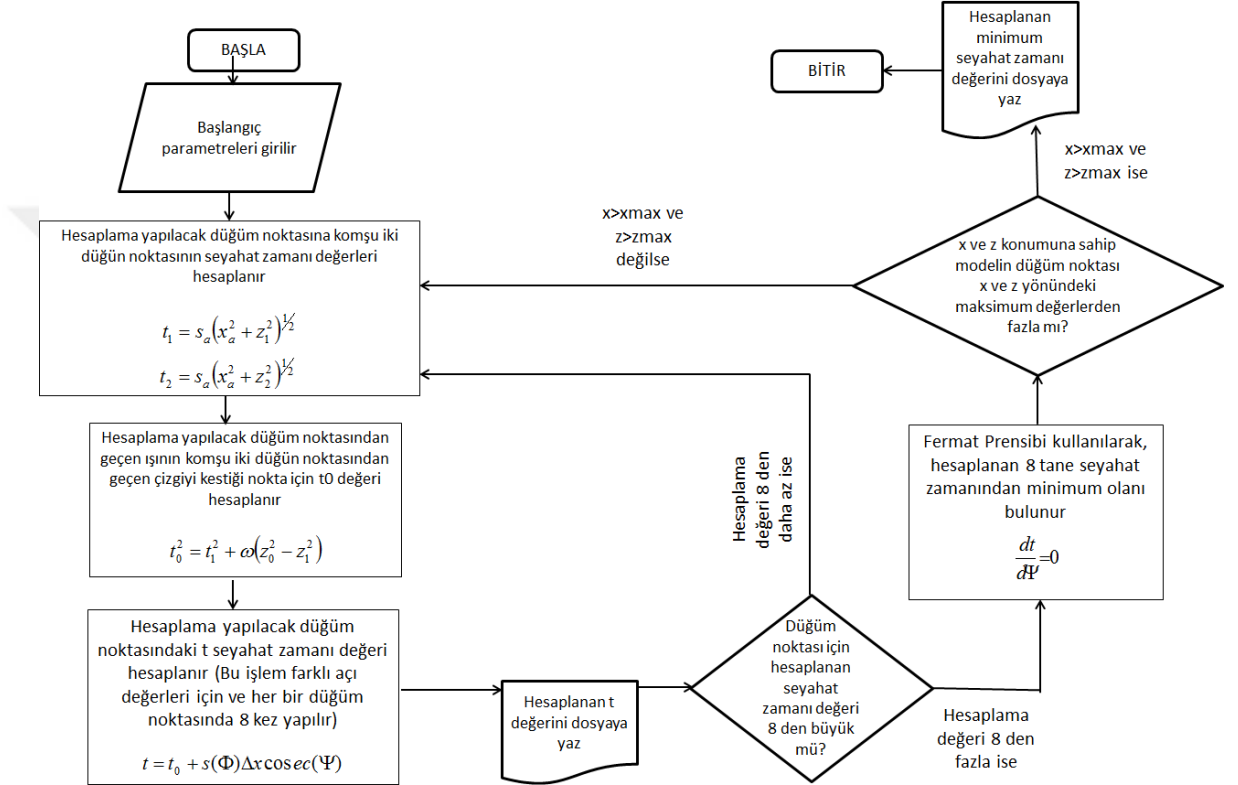
denklemini elde edilir. $z_2 > z_1$ olması halinde (3.44) denklemindeki işaret (-), $z_2 < z_1$ olması halinde ise işaret (+) olarak kullanılmalıdır. Kaynaktan (x, z_2) noktasına toplam seyahat zamanı;

$$t = t_0 + s(\Phi) \Delta x \cos ec(\Psi) \quad (3.45)$$

denklemini ile hesaplanır. Bu denklemdeki Ψ iki komşu grid noktasından geçen çizgi ile ışın arasındaki açı; Φ düşey eksen ile iki komşu grid noktasından geçen çizgi arasındaki açı (grup açısı); Δx yatay grid aralığı; t_0 bilinen seyahat zamanı değeri ve $s(\Phi)$ yavaşlık değeridir. (x, z_2) grid noktasındaki seyahat zamanı (5.6) denkleminin Ψ açısına bağlı olarak minimize edilmesi ile hesaplanır. Bir grid noktasına ait muhtemel ışın yolları için hesaplanan 8 farklı seyahat zamanı değerinin minimumu, kaynaktan o grid noktasına kadar gelen ışının minimum seyahat zamanını verir. (3.45) denklemini Fermat Prensipli kullanılarak minimum seyahat zamanı hesabı yapan denklemdir. Minimum seyahat zamanını hesaplamak için t 'nin Ψ açısına göre türevini sıfıra eşitleyerek uygun Ψ açısı hesaplanır.

$$\frac{dt}{d\Psi} = 0 \quad (3.46)$$

t değerini ve t'nin türevini hesaplamak için belirli bir Φ açısına ait yavaşlık değerine dolayısıyla da grup hızına ihtiyaç vardır. Ψ açısı birbirinden farklı her bir hesaplama için 0° ile 90° arasında değişen değerler almaktadır. Φ 'nin alabileceği 8 tane değer vardır. Φ ve Ψ açıları birbirlerinden farklıdır. $\Phi = k(\pi/4) + \Psi$ formülü ile; belirlenen Ψ değerlerine karşılık gelen Φ değerleri bulunur. Buradaki k değeri ise 0 ile 7 arasındadır.



Şekil 3.13 Fermat prensibine göre gerçekleştirilen işleme ait programın akış şeması

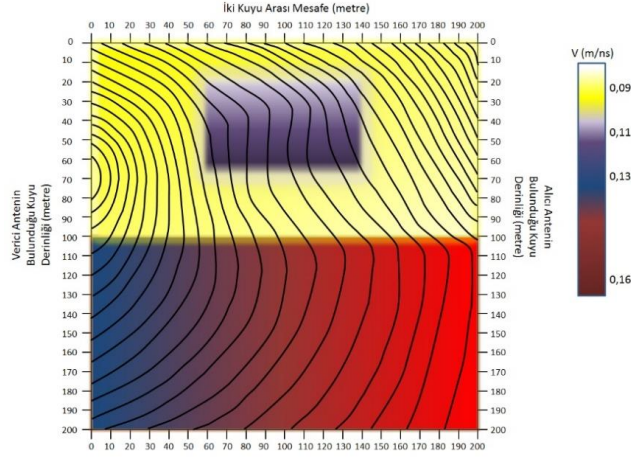
Algoritmada, kaynak sinyali olarak Blackman-Harris pencere fonksiyonunun birinci türevi ve sınır koşulu olarak CPML kullanılmaktadır. Blackman-Harris pencere fonksiyonu;

$$f(t) = \begin{cases} \sum_{n=0}^3 a_n \cos\left(\frac{2n\pi t}{T}\right), & \text{eğer } 0 < t < T \\ 0, & \text{diğer koşullarda} \end{cases} \quad (3.47)$$

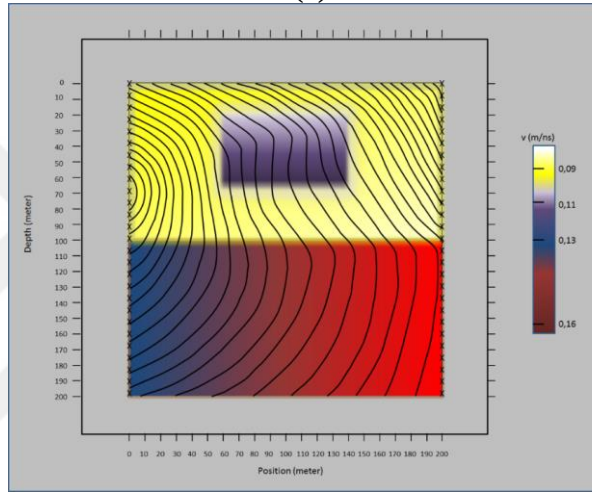
şeklinde tanımlanmaktadır. Burada, a_n katsayılar ($a_0=0,35322222$, $a_1=-0,488$, $a_2=0,145$, $a_3=-0,01022222$), t sayısal modellemenin kayıt süresi, T kaynak fonksiyonunun süresi ($T = 1,55/f_c$) ve f_c ise merkez frekans olup, şekil 3.13’de verilen modelleme için merkez frekansı 250 MHz seçilmiştir.

Şekil 3.13’de verilen algoritma kapsamında yazılan kod bir yapay veri üzerinde çalıştırılmış ve sonuçlar irdelenmiştir. Şekil 3.14’de örnek olarak verilen bu yapay veride, iki kuyu arasındaki mesafe 200 m olarak seçilmiş, kuyu içerisinde de her 0,5 m bir ölçü alındığı kabul edilmiştir. Verilen örnekte verici anten 70 m derinde iken alıcı anten yüzeyde kabul edilerek bu durum için seyahat zamanı değerleri hesaplanmıştır. Modelde ilk ortam 0,09 m/ns hızına sahip ve 100 m kalınlığında bir tabakaya karşılık gelmektedir. Ortam içine hızı 0.11 m/ns olan dikdörtgen şeklide, boyu 80 m, eni 45 m ve yüzeyden 20 m derinde olan gömülü bir nesne yerleştirilmiştir. z yönünde derine doğru gidilirken 100 m’den sonra 200 m’ye kadar olan kısımda ikinci bir ortama girilmektedir. Bu ikinci ortamda; z değerinin 100 m olduğu durum için, x değerinin 0 m’den 60 m’ye kadar değiştiği kısımda 0.13 m/ns hıza sahip başka bir tabaka ve z değerinin 100 m olduğu durum için, x değerinin 60 m’den 200 m’ye kadar değiştiği kısımda ise 0.16 m/ns hıza sahip başka bir tabaka bulunmaktadır. Bu karmaşık model için modelleme programı çalıştırılmış ve elde edilen seyahat zamanı değerleri kontur haritası olarak çizdirilmiştir (Şekil 3.14.a). Aynı model Giroux vd. (2007)’nin geliştirdiği Matlab tabanlı açık kodlu olarak yayınladığı programda da çalıştırılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Giroux vd. (2007)’nin geliştirdiği programdan elde edilen sonuç şekil 3.14.b’de yer almakta olup, her iki kodla elde edilen sonuçlar uyum göstermektedir.

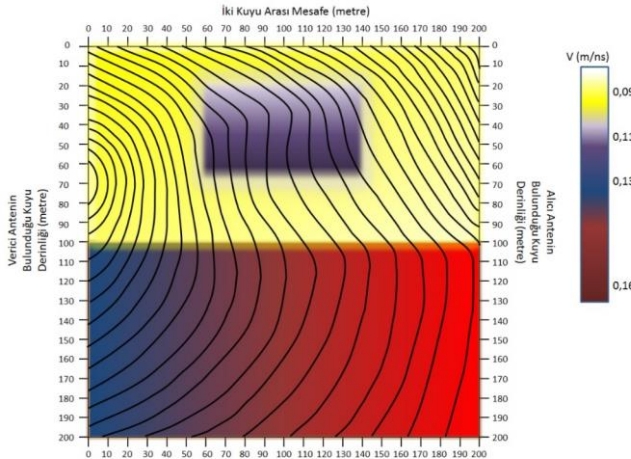
Ayrıca, Fermat Prensibi tabanlı doğrudan seyahat zamanı hesaplama yöntemi ile elde edilen seyahat zamanı değerleri de hesaplanmış ve bu hesaplama sonucu çizdirilen kontur haritaları diğer sonuçlarla karşılaştırılmış ve yine sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür. Fermat Prensibi tabanlı doğrudan seyahat zamanı hesaplama yöntemi ile elde edilen sonuç ise Şekil 3.14.c’de gösterilmektedir.



(a)



(b)



(c)

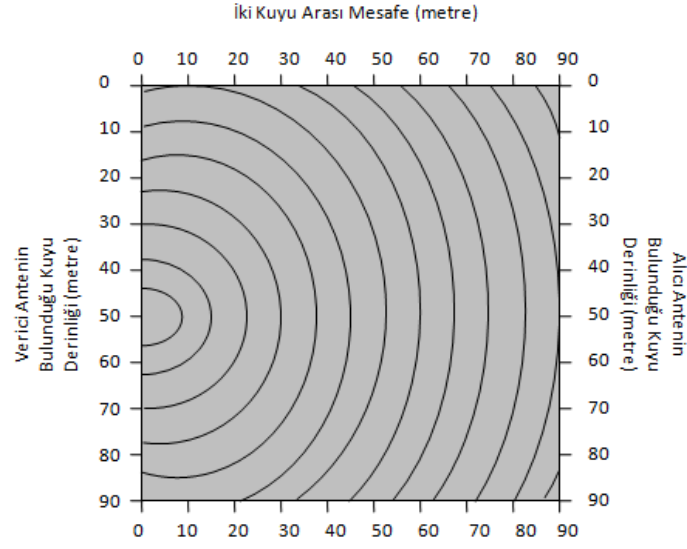
Şekil 3.14. a. Yüksek hızlı bir ortam içinde gömülü olan düşük hızlı bir cismin bulunduğu yer modeli için modelleme ile elde edilen seyahat zamanı kontur haritası, b. Giroux vd. (2007)'nin geliştirdiği Matlab tabanlı program sonucu, c. Fermat Prensibi tabanlı doğrudan seyahat zamanı hesaplama yöntemi ile elde edilen seyahat zamanı kontur haritası

3.4 Düz Çözüm Algoritmasının Test Edilmesi

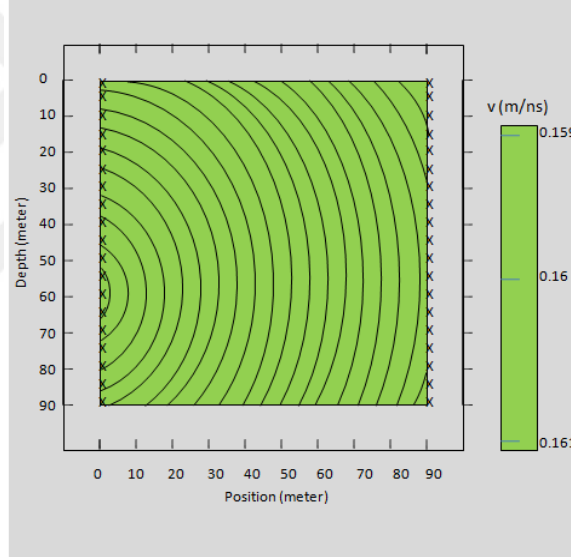
Modelleme uygulamaları için farklı yapay veriler oluşturulmuş ve yazılan algoritma ile farklı modeller için elde edilen seyahat zamanı kontur haritaları çizdirilmiştir. Modellerin tümünde yatay ve düşey yöndeki dx ve dz mesafeleri 0,5 m olacak şekilde eşit alınmıştır. İki kuyu arasındaki mesafe ve model derinliği 80 m olacak şekilde model boyutları 160x160 olarak seçilmiştir. Modelin 160x160 olan boyutlarına ek olarak, modelin sol, sağ ve alt kısımlarına modelin kenarlarında oluşan salınımları gidermek amacıyla 20'şer tane daha hücre eklenmiştir.

Tez kapsamında yazılan modelleme programının çalıştırılması sonucunda elde edilen kontur haritaları, Giroux vd. (2007) tarafından geliştirilen “bh_tomo-a Matlab borehole georadar 2D tomography package” adlı programın modelleme uygulamasından elde edilen seyahat zamanı değerleri sonucunda çizdirilen kontur haritaları ile karşılaştırılmış ve sonuçların uyum içinde olduğu görülmüştür. Bu kapsamda örnek uygulamalar yapılarak sonuçlar irdelenmiştir.

İlk olarak basit bir model olan tek düze bir hız değerine sahip (EM dalga hızı 0.16 m/ns) homojen yer modeli için modelleme programı çalıştırılmış ve elde edilen seyahat zamanı değerleri kontur haritası olarak çizdirilmiştir (Şekil 3.15.a). Homojen yer modeli seçilmesinin nedeni problemin analitik çözümünün var olmasıdır. Zaman, yolun hıza oranı olduğundan hesaplama kolaylıkla yapılabilmektedir. Algoritmada giriş modeli olarak okutulan dosyada homojen ortamın hızı 0,16 m/ns olarak yazılmıştır. Giroux vd. (2007)'nin geliştirdiği Matlab tabanlı programında elde edilen sonuç ise Şekil 3.15.b'de gösterilmektedir.



(a)

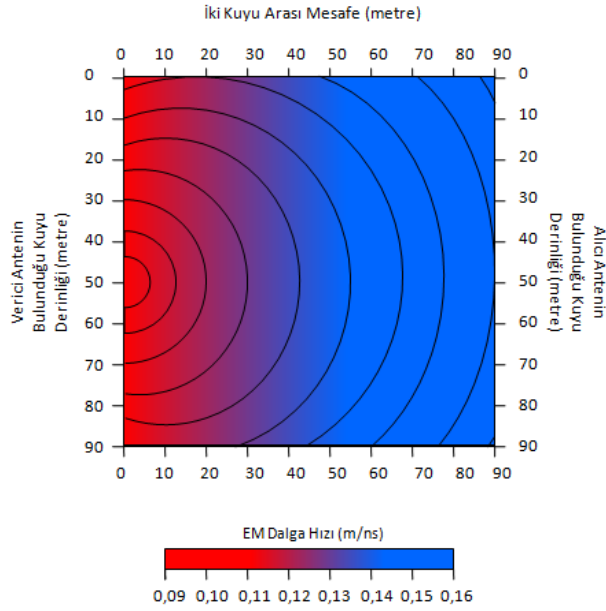


(b)

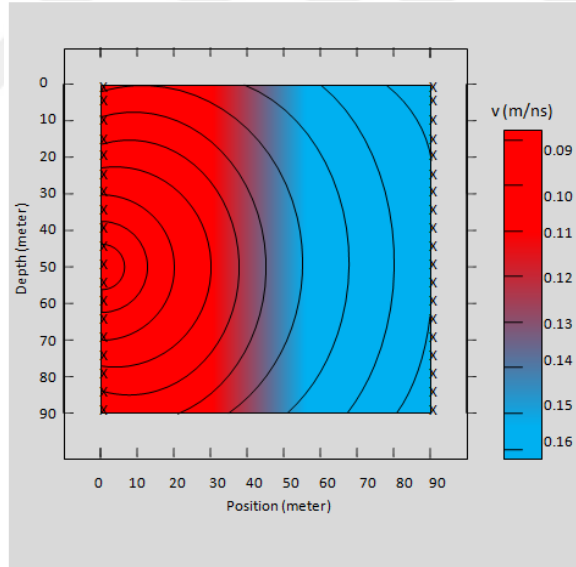
Şekil 3.15 a. Homojen ortam için modelleme ile elde edilen seyahat zamanı kontur haritası, b. Giroux vd. (2007)'nin geliştirdiği Matlab tabanlı program sonucu

İkinci olarak düşey fay modeli için modelleme programı çalıştırılmış ve elde edilen seyahat zamanı değerleri kontur haritası olarak çizdirilmiştir (Şekil 3.16.a). Bu yer modeli için, algoritmaya girilen ilk modelde fayın sol tarafındaki tabakanın hızı 0,09 m/ns, sağ tarafındaki tabakanın hızı 0,16 m/ns'dir. Giroux vd. (2007)'nin geliştirdiği Matlab tabanlı programında elde edilen sonuç ise Şekil 3.16.b'de gösterilmektedir. Her

iki algoritma sonucu elde edilen sonuçlar geliştirilen algoritmanın doğruluğunun test edilmesini sağlamıştır.



(a)



(b)

Şekil 3.16 a. Düşey fay modeli için modelleme ile elde edilen seyahat zamanı kontur haritası, b. Giroux vd. (2007)'nin geliştirdiği Matlab tabanlı program sonucu

Modelleme kapsamında yapılan benzer uygulama örnekleri EK 1 Modelleme Uygulamaları başlığı altında verilmektedir.

4. KARŞIT KUYU RADAR VERİLERİNİN TERS ÇÖZÜMÜ

Karşit kuyu veya yüzey-kuyu arasında ölçülen radar verilerinin 2B ve üç-boyutlu ters çözümü, “tomografi” olarak da isimlendirilmektedir (Cai ve McMechan 1995). Kuyu içi radar tomogografisi konusunda geliştirilen birçok algoritma vardır (Giroux vd. 2007, Irving 2006)

Literatürdeki kuyu radarı ile ilgili yapılan tomografi çalışmalarında, genellikle SEKK ters çözüm algoritması kullanılmaktadır (Farmani vd. 2008, Clement ve Knoll 2000, 2006). Literatürde, kuyu-kuyu radar verilerinin OCCAM ters çözümü yöntemi ile 2B tomografisini yapan bir algoritma bulunmamaktadır. Bu tez çalışmasında SEKK ve OCCAM ters çözüm tekniklerini kullanan yeni bir karşit kuyu radar verilerinin 2B tomografisini yapan bir algoritma geliştirilmiştir. Ayrıca geliştirilen algortimada, elde edilen 2B hız modeli kullanılarak, dielektrik sabiti değişimi ile ilişkilendirilmiş bağıntılar yardımıyla, su içeriği, su doygunluğu ve gözenekliliği gibi parametreler de ortaya konulmaya çalışılacaktır.

4.1 Sönümlü En Küçük Kareler Yöntemi

Jeofizik yöntemlerin çoğunda olduğu gibi, yer radarı yönteminde ters çözüm problemi doğrusal değildir (non-linear). Ayrıca, jeofizik yöntemlerin hepsinde ters çözüm problemi kötü koşulludur (ill-conditioned). Yani, ters çözüm sonucu elde edilen çözüm tek değildir (nonunique), durağan değildir (unstable) ve her zaman bir çözüm bulmak mümkün olmayabilir (existence). Dolayısıyla, doğrusal olmayan ve kötü koşullu ters çözümde SEKK yöntemi yanında OCCAM ve düzgünleştiricili ters çözüm (regularized inversion) teknikleri de kullanılmaktadır.

Doğrusal olmayan problemlerin SEKK ters çözümünde, düz çözüm operatörü doğrusallaştırılarak yinelemeli bir çözüm bulunur. Veri sayısı nd , parametre sayısı, np için $\Delta \mathbf{d}$, $(nd \times 1)$ boyutlu veri farkları vektörü, $\Delta \mathbf{m}$, $(np \times 1)$ boyutlu model düzeltme vektörü vektörü, $\mathbf{A}$, $(nd \times np)$ boyutlu kısmi türevler dizisi (Jacobian matrix) ve λ , ise

sönüm faktörü olsun. Bu durumda, SEKK çözümünde her yinelemede aşağıdaki dizey denklemi çözülür;

$$\Delta \mathbf{m} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{A}^T \Delta \mathbf{d} \quad (4.1)$$

Jeofizik verilerin ters çözümünde, ölçülen verilerin “standart sapması (sd)” kullanılarak elde edilen “veri ağırlık dizeyi ($\mathbf{W}_d$)” kullanılır. Bu durumda ağırlıklandırılmış SEKK çözümü aşağıdaki gibi verilir.

$$\Delta \mathbf{m} = (\mathbf{A}^T \mathbf{W}_d^T \mathbf{W}_d \mathbf{A} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{W}_d^T \mathbf{W}_d \Delta \mathbf{d} \quad (4.2)$$

Elde edilen çözüm her yinelemede model vektörüne ($\mathbf{m}(\text{np},1)$) aşağıdaki gibi eklenir;

$$\mathbf{m}_i = \mathbf{m}_{i-1} + \Delta \mathbf{m} \quad (4.3)$$

Yukardaki denklemde “i” yineleme sayısıdır. Her yinelemede aşağıdaki gibi hesaplanan karekök hata’ nın bir önceki yinelemeye göre azalması beklenir.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{d=1}^{nd} (\mathbf{W}_d \Delta \mathbf{d})^2}{nd}} \quad (4.4)$$

RMS’ in küçümemesi durumunda yienleme işlemine son verilir. Çalışmada, RMS değerinin gürültü ile çakışmaması için 1’ den küçük olması durumunda yinelemeye son verilir.

4.2 OCCAM Ters Çözümü

Ters çözüm problemlerinde MISFIT fonsiyoneli çözümünde diğer önerilen yöntem “OCCAM” olarak da bilinen “Yuvarlatılmış Ters Çözüm (Smoothing inversion)” yöntemidir. Bu yöntemi ilk öneren ve 1-B MT ile doğru akım öz direnç verilerine uygulayan Constable vd. (1987) olmuştur. Yöntem, elektrik ve elektromanyetik verilerin 2B ve 3B ters çözümünde çeşitli araştırmacılar tarafından kullanılmıştır

(Sasaki 1989, deGroot ve Constable 1990). Yer radarı yönteminde, karşıt kuyu radar verilerinin ters çözümünde ise ilk kez bu çalışmada kullanılmıştır.

OCCAM ters çözümünde her yinelemede aşağıdaki dizey denklemi çözülür.

$$\Delta \mathbf{m} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \lambda \mathbf{C}^T \mathbf{C})^{-1} \mathbf{A}^T \Delta \mathbf{d} \quad (4.5)$$

SEKK çözümünden farklı olarak burada I birim dizey yerine, burada (np,np) boyutlu **C** yuvarlatıcı dizeyi kullanılmıştır. Bu dizeyin elemanları aşağıdaki gibi verilebilir (Candansayar, 2002). Herhangi bir model parametresi, m_j ve bunun sol, sağ, üst ve altındaki dört blok parametreleri ise sırasıyla m_{sol} , $m_{sağ}$, $m_{üst}$ ve m_{alt} olsun. Bu m_j parametresi etrafındaki hız parametresi değişimi aşağıdaki gibi verilebilir:

$$\tilde{m}_j = \alpha_j (\partial m_j^{sol} + \partial m_j^{sağ} - 4\partial m_j + \partial m_j^{üst} + \partial m_j^{alt}) \quad (4.6)$$

Burada, α_j gradyen çarpanıdır (gradien amplifying factor) ve ampirik olarak hesaplanır. Parantez içindeki terim ise 2B Laplacian' ın ayrık 5-noktalı yaklaşımıdır ve sürekli fonksiyonun kabalık (roughness) özelliğini göstermektedir (Candansayar, 2002). Denklem dizey formunda aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\partial \tilde{\mathbf{m}} = \mathbf{C} \partial \mathbf{m} . \quad (4.7)$$

Burada **yuvarlatıcı dizeyi (C)** elemanları, α_j , 4α veya 0 olan kare dizeydir ve “roughening operator” olarak bilinir. C dizeyi ikinci dereceden türev operatörü (2-B Laplacian) olmasına karşın, operatör değerleri bloğun düşey ve yatay yöndeki boyutlarına bağlı olarak ölçeklenmiştir (Candansayar 2002). M adet bloktan oluşan bir model için C dizeyinin boyutu (np,np), dx ve dz i’inci bloğun x ve z yönündeki boyutları olmak üzere, c elemanı hesabı:

$$c_{i1} = c_{i4} = \frac{dx}{2(dx+dz)} \quad (4.8)$$

ve

$$c_{i2} = c_{i3} = \frac{dx}{2(dx+dz)} \quad (4.9)$$

şeklinde verilmektedir. Ana köşegen değerleri ise her satırda sıfırdan farklı değerlerin toplamının eksi işaretlisine eşittir ve

$$c_{0i} = -(c_{i1} + c_{i2} + c_{i3} + c_{i4}) \quad (4.10)$$

bu şekilde hesaplanmıştır.

4.3 Kısmi Türevler Dizeyinin Hesaplanması

Kısmi türevler dizeyi, kuramsal verinin model parametrelerindeki değişime duyarlılığının bir ölçüsüdür. Doğru bilgiye ulaşılmasında oldukça önemli olan bu dizeyin hesaplanması, ters çözüm algoritmalarının en önemli ve zaman alan adımlarından birisidir.

Sabit yavaşlığa (1/hız) sahip hücrelerden oluşan, nd adet gözlem noktası ve np adet model parametresi içeren bir tomografik ters çözüm probleminde (nd, np) boyutlu kısmi türevler (jacobian) dizeyinin elemanları;

$$[A]_{i,j} = \frac{\partial F_{i,j}}{\partial s_{i,j}}, i=1,...,nd \text{ ve } j=1,...,np \quad (4.11)$$

eşitliği ile tanımlanabilir. Burada, s hücrenin yavaşlığı; F ise yavaşlık modeli için seyahat zamanlarını veren bir fonksiyondur ve bu fonksiyon düz çözüm ile hesaplanan Eikonal denkleme karşılık gelmektedir. Kısmi türev dizeyini oluşturmak için sonlu farklar yaklaşımı kullanılmıştır (Ammon ve Vidale 1993). Bu yaklaşım, her bir hücre yavaşlığına göre seyahat zamanlarının kısmi türevlerinin sonlu farklar ile hesaplanması (Lines ve Treitel 1984) esasına dayanır. Denklem (4.11), ileri farklar ile izleyen şekilde hesaplanabilir;

$$\frac{\partial F_{i,j}}{\partial s_{i,j}} \approx \frac{F(s_{i,j} + \delta s_{i,j}) - F(s_{i,j})}{\delta s_{i,j}} \quad (4.12)$$

Vidale (1988, 1990) 2B Eikonal denklemin çözümünü sonlu farklar yöntemi ile açıklamıştır. (3.15) denkleminde, daha önce de bahsedildiği gibi, t seyahat zamanı, x ve y kartezyen koordinat eksenleri ve s hızın tersi şeklinde tanımlanan yavaşlıktır. Öncelikle tanımlanan hız modeli hücrelere bölünmüştür. Her bir (i,j) hücresi bir $s(i,j)$ yavaşlık değerine sahiptir. Her bir hücrenin düğüm noktaları için EM dalga seyahat zamanları hesaplanır.

Bilinen bir $T(i,j)$ seyahat zamanı değeri etrafındaki seyahat zamanları, bilinmeyen noktalar için ilerleme yönüne göre ileri ve geri fark operatörleri kullanılarak (i,j) noktasındaki $T(i,j)$ minimum değeri bilinen bir durum için, $(i,j+1)$ noktasındaki $T(i,j+1)$ seyahat zamanı değeri hesaplanmıştır. Daha sonra bilinen bir $(i,j+1)$ noktasındaki $T(i,j+1)$ seyahat zamanı değeri için $T(i,j+2)$ seyahat zamanı değeri hesaplanmıştır. Hesaplamalar bu şekilde tüm model için tamamlanır. Sonuç olarak verilen ikinci dereceden bir bilinmeyenli denklemin kökleri diskriminant hesabı ile yapılır. Buna göre a , b ve c katsayıları;

$$a = 1 \quad (4.13)$$

$$b = 4T(i, j + 1) \quad (4.14)$$

$$c = \left(\begin{aligned} &4\Delta x^2 \Delta z^2 .s(i, j)^2 - (16\Delta x^2 \Delta z^2 T(i, j + 1) + 9\Delta x^2 \Delta z^2 T(i, j)^2 - 24\Delta x^2 \Delta z^2 T(i, j + 1)T(i, j) \\ &- 6\Delta x^2 \Delta z^2 T(i, j - 2)T(i, j) + 16\Delta x^2 \Delta z^2 T(i, j - 1)^2 + 9\Delta x^2 \Delta z^2 T(i, j)^2 - 24\Delta x^2 \Delta z^2 T(i, j - 1)T(i, j) \\ &+ \Delta x^2 \Delta z^2 T(i + 1, j)^2 - 8\Delta x^2 \Delta z^2 T(i + 1, j)T(i, j - 1) + 6\Delta x^2 \Delta z^2 T(i + 1, j)T(i, j)) \end{aligned} \right) \quad (4.15)$$

şeklindedir. Bu ifadeler kullanılarak denklemin kökü hesaplanır. Hesaplanan bu değer aslında $T(i,j+2)$ 'ye karşılık gelen seyahat zamanı değeridir. a , b ve c değerleri kullanılarak diskriminant hesabı yapılmış ve gerekli hesaplamalar tamamlanarak denklemin kökleri bulunmuştur. Bulunan bu değer aslında hesaplanan seyahat zamanı değeridir. $T(i,j+2)$ ifadesi;

$$T(i, j + 2) = -2T(i, j - 1) \pm \Delta x \Delta z [4s(i, j)^2 - 12T(i, j + 1) - 18T(i, j)^2 + 24T(i, j + 1)T(i, j) + 6T(i, j - 2)T(i, j) - 16T(i, j - 1)^2 + 24T(i, j - 1)T(i, j) - T(i + 1, j)^2 + 8T(i + 1, j)T(i, j - 1) - 6T(i + 1, j)T(i, j)]^{1/2} \quad (4.16)$$

Daha sonra T seyahat zamanı değerinin yavaşlığa göre kısmi türevleri alınarak aşağıda verilen denklem kullanılarak kısmi türev dizeyi oluşturulur.

$$A^k = \frac{\partial T^k}{\partial s^k} = \frac{\partial}{\partial s^k} \sum_k T^k(i, j) \quad (4.17)$$

Denklem (4.17)'da sabit yavaşlık değerlerine sahip hücrelerden oluşan ve her bir hücrenin düğüm noktalarına atanmış olan m adet gözlem noktası ve n adet yavaşlık değerlerine karşılık gelen model parametre değeri bulunmaktadır. k, verici-alıcı kombinasyonlarını, (i,j) ise model parametrelerinin ait olduğu düğüm noktalarını gösteren indislerdir. Denklem (4.17) göz önünde bulundurularak T(i,j+2) için hesaplanan seyahat zamanı için kısmi türev ifadesi;

$$\frac{\partial T}{\partial s} = (4\Delta x \Delta z) \left/ \left[4s(i, j)^2 - 12T(i, j + 1) - 18T(i, j)^2 + 24T(i, j + 1)T(i, j) + 6T(i, j - 2)T(i, j) - 16T(i, j - 1)^2 + 24T(i, j - 1)T(i, j) - T(i + 1, j)^2 + 8T(i + 1, j)T(i, j - 1) - 6T(i + 1, j)T(i, j) \right]^{1/2} \right. \quad (4.18)$$

şeklinde. Bu ifade kısmi türev dizeyinin ilgili elemanına ait kısmi türev değeridir. Dizey oluşturulurken önce dizeyin her bir elemanı verici antenin tek bir konumu ve alıcı antenin tüm konumları için hesaplanır. Böylece verici-alıcı antenin ilk konumu için modelin her bir düğüm noktasına ait seyahat zamanlarının kısmi türevleri hesaplanmış olur. Ancak işlem antenlerin diğer konumları için de tamamlandığında sona erecektir. Bu nedenle verici anten kaydırma miktarı ne ise kuyu içinde düşey yönde o kadar kaydırılır. Verici antenin bu yeni konumu için alıcı anten kuyu boyunca yüzeyden kuyu sonuna kadar kaydırılarak yeniden seyahat zamanlarının yavaşlığa göre kısmi türevleri alınarak bir önceki adımda oluşturulan dizeyin her bir elemanına eklenerek yeniden bir dizey oluşturulur. Bu işlem verici-alıcı anten konumları tamamlanana kadar devam eder ve bu şekilde tüm durumlar göz önünde bulundurularak oluşturulan kısmi türev dizeyi ters çözüm işleminde kullanılır.

$$A^k = \begin{bmatrix} \frac{\partial T^1(1,1)}{\partial s^1(1,1)} + \frac{\partial T^2(1,1)}{\partial s^2(1,1)} + \dots + \frac{\partial T^k(1,1)}{\partial s^k(1,1)} & \dots & \frac{\partial T^1(1,m)}{\partial s^1(1,m)} + \frac{\partial T^2(1,m)}{\partial s^2(1,m)} + \dots + \frac{\partial T^k(1,m)}{\partial s^k(1,m)} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial T^1(n,1)}{\partial s^1(n,1)} + \frac{\partial T^2(n,1)}{\partial s^2(n,1)} + \dots + \frac{\partial T^k(n,1)}{\partial s^k(n,1)} & \dots & \frac{\partial T^1(n,m)}{\partial s^1(n,m)} + \frac{\partial T^2(n,m)}{\partial s^2(n,m)} + \dots + \frac{\partial T^k(n,m)}{\partial s^k(n,m)} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Yukarıdaki (4.19) Denkleminde, verici-alıcı kombinasyonları k indisi ile, model hücrelerine ait düğüm noktaları ise i ve j indisleri ile gösterilmektedir.

4.4 Kısmi Türevler Dizeyinin Broyden Güncellemesi İle Hesabı

Tomografi uygulamalarında, kısmi türev dizeyinin yukarıdaki şekilde hesaplanması zaman alıcı bir işlemdir. Broyden (1965) bunu önlemek için, kısmi türev dizeyinin, sayısal bir yaklaşımdan elde edilen bir dizey ile değiştirilmesini önermiştir. Buna göre, kısmi türev dizeyi, başlangıç modeli kullanılarak ilk yineleme adımı için belirtilen şekilde hesaplanmaktadır. Daha sonraki yineleme adımlarında kısmi türev dizeyin, sayısal bir yaklaşım ile elde edilen bir dizey ile değiştirilmekte ve sonraki yineleme adımlarında bu dizey güncellenmektedir. Broyden güncellemesinin ikinci veya üçüncü yineleme adımından sonra kullanılması genellikle daha duyarlı sonuçlar üretmektedir. Broyden (1965), kısmi türev dizeyinin, l yineleme sayısı olmak üzere (l+1)'inci yineleme adımında izleyen eşitlik ile güncellenmesini önermiştir.

$$A^{l+1} = A^l + \frac{(\Delta F^l + A^l \Delta s^l)(\Delta s^l)^T}{\|\Delta s^l\|^2} \quad (4.20)$$

Burada ΔF ve Δs ;

$$\Delta F^l = F(s^{l+1}) - F(s^l) \quad (4.21)$$

$$\Delta s^l = s^{l+1} - s^l \quad (4.22)$$

eşitlikleri ile tanımlanmaktadır. Denklem (4.21) ve (4.22)'de, l ve l+1 için F(s), (l) ve (l+1)'inci yinelemelerde hesaplanan (nd,1) boyutlu veri vektörleri, l ve l+1 için s ise, (l) ve (l+1)'inci yinelemelerde hesaplanan (np,1) boyutlu model vektörleridir.

Broyden güncellemesinin kullanılacağı ilk adım için hesaplanacak kısmi türev dizeyi hesabı ilk yapılmış olan A kısmi türev dizeyine eşit alınır. Daha sonraki yineleme adımları için ise Denklem (4.20)-(4.22) kullanılır (Dinçer, 2008).

4.5 Düzgünleyici Parametre λ 'nın Seçimi

Bu tez çalışmasında, SEKK' de ve OCCAM ters çözümünde kullanılan sönüm faktörü (damping factor) veya düzgünleştirici parametresi (regularization parameter) olarak bilinen " λ "nın seçiminde, süreklilik yada "cooling" yaklaşımı (Candansayar, 2002) kullanılmıştır. Bu yaklaşımda başlangıç değeri olarak tek düze yer modeli için hesaplanan kısmi türevler dizeyinin en büyük öz değeri alınmıştır. Her yinelemede, $(A^T A)$ dizey çarpımındaki en büyük tekil değer, dizeyin satırlarının toplamı en büyük olan değer olarak alınır (r_{top}). Sonra her yinelemede λ aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$\lambda_i = \frac{r_{top}}{2^{i-1}} \quad (4.23)$$

4.6 Doğrusal Olmayan Problemlerin Eşlenik Türev (CG) Yöntemi İle Ters Çözümü

Dizey denkleminin tersini almadan çözüm bulan "eşlenik türev" (conjugate gradient) yöntemi bu tez çalışmasında çözümün hızlı olması ve genel olarak çözümü doğru vermesi nedeniyle tercih edilmiştir. Yöntem çok sayıda veri ile yine çok sayıda parametrenin çözümünün arandığı doğrusal olmayan problemlerin ters çözümünde iyi sonuçlar vermektedir (Candansayar 2002).

Eşlenik gradyan (conjugate gradient) yöntemi doğrusal olmayan problemlerin çözümünde kullanılan yinelemeli bir dizey denklemi çözüm yöntemidir. Bu tez çalışmasında kullanılan CG algoritmasının ayrıntısı için Candansayar (2002) (Zhdanov 1993) bakılabilir.

4.7 EM Dalga Hızı ile İlişkili Diğer Parametreler

Karşılıklı kuyu radarı tomografisi uygulamalarında yapılan ters çözüm işlemindeki parametre hesabında seyahat zamanının kullanımı yaygındır. Standart ışın tabanlı seyahat zamanı tomografisinde, seyahat zamanı hızın tersi olan yavaşlık fonksiyonu ile değişir ve

$$\Delta t = L\Delta s \quad (4.24)$$

denklemini ile verilir. Burada Δt girişte kullanılan yavaşlık modelinden elde edilen seyahat zamanı ve ölçülen zaman arasındaki farkı veren bir vektördür. Δs ise yavaşlıkları içerir. L ise ışın tabanlı duyarlılık dizeyidir. Satırları anten çiftlerinin kayıt aldıkları noktayı merkez kabul ederek modelin her bir hücresindeki her bir ışının boyunu içerir.

(4.24) denklemi 2B modelleme ile hesaplanan seyahat zamanları ters çözüm işleminde kullanılacak olan değerlerdir ve burada hesaplanacak olan parametre modele ait yavaşlık değerleri olacaktır. Yavaşlık değerleri aynı zamanda ortamın elektromanyetik dalga hızı dolayısıyla da bağlı dielektrik sabiti değerlerinin hesaplanmasını beraberinde getirecektir.

$$\varepsilon_b = \frac{c^2}{v^2} \quad (4.25)$$

Burada c boşluktaki ışık hızıdır. v ise ters çözüm sonucunda elde edilen ortamın elektromanyetik dalga hızı değeridir. Buradan yeraltı fiziksel parametrelerinden biri olan porozite değerlerine de ulaşılabilir.

$$\varepsilon_b = [(1 - \theta)\varepsilon_s^\alpha + \theta\varepsilon_w^\alpha]^{1/\alpha} \quad (4.26)$$

formülü yardımı ile, $\varepsilon_s=4$, $\varepsilon_w=80$ ve α sabiti de 0.5 olarak alınarak daha önce (3.2) denklemi ile verilen porozite hesabı yapılmaktadır (Topp vd. 1988).

5. GELİŞTİRİLEN RADAR TOMOGRAFİ ALGORİTMASININ TEST EDİLMESİ

Çalışma kapsamında, belirlenen bazı hız modelleri için karşıt kuyu radar verileri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu verilere %3 “Gaussian” gürültü eklenmiştir. Elde edilen yapay verilerin SEKK ve OCCAM ters çözümleri yapılmıştır. Sonuçlar gerçek model ile karşılaştırılarak her iki ters çözüm tekniğinin üstün ve zayıf yönleri tartışılmıştır. Ayrıca, uygulamalarda ne tür parametre seçimlerinde nasıl sonuçlarla karşılaşacağımızı test etme amaçlı uygulamalar yapılmış olup, bu örnekler Ek 3 Radar Tomografisinde Kullanılan Anten Frekansı ve Kuyu Mesafesinin Etkisi başlığı altında verilmiştir.

Yapay veri oluşturulduktan sonra, veriye beyaz Gaussian Gürültü eklenmiş olup, izleyen formül kullanılarak veriye gürültü ekleme işlemi gerçekleştirilmiş ve bu veri ters çözüm işlemine tabi tutulmuştur.

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (5.1)$$

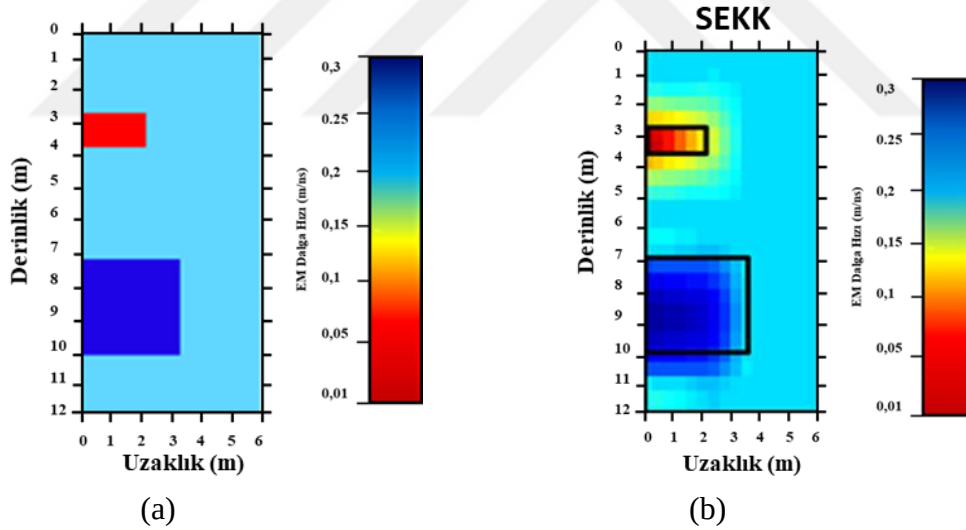
İzleyen bölümde iki farklı model için karşılaştırmalar yapılmıştır. Her iki örnekte de, gerçek model parametreleri ile ters çözüm sonucu elde edilen parametreler kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanan model MISFIT kesitleri, her modelin yanına çizilmiştir.

$$MISFIT_{Model} = \%100. \sqrt{\frac{(m_i^g - m_i^h)^2}{(m_i^g)^2}} \quad (5.2)$$

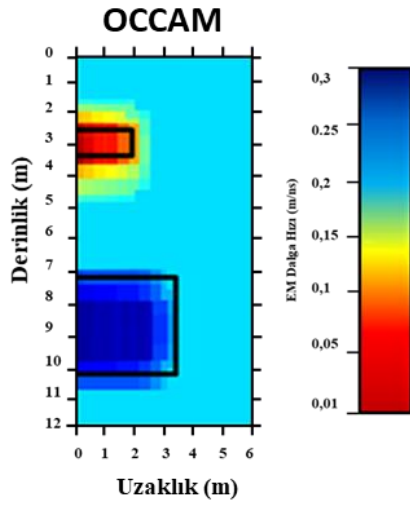
Yukarıda, i-numaralı model parametresi için, m_i^g gerçek model değeri, m_i^h ise ters çözüm (SEKK veya OCCAM) sonucu elde edilen modeldeki ilgili parametre değeri. Model MISFIT değerleri, modeldeki her parametre için ayrı ayrı hesaplanarak tüm model kesiti gibi çizdirilmiştir. Bu kesitler, modelin hangi bölümünün hangi ters çözümde daha iyi çözüldüğünün bir ölçüsünü vermektedir.

5.1 Model 1

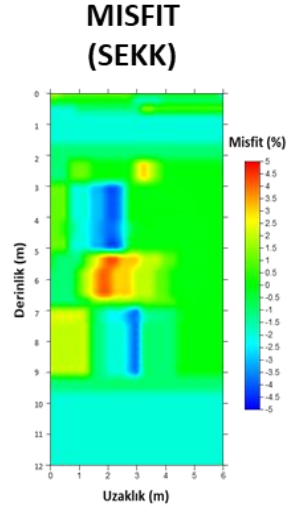
EM dalga hızı 0,22 m/ns olan ortamda 0,28 m/ns yüksek ve 0,01 m/ns düşük EM dalga hızlarına sahip 2 dikdörtgen şekilli gömülü nesnenin bulunduğu bir model kullanılmıştır. Model 0.25x0.25 m boyutunda hücrelere bölünmüş ve toplamda 1152 adet hücre için işlem yapılmıştır. Yüzeyden başlayan ve 12 m derinliğe kadar inen kuyu boyunca alıcı ve verici antenler 0.25 m aralıklarla kaydırılarak ölçü alınmıştır. İki kuyu arası mesafe 6 m kuyu derinlikleri ise 12 m’dir. Anten frekansı 250 MHz’dir. Modele beyaz Gaussian gürültüsü eklenerek çözümlenmiştir. Başlangıç modeli bu ters çözümlşlemi için homojen olarak seçilmiştir. Sönüm faktörü için de başlangıç değeri olarak tek düze yer modeli için hesaplanan kısmi türevler düzeyinin en büyük öz değeri alınmıştır. Daha sonra her yinelemede bu değer belli oranda azaltılarak RMS değerinin son 3 yinelemede aynı olması şartı ile algoritma sonlandırılmıştır.



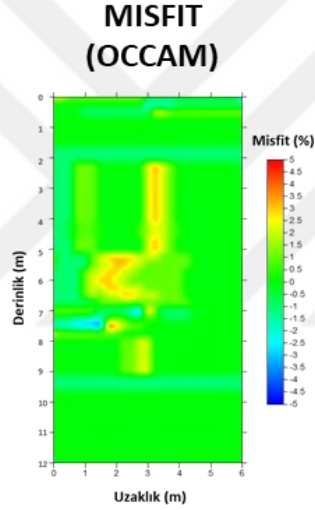
Şekil 5.1 a. Gerçek hız modeli, b. SEKK ters çözüm sonucu, c. OCCAM ters çözüm sonucu, d. SEKK için model MISFIT kesiti, e. OCCAM çözümü için model MISFIT kesiti



(c)



(d)

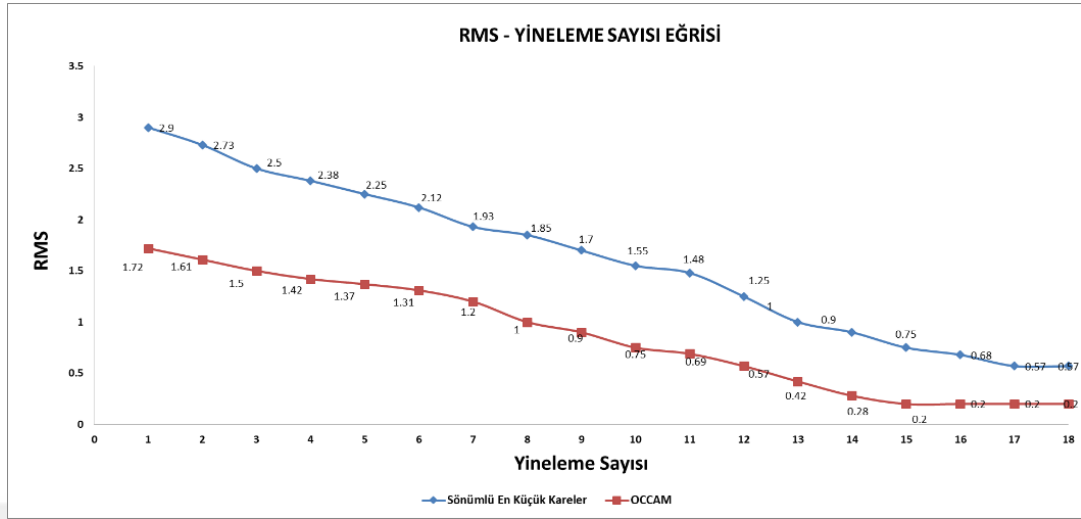


(e)

Şekil 5.1 a. Gerçek hız modeli, b. SEKK ters çözüm sonucu, c. OCCAM ters çözüm sonucu, d. SEKK için model MISFIT kesiti, e. OCCAM çözümü için model MISFIT kesiti (devam)

Çizelge 5.1 SEKK ve OCCAM ters çözüm yöntemlerinin yineleme sayısı, RMS değeri ve hesaplama süreleri

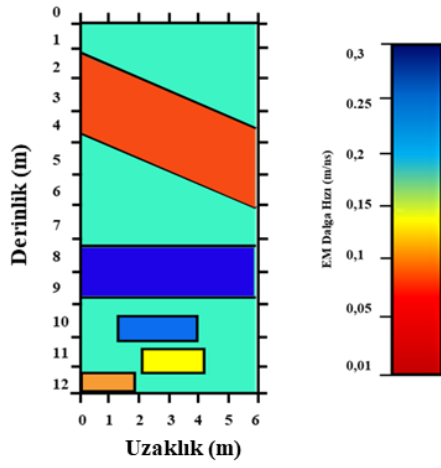
Yöntem	$\lambda_{\max}$ (1. yineleme)	$\lambda_{\min}$ (18. yineleme)	RMS	Hesaplama Zamanı (Dakika)
SEKK	1.32	0.01	0.57	22,34
OCCAM			0.2	24,32



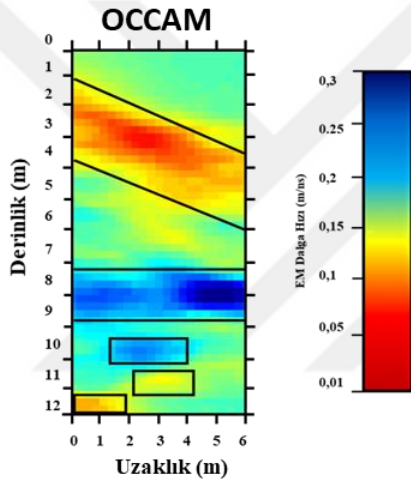
Şekil 5.2 SEKK ve OCCAM ters çözümde her yinelemede RMS değerleri

5.2 Model 2

EM dalga hızı 0.18 m/ns olan ortamda, yüzeyden 1 m derinde başlayan ve 4 m’de sonlanan 45 derece eğimli 0.1 m/ns düşük EM dalga hızına sahip eğimli bir tabaka, daha derinde 7 m’de başlayıp 9 m’de biten EM dalga hızı 0,28 m/ns olan bir yatay tabaka, daha derinde 9 ile 10 m arasında 10 ile 11 m arasında ve 11 ile 12 m arasında EM dalga hızları da sırasıyla 0,22 m/ns, 0,15 m/ns ve 0,11 m/ns olan gömülü nesnelerin bulunduğu model kullanılmıştır. Model 0.25x0.25 m boyutunda hücelere bölünmüş ve toplamda 1152 adet hücre için işlem yapılmıştır. Yüzeyden başlayan ve 12 m derinliğe kadar inen kuyu boyunca alıcı ve verici antenler 0.25 m aralıklarla kaydırılarak ölçü alınmıştır. İki kuyu arası mesafe 6 m kuyu derinlikleri ise 12 m’dir. Anten frekansı 250 MHz’dir. Modele beyaz Gaussian gürültüsü eklenerek çözümlenmiştir. Başlangıç modeli bütün ters çözümlerde homojen olarak seçilmiştir. Sönüm faktörü için de başlangıç değeri olarak tek düze yer modeli için hesaplanan kısmi türevler dizeyinin en büyük öz değeri alınmıştır. Daha sonra her yinelemede bu değer belli oranda azaltılarak RMS değerinin son 3 yinelemede aynı olması şartı ile algoritma sonlandırılmıştır.

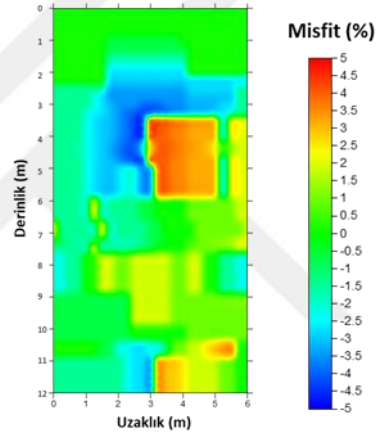


(a)

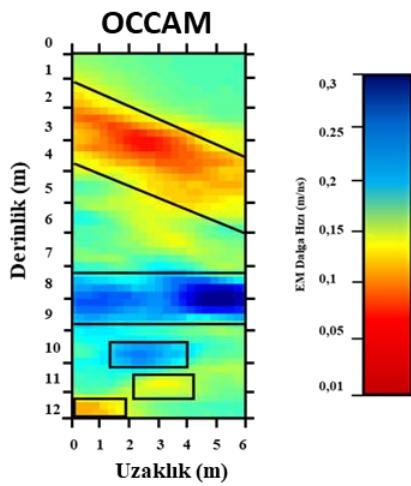


(b)

MISFIT
(SEKK)

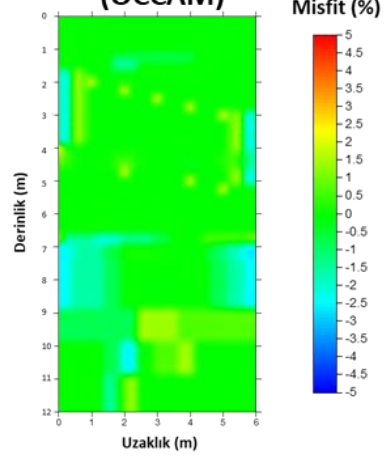


(d)



(c)

MISFIT
(OCCAM)

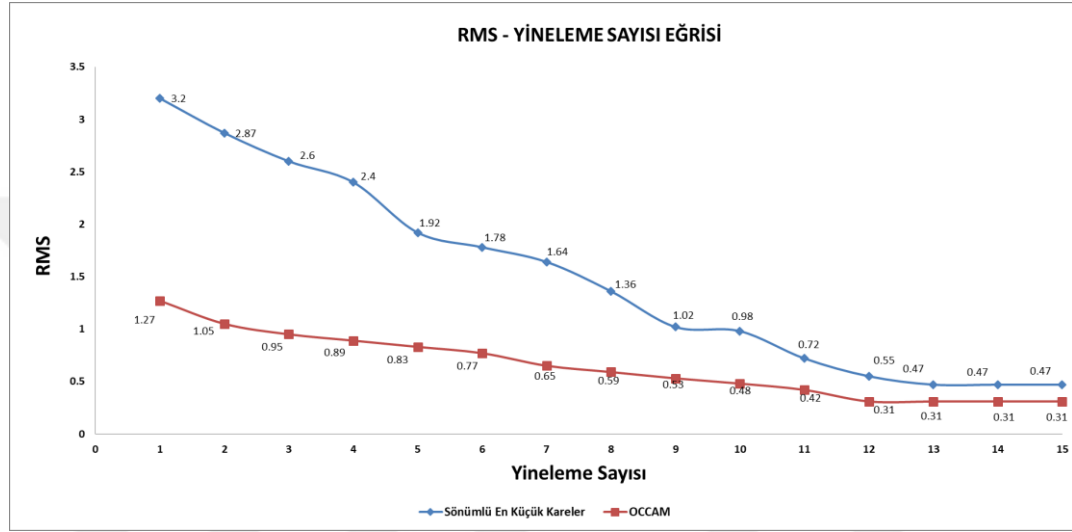


(e)

Şekil 5.3 a. Gerçek hız modeli, b. SEKK ters çözüm sonucu, c. OCCAM ters çözüm sonucu, d. SEKK için model MISFIT kesiti, e. OCCAM çözümü için model MISFIT kesiti

Çizelge 5.2 SEKK ve OCCAM ters çözüm yöntemlerinin yineleme sayısı, RMS değeri ve hesaplama süreleri

Yöntem	$\lambda_{\max}$ (1. yineleme)	$\lambda_{\min}$ (18. yineleme)	RMS	Hesaplama Zamanı (Dakika)
SEKK	1.87	0.11	0.47	21,38
OCCAM			0.31	35,46



Şekil 5.4 SEKK ve OCCAM ters çözümde her yinelemede RMS değerleri

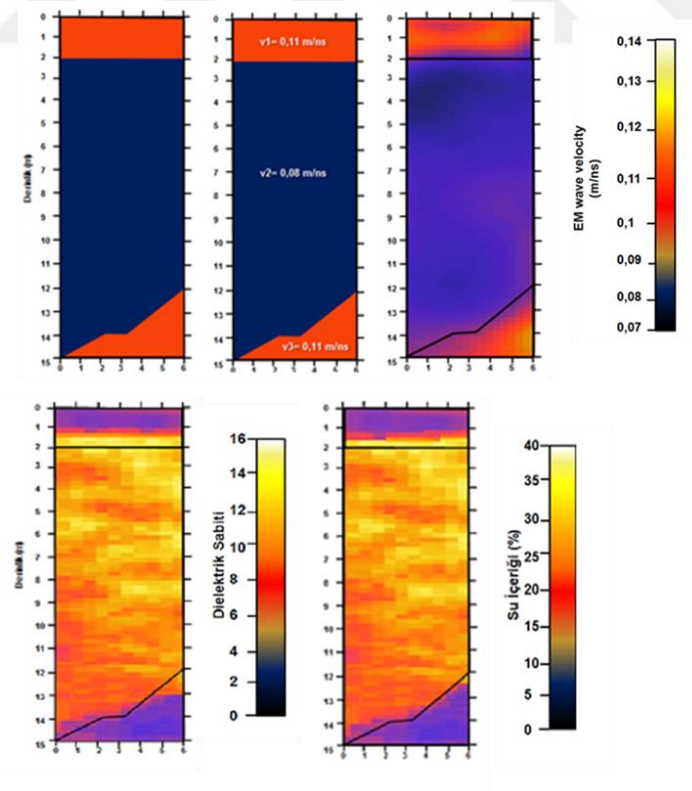
Her iki uygulama incelendiğinde yapılan ters çözüm işlemlerinde sonuçların benzerlik gösterdiği ancak RMS sonuçları ve MISFIT model kestirimlerine bakıldığında OCCAM ters çözüm yönteminin daha iyi sonuçlar ürettiği gözlemlenmiştir. Özellikle model içerisinde verilen gömülü nesne sınırlarının ve nesne konumlarının daha net ortaya konulmasında yöntemin öne çıktığı görülmektedir. Yöntemin dezavantajı olarak hesaplamaları daha uzun sürede tamamlaması belirtilebilir.

5.3 Model 3

2B modelleme ile hesaplanan seyahat zamanları ters çözüm işleminde kullanılacak olan değerlerdir ve burada hesaplanan parametre modele ait yavaşlık değerleridir. Yavaşlık değerlerine bağlı x-z model kesiti aynı zamanda ortamın EM dalga hızı kesitidir.

EM dalga hızından yola çıkarak bağıl dielektrik sabiti ve buna bağlı olarak da porozite, hacimsel su içeriği ve su doygunluğu gibi kesitlerin hesaplanmasını da mümkün hale getirmektedir. Tez içerisinde 3. Bölümde verilen Denklem (3.2) ile ifade edilen Topp Eşitliği Denklemi kullanılarak modele ait dielektrik sabiti ve su içeriği değişimi de gözlemlenebilmektedir. Buna ilişkin örnek uygulama yapılarak da sonuçlar irdelenmiştir.

Örnek modelde, en üstte EM dalga hızı 0.11 m/ns olan yüksek hızlı bir tabaka, onun altında ise EM dalga hızı 0.08 m/ns olan düşük hıza sahip ikinci bir tabaka bulunmaktadır. Üçüncü tabakanın üst sınırı 45 derecelik bir eğime sahip basamak şeklindedir ve yine 0.11 m/ns lik yüksek EM dalga hızına sahiptir. Model 0.25x0.25 m boyutunda hücrelere bölünmüş ve toplamda 1440 adet hücre için işlem yapılmıştır. Yüzeyden 15 m derinliğe kadar inen kuyu boyunca alıcı ve verici antenler 0.25 m aralıklarla kaydırılarak ölçü alınmıştır. İki kuyu arası mesafe 6 m kuyu derinlikleri ise 15 m’dir. Anten frekansı 250 MHz olarak seçilmiştir.



Şekil 5.5 OCCAM Ters çözüm yöntemi sonucu ile ortamın dielektrik sabiti ve su içeriği değişimi kesitleri

EM dalga hızının yüksek olduğu yerlerde dielektrik sabiti düşük, düşük olduğu yerlerde ise yüksek değerler göstermektedir. Parametreler arasındaki bağıntılar düşünüldüğünde her iki parametrenin birbiri ile ters orantılı olduğu görülmektedir. Bunun yanısıra dielektrik sabiti değişimi ile doğru orantılı olan su içeriğinin de benzer şekilde değişim gösterdiği görülmektedir.

Yukarıda verilen örnekler dışında yapay veriler üzerinde yapılan diğer uygulamalar EK 2 Ters Çözüm Uygulamaları başlığı altında verilmiştir.



6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Tez kapsamında, karşıt kuyu radar seyahat zamanı modelleme ve tomografi çalışması gerçekleştirilmiştir. Yeraltının yüksek çözünürlükle görüntülenmesi için yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri olan yer radarı uygulamasında önemli unsurlardan olan çözünürlük ve derinlik parametreleri ortamın su içeriği, jeolojik özellikleri ve kullanılan anten frekansından etkilenmektedir. Elektriksel iletkenliğin yüksek olduğu alanlarda iyi bir çözünürlük ve hedeflenen doğru bir yeraltı görüntüsü elde etmek oldukça güçtür. Dolayısıyla, karşıt-kuyu radar verisi toplanarak yapılacak bir yer radarı çalışması doğruya daha yakın, daha detaylı ve sağlıklı bir yeraltı radar hız dağılımını gösteren bir model elde edilmesini sağlayacaktır. Ayrıca, özellikle zeminin su içeriği ile ilişkili olduğu diğer parametrelerin belirlenmesi ve haritalanması gibi hidrojeolojik problemlerin çözümünde de kuyu radarı uygulaması yaygın olarak kullanılmaktadır.

İlk kez bu çalışma ile 2B karşıt kuyu radar tomografisinde OCCAM ters çözüm yöntemi kullanılmıştır. Yapay veriler üzerinde yapılan uygulamalar ile geleneksel olarak kullanılan SEKK yöntemi uygulamalarının sonuçları karşılaştırılarak, kuyu radarı verilerinde OCCAM çözümünün daha gerçekçi modeller ürettiği gösterilmiştir.

Bu çalışmada, öncelikle 2B yeraltı EM dalga hız modelleri oluşturulmuş ve oluşturulan yapay yeraltı verilerine ait 2B EM dalga hız haritasını kestirmek için 2B seyahat zamanı modellemesi ve seyahat zamanı tomografisi algoritmaları geliştirilmiştir. Bu amaçla FORTRAN ve MATLAB programlama yazılımları kullanılmış ve entegre bir kod hazırlanmıştır. Kod yazılırken Giroux (2007) tarafından geliştirilen bh-tomo aldı algoritmadan da yararlanılmıştır. 2B modelleme algoritması, sonlu farklar yöntemi ile 2B Eikonal denklemin çözümüne dayanmaktadır. Bu denklemin çözümü için ikinci dereceden sonlu farklar yaklaşımı kullanılmıştır. Seyahat zamanına bağlı ters çözüm işlemi ise, doğrusal olmayan problemlerin çözümünde yinelemeli düzey denklemi çözüm yöntemi olarak kullanılan eşlenik gradyan (conjugate gradient) çözümü ile (SEKK) ve OCCAM Ters Çözüm Yöntemi hesabı yapılmıştır.

Modelleme çalışmalarında Eikonal denklem kullanılarak yapılan seyahat zamanı hesabı daha kısa süre içerisinde gerçekleştirildiğinden, tez kapsamında bu yöntemin kullanılması modellemede ilk varış zamanlarının hesaplanması için oldukça etkili bir yaklaşım olmuştur.

Modelleme çalışmaları kapsamında yazılan kod, EM dalga hızı farklı tabaka geçişlerinde ya da farklı EM dalga hızına sahip yapıların yer aldığı farklı yapay veriler için çalıştırılarak test edilmiş, seyahat zamanı kontur haritaları çizdirilmiştir. Bu modelleme çalışmalarında, kuyular arası mesafe ile alıcı ve verici antenlerin kuyu içerisindeki konumları ile model içerisindeki yapının konumunun modelleme sonuçlarında etkili olduğu görülmüştür.

Tomografi hesabı için hazırlanan ters çözüm kodu ile hem yapay veriler oluşturularak hem de daha önce literatürde yayınlanmış çalışmalardan elde edilen modeller kullanılarak sonuca ulaşılmaya çalışılmıştır. Böylece SEKK yöntemi teyid edilmiş ve OCCAM ters çözüm yaklaşımı sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Burada ilk olarak dikkat edilen nokta hangi durumlarda hangi parametrelerin nasıl seçilmesi gerektiği olmuştur. Bu kapsamda modellerde gömülü yapı derinliği ve anten frekansı gibi parametreler sırasıyla değiştirilmiş, bu değişiklik yapılırken diğer tüm parametreler sabit tutularak hesaplama yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak aynı iterasyon sayısı için; yeraltı modeli içinde var olduğu düşünülen yapı boyutları büyüdükçe RMS değerinin azaldığı ancak hesaplama süresinin arttığı, anten frekansı azaldıkça RMS değerinin ve hesaplama zamanının azaldığı, yeraltı modeli içinde var olduğu düşünülen yapının bulunduğu derinlik yüzeye yaklaştıkça RMS değerinin azaldığı ancak hesaplama zamanının ufak da olsa arttığı ancak burada gömülü nesne ile ortam EM dalga hızı arasındaki farkların önemli olduğu sonucuna varılmıştır.

Tomografi çalışmaları için farklı yapay veri uygulamaları yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada, geliştirilen yazılım ile hesaplanan SEKK yöntemi

elde edilen RMS hata değerleri ile OCCAM ters çözüm yöntemi ile hesaplanan RMS hata değerlerinin birbirine yakın olduğu ancak OCCAM yöntemi sonuçlarının daha düşük olduğu görölmüş, buna ek olarak OCCAM yöntemi ile yapılan hesaplama süresinin daha fazla olduğu görölmüştür.

Çalışma sonuçları için hem yapay veriler hem de daha önce yapılmış çalışmalardan elde edilen modeller tekrar değerlendirilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuçlar irdelendiğinde;

- OCCAM ters çözüm yöntemi ile gerçek yeraltı modeline iyi bir uyum sağlandığı,
- Diğer yöntemlere göre daha düşük bir yineleme ve RMS ile uygulamanın tamamlandığı,
- Doğru hız modeline daha yakın çözümler ürettiğı, ancak diğer yöntemlere göre genellikle daha uzun bir hesaplama süresinde çözüme ulaştığı,
- Yöntemlerin hesaplama süreleri arasında büyük farklar olmadığı ve OCCAM ters çözüm yönteminin modeli daha iyi kestirdiğı,
- Yöntem ile modeldeki süreksizlik ve tabaka sınırlarının daha iyi belirlenebildiğı,
- Hesaplanan EM dalga hız değerlerinin modellemede verilen EM dalga hız değerlerine yakın bulunduğu,
- Karmaşık ve gömülü nesne sayısının arttığı modellerde bu yapıların OCCAM ters çözüm yöntemi ile daha ayrıntılı ve net olarak ortaya konulabildiğı

belirlenmiştir. Ayrıca OCCAM Ters Çözüm Yöntemi ile yapılan uygulamalarda;

- Gömülü nesne boyutlarının büyük olması halinde bu nesnelerin ve sınırlarının daha net ve doğru tespit edilebildiğı ancak gömülü nesne boyutlarının küçük durumunda çözümün net olmadığı ve yapı sınırlarında saçılmalar meydana geldiğı,
- Gömülü nesnenin bulunduğu ortam ile hız kontrastının yüksek olması halinde bu nesnelerin ve sınırlarının daha net ve doğru tespit edilebildiğı ancak gömülü

nesnenin bulunduğu ortam ile hız kontrastının düşük olması durumunda ayırıcı yüzeylerin tespit edildiği ancak yapı sınırlarında saçılmalar meydana geldiği,

- Gömülü nesnelerin yüzey sınırında olması halinde çözümün SEKK 'e göre daha iyi olduğu ancak yapı sınırlarında az da olsa saçılmalar meydana geldiği,
- Gömülü nesnelerin kuyu sonu/model sınırında olması durumunda ise yüzeye yakın olması durumundan daha iyi sonuç verdiği,
- Eğimli arayüzeylerin olduğu modellerde de bu yöntemle tabaka sınırlarının net bir şekilde ortaya konulduğu,
- Belirlenen yavaşlık değerlerinden kolaylıkla ortamın su içeriği ve dielektrik katsayısı gibi kesitlerinin elde edilebileceği

ortaya konulmuştur.

Bu tez çalışması sonucunda özetle; OCCAM ters çözüm yöntemi ile gerçek yeraltı modeline iyi bir uyum sağlandığı görülmekte olup, diğer yöntemlere göre daha düşük bir yinleme ve daha az bir RMS miktarı ile uygulamanın tamamlandığı, doğru hız dağılımı modeline daha yakın çözümler ürettiği, ancak diğer yöntemlere göre genellikle daha uzun bir hesaplama süresinde çözüme ulaştığı görülmekte olup, yöntemlerin hesaplama süreleri arasında büyük farklar olmadığı ve OCCAM ters çözüm yönteminin modeli daha iyi kestirdiği ortaya konulmuştur. Yöntem ile modeldeki süreksizlik ve tabaka sınırlarının daha iyi belirlenebildiği, hesaplanan EM dalga hız değerlerinin modellemede verilen EM dalga hız değerlerine yakın bulunduğu, karmaşık ve gömülü nesne sayısının arttığı modellerde ise ters çözüm sonuçlarında bu yapıların daha ayrıntılı ve net olarak ortaya konulabildiği yapılan uygulamalarda ortaya konulmuştur. Ayrıca belirlenen yavaşlık değerlerinden kolaylıkla ortamın su içeriği ve dielektrik katsayısı kesitlerinin elde edilebileceği de yapay veriler üzerinde gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

- Alumbaugh, D.L. ve Newman, G.A. 1994. Fast frequency-domain electromagnetic modeling of a 3-D earth using finite differences. Extended Abstracts from the Society of Exploration Geophysicists, 369-373, Los Angeles, California.
- Ammon, C.J. ve Vidale, J.E. 1993. Tomography without rays. Bulletin of the Seismological Society of America, 83, 509-528.
- Annan, A.P. ve Chua, L.T. 1992. Ground penetrating radar performance predictions. The Geological Survey of Canada, 90(4) 5-13.
- Balkaya, Ç. 2010. Karşılıklı Kuyu Yer Radarı Verisinin İki Boyutlu Seyahat Zamanı Tomografisi. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı, 177, İzmir.
- Balkaya, Ç. ve Göktürkler, G. 2016. Karşılıklı kuyu yer radarı verilerinin modellenmesi. Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, 22(6), 581-596.
- Binder, D., Brückl, E., Roch, K.H., Behm, M., Schöner, W. ve Hynek, B. 2009. Determination of total ice volume and ice-thickness distribution of two glaciers in the Hohe Tauern region, Eastern Alps, from GPR data. Annals of Glaciology, 50(51), 71-79.
- Bourgeois, J.M. ve Smith G.S. 1996. A fully three-dimensional simulation of a ground-penetrating radar: FDTD theory compared with experiment. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 34(1).
- Broyden, C.G. 1965. A class of methods for solving nonlinear simultaneous equations. Mathematics of Computation, 19, 577-593.
- Cai, J. ve McMechan, G.A. 1995. Ray-based synthesis of bistatic ground-penetrating radar profiles. Geophysics, 60, 87-96.
- Candansayar, M.E. 2002. Sönümlü En-Küçük Kareler Ve Eşlenik Türev Algoritmalarının Ardışık Kullanımı İle Manyetotellürik Verilerin Düzgünleştiricili İki-Boyutlu Ters Çözümü. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı, 129, Ankara.
- Carcione, J.M. 1996. Ground radar numerical modelling applied to engineering problems. Evr. J. Environ. Eng. Geophys., 1, 65-81.
- Casper, D.A. ve Kung, K.J.S. 1996. Simulation of ground-penetrating radar waves in a 2-D soil model. Geophysics, 61, 1034-1049.

- Clement, W.P. ve Knoll, M.D. 2000. Tomographic inversion of crosshole radar data: confidence in results, Proceeding of the Symposium on the Application of Geophysics to Environmental and Engineering Problems. 553-562, Arlington, VA.
- Clement, W.P. ve Knoll, M.D. 2006. Traveltime inversion of vertical radar profiles. Geophysics, 71(3), 553-562.
- Constable, S.C., Parker, R.L. ve Constable, C.G. 1987. OCCAM's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. Geophysics, 52(3), 289-300.
- deGroot-Hedlin, C. ve Constable, S.C. 1990. OCCAM's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. Geophysics, 55(12), 1613-1624.
- Dinçer, Y. 2007. 2008. Petrol Arama Amaçlı Ölçülen Manyetotellürik Verilerinin Sönümlü En Küçük Kareler Ve Quasi-Newton Yöntemi İle İki-Boyutlu Melez Ters Çözümü. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı, 49, Ankara.
- Ellefsen, K.J. 1999. Effects of layered sediments on the guided wave in crosswell radar data. Geophysics, 64(6), 1698-1707.
- Faria, E.L. ve Stoffa, P.L. 1994. Traveltime computation in transversely isotropic media. Geophysics, 59, 272-281.
- Farmani, M.B., Keers, H ve Kitterod, N.O. 2008. Time-lapse GPR tomography of unstratified water flow in an ice-contact delta. Vadose Zone Journal, 7(1), 272-283.
- Giroux, B., Gloaguen, E. Ve Chouteau, M. 2007. bh_tomo — a Matlab borehole georadar 2D tomography package. Computers and Geosciences 33, 126-137.
- Goodman, D. 1994. Ground-penetrating radar simulation in engineering and Archaeology. Geophysics, 59, 224-232.
- Göktürkler, G. ve Baklaya, Ç. 2010. Traveltime tomography of crosshole radar data without ray tracing. Journal of Applied Geophysics, 72, 213-224.
- Grote, K., Hubbard, S. Ve Rubin, Y. 2003. Field-Scale Estimation of Volumetric Water Content Using Groundpenetrating Radar Ground Wave Techniques. Water Resources Research, 39, 1321.
- Gue`rin, R. 2005. Borehole and Surface-Based Hydrogeophysics. Hydrogeol Journal, 13, 251-254.

- Hammon, W.S. III, Zeng, X., Corbeanu, R.M. ve McMechan, G.A. 2003. Estimation of The Spatial Distribution of Fluid Permeability from Surface and Ferron Sandstone, Utah. *Geophysics*, 67, 1505-1515.
- Hanafy, S. ve Hagrey, S.A. 2006. Ground penertaing radar tomography for soil moisture heterogeneity. *Geophysics*, 71(1), 9-18.
- Holliger, K. ve Bergmann, T. 2002. Numerical modeling of borehole georadar data. *Geophysics*, 67(4), 1249-1257.
- Huisman, J.A., Hubbard, S.S., Redman, J.D. ve Annan, A.P. 2003. Measuring Soil Water Content with Ground Penetrating Radar: A Review. *Vadose Zone Journal*. 2, 476–491.
- Irving, J. 2006. Improving tomographic estimates of subsurface electromagnetic wave velocity obtained from ground penetrating radar data. Doctor of Philosophy, Stanford University.
- Knight, R. 2001. Ground Penetrating Radar for Environmental Applications. *Annual Review Earth Planet Sci.*, 29, 229-255.
- Koçaslan, A. 2008. Sonlu Farklar Yöntemi İle Çok Yüksek Frekanslı Elektromanyetik Dalga Alanı Hesabı. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı, 255, Ankara.
- Kurt, B.B. 2009. Zaman Ortamında Sonlu Farklar Yöntemiile İki Boyutlu Yer Radarı Modellemesi. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı, 96, Ankara.
- Leidenfrost, A., Ettrich, N., Gajewski, D. ve Kosloff, D. 1999. Comparison of six different methods for calculating traveltimes. *Geophysical Prospecting*, 47, 269-297.
- Lines, L.R. ve Treitel, S. 1984. Tutorial:a review of least squares inversion and its application to geophysical problems. *Geophysical Prospecting*, 32, 159-186.
- Podvin, P. ve Lecomte, I. 1991. Finite difference computation travel times in very contrasted velocity models: a massively paralel approach and its associted tools. *Geophysics Jour. Int.*, 105, 271-284.
- Powers, M.H. ve Olhoeft, G.R. 1994. Modeling dispersive ground penetrating radar data, *Proceedings of the Fifth International Conference on Ground- Penetrating Radar*. June 12-16, Kitchener, Ontario, Canada.
- Qin, F., Luo, Y., Olsen, K.B., Cai, W. ve Schuster, G. 1992. Finite difference solution of the Eikonal equation along expanding wavefronts. *Geophysics*, 57(3), 478-487.

- Sasaki, Y. 1989. Two dimensional joint inversion of magnetotelluric and dipole-dipole resistivity data, *Geophysics* 54, 254-262.
- Sava, P. ve Fomel, S. 2000. Huygens wavefront tracing: A robust alternative to conventional ray tracing. Stanford Exploration Project, Report SERGEY, 441-454.
- Schneider, W. A. J., Ranzinger, K., Balch, A. ve Kruse, C. 1992. A dynamic programming approach to first-arrival traveltimes computation in media with arbitrarily distributed velocities. *Geophysics*, 57, 39-50.
- Topp, G.C., Davis, J.L. ve Annan, A.P. 1980. Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines. *Water Resources Research*, 16, 574-582.
- Treitel, S. ve Lines, L.R. 1999. Past, present and future of geophysical inversion – a Y2K Analysis, CREWES Research Report, 11, 2, 8.
- Vidale, J. E. 1988. Finite-difference calculation of travel times. *Bulletin of Seis. Soc. of America*, 78(6), 2062-2076.
- Vidale, J. E. 1990. Finite-difference calculation of travel times in three dimension, *Geophysics*, 55(5), 521-526.
- Wang, T. ve Tripp, A.C. 1996. FDTD simulations of EM waves propagation in a 3-D media. *Geophysics*, 61, 110-120.
- Wang, B., Zhang, W., Ahanbieke, P., Gan, Y., Xu, W., Li, L., Christie, P. ve Li L. 2014. Interspecific interactions alter root length density, root diameter and specific root length in jujube/wheat agroforestry systems. *Agroforest. Syst.*, 88, 835-850.
- Yee, K.S. 1966. Numerical solution of initial boundary problems involving Maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, 14, 302-309.
- Zeng, X., McMechan, G.A., Cai, J. ve Chen, H.W. 1995. Comparison of ray and fourier methods for modeling monostatic ground-penetrating radar profiles. *Geophysics*, 60, 1727-1734.
- Zhao, P. 1996. An efficient computer program for wavefront calculation by the finite difference method. *Computer and Geoscience*, 22(3), 239-251.
- Zhdanov, M.S. 1993. Tutorial: Regularization in Inversion Theory: Colorado School of Mines.

EKLER

EK 1 Modelleme Uygulamaları

EK 2 Ters Çözüm Uygulamaları

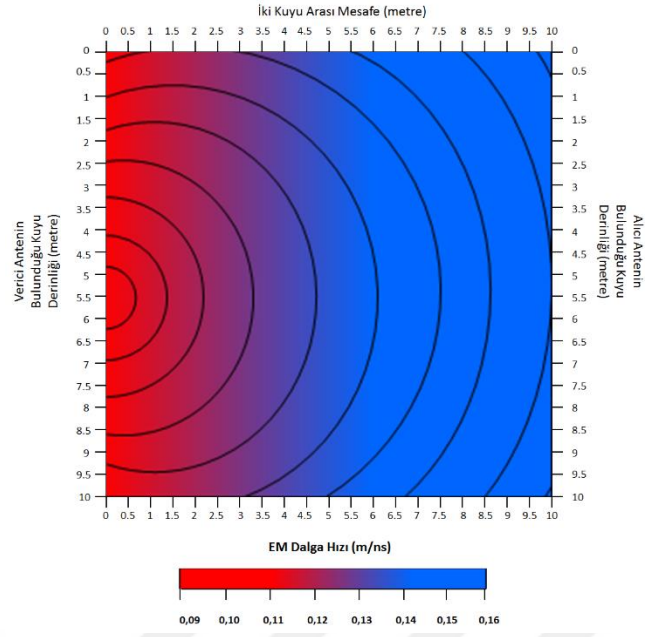
EK 3 Radar Tomografisinde Kullanılan Anten Frekansı ve Kuyu Mesafesinin Etkisi

EK 1 Modelleme Uygulamaları

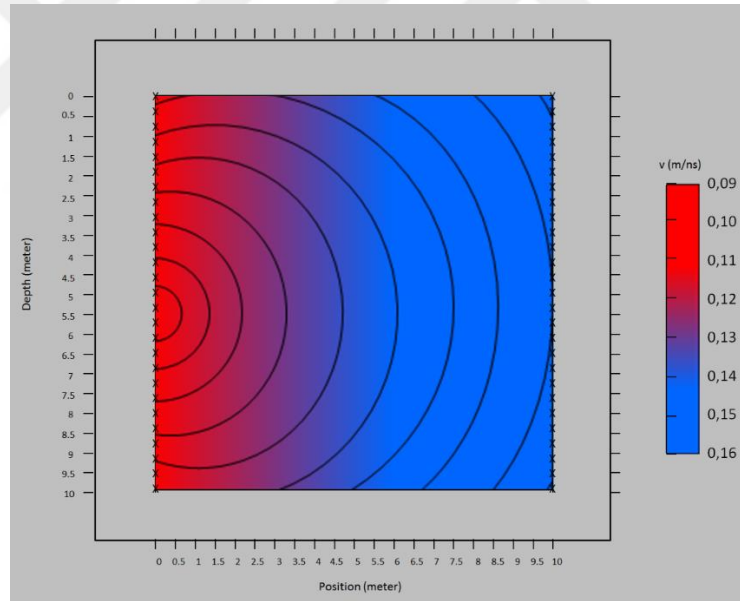
Bu başlık altında verilen uygulama örnekleri, Bölüm 6'da verilen modelleme çalışmalarına ek olarak yapılan yapay veri uygulamalarının farklı durumları gösteren yeraltı modelleri için irdelenmiştir.

İlk uygulamada yer alan örnek model için kuyu arası mesafe ve kuyu derinlikleri azaltılarak program tekrar çalıştırılmış ve sonuçlar irdelenmiştir. Bu modelde, iki kuyu arasındaki mesafe 8 m olarak seçilmiş, kuyu içerisinde de her 0,1 m bir ölçü alındığı kabul edilmiştir. Verilen örnekte verici anten 5,5 m derinde iken alıcı anten karşı kuyunun yüzeyinde kabul edilerek bu durum için seyahat zamanı değerleri hesaplanmıştır. Düşey yönde iki tabakayı ayıran bir kırığı ifade eden bu modelde, soldaki ortam 0,09 m/ns hızına sahip ve soldaki kuyumuzun başlangıç noktasından itibaren yatay yönde 3,5 m genişliğinde ve düşey yönde yüzeyden ölçünün bittiği noktaya kadar devam eden bir tabakaya karşılık gelmektedir. Yatay yönde yaklaşık 3,5 m civarında karşımıza çıkan kırık ile başka bir ortama geçilmektedir. Bu ikinci ortamda; yatay yönde sağdaki kuyumuzun bitiş noktasına kadar devam eden kısımda 6,5 m genişliğinde ve düşey yönde yüzeyden ölçümümüzün bittiği noktaya kadar olan derinliğe kadar devam eden kısımda ise 0.16 m/ns hıza sahip başka bir tabaka bulunmaktadır.

Bu durum için modelleme programı çalıştırılmış ve elde edilen seyahat zamanı değerleri kontur haritası olarak çizdirilmiştir (a). Giroux vd. (2007)'nin geliştirdiği Matlab tabanlı programında elde edilen sonuç ise b'de gösterilmektedir.



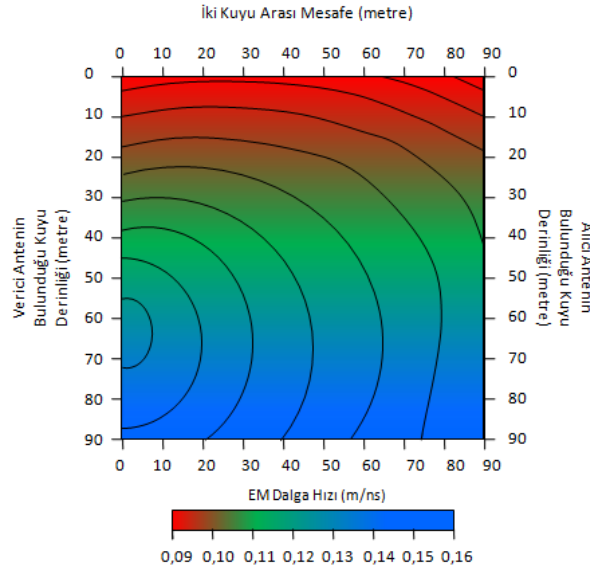
(a)



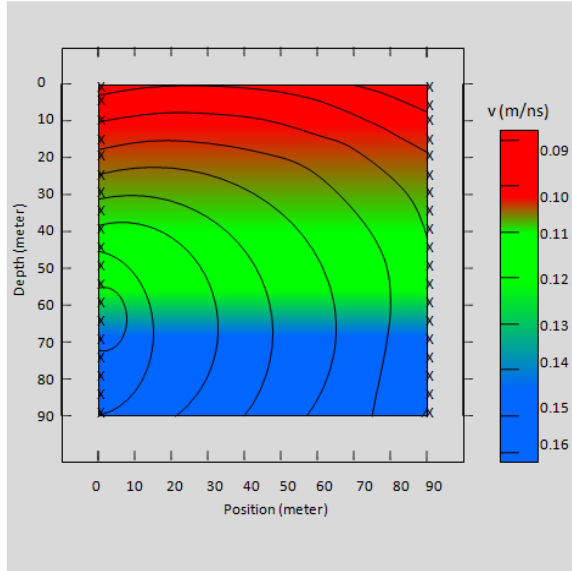
(b)

Düşey yönde bir kırık ile iki ortamı ayıran model, a. Geliştirilen modelleme programı ile elde edilen seyahat zamanı kontur haritası, b. Giroux vd. (2007)'nin geliştirdiği Matlab tabanlı program sonucu

Başka bir 3 tabakalı yatay tabaka modeli için modelleme programı çalıştırılmış ve elde edilen seyahat zamanı değerleri kontur haritası olarak çizdirilmiştir. Bu yer modeli için, programda giriş olarak okutulan dosyada 1. tabaka hızı 0,09 m/ns, 2. tabaka hızı 0,12 m/ns ve 3. tabaka hızı 0,16 m/ns olarak yazılmıştır. Giroux vd. (2007)'nin geliştirdiği Matlab tabanlı programında elde edilen sonuç aşağıda gösterilmektedir.



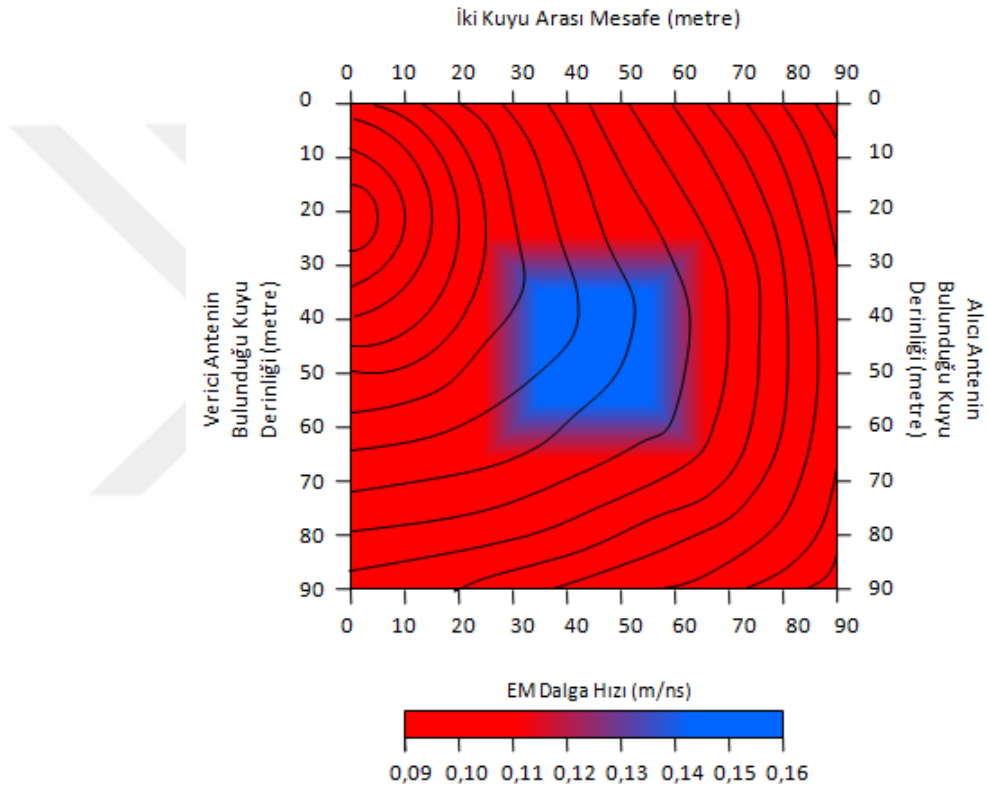
(a)



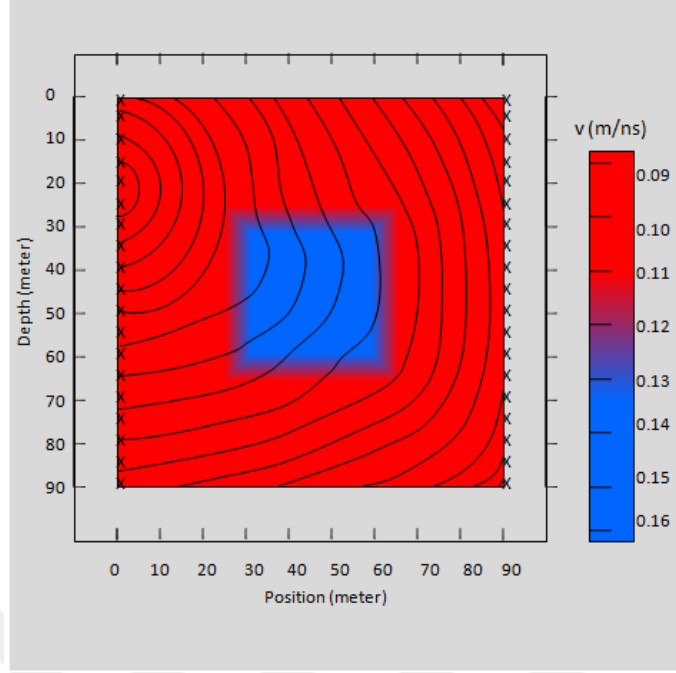
(b)

a. 3 tabakalı yatay yer modeli için modelleme ile elde edilen seyahat zamanı kontur haritası, b. Giroux vd. (2007)'nin geliştirdiği Matlab tabanlı program sonucu

Başka bir örnek modelde, sabit 0,16 m/ns'lik hıza sahip bir ortam içinde 30x30 m'lik bir alana sahip, yüzeyden 30 m derinde, kare şekilli ve 0,16 m/ns hızla sahip bir cisim bulunan model için modelleme programı çalıştırılmış ve elde edilen seyahat zamanı değerleri kontur haritası olarak çizdirilmiştir. Bu yer modeli için, programda giriş olarak okutulan dosyada cisim dışındaki ortamın tabaka hızı 0,09 m/ns'dir. Giroux vd. (2007)'nin geliştirdiği Matlab tabanlı programında elde edilen sonuç aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.



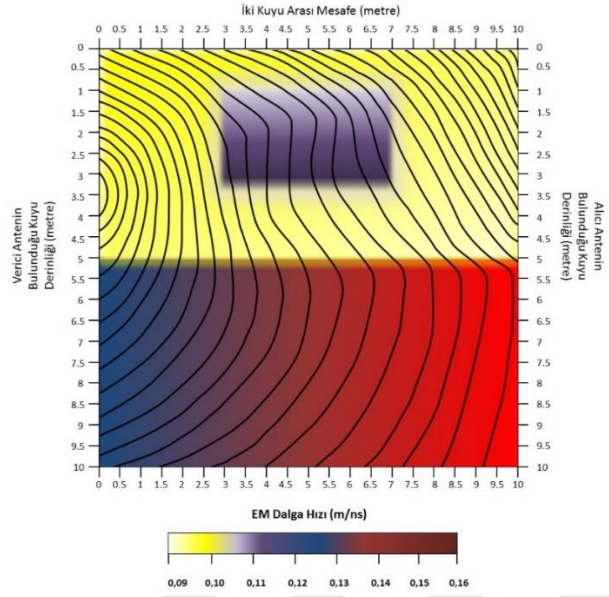
(a)



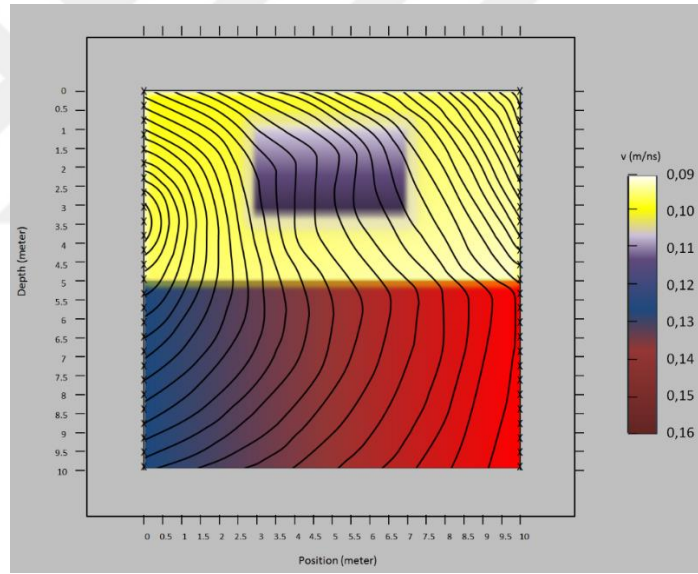
(b)

a. Yüksek hızlı bir ortam içinde gömülü olan düşük hızlı bir cismin bulunduğu yer modeli için modelleme ile elde edilen seyahat zamanı kontur haritası, b. Giroux vd. (2007)'nin geliştirdiği Matlab tabanlı program sonucu

Son olarak verilen örnek modlede ise, iki kuyu arasındaki mesafe 8 m olarak seçilmiş, kuyu içerisinde de her 0,1 m'de bir ölçü alındığı kabul edilmiştir. Verilen örnekte verici anten 3,5 m derinde iken alıcı anten karşı kuyunun yüzeyinde kabul edilerek bu durum için seyahat zamanı değerleri hesaplanmıştır. Modelde ilk ortam 0,09 m/ns hızına sahip ve 5 m kalınlığında bir tabakaya karşılık gelmektedir. Ortam içine hızı 0.11 m/ns olan dikdörtgen şeklide, boyu 4 m, eni 2 m ve yüzeyden 1 m derinde olan bir cisim yerleştirilmiştir. z yönünde derine doğru gidilirken 5 m'den sonra 10 m'ye kadar olan kısımda ikinci bir ortama girilmektedir. Bu ikinci ortamda; z değerinin 5 m olduğu durum için, x değerinin 0 m'den 2 m'ye kadar değiştiği kısımda 0.13 m/ns hıza sahip başka bir tabaka ve z değerinin 5 m olduğu durum için, x değerinin 2 m'den 10 m'ye kadar değiştiği kısımda ise 0.16 m/ns hıza sahip başka bir tabaka bulunmaktadır. Bu karmaşık model için modelleme programı çalıştırılmış ve elde edilen seyahat zamanı değerleri kontur haritası olarak çizdirilmiştir. Aşağıda verilen şekilde Giroux vd. (2007)'nin geliştirdiği Matlab tabanlı programında elde edilen sonuç gösterilmektedir.



(a)



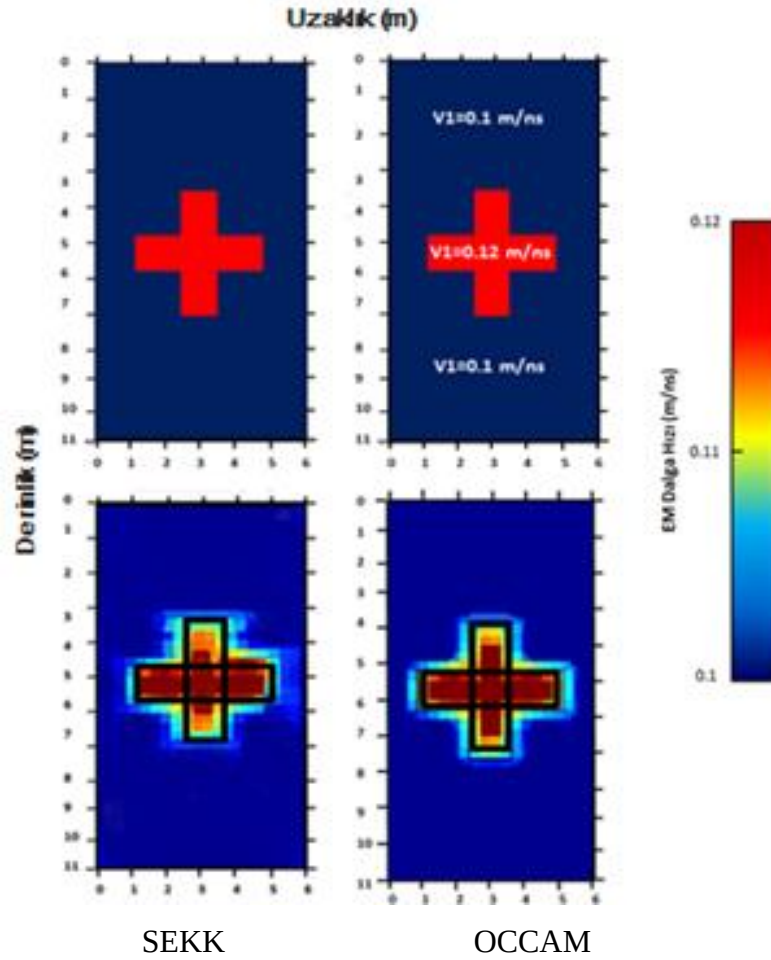
(b)

Yüksek hızlı bir ortam içinde gömülü olan düşük hızlı bir cismin bulunduğu yer modeli, a. Geliştirilen modelleme programı ile elde edilen seyahat zamanı kontur haritası, b. Giroux vd. (2007)'nin geliştirdiği Matlab tabanlı program sonucu

EK 2 Ters Çözüm Uygulamaları

Model 1:

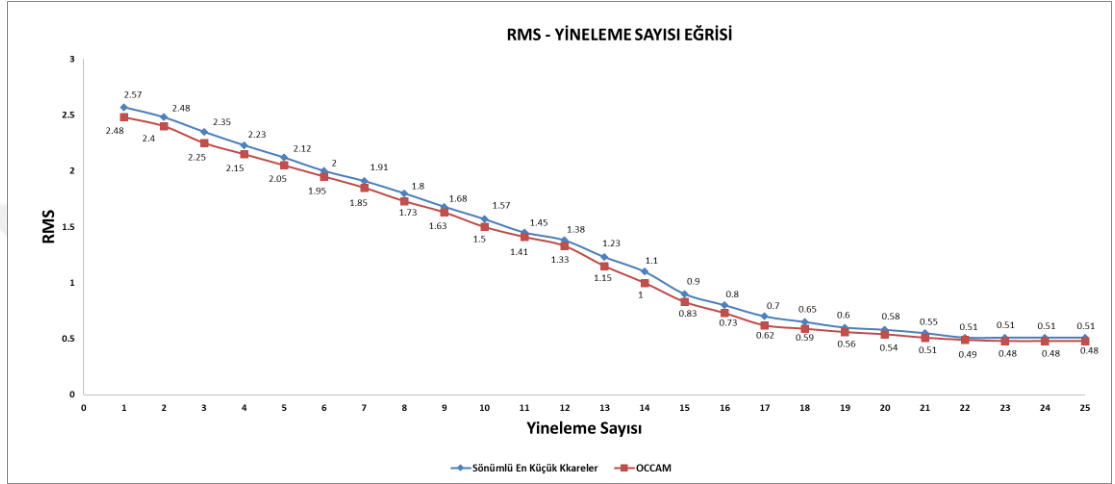
EM dalga hızı 0.1 m/ns olan ortamda 0.12 m/ns yüksek hıza sahip artı şeklinde bir gömülü bir nesnenin bulunduğu model kullanılmıştır. Model 0.25x0.25 m boyutunda hücrelere bölünmüş ve toplamda 1056 adet hücre için işlem yapılmıştır. Yüzeyden 11 m derinliğe kadar inen kuyu boyunca alıcı ve verici antenler 0.25 m aralıklarla kaydırılarak ölçü alınmıştır. İki kuyu arası mesafe 6 m kuyu derinlikleri ise 11 m'dir. Anten frekansı 250 MHz'dir.



(a)

Yöntem	Alıcı-Verici Arası Mesafe (m)	Kuyu Derinliği (m)	Yineleme Sayısı	RMS	Hesaplama Zamanı (Dakika)
Sönümlü En küçük Kareler	6	11	25	0.51	30,23
OCCAM	6	11	25	0.48	30,32

(b)

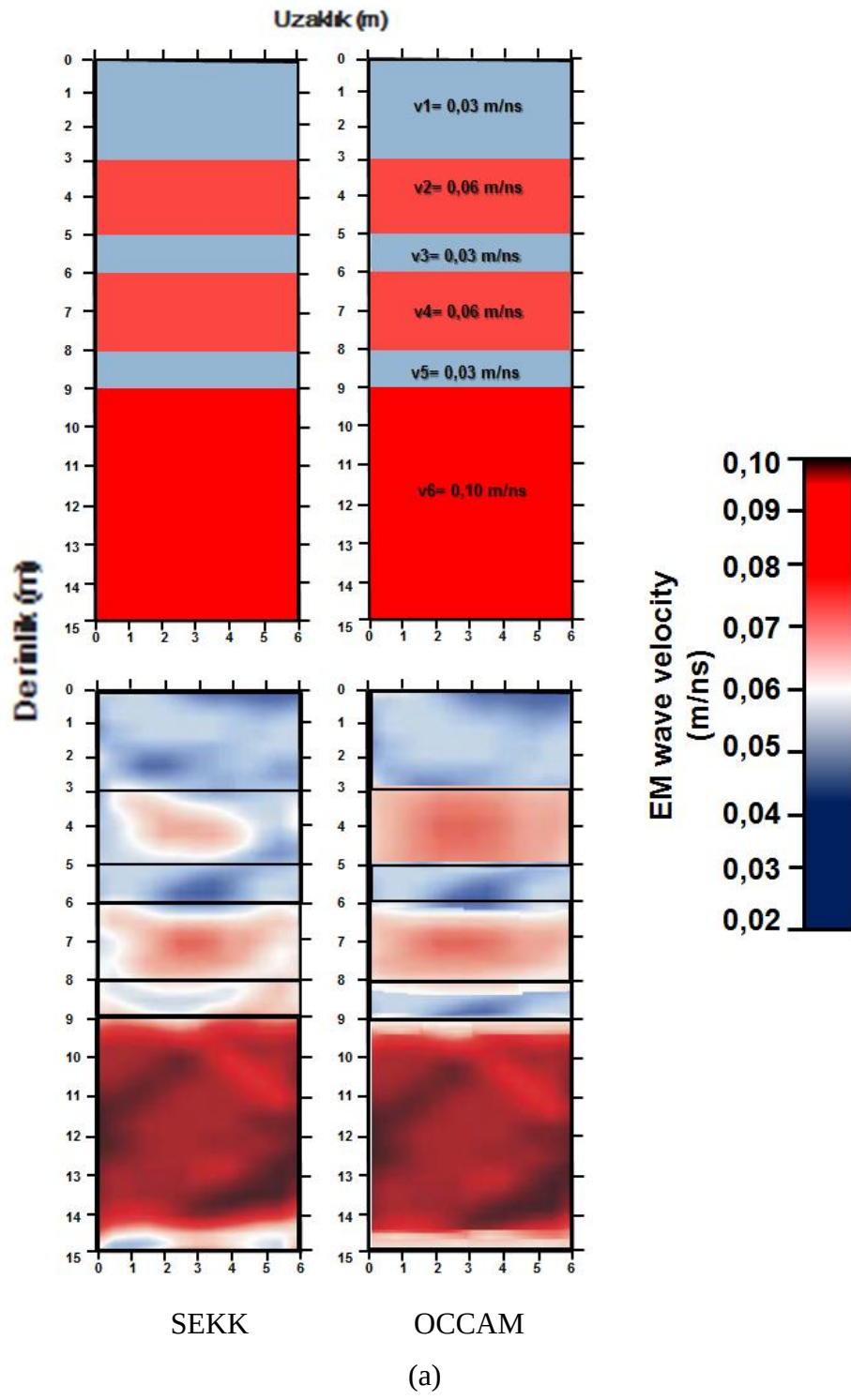


(c)

- a. Tüm parametreler aynı seçilerek yapılan SEKK ve OCCAM ters çözüm yöntemi ve sonuçları, b. Ters çözüm işlemi sonucu elde edilen sayısal değerleri gösteren tablo, c. Modellere ait RMS ve iterasyon sayısını gösteren eğrilerin karşılaştırıldığı grafik

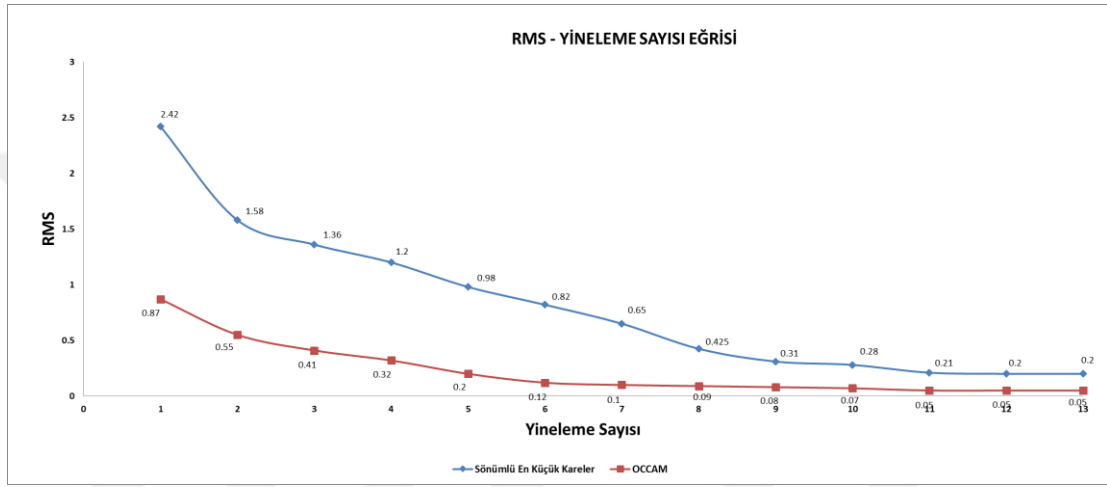
Model 2:

Ortam EM dalgı hızı 0.03 m/ns, 0.06 m/ns ve 0.10 m/ns olan yatay 6 tabakadan oluşmaktadır. Model 0.25x0.25 m boyutunda hücrelere bölünmüş ve toplamda 1440 adet hücre için işlem yapılmıştır. Yüzeyden 15 m derinliğe kadar inen kuyu boyunca alıcı ve verici antenler 0.25 m aralıklarla kaydırılarak ölçü alınmıştır. İki kuyu arası mesafe 6 m kuyu derinlikleri ise 15 m'dir. Anten frekansı 250 MHz'dir.



Yöntem	Alıcı-Verici Arası Mesafe (m)	Kuyu Derinliği (m)	Yineleme Sayısı	RMS	Hesaplama Zamanı (Dakika)
Sönümlü En küçük Kareler	6	15	13	0.2	36,21
OCCAM	6	15	13	0.05	39,57

(b)

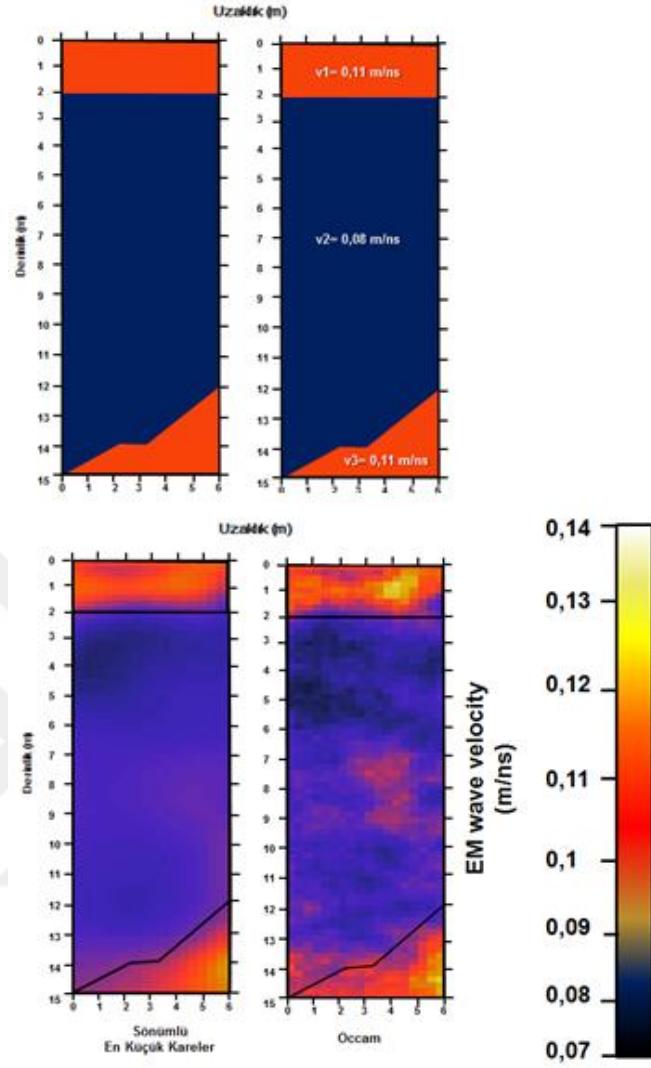


(c)

- a. Tüm parametreler aynı seçilerek yapılan SEKK ve OCCAM ters çözüm yöntemi ve sonuçları, b. Ters çözüm işlemi sonucu elde edilen sayısal değerleri gösteren tablo, c. Modellere ait RMS ve iterasyon sayısını gösteren eğrilerin karşılaştırıldığı grafik

Model 3:

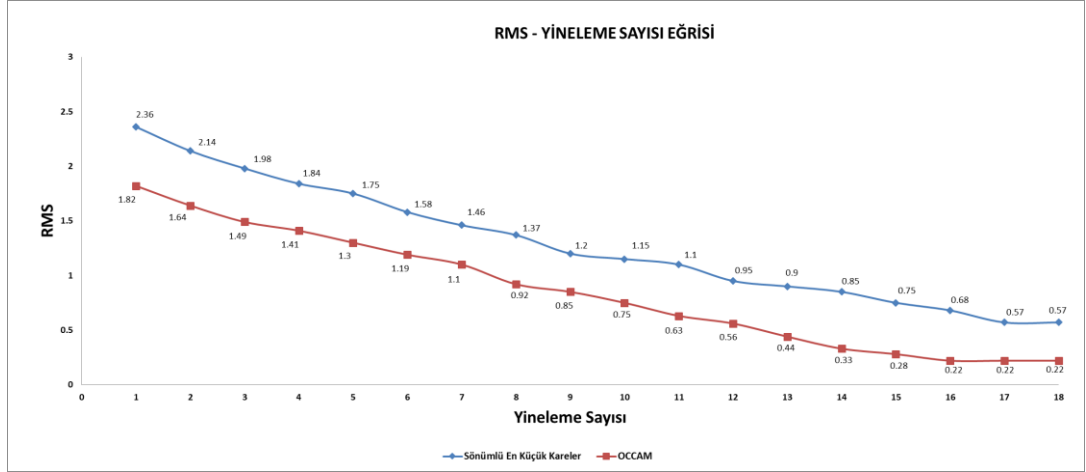
En üstte EM dalga hızı 0.11 m/ns olan yüksek hızlı bir tabaka, onun altında ise EM dalga hızı 0.08 m/ns olan düşük hıza sahip ikinci bir tabaka bulunmaktadır. Üçüncü tabakanın üst sınırı 45 derecelik bir eğime sahip basamak şeklindedir ve yine 0.11 m/ns lik yüksek Em dalga hızına sahiptir. Model 0.25x0.25 m boyutunda hücrelere bölünmüş ve toplamda 1440 adet hücre için işlem yapılmıştır. Yüzeyden 15 m derinliğe kadar inen kuyu boyunca alıcı ve verici antenler 0.25 m aralıklarla kaydırılarak ölçü alınmıştır. İki kuyu arası mesafe 6 metre kuyu derinlikleri ise 15 metredir. Anten frekansı 250 MHz'dir.



(a)

Yöntem	Alıcı-Verici Arası Mesafe (m)	Kuyu Derinliği (m)	Yineleme Sayısı	RMS	Hesaplama Zamanı (Dakika)
Sönümlü En küçük Kareler	6	15	18	0.57	42,19
OCCAM	6	15	18	0.22	50,57

(b)

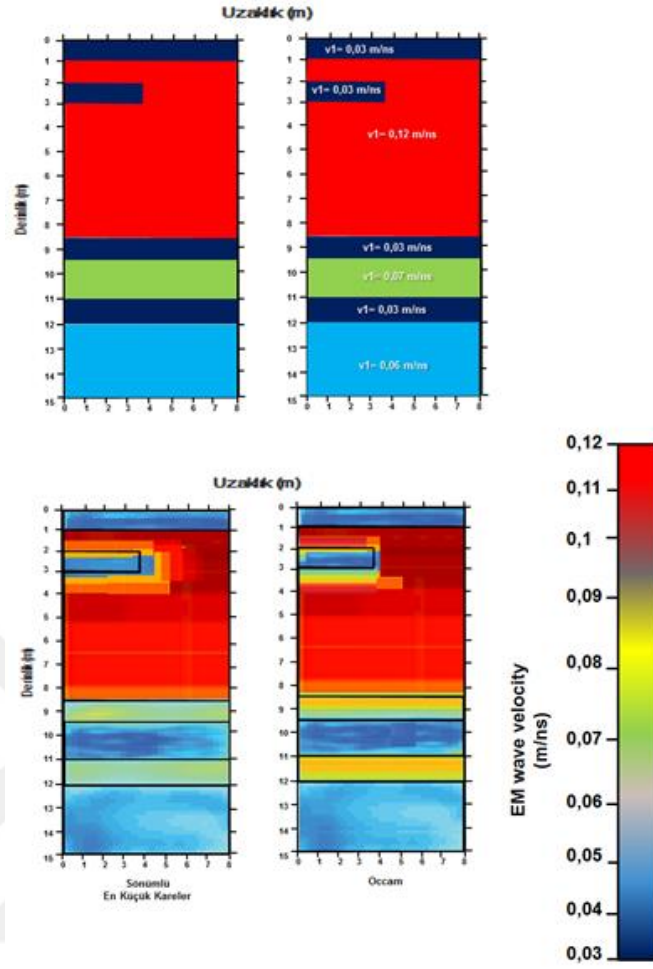


(c)

- a. Tüm parametreler aynı seçilerek yapılan SEKK ve OCCAM ters çözüm yöntemi ve sonuçları, b. Ters çözüm işlemi sonucu elde edilen sayısal değerleri gösteren tablo, c. Modellere ait RMS ve iterasyon sayısını gösteren eğrilerin karşılaştırıldığı grafik

Model 4:

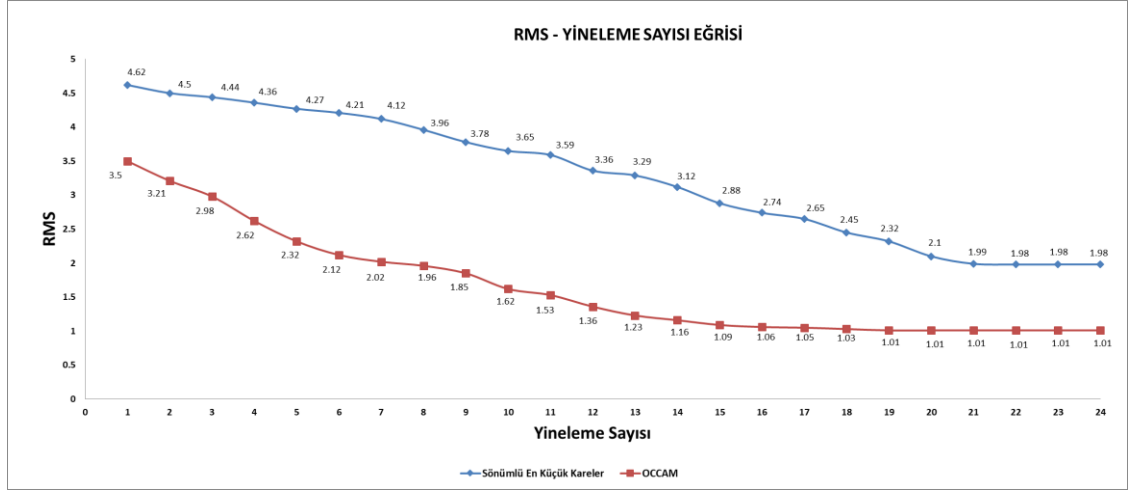
EM dalga hızı 0.12m/ns olan yüksek hızlı bir ortam içinde EM dalga hızı 0.03 m/ns olan düşük hızlı suyun olduğu bir ortam bulunmaktadır. Yüksek hızlı tabaka altında tekrar EM dalga hızı düşük olan suyun bulunduğu ardalımalı tabakalar ve bu tabakalar arasında suya göre kısmen hızı biraz daha yüksek olan kil ve siltlerin bulunduğu tabakalar yer almaktadır. Model 0.25x0.25 m boyutunda hücrelere bölünmüş ve toplamda 1920 adet hücre için işlem yapılmıştır. Yüzeyden 15 m derinliğe kadar inen kuyu boyunca alıcı ve verici antenler 0.25 m aralıklarla kaydırılarak ölçü alınmıştır. İki kuyu arası mesafe 8 metre kuyu derinlikleri ise 15 metredir. Anten frekansı 250 MHz'dir.



(a)

Yöntem	Alıcı-Verici Arası Mesafe (m)	Kuyu Derinliği (m)	Yineleme Sayısı	RMS	Hesaplama Zamanı (Dakika)
Sönümlü En küçük Kareler	8	15	24	1.98	48,56
OCCAM	8	15	24	1.01	57,08

(b)

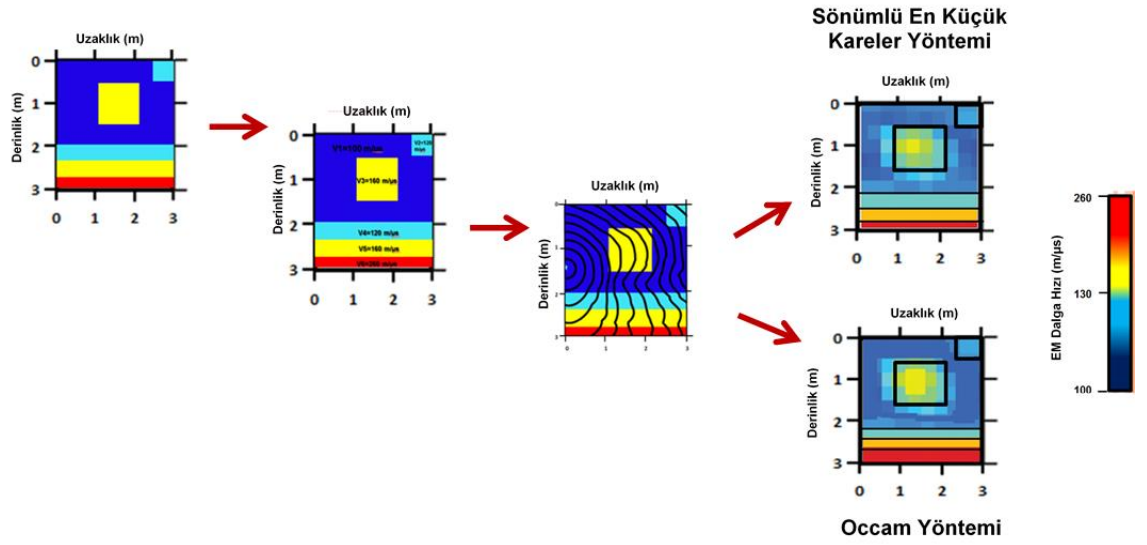


(c)

- a. Tüm parametreler aynı seçilerek yapılan SEKK ve OCCAM ters çözüm yöntemi ve sonuçları, b. Ters çözüm işlemi sonucu elde edilen sayısal değerleri gösteren tablo, c. Modellere ait RMS ve iterasyon sayısını gösteren eğrilerin karşılaştırıldığı grafik

Model 5:

EM dalga hızı 100 m/μs olan yüksek hızlı bir ortam içinde EM dalga hızı 120 m/μs ve 160 m/μs olan ortama göre daha yüksek hızlı 2 farklı boyutta ve kare şekilli gömülü yapılar bulunmaktadır. Düşük hızlı bu tabaka altında EM dalga hızı 120 m/μs olan 2. bir tabaka, onun altında EM dalga hızı 160 m/μs olan daha yüksek hızlı bir tabaka, son ve dördüncü olarak da EM dalga hızı 260 m/μs olan tabakanın bulunduğu bir yapay veri üretilmiştir. Model 0.25x0.25 m boyutunda hücrelere bölünmüş ve toplamda 144 adet hücre için işlem yapılmıştır. Yüzeyden 3 m derinliğe kadar inen kuyu boyunca alıcı ve verici antenler 0.25 m aralıklarla kaydırılarak ölçü alınmıştır. İki kuyu arası mesafe 3 metre kuyu derinlikleri ise 3 metredir. Anten frekansı 250 MHz'dir.



(a)

Yöntem	Alıcı-Verici Arası Mesafe (m)	Kuyu Derinliği (m)	Yineleme Sayısı	RMS	Hesaplama Zamanı (Dakika)
Sönümlü En küçük Kareler	3	3	12	0.16	12,16
OCCAM	3	3	9	0.07	10,03

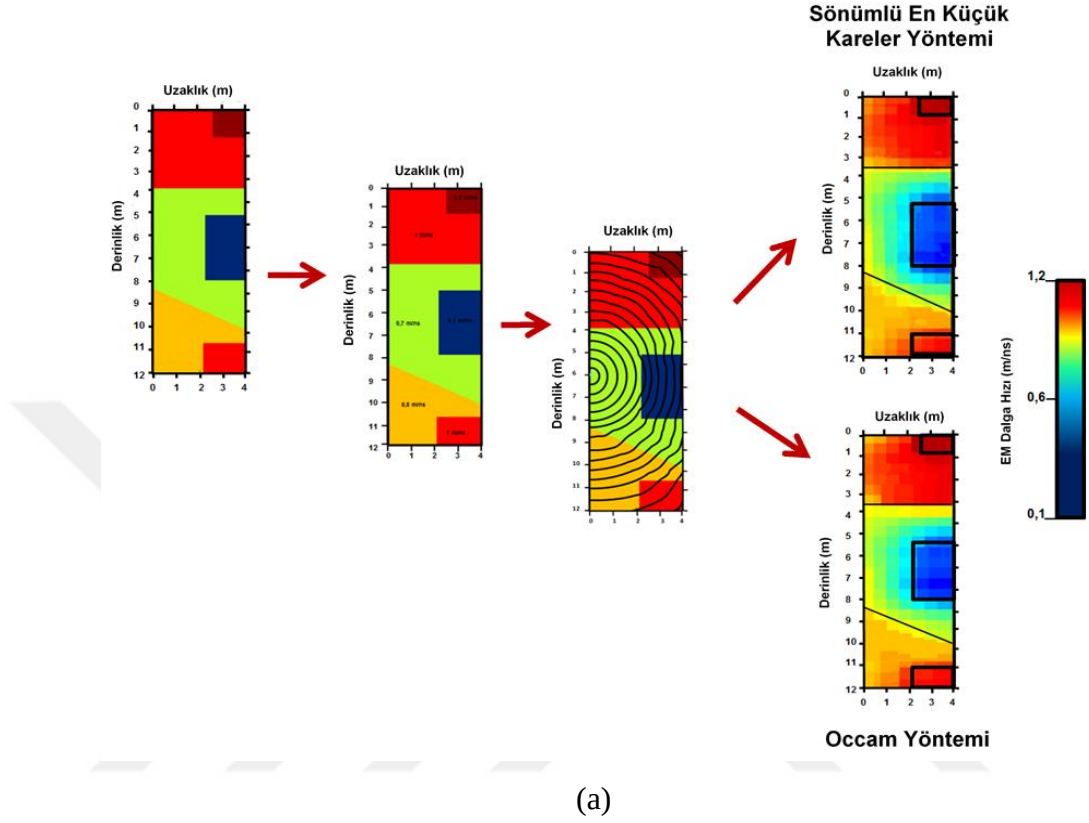
(b)

a. Tüm parametreler aynı seçilerek yapılan SEKK ve OCCAM ters çözüm yöntemi ve sonuçları, b. Ters çözüm işlemi sonucu elde edilen sayısal değerleri gösteren tablo

Model 6:

İçerisinde 1,2 m/ns EM dalga hızı olan kare şekilli gömülü bir yapı barındıran ilk tabakanın EM dalga hızı 1 m/ns dir. İçinde 0,1 m/ns EM dalga hızlı dikdörtgen şekilli gömülü bir yapı barındıran 2. tabakanın EM dalga hızı ise 0,7 m/ns dir. 45 derece eğimli olan 3. tabakanın EM dalga hızı 0,8 m/ns dir ve içerisinde 1 m/ns EM dalga hızı olan kare şekilli gömülü bir yapı barındırmaktadır. Model 0.25x0.25 m boyutunda hücrelere bölünmüş ve toplamda 768 adet hücre için işlem yapılmıştır. Yüzeyden 12 m derinliğe kadar inen kuyu boyunca alıcı ve verici antenler 0.25 m aralıklarla kaydırılarak ölçü

alınmıştır. İki kuyu arası mesafe 4 metre kuyu derinlikleri ise 12 metredir. Anten frekansı 250 MHz'dir.



Yöntem	Alıcı-Verici Arası Mesafe (m)	Kuyu Derinliği (m)	Yineleme Sayısı	RMS	Hesaplama Zamanı (Dakika)
Sönümlü En küçük Kareler	4	12	29	0.36	35,48
OCCAM	4	12	24	0.31	32,64

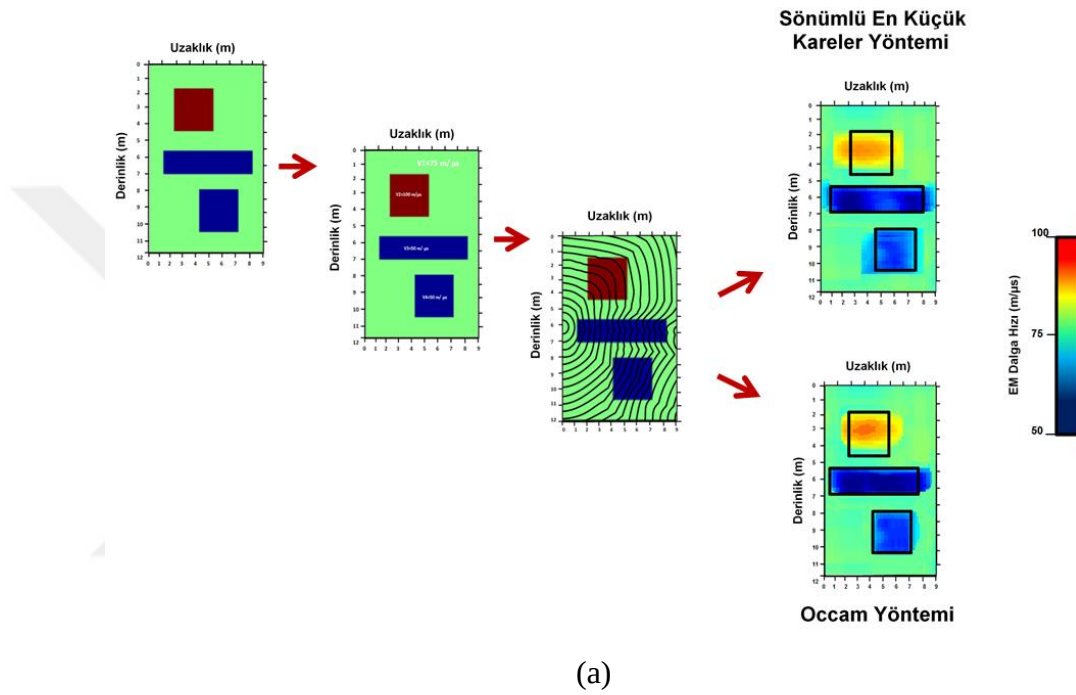
(b)

a. Tüm parametreler aynı seçilerek yapılan SEKK ve OCCAM ters çözüm yöntemi ve sonuçları, b. Ters çözüm işlemi sonucu elde edilen sayısal değerleri gösteren tablo

Model 7:

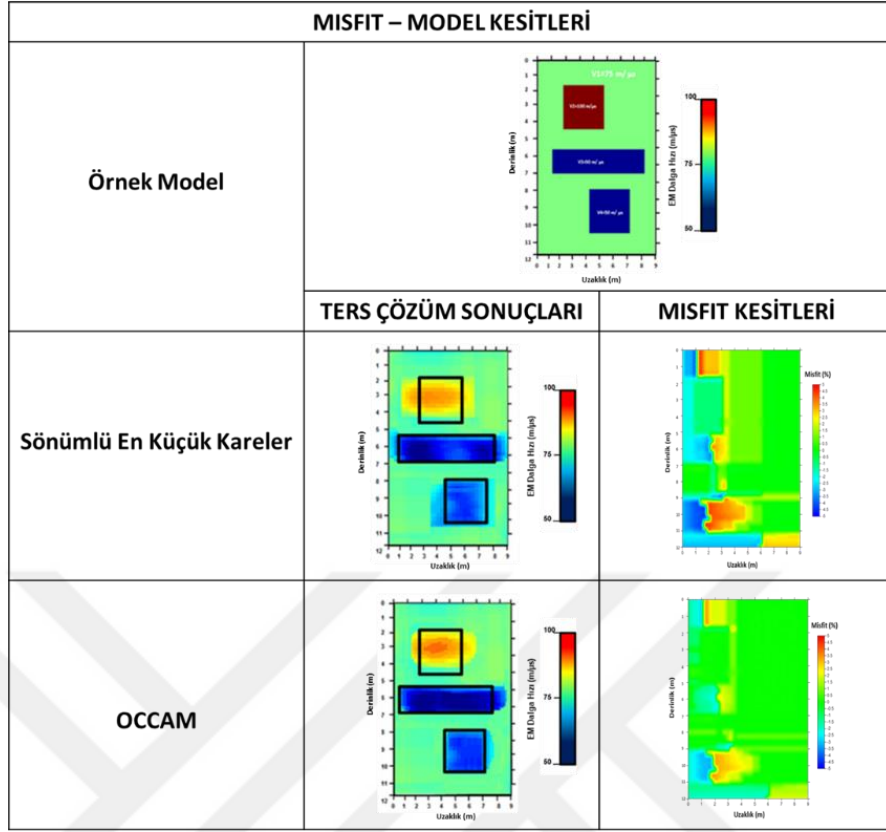
EM dalga hızı 75 m/μs olan yüksek hızlı bir ortam içinde EM dalga hızı 100 m/μs ve 50 m/μs olan ortama göre daha düşük ve daha yüksek hızlı 3 farklı boyutta, dikdörtgen

ve kare şekilli gömülü yapılar bulunmaktadır. Model 0.25x0.25 m boyutunda hücrelere bölünmüş ve toplamda 1728 adet hücre için işlem yapılmıştır. Yüzeyden 12 m derinliğe kadar inen kuyu boyunca alıcı ve verici antenler 0.25 m aralıklarla kaydırılarak ölçü alınmıştır. İki kuyu arası mesafe 9 metre kuyu derinlikleri ise 12 metredir. Anten frekansı 250 MHz'dir.



Yöntem	Alıcı-Verici Arası Mesafe (m)	Kuyu Derinliği (m)	Yineleme Sayısı	RMS	Hesaplama Zamanı (Dakika)
Sönümlü En küçük Kareler	9	12	17	1.63	22,34
OCCAM	9	12	24	1.02	28,32

(b)



(c)

- a. Tüm parametreler aynı seçilerek yapılan SEKK ve OCCAM ters çözüm yöntemi ve sonuçları, b. Ters çözüm işlemi sonucu elde edilen sayısal değerleri gösteren tablo, c. Yavaşlık kestirim modeline ait MISFIT kesitleri

EK 3 Radar Tomografisinde Kullanılan Anten Frekansı ve Kuyu Mesafesinin Etkisi

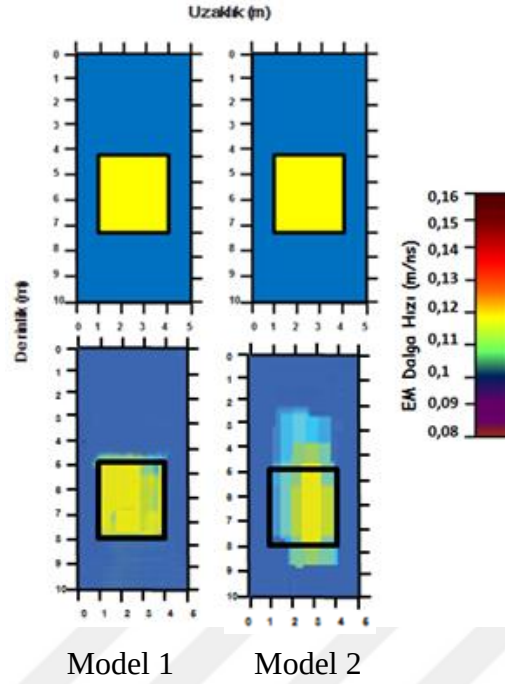
Tez konusu kapsamında yapılan ters çözüm çalışmalarının irdelenmesi için farklı yapay veriler oluşturularak ya da bu konuda çalışan kişilerce yapılan örnek modeller kullanılarak uygulamalar yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda, tez kapsamında geliştirilen ışın izleme tabanlı seyahat zamanının ters çözümü kullanılarak yazılan algoritmalar ile de elde edilen sonuçlarla karşılaştırmalar yapılmıştır.

Modeller üzerinde karşılaştırmalar yapılırken; ters çözüm işleminde hangi parametrenin ne şekilde seçilmesi gerektiğine yönelik çalışmalar da yapılmış ve buna göre ne şekilde parametre seçiminin yapılacağı hususu dikkate alınmıştır. Bu seçimin doğruluğu, giriş modelinin ters çözüm işlemi sonucunda doğruya yakın sonuç vermesini önemli ölçüde etkileyeceğinden, farklı parametre seçimlerinin irdelenmesi de önem arz etmektedir.

Bu deneştirme işlemi için gömülü yapı derinliği ve anten frekansı gibi parametreler sırasıyla değiştirilmiş, bu değişiklik yapılırken diğer tüm parametreler sabit tutularak hesaplama yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Anten Frekansına Göre Değişim:

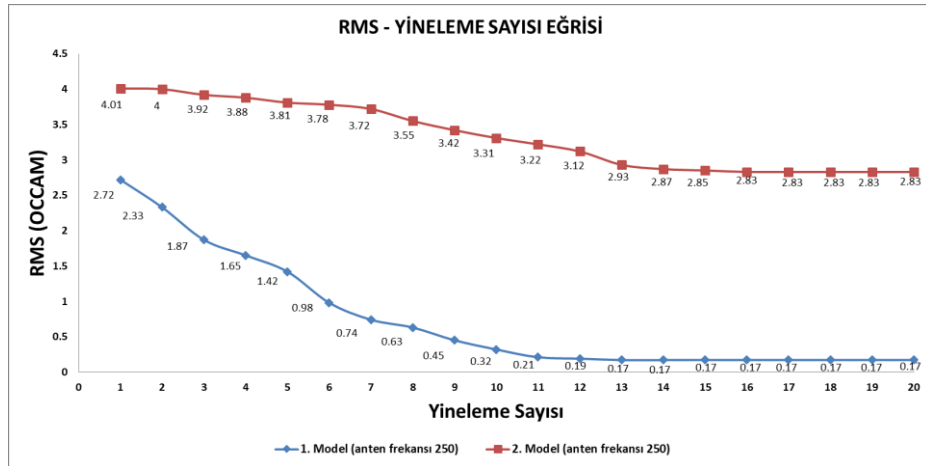
Kullanılan anten frekansının değişiminin incelenmesi için oluşturulan bu örnek yapay veride; EM dalga hızı 0.1 m/ns olan homojen ortamda 0.12 m/ns yüksek hıza sahip homojen 3x3 m lik kare şekilli gömülü bir nesne bulunmaktadır. Model 1x1 m boyutunda hücrelere bölünmüş ve toplamda 50 adet hücre için işlem yapılmıştır. Yüzeyden 0 m'den başlayan ve 10 m derinliğe kadar inen kuyu boyunca alıcı ve verici antenler 1 m aralıklarla kaydırılarak ölçü alınmıştır. İki kuyu arası mesafe 5 m kuyu derinlikleri ise 10 m'dir. Anten frekansı 1. modelde 250 MHz, 2. modelde ise 500 MHz dir.



(a)

Model No	Alıcı-Verici Arası Mesafe (m)	Kuyu Derinliği (m)	Model Boyutları (mxm)	Sönüm Faktörü	Yineleme Sayısı	RMS	Hesaplama Zamanı (Dakika)
1	5	10	3x3	0,17	20	0.17	15,18
2	5	10	3x3	0,17	20	2.83	16,25

(b)

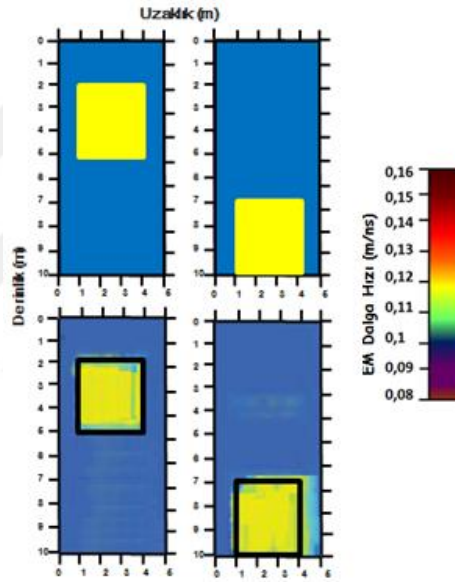


(c)

a. Kullanılan anten frekansının değiştiği 2 farklı yeraltı modeli ve ters çözüm sonuçları, b. Ters çözüm işlemi sonucu elde edilen sayısal değerleri gösteren tablo. c. Modellere ait RMS ve iterasyon sayısını gösteren eğrilerin karşılaştırıldığı grafik

Yapı Derinliğine Göre Değişim:

Ortamda gömülü yapı derinliğinin değişiminin incelenmesi için oluşturulan bu örnek yapay veride; EM dalga hızı 0.1 m/ns olan homojen ortamda 0.12 m/ns yüksek hıza sahip homojen kare şekilli bir yapı bulunmaktadır. Model 1x1 m boyutunda hücrelere bölünmüş ve toplamda 50 adet hücre için işlem yapılmıştır. Yüzeyden 0 m'den başlayan ve 10.5 m derinliğe kadar inen kuyu boyunca alıcı ve verici antenler 1 m aralıklarla kaydırılarak ölçü alınmıştır. İki kuyu arası mesafe 5 m kuyu derinlikleri ise 10 m'dir. Anten frekansı 250 MHz.dir.

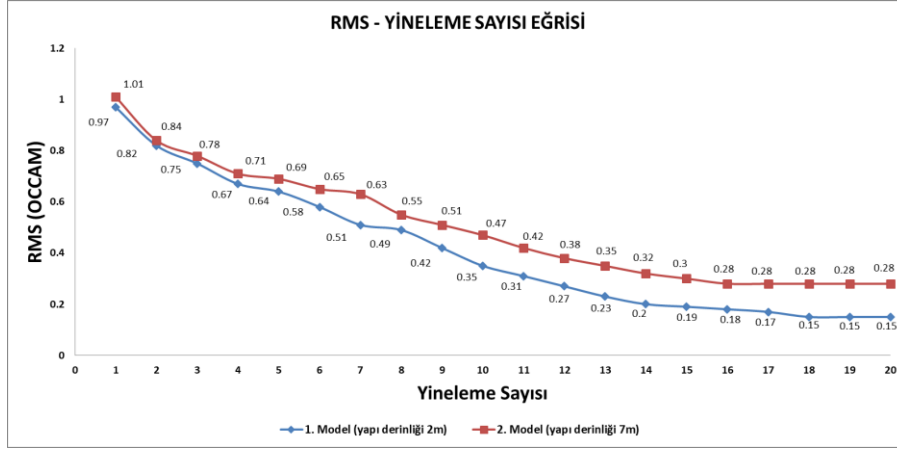


Model 1 Model 2

(a)

Model No	Alıcı-Verici Arası Mesafe (m)	Kuyu Derinliği (m)	Model Boyutları (mxm)	Sönüm Faktörü	Yapının Derinliği (m)	Yineleme Sayısı	RMS	Hesaplama Zamanı (Dakika)
1	5	10	3x3	0,17	2	20	0.15	14
2	5	10	3x3	0,17	7	20	0.28	13,18

(b)



(c)

- Ortamda gömülü yapının derinliğinin değiştiği 2 farklı yeraltı modeli ve ters çözüm sonuçları,
- Ters çözüm işlemi sonucu elde edilen sayısal değerleri gösteren tablo,
- Modellere ait RMS ve iterasyon sayısını gösteren eğrilerin karşılaştırıldığı grafik

Sonuç olarak; yapılan uygulamalar incelendiğinde, parametre değişimleri ile yapılan tomografi uygulamaları sonucu aynı iterasyon sayısı ile sonuca ulaşıldığında hesaplanan RMS değeri değişimleri örnek uygulamalar üzerinde gösterilmiş olup, yeraltı modeli içinde var olduğu düşünülen yapı boyutları büyüdükçe, yapı/gömülü nesnenin tespitinin daha doğru ve kolay yapıldığı, yapılan tomografi işlemi sonucunda RMS değerinin azaldığı ancak hesaplama süresinin arttığı, gömülü nesnenin yüzeyde ya da derinde olması halinde yapı hızının ortamın hızı ile olan farkının da etkisiyle yapı sınırlarının tespitinin daha doğru yapılabileceği ve anten frekansı azaldıkça RMS değerinin ve hesaplama zamanının azaldığı görülmüştür.