

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ZAMAN ORTAMINDA SONLU FARKLAR YÖNTEMİ İLE İKİ BOYUTLU
YER RADARI MODELLEMESİ**

Büşra Bihter KURT

JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

ANKARA

2009

Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Büşra Bihter KURT tarafından hazırlanan “Zaman Ortamında Sonlu Farklar Yöntemi İle İki Boyutlu Yer Radarı Modellemesi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: *Yrd. Doç. Dr. Selma KADIOĞLU*

Jüri Üyeleri :

Yrd. Doç. Dr. Emin ULUGERGERLİ
(Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü)

Yrd. Doç. Dr. Mehmet Emin CANDANSAYAR
(Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği A.B.D)

Yrd. Doç. Dr. Selma KADIOĞLU
(Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği A.B.D)

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Orhan ATAKOL

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ZAMAN ORTAMINDA SONLU FARKLAR YÖNTEMİ İLE İKİ BOYUTLU YER RADARI MODELLEMESİ

Büşra Bihter KURT

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Selma KADIOĞLU

Yer radarı yönteminde modelleme, fiziksel parametreleri (dielektrik katsayısı, elektriksel iletkenlik ve manyetik geçirgenlik) ve geometrik parametreleri ile tanımlı yer altı modelinin elektromanyetik dalga alanı kesitini (radargramı) elde etme işlemidir. Yer altı modelinin fiziksel ve geometrik parametre değişimleri ile modele ait elde edilen radargram üzerindeki değişimleri karşılaştırarak yer radarı yönteminde yorumlama yeteneğini artırmak mümkündür.

Bu çalışmada, elektromanyetik dalga alanı yayılımı için, MATLAB programlama dili kullanılarak zaman ortamında iki boyutlu sonlu farklar algoritması geliştirilmiştir. Farklı yer altı modelleri ve gömülü cisimler için farklı merkez frekanslı antenler ile elektromanyetik dalga alanları hesaplanmıştır. Böylece tanımlanan modellere ait radargramlar elde edilmiştir. Yer altı modellerindeki herhangi bir parametrenin değişimi ile radargramlar üzerindeki farklılıklar ortaya konulmuştur. Ayrıca gömülü cismin geometrik büyüklükleri değiştirilerek radargramlar üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Ocak 2009, 96 sayfa

Anahtar Kelimeler: Yer radarı, zaman ortamında sonlu farklar, modelleme, radargram, elektromanyetik dalga alanı.

ABSTRACT

Master Thesis

MODELLING OF GROUND PENETRATING RADAR WITH TWO DIMENSIONAL FINITE DIFFERENCE TIME DOMAIN METHOD

Büşra Bihter KURT

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

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Selma KADIOĞLU

Modeling of ground penetrating radar is to obtain elektromagnetic wavefield section (radargram) of subsurface model which is defined by physical parametres (dielectric permivity, electrical conductivity, magnetic permeability) and geometrical parameters. The ability of interpretation in ground penetrating radar method by comparing the changing in the physical and geometrical parameters in the subsurface model with the changing on the obtained radargram belonging to the model.

In this study a two dimensional time domain finite difference algorithm for the electromagnetic wave field propagation has been developed by using MATLAB programing language. EM wave fields have been computed for different subsurface models and burried objects with different central frequency antennas. Therefore; radargrams belonging to defined subsurface models have been obtained. Differences on the radargrams have been defined with changing any parameters in the subsurface models. In addition, the effects which seem on the radargrams have been analysed by changing the geometric sizes of the burried objects.

January 2009, 96 pages

Key Words: Ground penetrating radar, finite difference time domain, modeling, radargram, electomagnetic wavefield.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarında bana yardımcı olan, bilgi, tecrübe ve desteğini benden esirgemeyen, tezin oluşumunda önemli katkılarda bulunan danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Selma KADIOĞLU'na (Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi) teşekkürlerimi sunarım. Fikirleriyle tezime katkı sağlayan ve tezin her aşamasında yanımda olan ve görüşlerini aldığım Sayın Yrd. Doç. Dr. Mehmet Emin CANDANSAYAR'a (Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi), Sayın Yrd. Doç. Dr. Emin ULUGERGERLİ'ye (Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi), Araş. Gör. Esra Ezgi EKİNCİOĞLU'na teşekkür ederim.

Tez çalışmam sırasında manevi desteğini hiç eksik etmeyen ayrıca eleştirileriyle tezime önemli katkı sağlayan, üzüntümü ve sevincimi benimle paylaşan arkadaşım İsmail Demirci'ye teşekkür ederim.

Yurt içi yüksek lisans burs programı ile yüksek lisans öğrenciliğim boyunca beni desteklediği için Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) Bilim İnsanı Destekleme Başkanlığı'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Modelleme çalışmaları Ankara Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü Yer Bilimleri Veri İşlem Laboratuvarındaki (YEBVİL) bilgisayar donanımı ile gerçekleştirilmiştir. Sağlanan imkânlar için, Ankara Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü bölüm başkanlığına teşekkür ederim.

Ayrıca, tüm bu süre içerisinde maddi ve manevi beni destekleyen ve daima yanımda olarak başarıya ulaşmamı sağlayan sevgili babam, annem ve kardeşlerime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Büşra Bihter KURT
Ankara, Ocak 2009

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
SİMGELER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1 . GİRİŞ.....	1
2 .YER RADARI YÖNTEMİ.....	3
2.1 Yöntemin Tarihçesi.....	3
2.2 Yöntemin Tanımı ve Çalışma İlkesi	4
2.3 Yöntem Ekipmanları ve Ekipmanların Görevleri	6
2.4 Yöntemde Kullanılan Açık Anten Düzenekleri.....	7
2.5 Yöntemde Veri Toplama	8
3 . EM DALGA DENKLEMLERİ.....	12
3.1 Maxwell Denklemleri.....	12
3.2 Zaman Ortamında EM Dalga Denklemleri.....	13
3.2.1 Elektrik alan dalga denklemi	13
3.2.2 Manyetik alan dalga denklemi.....	14
3.3 Frekans Ortamında EM Dalga Denklemleri	15
4 . KARTEZYEN KOORDİNATLARDA TE ve TM-MODUNDA İKİ BOYUTLU MAXWELL DENKLEMLERİ	17
4.1 TM-Modunda Maxwell Denklemleri	17
4.2 TE-Modunda Maxwell Denklemleri.....	19
4.3 TM ve TE-Modlarında Maxwell Denklemlerinin Frekans Ortamındaki İfadeleri	20
5 . MAXWELL DENKLEMLERİNİN SONLU FARKLARLA TANIMLANMASI	22

5.1 Sonlu Farklar Yaklaşımı	22
5.2 Maxwell Denklemlerinin Sonlu Farklarla Uyarlanması	25
5.2.1 Bir boyutlu (1B) durum	25
5.2.2 İki boyutlu (2B) durum.....	29
6 . YER RADARI YÖNTEMİNDE İKİ BOYUTLU MODELLEME.....	34
6.1 Yüzey Yer Radarında Modelleme ve Sınır Koşulları	34
6.2 FDTD Yönteminde Kararlılık Koşulu ve Sayısal Dispersiyon	46
6.3 Kaynak Tanımlaması.....	48
6.4 Alıcı ve Verici Anten Konumu	49
7 . FDTD ALGORİTMASI VE AKIŞ ŞEMASI	51
8 . UYGULAMALAR VE YORUMLAR.....	53
8.1 Model 1: Yatay Tabaka Modeli	53
8.2 Model 2: Eğimli Tabaka Modeli	57
8.3 Model 3: Kare Şekilli Boşluk Yapıları	60
8.4 Model 4: Nemli Kum ve Kil Tabakası Modeli.....	65
8.5 Model 5: Senklinal modeli.....	68
8.6 Yeraltı Modellerinin Geometrik ve Fiziksel Özelliklerindeki Değişimlerinin İncelenmesi.....	70
8.6.1 Boyutları farklı yapıların incelenmesi.....	70
8.6.2 Farklı dielektrik katsayılı gömülü yapıların incelenmesi.....	74
8.6.3 Farklı dielektrik katsayılı ortamlar içindeki yapıların incelenmesi.....	77
8.6.4 Ortamın iletkenlik etkisinin incelenmesi	80
8.7 Polarite ve Yansıma Genlikleri Değişimlerinin İncelenmesi.....	83
8.7.1 EM kaynak alanının polaritesine göre aynı modele ait değişimin incelenmesi	83
8.7.2 Ortam parametrelerinin değişimine göre yansıma genlikleri ve polarite değişiminin incelenmesi	85

9 . SONUÇLAR	90
KAYNAKLAR	92
ÖZGEÇMİŞ.....	95

SİMGELER DİZİNİ

B	Manyetik akı yoğunluğu (Weber/metre-kare=tesla)
c	Işık Hızı
CPML	Mükemmel uyumlu tabaka sınır koşulu
D	Yer değiştirme akımları (Coulomb/ m^2)
E	Elektrik alan (mV/m)
E_x	Elektrik alan x-bileşeni (mV/m)
E_y	Elektrik alan y-bileşeni (mV/m)
E_z	Elektrik alan z-bileşeni (mV/m)
EM	Elektromanyetik
f	Anten frekansı
FD	Sonlu Farklar
FDTD	Zaman Ortamında Sonlu Farklar
H	Manyetik alan şiddeti (A/m)
H_x	Manyetik alan x-bileşeni (A/m)
H_y	Manyetik alan y-bileşeni (A/m)
H_z	Manyetik alan z-bileşeni (A/m)
J	Elektrik akım yoğunluğu (A/ m^2)
k	Konum (x,y,z)
m	metre
t	Zaman (nanosaniye)
ns	Nanosaniye
TM	Transverse Manyetic (Enine Manyetik)
TE	Transverse Electric (Enine Elektrik)
V	Elektromanyetik dalga hızı (m/ns)
1B	Bir-Boyutlu
2B	İki-Boyutlu
3B	Üç-Boyutlu
ϵ_r	Bağıl Dielektrik katsayısı
σ	Elektriksel iletkenlik (simens/m)
μ	Bağıl Manyetik geçirgenlik

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Yer radarı yönteminin çalışma prensibi.....	5
Şekil 2.2 Yer radarı ekipmanları: a. Kapalı anten ve elektroniği, b. Açık anten ve elektroniği, c. Kayıt-Gösterim ve kontrol ünitesi	7
Şekil 2.3 Profile dik, birbirine paralel anten düzeneği.....	8
Şekil 2.4 Sabit anten aralıklı profil ölçümü	9
Şekil 2.5 Ortak orta nokta profil ölçümü	9
Şekil 2.6 Geniş açılı yansıma profil ölçümü	10
Şekil 4.1 2B model (Candansayar 1997)	17
Şekil 4.2 TM-Modu.....	18
Şekil 4.3 TE-Modu.....	19
Şekil 5.1 $O(\Delta x^2)$ mertebesinde merkezi farklar	24
Şekil 5.2 $O(\Delta x^4)$ mertebesinde merkezi farklar	24
Şekil 5.3 1B ortamda: a. Elektrik alanın hesabı, b. Manyetik alanın hesabı.....	28
Şekil 5.4 TM-modunda elektrik ve manyetik alanların i,j koordinatlarında gösterimi (Lee and Teixeira 2006).....	29
Şekil 5.5 TE-modunda elektrik ve manyetik alanların i,j koordinatlarında gösterimi (Lee and Teixeira 2006).....	32
Şekil 6.1 TM-modunda $O[(2,4)]'$ e göre elektrik ve manyetik alanların i,j koordinatlarında gösterimi	36
Şekil 6.2 Sınır koşulu uygulanmamış, yatay iki tabaka modeline ait radargram.....	37
Şekil 6.3 Model ağı ve sınır bölgesi.....	37
Şekil 6.4 TM-modu için sonlu farklar ağı (Irving 2006)	41
Şekil 6.5 H_x bileşeninin hesabı	44
Şekil 6.6 H_z bileşeninin hesabı.....	45
Şekil 6.7 E_y bileşeninin hesabı.....	46

Şekil 6.8 Merkez frekans: a. 25 MHz, b. 100 MHz, c. 250 MHz için Blackmanharris pencereleri.....	48
Şekil 6.9 Verici ve alıcı antenlerin konumu.....	49
Şekil 6.10 FDTD ağında antenlerin konumuna örnek	50
Şekil 7.1 FDTD yüzey yer radarı modelleme algoritması akış şeması.....	52
Şekil 8.1 Yatay iki tabaka modeli	54
Şekil 8.2 Yatay iki tabaka modeline ait: a. dalga şekli açık görüntülü (wiggle) radargram, b. genlik-renk ölçeğine göre taralı (scan) radargram.....	55
Şekil 8.3 Eğimli tabaka modeli	58
Şekil 8.4 Eğimli tabaka modeline ait: a. dalga şekli açık görüntülü (wiggle) radargram, b. genlik-renk ölçeğine göre taralı (scan) radargram.....	59
Şekil 8.5. a. Kireçtaşı tabakası içindeki kare boşluklu model, b. Modele ait dalga şekli açık (wiggle) görüntülü radargram (Bergmann <i>et al.</i> 1998).....	61
Şekil 8.6. a. Kireçtaşı tabakası içindeki kare boşluk modeli ve bu modele ait, b. dalga şekli açık görüntülü (wiggle) radargram, c. genlik-renk ölçeğine göre taralı (scan) radargram	62
Şekil 8.7 500 Mhz merkez anten frekansı ile, model 3'e ait: a. dalga şekli açık görüntülü (wiggle) radargram, b. genlik-renk ölçeğine göre taralı (scan) radargram	64
Şekil 8.8.a. Nemli kum ve kil tabakası modeli, b. Modele ait dalga şekli açık (wiggle) görüntülü radargram (Bergmann <i>et al.</i> 1999)	66
Şekil 8.9.a. Nemli kum ve kil tabakası modeli ve bu modele ait, b. dalga şekli açık görüntülü (wiggle) radargram, c. genlik-renk ölçeğine göre taralı (scan) radargram	67
Şekil 8.10.a. Senklinal modeli ve bu modele ait, b. dalga şekli açık görüntülü (wiggle) radargram, c. genlik-renk ölçeğine göre taralı (scan) radargram	69
Şekil 8.11 Boyutları farklı boşluklar: a. Boşluk 1 (2x2), b. Boşluk 2 (1x2), c. Boşluk 3 (2x1), d. Boşluk 4 (1x1).....	71
Şekil 8.12 Boyutları farklı boşluklar: a. Boşluk 1, b. Boşluk 2, c. Boşluk 3, d. Boşluk 4'e ait dalga şekli açık görüntülü (wiggle) radargram.....	72
Şekil 8.13 Boyutları farklı gömülü cisimler: a. Boşluk 1, b. Boşluk 2, c. Boşluk 3, d. Boşluk 4'e ait genlik-renk ölçeğine göre taralı (scan) radargram.....	73

Şekil 8.14 Dielektrik katsayıları farklı gömülü yapılar: a. Yapı 1, b. Yapı 2	75
Şekil 8.15 Şekil 8.14.a'ya ait: a. b. dalga şekli açık görüntülü (wiggle)) ve genlik-renk ölçeğine göre taralı (scan) radargram, Şekil 8.14.b'ye ait: c. d. dalga şekli açık görüntülü (wiggle) ve genlik-renk ölçeğine göre taralı (scan) radargram	76
Şekil 8.16 Dielektrik katsayıları farklı ortamlara ait: a. Birinci model, b. İkinci model	78
Şekil 8.17 Dielektrik katsayıları farklı ortamlar: a. b. Şekil 8.16.a'ya ait, c. d. Şekil 8.16.b'ye ait dalga şekli açık görüntülü (wiggle) ve genlik-renk ölçeğine göre taralı (scan) radargram	79
Şekil 8.18 İletkenlik değerleri farklı ortam: a. Birinci model, b. İkinci model.....	81
Şekil 8.19 İletkenlik değeri farklı ortamlar: a. b. Şekil 8.18.a'ya ait, c. d. Şekil 8.18.b'ye ait, dalga şekli açık görüntülü (wiggle) ve genlik-renk ölçeğine göre taralı (scan) radargram	82
Şekil 8.20 Şekil 8.14.a'daki modele ait radargramlar: a. b. kaynak alan polaritesi negatif iken, c. d. kaynak alan polaritesi pozitif iken, dalga şekli açık görüntülü (wiggle) ve genlik-renk ölçeğine göre taralı (scan) radargram	85
Şekil 8.21. a. Birinci model, b. İkinci model	86
Şekil 8.22. a. b. Şekil 8.21.a'ya ait, c. d. Şekil 8.21.b'ye ait, dalga şekli açık görüntülü (wiggle) ve genlik-renk ölçeğine göre taralı (scan) radargram	87
Şekil 8.23 Ara yüzeye dik gelen dalganın yansımaları ve kırılması (Kadioğlu 2002)	88

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1	4
Çizelge 2.2	10

1. GİRİŞ

Yer radarı yöntemi (GPR-Ground Penetrating Radar) yüksek frekanslı elektromanyetik (EM) yöntemidir. Bir yer radarı sistemi, verici anten, alıcı anten ve kayıtçıdan 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 (Annan 2000).

Son yıllarda bilgisayar teknolojisinin ilerlemesiyle yer radarı yönteminde modelleme çalışmaları hızlanmıştır. Zaman ortamında sonlu farklar yöntemi (FDTD) ile yer radarında iki boyutlu (2B) modelleme birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir (Yee 1966, Lee and Teixeira 2006, Wang and Tripp 1996, Bourgeois and Smith 1996, Bergmann *et al.* 1996, Teixeira *et al.* 1998, Holliger and Bergmann 2002, Carcione 1998, Irving 2006). Yöntem Maxwell denklemlerinin doğrudan zamanda ve konumda yinelemeli olarak ayrıklaştırılıp çözümlenmesine dayanmaktadır. FDTD yöntemi, sonlu farklar yönteminin geliştirilmesi, denklemlerin EM dalga denklemlerinin zaman bölgesi için yazılmasıyla ortaya çıkarılmıştır (Yee 1966). Modelin içerdiği 2B geometri, dalga boyundan çok daha küçük boydaki hücrelere bölünerek sonlu farklar ağı oluşturulur. Sonlu farklar ağı geometrinin ve anten merkez frekansının büyüklüğüne bağlı olarak, binlerce küçük hücreden oluşabilir. Manyetik ve elektrik alanların bileşenleri bu hücrelerin farklı noktalarında, ardışık zaman adımlarında hesaplanır (Gürel and Oğuz 2000, Sevgi 1999). Yöntemde, üç boyutlu (3B) modellemede manyetik ve elektrik alanın üç yöndeki bileşenleri (x,y,z) hesaplanırken, 2B modellemede sadece iki yönde bileşenler hesaplanır. 2B modellemede, hangi bileşenlerin hesaplanacağı seçilen EM moda göre farklılık gösterir. Kullanılan mod enine elektrik alan (Transverse Electric, TE) veya enine manyetik alan (Transverse Manyetic, TM) olabilir. TE-modu genelde kuyu yer radarı için, TM-modu ise yüzeyde yapılan yer radarı için kullanılır (Irving and Knight 2006, Irving 2006).

Ayrıca FDTD yöntemi dışında, ışın yolu izleme (Goodman 1994, Cai and McMechan 1995), frekans ortamında sonlu farklar (Zeng *et al.* 1995), integral (Ellefsen 1999, Xiong and Tripp 1997), sonlu elemanlar ve melez gibi yöntemler ile de modelleme çalışmaları bulunmaktadır.

Yer radarı yönteminde, modelleme çalışmalarında farklı kaynak tipleri seçilebilmektedir. Örneğin, sinüzoidal (dar bantlı) yada darbesel (geniş bantlı) kaynak seçilebilir (Sevgi 1999). Sismik yöntemlerde kullanılan Ricker dalgacığı da kaynak tipi olarak seçilebilmektedir (Bergmann *et al.* 1999). Ayrıca Blackman Harris penceresi de bu yöntem için uygun kaynak tipidir, yapı olarak Ricker dalgacığına benzemektedir (Irving 2006).

Çalışmada Maxwell denklemlerinin ayrıklaşmasının getirdiği kararlılık koşulu, sayısal dispersiyon gibi etkiler önemlidir. Kararlılık koşulu, FDTD yinelemeli denklemlerinin kararlı olabilmesi için seçilen zaman adımıyla ilgilidir. Bir zaman adımında, dalganın hücre içerisinde kalabilmesi için zaman adımının en fazla alabileceği değer aralığı Yee (1966) tarafından tanımlanmıştır. Yine sonlu farklar ağında grid dispersiyonunu önlemek için kullanılması gereken grid aralığı seçimi konusu Yee (1966) tarafından verilmiştir. Sınır yansımaları önlemek amacıyla çeşitli sınır koşulları uygulayarak çalışmalar yapılmıştır (Yee 1996, Berenger 1994, 1996, Akleman 1998).

Bu çalışmada zaman ortamında 2B sonlu farklar yöntemi ile yer radarı modellemesi ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Yöntemin dayandığı Maxwell denklemleri ve gerekli yardımcı denklemler anlatılmıştır. FDTD yönteminde, parametre seçimi ve sayısal dispersiyon gibi yöntemlerle ilgili önemli kavramlar açıklanmıştır. Sınır koşulu olarak mükemmel uyumlu tabaka (CPML-Convolution Perfectly Matched Layer) olarak adlandırılan yutucu sınır koşulu ele alınmıştır. MATLAB programlama dili kullanılarak yazılan 2B yer radarı modelleme algoritması oluşturulan modellere uygulanmış ve elde edilen radargramlar yorumlanmıştır. Ayrıca yeraltında gömülü yapıların fiziksel ve geometrik özelliklerindeki değişimlerinin incelenmesi ve radargramlar üzerindeki etkileri test edilmiştir.

2.YER RADARI YÖNTEMİ

2.1 Yöntemin Tarihçesi

Radarın bulunuşuna ilk adımı 1886 yılında Alman fizikçisi Heinrich R. Hertz atmıştır. Hertz elektromanyetik dalgaların ışık gibi yayılmasını ve yansımalarını ispatlamıştır.

1904 yılında, Christian Hülsmeier gemilerin birbiriyle çarpışmasını önlemek amacıyla, EM dalgalar ile gemilerin yerini belirlemede kullanılabilen sistemi bulmuştur. Hülsmeier, EM dalgalar ile gemilerin yerini belirlemede kullanılabilen icadını, Ren nehrinde bulunan buharlı bir geminin yerinin tespiti için denemiştir. Denemeler sonunda geminin resmi ortaya çıkmıştır, böylece geliştirdiği cihazın kullanılabilirliğini 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 nesnelere belirlenmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca bu dönemde kutuplardaki buz tabakası kalınlığını belirlemede ve gezegen araştırmalarında kullanılmıştır (Davis and Annan 1989).

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.

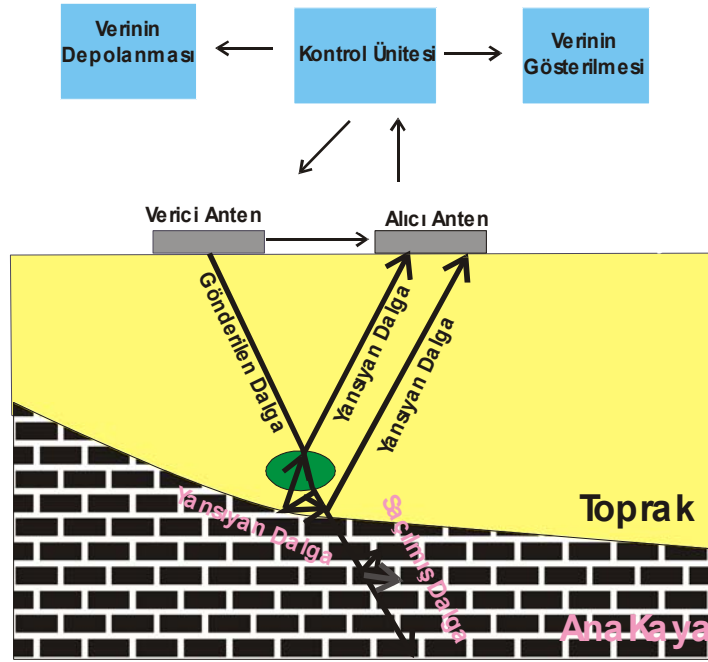
2.2 Yöntemin Tanımı ve Çalışma İlkesi

Yeraltındaki tabakalar ve gömülü cisimlerin bileşimlerine özgü fiziksel ve kimyasal özellikleri vardır. Bu özellikler, gömülü nesnelere ya da tabakaların bulunduğu ortamdan farklı özellikte olmasına sebep olur (Çizelge 2.1). Yer radarı yöntemi, yeraltına gönderilen çok yüksek frekanslı EM dalgalar yardımı ile yer içi veya yer içinde bulunan nesnelere hakkında bilginin toplanması ve değerlendirilmesini sağlayan bir jeofizik yöntemdir.

Çizelge 2.1 Bazı jeolojik malzemelere ait dielektrik, iletkenlik, hız değerleri (Annan 2000)

Malzeme	Bağıl dielektrik katsayısı (ϵ_r)	İletkenlik (σ ms/m)	Yayılm Hızı (V, m/ns)
Hava	1	0	0,3
Buz	3-4	0,01	0,16
Su (taze)	80	0,5	0,033
Su (tuzlu)	80	3000	0,01
Topraklar			
Kil	5-40	2-1000	0,06
Toprak (kuru)	3-5	0,01	0,15
Toprak (doğgun)	20-30	0,1-1,0	0,06
Silt	5-30	1-100	0,07
Mineraller			
Kalsit	7,8-8,5	$5 \cdot 10^{-10}$	0,11
Kuvars	4,2-5	$3 \cdot 10^{-4}$ - $5 \cdot 10^{-12}$	0,13-0,15
Tortul Kayaçlar			
Kireçtaşı	4-8	0,5-2	0,12
Tuz (kuru)	5-6	0,01-1	0,13
Kumtaşı	4<7-12	$1 \cdot 10^{-5}$ -0,7	0,09-0,14
Şeyl	5-15	1-100	0,09
Magmatik kayalar			
Bazalt	12	$8 \cdot 10^{-6}$ -0,025	0,09
Dasit	6,8-8,2	0,05	0,12
Diyabaz	10,5-34,5	$2 \cdot 10^{-5}$ -50	0,05-0,09
Diyorit	6	0,0002-0,002	0,12
Gabro	8,5-40	0,001-1	0,05-0,10
Granit	4,6	0,01-1	0,13
Norit	61	0,02-1	0,04
Peridotit	8,6	0,15-0,33	0,1

Yöntemde, verici anten aracılığıyla yer içine çok yüksek frekanslı EM dalgalar gönderilir. Yer içine gönderilen bu dalgalar herhangi bir nesne ile karşılaştıklarında yansıma ve saçılmaya uğrarlar. Yansıyan ve saçılan dalgalar da alıcı anten, kontrol ünitesi ve kayıtçı yardımıyla zamanın fonksiyonu olarak kayıt edilirler (Şekil 2.1). Varış zamanına göre kaydedilen dalgalar grubuna dalga alanı adı verilir.



Şekil 2.1 Yer radarı yönteminin çalışma prensibi

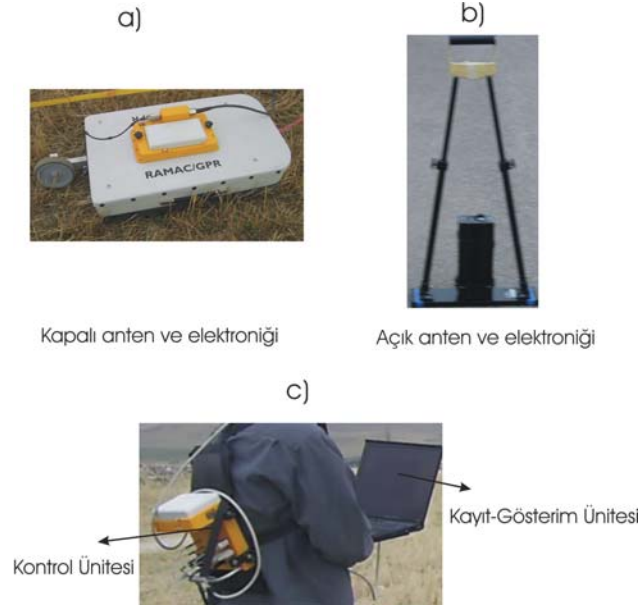
Yöntemin kullanım alanları başlıca yapısal araştırmalarda toprak stratigrafisinin ortaya çıkarılmasında (Davis and Annan 1989), yüzeye yakın jeolojik birimlerin belirlenmesinde (Koralay *et al.* 2007), fay, kırık ve çatlakların haritalanmasında (Grandjean and Gaury 1999, Green *et al.* 2003, Kadioğlu 2008), yeraltı karstik boşluklarının aranmasında (Kadioğlu vd. 2006), yeraltı su seviyesinin belirlenmesinde (Harrari 1996, Dannowski and Yaramancı 1999, Aspiro and Aigner 1999), yüzeye yakın sıvı hidrokarbon aramalarında (Changryol *et al.* 2000) kullanılır. Son yıllarda çok yaygın olarak arkeolojik çalışmalarda tapınak, mezar, duvar, temel ve benzeri tarihi kalıntıların bulunmasında (Sambuelli *et al.* 1999, Kadioğlu vd. 2008), metalik cisim arama çalışmalarında yeraltında gömülü boru, boru hattı, su veya akaryakıt tankı ve eski endüstriyel atık alanlarının bulunmasında (Carcione 1996, Kadioğlu and Daniels 2008,

Kurt vd. 2009), zemin araştırmalarında, tünel araştırmalarında karayolu, demiryolu, su tünelleri, tp geçitler, maden galerileri içinde duvar cephelerinin sağlamlık tespitinde, galeri içinde bozunmuş zon ve cevher aramada, galeri ilerleme yönü belirlemelerinde (Cardelli *et al.* 2003) ve yeraltındaki insan kalıntılarını aramada (Hammon III *et al.* 2000) kullanılmaktadır.

2.3 Yöntem Ekipmanları ve Ekipmanların Görevleri

Yer radarı ekipmanları genel olarak verici anten ve elektroniği, alıcı anten ve elektroniği, kontrol nitesi (sistem), kayıt nitesi ve gösterim ünitesinden oluşur (şekil 2.2). Kapalı anten düzeneklerinde kapalı bir kutu içinde merkez frekansına uygun aralıklarla konuşlandırılmış verici ve alıcı elektroniği bulunmaktadır (şekil 2.2.a).

Kontrol nitesi, radar sinyal üretimini ve daha sonra bir zaman fonksiyonu olarak gelen sinyalleri kontrol eder. Verici elektroniği ve verici anten çifti, yayılan sinyalin frekansını ve şeklini belirler. Alıcı elektroniği ve alıcı anten, verici elektroniği ve anteni özelliklerine göre tanımlıdır. Yer içinden yansımış veya saçılmış sinyal anten aracılığı ile alıcı elektroniğine ulaştırılır. Amaç zamanın bir fonksiyonu olarak gelen sinyalin genlik değişimini ölçmektir. Kayıt nitesi, alıcı ünitesinden gelen sinyali kaydeder. Gösterim nitesi, her bir kayıt noktasında elde edilen sinyalin kayıt ekranında görüntülenmesini sağlar (şekil 2.2).

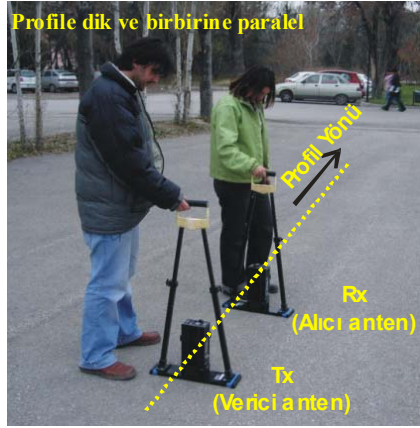


Şekil 2.2 Yer radarı ekipmanları: a. Kapalı anten ve elektroniği, b. Açık anten ve elektroniği, c. Kayıt-Gösterim ve kontrol ünitesi

2.4 Yöntemde Kullanılan Açık Anten Düzenekleri

Kullanılan anten düzenekleri, çalışmanın amacına göre seçilir. En çok tercih edilen düzenek profile dik ve birbirine paralel anten (cole-cole) düzeneğidir (Şekil 2.3). Kapalı antenlerde bu düzenek özel kutu içine anten aralığı sabit olacak şekilde düzenlenmiştir. Bu düzenek dışında, birbirine ve profil yönüne paralel anten düzenekleri, birbirine ve profil yönüne paralel ardışık anten düzenekleri, birbirine paralel ardışık profil yönüne dik anten düzenekleri ve birbirine dik anten düzenekleri vardır (Annan 2000).

Tez çalışmasında en çok tercih edilen profile dik birbirine paralel anten düzeneği kullanılmıştır.

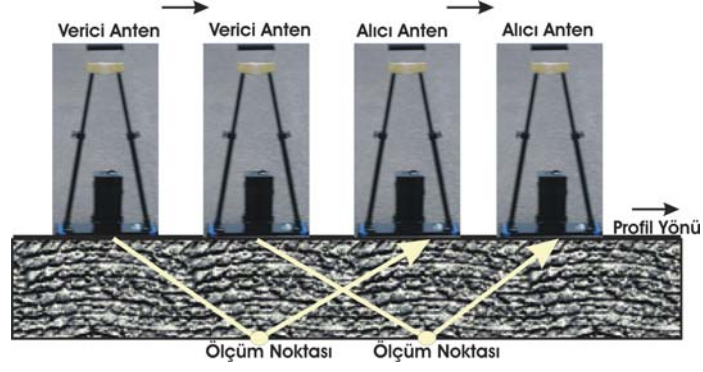


Şekil 2.3 Profile dik, birbirine paralel anten düzeneği

2.5 Yöntemde Veri Toplama

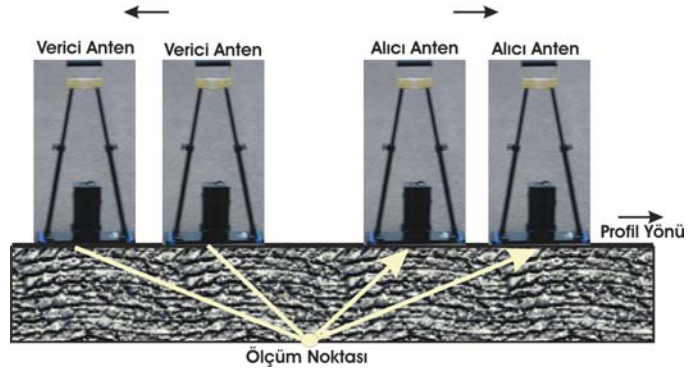
Veri toplama aşamasında, öncelikle çalışmanın amacına göre veri toplama tekniği, anten tipi ve frekansı seçilir. Daha sonra arazi çalışma planı oluşturulur. Profil başlangıç noktası, yönü ve boyu belirlenir. Ölçüme başlamak için anten merkez frekansına göre bozucu etkileşimi önleyecek kadar antenler arası uzaklık belirlenir. Bu uzaklık ortalama anten boyu kadardır (Annan 2000). İkinci olarak ölçüm aralığının belirlenmesidir. İlk ölçüm noktası verici-alıcı antenin ortak noktasıdır. Bu nokta profil başlangıç noktasıdır.

Anten tipi olarak açık anten seçildiğinde, farklı veri toplama teknikleri kullanılabilir. Açık antenlerin birbirlerine olan konumlarına göre üç farklı veri toplama tekniği vardır. En çok kullanılan teknik, sabit anten aralıklı profil ölçümüdür (Şekil 2.4). Bu veri toplama tekniğinde, bir profil boyunca antenler arası mesafe sabit kalacak biçimde antenler kaydırılarak ölçümler alınır. Kapalı antenlerle veri toplama bu tekniğe uygun olarak ayarlanmıştır.



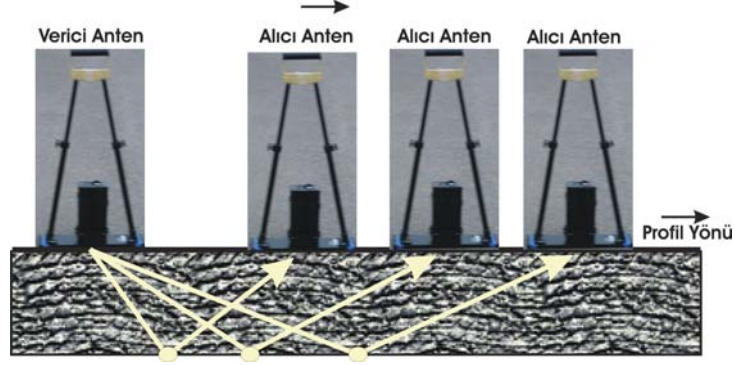
Şekil 2.4 Sabit anten aralıklı profil ölçümü

Diğer veri toplama tekniği, ortak orta nokta profil ölçümüdür (Şekil 2.5). Bu teknikte, antenler ölçüm noktası ortada kalacak şekilde eşit aralıklarla açılarak ilerletilir.



Şekil 2.5 Ortak orta nokta profil ölçümü

Geniş açı yansıma profili ölçümünde ise, profil üzerinde verici anten sabit tutularak alıcı anten belirli aralıklarla ilerletilir (Şekil 2.6). Bu veri toplama teknikleri daha çok EM dalga yayılım hızını belirlemek için kullanılır.



Şekil 2.6 Geniş açılı yansıma profil ölçümü

Anten merkez frekansı araştırma derinliği doğrultusunda seçilir. Araştırma derinliğine göre seçilen anten frekansı ile ilgili ampirik formül mevcuttur (Ulugergerli ve Özürkan 2005).

$$f = \frac{150}{d\sqrt{\epsilon}} \quad (2.5.1)$$

Burada d, derinlik, ϵ , dielektrik katsayısı, f ise anten frekansdır. Araştırma derinliğine bağlı frekans seçimleri Çizelge 2.2 de verilmiştir.

Çizelge 2.2 Araştırma derinliğine bağlı frekans seçimleri (Mala Geoscience 2003)

Merkez Frekans (MHz)	Maksimum Araştırma Derinliği (m)
25	50
50	40
100	25
200	12
500	6
800	2.5
1000	1.5
1600	1

Zaman örnekleme aralığı, bir iz üzerindeki noktalar arası zaman aralığıdır. Merkez frekansı büyüdükçe zaman örnekleme aralığı daha küçük seçilir (Sensors and Software 1996).

Amaca uygun veri toplama tekniği ve anten frekansı ve diğer parametreler seçildikten sonra antenler kontrol ünitesine, kontrol ünitesi de bilgisayara bağlanır. Kontrol ünitesi açılır ve profiller üzerinde yer radarı verisi toplanır.

3. EM DALGA DENKLEMLERİ

3.1 Maxwell Denklemleri

Faraday kanunu; herhangi bir kapalı eğri üzerinde elektrik alanın dolaşımı, eğrinin çevrelediği yüzey üzerinde manyetik akının zamanla değişiminin negatifine eşittir (3.1.1). Başka bir deyişle manyetik akının zamanla değişimi (ters yönde) elektrik alan oluşturur.

$$\nabla \times \vec{E} = - \left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) \quad (3.1.1)$$

Amper kanunu; bir ortamdan akım geçerse mutlaka manyetik alan oluşur ifadesini açıklar (3.1.2).

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \quad (3.1.2)$$

Gauss kanunu; elektrik alanın skaler kaynağının yük yoğunluğu olduğudur veya elektrik alanın noktasal olarak yüklerde sonlandığını belirtmektedir (3.1.3).

$$\nabla \cdot \vec{D} = \vec{q} \quad (3.1.3)$$

Manyetik alan için Gauss kanunu; manyetik alanın skaler kaynağının olmadığı anlamına gelir. Herhangi bir kapalı yüzeydeki manyetik alanın akısı sıfırdır (3.1.4).

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.1.4)$$

(3.1.1) – (3.1.4) eşitlikleri Maxwell denklemleri olarak adlandırılır (Nabighan 1998).

Homojen ve izotrop ortam için malzeme denklemleri;

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3.1.5)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (3.1.6)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (3.1.7)$$

şeklinde verilir. Bu denklemlerde;

\vec{H} Manyetik alan (A/m)

\vec{E} Elektrik alan (mv/m)

\vec{B} Manyetik akı yoğunluğu (Weber/m²=Tesla)

\vec{J} Elektrik akımın yoğunluğu (A/m²)

\vec{D} Yer değiştirme akımları (Coulomb/m²)

\vec{q} Hacim başına düşen birim yük yoğunluğu (A/ m²)

μ Manyetik geçirgenlik (Henry/m)

ε Dielektrik sabiti (Farad/m)

σ Elektriksel iletkenlik (simens/m)

Serbest uzayda manyetik geçirgenlik ve dielektrik sabiti değerleri; $\mu_0 ; 4 \pi 10^{-7}$ Henry/m, $\varepsilon_0 ; 8,854 \times 10^{-12}$ Farad/m'dir.

3.2 Zaman Ortamında EM Dalga Denklemleri

3.2.1 Elektrik alan dalga denklemi

(3.1.1) denkleminin sırasıyla aşağıda verildiği gibi (3.1.5) - (3.1.7) denklemleri yerleştirilerek elektrik alan dalga denklemi elde edilir.

$$\nabla \times \vec{E} = - \left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) \xrightarrow{\vec{B} = \mu \vec{H}} \nabla \times \vec{E} = - \left(\frac{\partial \mu \vec{H}}{\partial t} \right) \xrightarrow{\mu \rightarrow sbt} \nabla \times \vec{E} = - \mu \left(\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \right) \quad (3.2.1.1)$$

Bu denklemde her iki tarafın rotasyoneli (döneli) alınrsa;

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = -\mu \left(\frac{\partial (\nabla \times \vec{H})}{\partial t} \right) \xrightarrow{\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right)} \nabla \times \nabla \times \vec{E} = -\mu \left(\frac{\partial \left(\vec{J} + \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \right)}{\partial t} \right) \xrightarrow{\substack{\vec{D} = \epsilon \vec{E} \\ \vec{J} = \sigma \vec{E}}} \quad (3.2.1.2)$$

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = -\mu \left(\frac{\partial \left(\sigma \vec{E} + \left(\frac{\partial (\epsilon \vec{E})}{\partial t} \right) \right)}{\partial t} \right) \xrightarrow{\sigma \text{ ve } \epsilon \text{ sbt}} \nabla \times \nabla \times \vec{E} = -\mu \sigma \left(\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) - \mu \epsilon \left(\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \right) \quad (3.2.1.3)$$

ve

$$\nabla \times \nabla \times A = \nabla (\nabla A) - \nabla^2 A \quad (3.2.1.4)$$

(3.2.1.4) özelliği kullanılarak, zaman ortamında elektrik alan dalga denklemi aşağıdaki gibi elde edilir (Sadiku 1992).

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu \sigma \left(\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) + \mu \epsilon \left(\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \right). \quad (3.2.1.5)$$

3.2.2 Manyetik alan dalga denklemi

(3.1.1) eşitliği için yapılanlar (3.1.2) manyetik alan eşitliği için de yapılır. Buna göre;

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \xrightarrow{\substack{\vec{J} = \sigma \vec{E} \\ \vec{D} = \epsilon \vec{E}}} \nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \left(\frac{\partial \epsilon \vec{E}}{\partial t} \right) \xrightarrow{\epsilon \text{ sbt}} \nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \epsilon \left(\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \quad (3.2.2.1)$$

Bu denklemde her iki tarafın rotasyoneli (döneli) alınrsa;

$$\nabla \times \nabla \times \bar{H} = \sigma \left(\frac{-\partial(\mu\bar{H})}{\partial t} \right) + \left(\frac{\left(\frac{\partial(\mu\bar{H})}{\partial t} \right)}{\partial t} \right) \xrightarrow{\mu sbt} \nabla \times \nabla \times \bar{H} = \sigma\mu \left(\frac{\partial\bar{H}}{\partial t} \right) + \frac{\partial}{\partial t} \left(-\mu \frac{\partial\bar{H}}{\partial t} \right) \quad (3.2.2.2)$$

(3.2.1.4) özelliği kullanılarak zaman ortamında manyetik alan denklemi aşağıdaki gibi elde edilir (Sadiku 1992).

$$\nabla^2 \bar{H} = \mu\sigma \left(\frac{\partial\bar{H}}{\partial t} \right) + \mu\epsilon \frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial t^2}. \quad (3.2.2.3)$$

3.3 Frekans Ortamında EM Dalga Denklemleri

Zaman ortamındaki elektrik alan ve manyetik alan dalga denklemlerini frekans ortamına dönüştürebilmek için Fourier dönüşümünden yararlanılır. $\frac{\partial}{\partial t} \xrightarrow{\text{Fourier Dönüşümü}} i\omega$

ve $\frac{\partial^2}{\partial t^2} \xrightarrow{\text{Fourier Dönüşümü}} -\omega^2$ çiftinden yararlanarak, zaman ortamında yazılan elektrik alan denklemleri frekans ortamında aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\nabla^2 \bar{E} = \mu\sigma \left(\frac{\partial\bar{E}}{\partial t} \right) + \mu\epsilon \left(\frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} \right) \xrightarrow{\text{Fourier Dönüşümü}} \nabla^2 \bar{E} = -\mu\epsilon\omega^2 \bar{E} + i\omega\mu\sigma \bar{E}. \quad (3.3.1)$$

Buradan elektrik alan için Helmholtz dalga denklemi;

$$\nabla^2 \bar{E} + (\mu\epsilon\omega^2 - i\omega\mu\sigma) \bar{E} = 0 \quad (3.3.2)$$

elde edilir.

Aynı işlemler manyetik alan dalga denklemi içinde yapıldığında;

$$\nabla^2 \bar{H} = \mu\sigma \left(\frac{\partial \bar{H}}{\partial t} \right) + \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial t^2} \xrightarrow{\text{Fourier Dönüşümü}} \nabla^2 \bar{H} = -\mu\varepsilon\omega^2 \bar{H} + i\omega\mu\sigma \bar{H} \quad (3.3.3)$$

ve manyetik alan için Helmholtz dalga denklemi;

$$\nabla^2 \bar{H} + (\mu\varepsilon\omega^2 - i\omega\mu\sigma) \bar{H} = 0 \quad (3.3.4)$$

elde edilir.

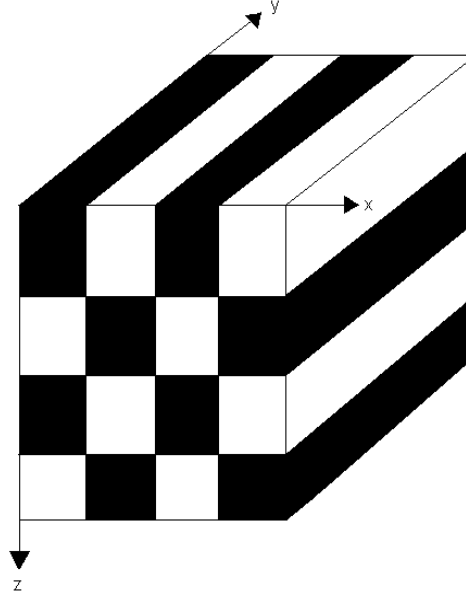
Sonuç olarak (3.3.2) ve (3.3.4) ifadeleri frekans ortamında EM dalga denklemleri olarak tanımlanırlar. Burada;

$$k = (\mu\varepsilon\omega^2 - i\omega\mu\sigma)^{1/2} \quad (3.3.5)$$

dalga sayısıdır.

4. KARTEZYEN KOORDİNATLARDA TE ve TM-MODUNDA İKİ BOYUTLU MAXWELL DENKLEMLERİ

2B ortamda y-yönünde, dielektrik katsayısı, manyetik geçirgenlik ve iletkenlik değişiminin olmadığını varsayılır (Şekil 4.1).

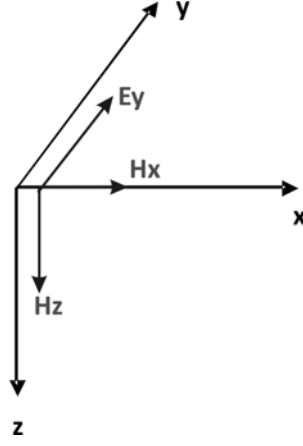


Şekil 4.1 2B model (Candansayar 1997)

Maxwell denklemleri 2B yer radarı modellenmesinde TM ve TE-modu durumlarına ayrılır.

4.1 TM-Modunda Maxwell Denklemleri

TM-modunda y-yönünde modele ait fiziksel parametrelerde (dielektrik katsayısı, manyetik geçirgenlik, iletkenlik) ve hesaplanması gerekli elektrik ve manyetik alan bileşenlerinde herhangi bir değişimin olmadığı kabulü ile, x ve z yönünde zamanla değişen manyetik alan ve manyetik alana bağımlı olarak değişen elektrik alan vardır (Şekil 4.2).



Şekil 4.2 TM-Modu

Buna göre;

$$H_z \neq H_x \neq E_y \neq 0 \quad (4.1.1)$$

ve

$$H_y = E_x = E_z = 0 \quad (4.1.2)$$

olur (Irving and Knight 2006).

Bu durumda eşitlik (3.2.1.1) deki elektrik alan denklemleri;

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = \mu \frac{\partial H_z}{\partial t} \quad (4.1.3)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial z} = -\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} \quad (4.1.4)$$

ve eşitlik (3.2.1.2) deki manyetik alan denklemi;

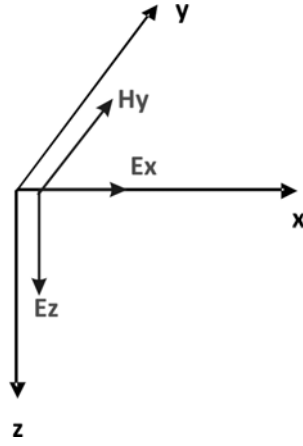
$$\sigma E_y + \varepsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial z} \quad (4.1.5)$$

şeklinde yazılır.

Bu tez çalışmasında, yüzey radarı dikkate alınarak TM-modu seçilmiştir.

4.2 TE-Modunda Maxwell Denklemleri

TE-modunda y-yönünde modele ait fiziksel parametrelerde (dielektrik katsayısı, manyetik geçirgenlik, iletkenlik) ve hesaplanması gerekli elektrik ve manyetik alan bileşenlerinde herhangi bir değişimin olmadığı kabulü ile, x ve z yönünde zamanla değişen elektrik alan ve elektrik alana bağımlı olarak değişen manyetik alan vardır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 TE-Modu

Yukarıdaki şekil TE-modu için gösterilmektedir (Şekil 4.3). Buna göre;

$$H_y \neq E_x \neq E_z \neq 0 \quad (4.2.1)$$

ve

$$H_x = H_z = E_y = 0 \quad (4.2.2)$$

olur.

Bu durumda eşitlik (3.2.1.2) ve (3.2.1.1) deki manyetik ve elektrik alan denklemleri;

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} = -\varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} - \sigma E_z \quad (4.2.3)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial z} = \varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} + \sigma E_x \quad (4.2.4)$$

$$\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (4.2.5)$$

şeklinde yazılır.

4.3 TM ve TE-Modlarında Maxwell Denklemlerinin Frekans Ortamındaki İfadeleri

TM-modu için zaman ortamında yazılan Maxwell denkleminin Fourier dönüşümü sonucunda;

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = \mu \frac{\partial H_z}{\partial t} \xrightarrow{\text{Fourier Dönüşümü}} \frac{\partial E_y}{\partial x} = i\omega\mu H_z \quad (4.3.1)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial z} = -\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} \xrightarrow{\text{Fourier Dönüşümü}} \frac{\partial E_y}{\partial z} = -i\omega\mu H_x \quad (4.3.2)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial z} = \varepsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} \xrightarrow{\text{Fourier Dönüşümü}} \frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial z} = i\omega\varepsilon E_y + \sigma E_y \quad (4.3.3)$$

denklemleri elde edilir.

TE-modu için zaman ortamında yazılan Maxwell denkleminin Fourier dönüşümü sonucunda;

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} = -\varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} - \sigma E_z \xrightarrow{\text{Fourier Dönüşümü}} \frac{\partial H_y}{\partial x} = -i\omega\varepsilon E_z - \sigma E_z \quad (4.3.4)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial z} = \varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} + \sigma E_x \xrightarrow{\text{Fourier Dönüşümü}} \frac{\partial H_y}{\partial z} = i\omega\varepsilon E_x + \sigma E_x \quad (4.3.5)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = \mu \frac{\partial H_y}{\partial t} \xrightarrow{\text{Fourier Dönüşümü}} \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = i\omega\mu E_y \quad (4.3.6)$$

denklemleri elde edilir.

5. MAXWELL DENKLEMLERİNİN SONLU FARKLARLA TANIMLANMASI

Sonlu Farklar (FD) yöntemi uzun yıllardır bilinmesine rağmen zaman bölgesinde Maxwell denklemleri için kullanımı ilk kez Kano Yee (1966) tarafından ortaya atılmıştır. Bunun sonucunda, EM dalga yayılımını modelleyen Maxwell denklemlerinin sonlu farklar ile yazılması ve zamana göre türevlerin de sayısallaştırılarak geliştirilmesi yöntemi zaman ortamında sonlu farklar olarak adlandırılmıştır. Kısaca FDTD olarak bilinen zaman ortamında sonlu farklar yöntemi İngilizce Finite Difference Time Domain kelimelerinin kısaltılmışıdır.

FDTD yöntemi Maxwell denklemlerindeki diferansiyel yaklaşımlarının zamanda ve konumda ayrıklaştırılmasına dayanır.

5.1 Sonlu Farklar Yaklaşımı

Sonlu farklar yaklaşımı sayısal türev alma işlemine dayanmaktadır. Tüm fark yaklaşımları;

$$f(y) = f(x) + (y-x)f'(x) + \frac{1}{2!}(y-x)^2 f''(x) + \frac{1}{3!}(y-x)^3 f'''(x) + 0((y-x)^4) \quad (5.1.1)$$

ile tanımlanan Taylor açılımı yardımı ile elde edilir. Burada (5.1.1) denklemindeki y yerine x_{i+1} yazıldığında;

$$f(x_{i+1}) = f(x_i) + (\Delta x)f'(x_i) + \frac{1}{2}(\Delta x)^2 f''(x_i) + \frac{1}{6}(\Delta x)^3 f'''(x_i) + 0((\Delta x)^4) \quad (5.1.2)$$

elde edilir. Bu denklemin birinci türevi içeren terimi ele alındığında;

$$(\Delta x)f'(x_i) = f(x_{i+1}) - f(x_i) - \frac{1}{2}(\Delta x)^2 f''(x_i) - \frac{1}{6}(\Delta x)^3 f'''(x_i) - 0((\Delta x)^4) \quad (5.1.3)$$

elde edilir. (5.1.3) ifadesi düzenlendiğinde;

$$f'(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{(\Delta x)} - \frac{1}{2}(\Delta x)f''(x_i) - \frac{1}{6}(\Delta x)^2 f'''(x_i) - O((\Delta x)^3) \quad (5.1.4)$$

sonlu farklar yaklaşımı ile türevi tanımlayan ileri farklar (forward difference) denklemi elde edilmiş olur. Burada $O(\Delta x^3)$ hatanın mertebesini ifade etmektedir.

(5.1.1) denklemindeki y yerine x_{i-1} yazıldığında;

$$f(x_{i-1}) = f(x_i) - (\Delta x)f'(x_i) + \frac{1}{2}(\Delta x)^2 f''(x_i) - \frac{1}{6}(\Delta x)^3 f'''(x_i) + O((\Delta x)^4) \quad (5.1.5)$$

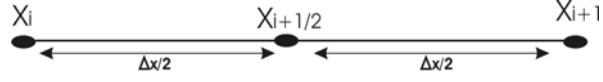
elde edilir. Denklemin birinci türevi içeren terimi bir tarafta diğerler terimleri bir tarafta toplanıp, $f'(x)$ yalnız bırakılıp denklem yazıldığında;

$$f'(x_i) = \frac{f(x_i) - f(x_{i-1})}{(\Delta x)} + \frac{1}{2}(\Delta x)f''(x_i) - \frac{1}{6}(\Delta x)^2 f'''(x_i) + O((\Delta x)^3) \quad (5.1.6)$$

ile tanımlanan geri farklar (backward difference) denklemi elde edilir.

Bu tez aşamasında merkezi farklar yöntemiyle elde edilen sonlu farklar denklemleri kullanılmıştır. Maxwell denklemlerine merkezi farklar yaklaşımı uygulanırken, zaman türevleri ($X_{i+1/2}$ deki türev değeri), hata mertebesi $O(\Delta x^2)$ iken, konum türevleri ($X_{i+1/2}$ deki türev değeri), hata mertebesi $O(\Delta x^4)$ iken hesaplanmıştır. Sonraki bölümlerde, elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin konumda ve zamandaki indislerinin daha kolay anlaşılabilmesi için, Taylor serisi $O(\Delta x^2)$ ve $O(\Delta x^4)$ hata mertebelerinde merkezi farklarla hesaplanacaktır.

$O(\Delta x^2)$ mertebesi için (Şekil 5.1);



Şekil 5.1 $O(\Delta x^2)$ mertebesinde merkezi farklar

$$f(x_i) = f(x_{i+1/2}) + \Delta x / 2 f'(x_{i+1/2}) + 0(\Delta x^2) \quad (5.1.7)$$

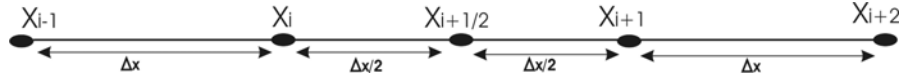
$$f(x_{i+1}) = f(x_{i+1/2}) - (\Delta x / 2) f'(x_{i+1/2}) + 0(\Delta x^2) \quad (5.1.8)$$

ileri ve geri farklar yaklaşımları yazılır. (5.1.8) eşitliği (-1) ile çarpılıp iki eşitlik alt alta toplandığında;

$$f'(x_{i+1/2}) = \frac{f(x_i) - f(x_{i+1})}{\Delta x} \quad (5.1.9)$$

elde edilir.

$O(\Delta x^4)$ mertebesi için (Şekil 5.2);



Şekil 5.2 $O(\Delta x^4)$ mertebesinde merkezi farklar

$$f(x_{i+2}) = f(x_{i+1/2}) + \Delta x f'(x_{i+1/2}) + \frac{1}{2!} (\Delta x)^2 f''(x) + \frac{1}{3!} (\Delta x)^3 f'''(x) + 0(\Delta x^4) \quad (5.1.10)$$

$$f(x_{i+1}) = f(x_{i+1/2}) + \Delta x f'(x_{i+1/2}) + \frac{1}{2!} (\Delta x)^2 f''(x) + \frac{1}{3!} (\Delta x)^3 f'''(x) + 0(\Delta x^4) \quad (5.1.11)$$

$$f(x_i) = f(x_{i+1/2}) + \Delta x f'(x_{i+1/2}) + \frac{1}{2!} (\Delta x)^2 f''(x) + \frac{1}{3!} (\Delta x)^3 f'''(x) + 0(\Delta x^4) \quad (5.1.12)$$

$$f(x_{i-1}) = f(x_{i+1/2}) + \Delta x f'(x_{i+1/2}) + \frac{1}{2!} (\Delta x)^2 f''(x) + \frac{1}{3!} (\Delta x)^3 f'''(x) + 0(\Delta x^4) \quad (5.1.13)$$

eşitlikleri yazılır. Eşitliklerde Δx yerine yazıldığında;

$$f(x_{i+2}) = f(x_{i+1/2}) + \frac{3\Delta x}{2} f'(x_{i+1/2}) + \frac{9\Delta x^2}{8} f''(x) + \frac{27\Delta x^3}{48} f'''(x) + 0(\Delta x^4) \quad (5.1.14)$$

$$f(x_{i+1}) = f(x_{i+1/2}) + \frac{\Delta x}{2} f'(x_{i+1/2}) + \frac{\Delta x^2}{8} f''(x) + \frac{\Delta x^3}{48} f'''(x) + 0(\Delta x^4) \quad (5.1.15)$$

$$f(x_i) = f(x_{i+1/2}) - \frac{\Delta x}{2} f'(x_{i+1/2}) + \frac{\Delta x^2}{8} f''(x) - \frac{\Delta x^3}{48} f'''(x) + 0(\Delta x^4) \quad (5.1.16)$$

$$f(x_{i-1}) = f(x_{i+1/2}) - \frac{3\Delta x}{2} f'(x_{i+1/2}) + \frac{9\Delta x^2}{8} f''(x) - \frac{27\Delta x^3}{48} f'''(x) + 0(\Delta x^4) \quad (5.1.17)$$

elde edilir. Eşitliklerde, 2. ve 3. türevler yok edilip, 1.türev elde edilmeye çalışılır. Bunun için 1.denklem (1) ile 2.denklem (-27) ile 3.denklem (27) ile 4.denklem (-1) ile çarpılıp 4 denklem alt alta toplanır. Sonuç olarak;

$$f'(x_{i+1/2}) = \frac{-f(x_{i+2}) + 27f(x_{i+1}) - 27f(x_i) + f(x_{i-1}))}{24\Delta x} \quad (5.1.18)$$

elde edilir.

5.2 Maxwell Denklemlerinin Sonlu Farklarla Uyarlanması

5.2.1 Bir boyutlu (1B) durum

Maxwell denklemlerinin 1B durumunda x ve y yönünde elektrik ve manyetik alan değişiminin olmadığı kabul edilmektedir. Buna göre elektrik alanın bilinen zaman değerinden bir sonraki zaman adımındaki değerini Maxwell denklemlerinin sonlu farklar yaklaşımı ile elde edilmesi işlemi aşağıda tanımlanmıştır.

$$\frac{\partial H_y}{\partial z} = -\varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} - \sigma E_x \quad (5.2.1.1)$$

$$\frac{\partial H_y^{n+1/2}(k)}{\partial z} = -\varepsilon(k) \frac{\partial E_x^{n+1/2}(k)}{\partial t} - \sigma(k) E_x^{n+1/2}(k) \quad (5.2.1.2)$$

Burada $E_x^n(k)$ ve $H_y^n(k)$ sırasıyla elektrik ve manyetik alanı ve n zamanı k ise konumu ifade etmektedir.

(5.2.1.2) denklemi üzerinde elektrik alan ve manyetik alan üzerinde 2. dereceden merkezi farklar yaklaşımı (5.1.9) kullanılarak işlem yapıldığında;

$$\frac{\partial E_x^{n+1/2}(k)}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} [E_x^{n+1}(k) - E_x^n(k)] \quad (5.2.1.3)$$

$$\frac{\partial H_y^{n+1/2}(k)}{\partial z} = \frac{1}{\Delta z} [H_y^{n+1/2}(k+1/2) - H_y^{n+1/2}(k-1/2)] \quad (5.2.1.4)$$

$$E_x^{n+1/2}(k) = \left[\frac{E_x^{n+1}(k) + E_x^n(k)}{2} \right] \quad (5.2.1.5)$$

(5.2.1.3), (5.2.1.4) ve (5.2.1.5) denklemleri elde edilir. Eşitlikler (5.2.1.2) denkleminde yerlerine yazıldığında;

$$E_x^{n+1}(k) = \frac{2\varepsilon(k) - \sigma(k)\Delta t}{2\varepsilon(k) + \sigma(k)\Delta t} E_x^n(k) - \frac{2\Delta t}{(2\varepsilon(k) + \sigma(k)\Delta t)\Delta z} [H_y^{n+1/2}(k+1/2) - H_y^{n+1/2}(k-1/2)] \quad (5.2.1.6)$$

elde edilir (Lee and Teixeira 2006).

Eşitlik (5.2.1.6) de görüldüğü gibi, $E_x^{n+1}(k)$ elektrik alan değerini hesaplayabilmek için kendinden bir zaman önceki $E_x^n(k)$ elektrik alan değeri, $k+1/2$ ve $k-1/2$ konumlarındaki manyetik alan değeri gereklidir. Manyetik alanın bilinen zaman değerlerinden bir adım zaman sonraki değerinin hesaplanması için yine Maxwell denklemi;

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} = -\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} \quad (5.2.1.7)$$

$$\frac{\partial E_x^n(k+1/2)}{\partial z} = -\mu(k+1/2) \frac{H_y^n(k+1/2)}{\partial t} \quad (5.2.1.8)$$

(5.2.1.8) denklemi üzerinde elektrik alan ve manyetik alan üzerinde 2. dereceden merkezi farklar yaklaşımı (5.1.9) kullanılarak işlem yapılırsa;

$$\frac{H_y^n(k+1/2)}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} [H_y^{n+1/2}(k+1/2) - H_y^{n-1/2}(k+1/2)] \quad (5.2.1.9)$$

$$\frac{\partial E_x^n(k+1/2)}{\partial z} = \frac{1}{\Delta z} [E_x^n(k+1) - E_x^n(k)] \quad (5.2.1.10)$$

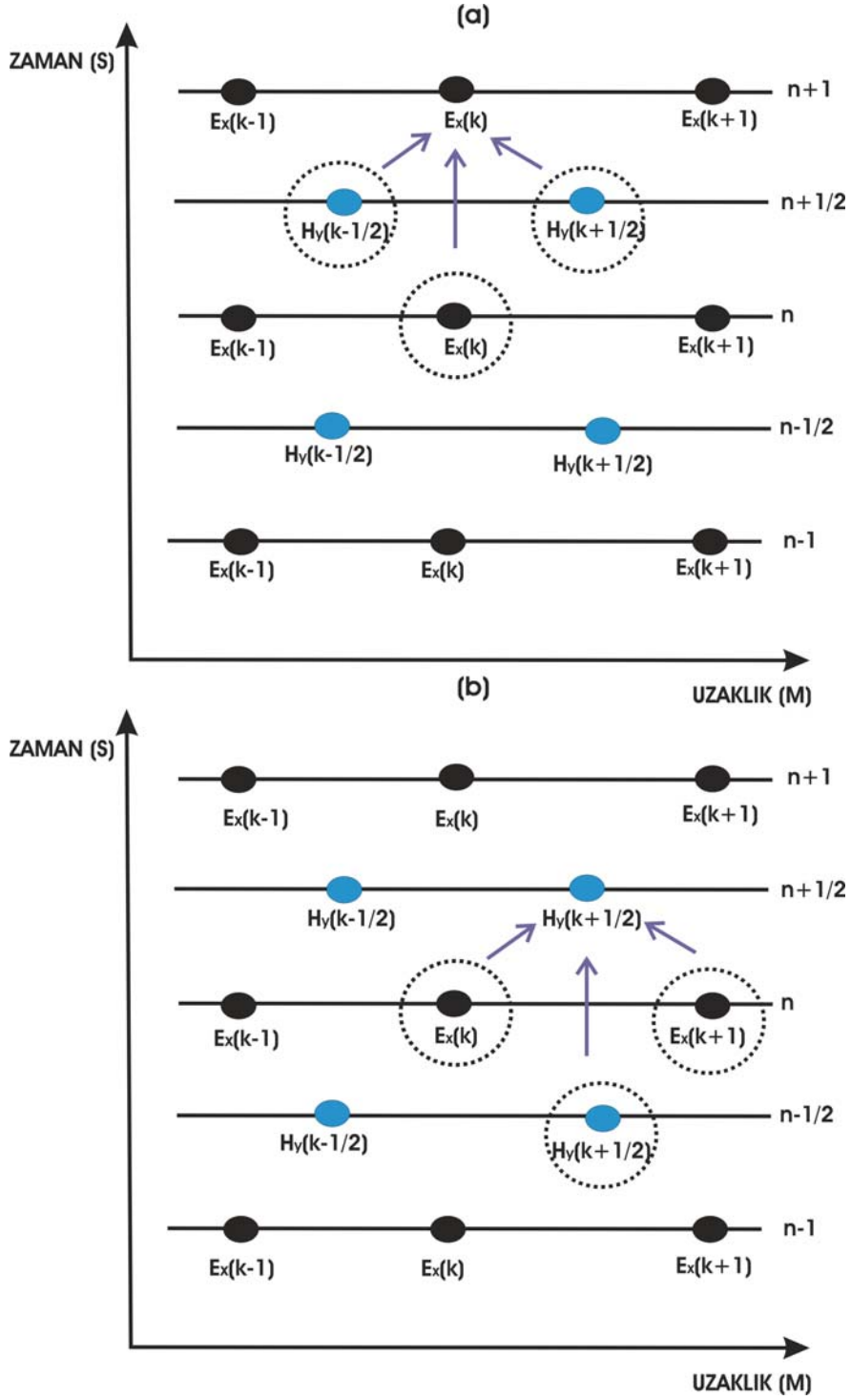
(5.2.1.9) ve (5.2.1.10) denklemleri elde edilir. Eşitlikler (5.2.1.8) denkleminde yerlerine yazılırsa;

$$H_y^{n+1/2}(k+1/2) = H_y^{n-1/2}(k+1/2) - \frac{\Delta t}{\mu(k)\Delta z} [E_x^n(k+1) - E_x^n(k)] \quad (5.2.1.11)$$

zaman ortamında hesaplanması gereken manyetik alan bileşeni bulunmuş olur (Lee and Teixeira 2006).

Eşitlik (5.2.1.11) de görüldüğü gibi, $H_y^{n+1/2}(k+1/2)$ manyetik alan değerini hesaplayabilmek için kendinden bir zaman önceki $H_y^{n-1/2}(k+1/2)$ manyetik alan değeri, k+1 ve k konumlarındaki elektrik alan değeri gereklidir.

Manyetik ve elektrik alan denklemlerinden görüldüğü gibi, zamanın tam katlarında elektrik alan, zamanın kesirli katlarında ise manyetik alan değeri hesaplanır. Manyetik ve elektrik alan bileşeni arasında $\Delta t/2$ 'lik bir fark vardır. Yani hem farklı konumlarda hem de farklı zamanlarda hesaplanırlar (Şekil 5.3). Şekil 5.3'e göre; $t = 0, \Delta t, 3\Delta t, \dots$ zamanlarında elektrik alan, $t = \Delta t/2, 3\Delta t/2, \dots$ zamanlarında manyetik alan hesaplanır.



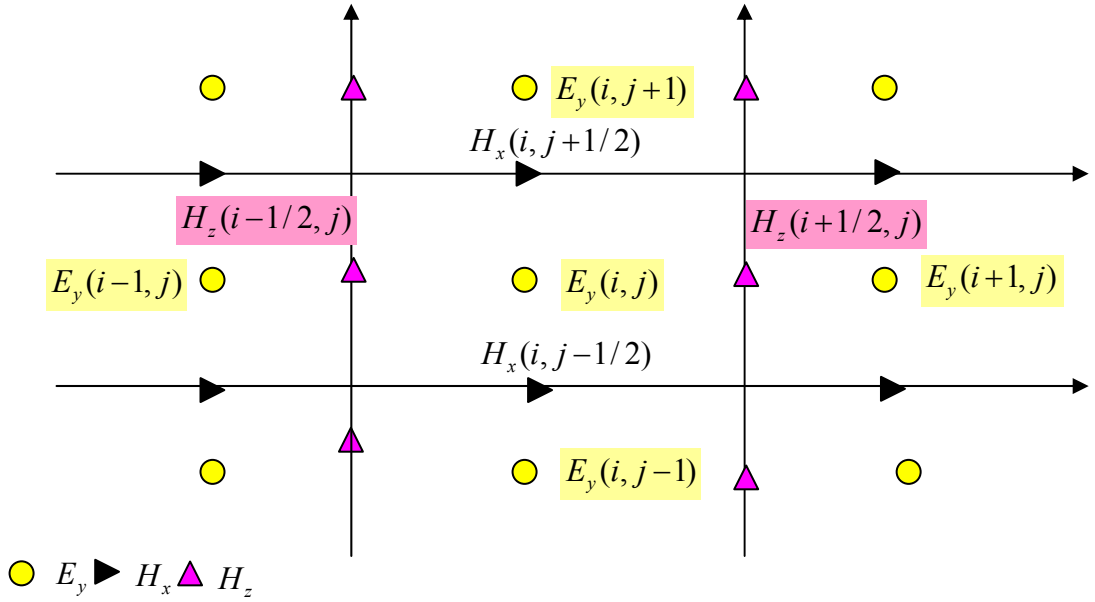
Şekil 5.3 1B ortamda: a. Elektrik alanın hesabı, b. Manyetik alanın hesabı

5.2.2 İki boyutlu (2B) durum

Daha önceki bölümlerde ortamın 2B olması durumunda Maxwell denklemlerinden ve TE, TM-modlarından bahsedilmişti. Bu bölümde denklemlerin sonlu farklar yaklaşımına uyarlanması her mod için ayrı ayrı yapılacaktır.

5.2.2.1 TM-modu bileşenlerinin sonlu farklar ile hesaplanması

2B model için y yönünde bir değişim olmadığı kabul edilerek manyetik alanın H_x ve H_z bileşeni, elektrik alanın E_y bileşeni sonlu farklar ağı içinde bulunan her bir hücre içine yerleştirilecektir. Yani bir hücrede H_x , H_z ve E_y hesaplanır (Şekil 5.4).



Şekil 5.4 TM-modunda elektrik ve manyetik alanların i, j koordinatlarında gösterimi (Lee and Teixeira 2006)

Elektrik alanın (E_y) 'x' yönündeki değişimi için sonlu farklar denklemini elde etmeye çalışalım. (4.1.3) denklemi zamana ve koordinatlara bağlı yazılırsa;

$$\frac{\partial E_y^n(i+1/2, j)}{\partial x} = \mu(i+1/2, j) \frac{\partial H_z^n(i+1/2, j)}{\partial t} \quad (5.2.2.1.1)$$

denklemleri elde edilir. Denklemde elektrik alan ve manyetik alan içeren terimler, zamana ve konuma göre türevleri 2. dereceden merkezi farklara göre açılırsa;

$$\frac{\partial E_y^n(i+1/2, j)}{\partial x} = \frac{1}{\Delta x} [E_y^n(i+1, j) - E_y^n(i, j)] \quad (5.2.2.1.2)$$

$$\frac{\partial H_z^{n+1/2}(i+1/2, j)}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} [H_z^{n+1/2}(i+1/2, j) - H_z^{n-1/2}(i+1/2, j)] \quad (5.2.2.1.3)$$

denklemleri elde edilir. (5.2.2.1.2) ve (5.2.2.1.3) denklemleri (5.2.2.1.1) denkleminde yerlerine yazılıp manyetik alan yalnız bırakıldığında;

$$\frac{[E_y^n(i+1, j) - E_y^n(i, j)]}{\Delta x} = \frac{\mu(i+1/2, j)}{\Delta t} [H_z^{n+1/2}(i+1/2, j) - H_z^{n-1/2}(i+1/2, j)] \quad (5.2.2.1.4)$$

ve

$$H_z^{n+1/2}(i+1/2, j) = H_z^{n-1/2}(i+1/2, j) + \frac{\Delta t}{\mu(i+1/2, j)\Delta x} [E_y^n(i+1, j) - E_y^n(i, j)] \quad (5.2.2.1.5)$$

elde edilir (Lee and Teixeira 2006).

Elektrik alanın 'z' yönündeki değişimi için sonlu farklar denklemini elde etmeye çalışalım. (4.1.4) denklemi zamana ve koordinatlara bağlı yazılırsa;

$$\frac{\partial E_y^n(i, j+1/2)}{\partial z} = -\mu(i, j+1/2) \frac{\partial H_x^n(i, j+1/2)}{\partial t} \quad (5.2.2.1.6)$$

denklemleri elde edilir. Denklemde elektrik alan ve manyetik alan içeren terimler merkezi farklara göre açılırsa;

$$\frac{\partial E_y^n(i, j+1/2)}{\partial z} = \frac{1}{\Delta z} [E_y^n(i, j+1) - E_y^n(i, j)] \quad (5.2.2.1.7)$$

$$\frac{\partial H_x^n(i, j+1/2)}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} [H_x^{n+1/2}(i, j+1/2) - H_x^{n-1/2}(i, j+1/2)] \quad (5.2.2.1.8)$$

denklemleri elde edilir. (5.2.2.1.7) ve (5.2.2.1.8) denklemleri (5.2.2.1.6) denkleminde yerlerine yazılıp manyetik alan tek başına bırakıldığında;

$$\frac{[E_y^n(i, j+1) - E_y^n(i, j)]}{\Delta z} = \frac{-\mu(i, j+1/2)}{\Delta t} [H_x^{n+1/2}(i, j+1/2) - H_x^{n-1/2}(i, j+1/2)] \quad (5.2.2.1.9)$$

ve

$$H_x^{n+1/2}(i, j+1/2) = H_x^{n-1/2}(i, j+1/2) + \frac{\Delta t}{\mu(i, j+1/2)\Delta z} [E_y^n(i, j+1) - E_y^n(i, j)] \quad (5.2.2.1.10)$$

bulunur (Lee and Teixeira 2006).

Manyetik alanın ‘x’ ve ‘z’ yönünde değişimi için sonlu farklar denklemini elde etmeye çalışalım. (4.1.5) denklemi zamana ve koordinatlara bağlı yazılırsa;

$$\sigma(i, j)E_y^{n+1/2}(i, j) + \varepsilon(i, j) \frac{\partial E_y^{n+1/2}(i, j)}{\partial t} = \frac{\partial H_z^{n+1/2}(i, j)}{\partial x} - \frac{\partial H_x^{n+1/2}(i, j)}{\partial z} \quad (5.2.2.1.11)$$

denklemini elde edilir. Denklemdaki terimler açılırsa;

$$\frac{\partial E_y^{n+1/2}(i, j)}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} [E_y^{n+1}(i, j) - E_y^n(i, j)] \quad (5.2.2.1.12)$$

$$\frac{\partial H_z^{n+1/2}(i, j)}{\partial x} = \frac{1}{\Delta x} [H_z^{n+1/2}(i+1/2, j) - H_z^{n+1/2}(i-1/2, j)] \quad (5.2.2.1.13)$$

$$\frac{\partial H_x^{n+1/2}(i, j)}{\partial z} = \frac{1}{\Delta z} [H_x^{n+1/2}(i, j+1/2) - H_x^{n+1/2}(i, j-1/2)] \quad (5.2.2.1.14)$$

$$E_y^{n+1/2}(i, j) = \left[\frac{E_y^{n+1}(i, j) + E_y^n(i, j)}{2} \right] \quad (5.2.2.1.15)$$

dört denklem elde edilir. Bu denklemler (5.2.2.1.11) denkleminde yerine yazılıp elektrik alan çekilirse (5.2.2.1.16) ve (5.2.2.1.17) denklemleri elde edilir (Lee and Teixeira 2006).

$$\frac{\sigma(i, j)}{2} [E_y^{n+1}(i, j) + E_y^n(i, j)] + \frac{\varepsilon(i, j)}{\Delta t} [E_y^{n+1}(i, j) - E_y^n(i, j)] =$$

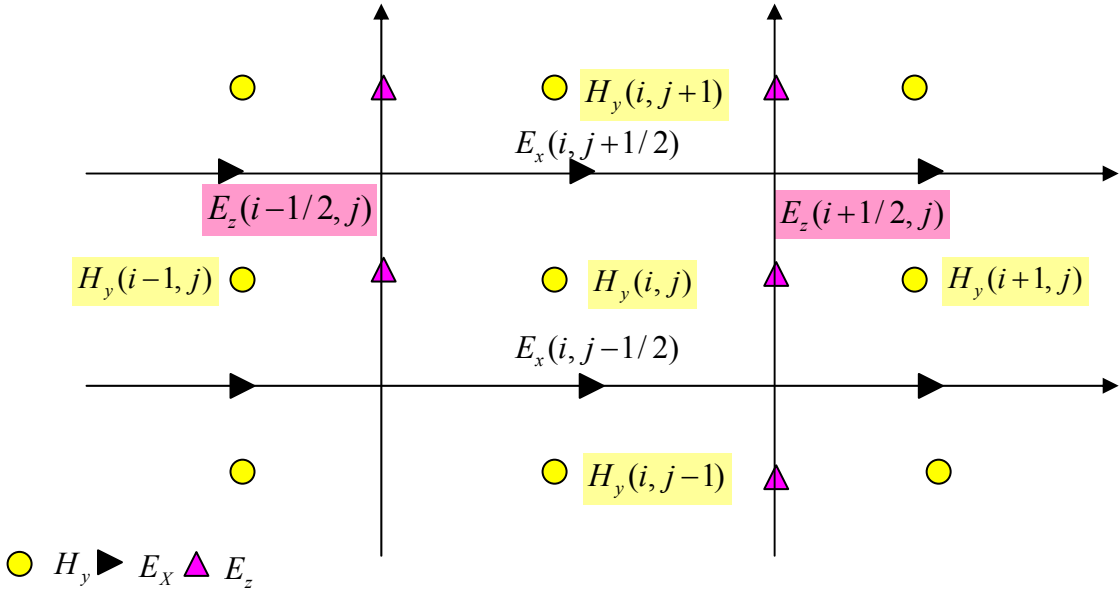
$$\left[\frac{H_z^{n+1/2}(i+1/2, j) - H_z^{n+1/2}(i-1/2, j)}{\Delta x} \right] - \left[\frac{H_x^{n+1/2}(i, j+1/2) - H_x^{n+1/2}(i, j-1/2)}{\Delta z} \right] \quad (5.2.2.1.16)$$

$$E_y^{n+1}(i, j) = \left[\frac{\sigma(i, j)\Delta t - 2\varepsilon(i, j)}{\sigma(i, j)\Delta t + 2\varepsilon(i, j)} \right] E_y^n(i, j) + \frac{2\Delta t}{\sigma(i, j)\Delta t + 2\varepsilon(i, j)}$$

$$\left[\frac{H_z^{n+1/2}(i+1/2, j) - H_z^{n+1/2}(i-1/2, j)}{\Delta x} \right] - \left[\frac{H_x^{n+1/2}(i, j+1/2) - H_x^{n+1/2}(i, j-1/2)}{\Delta z} \right] \quad (5.2.2.1.17)$$

5.2.2.2 TE-modu bileşenlerinin sonlu farklar ile hesaplanması

Elektrik alanın x ve z bileşeni, manyetik alanın y bileşeni hücre içerisinde yerleştirilecektir. Yani bir hücrede E_x , E_z ve H_y hesaplanır (Şekil 5.5).



Şekil 5.5 TE-modunda elektrik ve manyetik alanların i, j koordinatlarında gösterimi (Lee and Teixeira 2006)

Benzer şekilde eşitlikler çıkarılır (Lee and Teixeira 2006).

$$H_y^{n+1}(i, j) = H_y^n(i, j) - \frac{\Delta t}{\mu(i, j)} \left\{ \frac{[E_z^{n+1/2}(i+1/2, j) - E_z^{n+1/2}(i-1/2, j)]}{\Delta x} + \frac{[E_x^{n+1/2}(i, j+1/2) - E_x^{n+1/2}(i, j-1/2)]}{\Delta z} \right\} \quad (5.2.2.2.1)$$

$$E_x^{n+1/2}(i, j+1/2) = \left[\frac{\sigma(i, j+1/2)\Delta t - 2\varepsilon(i, j+1/2)}{\sigma(i, j+1/2)\Delta t + 2\varepsilon(i, j+1/2)} \right] E_x^{n-1/2}(i, j+1/2) - \left[\frac{2\Delta t}{\sigma(i, j+1/2)\Delta t + 2\varepsilon(i, j+1/2)\Delta z} \right] [H_y^n(i, j+1) - H_y^n(i, j)] \quad (5.2.2.2.2)$$

$$E_z^{n+1/2}(i+1/2, j) = \left[\frac{\sigma(i+1/2, j)\Delta t - 2\varepsilon(i+1/2, j)}{\sigma(i+1/2, j)\Delta t + 2\varepsilon(i+1/2, j)} \right] E_z^{n-1/2}(i+1/2, j) - \left[\frac{2\Delta t}{\sigma(i+1/2, j)\Delta t - 2\varepsilon(i+1/2, j)\Delta x} \right] [H_y^n(i+1, j) - H_y^n(i, j)] \quad (5.2.2.2.3)$$

Bu denklemler, 2. dereceden merkezi fark yaklaşımı kabulü ve herhangi bir sınır koşulu uygulanmaması halinde çıkarılmış denklemlerdir.

6. YER RADARI YÖNTEMİNDE İKİ BOYUTLU MODELLEME

Yer radarı modellemesinde ilk adım, 2B model ağı, dalga boyundan çok daha küçük boydaki hücelere bölünerek sonlu farklar ağının oluşturulmasıdır. Sonlu farklar ağı geometrinin ve çalışma frekansının büyüklüğüne bağlı olarak, binlerce küçük hücreden oluşabilir (Lee and Teixeira 2006). Oluşturulan sonlu farklar ağının her bir hücresine yer içi parametre (μ , σ , ϵ) değerleri atanır ve manyetik ve elektrik alanların bileşenleri bu hücrelerin farklı noktalarında ardışık zaman adımlarında hesaplanırlar (Oğuz ve Gürel 2000, Sevgi 1999). Hangi bileşenlerin hesaplanacağı ortamın boyutuna ve kullanılan tekniğe bağlı olarak değişir. Ortam 3B'lu olduğunda elektrik ve manyetik alanın üçer bileşeni hesaplanır. Ortam 2B'lu olduğunda ise hangi bileşenlerin kullanılacağı genelde kullanılan tekniğe göre seçilir. Kullanılan tekniğe göre yer radarı yöntemi iki gruba ayrılır;

- 1.Yüzey yer radarı
- 2.Kuyu yer radarı.

Yüzey yer radarında, alıcı ve verici anten genelde x-z düzlemine dik konumlandırılır böylece TM-modunda veri toplanır. Kuyu yer radarında ise, bir veya iki anten kuyu içine yerleştirilir ve TE-modunda veri toplanır (Irving and Knight 2006, Irving 2006). Bu tezde yüzey yer radarı esas alınarak TM-modu ve denklemleri kullanılacaktır. Bu nedenle bu bölümden itibaren denklemler sadece TM-modu için yazılacaktır.

6.1 Yüzey Yer Radarında Modelleme ve Sınır Koşulları

TM-modu için, 5. bölümde manyetik alan bileşenleri ve elektrik alan bileşeni için sonlu farklar denklemleri yazılmıştı. Denklemlerin anlaşılabilirliğinin kolay olması için konumda ve zamanda 2.dereceden merkezi farklar yaklaşımı kullanılmıştı. Ancak tez aşamasında sonlu farklar denklemleri, sınır koşulunda uygulanmasıyla birlikte zamana göre 2.dereceden konuma göre 4.dereceden merkezi fark yaklaşımı ($O[2,4]$) ile çıkarılmıştır (Şekil 6.1).

Bu bölümde, sınır koşulunun denklemlere dâhil olmasından önce (O[2,4])'e göre sonlu farklar denklemlerinin çıkarılması uygun bulunmuştur. Buna göre (5.2.2.1.1) denkleminde;

$$H_z^{n+1/2}(i+1/2, j) = H_z^{n-1/2}(i+1/2, j) + \frac{\Delta t}{\mu(i+1/2, j)24\Delta x} \left[-E_y^n(i+2, j) + 27E_y^n(i+1, j) - 27E_y^n(i, j) + E_y^n(i-1, j) \right] \quad (6.1.1)$$

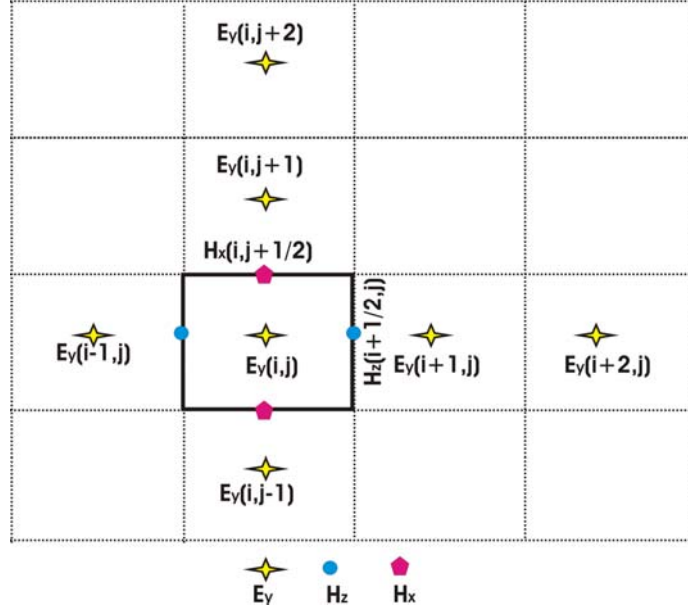
elde edilir. (5.2.2.1.2) denkleminde;

$$H_x^{n+1/2}(i, j+1/2) = H_x^{n-1/2}(i, j+1/2) + \frac{\Delta t}{\mu(i, j+1/2)24\Delta z} \left[-E_y^n(i, j+2) + 27E_y^n(i, j+1) - 27E_y^n(i, j) + E_y^n(i, j-1) \right] \quad (6.1.2)$$

elde edilir ve son olarak (5.2.2.1.3) denkleminde de;

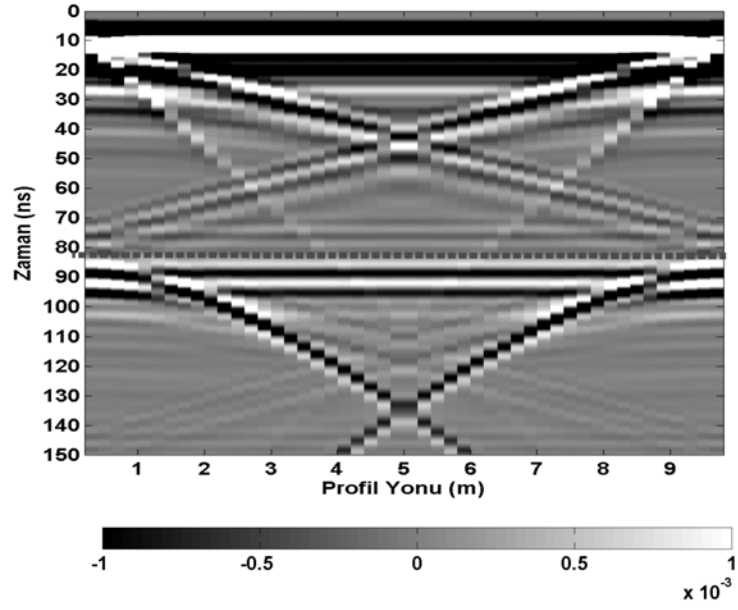
$$E_y^{n+1}(i, j) = \left[\frac{\sigma(i, j)\Delta t - 2\varepsilon(i, j)}{\sigma(i, j)\Delta t + 2\varepsilon(i, j)} \right] E_y^n(i, j) + \frac{2\Delta t}{\sigma(i, j)\Delta t + 2\varepsilon(i, j)} \left[\frac{\left[-H_z^{n+1/2}(i+3/2, j) + 27H_z^{n+1/2}(i+1/2, j) - 27H_z^{n+1/2}(i-1/2, j) + H_z^{n+1/2}(i-3/2, j) \right]}{24\Delta x} - \frac{\left[-H_x^{n+1/2}(i, j+3/2) + 27H_x^{n+1/2}(i, j+1/2) - 27H_x^{n+1/2}(i, j-1/2) + H_x^{n+1/2}(i, j-3/2) \right]}{24\Delta z} \right] \quad (6.1.3)$$

elde edilir. Son üç denklem, bir sınır koşulu uygulanmadığında kullanılan denklemlerdir.



Şekil 6.1 TM-modunda $O[(2,4)]$ ' e göre elektrik ve manyetik alanların i,j koordinatlarında gösterimi

Hesaplamalar için sonsuza giden bir model ağı tasarlanamayacağı için, model ağının bir yerden kesilmesi zorunludur. Ancak, bu kesilmeden dolayı verici antenden gönderilen EM dalga model ağı kenarlarına çarparak yansıyan ve saçılan EM alanlar meydana getirir ve kesitlerde olmaması gereken yalancı EM dalga alanları oluşur (Şekil 6.2'de yatay tabaka modeline ait sınır koşulu uygulanmamış halde elde edilen radargram sonucu görülmektedir). Yalancı EM dalga alanlarını önlemek amacıyla bir sınır koşulunun uygulanması gereklidir (Berenger 1994, 1996). TM-modu için yazılan Maxwell denklemleri sınır koşuluda dikkate alınarak yeniden düzenlenecektir.



Şekil 6.2 Sınır koşulu uygulanmamış, yatay iki tabaka modeline ait radargram

Tez aşamasında, kenardan gelen yansımaları önlemek amacıyla (CPML-Convolution Perfectly Matched Layer) mükemmel uyumlu tabaka sınır koşulu kullanılmıştır (Roden and Gedney 2000). Yöntemde model ağı etrafına belirli kalınlıkta sanal bir tabaka yerleştirilir ve bu tabakaya sınır bölgesi adı verilir (Şekil 6.3). Sınır bölgesinin amacı kenarlardan gelen yansımaları yok etmek, EM dalgayı yutmaktır.



Şekil 6.3 Model ağı ve sınır bölgesi

Sınır koşullarının (4.3.1), (4.3.2) ve (4.3.3) denklemlerine uygulanması amacıyla karmaşık germeli koordinat (complex stretched coordinate) uzayında bir operatör tanımlanır.

$$\nabla = \tilde{x} \frac{1}{S_x} \frac{\partial}{\partial x} + \tilde{y} \frac{1}{S_y} \frac{\partial}{\partial y} + \tilde{z} \frac{1}{S_z} \frac{\partial}{\partial z} \quad (6.1.4)$$

Bu denklemde; $S_{x,y,z}$ kısaca S_k ile gösterilebilir. 'k' yönü (x,y,z) ifade etmektedir. S_k karmaşık germeli koordinat uzayında değişkendir (6.1.5).

$$S_k = K_k + \frac{\sigma_k}{\alpha_k + i\omega\epsilon_0} \quad (6.1.5)$$

(6.1.5) denkleminde ϵ_0 : serbest uzayda dielektrik katsayısı, α_k , K_k , σ_k hem model ağı içinde hem de sınırlarda dalganın yayını ve sönümü için düzenlenmiş parametrelerdir. (4.3.1) - (4.3.3) denklemlerinde Maxwell denklemlerindeki elektrik ve manyetik alanın konuma göre türevlerinin başına $1/S_x$ ve $1/S_z$ çarpanı eklenir (6.1.6-6.1.8). Yani '∇', operatörü karmaşık germeli koordinat sisteminde yerine yazılır. Buna göre;

$$i\omega\mu H_x = -\frac{1}{S_z} \frac{\partial E_y}{\partial z} \quad (6.1.6)$$

$$i\omega\mu H_z = \frac{1}{S_x} \frac{\partial E_y}{\partial x} \quad (6.1.7)$$

$$i\omega\epsilon E_y + \sigma E_y = \frac{1}{S_x} \frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{1}{S_z} \frac{\partial H_x}{\partial z} \quad (6.1.8)$$

denklemleri elde edilir.

Sınır şartına göre model ağı içinde, $S_k=1$ 'dir. Bunun anlamı model ağı içinde S_k 'nın etkisiz eleman olmasıdır. Fakat sınır bölgesinde geri yansımaları önleyen karmaşık değerler alır. (6.1.5) denkleminde ait parametreler sırasıyla;

$$K_k = \begin{cases} 1 & \text{Model ağı içinde} \\ 1 + \left(\frac{d}{\delta}\right)^m (K_{k_{\max}} - 1) & \text{Sınır bölgesinde} \end{cases} \quad (6.1.9)$$

$$\sigma_k = \begin{cases} 0 & \text{Model ağı içinde} \\ \left(\frac{d}{\delta}\right)^m (\sigma_{k_{\max}}) & \text{Sınır bölgesinde} \end{cases} \quad (6.1.10)$$

ve

$$\sigma_{k_{\max}} = \frac{m+1}{150\pi\sqrt{\varepsilon_r}\Delta_k} \quad (6.1.11)$$

dır (Irving and Knight 2006).

Denklemlerde δ ; sınır bölgesi kalınlığı, d ; sınır bölgesindeki herhangi bir nokta (denklemlerdeki koordinat sistemine göre değişen x,z) ile model ağı arasındaki mesafe, m ; Katsayı, sınır tabakası bileşeni olarak adlandırılır.

CPML sınır koşulunun FDTD yöntemine uygulanabilmesi için (6.1.5) denkleminin ters Fourier dönüşümü alınmalıdır. Buna göre;

$$S_k = K_k + \frac{\sigma_k}{\alpha_k + iw\varepsilon_0} \xrightarrow{\text{Ters Fourier dönüşümü}} S_k^{-1}(t) = \frac{\delta(t)}{K_k} - \frac{\sigma_k}{\varepsilon_0 K_k^2} \exp\left[-\frac{t}{\varepsilon_0} \left(\frac{\sigma_k}{K_k} + \alpha_k\right)\right] u(t) \quad (6.1.12)$$

olur. Bu denklemde;

$$\zeta_k(t) = -\frac{\sigma_k}{\varepsilon_0 K_k^2} \exp\left[-\frac{t}{\varepsilon_0} \left(\frac{\sigma_k}{K_k} + \alpha_k\right)\right] u(t) \quad (6.1.13)$$

olarak tanımlandığında denklem;

$$S_k^{-1}(t) = \frac{\delta(t)}{K_k} + \zeta_k(t) \quad (6.1.14)$$

olur. Denklemler zaman ortamına dönüştürüldüğünde;

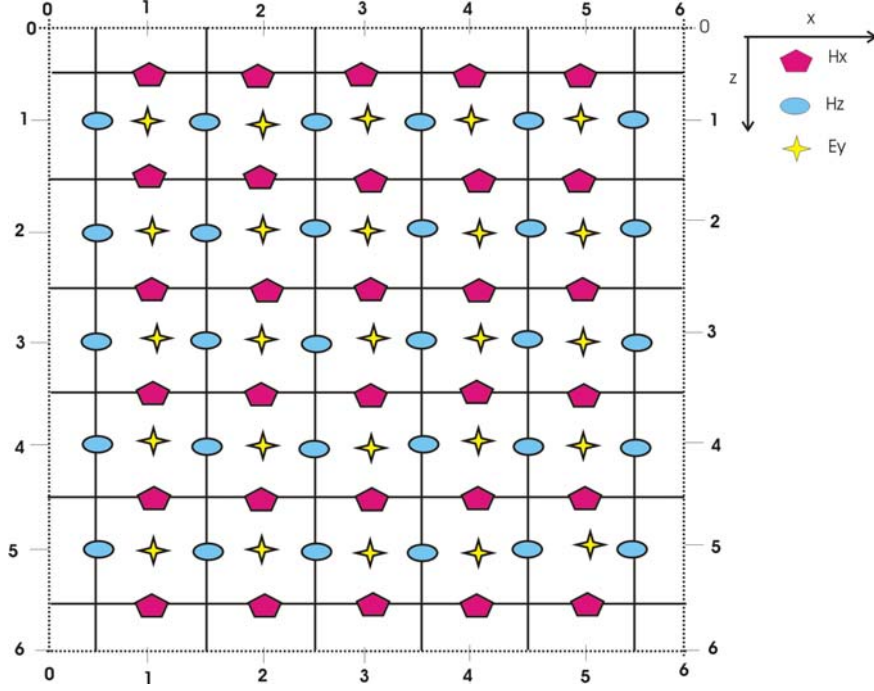
$$\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} = -S_z^{-1} * \frac{\partial E_y}{\partial z} = -\left(\frac{\delta(t)}{K_z} + \zeta_z(t) \right) * \frac{\partial E_y}{\partial z} = -\frac{1}{K_z} \frac{\partial E_y}{\partial z} - \zeta_z(t) * \frac{\partial E_y}{\partial z} \quad (6.1.15)$$

$$\mu \frac{\partial H_z}{\partial t} = S_x^{-1} * \frac{\partial E_y}{\partial x} = \left(\frac{\delta(t)}{K_x} + \zeta_x(t) \right) * \frac{\partial E_y}{\partial x} = \frac{1}{K_x} \frac{\partial E_y}{\partial x} + \zeta_x(t) * \frac{\partial E_y}{\partial x} \quad (6.1.16)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} + \sigma E_y &= S_x^{-1} * \frac{\partial H_z}{\partial x} - S_z^{-1} * \frac{\partial H_x}{\partial z} \\ &= \left(\frac{\delta(t)}{K_x} + \zeta_x(t) \right) * \frac{\partial H_z}{\partial x} - \left(\frac{\delta(t)}{K_z} + \zeta_z(t) \right) * \frac{\partial H_x}{\partial z} \\ &= \frac{1}{K_x} \frac{\partial H_z}{\partial x} + \zeta_x(t) * \frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{1}{K_z} \frac{\partial H_x}{\partial z} + \zeta_z(t) * \frac{\partial H_x}{\partial z} \\ &= \frac{1}{K_x} \frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{1}{K_z} \frac{\partial H_x}{\partial z} + \zeta_x(t) * \frac{\partial H_z}{\partial x} + \zeta_z(t) * \frac{\partial H_x}{\partial z} \end{aligned} \quad (6.1.17)$$

denklemleri elde edilir (Irving 2006).

Denklemlerdeki ‘*’ işareti evrişim işlemini tanımlamaktadır.



Şekil 6.4 TM-modu için sonlu farklar ağı (Irving 2006)

Denklemlerden görüleceği üzere manyetik alan bileşenlerinin hesabında, μ (manyetik alan geçirgenliği); elektrik alan bileşeninin hesabında, ϵ (dielektrik sabiti), σ (elektriksel iletkenlik) kullanılır. Elektrik alan bileşeni her hücrenin ortasında, manyetik alan bileşenleri ise her hücrenin kenarında konumlanır (Şekil 6.4). Elektrik alan bileşeni, aynı konumda fakat kendinden bir önceki zamandaki elektrik alan ve kendinden yarım adım önceki zamandaki komşu hücrelerdeki manyetik alan bileşenleri yardımıyla hesaplanır (Şekil 6.7). Aynı şekilde manyetik alan bileşenleri ise aynı konumda, kendinden bir önceki zamanda bulunan manyetik alan değeri ve kendinden yarım adım önceki zamandaki komşu hücrelerdeki elektrik alan bileşeni yardımıyla hesaplanır (Şekil 6.5 - Şekil 6.6). Hücrelerde manyetik alanın H_x ve H_z bileşeni hesaplandıktan sonra elektrik alanın E_y bileşeni hesaplanır ve hesaplama yinelemeli biçimde devam eder (6.1.18)-(6.1.20).

Sınır bölgesinde CPML sınır şartlarına göre TM-modu FDTD dalga denklemi çözümü için, konum türevleri 4. dereceden, zaman türevleri 2. dereceden yaklaşımla $[O(2,4)]$ kullanılarak; (Bergmann 1996)

$$\begin{aligned}
H_x^{n+1/2}(i, j+1/2) &= H_x^{n-1/2}(i, j+1/2) - D_{b_z}(i, j+1/2) \\
&\quad \left[-E_y^n(i, j+2) + 27E_y^n(i, j+1) - 27E_y^n(i, j) + E_y^n(i, j-1) \right] \\
&\quad - D_c(i, j+1/2) \left[\Psi_{H_{xz}}^n(i, j+1/2) \right]
\end{aligned} \tag{6.1.18}$$

$$\begin{aligned}
H_z^{n+1/2}(i+1/2, j) &= H_z^{n-1/2}(i+1/2, j) + D_{b_x}(i+1/2, j) \\
&\quad \left[-E_y^n(i+2, j) + 27E_y^n(i+1, j) - 27E_y^n(i, j) + E_y^n(i-1, j) \right] \\
&\quad + D_c(i+1/2, j) \left[\Psi_{H_{xz}}^n(i+1/2, j) \right]
\end{aligned} \tag{6.1.19}$$

$$\begin{aligned}
E_y^{n+1}(i, j) &= C_a(i, j) \left[E_y^n(i, j) \right] + C_{b_x}(i, j) \left[-H_z^{n+1/2}(i+3/2, j) \right. \\
&\quad \left. + 27H_z^{n+1/2}(i+1/2, j) - 27H_z^{n+1/2}(i-1/2, j) + H_z^{n+1/2}(i-3/2, j) \right] \\
&\quad - C_{b_z}(i, j) \left[-H_x^{n+1/2}(i, j+3/2) + 27H_x^{n+1/2}(i, j+1/2) - 27H_x^{n+1/2}(i, j-1/2) \right. \\
&\quad \left. + H_x^{n+1/2}(i, j-3/2) \right] + C_c(i, j) \left[\Psi_{E_{yx}}^{n+1/2}(i, j) - \Psi_{E_{yz}}^{n+1/2}(i, j) \right]
\end{aligned} \tag{6.1.20}$$

elde edilir (Irving 2006). Bu denklemlerde tanımlı;

$$C_a = \left(1 - \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon} \right) \left(1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon} \right)^{-1} \tag{6.1.21}$$

$$C_{b_k} = \frac{\Delta t}{\varepsilon} \left(1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon} \right)^{-1} (24K_k \Delta k)^{-1} \tag{6.1.22}$$

$$C_c = \frac{\Delta t}{\varepsilon} \left(1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon} \right)^{-1} \tag{6.1.23}$$

$$D_{b_{x,z}} = \frac{\Delta t}{\mu} (24K_k \Delta k)^{-1} \tag{6.1.24}$$

$$D_c = \frac{\Delta t}{\mu} \tag{6.1.25}$$

dir.

Yine (6.1.18) - (6.1.20) denklemlerindeki $\Psi_{H_{xz}}$, $\Psi_{H_{zx}}$, $\Psi_{E_{yx}}$ ve $\Psi_{E_{yz}}$, FDTD yöntemi ile tanımlı evrişim işlemlerini temsil etmektedirler. Evrişim işlemleri için Luebbers and

Hunsberger (1992) makalesindeki teknikler kullanılarak sayısallaştırılan denklemler kullanılmıştır (Irving 2006). Buna göre;

$$\begin{aligned} \psi_{H_{xz}}^n(i, j+1/2) &= B_z(i, j+1/2) \left[\psi_{H_{xz}}^{n-1}(i, j+1/2) \right] + A_z(i, j+1/2) \\ &\quad \left[-E_y^n(i, j+2) + 27E_y^n(i, j+1) - 27E_y^n(i, j) + E_y^n(i, j-1) \right] \end{aligned} \quad (6.1.26)$$

$$\begin{aligned} \psi_{H_{zx}}^n(i+1/2, j) &= B_x(i+1/2, j) \left[\psi_{H_{zx}}^{n-1}(i+1/2, j) \right] + A_x(i+1/2, j) \\ &\quad \left[-E_y^n(i+2, j) + 27E_y^n(i+1, j) - 27E_y^n(i, j) + E_y^n(i-1, j) \right] \end{aligned} \quad (6.1.27)$$

$$\begin{aligned} \psi_{E_{yx}}^{n+1/2}(i, j) &= B_x(i, j) \left[\psi_{E_{yx}}^{n-1/2}(i, j) \right] + A_x(i, j) \\ &\quad \left[-H_z^{n+1/2}(i+3/2, j) + 27H_z^{n+1/2}(i+1/2, j) - 27H_z^{n+1/2}(i-1/2, j) \right. \\ &\quad \left. + H_z^{n+1/2}(i-3/2, j) \right] \end{aligned} \quad (6.1.28)$$

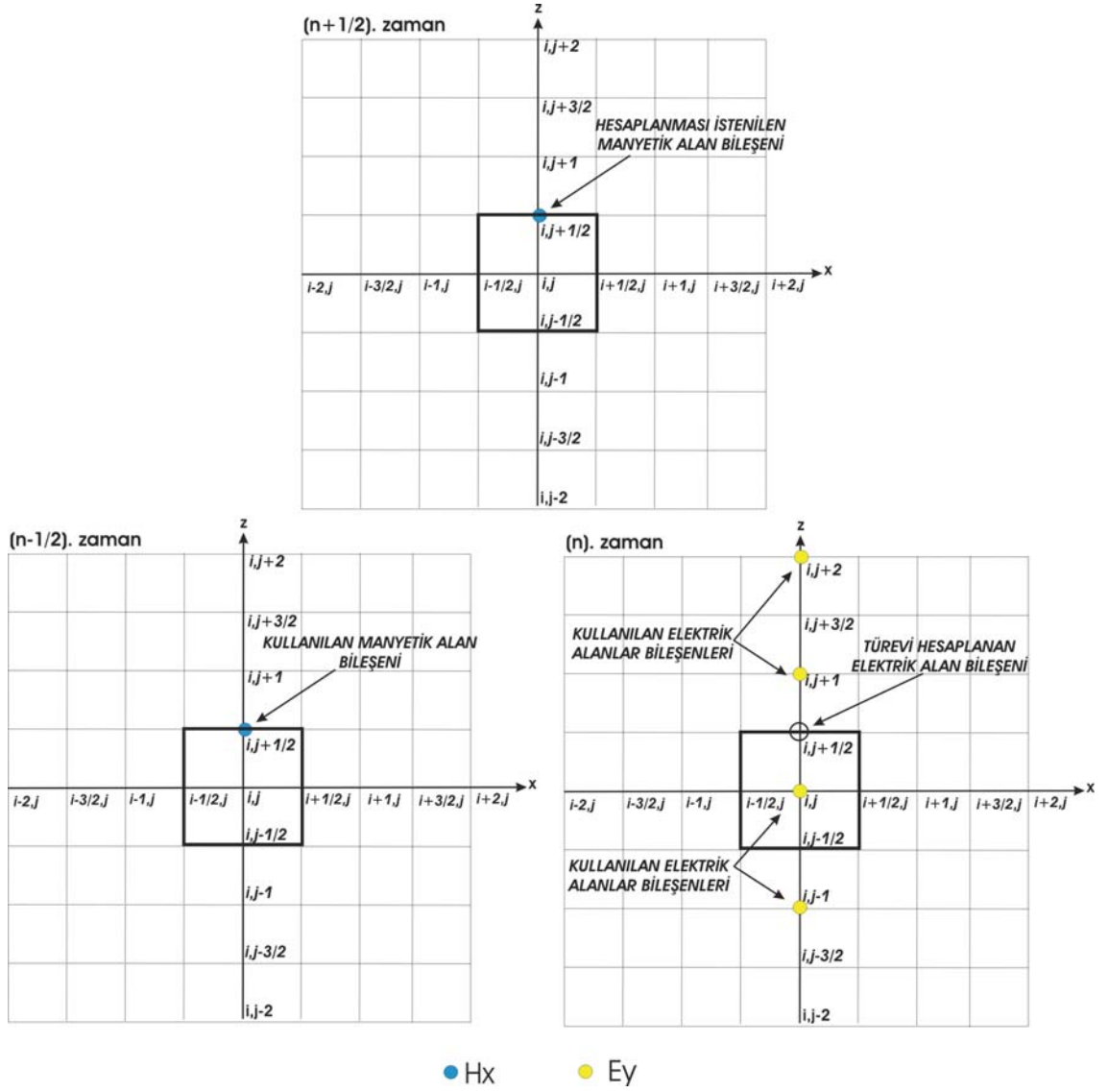
$$\begin{aligned} \psi_{E_{yz}}^{n+1/2}(i, j) &= B_z(i, j) \left[\psi_{E_{yz}}^{n-1/2}(i, j) \right] + A_z(i, j) \\ &\quad \left[-H_x^{n+1/2}(i, j+3/2) + 27H_x^{n+1/2}(i, j+1/2) - 27H_x^{n+1/2}(i, j-1/2) \right. \\ &\quad \left. + H_x^{n+1/2}(i, j-3/2) \right] \end{aligned} \quad (6.1.29)$$

dir. Denklemlerdeki;

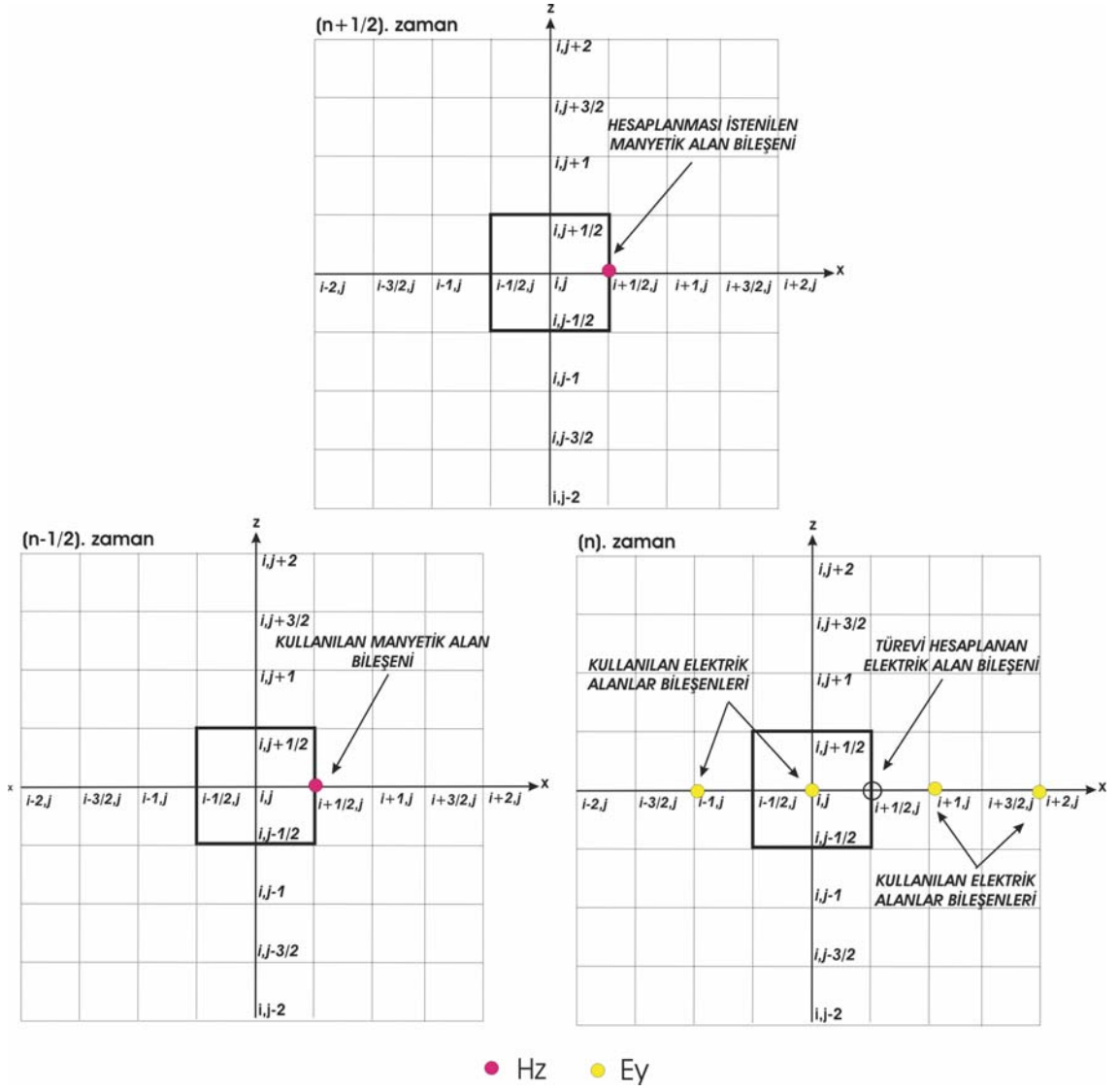
$$A_k = \frac{\sigma_k}{\sigma_k K_k + \alpha_k K_k^2} (B_k - 1) \quad (6.1.30)$$

$$B_k = \exp \left[-\frac{\Delta t}{\epsilon_0} \left(\frac{\sigma_k}{K_k} + \alpha_k \right) \right] \quad (6.1.31)$$

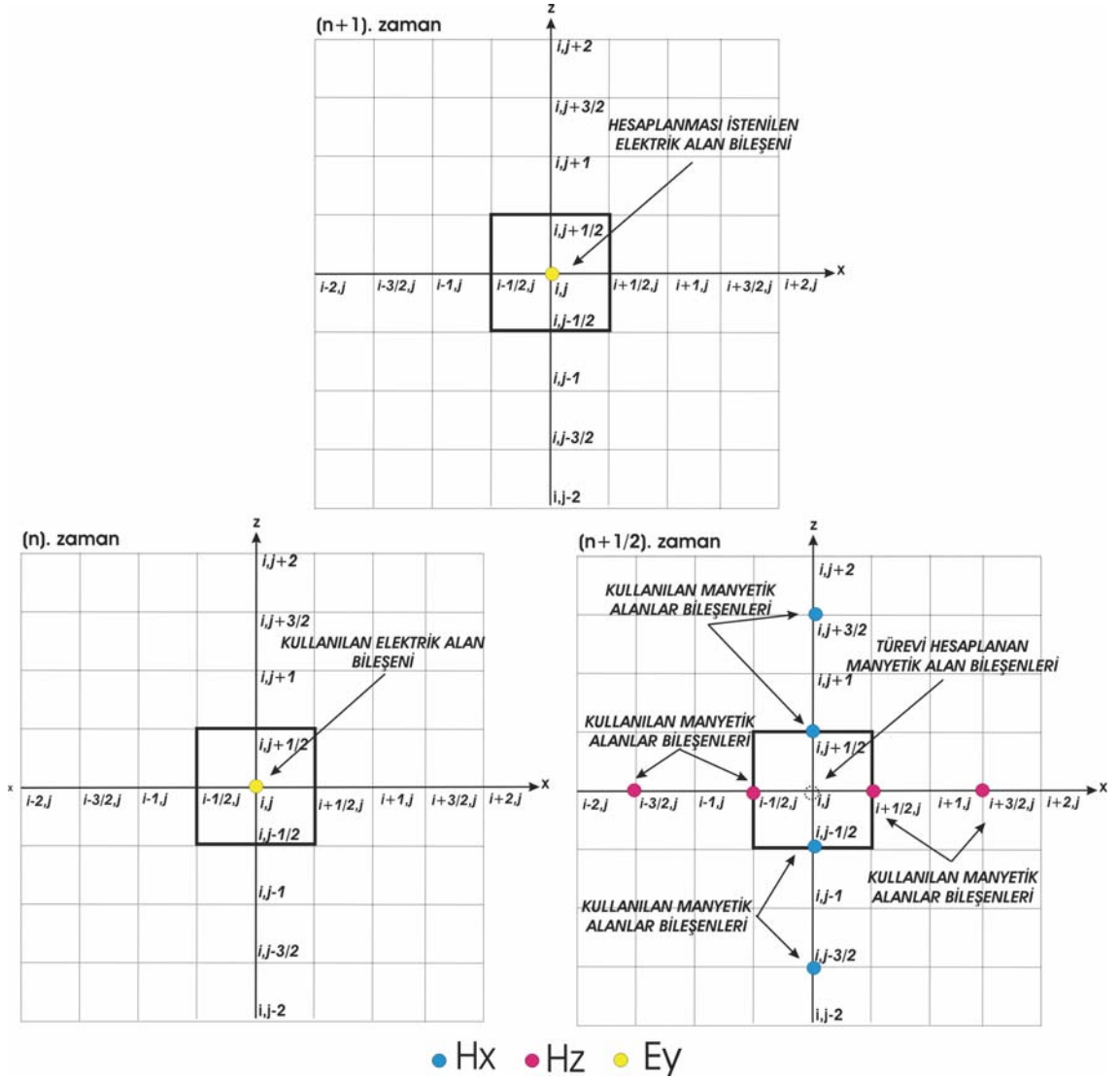
dır (Irving and Knight 2006).



Şekil 6.5 H_x bileşeninin hesabı



Şekil 6.6 H_z bileşeninin hesabı



Şekil 6.7 E_y bileşeninin hesabı

6.2 FDTD Yönteminde Kararlılık Koşulu ve Sayısal Dispersiyon

Kararlılık koşulu, FDTD yinelemeli denklemlerinin kararlı olabilmesi için zaman örnekleme değerinin seçimiyle ilgilidir. Zaman örnekleme değeri (Δt), dalganın en büyük ilerlemesi düşünülerek, dalga hareketinin bir zaman adımında hücre içerisinde kalabilmesi için hücre boyutunu aşmayacak şekilde yeterince küçük seçilmelidir. Courant kriteri denilen bu bağıntı zaman ve konum örnekleme değerleri arasında sağlanması gereken ilişkiyi belirlemektedir. Bir boyutlu ortamda bu koşul;

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \left(\frac{1}{(\Delta x)^2} \right)^{1/2}} \rightarrow \Delta t \leq \frac{\Delta x}{c} \quad (6.2.1)$$

denklemleri ile ifade edilir. Burada c ; ışık hızı, Δt ; zaman adımı, Δx ; hücre aralığıdır. Denklemdeki ışık hızı;

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (6.2.2)$$

ile ifade edilir.

2B sonlu farklar içinde kararlılık koşulu aynı denklemlerle sağlanır. 2B olduğunda sadece x yönü değil z yönü de denklemlere dâhil olur. Yani;

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \left[\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2} \right]^{1/2}} \quad (6.2.3)$$

şartı sağlanmalıdır.

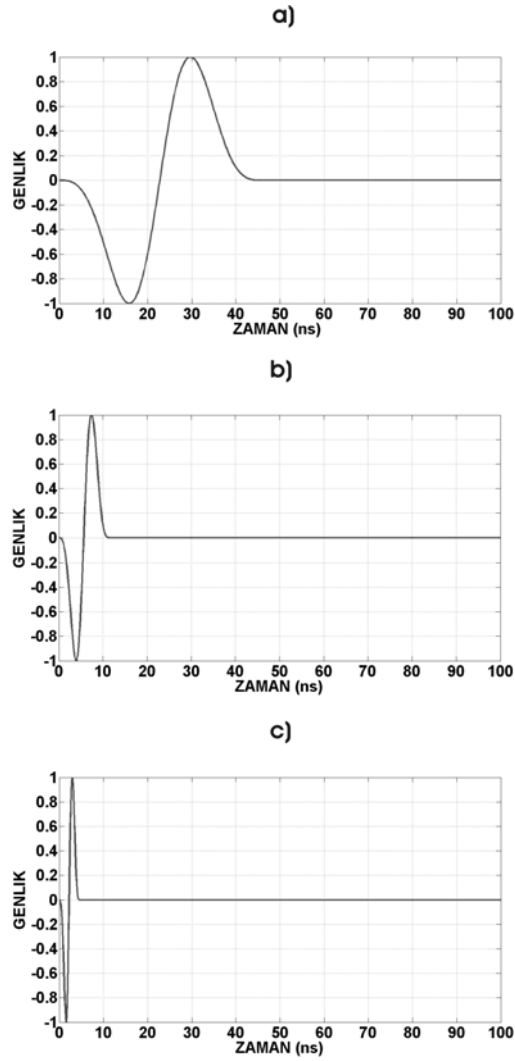
Δx ve Δz değerlerinin büyük olması durumunda dalganın şeklinin bozulması, hesaplama duyarlılığının azalmasına neden olmaktadır. Bu durumu önlemek amacıyla Δx ve Δz örnekleme aralığının bir dalga boyunun en az on örnekleme aralığı ile ayrıklaştırılması gerekir. Bu durum FDTD yönteminde sayısal dispersiyon olarak adlandırılır. Yani;

$$\Delta x \leq \lambda_{\min} / 10 \quad (6.2.4)$$

olmalıdır. Bu seçim ; $\Delta x \leq \lambda_{\min} / 10$ ile $\Delta x \leq \lambda_{\min} / 150$ arasında yapılabilir. Burada λ_{\min} dalga boyudur.

6.3 Kaynak Tanımlaması

Kaynak oluşturmak için öncelikle merkez frekans seçilmelidir. Merkez frekans, kullanılan antenin frekansıdır. Merkez frekansın seçimi, modelleme için çok önemli bir parametredir. Hedefin ve ortamın özellikleri, araştırma derinliği ve hedefin boyutu dikkate alınarak uygun merkez frekans seçilmelidir. Kaynak fonksiyonu olarak, ‘Blackmanharris’ penceresi kullanılmıştır (Harris 1978, Chen *et al.* 1997), (Şekil 6.8).



Şekil 6.8 Merkez frekans: a. 25 MHz, b. 100 MHz, c. 250 MHz için Blackmanharris pencereleri

‘Blackmanharris’ penceresi fonksiyonu;

$$f(t) = \begin{cases} \sum_{n=0}^3 a_n \cos(2n\pi t / T), & 0 < t < T \\ 0, & \text{Diğer durumlarda} \end{cases} \quad (6.3.1)$$

şekilde verilir (Chen *et al.* 1997). Fonksiyonda a_n ; katsayılar, t ; kayıt süresi, T ; kaynak fonksiyonunun süresidir ve;

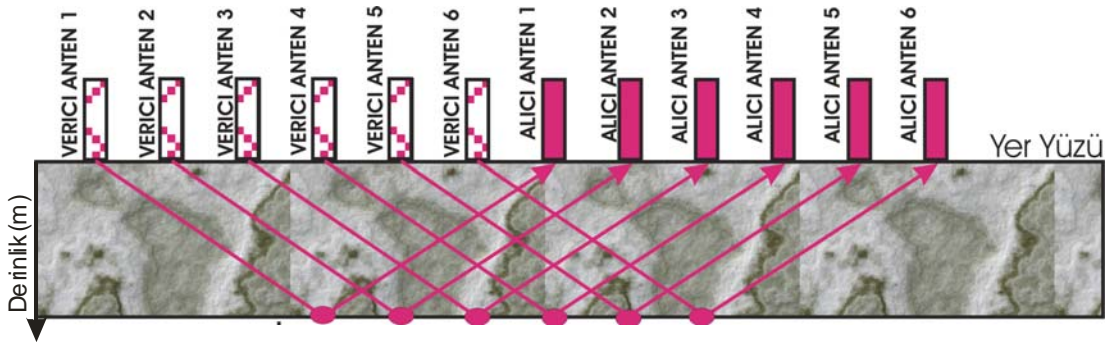
$$T = \frac{1.55}{f_c} \quad (6.3.2)$$

$a_0 = 0.35322222$ $a_1 = -0.488$ $a_2 = 0.145$ $a_3 = -0.010222222$ ile verilir (Chen *et al.* 1997). (6.3.2) denkleminde ' f_c ' merkez frekansı göstermektedir.

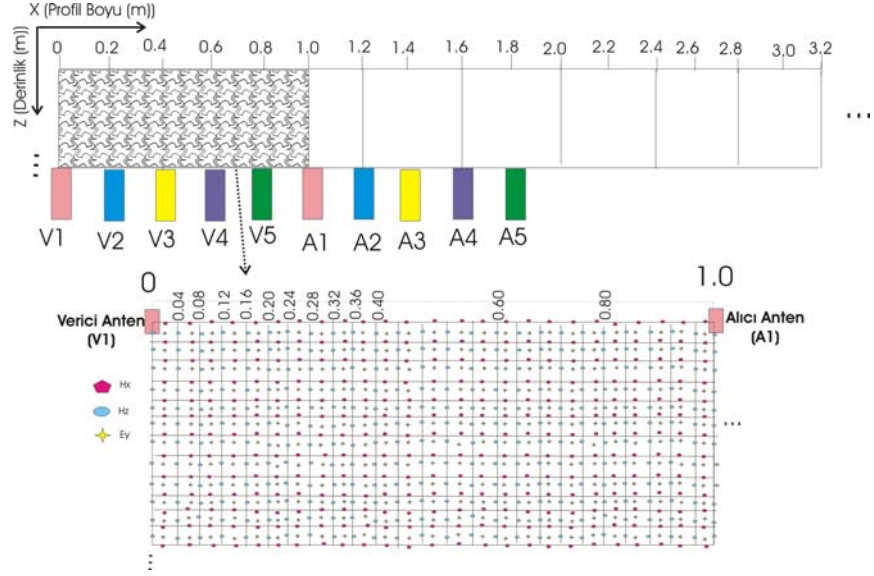
6.4 Alıcı ve Verici Anten Konumu

Alıcı ve verici anten arası mesafe, sonlu farklar ağına yerleştirilmiş olan cismin boyutuyla doğrudan ilişkilidir.

Anten aralığı, seçilmesi gereken aralıktan daha küçük seçilirse zaman kaybı olur, modelleme algoritması çok uzun zamanda sonuca ulaşır. Seçilmesi gereken aralıktan fazla seçildiğinde ise gömülü nesneyi ayırt etmek zorlaşır. Şekil 6.9 ve Şekil 6.10 algoritmada kullanılan anten düzeneğini göstermektedir.



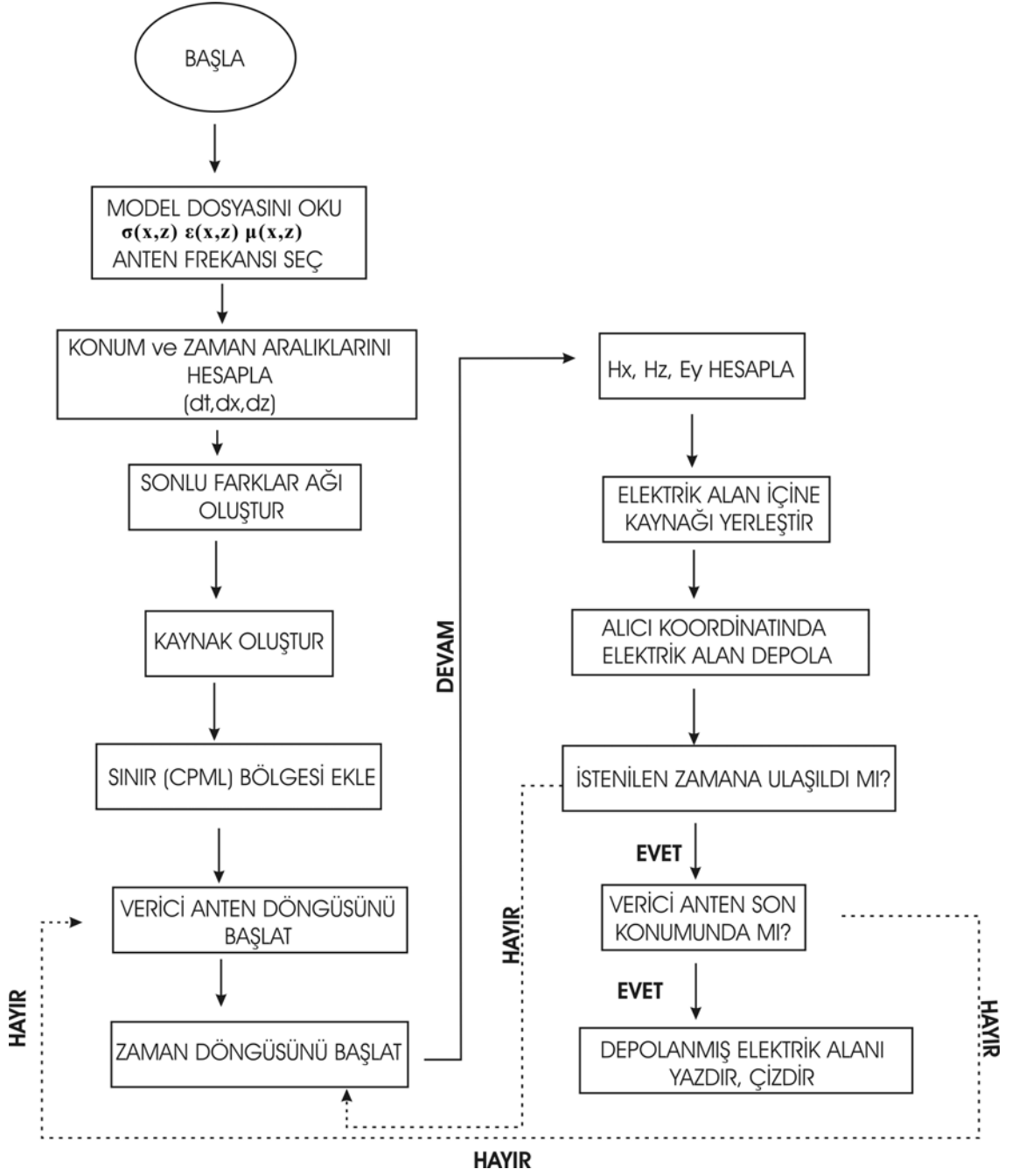
Şekil 6.9 Verici ve alıcı antenlerin konumu



Şekil 6.10 FDTD ağında antenlerin konumuna örnek

7. FDTD ALGORİTMASI VE AKIŞ ŞEMASI

- FDTD algoritması, model dosyalarının okunmasıyla başlar. Model dosyasında yer altına ait fiziksel parametreler (dielektrik katsayısı, manyetik geçirgenlik ve iletkenlik değerleri) yer alır.
- İkinci adım olarak gömülü yapının derinliğine ve yaklaşık hesaplama derinliğine göre anten frekansı seçilir.
- Kararlılık koşulu ve sayısal dispersiyon göz önünde bulundurularak, grid aralıkları (Δx , Δz) ve zaman adım aralığı (Δt) hesaplanır.
- Hesaplanan grid aralıklarına göre sonlu farklar ağı oluşturulur.
- Anten frekansına uygun kaynak oluşturulur.
- Sonlu farklar ağının etrafına sanal sınır bölgesi (CPML) eklenir.
- Kullanılan anten frekansı ve gömülü cismin boyutları dikkate alınarak antenler arası mesafe seçilir. Verici ve alıcı anten koordinatları belirlenir.
- Kayıt zamanı belirlenir.
- Verici antenin ilk konumu için tüm zamanlarda manyetik ve elektrik alan hesabı yapılır. Hesaplamalarda öncelikle manyetik alan bileşenleri sonra elektrik alan bileşeni hesaplanır. Her zaman döngüsünden sonra kaynak terimi elektrik alan bileşenine eklenir. FDTD algoritmasındaki döngü, verici antenin son koordinatına kadar devam eder.
- Alıcı koordinatlarında elektrik alanı bileşeni depolanır (Şekil 7.1).



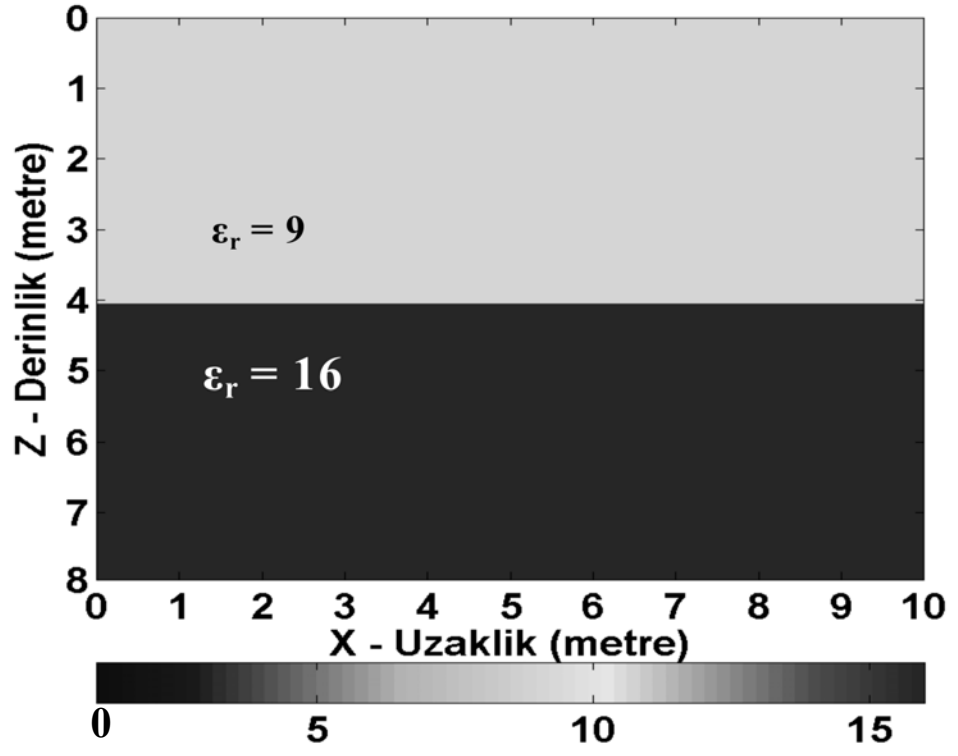
Şekil 7.1 FDTD yüzey yer radarı modelleme algoritması akış şeması

8. UYGULAMALAR VE YORUMLAR

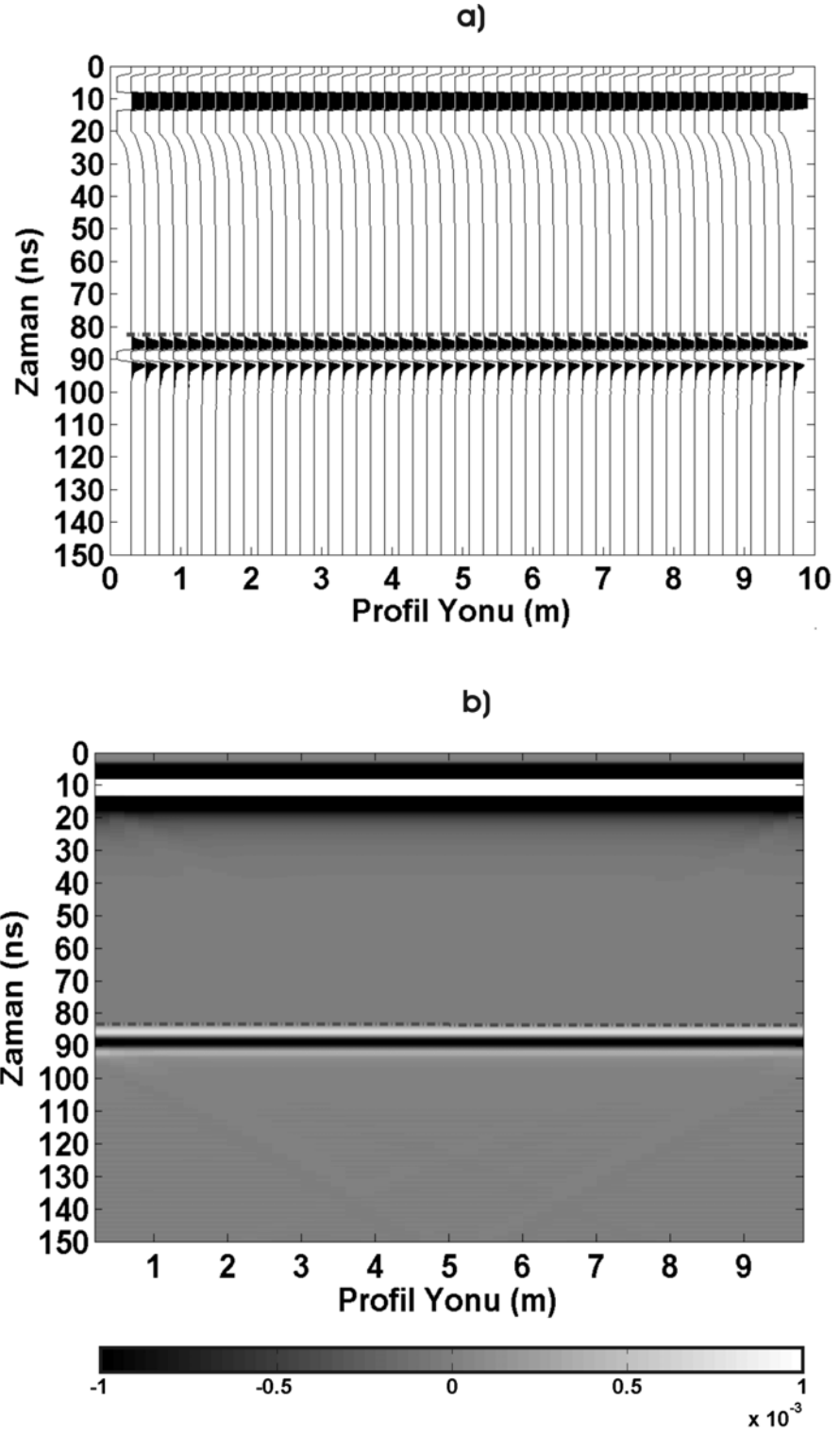
8.1 Model 1: Yatay Tabaka Modeli

İlk olarak, basit yatay iki tabakalı model oluşturulmuştur (Şekil 8.1). İlk tabakanın bağıl dielektrik katsayısı 9, ikinci tabakanınki ise 16'dır. Tabakaların iletkenlik değerleri sırasıyla 0.001 ve 0.005 simens/m alınmış ve μ_0 manyetik geçirgenlik değeri olarak kullanılmıştır.

Profil boyu 10 metre, toplam derinlik 8 metre, iki tabaka arasındaki sınır 4.1 metre derinliktedir. Model ağı x yönünde toplam 483, z yönünde 443 hücreden oluşmaktadır. CPML sınır bölgesi, model ağının sağ, sol, alt ve üstüne 41 hücre eklenerek oluşturulmuştur. Alıcı ve verici antenler arası mesafe 0.6 metre, anten kaydırma mesafesi (ölçüm aralığı) 0.2 metredir. Model için 48 verici, 48 alıcı anten çifti kullanılmıştır. Antenler CPML sınır bölgesinde konumlandırılmamıştır. Anten frekansı 100 MHz alınmıştır. Kayıt zamanı 150 ns, dt zaman aralığı kararlılık koşulu dikkate alınarak 0.1 ns olarak alınmıştır. Ayrıca dx, hücre kalınlıkları sayısal dispersiyon dikkate alınarak 0.05 m seçilmiştir. Modelleme sonucu elde edilen radar kesiti (radargram) Şekil 8.2'de verilmiştir.



Şekil 8.1 Yatay iki tabaka modeli



Şekil 8.2 Yatay iki tabaka modeline ait: a. dalga şekli açık görüntülü (wiggle) radargram, b. genlik-renk ölçeğine göre taralı (scan) radargram

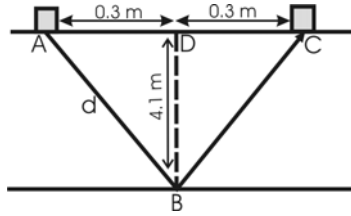
Yeraltı modellerinde düşey eksen derinlik iken radargramlarda düşey eksen dalgaların ilerleme zamanıdır. EM dalgasının ara yüzeyden yansıma zamanının doğruluğu;

$$t = \frac{d}{V} \quad (8.1)$$

ve

$$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (8.2)$$

denklemleri ile test edilebilir. Burada 'd' vericiden çıkan EM dalganın alıcıya minimum zamanda ulaşması için aldığı yol, 't' vericiden çıkan EM dalganın alıcıya minimum geliş zamanı, 'V' tabakanın EM dalga hızı, 'c' ışık hızı ve 'ε_r' tabakanın dielektrik katsayısıdır. Bu iki denklem yardımı ile dalganın alıcıya varış zamanı radargram üzerinden okunarak bilinen ortamda dalganın ilerleme hızı da kullanılarak derinlik değerleri elde edilir. Aynı zamanda modele ait tabaka derinlik değeri ve ortamın hızı kullanılarak EM dalganın varış zamanı hesaplanabilir.



Yatay tabaka modeli için ara yüzeye varış zamanı hesabı yapıldığında;

$$d = 2x\sqrt{|BD|^2 + |AD|^2} = 2x\sqrt{(4.1^2 + 0.3^2)} = 8.222 \text{ m}$$

$$V = \frac{0.3}{\sqrt{9}} = 0.1000 \text{ m/ns}$$

$$t = \frac{d}{V} = \frac{8.222}{0.1000} = 82.22 \text{ ns}$$

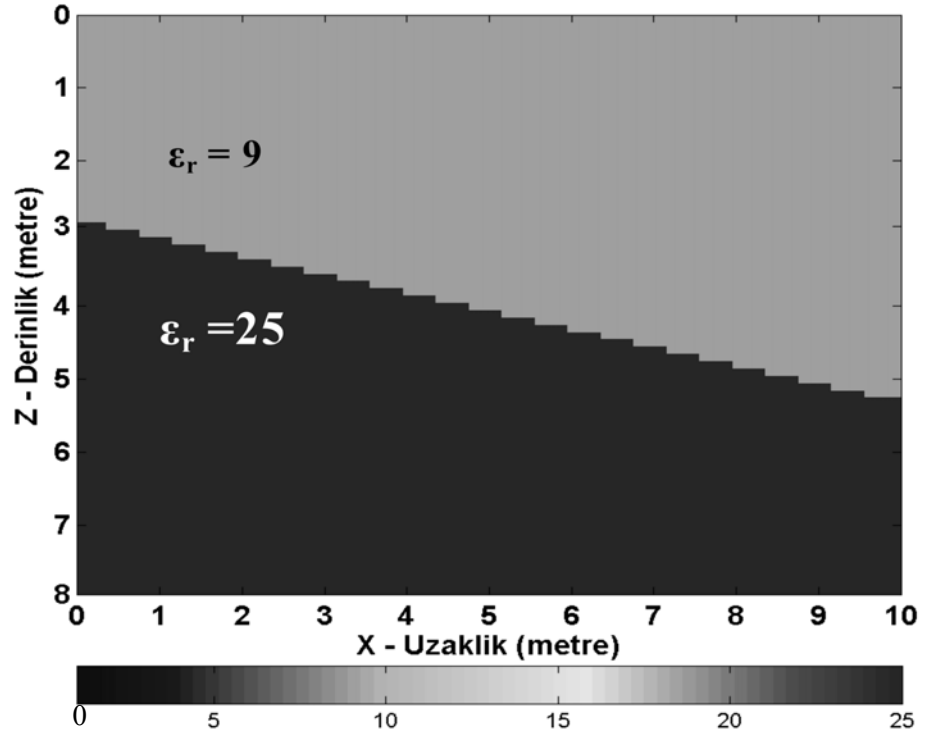
bulunur. Tabaka sınırından gelen yansıma dalgalarının varış zamanı 82.22 ns'dir. Model 1'e ait radargramlarda (Şekil 8.2) bu değer kesikli çizgi ile gösterilmektedir.

Buna göre dalgaların varış zamanının doğruluğu ispat edilmiştir. Aynı şekilde diğer modellere ait radargramlar üzerinde tabaka sınırından veya gömülü cisimlerin sınırlarından yansımış dalgaların varış zamanları kesikli çizgilerle gösterilecektir.

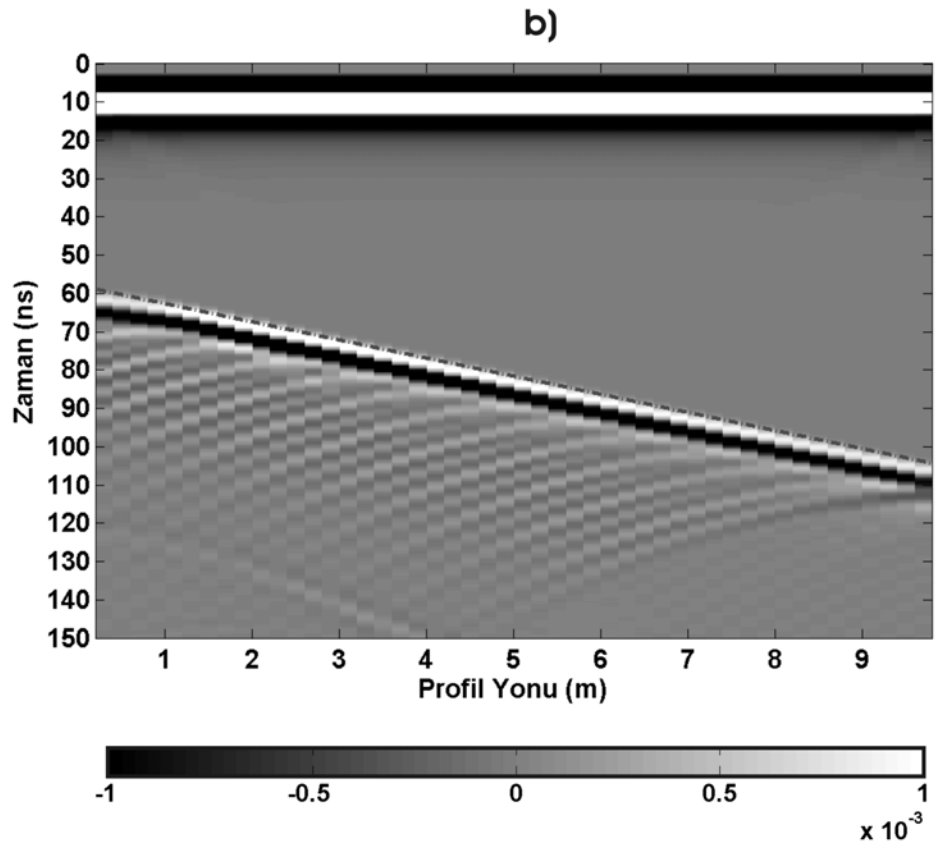
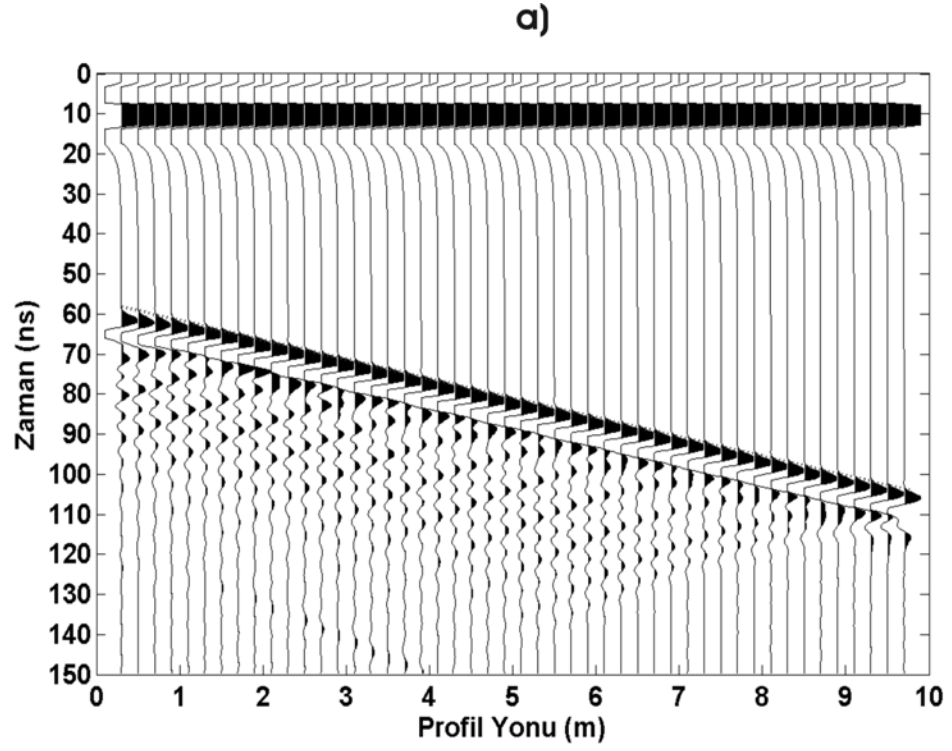
8.2 Model 2: Eğimli Tabaka Modeli

Tabaka eğimi 15^0 derece verilmiştir. Profil boyu 10 metre, toplam derinlik 8 metre, ikinci tabaka $x=0$ uzaklığında 3 metre derinlikten başlamaktadır. Birinci tabakanın bağıl dielektrik katsayısı 9, ikinci tabakanın bağıl dielektrik katsayısı ise 25 alınmıştır (Şekil 8.3). Tabakaların iletkenlik değerleri sırasıyla 0.001 ve 0.005 simens/m alınmış ve μ_0 manyetik geçirgenlik değeri olarak kullanılmıştır.

Model ağı x yönünde toplam 583, z yönünde 533 hücreden oluşmaktadır. CPML sınır bölgesi, model ağının sağ, sol, alt ve üstüne 41 hücre eklenerek oluşturulmuştur. Alıcı ve verici antenler arası mesafe 0.6 metre, anten kaydırma mesafesi (ölçüm aralığı) 0.2 metredir. Model için 48 verici, 48 alıcı anten çifti kullanılmıştır. Anten frekansı 100 MHz alınmıştır. Kayıt zamanı 150 ns, dt zaman aralığı 0.08 ns olarak alınmıştır ve dx, hücre kalınlıkları 0.04 m seçilmiştir. Elde edilen radargramlar Şekil 8.4'de görülmektedir.



Şekil 8.3 Eğimli tabaka modeli



Şekil 8.4 Eğimli tabaka modeline ait: a. dalga şekli açık görüntülü (wiggle) radargram, b. genlik-renk ölçeğine göre taralı (scan) radargram

İkinci tabaka ilk olarak $x=0.3$ uzaklığında 60.2993 ns'de profil sonunda 104.1729 ns'de son bulmuştur.

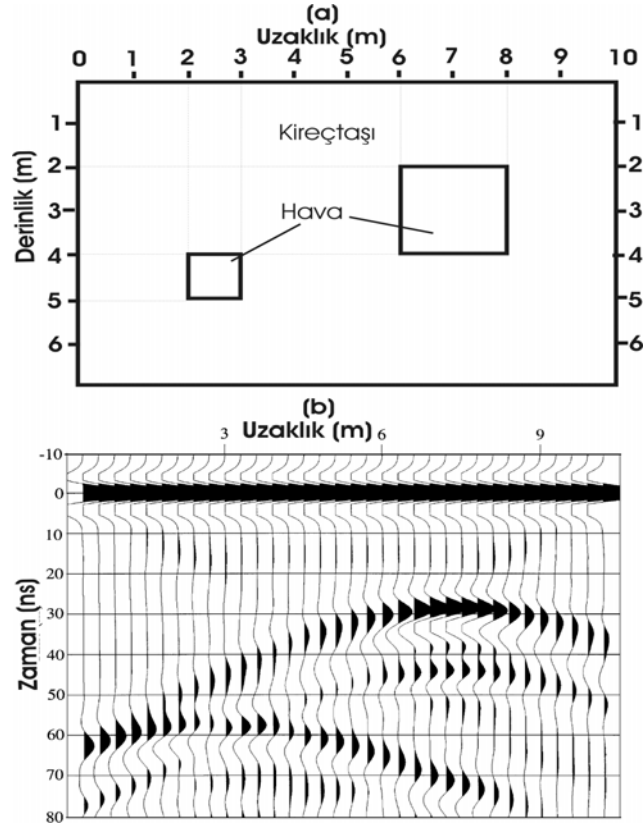
65 ns altında bulunan ve genliği tabaka sınırından gelen yansıma genliklerinden küçük olan hiperbol kanatları, eğimli tabaka model oluşturulurken kullanılan kare biçimli hücrelerden kaynaklanmaktadır. Yani EM dalga her bir karenin ya da dikdörtgenin köşesine çarparak saçılmaya uğrar, saçılan bu EM dalgalarda kendini hiperbol şeklinde gösterir (Şekil 8.4).

8.3 Model 3: Kare Şekilli Boşluk Yapıları

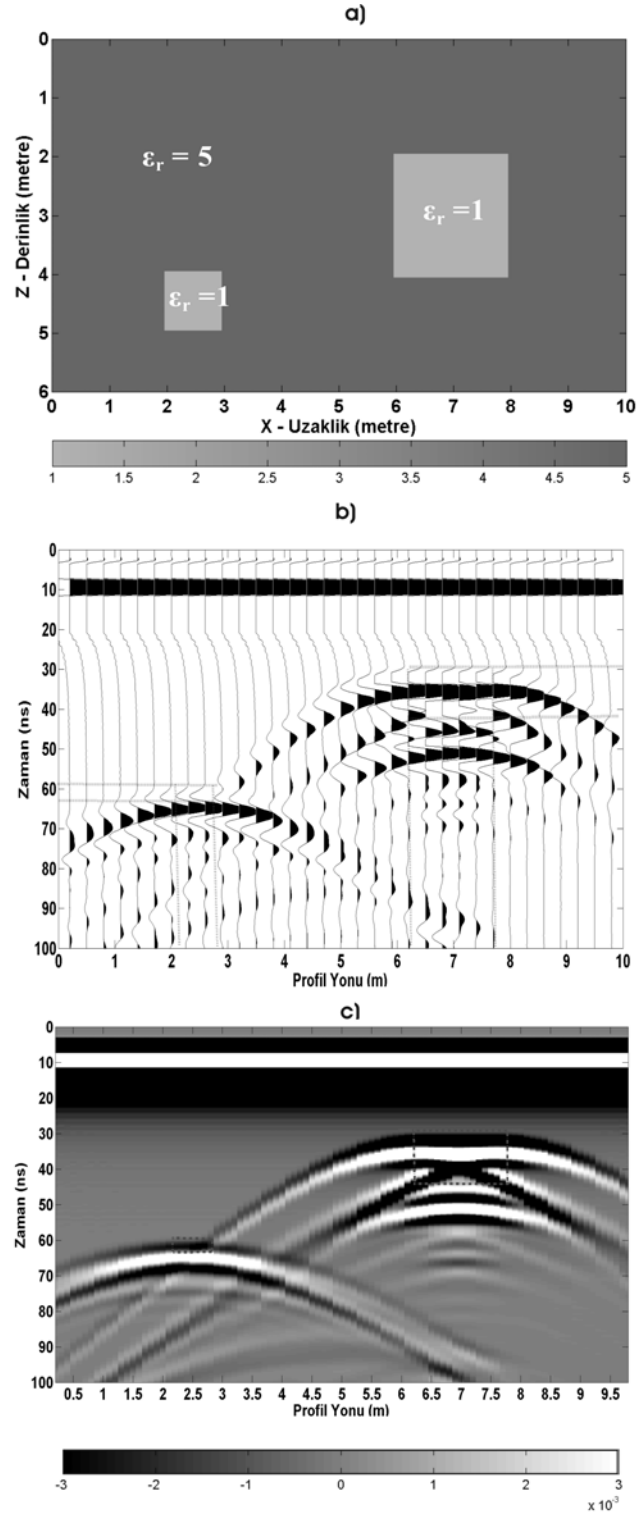
Yazılan modelleme algoritmasını test etmek amacıyla Model 3'de Bergmann *et al.* (1998) tarafından yapılan çalışmada kireçtaşı ve kireçtaşı içindeki kare şekilli boşluk modelinin aynısı oluşturulmuştur.

Profil boyu 10 metre, derinlik ise 6 metre'dir. Kireçtaşının bağıl dielektrik katsayısı 5, kireçtaşı içindeki boşluğun bağıl dielektrik katsayısı 1'dir. Boşlukların iletkenlik değeri 0 simens/m, kireçtaşının ki ise 0.002 simens/m alınmıştır. μ_0 manyetik geçirgenlik değeri olarak kullanılmıştır. Şekil 8.5 Bergmann *et al.* (1998) tarafından oluşturulan modeli ve elde edilen radargramı, Şekil 8.6 ise tez kapsamında oluşturulan modeli ve yazılan FDTD modelleme programı ile elde edilen radargramı göstermektedir.

Model ağı x yönünde toplam 333, z yönünde 233 hücreden oluşmaktadır. CPML sınır bölgesi, model ağının sağ, sol, alt ve üstüne 41 hücre eklenerek oluşturulmuştur. Alıcı ve verici antenler arası mesafe 0.4 metre, anten kaydırma mesafesi (ölçüm aralığı) 0.1 metredir. Model için 97 verici, 97 alıcı anten çifti kullanılmıştır. Anten frekansı 100 MHz alınmıştır. Kayıt zamanı 100 ns, dt zaman aralığı alınarak 0.1 ns olarak alınmıştır ve dx, hücre kalınlıkları 0.08 m seçilmiştir.



Şekil 8.5. a. Kireçtaşı tabakası içindeki kare boşluklu model, b. Modele ait dalga şekli açık (wiggle) görüntülü radargram (Bergmann *et al.* 1998)



Şekil 8.6. a. Kireçtaşı tabakası içindeki kare boşluk modeli ve bu modele ait, b. dalga şekli açık görüntülü (wiggle) radargram, c. genlik-renk ölçeğine göre taralı (scan) radargram

Bergmann *et al.* (1998) tarafından oluşturulan modelde verici-alıcı anten çifti sayısı, hücre kalınlıkları, zaman adım aralığı, antenler arası mesafenin bilinmemesi gibi nedenlerden dolayı iki çalışma arasında farklılıklar bulunmaktadır (Tez aşamasında bu parametreler kararlık koşulu ve sayısal dispersiyon dikkate alınarak seçilmiştir). Ancak anten frekansı, boşlukların boyutları, derinlikleri ve konumları her iki çalışma içinde aynıdır. Diğer bir farklılık Bergmann *et al.* (1998)'nin kullandıkları sınır koşulu (PML) ve kaynak (Ricker) dalgacıdır. Bu gibi nedenler görüntü farklılığına sebep olmuş olabilir. Örneğin, Şekil 8.5.b'deki radargramda boşlukların köşelerinden gelen saçılmalar, boşluk içindeki bölümlerinde dalgaların birbirlerini sönmüledikleri için görülmemektedir ancak Şekil 8.6.b.c' de saçılmalar ayırt edilebilmektedir.

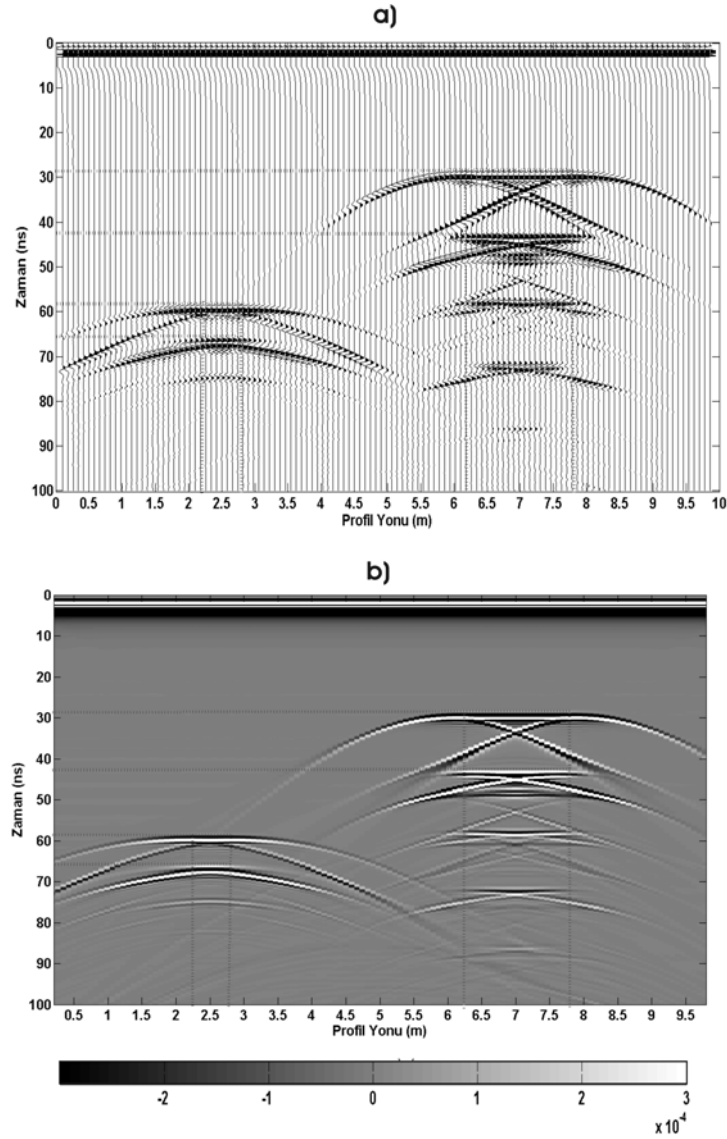
Yapılan işlemlere göre, 6-8 metre arasında bulunan 2x2'lik boşluğun üst sınırı 30.1478 ns'de, alt sınırı ise 43.4811 ns'de; 2-3 metre arasında bulunan 1x1'lik boşluğun üst sınırı 59.7959 ns'de, alt sınırı 66.4626 ns'de gözlenmesi gerekmektedir. Bergmann *et al.* (1998)'nin modelleme sonuçlarında zamanlar arasında yaklaşık 10 ns fark vardır. Sebebi, Bergmann'ın doğrudan gelen dalgaları 0 ns'de göstermesidir. Sonuç olarak her iki çalışmada da boşluklar başarılı bir şekilde görüntülenmiştir.

Şekil 8.6'da ise 2x2'lik boşluğun köşelerinden gelen saçılmalar radargram üzerinde görülmekte, fakat kullanılan anten frekansının düşük olması nedeniyle 1x1'lik boşluğun köşelerinden gelen saçılmalar ve alt sınır görülmemektedir.

Şekil 8.6.a'daki oluşturulan model ile, Şekil 8.6.b.c'deki radargramlarda gözlenen cisimlerin derinlikleri ile zamanlarının tutarlılığı görülmektedir. Ancak kullanılan antenin frekansı ile ilgili olarak 1x1 m'lik boşluğun alt sınırından gelen yansımaların net olarak gözlenemediği ortadır. Bunun için aynı model kullanılarak algoritma 500 Mhz anten frekansı için çalıştırılmıştır. Model ağı x yönünde toplam 1203, z yönünde 803 hücreden oluşmaktadır. CPML sınır bölgesi, model ağının sağ, sol, alt ve üstüne 101 hücre eklenerek oluşturulmuştur. Alıcı ve verici antenler arası mesafe 0.2 metre, anten kaydırma mesafesi (ölçüm aralığı) 0.08 metredir. Model için 123 verici, 123 alıcı anten çifti kullanılmıştır. Kayıt zamanı 100 ns, dt zaman aralığı 0.04 ns olarak alınmıştır ve dx, hücre kalınlıkları 0.02 m seçilmiştir.

Böylelikle anten frekansları arasındaki fark ortaya konulmuştur (Şekil 8.7). Buna göre;

- ✓ Düşük merkez frekans kullanılması, araştırma derinliğini artırmakta ancak çözünürlüğün azalmasına sebep olmaktadır. Şekil 8.7’de her iki boşluk içinde geometri ve derinlik ayrımı yüksek iken Şekil 8.6’da, geometri ve boşlukların alt sınırından gelen yansımalar net değildir (Şekil 8.7).



Şekil 8.7 500 Mhz merkez anten frekansı ile, model 3’e ait: a. dalga şekli açık görüntülü (wiggle) radargram, b. genlik-renk ölçeğine göre taralı (scan) radargram

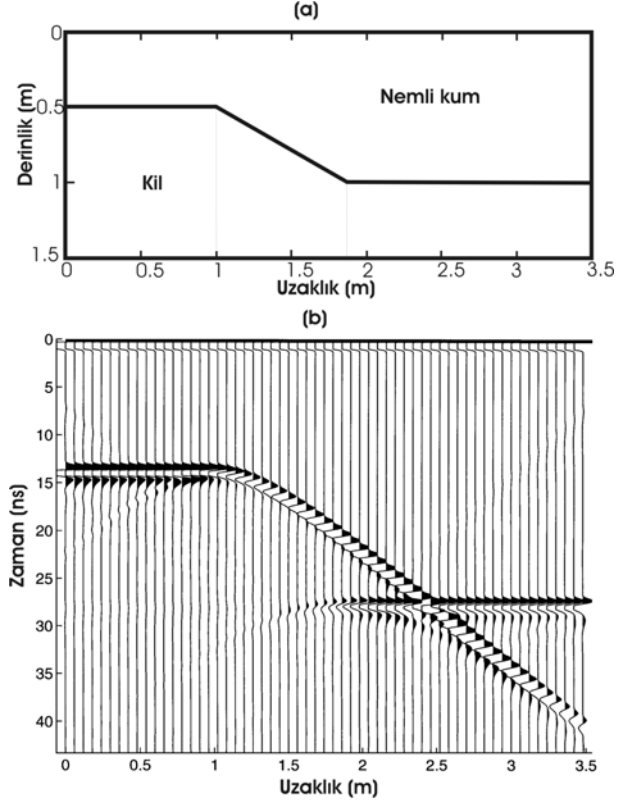
8.4 Model 4: Nemli Kum ve Kil Tabakası Modeli

Yine yazılan modelleme algoritmasını test etmek amacıyla Model 4'de Bergmann *et al.* (1999) tarafından yapılan çalışmada nemli kum ve kil tabakası modelinin aynısı oluşturulmuştur.

Profil boyu 4 metre, derinlik ise 2 metre seçilmiştir. Nemli kumun bağıl dielektrik katsayısı 5, iletkenlik değeri 0.1 simens/m, kilin bağıl dielektrik katsayısı 40, iletkenlik değeri 0.06 simens/m seçilmiştir. μ_0 manyetik geçirgenlik değeri olarak kullanılmıştır. Tabaka eğimi ise 30° alınmıştır.

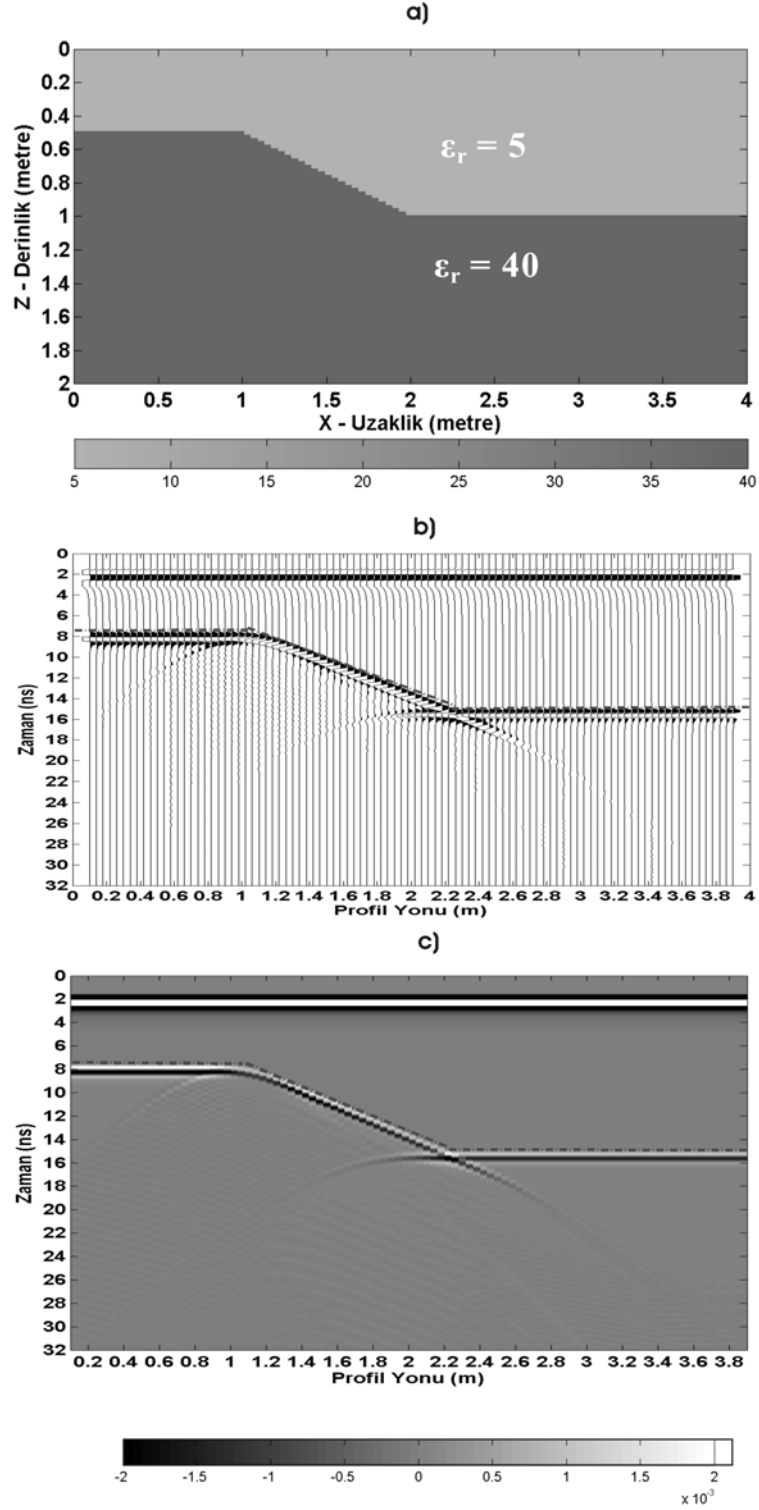
Model ağı x yönünde toplam 2203, z yönünde 1203 hücreden oluşmaktadır. CPML sınır bölgesi, model ağının sağ, sol, alt ve üstüne 101 hücre eklenerek oluşturulmuştur. Alıcı ve verici antenler arası mesafe 0.2 metre, anten kaydırma mesafesi (ölçüm aralığı) 0.04 metredir. Model için 96 verici, 96 alıcı anten çifti kullanılmıştır. Anten frekansı 800 MHz alınmıştır. Kayıt zamanı 32 ns, dt zaman aralığı alınarak 0.018 ns olarak alınmıştır ve dx, hücre kalınlıkları 0.004 m seçilmiştir.

Şekil 8.8.a modeli, Şekil 8.8.b, Bergmann *et al.* (1998) tarafından elde edilen radarogramı, Şekil 8.9 ise tez kapsamında oluşturulan modeli ve yazılan FDTD modelleme programı ile elde edilen radarogramı göstermektedir.



Şekil 8.8.a. Nemli kum ve kil tabakası modeli, b. Modele ait dalga şekli açık (wiggle) görüntülü radargram (Bergmann *et al.* 1999)

İkinci tabaka 0-1 m arasında 0.5 m derinliğinde başlamaktadır. 0.5 m derinlik zamanda 7.4536 ns değerine denk gelmektedir. 1-1.9 m aralığında ikinci tabaka eğimli olarak 1 m derinliğine kadar inmektedir. 1 m derinliği zamanda 14.9071 ns değerine denk gelmektedir. Profil sonuna (1.9 - 3.5 m) kadar yatay tabaka olarak gözlenmektedir. Bergmann *et al.* (1999) ve FDTD algoritması sonucu elde edilen radargramlar arasındaki fark kare şekilli boşluk yapıları modeli (Model 3) ile aynıdır.



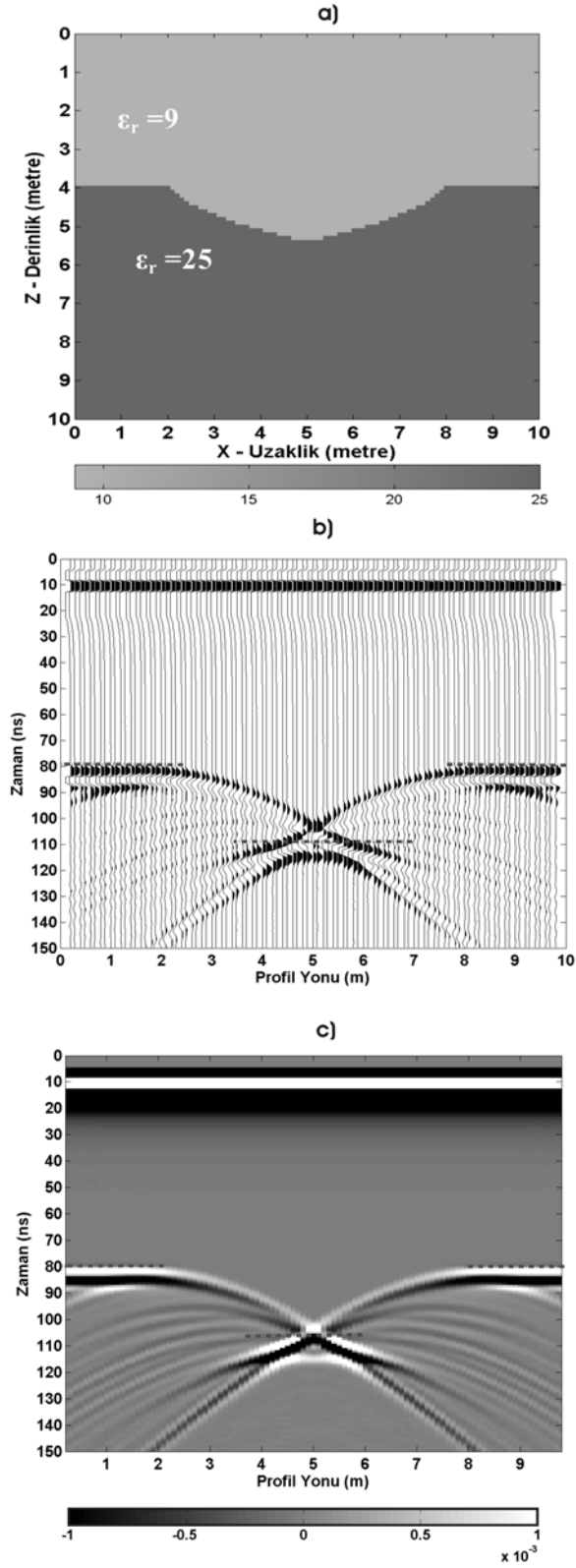
Şekil 8.9.a. Nemli kum ve kil tabakası modeli ve bu modele ait, b. dalga şekli açık görüntülü (wiggle) radargram, c. genlik-renk ölçeğine göre taralı (scan) radargram

8.5 Model 5: Senklinal modeli

Model 5’de profil boyu ve derinlik 10 m’dir. 4 m derinliğinde ve profil boyunca 2-8 m aralığına bir senklinal yapısı yerleştirilmiştir. Birinci tabakanın bağıl dielektrik katsayısı 9, ikinci tabakanın bağıl dielektrik katsayısı 25 olarak alınmıştır (Şekil 8.10.a). Tabakaların iletkenlik değerleri sırasıyla 0.001 ve 0.005 simens/m alınmış ve μ_0 manyetik geçirgenlik değeri olarak kullanılmıştır.

Model ağı x yönünde toplam 583, z yönünde 583 hücreden oluşmaktadır. CPML sınır bölgesi, model ağının sağ, sol, alt ve üstüne 41 hücre eklenerek oluşturulmuştur. Alıcı ve verici antenler arası mesafe 0.4 metre, anten kaydırma mesafesi (ölçüm aralığı) 0.2 metredir. Model için 49 verici, 49 alıcı anten çifti kullanılmıştır. Anten frekansı 100 MHz alınmıştır. Kayıt zamanı 150 ns, dt zaman aralığı alınarak 0.2 ns olarak alınmıştır ve dx, hücre kalınlıkları 0.04 m seçilmiştir. 2B modelleme sonucu elde edilen radargram Şekil 8.10.b.c ile verilmiştir. Radargramda senklinal yapısı iyi bir şekilde görüntülenmiştir.

Profil başında ikinci tabaka derinliği 4 metrede başlamaktadır. 4 metre zaman olarak 80.2247 ns değerine denk gelmektedir. Senklinal çukuru 5.4 metre derinliğinde, yani 108.1665 ns zaman değerindedir (Şekil 8.10).



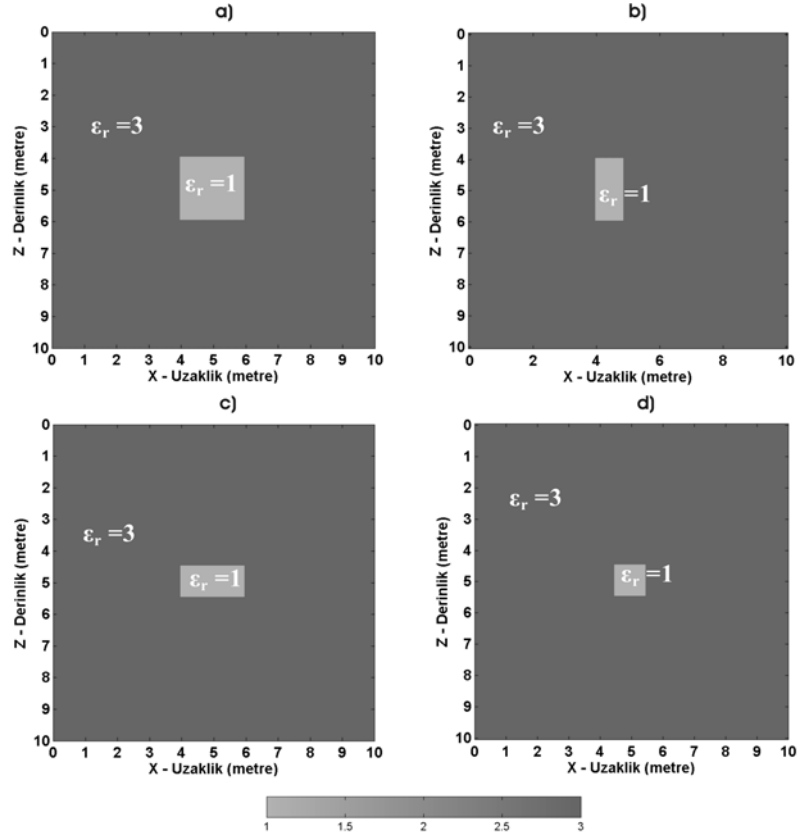
Şekil 8.10.a. Senklinal modeli ve bu modele ait, b. dalga şekli açık görüntülü (wiggle) radargram, c. genlik-renk ölçeğine göre taralı (scan) radargram

8.6 Yeraltı Modellerinin Geometrik ve Fiziksel Özelliklerindeki Değişimlerinin İncelenmesi

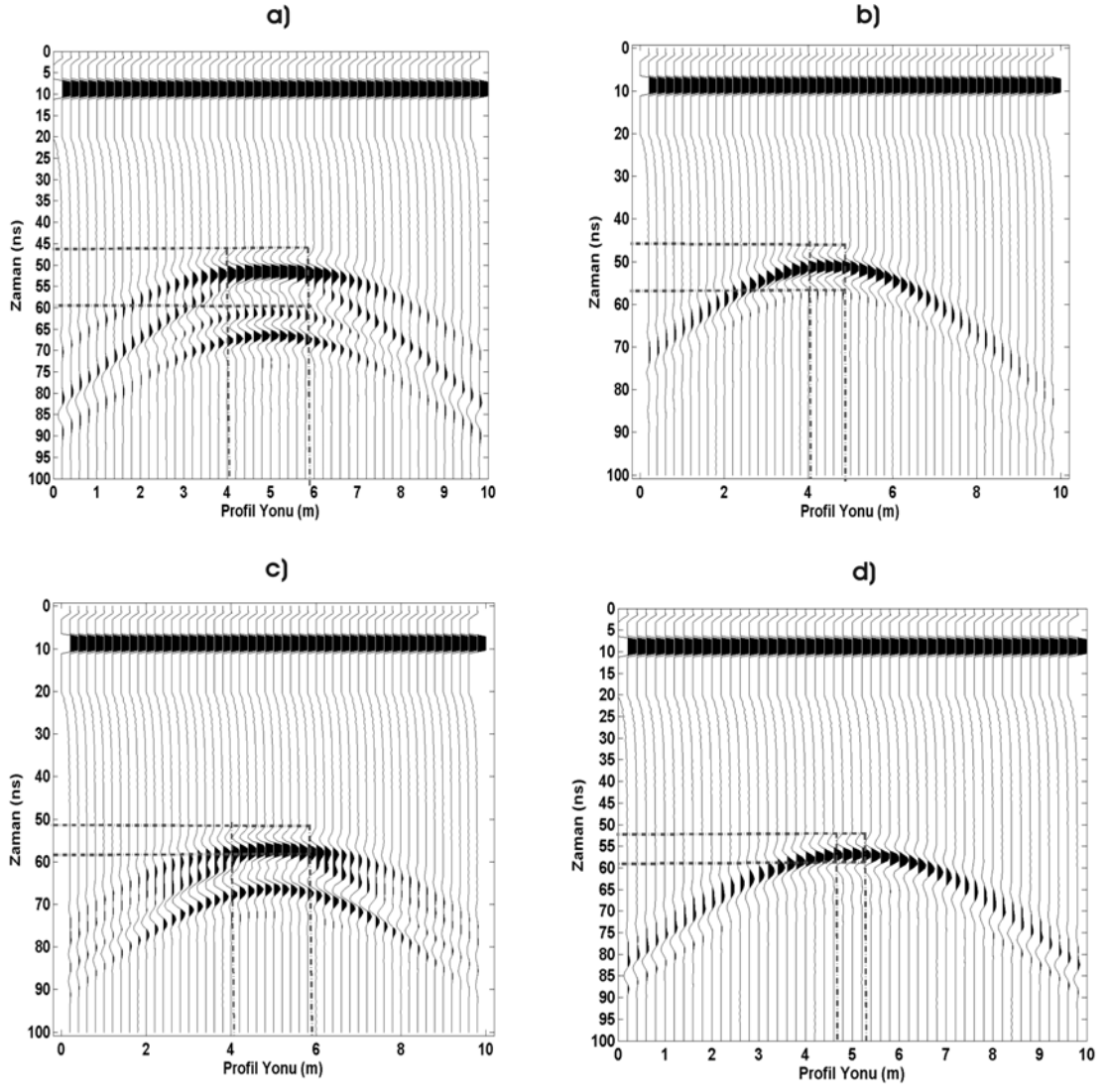
8.6.1 Boyutları farklı yapıların incelenmesi

Bu bölümde, bağıl dielektrik katsayısı 3, iletkenlik değeri 0.001 simens/m olan kuru toprak ortam olarak seçilmiştir. Kuru toprak içine bağıl dielektrik katsayısı 1, iletkenlik değeri 0 simens/m olan boşluk yapıları yerleştirilmiştir. μ_0 manyetik geçirgenlik değeri olarak kullanılmıştır. Bu çalışmanın amacı, aynı merkez anten frekansı ile, x (profil yönü) ve z (derinlik) yönündeki boşlukların kalınlıklarını değiştirerek, radargramlardaki görüntü değişikliklerini incelemektir. Bu nedenle dört farklı model oluşturulmuştur. Birinci boşluk 2x2, ikinci boşluk 1x2, üçüncü boşluk 2x1 ve dördüncü boşluk 1x1 boyutundadır (Şekil 8.11).

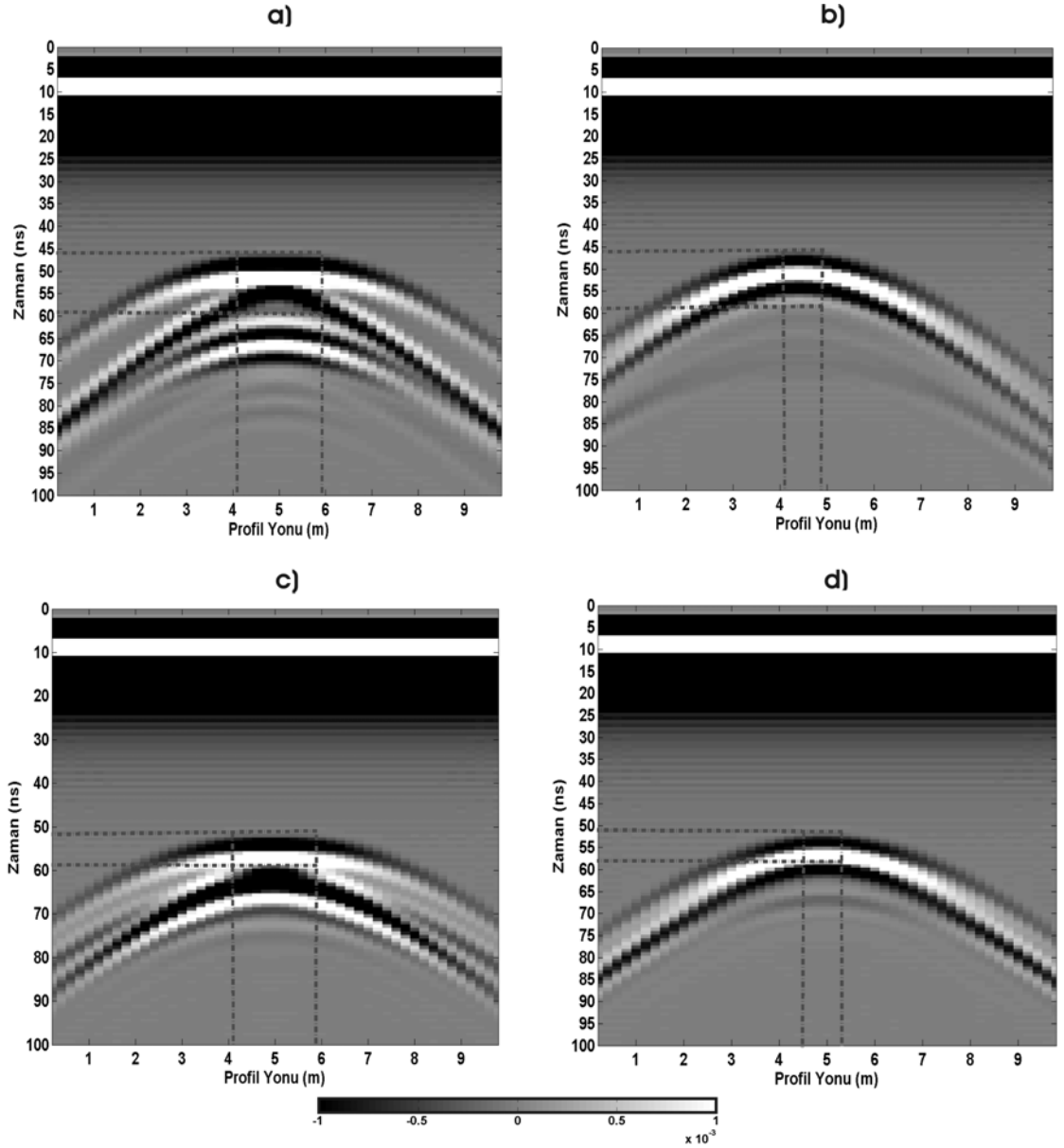
Model ağı x yönünde toplam 283, z yönünde 283 hücreden oluşmaktadır. CPML sınır bölgesi, model ağının sağ, sol, alt ve üstüne 41 hücre eklenerek oluşturulmuştur. Alıcı ve verici antenler arası mesafe 0.4 metre, anten kaydırma mesafesi (ölçüm aralığı) 0.2 metredir. Model için 49 verici, 49 alıcı anten çifti kullanılmıştır. Anten frekansı 100 MHz alınmıştır. Kayıt zamanı 100 ns, dt zaman aralığı alınarak 0.2 ns olarak alınmıştır ve dx, hücre kalınlıkları 0.1 m seçilmiştir.



Şekil 8.11 Boyutları farklı boşluklar: a. Boşluk 1 (2x2), b. Boşluk 2 (1x2), c. Boşluk 3 (2x1), d. Boşluk 4 (1x1)



Şekil 8.12 Boyutları farklı boşluklar: a. Boşluk 1, b. Boşluk 2, c. Boşluk 3, d. Boşluk 4'e ait dalga şekli açık görüntülü (wiggle) radargram



Şekil 8.13 Boyutları farklı gömülü cisimler: a. Boşluk 1, b. Boşluk 2, c. Boşluk 3, d. Boşluk 4'e ait genlik-renk ölçeğine göre taralı (scan) radargram

Kesitlerin yorumlanmasıyla şu sonuçlar elde edilebilir:

- ✓ Birinci boşluk diğerlerine göre, radargramda daha net görülmektedir. Boşluğun üst sınırı, köşelerinden gelen saçılmalar ve alt sınırı net olarak gözlenmektedir (Şekil 8.13.a). Ancak boşluk boyutunun küçülmesiyle boşlukların ayırt edilmesi zorlaşmaktadır. Boşluğun boyu azaltıldığında, alt sınırdan gelen yansımalar görülmemekte dolayısıyla alt sınır ayırt edilememektedir. Eninin azaltılması ise

boşluğun çok dar bir yapıda olmasına dolayısıyla oluşan yansımalar ve saçılmaların birbirine karışmasına ve EM dalga alanlarının yok olmasına neden olmaktadır (Şekil 8.13).

- ✓ Kullanılan anten frekansı, boşlukların alt ve üst sınırının ayırt edilmesinde doğrudan ilişkili önemli bir parametredir. Bu çalışmada anten frekansı 100 Mhz seçildiğinden, boşluğun kalınlığı azaldıkça, radargramlarda boşluğun alt sınırın net olarak gözlenememesi çok normaldir. Anten frekansı daha büyük alınsaydı, (örneğin 500 Mhz) tüm boşlukların alt sınırından gelen yansımalar gözlenebilirdi.

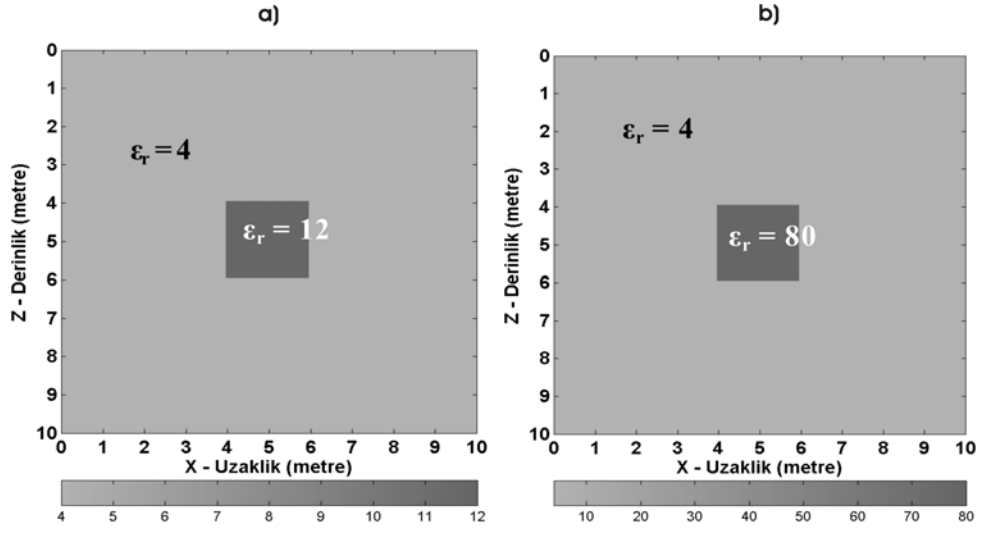
8.6.2 Farklı dielektrik katsayılı gömülü yapıların incelenmesi

Bu bölümdeki çalışmanın amacı kireçtaşı içinde bulunan aynı büyüklükte fakat farklı dielektrik özellikteki gömülü yapıların radargramlar üzerindeki farklılıklarını gözlemlemektir. Bunun için, ortamın yani kireçtaşının bağıl dielektrik katsayısı sabit tutulmuş, gömülü yapıların bağıl dielektrik katsayısı değiştirilerek iki model oluşturulmuştur. Kireçtaşının bağıl dielektrik katsayısı 4, iletkenlik değeri 0.001 simens/m, birinci yapının bağıl dielektrik katsayısı 12, ikinci yapının bağıl dielektrik katsayısı 80, iletkenlik değerleri ise 0 simens/m olarak alınmıştır (Şekil 8.14). μ_0 manyetik geçirgenlik değeri olarak kullanılmıştır.

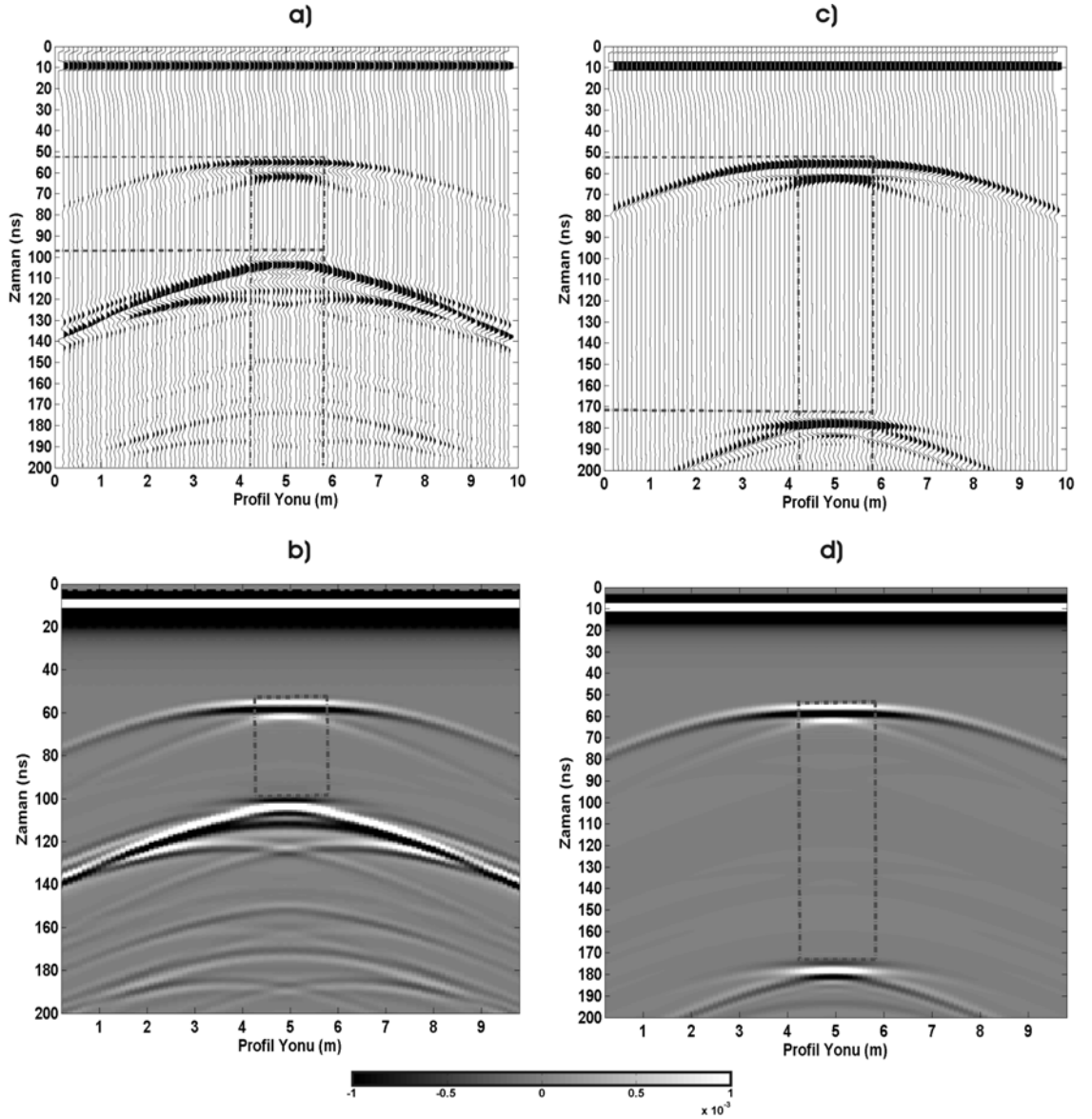
Birinci yapı için, model ağı x yönünde toplam 485, z yönünde 485 hücreden oluşmaktadır. CPML sınır bölgesi, model ağının sağ, sol, alt ve üstüne 81 hücre eklenerek oluşturulmuştur. Alıcı ve verici antenler arası mesafe 0.4 metre, anten kaydırma mesafesi (ölçüm aralığı) 0.1 metredir. Model için 97 verici, 97 alıcı anten çifti kullanılmıştır. Anten frekansı 100 MHz alınmıştır. Kayıt zamanı 200 ns, dt zaman aralığı alınarak 0.24 ns olarak alınmıştır ve dx, hücre kalınlıkları 0.062 m seçilmiştir.

İkinci yapı için, model ağı x yönünde toplam 963, z yönünde 963 hücreden oluşmaktadır. CPML sınır bölgesi, model ağının sağ, sol, alt ve üstüne 81 hücre eklenerek oluşturulmuştur. Alıcı ve verici antenler arası mesafe 0.4 metre, anten

kaydırma mesafesi (ölçüm aralığı) 0.1 metredir. Model için 97 verici, 97 alıcı anten çifti kullanılmıştır. Anten frekansı 100 MHz alınmıştır. Kayıt zamanı 200 ns, dt zaman aralığı alınarak 0.095 ns olarak alınmıştır ve dx, hücre kalınlıkları 0.025 m seçilmiştir.



Şekil 8.14 Dielektrik katsayıları farklı gömülü yapılar: a. Yapı 1, b. Yapı 2



Şekil 8.15 Şekil 8.14.a'ya ait: a. b. dalga şekli açık görüntülü (wiggle) ve genlik-renk ölçeğine göre taralı (scan) radargram, Şekil 8.14.b'ye ait: c. d. dalga şekli açık görüntülü (wiggle) ve genlik-renk ölçeğine göre taralı (scan) radargram

Anten merkez frekansı 100 Mhz, antenler arası mesafe 0.4 metre, örnekleme aralığı 0.2 metre olarak seçilmiştir. Şekil 8.15.a.b.c.d'de görülen radargramlara göre;

- ✓ Gömülü yapının dielektrik katsayısı artışına bağlı olarak, yapıların üst yüzeyinden yansıyan EM dalga alanlarının varış zamanları aynı iken, yapıların alt yüzeyinden gelen dalga alanlarının varış zamanları farklıdır. Bunun nedeni

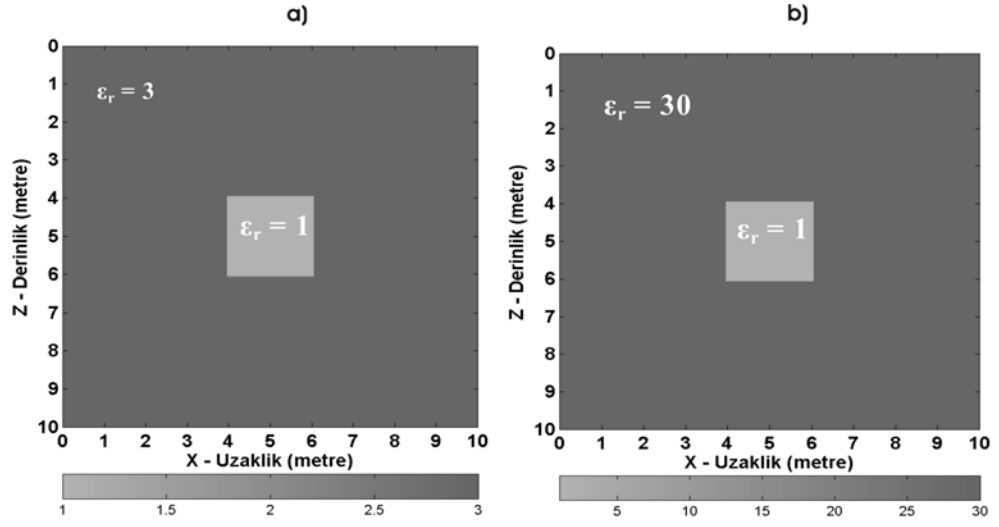
- gömülü yapıya ait dielektrik katsayısı arttıkça EM dalga hızının azalması ve buna bağlı olarak alt sınırdan gelen dalga alanlarının varış zamanının artmasıdır.
- ✓ Gömülü yapının dielektrik katsayısı ile ortamın dielektrik katsayısı arasındaki fark artışına bağlı olarak, cismin üst yüzeyinden yansıyan EM dalga alanlarının genlik değerleri artmaktadır (bkz. sayfa:83, bölüm:8.7). Şekil 8.15.c.d'de gösterilen radargramda genliklerin daha yüksek olduğu görülmektedir.

8.6.3 Farklı dielektrik katsayılı ortamlar içindeki yapıların incelenmesi

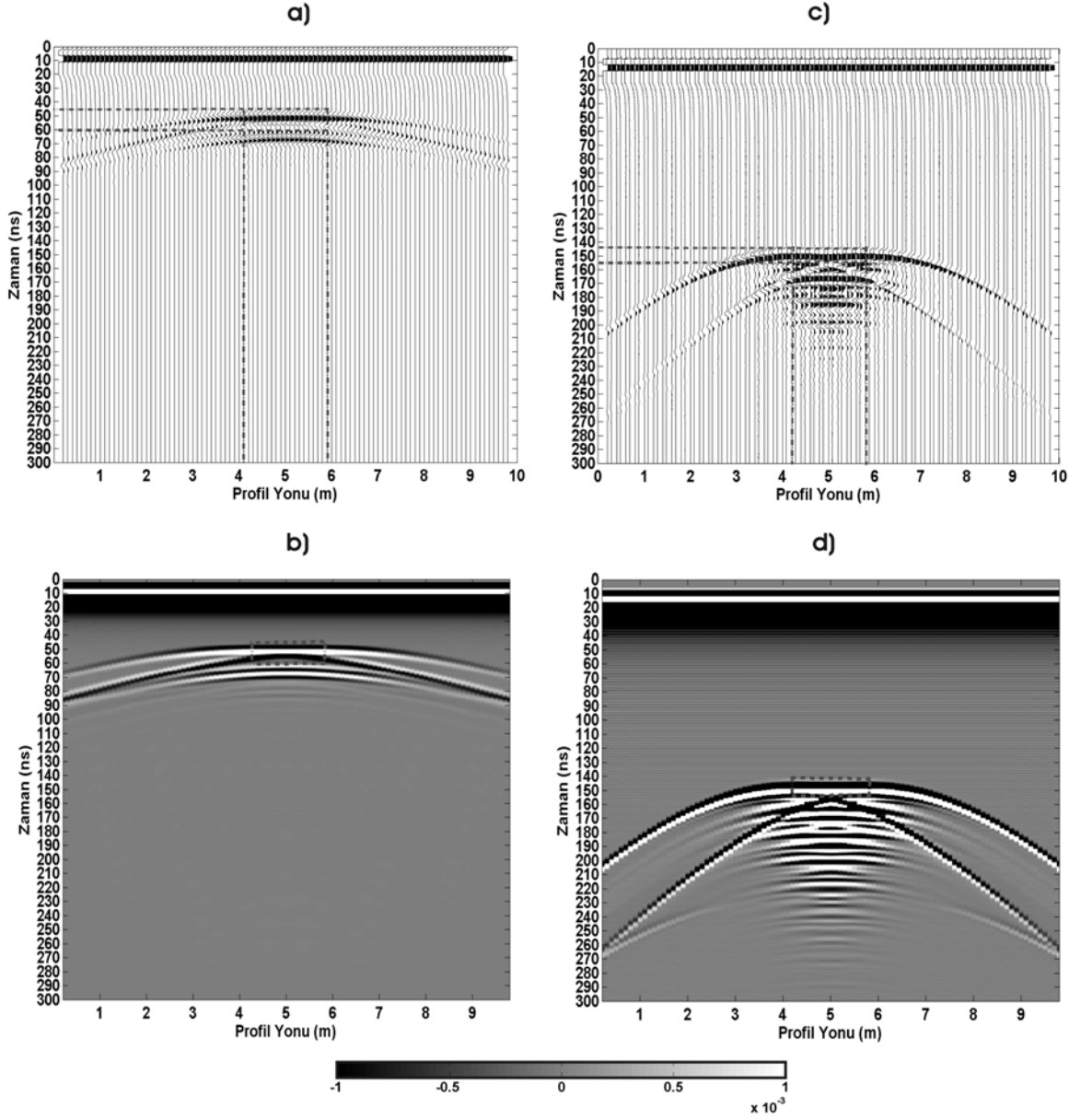
Bu bölümdeki çalışmanın amacı yer altı boşluklarının, farklı özellikteki ortamlar içinde davranışını gözlemlemektir. Bunun için modellerde iki farklı ortam kullanılmıştır. Şekil 8.16.a'da kuru toprak (bağıl dielektrik katsayısı: 3, iletkenlik değeri 0.001 simens/m), Şekil 8.16.b'de doymun toprak (bağıl dielektrik katsayısı: 30, iletkenlik değeri 0.001 simens/m) ortam olarak alınmıştır. Ortamlar içine aynı özellikte ve boyda boşluklar (Bağıl dielektrik katsayısı: 1, iletkenlik değeri 0 simens/m) yerleştirilmiştir (Şekil 8.16). Modellerde μ_0 , manyetik geçirgenlik değeri olarak kullanılmıştır.

Birinci model için, model ağı x yönünde toplam 283, z yönünde 283 hücreden oluşmaktadır. CPML sınır bölgesi, model ağının sağ, sol, alt ve üstüne 41 hücre eklenerek oluşturulmuştur. Alıcı ve verici antenler arası mesafe 0.4 metre, anten kaydırma mesafesi (ölçüm aralığı) 0.1 metredir. Model için 97 verici, 97 alıcı anten çifti kullanılmıştır. Anten frekansı 100 MHz alınmıştır. Kayıt zamanı 300 ns, dt zaman aralığı alınarak 0.2 ns olarak alınmıştır ve dx, hücre kalınlıkları 0.1 m seçilmiştir.

İkinci model için, model ağı x yönünde toplam 663, z yönünde 663 hücreden oluşmaktadır. CPML sınır bölgesi, model ağının sağ, sol, alt ve üstüne 81 hücre eklenerek oluşturulmuştur. Alıcı ve verici antenler arası mesafe 0.4 metre, anten kaydırma mesafesi (ölçüm aralığı) 0.1 metredir. Model için 97 verici, 97 alıcı anten çifti kullanılmıştır. Anten frekansı 100 MHz alınmıştır. Kayıt zamanı 300 ns, dt zaman aralığı alınarak 0.08 ns olarak alınmıştır ve dx, hücre kalınlıkları 0.04 m seçilmiştir.



Şekil 8.16 Dielektrik katsayıları farklı ortamlara ait: a. Birinci model, b. İkinci model



Şekil 8.17 Dielektrik katsayıları farklı ortamlar: a. b. Şekil 8.16.a'ya ait, c. d. Şekil 8.16.b'ye ait dalga şekli açık görüntülü (wiggles) ve genlik-renk ölçeğine göre taralı (scan) radargram

Şekil 8.17.a,b,c,d'de görülen radargramlara bakıldığında, oluşturulan modeller arasındaki farklar gözlenmektedir. Radargramlardan çıkarılan sonuçlara göre;

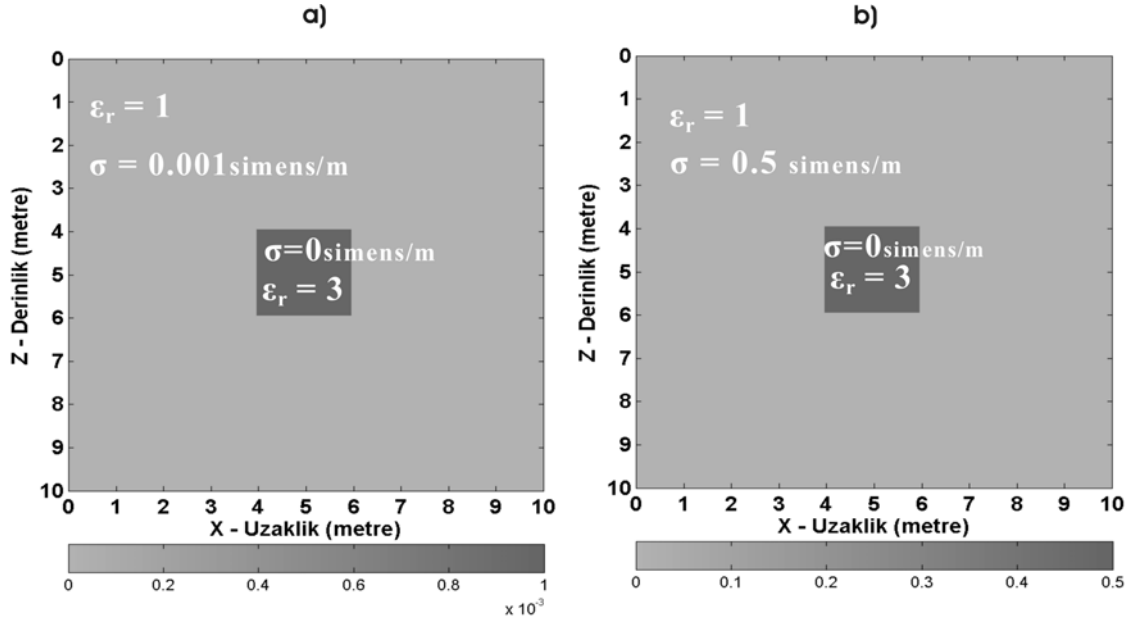
- ✓ Ortamın dielektrik katsayısı arttıkça boşluk yapısı nedeniyle oluşan hiperbol kolları daralır (Doğgun toprak, ikinci model, Şekil 8.17.c.d).

- ✓ Boşluk ile ortam arasındaki dielektrik katsayısı fark artışına bağlı olarak yansıma genliklerinde yükselme olur (Doygun toprak, ikinci model, Şekil 8.17. c.d).
- ✓ Boşluk ile ortam arasındaki dielektrik katsayısı fark artışına bağlı olarak tekrarlı yansımalarda artış gözlenir (Doygun toprak, ikinci model, Şekil 8.17.c.d).
- ✓ Dielektrik katsayısındaki artış, EM dalganın ortam içinde daha yavaş hareket etmesine (EM hız düşük olduğundan) ve alıcıya daha geç ulaşmasına neden olur (Doygun toprak, ikinci model, Şekil 8.17.c.d).

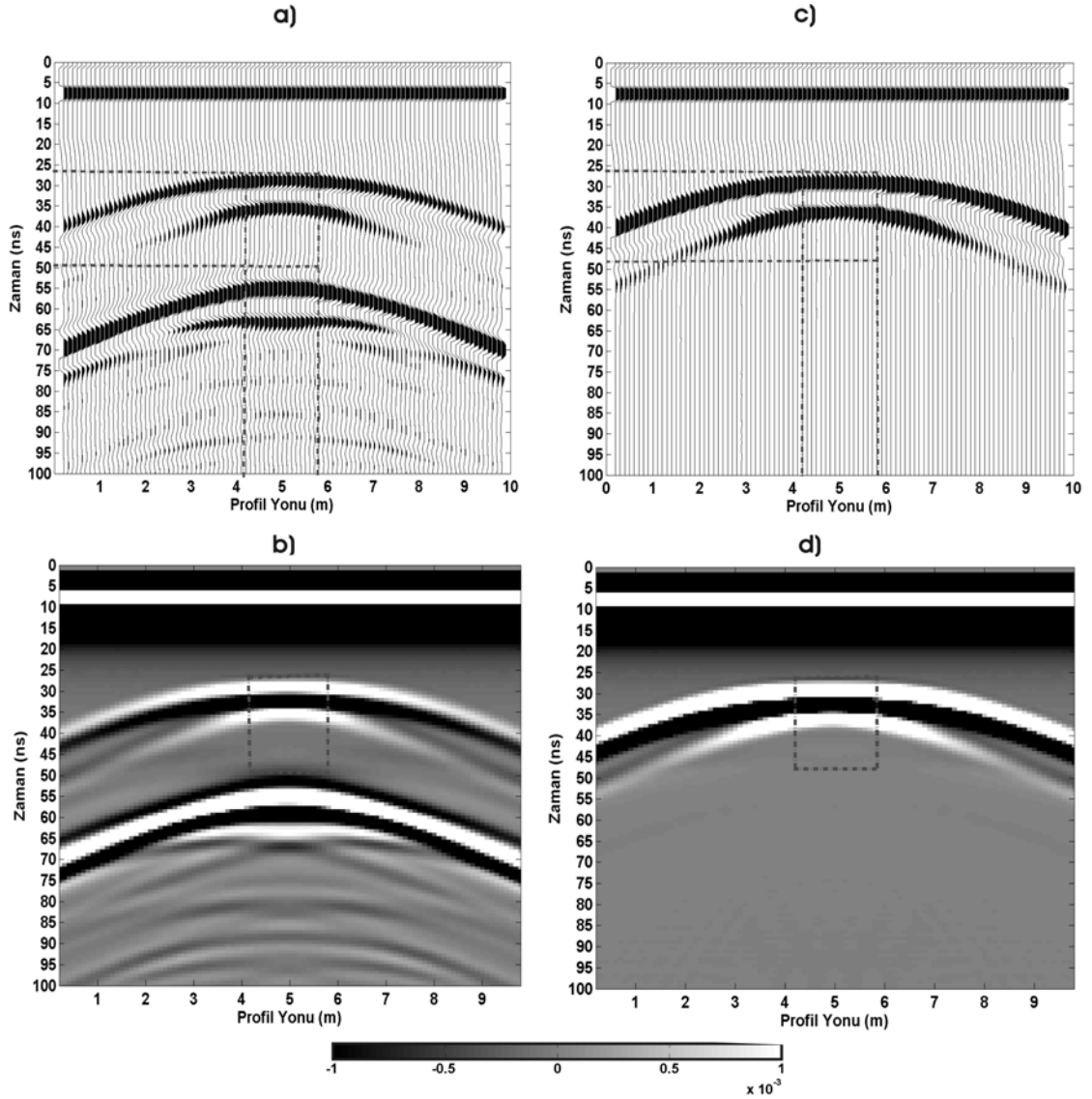
8.6.4 Ortamın iletkenlik etkisinin incelenmesi

Bu bölümdeki amaç, iletken ortamlarda ilerleyen EM dalga genliğinin zayıfladığını ve sönümlendiğini göstermektedir. Oluşturulan iki farklı ortam için aynı bağıl dielektrik katsayısı fakat farklı iletkenlik değeri kullanılmıştır. Birinci ortamın iletkenliği 0.001 simens/m alınırken, ikinci ortamın iletkenliği 0.5 simens/m alınmıştır (Şekil 8.18) ve μ_0 manyetik geçirgenlik değeri olarak kullanılmıştır.

Modellerde model ağı x yönünde toplam 283, z yönünde 283 hücreden oluşmaktadır. CPML sınır bölgesi, model ağının sağ, sol, alt ve üstüne 41 hücre eklenerek oluşturulmuştur. Alıcı ve verici antenler arası mesafe 0.4 metre, anten kaydırma mesafesi (ölçüm aralığı) 0.1 metredir. Model için 97 verici, 97 alıcı anten çifti kullanılmıştır. Anten frekansı 100 MHz alınmıştır. Kayıt zamanı 100 ns, dt zaman aralığı alınarak 0.2 ns olarak alınmıştır ve dx, hücre kalınlıkları 0.1 m seçilmiştir.



Şekil 8.18 İletkenlik değerleri farklı ortam: a. Birinci model, b. İkinci model



Şekil 8.19 İletkenlik değeri farklı ortamlar: a. b. Şekil 8.18.a'ya ait, c. d. Şekil 8.18.b'ye ait, dalga şekli açık görüntülü (wiggle) ve genlik-renk ölçeğine göre taralı (scan) radargram

Şekil 8.19.a.b.c.d'de görülen radargramlara bakıldığında, gözlenen farklar şu şekildedir;

- ✓ İletkenlik arttıkça hiperbolün üst kanadı belirginleşir, alt kanatlarında genliklerin düştüğü gözlenir. Dolayısıyla da tekrarlı yansımaların olmadığı EM dalga çok çabuk sönümlenmesinden görülmektedir (Şekil 8.19.c.d).
- ✓ Yine iletkenlik arttıkça EM dalga soğrulduğundan gömülü cismin alt sınırı gözlenmez (Şekil 8.19.c.d).

- ✓ İletkenlik artıkça EM dalganın varış zamanında herhangi bir değişiklik olmaz (Şekil 8.19).
- ✓ Ayrıca, gömülü yapı daha derinde olsaydı, EM kaynak alan yapının üst yüzeyine dahi ulaşamayabilirdi.

8.7 Polarite ve Yansıma Genlikleri Değişimlerinin İncelenmesi

8.7.1 EM kaynak alanının polaritesine göre aynı modele ait değişimin incelenmesi

Ortamın ve gömülü cismin dielektrik katsayısı ya da EM dalga hızı, polaritenin işaretini belirler. Yansıma katsayısı;

$$R = \frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1} = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (8.7.1.1)$$

ile verilir. Denklemden V_1 ve ϵ_1 sırasıyla yarı sonsuz ortamın EM dalga hızını ve dielektrik katsayısını, V_2 ve ϵ_2 sırasıyla gömülü yapının EM dalga alanı hızını ve dielektrik katsayısını temsil etmektedir (Annan 2000). Gelen dalga nesneye çarptığı zaman genliğinin yansıma katsayısı ile çarpımı sonucu elde edilen genlik değeri kadar yansıyor ve/veya saçılarak geri döner ve alıcılarda kaydedilirler. Yansıma katsayısı hızlara göre değerlendirildiğinde yapının hızı ortamın hızından büyükse yansıma katsayısı pozitif işaretli olmaktadır. Bu yansıyan/saçılan dalga alanının polaritesini değiştirmeyeceği, doğrudan gelen dalga alanının (kaynak alan) polaritesi ile aynı olacağı anlamındadır. Ters durumda yani $V_1 > V_2$ olması durumunda yansıma katsayısı negatif işaretli olmaktadır. Bu durumda yansıyan/saçılan dalga alanının polaritesi doğrudan gelen dalga alanının polaritesi ile farklı olacağı anlamındadır (Kurt vd. 2009).

Bu bölümde amaç teoriye dayalı yapılan yorumları, modelleme çalışmaları ile güçlendirmektir. Bunun için kaynak dalgacığının polaritesinin değiştirilerek, aynı model için elde edilen radargramlardaki fark incelenmiştir. Bunun için bölüm 8.6.2'de oluşturulan model kullanılmıştır (Şekil 8.14.a). Şekil 8.20.a.b'de doğrudan gelen dalga alanının polaritesi negatif, Şekil 8.20.c.d'de ise pozitif polaritelidir.

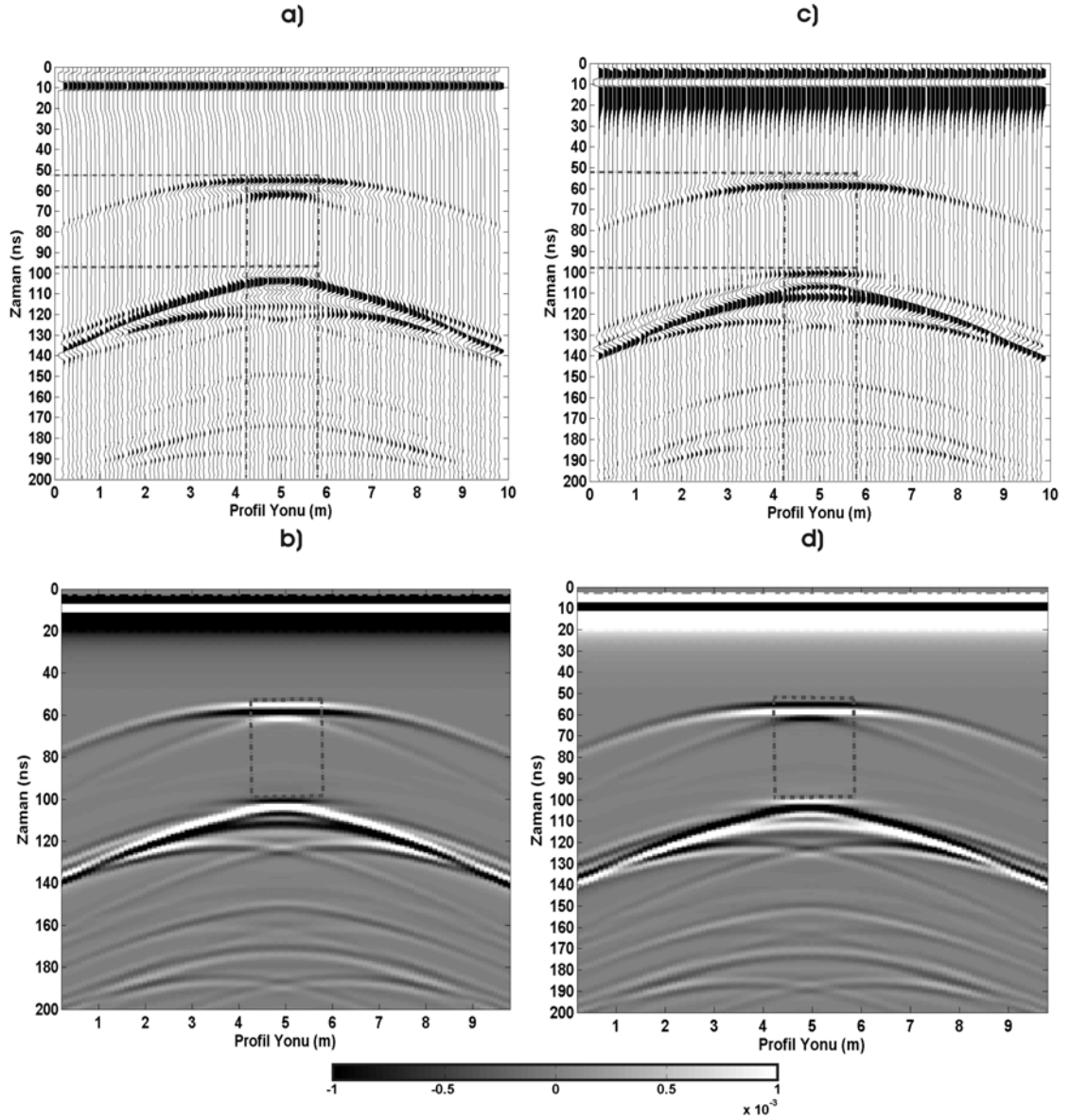
Elde edilen radargramlara bakıldığında teori ile uygun olduğu görülmektedir (Şekil 8.20). (8.7.1.1) eşitliğine göre Şekil 8.14.a'daki model için, gömülü yapının üst sınırı için yansıma katsayısı negatif, alt sınırı için pozitif değerdedir. Buna göre,

Doğrudan gelen dalga alanının polaritesi negatif polariteli olduğunda (Şekil 8.20.a.b);

- ✓ Gömülü cismin üst yüzeyinden, yansımış/saçılmış EM dalga alanının polaritesi doğrudan gelen dalga alanının polaritesinden farklı olup pozitif polaritelidir (Şekil 8.20.a.b) (Yansıma katsayısı negatif olduğundan polarite değişmiştir).
- ✓ Gömülü cismin alt yüzeyinden, yansımış/saçılmış EM dalga alanının polaritesi negatiftir (Şekil 8.20.a.b) (Yansıma katsayısı pozitif değerde olduğundan doğrudan gelen dalga alanının polaritesi ile aynı polaritededir).

Doğrudan gelen dalga alanının polaritesi pozitif polariteli olduğunda (Şekil 8.20.c.d);

- ✓ Gömülü cismin üst yüzeyinden, yansımış/saçılmış EM dalga alanının polaritesi doğrudan gelen dalga alanının polaritesinden farklı olup negatif polaritelidir (Şekil 8.20.c.d) (Yansıma katsayısı negatif olduğundan polarite değişmiştir).
- ✓ Gömülü cismin alt yüzeyinden, yansımış/saçılmış EM dalga alanının polaritesi pozitifdir (Şekil 8.20.c.d) (Yansıma katsayısı pozitif değerde olduğundan doğrudan gelen dalga alanının polaritesi ile aynı polaritededir).



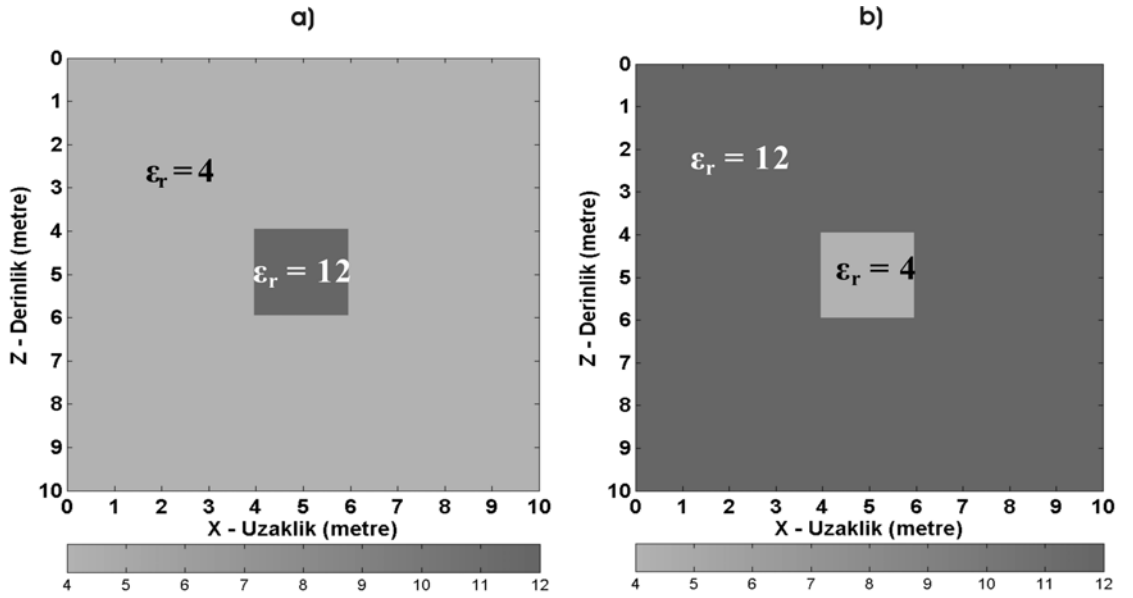
Şekil 8.20 Şekil 8.14.a'daki modele ait radargramlar: a. b. kaynak alan polaritesi negatif iken, c. d. kaynak alan polaritesi pozitif iken, dalga şekli açık görüntülü (wiggle) ve genlik-renk ölçeğine göre taralı (scan) radargram

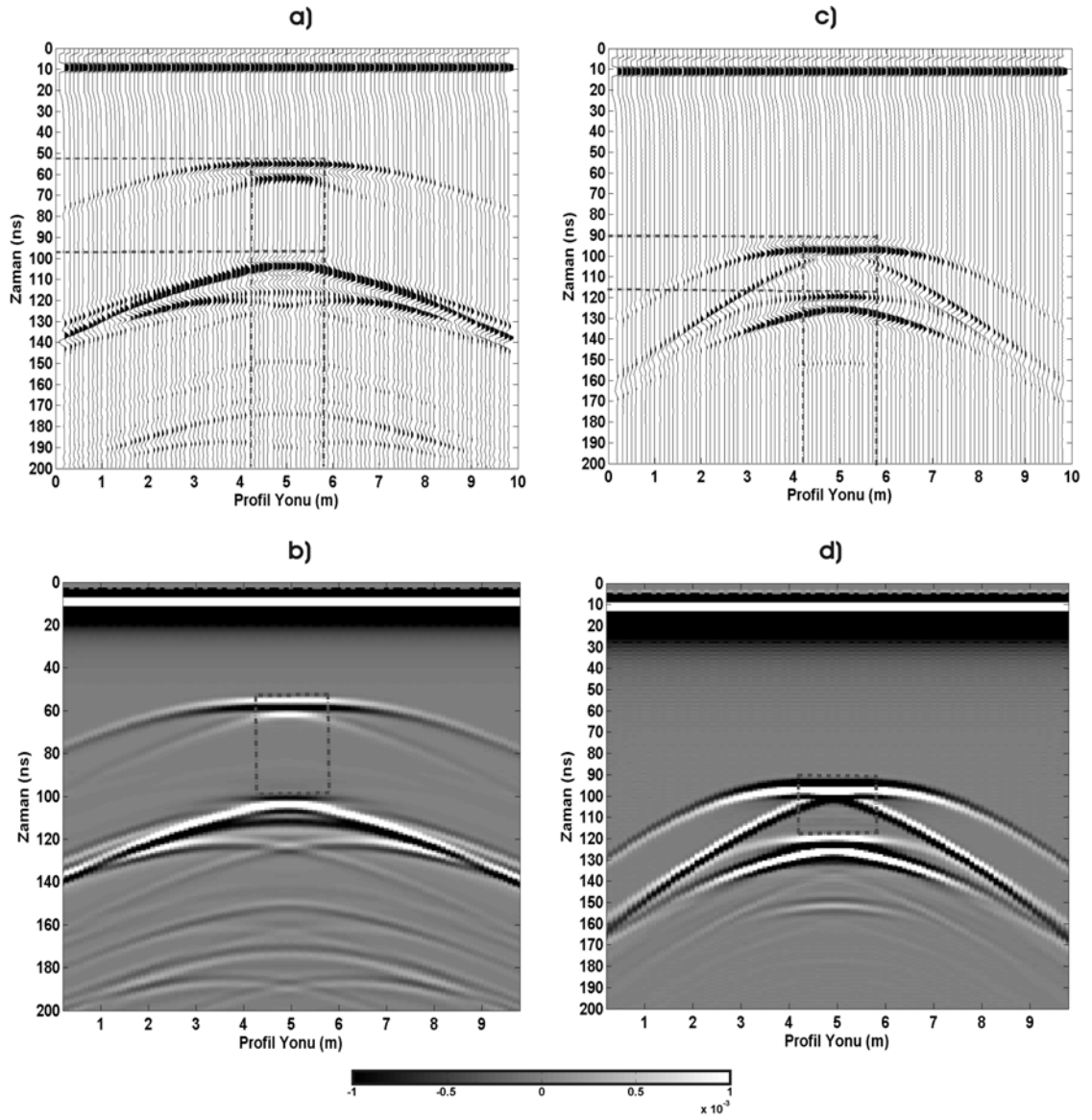
8.7.2 Ortam parametrelerinin değişimine göre yansıma genlikleri ve polarite değişiminin incelenmesi

Radargramlarda yansıma genlikleri ve polarite değişimleri incelemek için, iki ayrı model oluşturuldu. İlk modelde ortamın bağıl dielektrik katsayısı ile ikinci modelde gömülü yapının bağıl dielektrik katsayısı 4 ve ilk modelde gömülü yapının bağıl dielektrik katsayısı ile ikinci modelde ortamın bağıl dielektrik katsayısı 12 alınmıştır

(Şekil 8.21). Amaç parametrelere göre birbirine simetrik iki modelin tepkileri arasındaki farklılıkları incelemektir. Ayrıca ortamın iletkenlik değeri 0.001 simens/m, yapının iletkenlik değeri 0 simens/m alınmıştır) ve μ_0 manyetik geçirgenlik değeri olarak kullanılmıştır.

Modellerde model ağı x yönünde toplam 485, z yönünde 485 hücreden oluşmaktadır. CPML sınır bölgesi, model ağının sağ, sol, alt ve üstüne 81 hücre eklenerek oluşturulmuştur. Alıcı ve verici antenler arası mesafe 0.4 metre, anten kaydırma mesafesi (ölçüm aralığı) 0.1 metredir. Model için 97 verici, 97 alıcı anten çifti kullanılmıştır. Anten frekansı 100 MHz alınmıştır. Kayıt zamanı 200 ns, dt zaman aralığı alınarak 0.24 ns olarak alınmıştır ve dx, hücre kalınlıkları 0.062 m seçilmiştir.

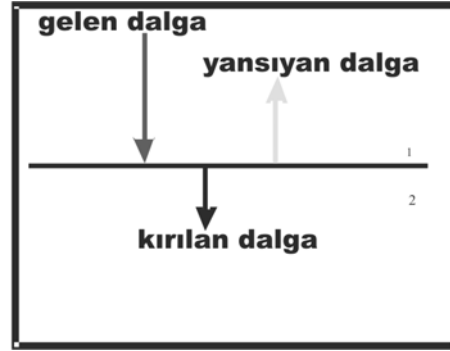




Şekil 8.22. a. b. Şekil 8.21.a'ya ait, c. d. Şekil 8.21.b'ye ait, dalga şekli açık görüntülü (wiggle) ve genlik-renk ölçeğine göre taralı (scan) radargram

$$T = 1 - R$$

(8.7.2.1)



Şekil 8.23 Ara yüzeye dik gelen dalganın yansıması ve kırılması (Kadioğlu 2002)

Elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- ✓ Birinci modelde gömülü yapının dielektrik katsayısı ortamın dielektrik katsayısından büyük olduğundan, gömülü yapının üst sınırından yansımış/saçılmış EM dalga alanı pozitif polaritede, alt sınırından yansımış/saçılmış EM dalga alanı negatif polaritededir (Şekil 8.22.a.b).
- ✓ İkinci modelde gömülü yapının dielektrik katsayısı ortamın dielektrik katsayısından küçük olduğundan, gömülü yapının üst sınırından yansımış/saçılmış EM dalga alanı negatif polaritede, alt sınırından yansımış/saçılmış EM dalga alanı pozitif polaritededir (Şekil 8.22.c.d).
- ✓ Birinci modelde, gömülü yapının dielektrik katsayısı ortamın dielektrik katsayısından büyük olduğundan yansıma katsayısı negatif çıkacaktır. (8.7.2.1) eşitliğinde kırılan dalganın (T) genliği, yansıyan dalganın genliğinden büyük olacaktır. Dolayısıyla yapının alt yüzeyine çarpıp yansıyıp gelen EM dalga genliği, yapının üst yüzeyine çarpıp gelen EM dalga alanı genliğinden daha yüksek genlikte olacaktır (Şekil 8.22.a.b).
- ✓ İkinci modelde, tam ters bir durum söz konusudur. Yapının dielektrik katsayısı ortamın dielektrik katsayısından küçük olduğundan yansıma katsayısı pozitif çıkacaktır. (8.7.2.1) eşitliğinde kırılan dalganın (T) genliği, yansıyan dalganın genliğinden küçük olacaktır. Dolayısıyla cismin üst yüzeyine çarpıp yansıyıp

gelen EM dalga alanı genliği, cismin alt yüzeyine çarpıp gelen EM dalga alanı genliğinden daha yüksek genlikte olacaktır (Şekil 8.22.c.d).

Bunlar haricinde kesitlerden şu yorumların çıkarılması da mümkündür;

- ✓ Ortamın dielektrik katsayısındaki artışı, EM dalganın ortam içinde daha yavaş hareket etmesine ve alıcıya daha geç ulaşmasına neden olmaktadır (Şekil 8.22.c.d).
- ✓ Ortamın dielektrik katsayısındaki artış, EM dalganın gömülü yapıya çarpıp, yansıması ve saçılması sonucu oluşan hiperbol kollarının daralmasına neden olmaktadır (Şekil 8.22.c.d).

9. SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında MATLAB programlama dili kullanılarak yer radarı yönteminde 2B modelleme algoritması geliştirilmiştir. Modelleme için zaman ortamında sonlu farklar yöntemi kullanılmıştır. Yazılan modelleme algoritması, yapay modellerle test edilmiştir. Modellere ait tabaka derinlik değeri ve ortamın EM dalga hızı kullanılarak, EM dalganın varış zamanı hesaplanmıştır. Hesaplanan varış zamanı ile radargram üzerinde görülen varış zamanı karşılaştırılıp, algoritmanın doğruluğu ispatlanmıştır. İlk olarak yatay tabaka, eğimli tabaka, boşluk yapıları ve senkinal gibi modeller oluşturulmuştur. Tüm modellerde, tabakaların ve gömülü cisimlerin büyüklükleri, konumları ve derinlik ayrıntılarını ortaya koyan EM dalga alanlarını gösteren radargramlar elde edilmiş ve bu radargramlar irdelenerek yorumlanmıştır. İkinci olarak, modellerdeki ortamın ve gömülü boşluk/yapının geometrisi ve fiziksel özellikleri (bağıl dielektrik katsayısı ve iletkenlik değerleri) değiştirilerek elde edilen radargramlar üzerindeki değişiklikler tartışılmıştır. Ortamın ve gömülü yapılara ait bağıl dielektrik katsayısının artması ve azalması sonucu EM dalga alanının alıcıya ulaşma zamanının değişimi ve iletkenlik değerinin artmasıyla EM dalganın izlemiş olduğu davranış incelenmiştir. Ayrıca bir model üzerinde anten frekansları değiştirilerek frekans etkisi kısaca irdelenmiştir. Çalışma sonucu yüksek frekanslı anten kullanıldığında yer altında daha ayrıntılı ve yüksek çözünürlükte bilgi alınacağı ortaya konulmuştur. Ancak anten frekansı, öncelikle araştırılması gereken derinlik dikkate alınarak seçilmeli daha sonra gömülü yapıların ayrıntı özelliklerini ortaya çıkarıcı etkiler düşünülmelidir. Çünkü yüksek anten frekansı kullanarak ayrıntıyı yakalamaya çalışırken, araştırılması gerekli derinliğe EM dalga ulaşamayabilir. Bu nedenle öncelikli olan gömülü yapıların başlangıç derinliği daha sonra ayrıntısıdır. Son olarak oluşturulan modellerde, yansıma genlikleri ve polarite değişimleri incelenmiştir ve sonuçlar yorumlanmıştır. Yansıma genliklerinin ve polarite değişiminin, ortam ve ortamda bulunan gömülü yapıların bağıl dielektrik katsayılarına göre değişiklik gösterdiği ispatlanmıştır.

Arazi yapısına uygun oluşturulan yapay modellerle yeraltının tepkisini önceden incelemek, arazi verisinin yorumlanmasını kolaylaştırdığından modelleme çalışmaları

önemlidir. Bu tez kapsamında yapılan tüm çalışmalar, ilerde arazi verisinin toplanmasında ve yorumlanmasında kolaylık sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Akleman, F. 1998. Zamanda sonlu farklar yöntemi ve yutucu sınır koşulları, Yüksek lisans tezi.
- Annan, A.P. 2000. Ground penetrating radar workshop notes. Sensors and Software Inc., Canada.
- Aspiron, U. and Aigner, T. 1999. Towards realistic aquifer models: Three dimensional georadar surveys of Quaternary gravel deltas (Singen Basin, SW Germany). *Sedimentary Geology*, 129, 281-297.
- Berenger, J. P. 1994. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic wave. *Journal of Computational Physics*, 114, 185-200.
- Berenger, J. P. 1996. Three-Dimensional perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. *Journal of Computational Physics*, 127, 363-379.
- Bergmann, T. Robertsson, J. O.A. and Holliger K. 1998. Finite difference modelling of electromagnetic wave propagation in dispersive and attenuating media. *Geophysics*, Vol.63, No.3, P.856-867.
- Bergmann, T. Blanch, J.O. and Robertsson, J.O.A. 1999. A simplified Lax-Wendroff correction for staggered-grid FDTD modeling of electromagnetic wave propagation in frequency-dependent media. *Geophysics*, Vol.64, No.5, P.1369-1377.
- Bourgeois, J.M. and 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*, Vol.34, No.1.
- Cai, J. and McMechan G. A 1995. Ray-based synthesis of bistatic ground-penetrating radar profiles. *Geophysics*, Vol.60, No.1, P.87-96.
- Candansayar, M.E. 1997. Doğru akım öz direnç yönteminde modelleme ve iki-boyutlu sığ yapıların aranmasında elektrod dizilimlerinin ayrımlılıklarının karşılaştırılması.
- Carcione, J. M. 1996. Ground radar numerical modelling applied to engineering problems. *Evr. J. Environ. Eng. Geophys.*1, 65-81.
- Carcione, J., M., 1998. Radiation patterns for 2-D GPR forward modelling. *Geophysics*, Vol 63, No 2, P 424-430.
- Cardelli, E. Marrone, C. and Orlando, L. 2003. Evaluation of tunnel stability using integrated geophysical methods. *Journal of Applied Geophysics*, 52, 93-102.
- Changryol, K. Daniels, J. J. Guy, E. Radzevicius, S. J. and Holt, J. 2000. Residual hydrocarbons in a water-saturated medium: A detection strategy using ground penetrating radar. *Environmental Geosciences*, 7, 4, 169-176.
- Chen, Y. H. Chew, W.C. and Oristaglio, A. L. 1997. Application of perfectly matched layers to the transient modelling of subsurface EM problems. *Geophysics*, Vol.62, No.6, P.1730-1736.
- Dannowski, G. and Yaramancı, U. 1999. Estimation of water content and porosity using combined radar and geoelectric measurements. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 4, 71-85.
- Davis, J.L. and Annan, A.P. 1989. Ground-penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, 37, 531-551.
- Ellefsen, K.J. 1999. Effects of layered sediments on the guided wave in crosswell radar data. *Geophysics*, Vol.64, No.6, P.1698-1707.

- Gürel, L. and Oğuz, U. 2000. Three- dimensional FDTD modelling of a Ground- Penetrating Radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol 38., No.4.
- Goodman, D. 1994. Ground-penetrating radar simulation in engineering and archaeology. *Geophysics* 59, 224-232.
- Grandjean, G. and Gourry, J.C. 1999. GPR data processing for 3D fracture mapping in a marble quarry (Thassos, Greece). *Journal of Applied Geophysics* 36, 19–30.
- Green, A. Gross, R. Holliger, K. Horstmeyer, H. and Baldwin, J. 2003. Results of 3D georadar surveying and trenching the San Andreas fault near its northern landward limit. *Tectonophysics*, 368,7–23.
- Hammon III, W. S. McMechan, G. A. and Zeng, X. 2000. Forensic GPR: finite-difference simulations of responses from buried human remains. *Journal of Applied Geophysics*, 45, 171-186.
- Harris F. J. 1978. On the use of Windows for harmonic analysis with the discrete fourier transforms. *Proceeding of the IEEE*, Vol.66, No.1, P.51-83.
- Holliger, K., and Bergmann, T., 2002. Numerical modeling of borehole georadar data. *Geophysics*, Vol.67, No.4, P.1249-1257.
- Harrari, Z. 1996. Ground penetrating radar (GPR) for imaging stratigrafic features and groundwater in sand dunes. *Journal of Applied Geophysics*, 36, 43-52.
- Irving, J. 2006. Improving tomographic estimates of subsurface electromagnetic wave velocity obtained from ground-penetrating radar data. Doctor of Philosophy, Stanford University.
- Irving, J. and Knight, R. 2006. Numerical modelling of ground-penetrating radar in 2D using MATLAB, *Computer and Geosciences*, 35, 1247-1258.
- Kadioğlu, S. 2008. Photographing layer thicknesses and discontinuities in a marble quarry with 3D GPR visualization. *Journal of Applied Geophysics*, 64(3), 109-114.
- Kadioğlu, S. Kadioğlu, Y.K. and Akyol, A.A. 2008. Geoarcheological research of the mid-Age Ilyasbey Complex buildings with ground penetrating radar in Miletus, Aydin, Western Anotolia, Turkey, Donald Harrington Symposium on the Geology of the Aegean, 28–30 April 2008, University of Texas at Austin, Jackson School of Geosciences, USA, B C Burchfiel 2008 IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2, published online.
- Kadioğlu, S. and Daniels, J. J. 2008. 3D visualization of integrated ground penetrating radar data and EM-61 data to determine buried objects and their characteristics, *Journal of Geophysics and Engineering*, 5, 448-456.
- Kadioğlu, S. Ulugergerli, E.U. and Daniels, J.J. 2006. 3D visualization to map cavities by GPR method: Dalaman Akkopru dam reservoir area, Mugla, Southwest Turkey. *Proceedings of the 11 th International Conference on Ground Penetrating Radar*, Columbus- Ohio, USA, CD paper No.156_dnj.
- Koralay, T. Kadioğlu, S. and Kadioğlu, Y. K. 2007. A New Approximation in determination of zonation boundaries of ignimbrite by ground penetrating padar: Kayseri, Central Anotalia, Turkey. *Environmental Geology*, 52(7), 1387-1397.
- Kurt, B.B. Kadioğlu, S. ve Ekincioğlu, E.E. 2009. Yer radarı yöntemi ile gömülü boruların konum, büyüklük ve fiziksel özellikleri ile belirlenmesi. *Yerbilimleri*, 30(1), (Baskıda).
- Lee, R. and Teixeria, F. L. 2006. Finite difference time domain modelling for GPR applications. *GPR 2006 conference short course notes*.

- Luebbers, R. J. and Hunsberger F. 1992. FDTD for Nth-order dispersive media. IEEE transactions on antennas and propagation, Vol.40, No.11, P.1297-1301.
- MALA GEOSCIENCE. Basic radar theory, fundamentals of Ground Penetrating Radar (CD), Sweden.
- Nabighan, M.N. 1998. Electromagnetic methods in applied geophysics, Vol. 1, Theory, Tulsa.
- Roden, J. A. and Gedney, S. 2000. An efficient FDTD implementation of the PML with CFS in general media, IEEE.
- Sevgi, L. 1999. Elektromagnetik problemler ve sayısal yöntemler, Canada.
- Sambuelli, L. Socco, L.V. and Brecciaroli, L. 1999. Acquisition and processing of electric, magnetic and GPR data on a Roman site (Victimulae, Salussola, Biella). Journal Applied Geophysics 41,189–204.
- Sensors and Software, 1996. PulseEKKO100 User's Guide, V1.2, technical manual 25, Canada.
- Sadiku, M.N.O. 1992. Numerical techniques in electromagnetics, second edition, London.
- Teixeira, F.L. Chew, W.C. Straka, M. Oristaglio, M.L. and Wang, T. 1998. Finite-Difference Time Domain simulation of ground penetrating radar on dispersive, inhomogeneous, and conductive soils, IEEE transactions on geoscience and remote sensing, Vol: 36, No: 6.
- Ulugergerli, E. U. ve Özürlan, G. 2005. Jeofizik Mühendisliğinde Elektromanyetik Yöntemler, Y-0029, ISBN: 975-511-433-5, Birsen yayınevi.
- Wang, T. and Tripp, A.C. 1996. FDTD simulation of EM wave propagation in 3-D media. Geophysics, Vol:61, No:1, P 110-120.
- Xiong, Z. and Tripp, C. A. 1997. 3D electromagnetic modelling for near-surface targets using integral equation, Geophysics, Vol 62, No 4.
- Yee, K. S. 1966. Numerical solution of initial boundary problems involving Maxwell's equations in isotropic media, IEEE Trans. Ant. Prop., Ap-14, P 302-309.
- Zeng, X. McMechan, G.A. Cai, J. and Chen, H. 1995. Comparison of ray and Fourier methods for modelling monostatic ground-penetrating radar profiles, Geophysics, Vol.60, No.6, P.1727-1734.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Büşra Bihter KURT

Doğum Yeri : Ankara

Doğum Tarihi : 16.09.1984

Medeni Hali : Bekâr

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Aydınlık Evler Süper Lisesi (1998-2002)

Lisans : Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Jeofizik Mühendisliği Bölümü (2002-2006)

Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı
(Şubat 2007 – Şubat 2009)

Yayınlar:

- **Kurt, B.B.**, Kadioğlu, S., ve Ekincioğlu, E.E., 2009. Yer radarı yöntemi ile gömülü boruların konum, büyüklük ve fiziksel özellikleri ile belirlenmesi. *Yerbilimleri*, 30(1), (Baskıda).

Bildiriler:

- **Kurt, B.B.** Doğru Akım Özdirenç Ve Sismik Kırılma Verilerinin Birleşik Ters Çözümü (Joint Inversion of Direct Current Resistivity and Seismic Refraction Data) Uluslararası 17. Jeofizik Kongresi.
- **Kurt, B.B.**, Kadioğlu, S., ve Ekincioğlu, E.E. Yer Radarı Yöntemi İle Gömülü Boruların Araştırılması (Determination of buried pipes using ground penetrating radar) Uluslararası 18. Jeofizik Kongresi.
- Özkan, B., **Kurt, B.B.**, Ekincioğlu, E. E., Kadioğlu, S. Gömülü Demir Ağı Yapısının Yer Radarı Yöntemi ile Araştırılması (Research Of Buried Rebar with Ground Penetrating Radar Method) Uluslararası 18. Jeofizik Kongresi.

- Köse, M., **Kurt, B.B.**, Kadioğlu, S. Yer Radarı Yöntemi ile Yapı Kolonu İncelemesi (Researching Structure Column with Ground Penetrating Radar Method) Uluslararası 18. Jeofizik Kongresi.
- Canaz, S., **Kurt,B.B.**, Ekincioğlu, E.E, Kadioğlu, S. Yer Radarı Yöntemi ile Gömülü Tank Deneyi (Buried Tank Experiment with Ground Penetrating Radar Method) Uluslararası 18. Jeofizik Kongresi.
- Türker, Y., **Kurt,B.B.**, Ekincioğlu, E.E, Kadioğlu S. Yer Radarı Yöntemiyle Granit Dilimlerinin Görüntülenmesi Deneyi (The Granite Experiment with Ground Penetrating Radar) Uluslararası 18. Jeofizik Kongresi.