

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YER RADARI VERİLERİNİN
MODELLENMESİ VE YORUMLANMASI**

YÜKSEK LİSANS

İsmail KAPLANVURAL

**Anabilim Dalı: Jeofizik Mühendisliği
Danışman : Yrd. Doç. Dr. Ertan PEKŞEN**

KOCAELİ, 2011

**YER RADARI VERİLERİNİN MODELLENMESİ VE
YORUMLANMASI**

YÜKSEK LİSANS

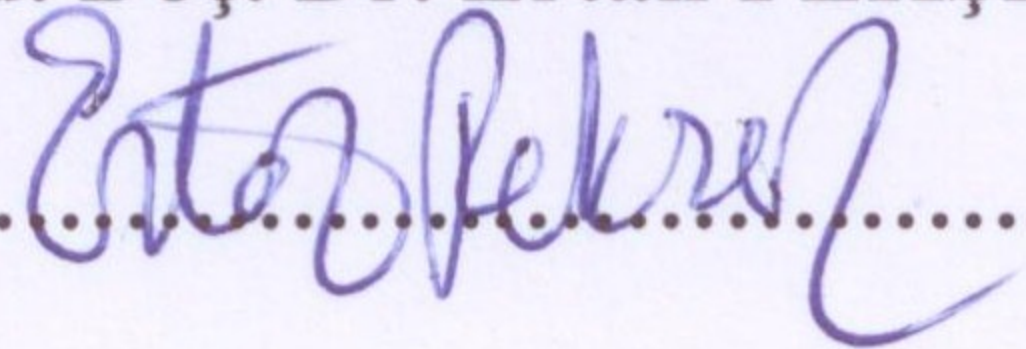
İsmail KAPLANVURAL

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 29 Kasım 2011

Tezin Savunulduğu Tarih: 21 Aralık 2011

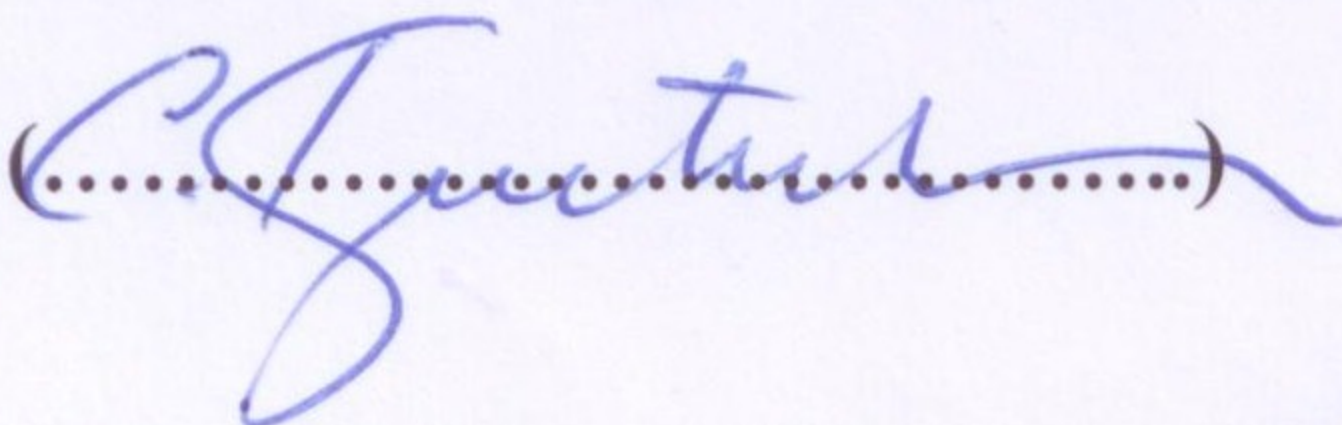
Tez Danışmanı

(Yrd. Doç. Dr. Ertan PEKŞEN)

(..........)

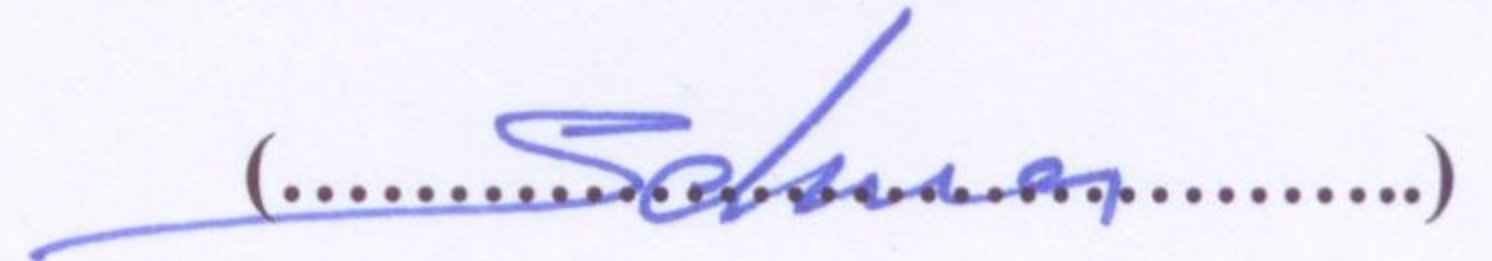
Üye

(Prof. Dr. Cengiz KURTULUŞ)

(..........)

Üye

(Doç. Dr. Selma KADIOĞLU)

(..........)

KOCAELİ, 2011

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Jeofizik araştırmalar ile gömülü halde bulunan yapıların gün yüzüne çıkartılması amaçlanmaktadır. Son yıllarda sığ araştırmalarda sıklıkla kullanılan yöntemlerden biri de yer radarı yöntemidir.

Yer radarı çalışması ile elde edilen verilerin yorumlama aşamasından önce modellenmesi yorumlama açısından oldukça önemlidir. Bu nedenle, bu çalışmada gerek teorik modeller ile gerekse gerçek arazi verisi ile modelleme çalışması yapılarak yer altındaki yapının geometrisi, şekli ve fiziksel özellikleri anlaşılmalı çalışılmıştır. Yapılan bu çalışma sonunda yer radarı verisinin yorumunun kolaylaştırılması amaçlanmıştır. Ayrıca yer altındaki yapının geometrisi anlaşılmalı çalışılarak kazı ve sondaj çalışmaları için kolaylık sağlamak hedeflenmiştir.

Yüksek lisans çalışmam süresince benden destek ve yardımlarını esirgemeyen, değerli bilgileri ve önerileri ile beni yönlendiren, danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Ertan PEKŞEN'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca değerli bilgilerini benimle paylaşan, verilerin modellenmesinde ve değerlendirilmesinde bana yol gösteren ve önerilerini sunan Prof. Dr. Wolfgang RABEL' a teşekkür ederim. Tez çalışmamın her aşamasında değerli bilgileriyle bana destek olan, verilerin sağlanmasında yardım eden ve değerlendirilmesinde yol gösteren değerli hocam Yük. Müh. Ercan ERKUL'a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca verilerin sağlanmasında bana yardım eden ve değerli bilgilerini benimle paylaşan Dr. Harald STÜMPER'e teşekkür ederim.

Christian Albrechts Üniversitesi Kiel'den değerli arkadaşlarım Dr. Dennis WILKEN'e, Dr. Matthias STRASER'a Yük. Müh. Tina WUNDERLICH'e, Yük. Müh. Christina KLEIN'a, yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Çalışmama katkıda bulunan, değerli görüş ve önerileri ile beni yönlendiren değerli hocam Doç. Dr. Selma KADIOĞLU'na teşekkür ederim.

Tezimin düzenlenmesi ve derlenmesinde bana yardım edip görüşlerini paylaşan Arş. Gör. Nur DEMİR'e teşekkür ederim.

Ayrıca bana her türlü çalışma imkanını sağlayarak destek ve yardımlarını esirgemeyen hocalarım Prof. Dr. Mithat Fırat ÖZER'e, Prof. Dr. Cengiz KURTULUŞ'a ve Prof. Dr. Şerif BARIŞ'a teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ.....	vi
SİMGELER.....	vii
ÖZET.....	viii
İNGİLİZCE ÖZET.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. YER RADARI YÖNTEMİ.....	4
2.1. Yöntemin Tanımı.....	4
2.2. Yer Radarı Kuramı.....	5
2.2.1. Ortamın iletkenliği.....	7
2.2.2. Dielektrik sabiti (Ortamın elektriksel geçirgenliği).....	7
2.2.3. Ortamın manyetik geçirgenliği.....	8
2.3. Elektromanyetik Dalgaların Özellikleri.....	9
2.4. Elektromanyetik Dalgaların Ara Yüzeyde Yansıması, Kırılması ve İletimi.....	12
2.5. Yatay ve Düşey Ayrımlılık.....	14
2.6. Uygun Anten Seçimi.....	16
2.7. Anten Dizilimleri.....	18
3. ZAMAN ORTAMINDA ELEKTRİK VE MANYETİK ALAN DALGA DENKLEMLERİ.....	20
3.1. Elektrik Alan Dalga Denklemi.....	20
3.2. Manyetik Alan Dalga Denklemi.....	22
3.3. TE ve TM Modları için Elektrik ve Manyetik Alan Dalga Denklemleri.....	23
3.3.1. TE modu için alan denklemleri.....	24
3.3.2. TM modu için alan denklemleri.....	25
4. SONLU FARKLAR YÖNTEMİNDE MAXWELL DENKLEMLERİ.....	26
4.1. Sonlu Farklar Yöntemi.....	26
4.2. Maxwell Denklemlerinin Sonlu Farklar Yöntemine Göre Yazılması.....	27
4.2.1. Bir boyutta Maxwell denklemleri.....	28
4.2.2. İki boyutta Maxwell denklemleri.....	30
4.2.2.1. TE modu.....	30
4.2.2.2. TM modu.....	36
4.3. Sınır Koşulları.....	37
4.4. Kararlılık Koşulu ve Sayısal Dispersiyon.....	42
5. YER RADARINDA VERİ İŞLEM.....	44
5.1. Sıfır Kayma Zamanı Düzeltmesi.....	45
5.2. Direkt Gelen Dalga'nın Veriden Atılması.....	45
5.3. Süzgeçleme.....	46
5.4. Dekonvolüsyon.....	47
5.5. Göç (Migrasyon).....	49
5.6. Zaman Dilimleri.....	52
6. MODEL ÇALIŞMALARI.....	55

6.1. Teorik Model Çalışmaları.....	55
6.1.1. Farklı geometrik şekildeki yapılar.....	55
6.1.2. Antiklinal, senklinal ve fay modelleri	60
6.2. Pratik Model Çalışmaları.....	64
6.2.1. Demir modeli.....	65
6.2.2. Tuna el-Gebel (Mısır) arkeolojik alanı verileri için bir model.....	71
SONUÇLAR.....	75
KAYNAKLAR.....	76
EKLER	80
ÖZGEÇMİŞ.....	82

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Yer radarının çalışma prensipleri	4
Şekil 2.2: Hız (a) ve sönümlenme (b) değerlerinin frekansa bağlı olarak değişimi ...	11
Şekil 2.3: Arayüzeye gelen dalga I 'nın sınıra çarptıktan sonra enerjinin yansıyan ve iletilen dalgalara aktarılması	12
Şekil 2.4: TE ve TM bileşenlerinin arayüzeyde yansımaları ve iletimi	13
Şekil 2.5: Anten durumlarına göre TE ve TM modları	13
Şekil 2.6: Frekans ile düşey ayrırlılık arasındaki ilişki. a) 50 MHz, b) 100 MHz, c) 200MHz	15
Şekil 2.7: Freznel zonu ve yatay ayrırlılık	16
Şekil 2.8: Yer radarı ölçümlerinde kullanılan çeşitli anten dizilimleri. a) Sabit açılım, b) Ortak derinlik noktası, c) Sabit kaynak, d) Sabit alıcı	19
Şekil 3.1: a) TE modu ve b) TM modu için EM alan bileşenleri	24
Şekil 4.1: TE modundaki elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin model ağı	31
Şekil 4.2: Hx bileşeninin hesaplanması için gerekli olan elektrik ve manyetik alan bileşenleri	34
Şekil 4.3: Hz bileşeninin hesaplanması için gerekli olan elektrik ve manyetik alan bileşenleri	35
Şekil 4.4: Ey bileşeninin hesaplanması için gerekli olan elektrik ve manyetik alan bileşenleri	35
Şekil 4.5: TM modundaki elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin model ağı	36
Şekil 4.6: Sınırları tanımlanmış bir model ağı	37
Şekil 5.1: Mısır'ın Tuna el-Gebel arkeolojik alanından toplanan örnek ham yer radarı verisi	44
Şekil 5.2: Radargramın T_0 düzeltmesinden sonraki görüntüsü	45
Şekil 5.3: Direkt gelen dalga veriden atıldıktan sonra radargramın görüntüsü	46
Şekil 5.4: Bant geçişli süzgeçlerin geçirim bandı (f_1 ve f_2) frekansları arasında kalan boyalı alan) ve kesme frekanslarının (f_1 ve f_2) şematik gösterimi ..	47
Şekil 5.5: Şematik olarak dekonvolüsyon işlemi. Altta dekonvolüsyon öncesi ve sonrası sismik dalgacıklar, üstte ise bunların şematik genlik spektrumları	48
Şekil 5.6: Örnek radargramın dekonvolüsyon uygulandıktan sonraki hali	48
Şekil 5.7: a) Yatay yansıtıcı yüzeyde düşey yansıma, b) radar kesidi	49
Şekil 5.8: a) Eğimli yansıtıcı yüzeyde yansıma, b) radar kesidi	49
Şekil 5.9: Orjinal pozisyonundaki olayın göç ettirilmiş yeri	50
Şekil 5.10: Radargramda görülen saçılma hiperbolü	50
Şekil 5.11: Örnek radargramın göç uygulandıktan sonraki hali	52
Şekil 5.12: Mısır'ın Tuna el-Gebel arkeolojik sahasında 400 MHz'lik radar anteni ile alınan ölçüler sonucunda elde edilen zaman dilimleri	54
Şekil 6.1: a) Dielektrik sabitini gösteren kare şeklindeki yeraltı modeli, b) bu modele ait elde edilen teorik radargram, c) göç uygulanmış radargram....	57
Şekil 6.2: a) Dielektrik sabitini gösteren daire şeklindeki yeraltı modeli, b) bu modelden elde edilen teorik radargram, c) göç uygulanmış radargram.....	58
Şekil 6.3: a) Dielektrik sabitini gösteren üçgen şeklindeki yeraltı modeli, b) bu modelden elde edilen teorik radargram, c) göç uygulanmış radargram.....	59

Şekil 6.4: a) Kare şeklindeki yapının dielektrik sabitinin çevre yapıya göre büyük olması durumu, b) kare şeklindeki yapının dielektrik sabitinin çevre yapıya göre küçük olması durumu, c) a modelinden hesaplanan teorik radargram d) b modelinden hesap edilen teorik radargram	60
Şekil 6.5: a) Antiklinal modeli için dielektrik sabitini gösteren yer altı modeli, b) bu modelden hesaplanan teorik radargram c) teorik radargrama göç uygulanmış hali	61
Şekil 6.6: a) Senklinal modeli için dielektrik sabitini gösteren yer altı modeli, b) bu modelden hesaplanan teorik radargram c) teorik radargrama göç uygulanmış hali	63
Şekil 6.7: a) Fay modeli için dielektrik sabitini gösteren yer altı modeli, b) bu modelden hesaplanan teorik radargram, c) teorik radargrama göç uygulanmış hali	64
Şekil 6.8: Beton içinde bulunan demir için a) dielektrik sabiti, b) manyetik geçirgenlik, c) iletkenlik değerlerini gösteren yer altı modeli	66
Şekil 6.9: Şekil 6.7'deki yer altı modelinden hesaplanan a) 1.6 GHz, b) 2.0 GHz, c) 2.6 GHz için teorik radargramlar	67
Şekil 6.10: a) 1.6 GHz, b) 2.0 GHz, c) 2.6 GHz 'lik antenler için hesaplanmış teorik radargramların göç uygulanmış hali	68
Şekil 6.11: a) 1.6 GHz, b) 2.0 GHz, c) 2.6 GHz 'lik antenler ile aynı profil üzerinde kaydedilmiş radargramlar.....	69
Şekil 6.12: a) 1.6 GHz'lik anten ile ölçüm sonucu kaydedilen radargram, b) göç uygulanmış hali, c) 1.6 GHz'lik anten için hesaplanan teorik radargram, c) göç uygulanmış hali	70
Şekil 6.13: Tuna el-Gebel (Mısır) araştırma alanı	71
Şekil 6.14: Uygulama alanında yapılan yer radarı çalışması	72
Şekil 6.15: a) Dielektrik sabiti değerlerini gösteren yeraltı yapısı, b) iletkenlik değerlerini gösteren yeraltı yapısı, c) FDTD yöntemi ile modellenerek hesaplanmış radargram, d) radagrama göç uygulanmış hali.....	73
Şekil 6.16: a) Arazide kaydedilmiş radargram, b) arazide kaydedilen radagrama göç uygulanmış hali, c) hesaplanan teorik radargram, d) hesaplanan teorik radagrama göç uygulanmış hali.....	74

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1: Yer radarı yönteminin kullanım alanları	2
Tablo 2.1: Bazı malzemeler için göreceli dielektrik sabiti ve iletkenlik değerleri	8
Tablo 2.2: Bazı malzemeler için göreceli manyetik geçirgenlik değerleri	9
Tablo 2.3: Anten merkez frekansı ile maksimum nüfuz derinliği arasındaki ilişki ...	17
Tablo 2.4: Anten merkez frekansı ile maksimum örnekleme aralığı arasındaki ilişki	18

SİMGELER

E	: Elektrik alan şiddeti (V / m)
D	: Elektrik akı yoğunluğu (C / m^2)
H	: Manyetik alan şiddeti (A / m)
B	: Manyetik akı yoğunluğu (W / m^2)
J	: Elektrik akım yoğunluğu (A / m^2)
ρ	: Serbest elektrik yük yoğunluğu (C / m^3)
σ	: İletkenlik (S / m)
ε	: Dielektrik Sabiti (F / m)
μ	: Manyetik geçirgenlik (H / m)
v	: Elektromanyetik dalga hızı (m / ns)
c	: Işığın boşlukta yayılma hızı (m / ns)
λ	: Elektromanyetik dalga boyu
f	: Frekans (Hz)
R	: Yansıma katsayısı
T	: Kırılma katsayısı
Z	: Empedans (Ω)
t	: Zaman (ns)
∇	: Nabla operatörü
α	: Sönümlenme (dB / m)
χ	: Duyarlılık

Alt ve üst indisler

r	: Göreceli
k	: Konum
x	: x yönü
y	: y yönü
z	: z yönü
n	: zaman

Kısaltmalar

GPR	: Yer radarı
EM	: Elektromanyetik
TE	: Enine elektrik (Transverse Electric)
TM	: Enine manyetik (Transverse Magnetic)
CPML	: Mükemmel uyumlu tabaka sınırı koşulu
GHz	: Gigahertz
MHz	: Megahertz

YER RADARI VERİLERİNİN MODELLENMESİ VE YORUMLANMASI

İsmail KAPLANVURAL

Anahtar Kelimeler: Yer radarı, Modelleme, Radargram, Zaman ortamında sonlu farklar, Veri İşlem

Özet: Yer radarı çalışmaları ile elde edilen radargramlardan yer altı yapısı hakkında doğrudan yorum yapmak zordur. Herhangi bir yansımanın radargram üzerinde ne tür bir yapıya karşılık geldiğinin iyi yorumlanması gerekmektedir. Bunun içinde veriye veri işlem uygulamak ve/veya modelleme çalışması yapmak gerekir.

Yer radarı verileri yorumlanmadan önce çeşitli veri işlem basamakları uygulanabilir. Veri işlem, sinyal/gürültü oranını arttırmak ve veriyi yoruma hazır hale getirmek için yapılabilir. Bu çalışmada Mısır'ın Tuna el-Gebel arkeolojik alanından alınan bir yer radarı verisi örnek olarak seçilip çeşitli veri işlem basamaklarına uygulanmıştır.

Bu çalışmada zaman ortamında sonlu farklar yöntemi ile iki boyutta modelleme çalışması yapılarak gerek teorik olarak üretilen yeraltı yapıları, gerekse gerçek radargramlar modellenmiştir. Farklı şekillerde yer altı yapılarının nasıl radargramlar oluşturacağını anlamak ve çeşitli gerçek arazi verilerindeki anomalilerden yola çıkarak geometrik şekillerini ve fiziksel özelliklerini belirleyebilmek amacı ile zaman ortamında sonlu farklar yöntemi ile teorik radargramlar hesaplanmıştır. Daha sonra ise çoğunlukla göç olmak üzere çeşitli veri işlem basamakları uygulanan teorik ve gerçek radargramlar karşılaştırılmış ve yeraltı yapısı modellenmiştir.

Çalışmada ilk önce kare, daire, üçgen, antiklinal, senklinal ve fay şeklinde yeraltı yapıları oluşturulmuş ve bu yapıların düz çözümleri hesaplanmıştır. Göç uygulanan bu radargramlar ile yer altı yapıları karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır. Daha sonra, bina için uygulanan yer radarı çalışmasına ait bir radargramdan ve Tuna El-Gebel (Mısır) arkeolojik alanında yapılmış yer radarı çalışmasına ait bir radargramdan yola çıkılarak yer altı yapısı oluşturulmuş ve zaman ortamında sonlu farklar ile modellenmiştir. Elde edilen teorik radargramlar ve gerçek radargramlara göç uygulanarak karşılaştırılmış ve yer altının nasıl bir yapıya karşılık geldiği anlaşılmıştır.

MODELLING AND INTERPRETATION OF GROUND PENETRATING RADAR DATA

İsmail KAPLANVURAL

Key Words: Ground penetrating radar, Modelling, Radargram, Finite difference time domain, Data processing

Abstract: Direct interpretation of radargrams is difficult to reveal the underground structure. Any kind of reflections should be well interpreted in order to identify a structure type. Some processing steps and modelling can be applied to radargrams in order to understand underground structure types.

Some data processing steps can be applied before the interpretation of ground penetrating radar data. That can be done in order to increase signal/noise ratio and to prepare the data before interpretation. A radargram from Tuna el-Gebel archaeological area is chosen as an example and processed for possible processing steps for ground penetrating radar.

Theoretical radargrams are calculated by finite difference time domain method in order to understand radargrams of various shaped structures and determine geometric shapes and physical properties of field data in this study. Migrated theoretical and field radargrams are compared and underground structures are modeled.

Firstly, the model response of the square, circle, triangle, anticlinal, synclinal and fault shaped structures are calculated. Migrated radargrams and the underground structures are compared and interpreted. Underground structures are created based on the radargram belong to a building structure and Tuna el-Gebel (Egypt) archaeological area and modeled by finite difference time domain method. Migration is applied to calculated theoretical and field radargrams and they are compared. This reveals the shape of the bodies and the locations.

1. GİRİŞ

Gömülü nesnelerin yeryüzünden saptanması fikri yıllar boyunca insanoğlunun ilgisini çekmiştir. Bu amaçla günümüze kadar bir çok jeofizik metot geliştirilmiştir. Jeofizik araştırmalarda kullanılan elektromanyetik yöntemlerin en yenilerinden biri olan yer radarı (Ground Penetrating Radar, Ground Probing Radar, Georadar) sığ araştırmalar için cazip bir seçenektir.

Yer altındaki gömülü nesneleri belirleme amaçlı yapılan ilk çalışma Hülsmeier (1904) tarafından gömülü bir metal nesneyi tespit etmek için yapılmıştır. Bundan yaklaşık altı yıl sonra Löwy (1911) alıcı ve verici antenler için düşey kuyular açarak kaydedilen sinyallerin genliklerini incelemiştir. Hülsenbeck'in 1926'da yaptığı çalışma ile gömülü yapıları tespit etmek için kullanılan ilk sinyal tekniği denenmiştir. Hülsenbeck herhangi bir dielektrik değişimin iletkenlik içermesi gerekli olmasa bile yansımalar üretebileceğini ortaya koymuştur. 1930 yılında Stern ilk yer radarı düzeneğini kurarak Avustralya'da buz kütlelerinin su altındaki derinliğini bulmak için çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmalar 1930'larda geliştirilerek kayda değer derinlikte olan buz, içme suyu, tuz depozitleri araştırılmıştır.

Yer radarı cihazı 1970'li yılların ilk başlarında Ohio Devlet Üniversitesi'nin Elektrobilimler Laboratuvarında üretilmiştir. Rex Morey ve Art Darke 1972 yılında "Geophysical Survey System Inc. (GSSI)" şirketi adı altında radar aletini ticari olarak satmaya başlamışlardır Cook (1974, 1975), Roe ve Ellerbuch (1979) tarafından yapılan çalışmalarda kaya ve kömür araştırmaları yapılmıştır. Buna rağmen derine indikçe sinyalin genliğindeki sönümlenmeden ötürü yöntemin bir kaç on metreden derin araştırmalarda başarısız olduğu gözlenmiştir.

Yer radarı yöntemi yer yüzeyinden, kuyu içinden ve kuyular arasında başarı ile uygulanabilmektedir. Yer radarının araştırma derinliği araştırma yapılan formasyonun özelliklerine ve anten frekansına bağlıdır. Yöntem, santimetre

duyarlılığa sahip yöntemlerden bir tanesidir. Yer radarı yöntemi ile toplanan verilerin değerlendirilmesiyle gömülü yapının derinliği, boyutu ve biçimi belirlenebilmektedir. Yer radarı yöntemi hızlı bir yöntemdir ve bir kaç gün içinde bir kaç hektarlık alanı taramak mümkündür.

Yer radarı yönteminin uygulama yelpazesi teknolojinin gelişmesiyle beraber 1970'ten günümüze kadar olan süreçte giderek genişlemiştir. Bir çok mühendislik problemine çözüm bulan yer radarı yönteminin kullanım alanları oldukça geniştir (Tablo 1.1).

Tablo 1.1: Yer radarı yönteminin kullanım alanları (Özkap, 2008).

Araştırma alanı	Hedeflenen örnek yapılar
Zemin Araştırmaları	Yol, hava alanı, su kanalı çalışmaları, yeraltı boşluk araması
Yapı Araştırmaları	Duvar incelemeleri, kolon-kiriş içi demir ve çatlak incelemesi
Arkeolojik Araştırmalar	Antik şehir, tapınak, mezar, duvar ve temel aramaları
Altyapı Çalışmaları	Kanalizasyon, su boruları, sığınak, elektrik ve telefon hatlarının tespiti
Çevresel Araştırmalar	Endüstriyel atık, sızıntı ve kaçak alanlarının tespiti
Adli ve Adli Tıp Araştırmaları	Cezaevi firar tünellerinin belirlenmesi, kasa, silah ve benzeri objelerin tespiti, ceset ve toplu mezarların bulunması
Maden Araştırmaları	Yüzeye yakın madenlerin aranması ve rezerv tespiti

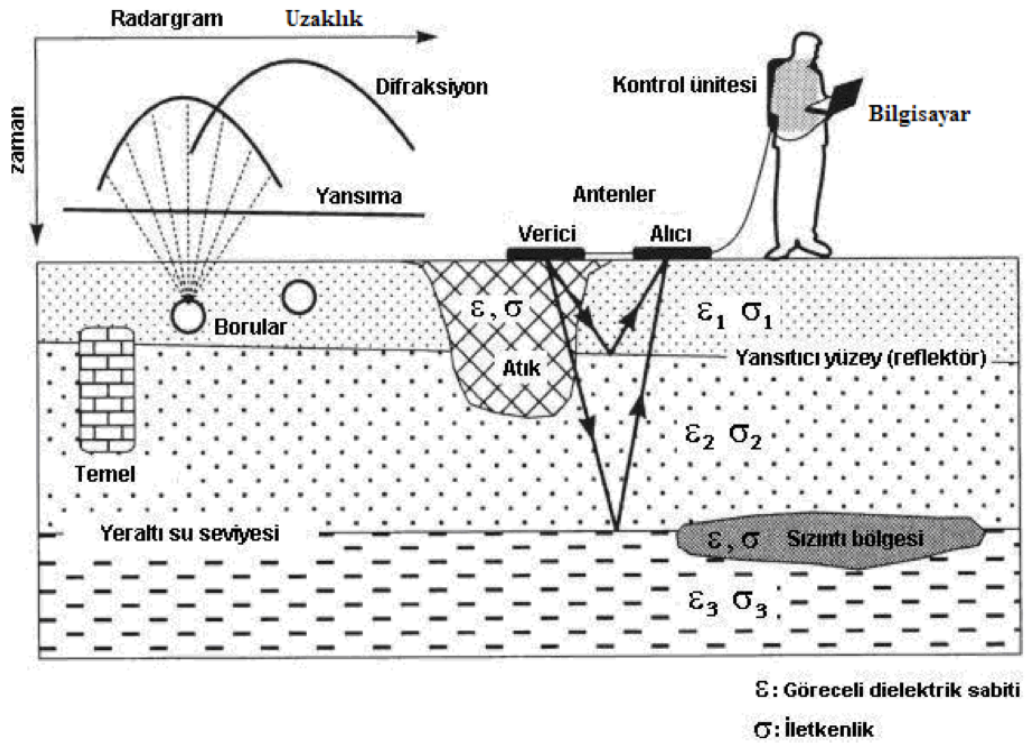
Bu çalışmada iki boyutlu ortamda farklı dielektrik özelliklere sahip yer altı yapılarından FDTD (zaman ortamında sonlu farklar) yöntemi ile teorik radargramlar elde edilmiştir. Elde edilen bu radargramlar sıfır ofset aralığı olan alıcı ve verici anten ile yer yüzeyinde uygulandığı düşünülerek hesaplanmıştır. Farklı geometrik yapıların radargramlar üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu yeraltı yapıları yaklaşık olarak girilen dielektrik katsayısı, manyetik geçirgenlik ve iletkenlik değerleri ile zaman ortamında iki boyutta sonlu farklar yöntemi ile modellenmiştir. Daha sonra göç uygulanan teorik ve gerçek radargramlar ile yeraltı yapılarının belirlenmesi

amaçlanmıştır. Uygulamada teorik radargramların yanı sıra, yapı üzerinde yapılan yer radarı çalışmasından bir radargram ve Mısır'ın Tuna el-Gebel arkeolojik alanında yapılan yer radarı çalışmasına ait senklinale benzer bir radargram modellenmiştir.

2. YER RADARI YÖNTEMİ

2.1. Yöntemin Tanımı

Yer radarı yöntemi bir verici anten yardımıyla yer içine gönderilen yüksek frekanslı elektromanyetik dalgaların yer altındaki farklı elektriksel özelliklere sahip yapılardan yansırarak alıcı anten tarafından kaydedilmesi ilkesine dayanır. Yeraltında her iki tarafı farklı dielektrik özellikte kayalarından oluşan bir ara yüzey varsa, elektromanyetik dalga bu ara yüzeyde yansıma ve iletme uğrayacaktır. Yüksek çözünürlüklü bir yöntem olan yer radarı yöntemi yer altının sığ kesimlerinin araştırılmasında en çok tercih edilen yöntemdir.



Şekil 2.1: Yer radarının çalışma prensipleri (Knödel ve diğ., 1997).

Yöntemde kullanılan verici antenin merkez frekansı 10 MHz ile 2.6 GHz arasında değişmektedir. Yeraltına gönderilen sinyal zamanın fonksiyonu olarak kaydedilir. Sığ derinliklerden yansırarak kaydedilen sinyaller “radargram” olarak adlandırılır.

Bir yer radarı çalışması kavram olarak sismik yansıma çalışması ile benzerdir. Sismik yansıma çalışmasında kullanılan kaynak yer radarında verici antene, jeofonlar ise alıcı antene karşılık gelmektedir. Genel olarak bu iki yöntem yayılan enerjinin türü bakımından birbirinden ayrılır. Sismik yöntemde yayılan akustik dalgaya karşılık yer radarı yönteminde elektromanyetik dalga yayılımı söz konusudur.

Yer radarı yönteminde elektromanyetik dalganın frekansına bağlı olarak yer altındaki cisimlerin derinlikleri ve geometrisi santimetre mertebesine kadar hassas bir şekilde tespit edilebilir. Bu üstün özelliğinden dolayı yer radarı yöntemi son yıllarda sığ çalışmalarda en çok tercih edilen yöntemlerden birisi olmuştur.

2.2. Yer Radarı Kuramı

Yer radarı yönteminin temeli elektromanyetik teoriye dayanır. Bu bölümde elektromanyetik teorinin temeli olan Maxwell denklemleri ile ilgili bilgiler verilecektir. Klasik Maxwell denklemleri aşağıdaki dört temel denklem olarak bilinir.

Amper yasasına göre bir ortamdan akım geçerse mutlaka manyetik alan oluşur.

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.1)$$

Faraday yasasına göre manyetik alanın zamanla değişimi elektrik alan oluşturur.

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.2)$$

Gauss yasası kapalı bir yüzeydeki elektrik alan akısının, bu yüzey tarafından çevrelenmiş olan hacimde bulunan net yük ile orantılı olduğunu ifade eder.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.3)$$

Manyetik alan için Gauss yasasına göre kapalı bir yüzeyden geçen net manyetik akı sıfırdır.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.4)$$

Bunlara ek olarak ortam ve alanlarla ilgili üç bağıntı aşağıdaki gibi verilmektedir;

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.5)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.6)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.7)$$

Bu denklemlerde;

$\vec{H}$ Manyetik alan şiddeti (A/m)

$\vec{E}$ Elektrik alan şiddeti (V/m)

$\vec{B}$ Manyetik akı yoğunluğu (nT)

$\vec{D}$ Elektrik akı yoğunluğu (Coulomb/m²)

$\vec{J}$ Akım yoğunluğu (A/m²)

ρ Serbest elektrik yük yoğunluğu (Coulomb/m³)

ϵ Dielektrik sabiti (Farad/m)

σ İletkenlik (Siemens/m)

μ Manyetik geçirgenliği (Henry/m)

Burada $\vec{\nabla} \times$ ya da curl vektörel çarpımı, $\vec{\nabla} \cdot$ diverjansı göstermektedir. Elektromanyetik yöntemlerde malzemenin fiziksel özellikleri ile ilgili parametreler olan σ , μ , ϵ elektromanyetik dalga yayılımının incelenmesi açısından oldukça önemlidir (Balanis, 1989).

2.2.1. Ortamın iletkenliği

Doğada bulunan malzemeler elektrik akımına (elektronların hareketlerine) karşı koyarlar. Her malzemenin bu karşı koyma direncine özdirenç denir. Kayaçlar ve maddeler için özdirenç değerleri farklılık gösterirler. Aynı kayaçlar farklı fiziksel koşullarda, farklı özdirençler verirler. Bunun nedeni ortamın özdirenç değerinin; formasyon faktörüne (formasyonun çimentolanma ve derecelenme özelliklerine), su doygunluğuna, porozitesine, mineral içeriğine, sıcaklığına bağlı olmasından kaynaklanmaktadır. Özetkenlik ise bir voltaj uygulandığı zaman bir materyalin elektriği geçirme yeteneğine denir. İletkenlik özdirencin tersi ile gösterilir (Öztürk, 1995).

2.2.2. Dielektrik sabiti (Ortamın elektriksel geçirgenliği)

Dielektrik sabiti malzemenin EM dalganın enerjisini elektriksel yük şeklinde depolayabilme ve serbest bırakabilme özelliğidir (Cassidy, 2009). Dielektrik sabiti (ϵ) ortamın elektrik özelliğine bağlı bir katsayı olup;

$$\epsilon = \epsilon_0(1 + \chi_e) \quad (2.8)$$

ile verilir. Burada ϵ malzemenin elektriksel geçirgenliği, ϵ_0 boşluğun elektriksel geçirgenliği ve χ_e ortamın elektrik duyarlılığıdır. Boşluk için $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ F/m, χ_e ise sıfırdır. Malzemenin elektriksel geçirgenliği boşluğun elektriksel geçirgenliğine oranlandığında göreceli dielektrik sabiti değeri;

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (2.9)$$

ile verilir. Bazı malzemeler için göreceli dielektrik sabiti ve iletkenlik değerleri Tablo (2.1) de verilmektedir.

Tablo 2.1: Bazı malzemeler için göreceli dielektrik sabiti ve iletkenlik değerleri (Schön, 1998, Daniels, 1996).

Malzeme	Göreceli Dielektrik Sabiti	İletkenlik (mS/m)
Hava	1	0
Saf su	80	0.01
Deniz suyu	80	3000
Kuru kum	3 - 5	0.01
Suya doymuş kum	20 - 30	0.1 - 1
Kireçtaşı	4 - 8	0.5 - 2
Kil taşı	5- 30	1 - 100
Silt	5 - 30	1 - 100
Kil	5 - 40	2 - 1000
Granit	4 - 6	0.01 - 1
Kuru tuz	5 - 6	0.01 - 1
Buz	3 - 4	0.01

2.2.3. Ortamın manyetik geçirgenliği

Demir ve nikel içeren malzemeler dışında manyetik geçirgenlik değeri μ çok fazla değişim göstermemektedir. Ortamın manyetik geçirgenlik değeri ortamın dielektrik sabitine benzer formüllerle açıklanabilir. Durağan manyetik geçirgenlik;

$$\mu = \mu_0(1 + \chi_m) \quad (2.10)$$

bağıntısı ile verilir. Burada μ malzemenin manyetik geçirgenliği, μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliği, χ_m ortamın manyetik duyarlılığıdır. Boşluk için $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m dir. Malzemenin manyetik geçirgenliği boşluğun manyetik geçirgenliğine oranlandığında göreceli manyetik geçirgenlik değeri;

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (2.11)$$

olmaktadır. Bazı malzemeler için manyetik geçirgenlik değerleri Tablo 2.2 de verilmiştir.

Tablo 2.2: Bazı malzemeler için göreceli manyetik geçirgenlik değerleri (Balanis, 1989).

Malzeme	Göreceli manyetik geçirgenlik
Su	0.9
Boşluk	1
Hava	1.0000004
Kobalt	250
Nikel	600
Demir	5000

2.3. Elektromanyetik Dalgaların Özellikleri

Elektromanyetik dalgalar, ortamın fiziksel özelliklerine bağlı olarak yayılmaktadırlar. Andre Marie Ampere (1775-1836), Michael Faraday (1791-1867) ve Karl Friedrich Gauss (1777-1885)'un yapmış olduğu çalışmalar ışığın elektromanyetik dalga olduğunu ve boşlukta c hızıyla yayıldığını ortaya koymaktadır (Sears ve diğ., 1982).

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (2.12)$$

Burada ϵ_0 boşluğun dielektrik sabiti, μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliği olup $c \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ olarak hesaplanır. Elektromanyetik dalga madde içinde yayılırsa hız;

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} \quad (2.13)$$

olarak verilir. Önceki bölümlerde bahsedildiği üzere ϵ maddenin dielektrik sabitini, μ manyetik geçirgenliği göstermektedir. Maddenin göreceli dielektrik sabiti ϵ_r ve maddenin göreceli manyetik geçirgenliği μ_r olarak tanımlanırsa,

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (2.14)$$

ve

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (2.15)$$

bağıntıları ile hız bağıntısı tekrar yazılırsa malzemenin içinde seyahat eden elektromanyetik dalga hızı;

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}} \quad (2.16)$$

olarak ifade edilebilir. (2.16) bağıntısında belirtildiği üzere elektromanyetik dalga hızı (v), göreceli dielektrik sabiti ve göreceli manyetik geçirgenliğin bir fonksiyonudur.

Elektromanyetik dalga için sönümlenme ve empedans bağıntıları ise aşağıdaki gibi tanımlanır (Annan, 2004) ;

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (2.17)$$

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (2.18)$$

Boşluğun empedansı;

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 377\Omega \quad (2.19)$$

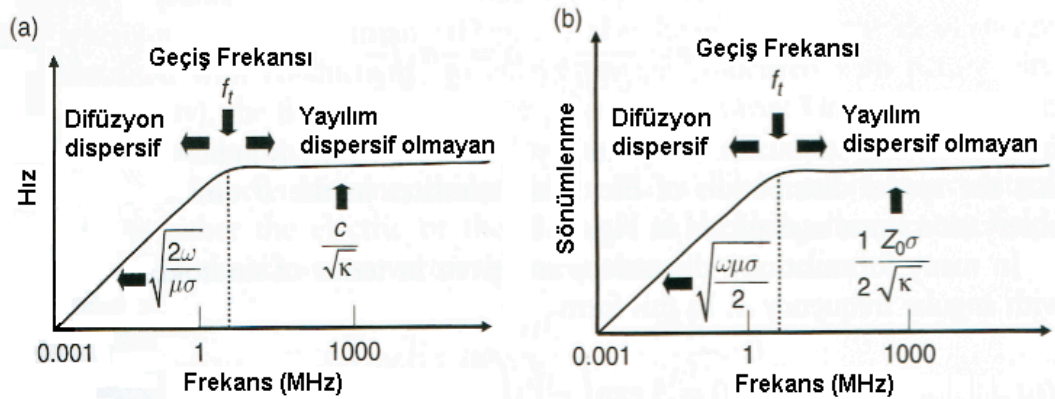
olarak ifade edilir.

Bağıntı 2.16 ve 2.17 dielektrik sabitinin değişimi hızın değişimini etkiliyorken iletkenliğin sönümlenme üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğunu açıklamaktadır. Bu nedenden dolayı yer radarı yöntemi kum ve çakıl karışımı malzeme (göreceli olarak direnç gösterme eğilimde olan) olan bölgelerde iyi sonuçlar vermektedir. Fakat elektriksel olarak iletken kil malzemesinin olduğu bölgelerde yer radarının kullanımı sınırlıdır. %5 - %10 oranında kil içeren malzeme yer radarının nüfuz derinliğini 1 metreden daha aza düşürebilir (Walther ve diğ., 1986; Knight, 2001).

Dielektrik sabiti, iletkenlik ve manyetik geçirgenlik değerlerine sahip herhangi bir ortam için elektromanyetik dalga hızı (v) ve sönümlenme (α) frekansa bağlı olarak değişim gösterir. Düşük frekanslarda dalga özellikleri açısıl frekansa bağlıdır. Elektromanyetik dalga düşük frekanslarda dispersif yayılım göstererek difüzyon hareketi ile ilerler. Yüksek frekanslarda ise dalga özellikleri frekansa bağlıdır ve dispersif olmayan yayılım gösterir. Yüksek frekans davranışı yer radarı yöntemi için en önemli özelliktir (Şekil 2.2).

Dispersif dalga hareketinden dispersif olmayan dalga hareketine geçiş galvanik iletimin baskın olduğu durumdan yer değiştirme akımları ile iletimin baskın olduğu duruma geçtiği frekansta gerçekleşir. Bu frekansa geçiş frekansı f_t denir.

$$f_t = \frac{\sigma}{2\pi\epsilon} \quad (2.20)$$



Şekil 2.2: Hız (a) ve sönümlenme (b) değerlerinin frekansa bağlı olarak değişimi (Annan, 2009).

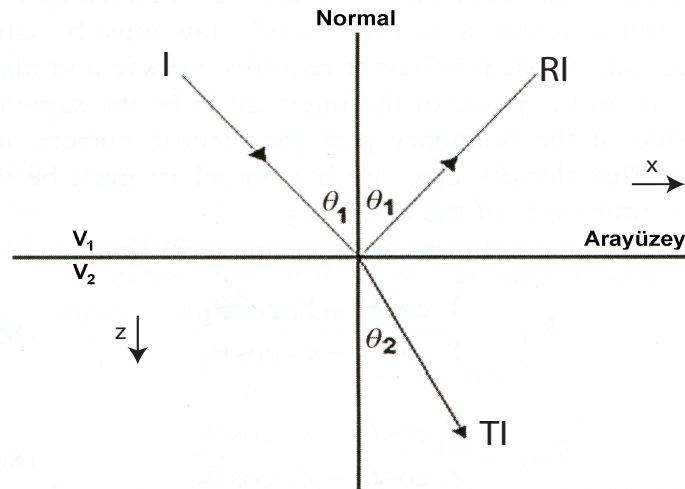
2.4. Elektromanyetik Dalgaların Ara Yüzeylerde Yansıması, Kırılması ve İletimi

Elektromanyetik dalgaların herhangi bir ara yüzdeki davranışı “Snell Kanunu” ile açıklanır. Snell kanununa göre eğer bir dalga iki ortamı ayıran bir sınırdan geçerse yansıyan ve kırılan dalgalar ortaya çıkar. Bu kanun yansıyan ve kırılan ışınların genliği konusunda bilgi vermez fakat yansıyan ve kırılan ışınların normalle olan doğrultularını gösterir. Bu kanun genellikle;

$$\frac{\sin \phi_1}{\sin \phi_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad (2.21)$$

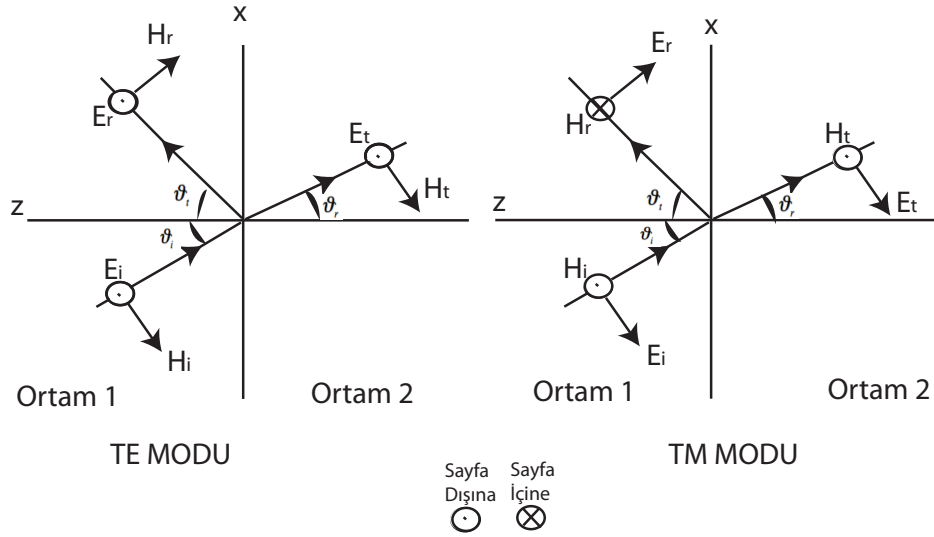
olarak verilir.

Fresnel yansımaları ve iletim katsayıları ile elektromanyetik dalganın genliğinin herhangi bir ara yüzeyde nasıl değiştiği açıklanabilir (Şekil 2.3). Bir elektromanyetik dalga sınıra çarptığında kısmen iletilir kısmen ise yansır. Burada sınıra gelen dalganın genliği I , yansıyan dalga RI , iletilen dalga TI , R ve T yansımaları ve kırılma katsayıları olarak ifade edilir. Bu noktada elektromanyetik dalganın doğası hakkında daha ayrıntılı düşünüldüğünde yayılma doğrultusunda birbirinden bağımsız iki ayrı bileşen vardır (Annan, 2005).



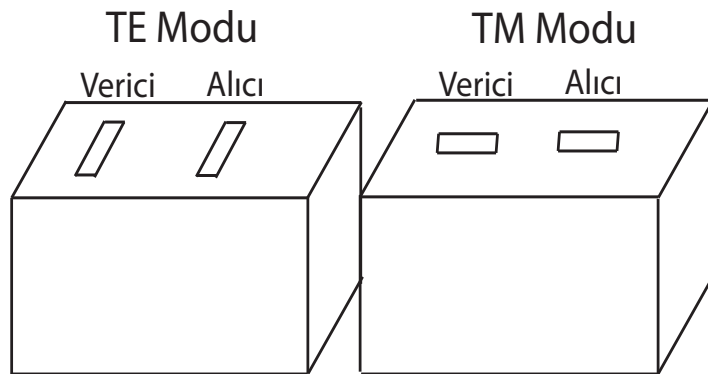
Şekil 2.3: Arayüzeye gelen dalga I ’nın sınıra çarptıktan sonra enerjinin yansıyan ve iletilen dalgalara aktarılması (Annan, 2005).

İki boyutlu ortamda düzlemsel bir ara yüzey olduğunda elektromanyetik dalga alanı iki moda ayrılmaktadır. Bu dalga modları TE (Enine elektrik alan) ve TM (Enine manyetik alan) olarak adlandırılır (Şekil 2.4). TE modunun elektrik alan bileşeni ara yüzeye paralel iken ve TM modunun manyetik alan bileşeni ara yüzeye paraleldir.



Şekil 2.4: TE ve TM bileşenlerinin arayüzeyde yansıması ve iletimi (E:Elektrik alan vektörü, H:Manyetik alan vektörü) (Balanis, 1989).

Elektromanyetik dalga alanının TE ve TM olarak iki moda ayrılarak incelenmesi tamamen anten geometrisinden kaynaklanmaktadır. Eğer alıcı ve verici antenlerin yönü profil doğrultusu ile aynı ise TM modu, profil yönüne dik ise TE modu söz konusudur (Şekil 2.5).



Şekil 2.5: Anten durumlarına göre TE ve TM modları (van der Kruk ve diğ., 2006).

Alan TE ve TM bileşenlerine ayrıldığında yansıma ve kırılma katsayıları TE modu için;

$$T = \frac{E_r}{E_i} = \frac{Z_2 \cos \vartheta_i - Z_1 \cos \vartheta_t}{Z_2 \cos \vartheta_i + Z_1 \cos \vartheta_t} \quad (2.22)$$

$$R = \frac{E_t}{E_i} = \frac{2Z_2 \cos \vartheta_i}{Z_2 \cos \vartheta_i + Z_1 \cos \vartheta_t} \quad (2.23)$$

$$1 + T = R \quad (2.24)$$

TM Modu için;

$$T = \frac{E_r}{E_i} = \frac{Z_2 \cos \vartheta_t - Z_1 \cos \vartheta_i}{Z_2 \cos \vartheta_t + Z_1 \cos \vartheta_i} \quad (2.25)$$

$$R = \frac{E_t}{E_i} = \frac{2Z_2 \cos \vartheta_i}{Z_2 \cos \vartheta_i + Z_1 \cos \vartheta_t} \quad (2.26)$$

$$1 + T = R \frac{\cos \vartheta_t}{\cos \vartheta_i} \quad (2.27)$$

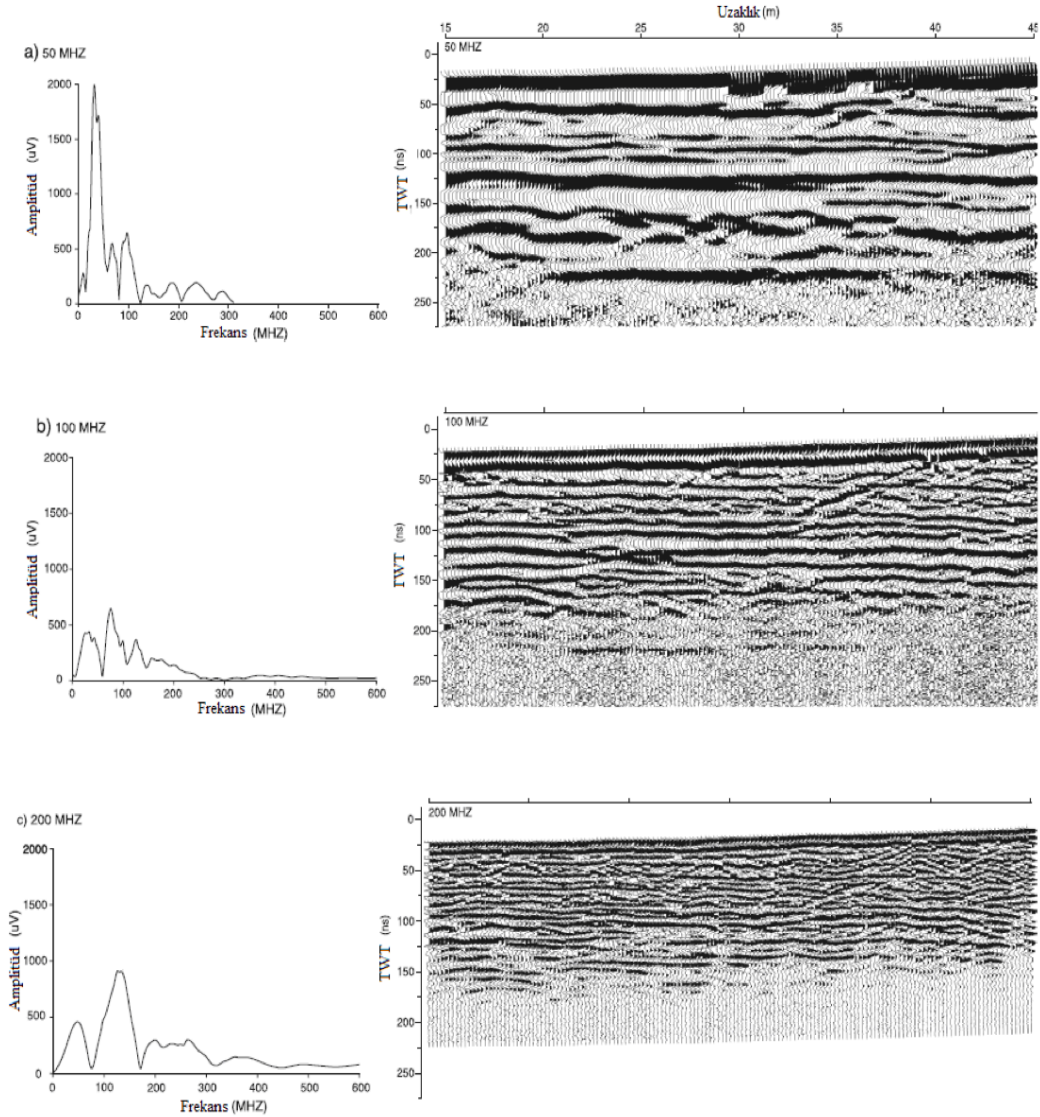
olarak verilir (Balanis, 1989). Burada Z_i i'inci tabaka için elektromanyetik empedansları belirtmektedir. Bu duruma göre yansıma katsayılarının değeri negatif veya pozitif olabilir. Burada enerjinin korunumu sağlanmıyormuş gibi görünse de aslında enerji korunur. Bu durum “Poynting Teoremi” ile açıklanabilir (Sadiku, 1995). Bu konu ile ilgili detaylı bilgi ve sayısal örnek için EK-1’e bakınız.

2.5. Yatay ve Düşey Ayrımlılık

Düşey ayrımlılık değeri genel olarak dalga boyunun dörtte biri olarak kabul edilir. Dalga boyu antenin merkez frekansından ve ortamın hızından yararlanılarak bulunur.

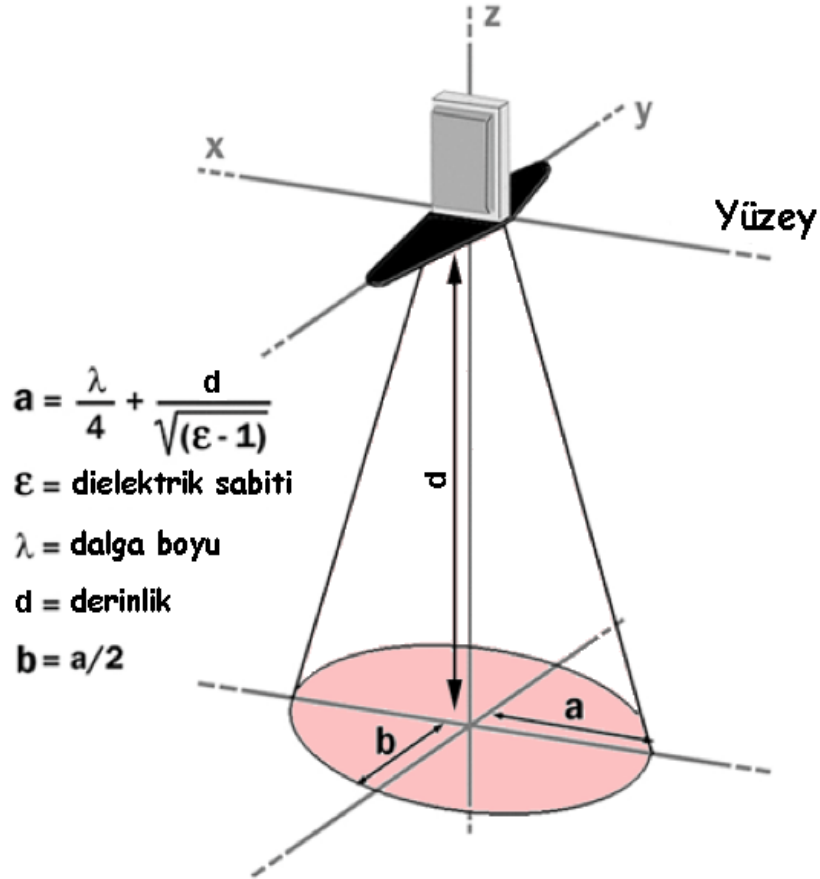
Düşük frekanslı antenlerin yaydıkları sinyal geniş dalga boyludur. Verici antenin merkez frekansı azaldıkça düşey ayrımlılık azalmaktadır. Fakat nüfuz derinliği artmaktadır (Şekil 2.6). Düşük frekanslı anten ile yapılan çalışmalarda ince tabakalar radargramlarda görünmeyebilir.

Düşük frekanslı anten ile elde edilen radargram ile daha derinden bilgi alınmasına rağmen ayrımlılık düştüğünden yuvarlatma etkisi açıkça görülebilmektedir. İkinci radargramda ise çözünürlük ilk radargrama göre artmaktadır. Fakat derinden gelen yansımaların enerjilerini kaybettiği görülür. Kullanılan yüksek frekanslı anten ile üçüncü radargramda yüzeye yakın saçılmalar daha belirgin bir şekilde görülebilmektedir.



Şekil 2.6: Frekans ile düşey ayrımlılık arasındaki ilişki a) 50 MHz, b) 100 MHz, c) 200MHz (Neal, 2004).

Yatay ayrırlılık değeri ise izler arasındaki mesafe ve Fresnel zonu büyüklüğü ile kontrol edilir (Şekil 2.7). Geniş Fresnel zonu düşük yatay ayrırlılık demektir. Buna göre bir olayın en az iki noktada örnekleme gerektiği dikkate alındığında, profil üzerinde ölçüm alınırken seçilen ölçüm aralığı dalga boyunun yarısından daha küçük olmalıdır. İdeal olarak ölçüm aralığı dalga boyunun dörtte biri kadar olmalıdır.



Şekil 2.7: Fresnel zonu ve yatay ayrırlılık (Mala Geoscience, 2003).

2.6. Uygun Anten Seçimi

Yer radarı uygulamalarında doğru sonuca ulaşabilmede en önemli etkenlerden biri sorunun çözümüne uygun anten kullanmaktır. Bu nedenle ilgilenilen yapının çözünürlüğü ve araştırılması hedeflenen derinlik göz önüne alınırken anten frekansının seçimine özen gösterilmelidir. Yeraltına gönderilen dalganın nüfuz derinliği verici antenin merkez frekansına bağlı olsa da ortamın dielektrik sabiti, iletkenliği ve manyetik geçirgenliğine göre de değişim göstereceğinden frekans

değerini tahmin etmek kolay değildir. Ortamın nem içeriği ve gözenekliliği de bu değişimi etkileyecektir.

Tablo 2.3: Anten merkez frekansı ile maksimum nüfuz derinliği arasındaki ilişki (Mala Geoscience, 2003).

Merkez Frekans (MHz)	Derinlik (m)
1000	1.5
500	6
200	12
100	25
50	40
25	50
10	60

Tablo 2.3'te anten merkez frekansına bağlı olarak verilen araştırma derinliği değerleri yapılan arazi çalışmalarında elde edilen deneyimsel bilgiler kaynaklıdır. Yer altının tekdüze olmamasından dolayı bu bilgiler sadece yapılacak yer radarı çalışması öncesinde anten seçimi için kabaca fikir vermektedir.

Yer radarı çalışmasına başlamadan önce yapılması gereken bir başka seçim örnekleme aralığıdır. Örnekleme aralığı kayıttaki en yüksek frekanslı dalgacığın periyodunun en fazla yarısı kadar olmalıdır. Örnekleme aralığı ile merkez frekans arasındaki ilişki;

$$t = \frac{1000}{6f_c} \quad (2.28)$$

olarak verilir. Burada f_c MHz mertebesinde merkez frekansı belirtmektedir. t ise nanosaniye mertebesinde.

Tablo 2.4: Anten merkez frekansı ile maksimum örnekleme aralığı arasındaki ilişki (Sensors and Softwares, 1999).

Merkez Frekans (MHz)	Maksimum Örnekleme Aralığı (ns)
10	16.7
20	8.3
50	3.3
100	1.67
200	0.83
500	0.33
1000	0.17

Eğer zaman aralığı büyük alınırsa zaman kesintilerinde yeterince ayrımlılığa sahip olmayan ve yuvarlatılmış görüntüler elde edilecektir. Örnekleme aralığının sık olması yapının yerinin belirlenmesinde önemli bir etkidir. Örnekleme aralığının sık alınmasının veriye hiç bir zararı olmaz fakat gereğinden fazla sıklıkta yapılan örnekleme veri işlem sırasında bilgisayarın performansının düşmesine neden olur. Bu nedenden dolayı uygun bir örnekleme aralığının seçimi önem taşımaktadır.

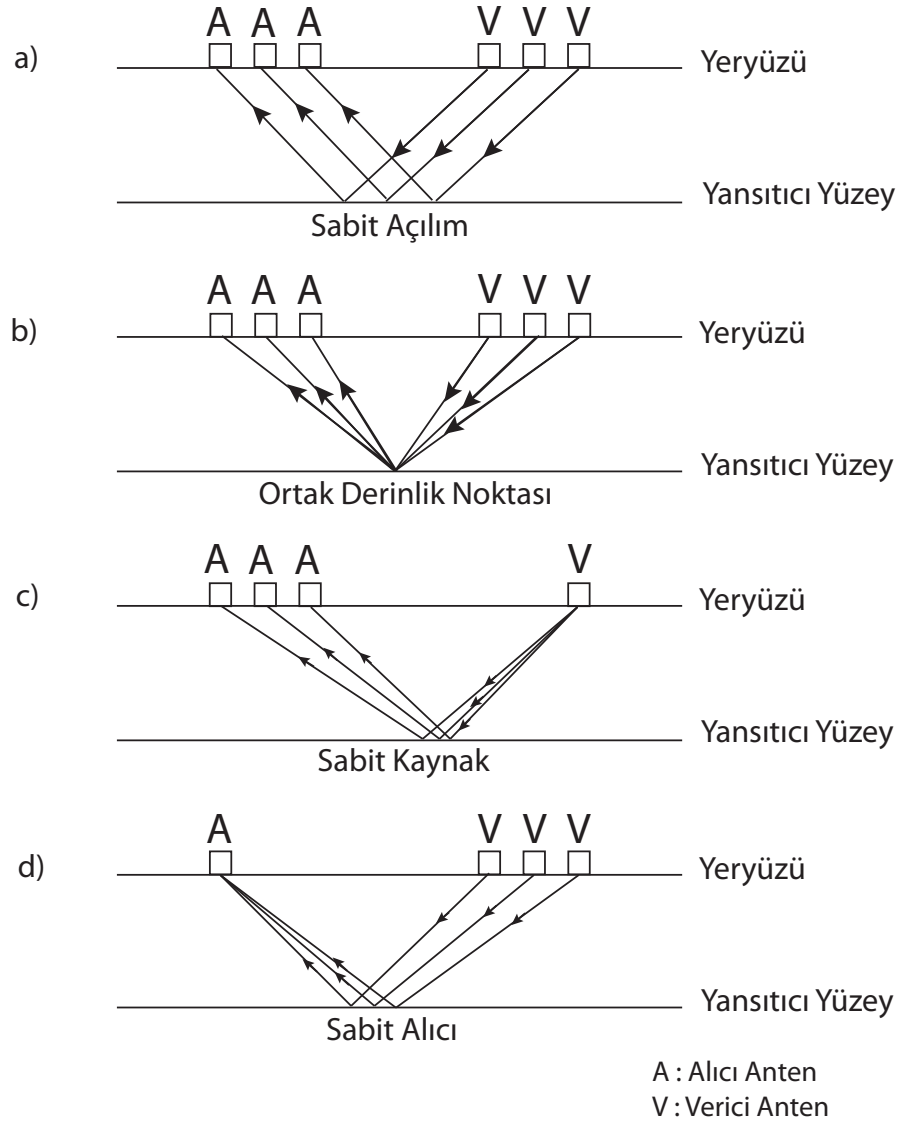
2.7. Anten Dizilimleri

Yer radarı yönteminde farklı uygulamalar için çeşitli anten dizilimleri kullanılmaktadır. Birbirlerine belirli bir mesafede tutulan alıcı ve verici antenler araştırma doğrultusu üzerinde ilerletilir. Çoğu zaman yer radarı çalışmalarında sabit anten aralığı kullanılır ve bu dizilim sabit açılım (Common Offset) olarak adlandırılır. Bunun dışında sıklıkla kullanılan bir diğer anten dizilimi ise ortak derinlik noktası (Common Mid Point) dizilimidir. Ortak derinlik noktası ölçümü genellikle hız ölçümleri için tercih edilir. Verici antenin sabit tutulup alıcı antenin ilerletildiği sabit kaynak (Common Source), alıcı antenin sabit tutulup kaynağın ilerletildiği sabit alıcı (Common Receiver) dizilimleri ender kullanılan anten dizilimleridir (Şekil 2.8).

Ortak derinlik noktası dizilimi ile hız tespitini olabildiğince doğru yapabilmek için ölçüm arazinin birkaç farklı yerinde yapılmalıdır. Elde edilen hız değerleri ile

araştırılan yapı veya objenin derinliği tespit edilebilmektedir. Kazı ve sondaj çalışmaları bu tespitlere göre yapılmaktadır.

Bu çalışmada hesaplanan teorik radargramlar sabit açılım uygulandığı varsayılarak hesaplanmıştır.



Şekil 2.8: Yer radarı ölçümlerinde kullanılan çeşitli anten dizilimleri. a) Sabit açılım, b) Ortak derinlik noktası, c) Sabit kaynak, d) Sabit alıcı (Daniels, 1996).

3. ZAMAN ORTAMINDA ELEKTRİK VE MANYETİK ALAN DALGA DENKLEMLERİ

Bu bölümde elektromanyetik yöntemlerde kullanılan dalga denklemleri elde edilecektir. Bu denklemleri oluşturabilmek için daha önce bahsedilmiş olan Maxwell denklemlerinden faydalanılır.

3.1. Elektrik Alan Dalga Denklemi

Elektrik alan denklemini elde etmek için (2.2) denkleminin her iki tarafının rotasyonali alınırsa,

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \vec{\nabla} \times \vec{B} \quad (3.1)$$

olarak yazılır ve $\vec{B} = \mu \vec{H}$ eşitliğine göre yeniden düzenlenirse;

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial}{\partial t} \vec{\nabla} \times \vec{H} \quad (3.2)$$

elde edilir. (2.1) denkleminin her iki tarafı $-\mu$ ile çarpılıp yeniden düzenlenirse;

$$-\mu \vec{\nabla} \times \vec{H} = -\mu \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \quad (3.3)$$

olarak yazılır. $\vec{J} = \sigma \vec{E}$ ve $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$ eşitliklerine göre (3.3) denklemi yeniden düzenlenirse;

$$-\mu \vec{\nabla} \times \vec{H} = -\mu \left(\sigma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \quad (3.4)$$

olarak yazılır. (3.4) denkleminin her iki tarafının zamana göre türevi alınır;

$$-\mu \frac{\partial}{\partial t} \vec{\nabla}_x \vec{H} = -\mu \left(\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \right) \quad (3.5)$$

elde edilir. Bu işlemlerden sonra (3.2) denkleminin sağ tarafı ile (3.5) denkleminin sol tarafının aynı olduğu görülür. Bu nedenle;

$$\vec{\nabla}_x \vec{\nabla}_x \vec{E} = -\mu \left(\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \right) \quad (3.6)$$

olarak yazılabilir. Herhangi bir vektör için aşağıdaki özellik geçerlidir.

$$\vec{\nabla}_x \vec{\nabla}_x \vec{A} = \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{A}) - \vec{\nabla}^2 \vec{A} \quad (3.7)$$

Burada A herhangi bir vektörü ifade etmektedir. (3.6) denkleminde A yerine E bulunmaktadır. Bu özelliğe göre (3.6) denklemini (3.7) denklemine göre yazarsak;

$$\vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) - \vec{\nabla}^2 \vec{E} = -\mu \left(\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \right) \quad (3.8)$$

elde edilir. $\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho$ eşitliğinden yola çıkarak $\varepsilon \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \rho$ şeklinde yazılabilir. Burada ρ yük yoğunluğunu ifade etmektedir. Yük yoğunluğu sıfırdan farklı iletkenliğe sahip ortamlarda çok kısa süre içinde dağılacığından $\varepsilon \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0$ şeklinde yazılabilir. Son durumu da göz önüne aldığımızda denklem

$$-\vec{\nabla}^2 \vec{E} = -\mu \left(\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \right) \quad (3.9)$$

olarak yazılır ve düzenlenirse,

$$\vec{\nabla}^2 \vec{E} = \mu \left(\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \right) \quad (3.10)$$

şeklini alır (Balanis 1989, Sadiku 1992).

3.2. Manyetik Alan Dalga Denklemi

Manyetik alan dalga denklemide elektrik alan denklemine benzer şekilde elde edilir. Manyetik alan dalga denklemini elde etmek için (2.1) denklemi, $\vec{J} = \sigma \vec{E}$ ve $\vec{D} = \varepsilon \vec{E}$ denklemlerine göre yeniden yazılırsa;

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (3.11)$$

olarak elde edilir. (3.11) denkleminin her iki tarafının rotasyoneli alınır;

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{H} = \sigma \vec{\nabla} \times \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \vec{\nabla} \times \vec{E} \quad (3.12)$$

olarak yazılır. $\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ eşitliğine göre denklem yeniden düzenlenirse;

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{H} = -\sigma \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad (3.13)$$

elde edilir. $\vec{B} = \mu \vec{H}$ eşitliğine göre denklem yeniden düzenlenirse;

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{H} = -\mu \left(\sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \right) \quad (3.14)$$

olarak yazılır. (3.7)' deki vektör özelliğine göre zaman ortamında manyetik alan dalga denklemi;

$$\vec{\nabla}^2 \vec{H} = \mu \left(\sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \right) \quad (3.15)$$

elde edilir (Balanis 1989, Sadiku 1992).

Elde edilen manyetik ve elektrik alan dalga denklemleri için yüksek frekanslarda, elektrik alan dalga denklemi

$$\vec{\nabla}^2 \vec{E} = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (3.16)$$

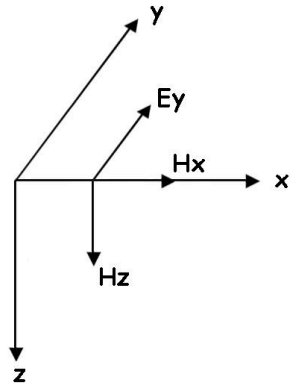
ve manyetik alan dalga denklemi

$$\vec{\nabla}^2 \vec{H} = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (3.17)$$

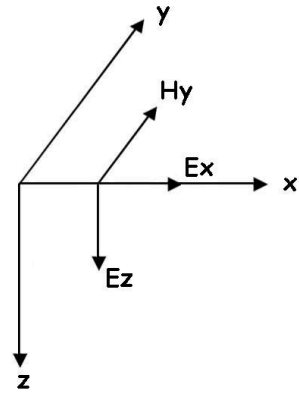
olarak yazılır. Bu denklemler yüksek frekanslarda, yaklaşık olarak 100 kHz' ten büyük değerler için kullanılan denklemlerdir. Yer radarı yönteminde kullanılan denklemler de bu denklemlerdir.

3.3. TE ve TM Modları İçin Elektrik ve Manyetik Alan Denklemleri

TE (Enine Elektrik Alan) ve TM (Enine Manyetik Alan) modları ile ilgili bilgiler önceki bölümlerde verilmişti. Elektromanyetik dalga yayılım doğrultusuna göre TE ve TM modlarına ayrılarak incelenmelidir. Düzlemsel tabaka sınırlarında birbirinden bağımsız iki farklı elektromanyetik alan vardır. Elektrik alan vektörü tabaka düzleminde olduğu zaman TE modu, manyetik alan vektörü tabaka düzleminde olduğu zaman ise TM modu söz konusudur (Annan, 2009). TE modunda birbirine dik iki manyetik alan bileşeni ve bu manyetik alan bileşenlerine dik bir elektrik alan bileşeni, TM modunda ise birbirine dik iki elektrik alan bileşeni ve bu elektrik alan bileşenlerine dik bir manyetik alan bileşeni söz konusudur.



(a)



(b)

Şekil 3.1: a) TE modu ve b) TM modu için EM alan bileşenleri.

3.3.1. TE modu için alan denklemleri

TE modunda x ve z yönünde zamanla değişen manyetik alan ve manyetik alana bağımlı olarak oluşan elektrik alan vardır (Şekil 3.1). x ve z yönündeki elektrik alan ve y yönündeki manyetik alan bileşenleri sıfır kabul edilir. Bu duruma göre;

$$H_z \neq H_x \neq E_y \neq 0 \quad (3.18)$$

ve

$$H_y = E_x = E_z = 0 \quad (3.19)$$

olarak ifade edilir (Irving and Knight, 2006). Bu durumda TE modu için elektrik ve manyetik alan denklemleri;

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = \mu \frac{\partial H_z}{\partial t} \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial z} = -\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} \quad (3.21)$$

$$\sigma E_y + \varepsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial z} \quad (3.22)$$

olarak yazılır.

3.3.2. TM modu için alan denklemleri

TM modunda x ve z yönünde zamanla değişen elektrik alan ve elektrik alana bağlı olarak değişen bir manyetik alan vardır (Şekil 3.1). x ve z yönündeki manyetik alan ve y yönündeki elektrik alan bileşenleri sıfır kabul edilir. Bu duruma göre;

$$H_y \neq E_x \neq E_z \neq 0 \quad (3.23)$$

ve

$$H_x = H_z = E_y = 0 \quad (3.24)$$

olarak ifade edilir (Irving and Knight, 2006). Bu durumda TM modu için manyetik ve elektrik alan denklemleri;

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} = -\varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} - \sigma E_z \quad (3.25)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial z} = \varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} + \sigma E_x \quad (3.26)$$

$$\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (3.27)$$

olarak yazılır.

4. SONLU FARKLAR YÖNTEMİNDE MAXWELL DENKLEMLERİ

4.1. Sonlu Farklar Yöntemi

Matematiksel bir ifade olan “sonlu fark” türev işlemini ifade etmektedir. Sonlu farklar yöntemi sayısal türev alma işlemidir. Sonlu fark denklemlerini elde etmek için Taylor serisinden faydalanılır. Taylor serisi;

$$f(a) = f(x) + f'(x)(a-x) + f''(x)(a-x)^2 \frac{1}{2!} + f'''(x)(a-x)^3 \frac{1}{3!} + 0(\delta^4) \quad (4.1)$$

olarak tanımlanır. Denklemden de görüldüğü üzere türevin derecesi arttıkça değer düşmekte ve ihmal edilmektedir. (4.1) bağıntısında x yerine x_i ve a yerine x_{i+1} yazılırsa;

$$f(x_{i+1}) = f(x_i) + f'(x_i)(x_{i+1} - x_i) + f''(x_i)(x_{i+1} - x_i)^2 \frac{1}{2!} + f'''(x_i)(x_{i+1} - x_i)^3 \frac{1}{3!} + 0(\delta^4) \quad (4.2)$$

elde edilir. Denklem birinci türeve göre düzenlenip yeniden yazılırsa;

$$f'(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{x_{i+1} - x_i} - \frac{1}{2}(x_{i+1} - x_i)f''(x_i) - \frac{1}{6}(x_{i+1} - x_i)^2 f'''(x_i) - 0(\delta^3) \quad (4.3)$$

ileri fark denklemi yazılmış olur. Burada üçüncü türevden sonraki değerler ihmal edildiğinden dolayı bu denklem üçüncü dereceden ileri fark denklemi olarak tanımlanır. $0(\delta^3)$ hatanın derecesini ifade etmektedir. δ değeri fark aralığını yani $x_{i+1} - x_i$ 'i tanımlamaktadır. Benzer şekilde (4.1) bağıntısında x yerine x_i ve a yerine x_{i-1} yazılıp denklem birinci türeve göre yeniden düzenlenirse

$$f'(x_i) = \frac{f(x_i) - f(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}} - \frac{1}{2}(x_i - x_{i-1})f''(x_i) - \frac{1}{6}(x_i - x_{i-1})^2 f'''(x_i) - O(\delta^3) \quad (4.4)$$

geri fark denklemi yazılmış olur. İkinci dereceden ileri fark denklemi;

$$f'(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{x_{i+1} - x_i} - O(\delta^2) \quad (4.5)$$

ve ikinci dereceden geri fark denklemi;

$$f'(x_i) = \frac{f(x_i) - f(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}} - O(\delta^2) \quad (4.6)$$

olarak verilir.

Burada (4.6) denklemi (-) ile çapılıp ileri ve geri fark denklemleri alt alta toplanarak merkezi fark denklemi elde edilir. Buna göre ikinci dereceden merkezi fark denklemi;

$$f'(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_{i-1})}{x_{i+1} - x_{i-1}} \quad (4.7)$$

olarak hesaplanır (Forsythe, 1960).

4.2. Maxwell Denklemlerinin Sonlu Farklar Yöntemine Göre Yazılması

Bu çalışmada elektrik ve manyetik alanların türevleri hem zaman hem de konum aralıkları için hesaplanmıştır. Zaman türevleri ikinci dereceden, konum türevleri ise dördüncü dereceden hata ile hesaplanmıştır. Buna göre zaman türevi için ikinci dereceden merkezi fark denklemi;

$$f'(t_i) = \frac{f(t_{i+1}) - f(t_{i-1}))}{\Delta t} \quad (4.8)$$

ve dördüncü dereceden merkezi fark denklemi;

$$f'(x_i) = \frac{-f(x_{i+2}) + 27f(x_{i+1}) - 27f(x_{i-1}) + f(x_{i-2})}{24\Delta x} \quad (4.9)$$

olarak yazılır.

Maxwell denklemleri ilk olarak Yee (1966) tarafından sonlu farklar yöntemine atanmıştır. Bu bölümde ilk olarak konunun açıklanması amacıyla bir boyutta ve daha sonra da bu çalışmanın yapıldığı iki boyutta Maxwell denklemleri sonlu farklar yöntemine göre hesaplanacaktır.

4.2.1. Bir boyutta Maxwell denklemleri

Bir boyutta elektromanyetik dalga yayılımı söz konusu ise bir yönde elektrik alan vektörü ve bu alana dik yönde manyetik alan vektörü vardır. Dalganın ilerleme doğrultusu ise her iki alanın yönüne dik yöndedir. x yönünde elektrik alan, y yönünde manyetik alan söz konusu ise E_x bileşeni ve H_y bileşeni vardır. E_y ve H_x bileşenleri ise o yönlerde değişim olmadığından dolayı sıfır kabul edilir. Buna göre Maxwell denklemleri sonlu farklarda aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\frac{\partial H_y}{\partial z} = -\epsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} - \sigma E_x \quad (4.10)$$

denklemleri zaman ve konum değerleri eklenerek ifade edilirse;

$$\frac{\partial H_y^{n+1/2}(k)}{\partial z} = -\epsilon(k) \frac{\partial E_x^{n+1/2}(k)}{\partial t} - \sigma(k) E_x^{n+1/2}(k) \quad (4.11)$$

olur. Burada n zaman, k ise konumdur. Bu denklemdeki elektrik alan ve manyetik alan bileşenlerine ikinci dereceden merkezi fark yaklaşımı uygulanırsa;

$$\frac{\partial H_y^{n+1/2}}{\partial z} = \frac{1}{\Delta z} [H_y^{n+1/2}(k+1/2) - H_y^{n+1/2}(k-1/2)] \quad (4.12)$$

$$\frac{\partial E_x^{n+1/2}(k)}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} [E_x^{n+1}(k) - E_x^n(k)] \quad (4.13)$$

$$E_x^{n+1/2}(k) = \left[\frac{E_x^{n+1}(k) + E_x^n(k)}{2} \right] \quad (4.14)$$

denklemleri elde edilir. Bu denklemler (4.11) bağıntısında yerlerine yazıldığında;

$$\begin{aligned} E_x^{n+1}(k) &= \frac{2\varepsilon(k) - \sigma(k)\Delta t}{2\varepsilon(k) + \sigma(k)\Delta t} E_x^n(k) \\ &- \frac{2\Delta t}{(2\varepsilon(k) + \sigma(k)\Delta t)\Delta z} [H_y^{n+1/2}(k+1/2) - H_y^{n+1/2}(k-1/2)] \end{aligned} \quad (4.15)$$

hesaplanması gereken elektrik alan bileşeni elde edilmiş olur (Kurt, 2009).

(4.15) eşitliğinden de görüldüğü üzere elektrik alanın $n+1$ ' inci zamandaki değerini ($E_x^{n+1}(k)$) hesaplayabilmek için kendinden bir önceki zamandaki elektrik alan değerine ve $(k+1/2)$ ve $(k-1/2)$ konumlarındaki manyetik alan değerlerine ihtiyaç vardır. Benzer şekilde bir sonraki zamandaki manyetik alan değerini elde etmek için

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} = -\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} \quad (4.16)$$

Maxwell denklemi zaman ve konum değerleri eklenerek düzenlenirse;

$$\frac{\partial E_x^n(k+1/2)}{\partial z} = -\mu(k+1/2) \frac{\partial H_y^n(k+1/2)}{\partial t} \quad (4.17)$$

Bu denklemdeki elektrik alan ve manyetik alan bileşenlerine ikinci dereceden merkezi fark yaklaşımı uygulanırsa;

$$\frac{\partial E_x^n(k+1/2)}{\partial z} = \frac{1}{\Delta z} [E_x^n(k+1) - E_x^n(k)] \quad (4.18)$$

$$\frac{H_y^n(k+1/2)}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} [H_y^{n+1/2}(k+1/2) - H_y^{n-1/2}(k+1/2)] \quad (4.19)$$

denklemleri elde edilir. Bu denklemler (4.17) eşitliğinde yerine yazıldığında;

$$H_y^{n+1/2}(k+1/2) = H_y^{n-1/2}(k+1/2) - \frac{\Delta t}{\mu(k)\Delta z} [E_x^n(k+1) - E_x^n(k)] \quad (4.20)$$

hesaplanması gereken manyetik alan bileşeni elde edilir (Kurt, 2009).

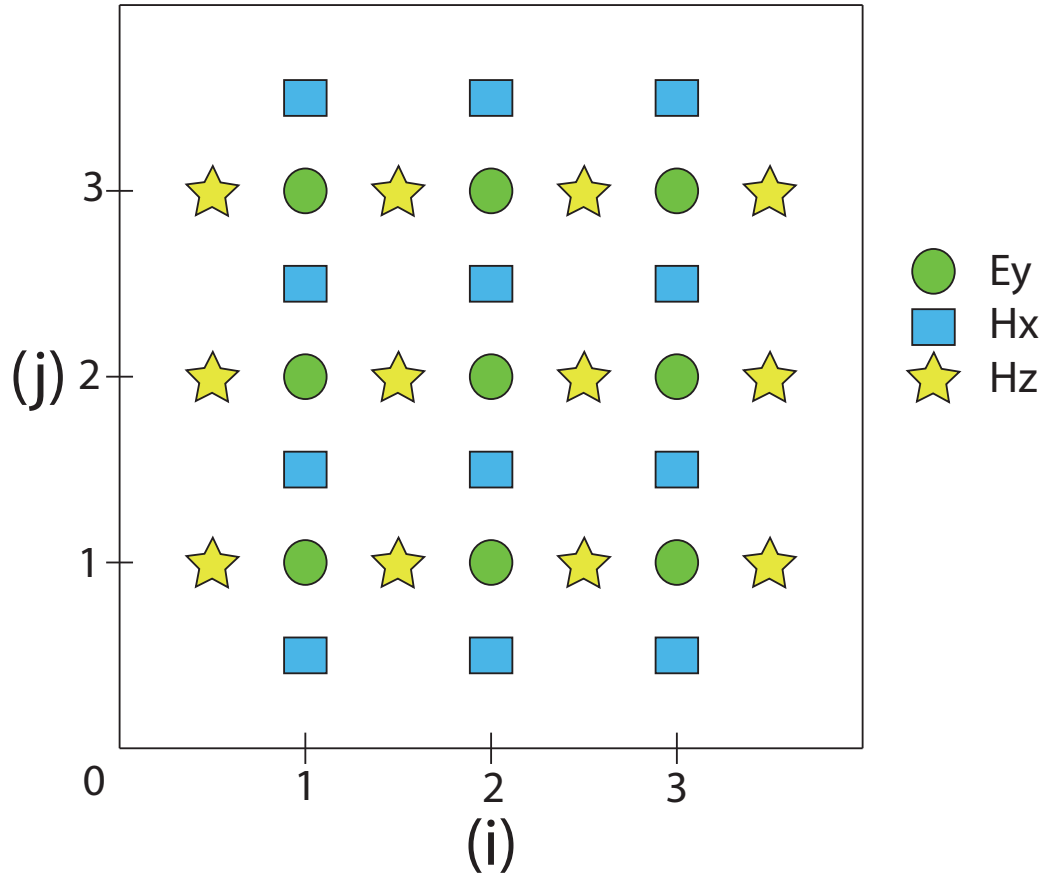
(4.20) eşitliğinde de görüldüğü gibi manyetik alanın $n+1/2$ ' nci zamandaki değerini ($H_y^{n+1/2}(k+1/2)$) hesaplayabilmek için kendinden bir önceki zamandaki manyetik alan değerine, $k+1$ ve k konumundaki elektrik alan değerine ihtiyaç vardır.

4.2.2. İki boyutta Maxwell denklemleri

Yer radarı yönteminde iki boyutlu ortam düşünüldüğünde antenlerin konumlarına göre TE ve TM modlarının varlığından bahsedilmiştir. Bu bölümde TE ve TM modları için Maxwell denklemleri sonlu farklar ile ifade edilecektir.

4.2.2.1. TE modu

TE modunda elektrik ve manyetik alanın E_y , H_x ve H_z bileşenlerinin değişmekte olan bileşenler olduğu önceki bölümlerde açıklanmıştır. TE modu için aşağıdaki grafikte gösterilen sonlu farklar ağına göre bu bileşenler hesaplanır.



Şekil 4.1: TE modundaki elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin model ağı.

Elektrik alanın x yönündeki değişimi için Maxwell denklemi sonlu farklarda;

$$\frac{\partial E_y^n(i+1/2, j)}{\partial x} = \mu(i+1/2, j) \frac{\partial H_z^n(i+1/2, j)}{\partial t} \quad (4.21)$$

olarak ifade edilir. Burada i ve j konumu, n zamanı ifade etmektedir. Bu denklemdeki elektrik alan ve manyetik alan bileşenlerine ikinci dereceden merkezi fark yaklaşımı uygulanırsa;

$$\frac{\partial E_y^n(i+1/2, j)}{\partial x} = \frac{1}{\Delta x} [E_y^n(i+1, j) - E_y^n(i, j)] \quad (4.22)$$

$$\frac{\partial H_z^n(i+1/2, j)}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} [H_z^{n+1/2}(i+1/2, j) - H_z^{n-1/2}(i+1/2, j)] \quad (4.23)$$

denklemleri elde edilir. Bu denklemler (4.21) denkleminde yerlerine yazılırsa;

$$\frac{[E_y^n(i+1, j) - E_y^n(i, j)]}{\Delta x} = \frac{\mu(i+1/2, j)}{\Delta t} [H_z^{n+1/2}(i+1/2, j) - H_z^{n-1/2}(i+1/2, j)] \quad (4.24)$$

elde edilir. Buradan $n+1/2$ 'nci zamandaki z yönündeki manyetik alan bileşeni ;

$$H_z^{n+1/2}(i+1/2, j) = H_z^{n-1/2}(i+1/2, j) + \frac{\Delta t}{\mu(i+1/2, j)\Delta x} [E_y^n(i+1, j) - E_y^n(i, j)] \quad (4.25)$$

olarak yazılır (Maloney, 1992, Kurt, 2009).

Elektrik alanın z yönündeki değişimi için Maxwell denklemi sonlu farklarda;

$$\frac{\partial E_y^n(i+1/2, j)}{\partial z} = -\mu(i+1/2, j) \frac{\partial H_x^n(i+1/2, j)}{\partial t} \quad (4.26)$$

olarak ifade edilir. Bu denklemdeki elektrik ve manyetik alan bileşenlerine ikinci dereceden merkezi fark yaklaşımı uygulanırsa;

$$\frac{\partial E_y^n(i, j+1/2)}{\partial z} = \frac{1}{\Delta z} [E_y^n(i, j+1) - E_y^n(i, j)] \quad (4.27)$$

$$\frac{\partial H_x^n(i, j+1/2)}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} [H_x^{n+1/2}(i, j+1/2) - H_x^{n-1/2}(i, j+1/2)] \quad (4.28)$$

denklemleri elde edilir. Bu denklemler (4.26) denkleminde yerlerine yazılırsa;

$$\frac{[E_y^n(i, j+1) - E_y^n(i, j)]}{\Delta z} = -\frac{\mu(i, j+1/2)}{\Delta t} [H_x^{n+1/2}(i, j+1/2) - H_x^{n-1/2}(i, j+1/2)] \quad (4.29)$$

elde edilir. Buradan $n+1/2$ 'nci zamanda x yönündeki manyetik alan bileşeni;

$$H_x^{n+1/2}(i, j+1/2) = H_x^{n-1/2}(i, j+1/2) + \frac{\Delta t}{\mu(i, j+1/2)\Delta z} [E_y^n(i, j+1) - E_y^n(i, j)] \quad (4.30)$$

olarak ifade edilir (Maloney, 1992, Kurt, 2009).

Manyetik alanın x ve z yönündeki değişimi için Maxwell denklemi sonlu farklarda;

$$\sigma(i, j)E_y^{n+1/2}(i, j) + \varepsilon(i, j) \frac{\partial E_y^{n+1/2}(i, j)}{\partial t} = \frac{\partial H_z^{n+1/2}}{\partial x} - \frac{\partial H_x^{n+1/2}(i, j)}{\partial z} \quad (4.31)$$

olarak verilir. Bu denklemdeki elektrik ve manyetik alan bileşenlerine ikinci dereceden merkezi fark yaklaşımı uygulanırsa;

$$\partial E_y^{n+1/2}(i, j) = \left[\frac{E_y^{n+1}(i, j) - E_y^n(i, j)}{2} \right] \quad (4.32)$$

$$\frac{\partial E_y^{n+1/2}(i, j)}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} [E_y^{n+1}(i, j) - E_y^n(i, j)] \quad (4.33)$$

$$\frac{\partial H_z^{n+1/2}(i, j)}{\partial x} = \frac{1}{\Delta x} [H_z^{n+1/2}(i+1/2, j) - H_z^{n+1/2}(i-1/2, j)] \quad (4.34)$$

$$\frac{\partial H_x^{n+1/2}(i, j)}{\partial z} = \frac{1}{\Delta z} [H_x^{n+1/2}(i, j+1/2) - H_x^{n+1/2}(i, j-1/2)] \quad (4.35)$$

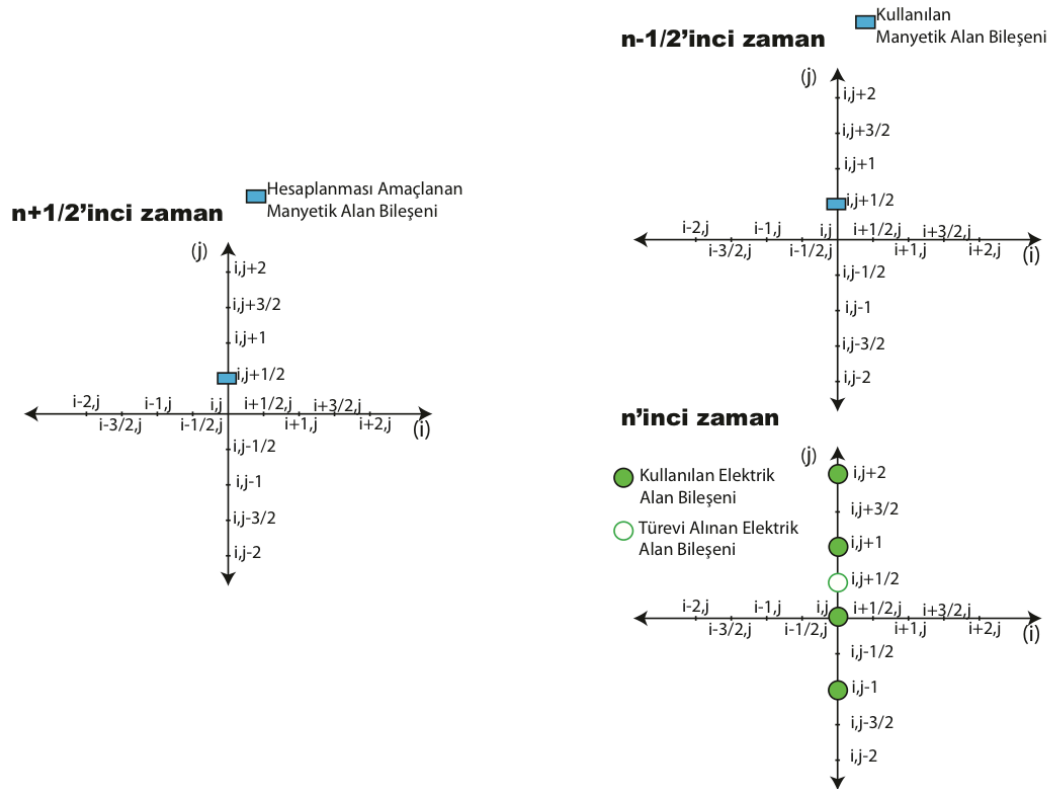
denklemleri elde edilir. Bu denklemler (4.31) denkleminde yerlerine yazılırsa;

$$\begin{aligned} \frac{\sigma(i, j)}{2} [E_y^{n+1}(i, j) + E_y^n(i, j)] + \frac{\varepsilon(i, j)}{\Delta t} [E_y^{n+1}(i, j) - E_y^n(i, j)] = \\ \frac{[H_z^{n+1/2}(i+1/2, j) - H_z^{n+1/2}(i-1/2, j)]}{\Delta x} - \frac{[H_x^{n+1/2}(i, j+1/2) - H_x^{n+1/2}(i, j-1/2)]}{\Delta z} \end{aligned} \quad (4.36)$$

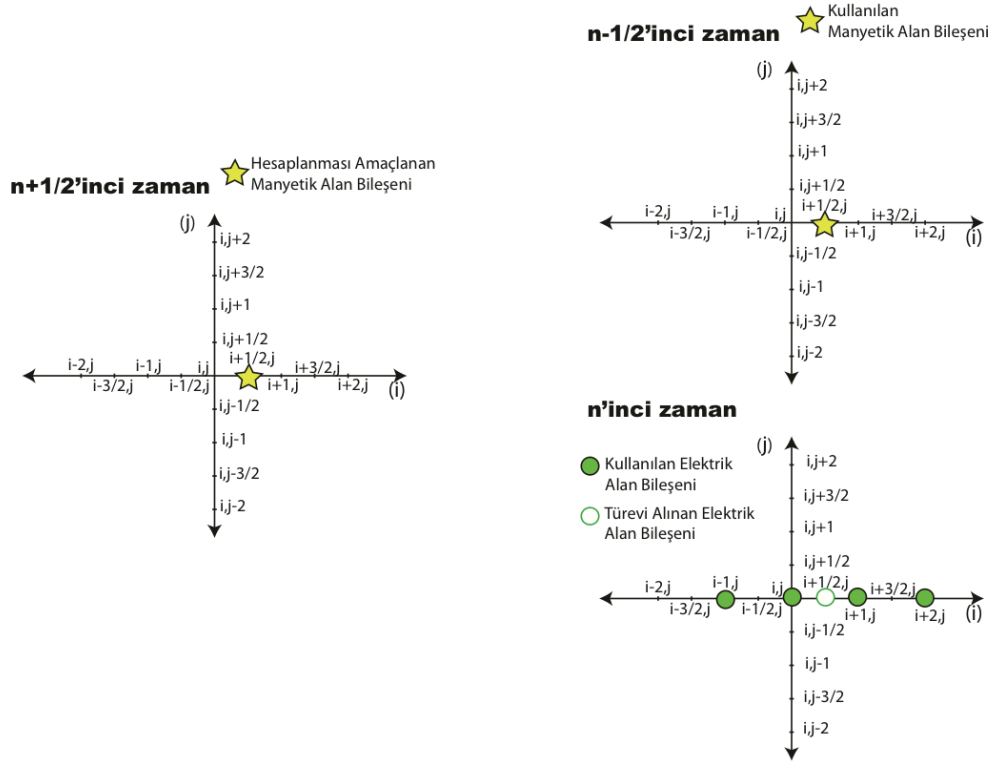
elde edilir. Burada elektrik alan bileşeni yalnız bırakılırsa;

$$E_y^{n+1}(i,j) = \left[\frac{\sigma(i,j)\Delta t - 2\varepsilon(i,j)}{\sigma(i,j)\Delta t + 2\varepsilon(i,j)} \right] E_y^n(i,j) + \frac{2\Delta t}{\sigma(i,j)\Delta t + 2\varepsilon(i,j)} \left[\frac{H_z^{n+1/2}(i+1/2,j) - H_z^{n+1/2}(i-1/2,j)}{\Delta x} - \frac{H_x^{n+1/2}(i,j+1/2) - H_x^{n+1/2}(i,j-1/2)}{\Delta z} \right] \quad (4.37)$$

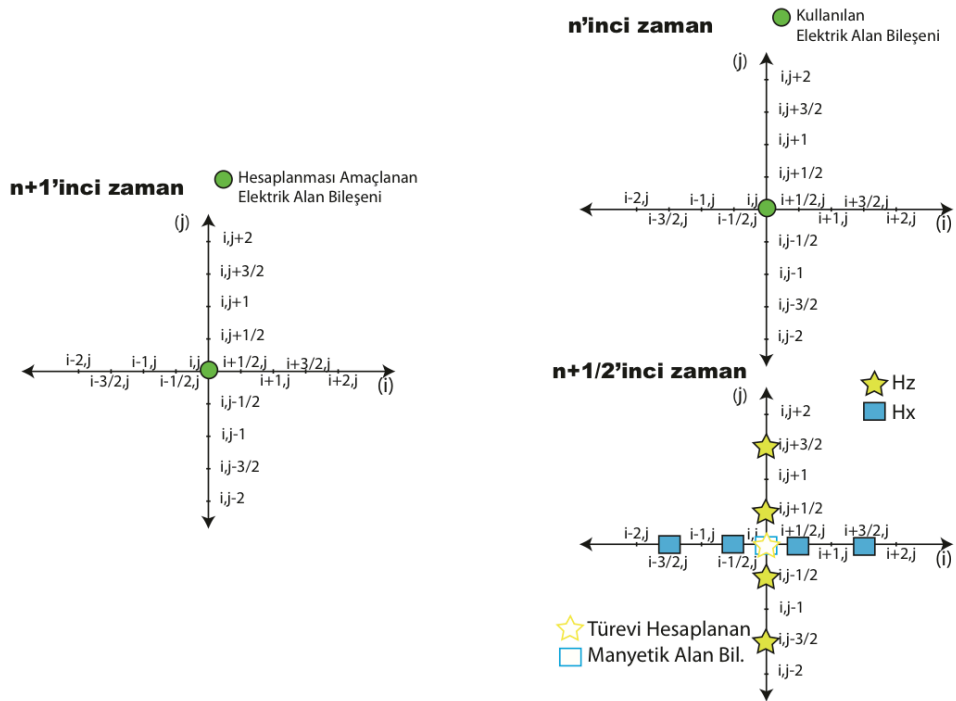
olarak ifade edilir. TE modunda hesaplanan bileşenler Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te ayrıntılı olarak açıklanmıştır.



Şekil 4.2: H_x bileşeninin hesaplanması için gerekli olan elektrik ve manyetik alan bileşenleri.



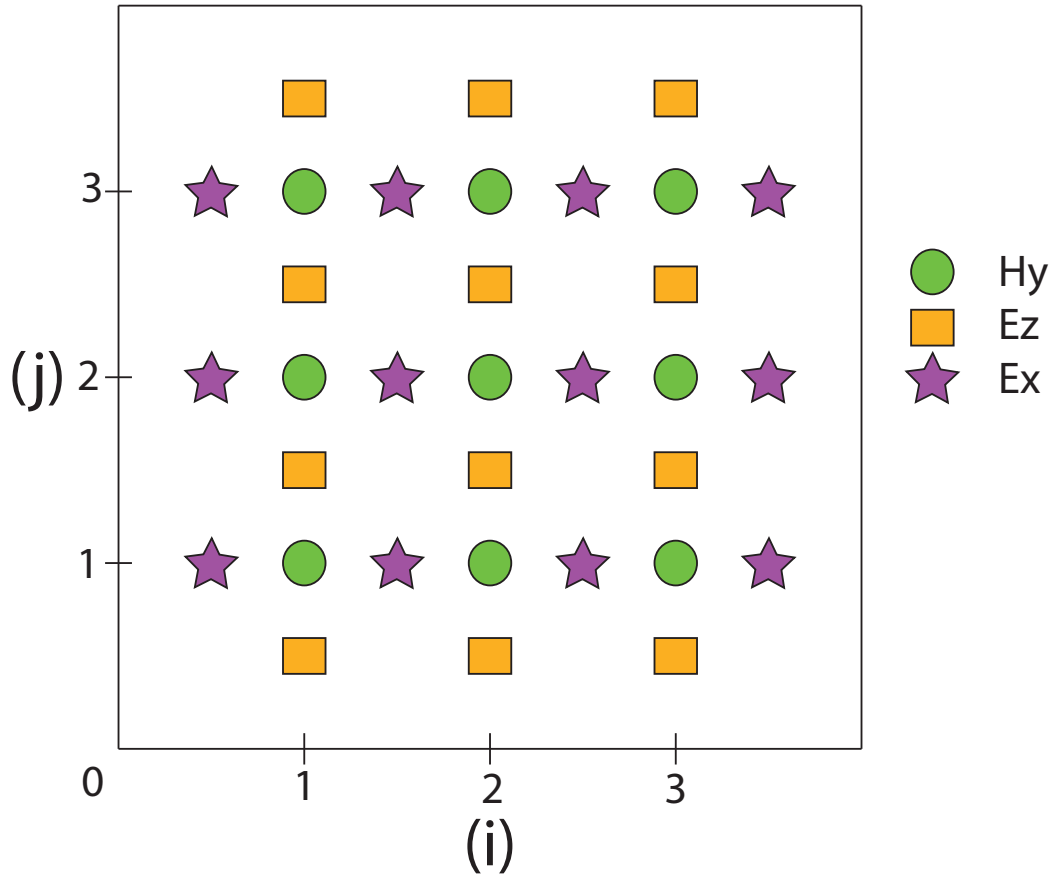
Şekil 4.3: Hz bileşeninin hesaplanması için gerekli olan elektrik ve manyetik alan bileşenleri.



Şekil 4.4: Ey bileşeninin hesaplanması için gerekli olan elektrik ve manyetik alan bileşenleri.

4.2.2.2. TM modu

TM modunda elektrik ve manyetik alanın, E_x , E_z ve H_y bileşenlerinin değişmekte olan bileşenler olduğu önceki bölümlerde açıklanmıştı. TM modu için aşağıdaki grafikte gösterilen sonlu farklar ağına göre bu bileşenler hesaplanır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5: TM modundaki elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin model ağı.

Elektrik alanın x ve y, manyetik alanın y yönündeki bileşeni için Maxwell denklemleri sonlu farklarda benzer şekilde ifade edilir. Bu durumda;

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (4.38)$$

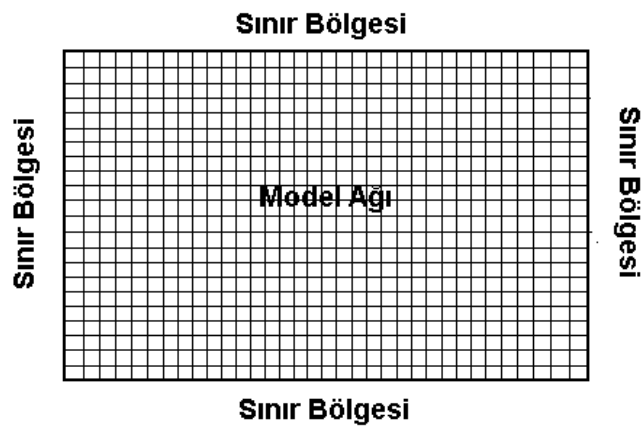
$$E_z^{n+1/2}(i+1/2, j) = \left[\frac{\sigma(i+1/2, j)\Delta t - 2\varepsilon(i+1/2, j)}{\sigma(i+1/2, j)\Delta t + 2\varepsilon(i+1/2, j)} \right] E_z^{n-1/2}(i+1/2, j) - \left[\frac{2\Delta t}{\sigma(i+1/2, j)\Delta t + 2\varepsilon(i+1/2, j)\Delta x} \right] \left[H_y^n(i+1, j) - H_y^n(i, j) \right] \quad (4.39)$$

$$H_y^{n+1}(i, j) = H_y^n(i, j) - \frac{\Delta t}{\mu(i, j)} \left[\frac{E_z^{n+1/2}(i+1/2, j) - E_z^{n+1/2}(i-1/2, j)}{\Delta x} + \frac{E_x^{n+1/2}(i, j+1/2) - E_x^{n+1/2}(i, j-1/2)}{\Delta z} \right] \quad (4.40)$$

olarak ifade edilir.

4.3. Sınır Koşulları

Yer radarı yöntemi için yapılan modelleme çalışmalarında zaman ortamında sonlu farklar yöntemi son yıllarda sıklıkla kullanılmaktadır. Fakat modellenen yer altı yapısının sınırlarının belirlenmesi gerekmektedir (Şekil 4.6). Yer radarı yöntemi ele alındığında modele uygulanan sınırların dalga yayılımını etkilememesi gerekmektedir. Sınırdan yansıyarak alıcı antene gelen dalgaların kayıtlarda gürültü oluşturması kaçınılmazdır. Yapılan bu modelleme çalışmasında verici antenden çıkıp sınıra ulaşan elektromanyetik dalganın sönümlenmesi istenmektedir. Dolayısıyla elektromanyetik dalga sınırdan yansımayacak ve kayıta görünmeyecektir. Bu durum da hesaplanan teorik radargramlarda istenilmeyen yansımaların olmamasını sağlayacaktır.



Şekil 4.6: Sınırları tanımlanmış bir model ağı.

Bu çalışmada belirlenen modeller için sınırdaki EM dalgaları sönümleyen CPML (Convolutional Perfectly Matched Layer) sınır koşulları kullanılmıştır. Burada frekans ortamındaki elektromanyetik alan bileşenleri için gergin karmaşık koordinatlarda (complex stretched coordinate) bir operatör tanımlanır (Irving, 2006).

$$\nabla = \tilde{x} \frac{1}{S_x} \frac{\partial}{\partial x} + \tilde{y} \frac{1}{S_y} \frac{\partial}{\partial y} + \tilde{z} \frac{1}{S_z} \frac{\partial}{\partial z} \quad (4.41)$$

Burada x, y, z yönü ifade etmektedir. x, y, z yerine k yazılıp S_x , S_y , S_z değerleri S_k ile ifade edilirse,

$$S_k = K_k + \frac{\sigma_k}{\alpha_k + i\omega\epsilon_0} \quad (4.42)$$

denkleminde σ_k , α_k ve K_k elektromanyetik dalgaın yayını ve sönümü için bazı parametrelerdir. ϵ_0 ise boşluktaki dielektrik katsayısını ifade etmektedir (Kuzuoglu and Mittra, 1996). Burada;

$$K_k = \begin{cases} 1 & \text{Model ağı içinde} \\ 1 + \left(\frac{d}{\delta}\right)^m (K_{k_{MAX}} - 1) & \text{Sınır Bölgesinde} \end{cases} \quad (4.43)$$

$$\sigma_k = \begin{cases} 0 & \text{Model ağı içinde} \\ \left(\frac{d}{\delta}\right)^m (\sigma_{k_{MAX}}) & \text{Sınır Bölgesinde} \end{cases} \quad (4.44)$$

$$\sigma_{k_{MAX}} = \frac{m+1}{150\pi\sqrt{\epsilon_r}\Delta k} \quad (4.45)$$

olarak ifade edilir. Burada d , sınır içindeki herhangi bir nokta ile model ağının başlangıcı arasındaki mesafe, δ , sınır bölgesinin kalınlığı, m ise sınır bölgesinin

kuvveti olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada $m=4$, $K_{x_{MAX}} = K_{z_{MAX}} = 5$ alınmıştır. Bunun nedeni sınırlardaki sönümlenmenin bu değerlerde en iyi olmasıdır.

Sınırlara CPML yaklaşımını uygulamak için $1/S_k$ değerinin Ters Fourier dönüşümü alınır (Irving, 2006);

$$S_k^{-1}(t) = \frac{\delta(t)}{K_k} - \frac{\sigma_k}{\varepsilon_0 K_k^2} \exp \left[-\frac{t}{\varepsilon_0} \left(\frac{\sigma_k}{K_k} + \alpha_k \right) \right] u(t) \quad (4.46)$$

Burada, $\delta(t)$ dirac delta fonksiyonunu, $u(t)$ birim basamak fonksiyonunu ifade etmektedir. Bu denklemde;

$$\xi_k(t) = \frac{\sigma_k}{\varepsilon_0 K_k^2} \exp \left[-\frac{t}{\varepsilon_0} \left(\frac{\sigma_k}{K_k} + \alpha_k \right) \right] u(t) \quad (4.47)$$

olarak tanımlanırsa;

$$S_k^{-1}(t) = \frac{\delta(t)}{K_k} - \xi_k(t) \quad (4.48)$$

olarak ifade edilebilir.

Bu çalışmada hesaplanan modellerde TE modu kullanılmıştır. Buna göre, TE modunun bileşenleri olan H_x , H_z ve E_y 'ye ait Maxwell denklemlerinin Fourier dönüşümleri alınır;

$$iw\mu H_x = -\frac{\partial E_y}{\partial z} \quad (4.49)$$

$$iw\mu H_z = \frac{\partial E_y}{\partial x} \quad (4.50)$$

$$i\omega\epsilon E_y + \sigma E_y = \frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial z} \quad (4.51)$$

denklemleri elde edilir. Bu denklemler gergin karmaşık koordinatlarda bir operatör olarak tanımlanan ∇ 'ya göre düzenlenirse;

$$i\omega\mu H_x = -\frac{1}{S_z} \frac{\partial E_y}{\partial z} \quad (4.52)$$

$$i\omega\mu H_z = \frac{1}{S_x} \frac{\partial E_y}{\partial x} \quad (4.53)$$

$$i\omega\epsilon E_y + \sigma E_y = \frac{1}{S_x} \frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{1}{S_z} \frac{\partial H_x}{\partial z} \quad (4.54)$$

denklemleri elde edilir. Bu denklemler zaman ortamına dönüştürüldüğünde;

$$\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} = -\frac{1}{K_z} \frac{\partial E_y}{\partial z} + \zeta_z(t) * \frac{\partial E_y}{\partial z} \quad (4.55)$$

$$\mu \frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{K_x} \frac{\partial E_y}{\partial x} + \zeta_x(t) * \frac{\partial E_y}{\partial x} \quad (4.56)$$

$$\sigma E_y + \mu \frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{K_x} \frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{1}{K_z} \frac{\partial H_x}{\partial z} + \zeta_x(t) * \frac{\partial H_z}{\partial x} - \zeta_z(t) * \frac{\partial H_x}{\partial z} \quad (5.57)$$

denklemleri elde edilir (Irving, 2006). İkinci dereceden zaman türevleri ve dördüncü dereceden konum türevleri ile sınır koşulları eklenmiş alan denklemleri sonlu farklar ile yazılırsa;

$$\begin{aligned}
H_x^{n+1/2}(i, j+1/2) &= H_x^{n-1/2}(i, j+1/2) - D_{b_z}(i, j+1/2) \\
&\left[-E_y^n(i, j+2) + 27E_y^n(i, j+1) - 27E_y^n(i, j) + E_y^n(i, j-1) \right] \\
&- D_c(i, j+1/2) \left[\Psi_{H_{xz}}^n(i, j+1/2) \right]
\end{aligned} \tag{4.58}$$

$$\begin{aligned}
H_z^{n+1/2}(i+1/2, j) &= H_z^{n-1/2}(i+1/2, j) - D_{b_x}(i+1/2, j) \\
&\left[-E_y^n(i+2, j) + 27E_y^n(i+1, j) - 27E_y^n(i, j) + E_y^n(i-1, j) \right] \\
&- D_c(i+1/2, j) \left[\Psi_{H_{xz}}^n(i+1/2, j) \right]
\end{aligned} \tag{4.59}$$

$$\begin{aligned}
E_y^{n+1}(i, j) &= C_a(i, j) \left[E_y^n(i, j) \right] + C_{b_x}(i, j) \\
&\left[-H_z^{n+1/2}(i+3/2, j) + 27H_z^{n+1/2}(i+1/2, j) - 27H_z^{n+1/2}(i-1/2, j) + H_z^{n+1/2}(i-3/2, j) \right] \\
&- C_{b_z} \left[-H_x^{n+1/2}(i, j+3/2) + 27H_x^{n+1/2}(i, j+1/2) - 27H_x^{n+1/2}(i, j-1/2) \right. \\
&\left. + H_x^{n+1/2}(i, j-3/2) \right] + C_c(i, j) \left[\Psi_{E_{yx}}^{n+1/2}(i, j) - \Psi_{E_{yz}}^{n+1/2}(i, j) \right]
\end{aligned} \tag{4.60}$$

elde edilir. Burada katsayılar;

$$C_a = \left(1 - \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon} \right) \left(1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon} \right)^{-1} \tag{4.61}$$

$$C_{b_k} = \frac{\Delta t}{\varepsilon} \left(1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon} \right)^{-1} (24K_k \Delta k)^{-1} \tag{4.62}$$

$$C_c = \frac{\Delta t}{\varepsilon} \left(1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon} \right)^{-1} \tag{4.63}$$

$$D_{b_k} = \frac{\Delta t}{\mu} (24K_k \Delta k)^{-1} \tag{4.64}$$

$$D_c = \frac{\Delta t}{\mu} \tag{4.65}$$

olarak verilir. Konvolüsyon işlemlerini ifade eden $\Psi_{H_{xz}}^n$, $\Psi_{H_{zx}}^n$, $\Psi_{E_{yx}}^{n+1/2}$, $\Psi_{E_{yz}}^{n+1/2}$ değerleri ise (Luebbers and Hunsberger, 1992);

$$\Psi_{H_{xz}}^n(i, j+1/2) = B_z(i, j+1/2) \left[\Psi_{H_{xz}}^{n-1}(i, j+1/2) \right] + A_z(i, j+1/2) \left[-E_y^n(i, j+2) + 27E_y^n(i, j+1) - 27E_y^n(i, j) + E_y^n(i, j-1) \right] \quad (4.66)$$

$$\Psi_{H_{zx}}^n(i+1/2, j) = B_x(i+1/2, j) \left[\Psi_{H_{zx}}^{n-1}(i+1/2, j) \right] + A_x(i+1/2, j) \left[-E_y^n(i+2, j) + 27E_y^n(i+1, j) - 27E_y^n(i, j) + E_y^n(i-1, j) \right] \quad (4.67)$$

$$\Psi_{E_{yx}}^{n+1/2}(i, j) = B_x(i, j) \left[\Psi_{E_{yx}}^{n-1/2}(i, j) \right] + A_x(i, j) \left[-H_z^{n+1/2}(i+3/2, j) + 27H_z^{n+1/2}(i+1/2, j) - 27H_z^{n+1/2}(i-1/2, j) + H_z^{n+1/2}(i-3/2, j) \right] \quad (4.68)$$

$$\Psi_{E_{yz}}^{n+1/2}(i, j) = B_z(i, j) \left[\Psi_{E_{yz}}^{n-1/2}(i, j) \right] + A_z(i, j) \left[-H_x^{n+1/2}(i, j+3/2) + 27H_x^{n+1/2}(i, j+1/2) - 27H_x^{n+1/2}(i, j-1/2) + H_x^{n+1/2}(i, j-3/2) \right] \quad (4.69)$$

olarak tanımlanmıştır. Bu denklemlerdeki;

$$A_k = \frac{\sigma_k}{\sigma_k K_k + \alpha_k K_k^2} (B_k - 1) \quad (4.70)$$

$$B_k = \exp \left[-\frac{\Delta t}{\varepsilon_0} \left(\frac{\sigma_k}{K_k} + \alpha_k \right) \right] \quad (4.71)$$

dır (Irving, 2006).

4.4. Kararlılık Koşulu Ve Sayısal Dispersiyon

Zaman ortamında sonlu farklar yöntemi ile modelleme çalışması yapılırken dikkat edilmesi gereken önemli bir adım da zaman (Δt) ve uzaklık (Δx ve Δz) aralıklarının seçimidir. İdeal olarak, Δx , Δz ve Δt değerleri simülasyonun hızlı çalışması için

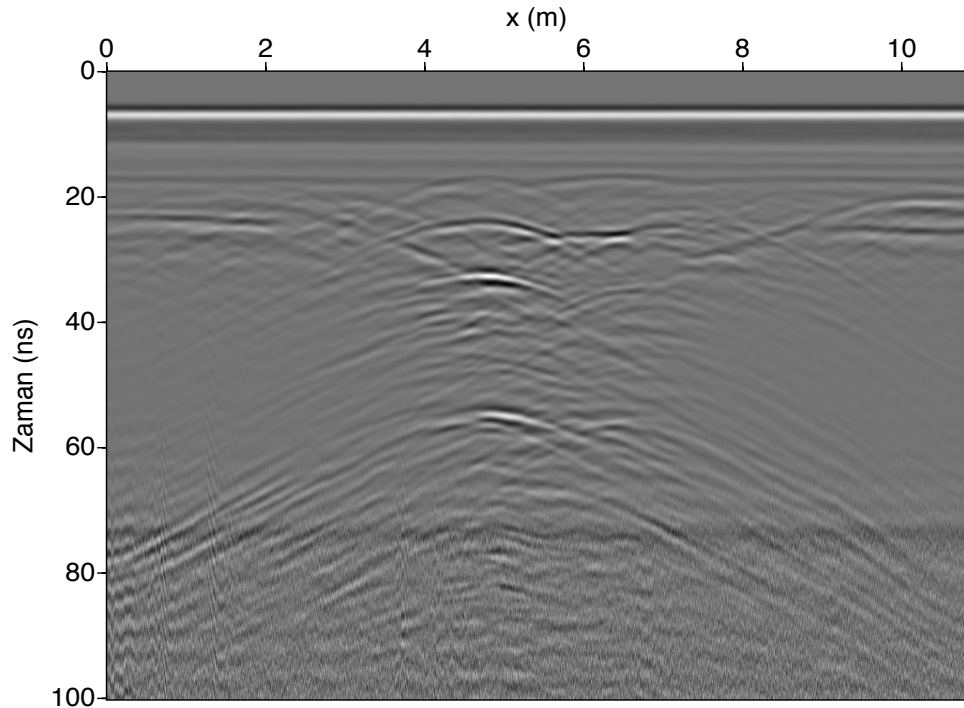
mümkün olduğunca geniş seçilmelidir. Fakat Δt değeri çok büyük seçilirse sonlu farklar ağında kararlılık koşulunu sağlayamayacaktır. Δt değeri büyük seçildiği zaman dalga hücre boyutunu aşar ve model ağındaki uzaklık aralıklarını geçebilir. Bu yüzden Δt değeri ile model ağı içerisindeki uzaklık aralıkları (Δx ve Δz) birbirleri ile ilişkili olarak seçilmelidir. Bu ilişki;

$$\Delta t_{\max} = \frac{6}{7} \sqrt{\frac{\mu_{\min} \varepsilon_{\min}}{(1/\Delta x^2 + 1/\Delta z^2)}} \quad (4.72)$$

olarak tanımlanmıştır (Georgakopoulos ve diğ., 2002). Δx ve Δz aralıkları gereğinden büyük seçildiğinde ise model ağı içinde çözümlenen noktalar azalacağından elde edilen sonuç daha az çözünürlükte olacaktır.

5. YER RADARINDA VERİ İŞLEM

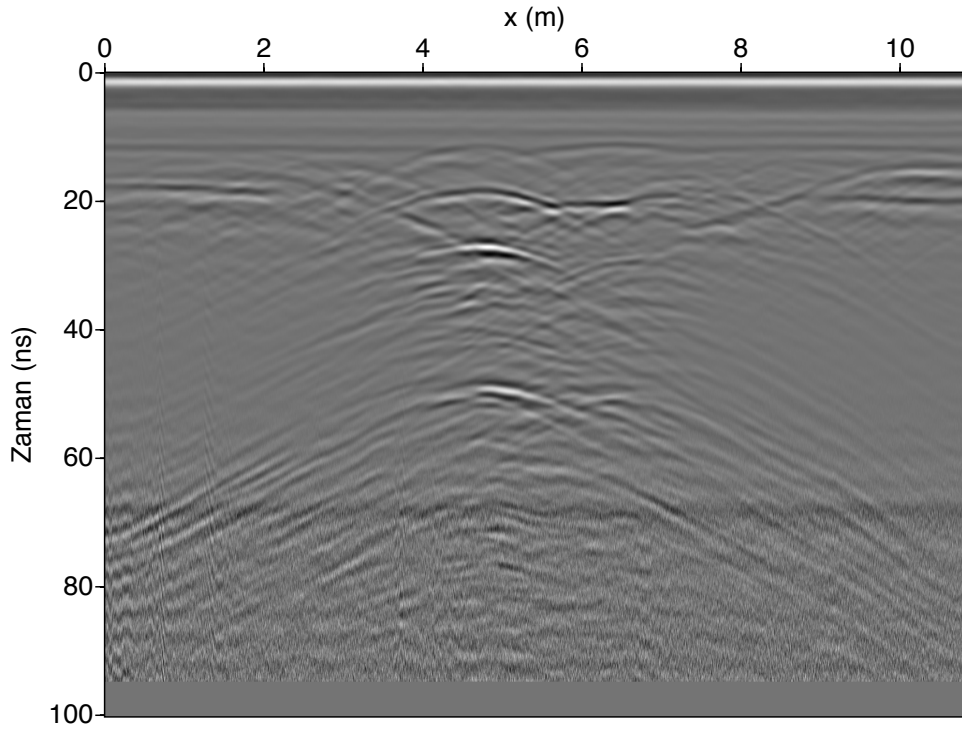
Bütün jeofizik yöntemlerde olduğu gibi yer radarı yönteminde de veri işlem uygulanmasının amacı Sinyal/Gürültü oranını arttırmak ve veriyi yoruma hazır hale getirmektir. Yer radarında uygulanan veri işlem sismik yöntemde uygulanan veri işlemle neredeyse bire bir aynıdır. Bu bölümde kısaca anlatılacak olan bazı temel veri işlem aşamalarını uygulamak için “Seismic Unix (SU)” (Liner, C.) ve Almanya’nın Christian Albrechts Üniversitesi’nde çalışan Dr. Harald Stümpel’in geliştirdiği “DT_Plot8” programı kullanılmıştır. Veri işlem uygulamaları Kasım 2010 tarihinde Mısır’ın Tuna el-Gebel arkeolojik sahasından toplanan yer radarı verilerinden örnek bir profil seçilerek gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.1). Bu profilde kaydedilen toplam iz sayısı 1665’tir. Kayıt süresi 100 ns olarak seçilmiştir. Kullanılan antenin merkez frekansı ise 400 MHz’tir.



Şekil 5.1: Mısır’ın Tuna el-Gebel arkeolojik alanından örnek ham yer radarı verisi.

5.1. Sıfır Kayma Zamanı Düzeltmesi

Kablo uzunluğu ve türü, elektronik duraysızlık ve termal değişimler nedeniyle elektromanyetik dalga havadan yere geçerken kayıt üzerinde bir gecikme gözlenir. Bu gecikme sıfır-zaman gecikmesi olarak adlandırılır. Buna göre gecikme zamanı radargram üzerinden belirlenir ve bu bölüm veriden atılarak başlangıç zamanı zaman ekseninin başlangıcına taşınır. Aşağıda, ham veride 5.6 ns sıfır-zaman gecikmesi gözlenmesi dolayısıyla uygulanan T_0 (Sıfır kayma zamanı) düzeltmesi gösterilmektedir (Şekil 5.2).

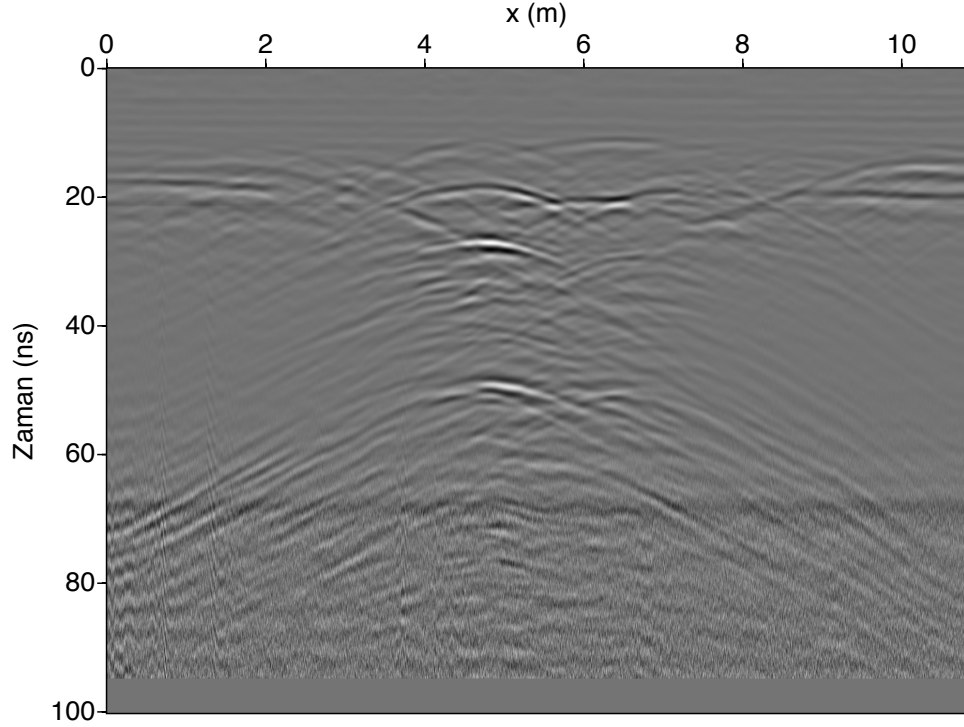


Şekil 5.2: Radargramın T_0 düzeltmesinden sonraki görüntüsü.

5.2. Direkt Gelen Dalganın Veriden Atılması

Sismik kayıtlarda olduğu gibi radargramlarda da direkt gelen dalgalar gözlenir. Kaydedilen bu radargram “sıfır ofset” anten açılımı ile toplanmış bir veri olsa da antenler arası mesafenin pratikte sıfır olması mümkün değildir. Bu nedenden dolayı “sıfır ofset” açılımı ile kaydedilen radargramlarda da direkt gelen dalga gözlenir. Direkt gelen dalganın veriden atılması için program tarafından bütün izlerin

ortalaması hesap edilir ve bütün izlerde aynı olan kısım yani direkt gelen dalga veriden silinir (Şekil 5.3).



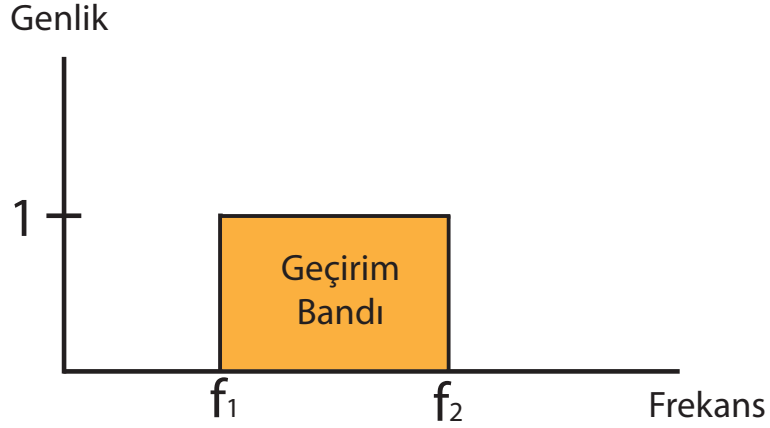
Şekil 5.3: Direkt gelen dalga veriden atıldıktan sonra radargramın görüntüsü.

5.3. Süzgeçleme

Yer radarı verisinde istenmeyen etkileri (gürültüleri) gidermek için süzgeçleme tekniği kullanılır. Yer radarı verisinde gözlemlenebilecek muhtemel gürültüler çevreden ya da cihazın kendisinden kaynaklanabilir. Bu bakımdan süzgeçleme veri işlem aşamalarında önemli bir yere sahiptir. İstenilmeyen frekanslardaki sinyallerin veriye girmesi durumunda yorumlama kısmında yanlışlıklar kaynaklanabilir.

Frekans süzgeçlemesi yer radarı verisinin doğrudan doğruya genlik spektrumunu değiştirilmesi işlemidir. Bu işlemi gerçekleştirebilmek amacıyla kullanılan birçok farklı türden süzgeç tasarımı mevcuttur. Temel olarak bunlar, belirli bir frekansın altını geçiren alçak geçişli, üstünü geçiren yüksek geçişli, belirli bir frekans aralığını geçiren bant geçişli ve belirli bir frekans bandını kesen bant durdurucu süzgeçlerlerdir. Bununla birlikte yer radarı verisinin süzülmesinde genellikle bant geçişli süzgeçler kullanılır. Bunlar verinin belirli bir frekans bandındaki bileşenlerini

geçirip, bu bandın dışındaki frekans bileşenlerine ait genlikleri veriden atmak için tasarlanmış süzgeçlerdir. Söz konusu bant “geçirim bandı (pass band)” olarak bilinir ve şematik olarak frekans ortamında bir dikdörtgen pencere ile gösterilebilir (Şekil 5.4) (Dondurur, 2009).



Şekil 5.4: Bant geçişli süzgeçlerin geçirim bandı (f_1 ve f_2 frekansları arasında kalan boyalı alan) ve kesme frekanslarının (f_1 ve f_2) şematik gösterimi (Dondurur, 2009).

5.4. Dekonvolüsyon

Dekonvolüsyon işlemi ters süzgeçleme (filtreleme) işlemi olarak da adlandırılabilir. Dekonvolüsyon işlemi yer radarı izindeki kaynak dalgacığını sıkıştırarak içnecik veya daha uygun bir dalgaya dönüştürmeyi ve böylece sismik verinin ayrımlılığını arttırmayı amaçlar. Dekonvolüsyon uygulanarak ayrıca veride istenmeyen tekrarlı yansımalar da yok edilebilir (Yılmaz, 1987).

Dekonvolüsyon öncesi dalgacığın zamansal genişliği (t_1) dekonvolüsyon sonrasındaki genişliğinden (t_2) çok daha fazladır (Şekil 5.5). Bu işlem içnecikleştirme dekonvolüsyonu olarak adlandırılır. Yansıma katsayıları serisi yer radarı yöntemi için jeolojik bilinmeyendir ve sismik yöntemle elde edilmeye çalışılır. İçnecikleştirme dekonvolüsyonu yansıma katsayıları serisinin elde edilmesini amaçlar. Bunun dışında, yer radarı verisindeki ardışık yansımaların giderilmesi ve dalgacığın zamansal genişliğinin azaltılması amacıyla kullanılan dekonvolüsyon türü ise “kestirim (tahminsel) dekonvolüsyondur. Bu iki dekonvolüsyon türü günümüzde en çok kullanılan dekonvolüsyon türüdür (Dondurur, 2009).

DEKONVOLÜSYON ÖNCESİ

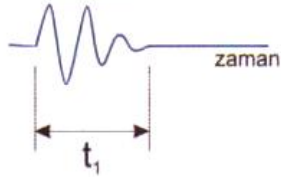


dekonvolüsyon

DEKONVOLÜSYON SONRASI

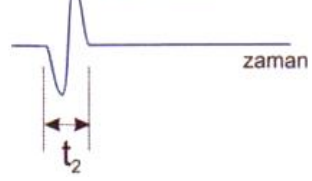


DALGACIK



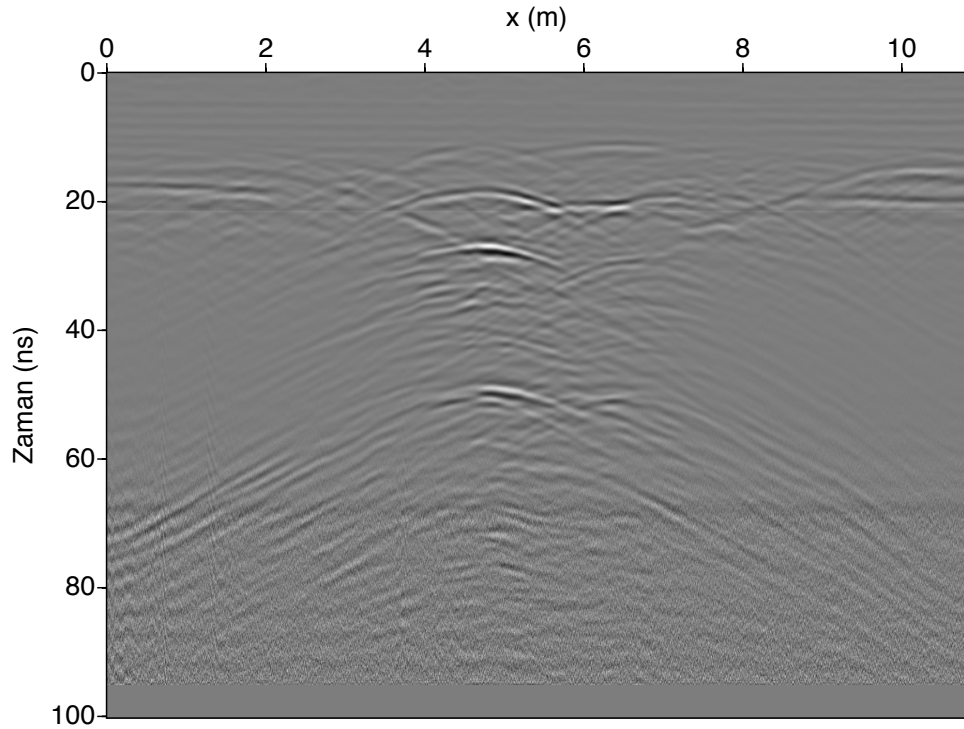
dekonvolüsyon

DALGACIK



Şekil 5.5: Şematik olarak dekonvolüsyon işlemi. Altta dekonvolüsyon öncesi ve sonrası sismik dalgacıklar, üstte ise bunların şematik genlik spektrumları görülmektedir (Dondurur, 2009).

Bu radargrama uygulanan dekonvolüsyon tipi ise tahminsel dekonvolüsyondur. Tahminsel dekonvolüsyon kaynak dalgacığının boyunu bir önkestirim zamanı kadar bırakacak şekilde kısaltmayı hedefler. Bu örnek için tahminsel uzaklık (prediction lag) 0.05 olarak seçilmiştir (Şekil 5.6).

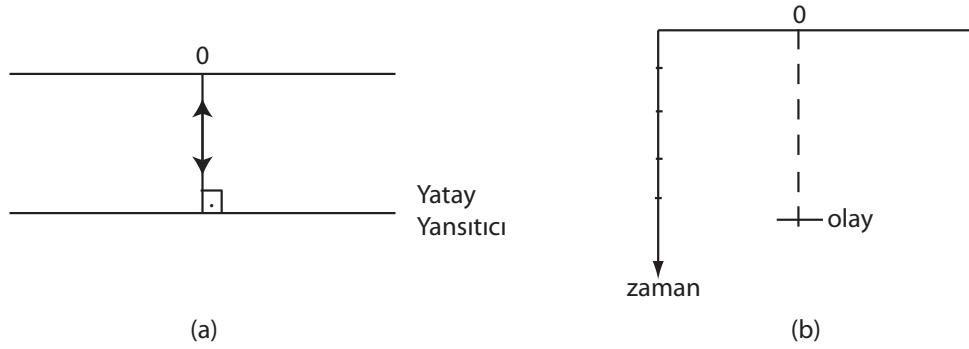


Şekil 5.6: Örnek radargramın dekonvolüsyon uygulandıktan sonraki hali.

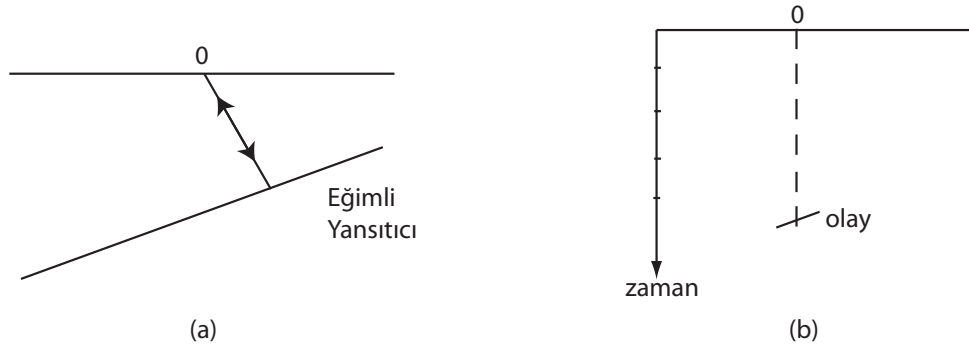
5.5. Göç (Migrasyon)

Gözlem noktalasına göre kaydedilen verinin yansıma noktalarına göre yeniden düzenlenmesine göç işlemi denir. Sismik ya da yer radarında kaydedilen bir yansıma izi sadece yansımanın zamanını ve genliğini gösterir fakat yansımanın nereden geldiği konusunda doğrudan bir bilgi içermez. Kayıta görülen yansımalar her zaman alıcının doğrudan altında oluşmamaktadır. Bu yüzden sinyalin gerçekten nereden yansıdığı göç (migrasyon) işlemi ile bulunur. Herhangi bir sismik ya da yer radarı verisine göç işlemi uygulanması ile birlikte yansımanın gerçek noktası ve dolayısıyla da hedef yapı bulunabilir.

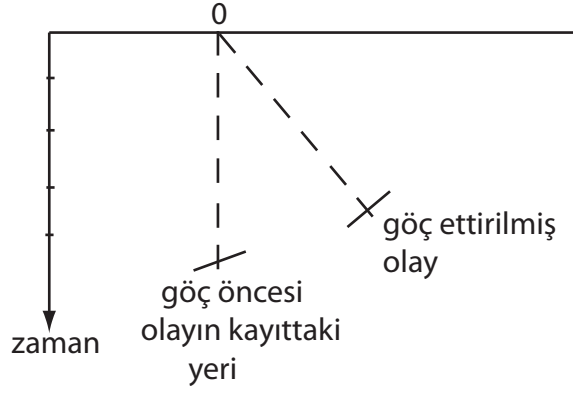
Radargramlarda görülen yansıma olayları elektromanyetik dalga düşey olarak yol alıyormuş gibi gözlenir. Bu varsayım ancak yatay yansıtıcıların olması durumunda doğrudur (Şekil 5.7). Fakat yansıtıcıların eğimli olması durumunda bu varsayım doğru değildir (Şekil 5.8). Bunun düzeltilmesi için yansıma noktalarının gerçek yerlerine taşınması yani göç ettirilmesi gerekir (Şekil 5.9) (Kurtuluş, 2002).



Şekil 5.7: a) Yatay yansıtıcı yüzeyde düşey yansıma, b) radar kesidi (Kurtuluş, 2002).

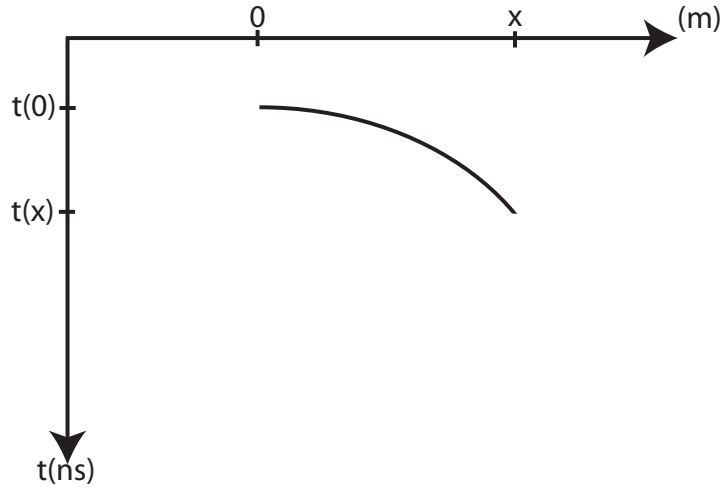


Şekil 5.8: a) Eğimli yansıtıcı yüzeyde yansıma, b) radar kesidi (Kurtuluş, 2002).



Şekil 5.9: Orjinal pozisyonundaki olayın göç ettirilmiş yeri (Kurtuluş, 2002).

Elektromanyetik dalga hızı yeriçinde tabakaların sabit hızlardan oluşmamasından dolayı yanal ve düşey yönde değişim gösterebilir. Yer radarı yönteminde kaydedilen yansımalar, farklı dalga hızlarına sahip tabaka arayüzeylerinden kaynaklanmaktadır. Hız bilgisi derinlik, eğim ve yansıtıcıların yatay konumlarının belirlenmesi için temel parametredir. Göç işlemi uygulanmadan önce ise yer altının hız değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Hız değeri radargramlarda görülen hiperbollerden ya da ortak derinlik noktası (ODN) ölçümleri sonucu oluşan hiperbollerden hesaplanabilir (Şekil 5.10).



Şekil 5.10: Radargramda görülen saçılma hiperbolü.

Belirli bir yansıma için kaynaktan herhangi bir mesafedeki alıcıya gelen yansıma zamanının, yansımanın sıfır ofset (kaynak noktasındaki) alıcıya varış zamanından olan farkı normal kayma zamanıdır (NMO). NMO sadece kaynak-alıcı ara mesafesinin varlığı nedeniyle oluşur. Hız analizinde elde edilen hızda bu hızdır. NMO hızı şu şekilde tanımlanır:

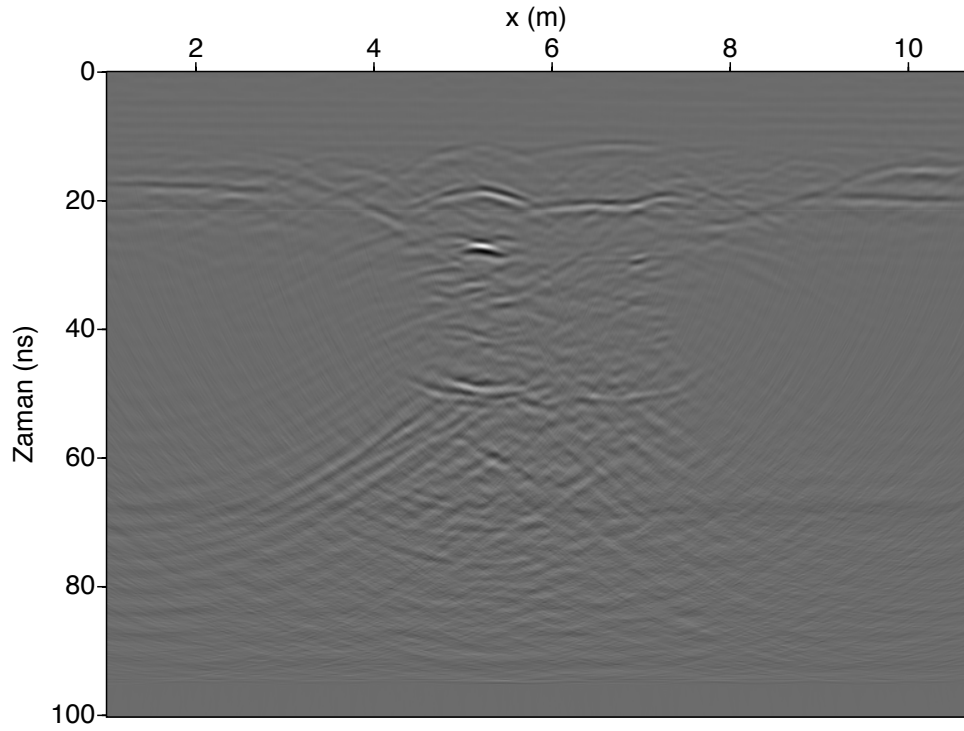
$$V_{NMO} = \sqrt{\frac{x^2}{(t(x)^2 - t(0)^2)}} \quad (5.1)$$

Aşağıda örnek olarak seçilen radargrama uygulanan göç sonucu elde edilen radargram gösterilmektedir (Şekil 5.11). Uygulanan göç türü “Frekans – Dalga Sayısı” tipidir. Frekans – Dalga Sayısı (f-k) göçü, Stolt ve Gazdag (Faz kayması) göçü olarak ikiye ayrılır. Stolt göç türü yanal ve düşey yöndeki hız değişimlerini dikkate almaz ve sabit hızlı bir ortam öngörür. Ancak Stolt gerilme faktörü olarak tanımlanan bir sabit kullanılarak Stolt türü göç uygulamasının gelişigüzel hızlarla da kullanılması mümkündür. Gazdag göç uygulaması ise sadece düşey yöndeki hız değişimlerini dikkate alır (Dondurur, 2009).

Günümüzde Stolt göç türü tüm göç yöntemleri içerisinde en hızlı ve dolayısıyla en ekonomik olanıdır. Sabit hızlı ortamlar gerçekleştiğinde 90 derecelik eğimlere kadar oldukça doğru sonuçlar üretir. Ancak yanal ve/veya düşey yönde hız değişimlerinin bulunduğu durumlarda hatalı sonuçlar elde edilebilir. Stolt gerilme faktörü bu durumun önüne geçmekte kullanılabilse de bu düzeltme saçılma hiperbolünün kanatları üzerinde geçerliliğini yitirir. Gerilme faktörü (W) teorik olarak 0 – 2 arasında değişir (Dondurur, 2009).

Gazdag göç türü ise aşağı uzanım yaklaşımlarına göre çalışmakta, ancak işlem f-k ortamında faz kaymasına karşılık gelmektedir. Hızın yanal yönde değişmemesi koşuluyla Gazdag göçü de 90 derecelik eğimlere kadar sonuçlar üretir.

Bu uygulamada kullanılan göç türü Gazdag’dır. Fakat sonlu farklarda modellenen radargramlara uygulanan göç türü Stolt’tur. Örnek radargram için hız değeri 30 nanosaniyeye kadar 18 cm/ns, 70 nanosaniyeye kadar ise 14 cm/ns girilerek göç işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.11: Örnek radargramın göç uygulandıktan sonraki hali.

Göç uygulanmış radargramda saçılmalar azalmış ve yansımalar gerçek yerlerine taşınmıştır. Göç uygulandıktan sonra yeraltı yapısının radargramda belirgin bir şekilde ortaya çıktığı ve yoruma kolay hale geldiği görülmektedir.

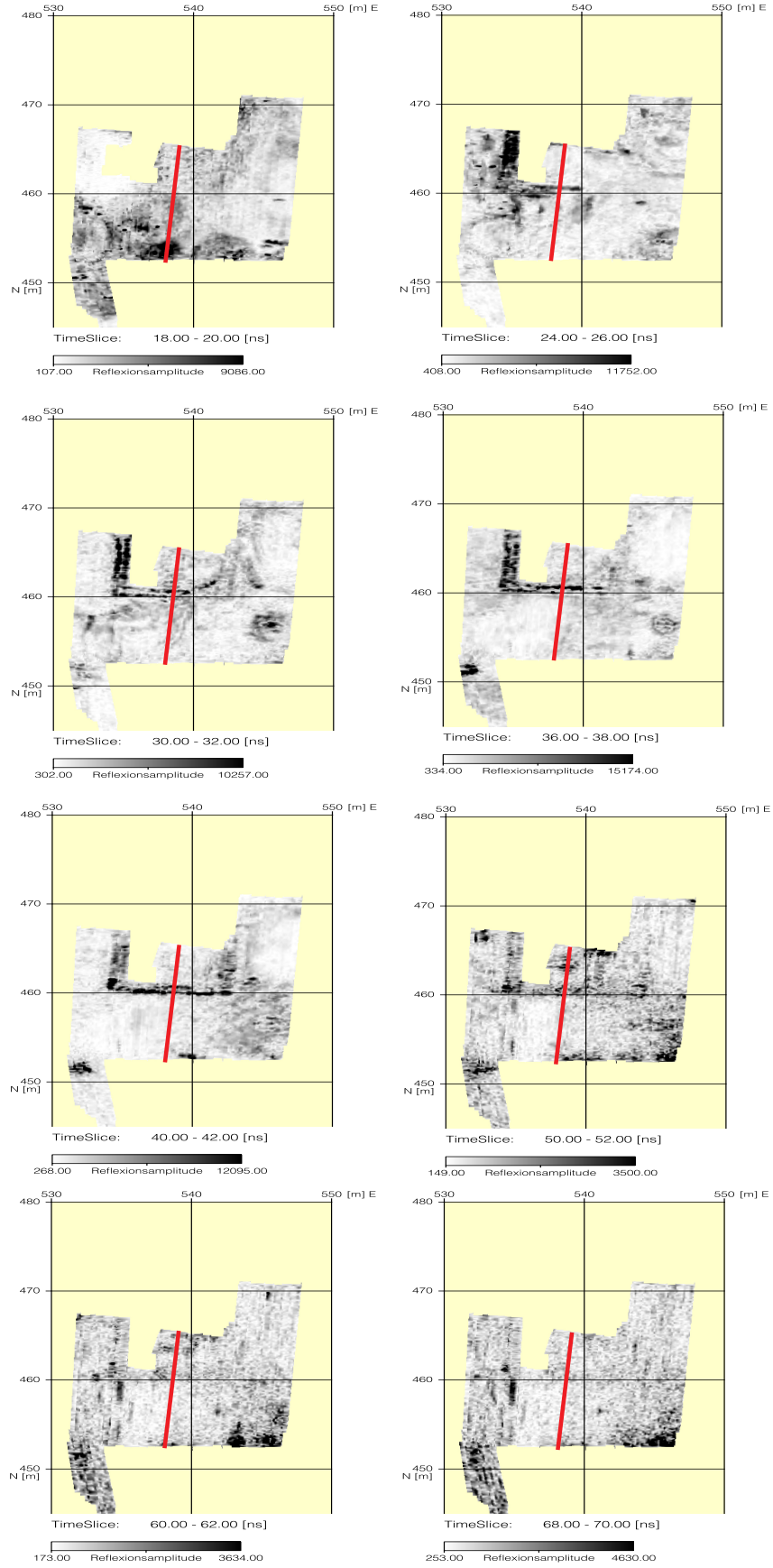
Bu çalışmada radargramlara göç işlemi uygulanmasının amacı yeraltı yapısını modellemektir. Bu sayede gerçek ve teorik radargramlar karşılaştırılmış ve radargramlara migrasyon uygulanarak sonlu farklar ile modelleme sırasında girilen yeraltı modellerine ulaşılmaya çalışılmıştır. Göç uygulanmış gerçek ve teorik radargramlar karşılaştırılarak anten frekansının ve geometrik yapısının jeolojik yapı üzerinde ne kadar etkisi olduğu da araştırılmıştır. Ayrıca Mısır'ın Tuna el Gebel bölgesindeki arkeolojik alandan toplanan yer radarı verileri ile yüksek frekanslı antenler ile bina içinde ölçülen yer radarı verileri modellenmiştir.

5.6. Zaman Dilimleri

Yer radarı verilerini yorumlamada görüntülemenin rolü büyüktür. Yorumlamada kullanılan görüntüleme yöntemi ise araziden toplanan radargramların bilgisayar

ortamında yan yana konularak üç boyutlu olarak görüntülenmesidir. Bu şekilde, belirli zaman derinliklerindeki genlikler çizdirilerek yer altındaki yapının geometrik yapısı görünebilir.

Mısır'ın Tuna el-Gebel arkeolojik sahasında 400 MHz'lik radar anteni ile alınan ölçüler sonucunda 2 ns zaman aralıkları ile zaman dilimleri elde edilmiştir (Şekil 5.12). Zaman dilimlerindeki kırmızı çizgi veri işlem uygulanan radargramın yerini göstermektedir. Burada zaman dilimlerinin aralık seçimi veriyi yorumlayan kişiye aittir.



Şekil 5.12: Mısır'ın Tuna el-Gebel arkeolojik sahasında 400 MHz'lik radar anteni ile alınan ölçüler sonucunda elde edilen zaman dilimleri.

6. MODEL ÇALIŞMALARI

Bu çalışmada teorik radargramlar Knight ve Irving'in 2006'da "Computers and Geoscience" isimli dergide yayımlanan makalelerindeki matlab tabanlı çalışan açık kod ile amaca göre kullanılarak hesaplanmıştır. Radargramların çizimi, veri işlem ve göç (migrasyon) uygulamaları gibi aşamalarda ise Unix işletim sistemi tabanlı çalışan Seismic Unix (SU) programı kullanılmıştır. Göç işlemi uygulanırken Seismic Unix programında SUSTOLT göç uygulaması seçilmiştir. Bu işlem zaman cinsinden hızın değiştiği derinliğe kadar olan bölümün hızının ve zamanının girilmesi ile gerçekleştirilir.

6.1. Teorik Model Çalışmaları

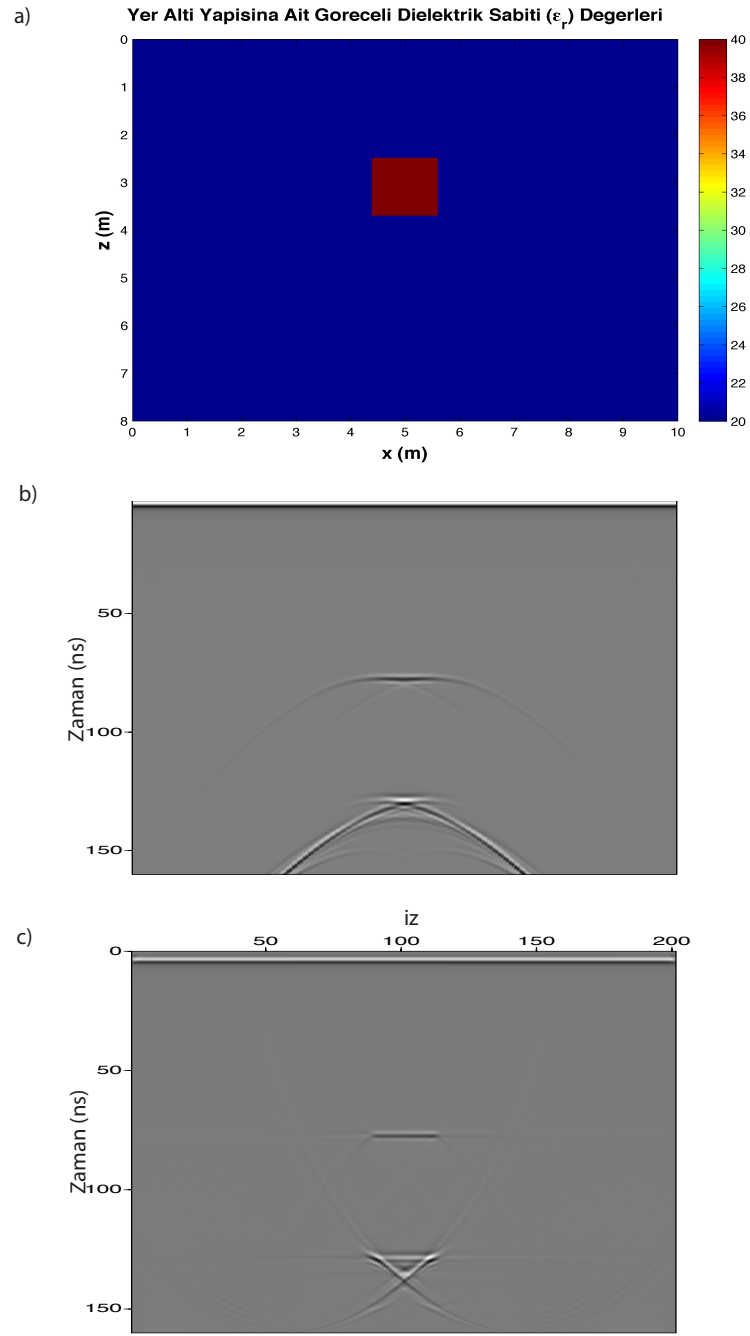
Bu bölümde yer altında bulunabilecek muhtemel yapılar sonlu farklar yöntemi ile modellenmiştir. Jeolojik yapının farklı fiziksel özelliklerinin de radargramlara nasıl yansıdığı gözlemlenmiştir. Bu çalışma bir yer radarı çalışmasına başlamadan önce araştırma yapılacak alanın özelliklerine göre uygulanarak olası sonuçları gözlemlemek için yapılabilir.

6.1.1. Farklı geometrik şekildeki yapılar

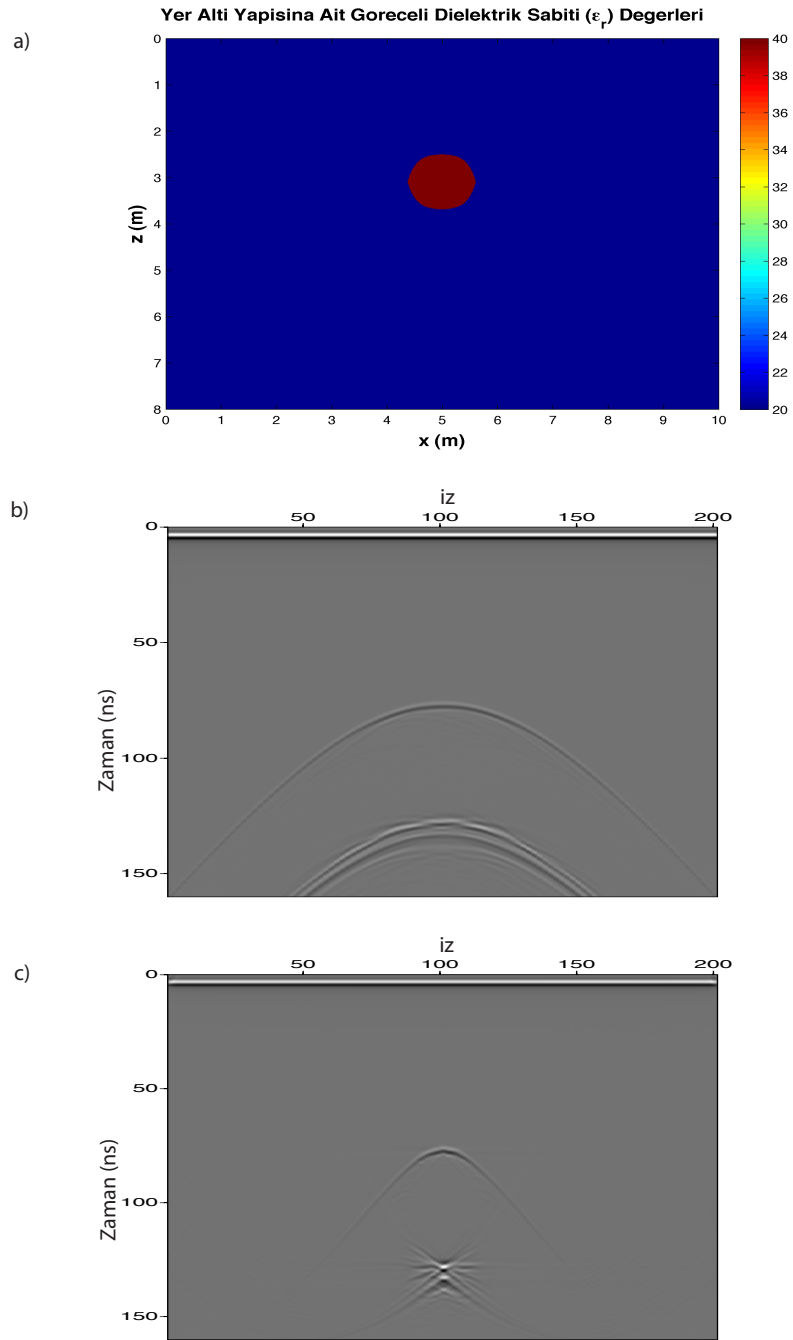
Farklı geometrik şekillerdeki yapılar farklı anomaliler oluşturabilir. Bu model çalışması yer altında bulunması muhtemel kare, daire ve üçgene benzeyen yapıların ne tür anomaliler oluşturacağını anlamak için yapılmıştır. Kare, daire ve üçgen şeklindeki yapıların üst sınır derinliği 2.5 metre alt sınır derinliği ise 3.7 metre olarak alınmıştır. Yapılan çalışmada değiştirilen parametre sadece dielektrik sabitidir. Manyetik geçirgenlik ve iletkenlik değerlerinin yer altının tamamında aynı olduğu kabul edilmiştir. Manyetik geçirgenlik ortamda manyetik özelliği olan bir malzeme bulunmadıkça 1 civarında olduğundan yer altı yapısının tamamı için $\mu_r = 1$

alınmıştır. İletkenlik değeri de yeraltı yapısının tamamı için $\sigma = 0.01$ mS/m olarak alınmıştır. Buna göre çevre yapının dielektrik sabiti $\epsilon_1 = 20$, kare, daire ve üçgen şeklindeki yapının dielektrik sabiti ise $\epsilon_2 = 40$ alınmıştır. Çalışmada 10 metrelik bir profil üzerinde her 5 cm' de bir iz kaydedilmiştir. Çalışmada kullanılan dalga 200 MHz' lik radar anteninden yayılıyorymuş gibi kabul edilmiştir. Bunun sonucunda bu tip yapıların radargramlarda nasıl görüneceği açıklanmaya çalışılmıştır. Uygulanan göç işlemi için hız değerleri teorik radargramlar üzerindeki saçılma hiperbollerinden hesaplanmıştır. Hız değerleri kare ve üçgen modeli için 13cm/ns, daire modeli için ise 12 cm/ns olarak girilmiştir (Şekil 6.1, Şekil 6.2, Şekil 6.3).

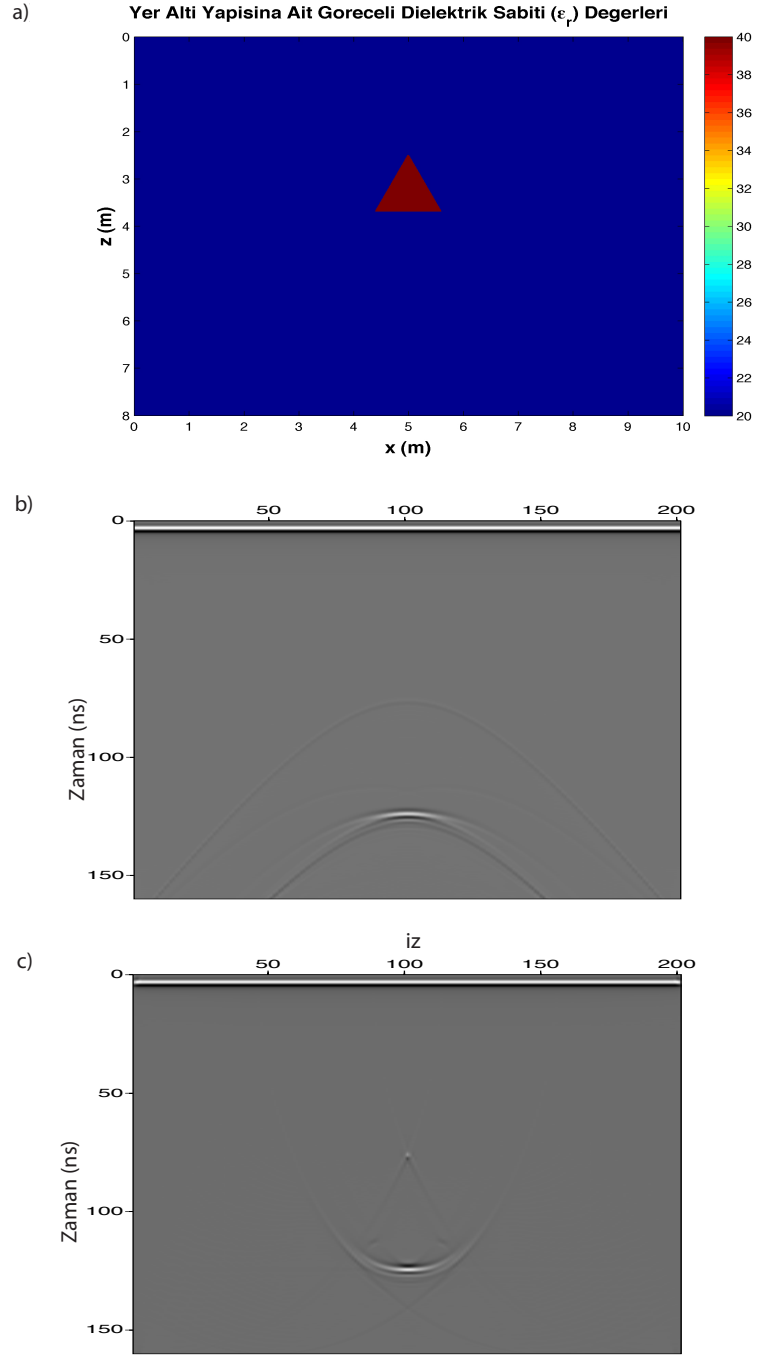
Elde edilen radargramlar değerlendirildiğinde karenin alt ve üst sınırlarını gösteren yansımalar radargramda açıkça görülmektedir. Alt ve üst sınır arasındaki zaman türünden mesafe ortamın dielektrik katsayısına bağlıdır. Dielektrik katsayısı hız ile ters orantılı olduğundan dielektrik katsayısı arttıkça elektromanyetik dalga daha yavaş ilereyecektir. Dolayısıyla dielektrik katsayısı arttıkça karenin alt ve üst sınırlarını gösteren yansımalar arası mesafe artacaktır. Ayrıca elektromanyetik dalga ilerlediği ortamın dielektrik sabitinden daha büyük dielektrik sabitine ait bir ortama geçiyorsa radargramdaki yansımada ilk polarite negatif, dielektrik sabiti daha küçük bir ortama geçiyorsa ilk polarite pozitif görünür (Şekil 6.4). Daire ve üçgen modellerinden hesaplanan radargramların birbirlerine benzediği görülmektedir. Fakat daire modelinden hesaplanan radargramda saçılmaların daha yaygın olduğu, üçgen modelinde ise saçılmanın daha dik olduğu görülmektedir. Üçgen şeklindeki yapıda üçgenin üst köşesi ince olduğundan ilk yansıma çok belirgin olarak görülmemektedir. Fakat üçgenin alt sınırında meydana gelen yansıma daha kuvvetlidir. Göç ettirilmiş radargramlar incelendiğinde ise yapıların üst kısımları belirli hale gelmektedir. Fakat dalganın yayılımı sırasında hedef yapının içinde meydana gelen ardışık yansımalar nedeniyle yapının alt kısımlarının göç sonrası belirgin hale gelmesi mümkün değildir.



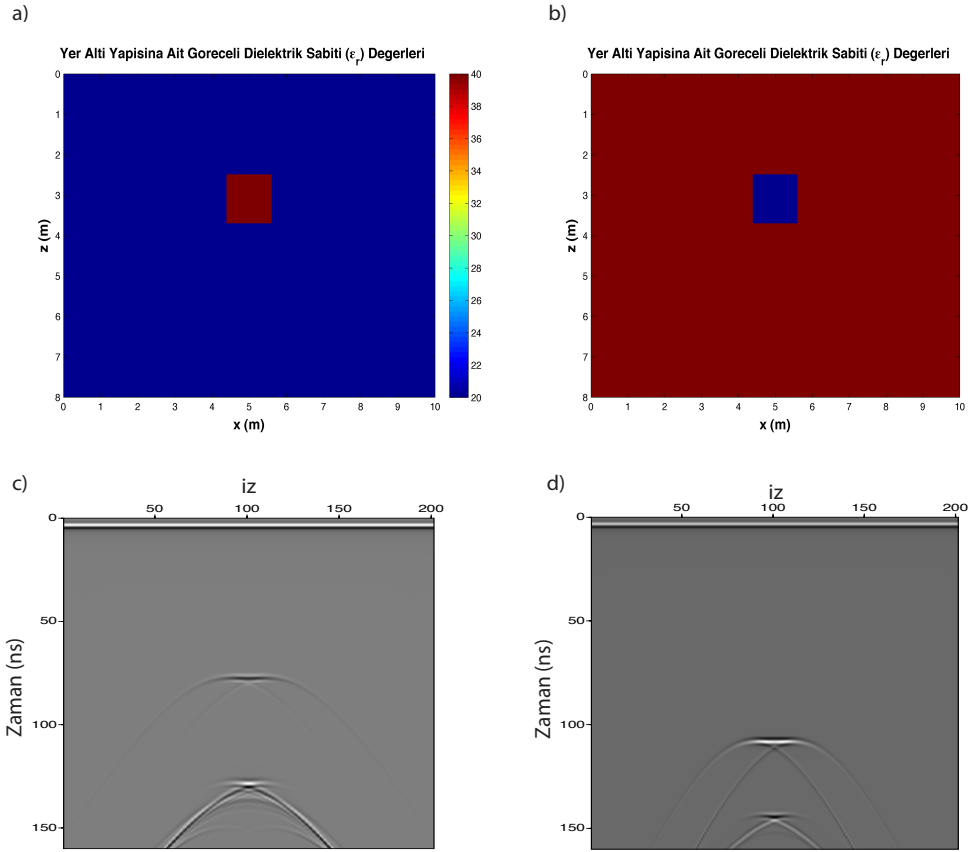
Şekil 6.1: a) Dielektrik sabitini gösteren kare şeklindeki yeraltı modeli, b) bu modele ait elde edilen teorik radargram, c) göç uygulanmış radargram.



Şekil 6.2: a) Dielektrik sabitini gösteren daire şeklindeki yeraltı modeli, b) bu modelden elde edilen teorik radargram, c) göç uygulanmış radargram.



Şekil 6.3: a) Dielektrik sabitini gösteren üçgen şeklindeki yeraltı modeli, b) bu modelden elde edilen teorik radargram, c) göç uygulanmış radargram.



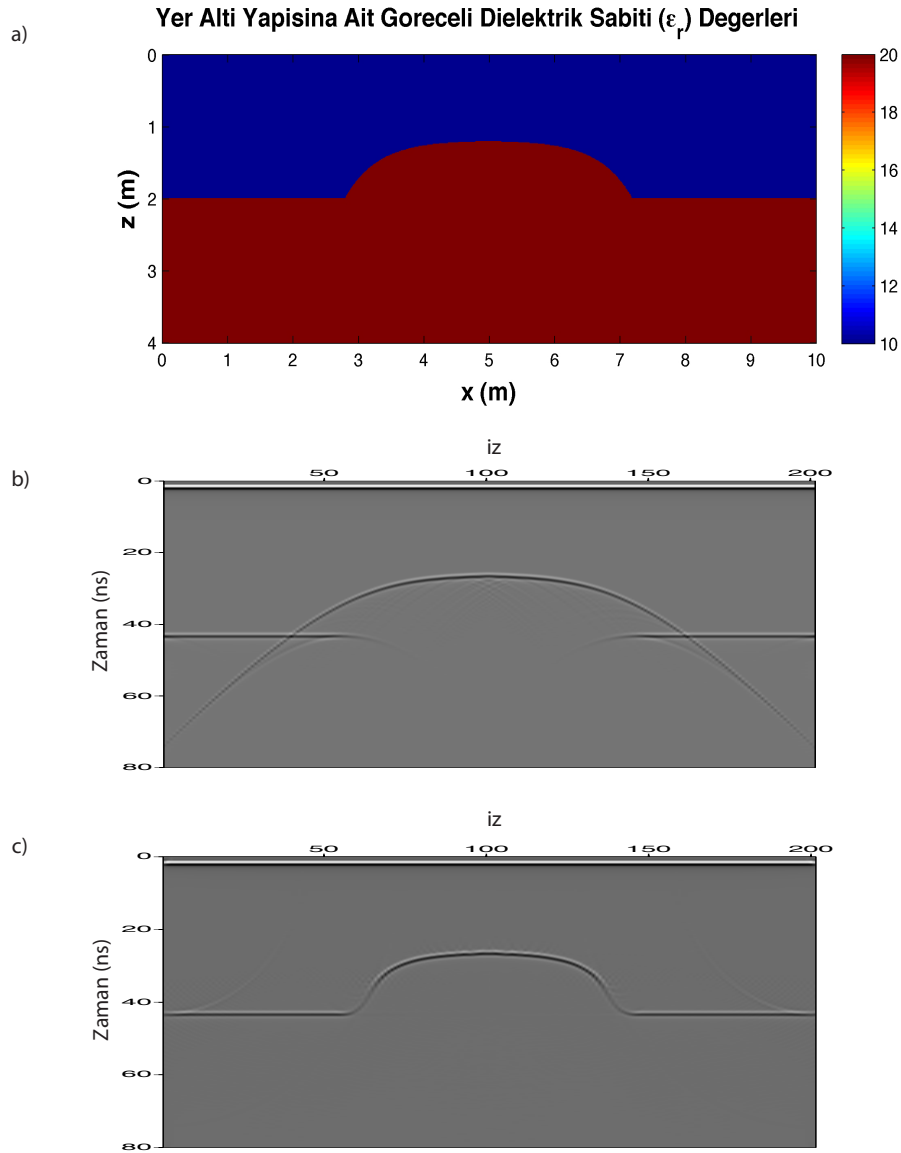
Şekil 6.4: a) Kare şeklindeki yapının dielektrik sabitinin çevre yapıya göre büyük olması durumu, b) kare şeklindeki yapının dielektrik sabitinin çevre yapıya göre küçük olması durumu, c) a modelinden hesaplanan teorik radargram d) b modelinden hesap edilen teorik radargram.

6.1.2. Antiklinal, senklinal ve fay modelleri

Yüzeye yakın jeolojik oluşumları yer radarı yöntemi ile gözlemlemek mümkündür. Bu bölümde antiklinal, senklinal ve fay şeklindeki yapıların radargramlarda muhtemel görüntüsü açıklanmaya çalışılacaktır. Daha sonra teorik radargramlara göç uygulanarak jeolojik modele dönüş yapılacaktır. Göç uygulanan radargramların jeolojik model ile aynı olduğu gözlemlenmiştir.

Antiklinal modeli için 10 m uzunluğunda ve 4 m derinliğinde bir yer altı modeli oluşturulmuştur. Üstteki tabaka için dielektrik sabiti $\epsilon_1 = 10$ alt tabaka için dielektrik sabiti $\epsilon_2 = 20$ olarak girilmiştir. Tüm jeolojik yapı için manyetik geçirgenlik değeri $\mu = 1$, iletkenlik değeri ise $\sigma = 0.01$ mS/m olarak girilmiştir. Sonlu farklar model ağı

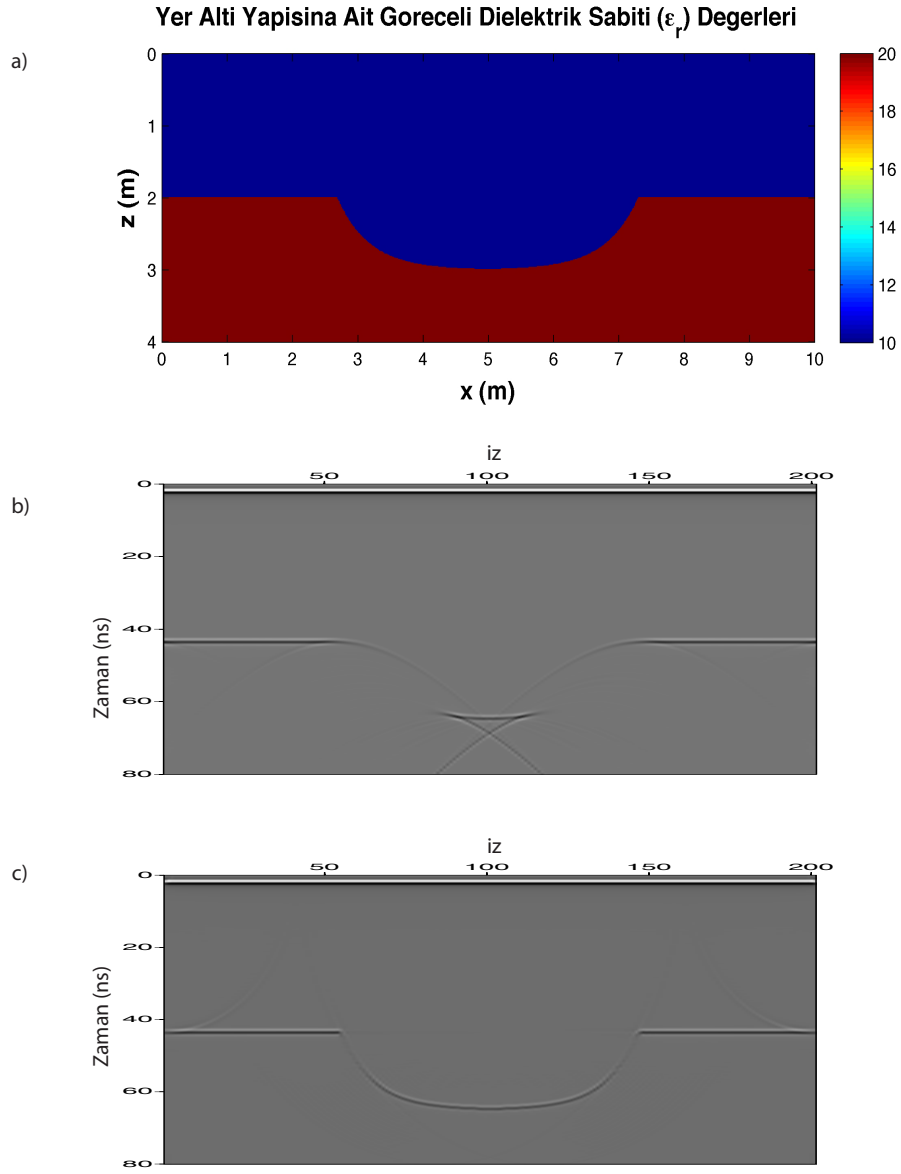
için $dx = 0.01$ m, $dz = 0.01$ m ve $dt = 0.02$ ns olarak girilmiştir. Kullanılan anten frekansı 400 MHz olarak seçilmiş ve kayıt süresi 80 ns olarak tutulmuştur. Her 5 cm' de bir iz kaydedilmiştir. Bu değerler ile antiklinal şeklindeki bir yer altı modeline sonlu farklar yaklaşımı uygulanarak teorik bir radargram hesaplanmıştır. Daha sonra teorik radargrama göç uygulanarak jeolojik yapı modellenmiştir. Göç işlemi, 25 ns' ye kadar 20 cm/ns hız verilerek gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.5).



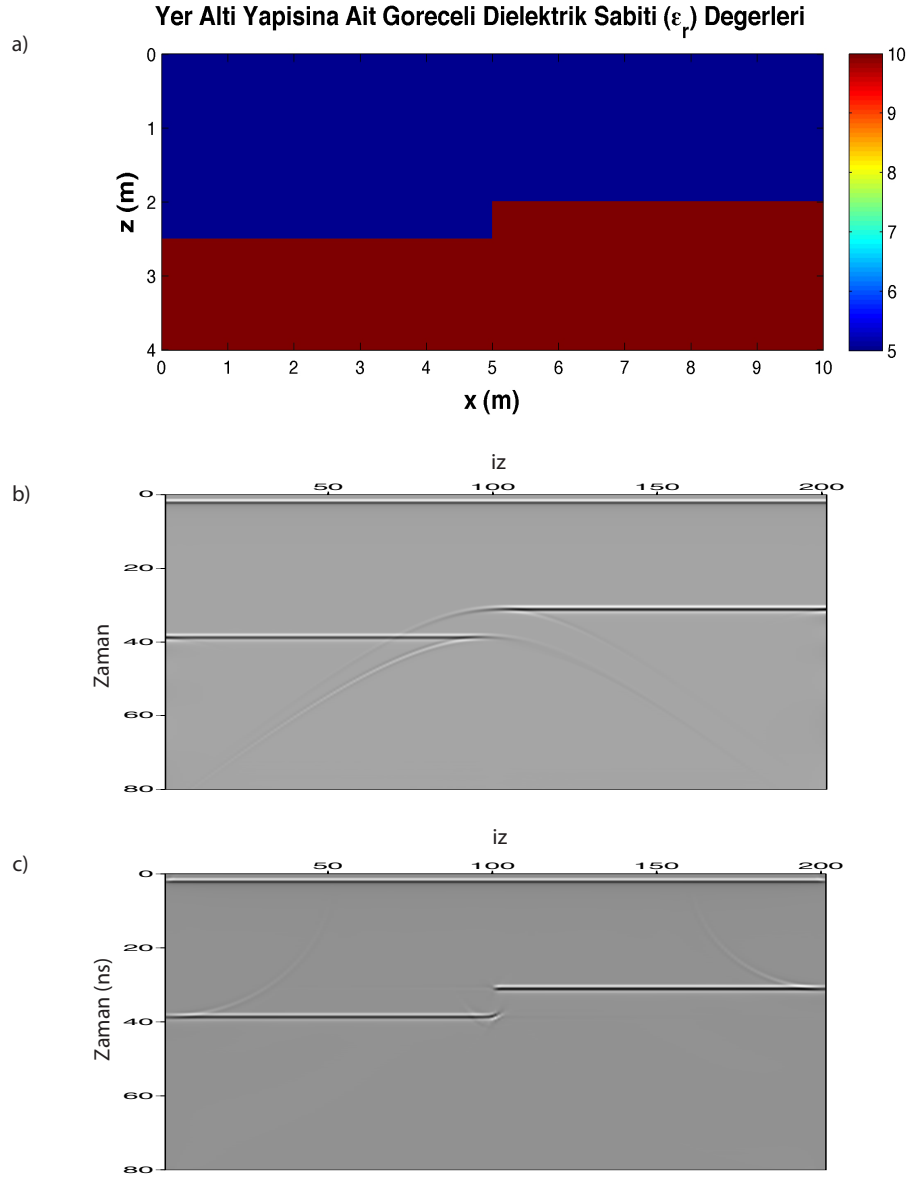
Şekil 6.5: a) Antiklinal modeli için dielektrik sabitini gösteren yer altı modeli, b) bu modelden hesaplanan teorik radargram c) teorik radargrama göç uygulanmış hali.

Senklinal modeli için 10 m uzunluğunda ve 4 m derinliğinde bir yer altı modeli belirlenmiştir. Üstteki tabaka için göreceli dielektrik sabiti $\epsilon_1 = 10$ alt tabaka için göreceli dielektrik sabiti $\epsilon_2 = 20$ olarak girilmiştir. Tüm jeolojik yapı için göreceli manyetik geçirgenlik değeri $\mu = 1$, iletkenlik değeri ise $\sigma = 0.01$ mS/m olarak girilmiştir. Sonlu farklar model ağı için $dx = 0.01$ m, $dz = 0.01$ m ve $dt = 0.02$ ns olarak girilmiştir. Kullanılan anten frekansı 400 MHz olarak seçilmiş ve kayıt süresi 80 ns olarak tutulmuştur. Her 5 cm' de bir iz kaydedilmiştir. Bu değerler ile senklinal şeklindeki bir yer altı modeline sonlu farklar yaklaşımı uygulanarak teorik bir radargram hesaplanmıştır. Daha sonra teorik radargrama göç uygulanarak jeolojik yapı modellenmiştir. Göç işlemi, 42 ns' ye kadar 19 cm/ns hız verilerek gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.6).

Fay modeli için de antiklinal ve senklinal modellerinde olduğu gibi 10 m uzunluğunda ve 4 m derinliğinde bir yer altı modeli belirlenmiştir. Üstteki tabaka için göreceli dielektrik sabiti $\epsilon_1 = 5$ alt tabaka için göreceli dielektrik sabiti $\epsilon_2 = 10$ olarak girilmiştir. Tüm jeolojik yapı için göreceli manyetik geçirgenlik değeri $\mu = 1$, iletkenlik değeri ise $\sigma = 0.01$ mS/m olarak girilmiştir. Sonlu farklar model ağı için $dx = 0.01$ m, $dz = 0.01$ m ve $dt = 0.02$ ns olarak girilmiştir. Kullanılan anten frekansı 400 MHz olarak seçilmiş ve kayıt süresi 80 ns olarak tutulmuştur. Her 5 cm' de bir iz kaydedilmiştir. Fay şeklindeki bir yer altı modeline sonlu farklar yaklaşımı uygulanmış ve teorik bir radargram hesaplanmıştır. Daha sonra teorik radargrama göç uygulanarak jeolojik yapı modellenmiştir. Göç işlemi, 30 ns' ye kadar 26.5 cm/ns hız verilerek gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.7).



Şekil 6.6: a) Senklinal modeli için dielektrik sabitini gösteren yer altı modeli, b) bu modelden hesaplanan teorik radargram c) teorik radargrama göç uygulanmış hali.



Şekil 6.7: a) Fay modeli için dielektrik sabitini gösteren yer altı modeli, b) bu modelden hesaplanan teorik radargram, c) teorik radargrama göç uygulanmış hali.

6.2. Pratik Model Çalışmaları

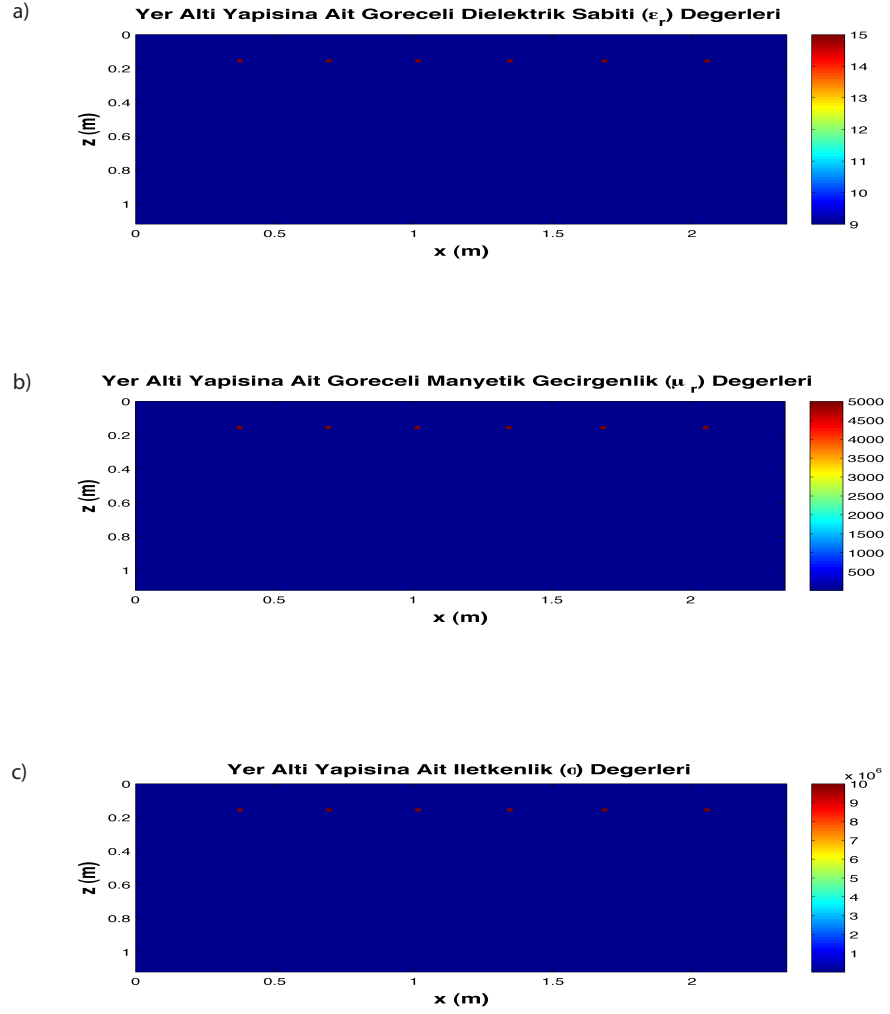
Bu bölümde farklı bölgelerden toplanan yer radarı verilerine iki boyutlu sonlu farklar yöntemi uygulanmıştır. Gerçek arazi verisi göz önünde bulundurularak radargramlardaki saçılmaların ne tür yapılardan kaynaklanacağı düşünülmüş ve buna göre sonlu farklar yöntemi için giriş verisi hazırlanmıştır. Hem kaydedilen gerçek

radargrama hem de verinin toplandığı bölgenin fiziksel ve jeolojik özelliklerine göre hesaplanan teorik radargramlara göç uygulanarak yeraltı yapısı modellenmiştir.

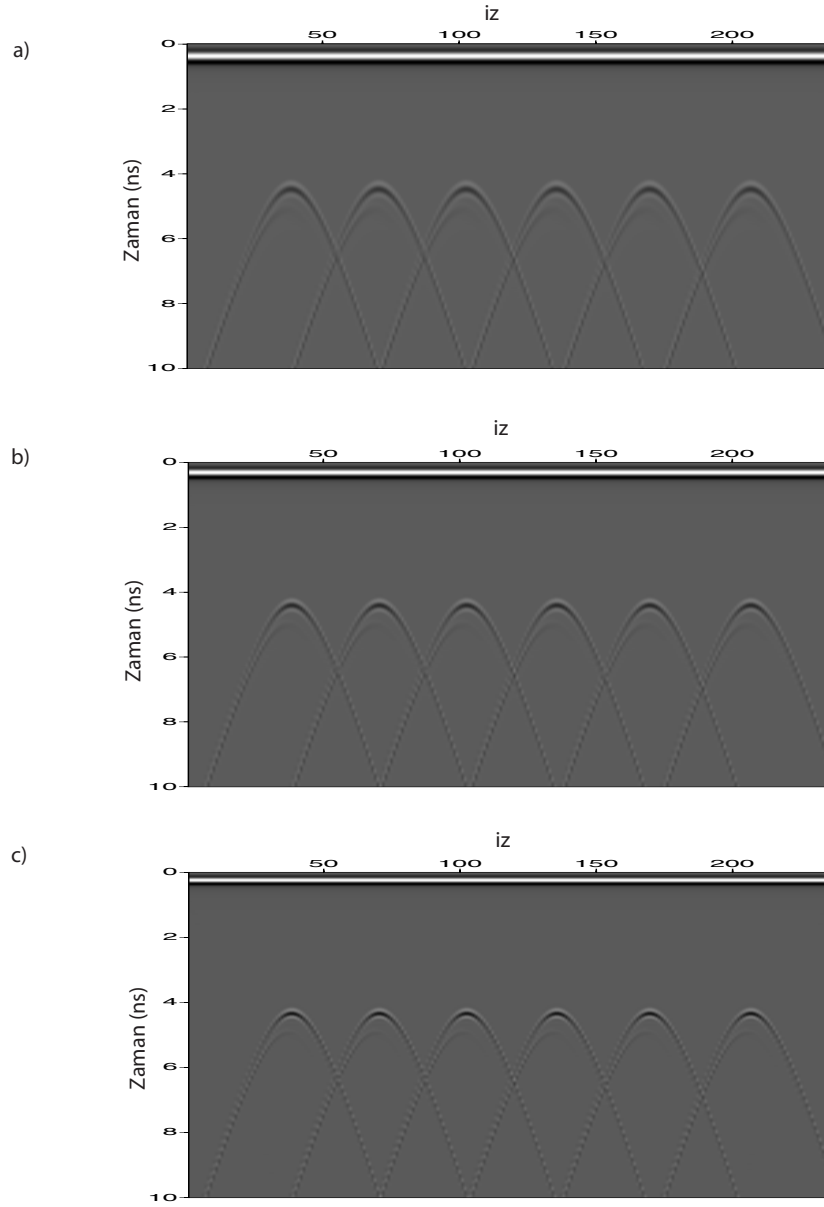
6.2.1. Demir modeli

Bu model çalışması farklı frekanslardaki yer radarı antenlerinin radargramlara etkisini araştırmak için yapılmıştır. Buna göre 1.6 GHz, 2.0 GHz ve 2.6 GHz 'lık radar antenleri ile aynı bölgede yer radarı ölçüsü alınmıştır. Üç farklı antenle de ölçülen bir profil modellenmiştir. Sonlu farklar yönteminin uygulanması için gerekli olan yer altı yapısına ait malzemelemlerin göreceli dielektrik sabiti, iletkenlik ve göreceli manyetik geçirgenlik değerleri laboratuvar çalışmaları sonucunda elde edilen değerler baz alınarak girilmiştir (Şekil 6.8). Sonlu farklar uygulanması sonucu elde edilen radargramlara ve ölçülen radargramlara migrasyon yapılarak radargramlar karşılaştırılmıştır.

Bu yeraltı modeline girilen göreceli dielektrik sabiti beton için $\epsilon_b = 9$ olarak alınmıştır. Bu değer kaydedilen radargramda betonun hızının 10 cm/ns olarak çıkmasından dolayı elektromanyetik dalganın malzeme içindeki hız formülünün (2.16) hesaplanmıştır. Demirin dielektrik sabiti $\epsilon_d = 15$ olarak alınmıştır (Weast R. C., 1978). Betonun manyetik geçirgenliği $\mu_b = 1$, demirin göreceli manyetik geçirgenliği $\mu_d = 5000$ olarak alınmıştır (Balanis, 1989). Beton kum ve su katılarak oluşturulan bir madde olduğundan yaklaşık olarak bu iki maddenin ortak iletkenliği olan $\sigma_b = 0.01$ mS/m betonun iletkenliği olarak alınmıştır (Schön, 1998, Daniels 1996). Demirin iletkenliği ise çok yüksektir. İletkenliğin yüksek olduğu durumlarda yer radarı yöntemi sağlıklı sonuçlar vermez. Fakat bu modelde demirin 2cm x 2cm gibi bir alan kapladığı düşülürse bu durum istenilen anomalinin görülmesini engellemez. Bu durumda demirin iletkenliği göz ardı edilmemiştir ve çok yüksek bir değer olan $\sigma_d = 10000000$ mS/m olarak alınmıştır. Bu modele zaman ortamında iki boyutlu sonlu farklar yöntemi uygulanmış ve uygulama sonucunda üç farklı frekanstaki antenler içinde teorik radargramlar hesaplanmıştır. Model ağında $dx = 0.002$ m, $dz = 0.002$ m ve $dt = 0.01$ ns olarak üç anten içinde aynı seçilmiştir. Her 0.01m' de bir iz kaydedilmiştir (Şekil 6.9).



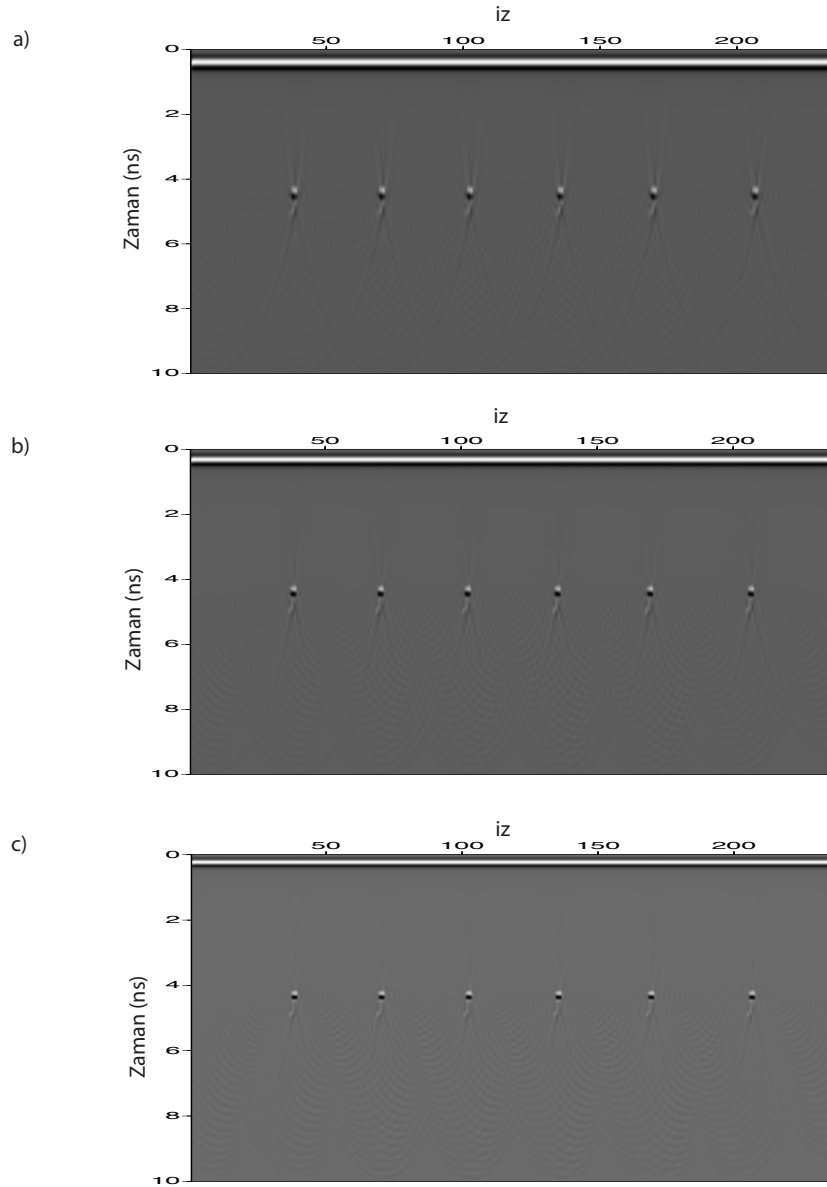
Şekil 6.8: Beton içinde bulunan demir için a) dielektrik sabiti, b) manyetik geçirgenlik, c) iletkenlik değerlerini gösteren yer altı modeli.



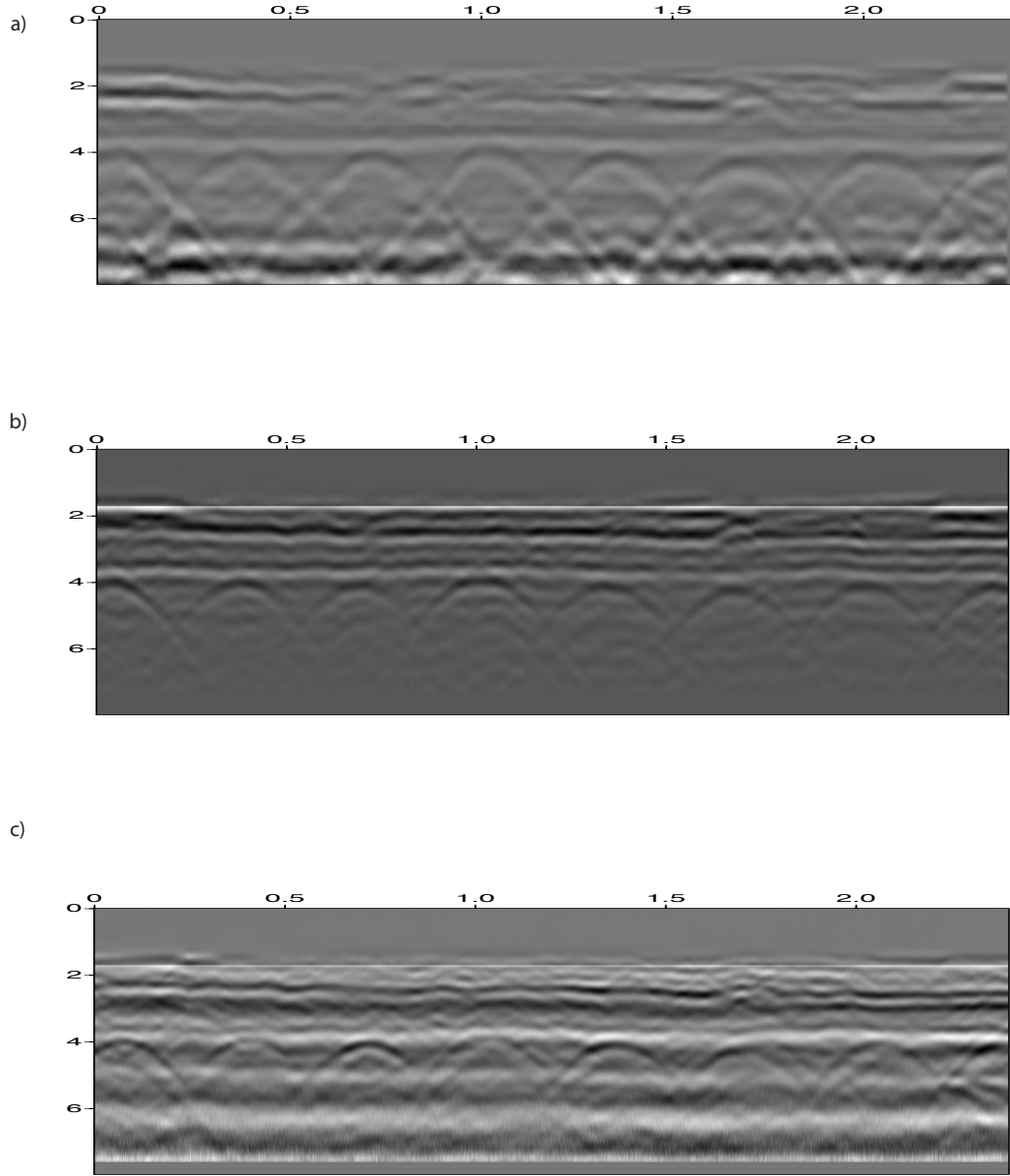
Şekil 6.9: Şekil 6.7’deki yer altı modelinden hesaplanan a) 1.6 GHz, b) 2.0 GHz, c) 2.6 GHz için teorik radargramlar.

Burada üç farklı frekanstaki antenler için karşılaştırma yapıldığında, 1.6 GHz’ lik anten için hesaplanan teorik radargramda görülen anomalinin dalga boyunun en büyük, 2.6 GHz’ lik anten için hesaplanan teorik radargramda görülen anomalinin dalga boyunun en küçük olduğu görülmektedir. Elde edilen bu radargramlara göç uygulanarak yeraltı modeline dönüş yapılmış ve modellenmiştir. Göç işlemi için betonun hızı 10 cm/ns girilmiştir (Şekil 6.10).

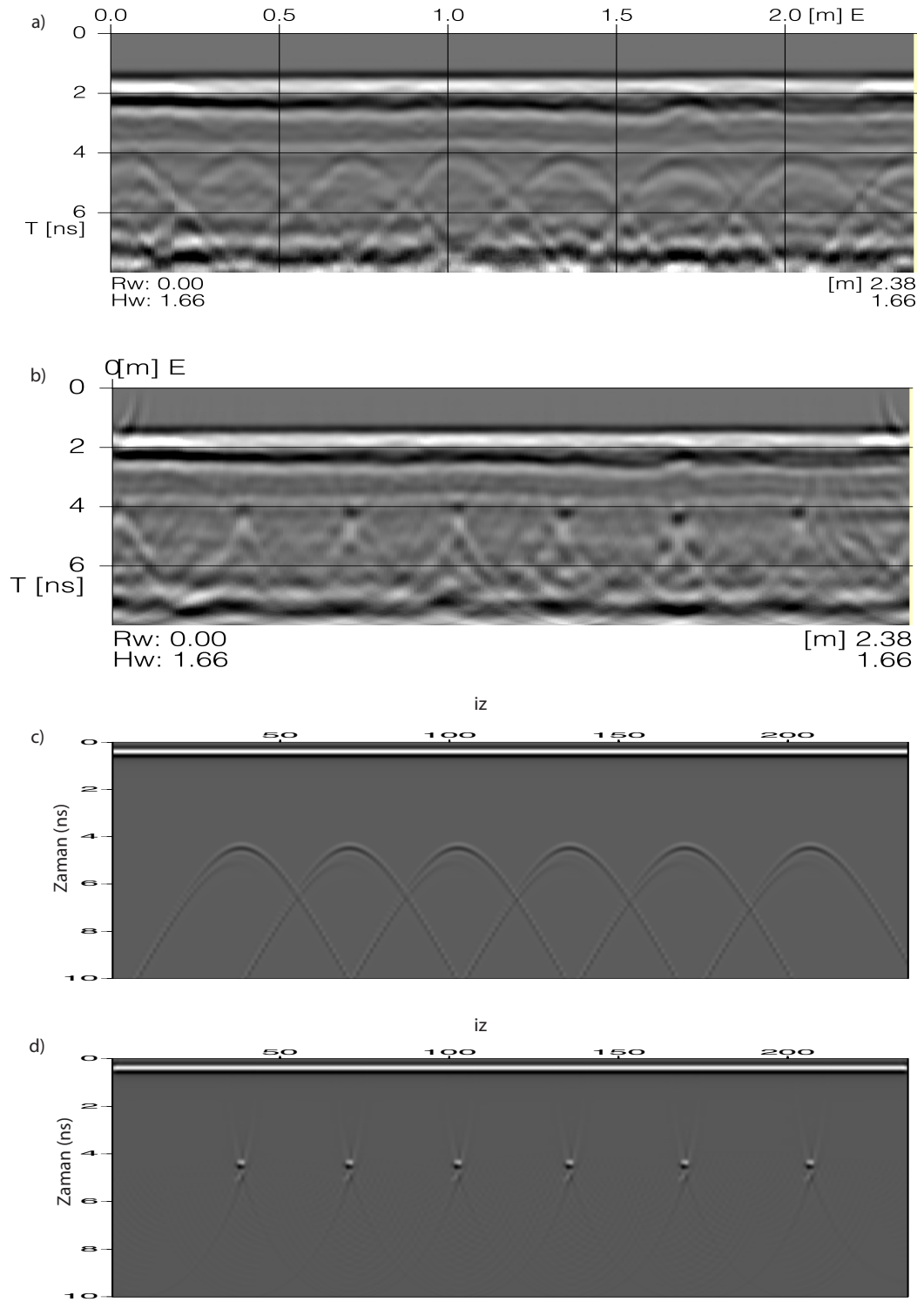
Şekil 6.11’de ise üç farklı frekanstaki antenler ile aynı profil üzerinde kaydedilen radargramlar görülmektedir. 1.6 GHz frekansındaki anten ile aynı profil üzerinde kaydedilen radargram ve göç uygulanmış hali, hesaplanan teorik radargram ve onun göç uygulanmış hali ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonunda migrasyon uygulanmış gerçek ve teorik radargramların girilen yeraltı yapısına benzer olduğu görülmektedir (Şekil 6.12).



Şekil 6.10: a) 1.6 GHz, b) 2.0 GHz, c) 2.6 GHz ‘lık antenler için hesaplanmış teorik radargramların göç uygulanmış hali.



Şekil 6.11: a) 1.6 GHz, b) 2.0 GHz, c) 2.6 GHz 'lık antenler ile aynı profil üzerinde kaydedilmiş radargramlar.



Şekil 6.12: a) 1.6 GHz'lik anten ile ölçüm sonucu kaydedilen radargram, b) göç uygulanmış hali, c) 1.6 GHz'lik anten için hesaplanan teorik radargram, d) göç uygulanmış hali.

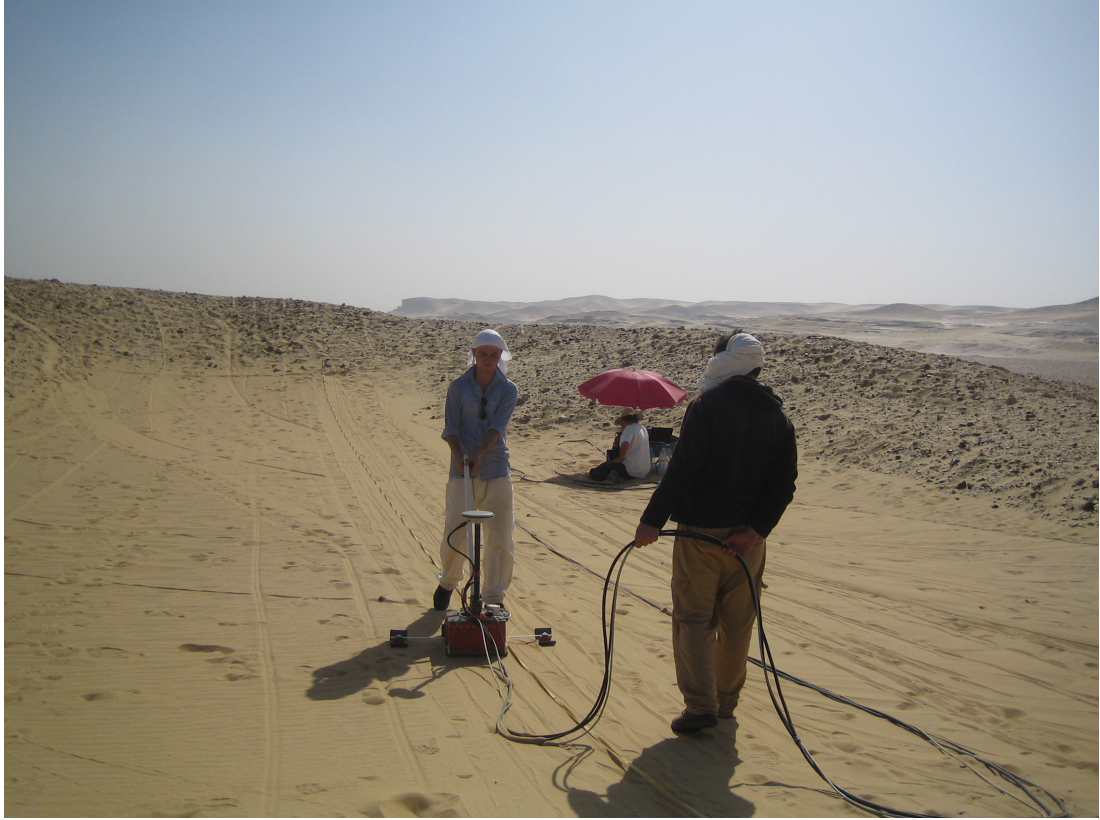
6.2.2. Tuna el-Gebel (Mısır) arkeolojik alanı verileri için bir model

Yer radarı çalışması Mısır'ın orta kesimlerinde başkent Kahire'nin yaklaşık 650 km güneyinde Tuna el-Gebel bölgesinde yapılmıştır. Alan Nil Nehri'nin yaklaşık 25 km doğusundadır (Şekil 6.13). Tuna el-Gebel M.Ö. 3. yüzyılda tarihi Hermopolis şehrinin nekropolünü oluşturmaktadır. Bu nekropolde büyük mezar taşları, tapınaklar ve kumun altında kalmış tarihi duvar kalıntıları bulunmaktadır. Çölün başlangıç kısmında bulunan bölge tamamen kum ile kaplıdır.



Şekil 6.13: Tuna el-Gebel (Mısır) araştırma alanı.

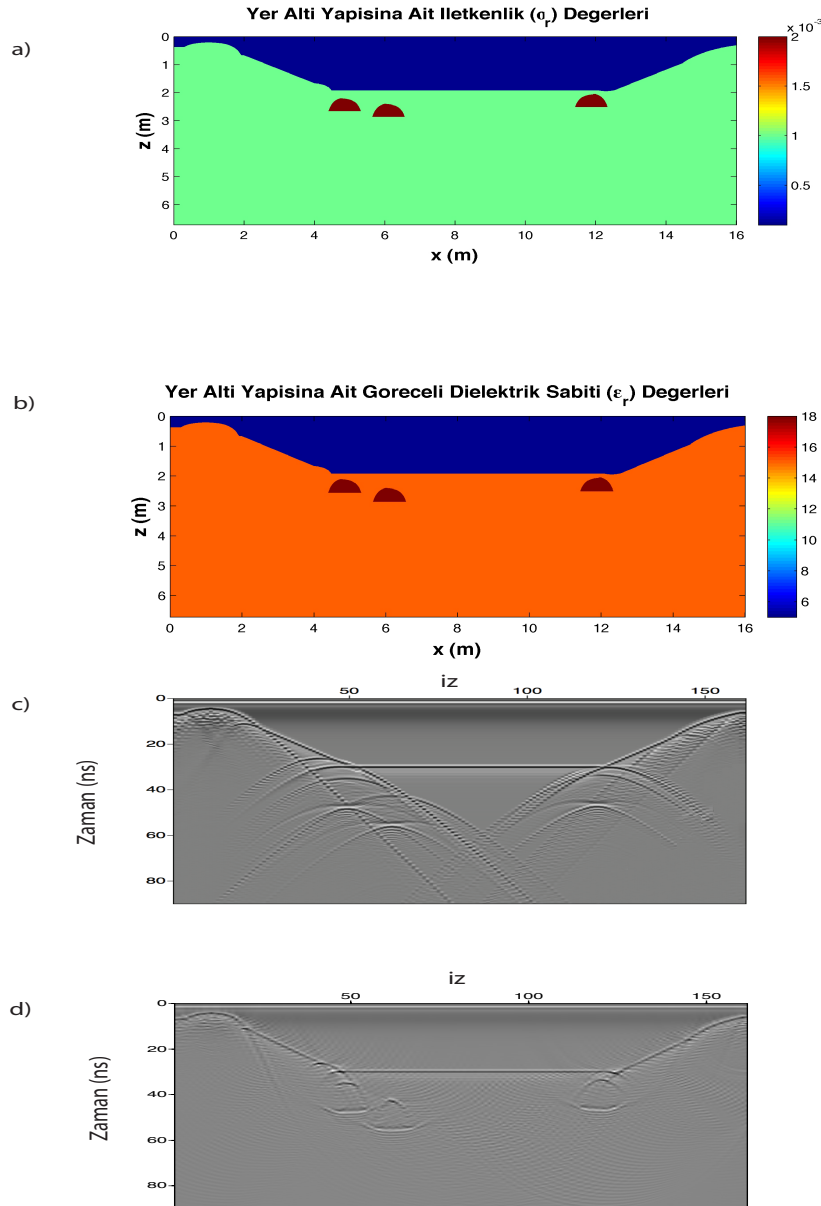
Bu bölgede yer radarı ve manyetik çalışmaları yapılmıştır (Şekil 6.14). Yapılan yer radarı çalışmasından seçilen bir radargram bu çalışmada modellenmiştir.



Şekil 6.14: Uygulama alanında yapılan yer radarı çalışması.

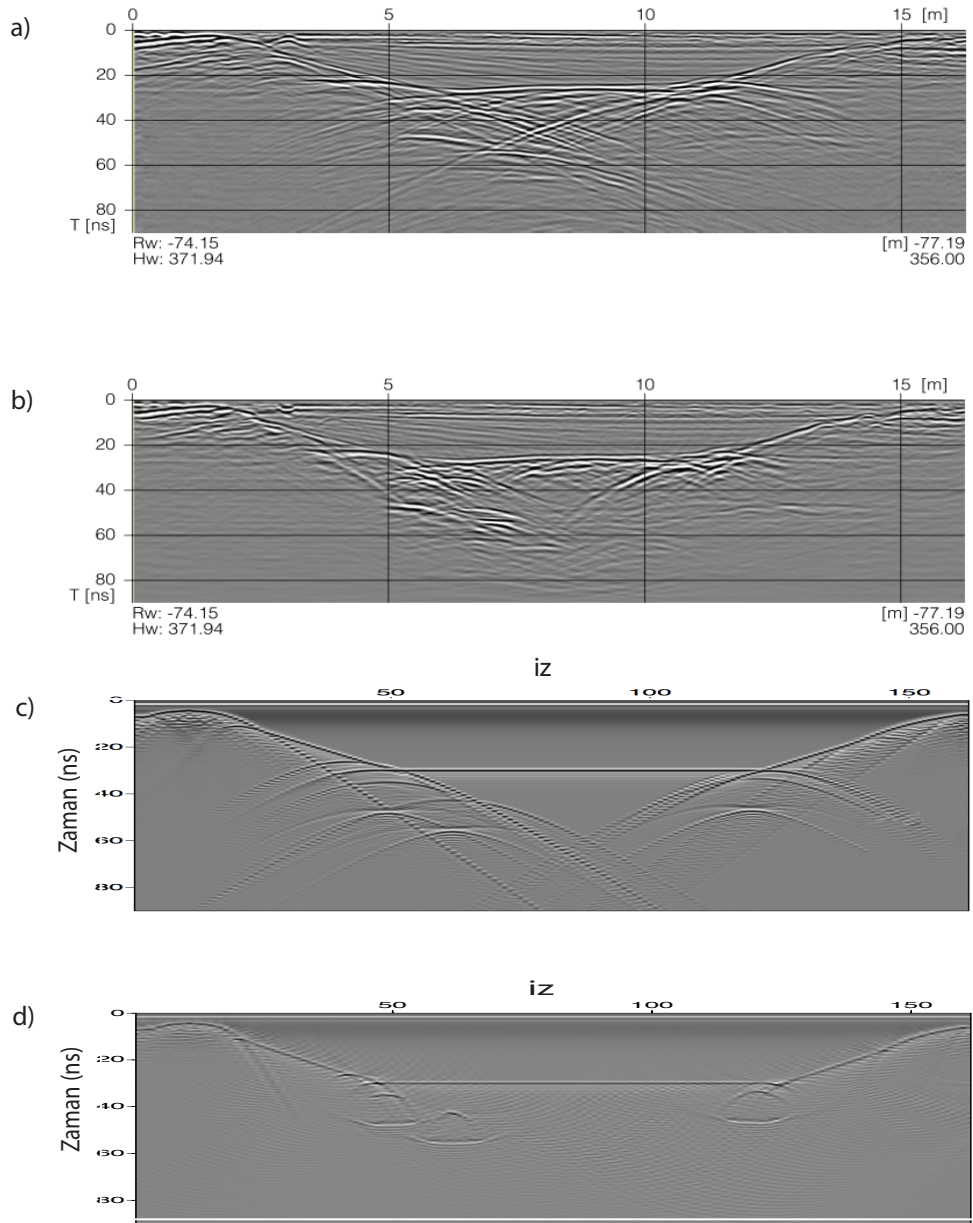
Seçilen radargram senklinal bir yapıya benzemektedir. Bu yapının zamanla aşınmış, yıkılmış ve ortasının kum ile dolmuş duvar kalıntıları olduğu düşünülmektedir. Bu radargramdan yola çıkılarak bir yer altı modeli belirlenmiş ve FDTD yöntemi için giriş verisi hazırlanmıştır. Buna göre kum olduğu düşünülen bölümün göreceli dielektrik sabiti $\epsilon_s = 5$, pişmiş kilden yapıldığı düşünülen duvarlar için göreceli dielektrik sabiti $\epsilon_c = 15$, ilk kuvvetli yansımaların altında bulunan fakat anomali oluşturduğundan ötürü aynı özellikte olmayacağı düşünülen ve daha kuru kilden olduğu düşünülen yarım daire şeklindeki yapılar için göreceli dielektrik sabiti $\epsilon_{c2} = 18$ olarak girilmiştir. Bu yapılar için iletkenlik değerleri sırasıyla $\sigma_s = 0.001$ mS/m, $\sigma_c = 0.01$ mS/m ve $\sigma_{c2} = 0.02$ mS/m olarak girilmiştir. Burada iletkenliğin kil oranının artması ile yükseldiği düşünülmüştür. Bölgede yapılan manyetik çalışmasındaki değişim yaklaşık 2 nT kadar olduğundan, yapıda manyetik özellik

içeren malzemenin olmadığı düşünülmüştür. Oluşturulan modelin uzunluğu 16 metre, derinliği ise 7 metredir. Buna göre her 10 cm’de bir iz hesaplanmıştır. Sonlu farklar model ağı için $dx = 0.01$ m, $dz = 0.01$ m $dt=0.04$ ns’ dir. Kayıt uzunluğu 90 ns olarak tutulmuştur. Buna göre de manyetik geçirgenlik değeri bütün yer altı modeli için $\mu=1$ olarak belirlenmiştir. Bu yer altı modeline göre yer altı yapısı FDTD yöntemi ile modellenmiş ve teorik bir radargram hesaplanmıştır (Şekil 6.15).



Şekil 6.15: a) Dielektrik sabiti değerlerini gösteren yeraltı yapısı, b) iletkenlik değerlerini gösteren yeraltı yapısı, c) FDTD yöntemi ile modellenerek hesaplanmış radargram, d) radargrama göç uygulanmış hali.

Hesaplanan teorik radargram ve göç uygulanmış hali arazide kaydedilen radargram ve onun göç ettirilmiş hali ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda göç uygulanmış radargramların benzerliğinden dolayı modelin geometrisinin ve fiziksel özelliklerinin kabaca doğru tahmin edilmiş olduğu görülmektedir (Şekil 6.16).



Şekil 6.16: a) Arazide kaydedilmiş radargram, b) arazide kaydedilen radargrama göç uygulanmış hali, c) hesaplanan teorik radargram, d) hesaplanan teorik radargrama göç uygulanmış hali.

SONUÇLAR

İki boyutlu ortamda farklı dielektrik özelliklere sahip yeraltı yapıları hazırlanarak FDTD (zaman ortamında sonlu farklar) yöntemi ile teorik radargramlar elde edilmiştir. Elde edilen bu radargramlar sıfır ofset aralığı olan alıcı ve verici anten ile yer yüzeyinde uygulandığı düşünülerek hesaplanmıştır. Farklı fiziksel özelliklere sahip geometrik yapıların radargramlar üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu yeraltı yapıları yaklaşık olarak girilen dielektrik katsayısı, manyetik geçirgenlik ve iletkenlik değerleri ile zaman ortamında iki boyutlu sonlu farklar yöntemi ile modellenmiştir.

Teorik çalışmaların yanı sıra gerçek arazi verileri de modellenmiştir. Bir binanın zemininde yapılan ve beton içindeki demirlerin yerlerinin belirlenmesini amaçlayan çalışma sonucundaki radargramlar da FDTD yöntemi ile modellenmiştir. Bu çalışmada kullanılan farklı frekanslardaki 3 antenin radargramlara etkisi araştırılmıştır. Mısır'ın Tuna el-Gebel arkeolojik bölgesinde yapılan yer radarı çalışmasına ait bir radargram da FDTD yöntemi ile modellenmiştir. Senklinal yapıya sahip bu yer altı modeli ana hatları ile açıklanmıştır. Bu sonuçla arazi verisinin yorumu kolaylaşmıştır.

Göç uygulayarak teorik radargramlar ile yeraltı yapılarının geometrik şekillerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Göç uygulanan teorik radargramlar ve gerçek radargramlar FDTD yöntemi için oluşturulan yeraltı modelleri ile karşılaştırılmış ve yeraltı yapısının geometrisi ve fiziksel özellikleri belirlenmiştir.

Çalışma yapıldıktan sonra elde edilen radargramlardan yola çıkarak yeraltı yapıları bu yöntemle modellenebilir. Ayrıca bu yöntem ile yer radarı uygulaması yapılacak olan bölgede çalışma yapmadan önce yeraltının fiziksel özellikleri ve geometrik yapısı tahminler doğrultusunda girilerek nasıl sonuçlar elde edilebileceği izlenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Annan, A.P., “Ground Penetrating Radar Principles, Procedures & Applications” ***Sensors and Softwares Inc.***, (2004).
- [2] Annan, A.P., “Ground Penetrating Radar”, Near Surface Geophysics Part 1: Concept and Fundamentals, Butler, D.K.(Ed.), Investigations in Geophysics No.13, ***SEG Foundation***, (2005).
- [3] Annan, A.P., “Electromagnetic Principles of Ground Penetrating Radar”, In Ground Penetrating Radar: Theory and Applications”, Jol, H.M.(Ed.), ***Elsevier***, (2009).
- [4] Balanis, C.A., “Advanced Engineering Electromagnetics”, ***John Willey&Sons***, (1989).
- [5] Cook, J. C., “Status of ground-probing radar and some recent experience”, ***Proc. Conf. Subsurface Exploration for Underground Excavation and Heavy Construction. Am. Soc. Civ. Eng.***, pp. 213-232, (1974).
- [6] Cook, J. C., “Radar transparencies of mine and tunnel rocks”, ***Geophysics***, 40, pp. 865-885, (1975).
- [7] Cassidy, N.J., “Electrical and Magnetic Properties of Rocks, Soils and Fluids”, In Ground Penetrating Radar: Theory and Applications, Jol, H.M.(Ed.), ***Elsevier***, (2009).
- [8] Daniels, D., “Surface Penetrating Radar The Institution of Electrical Engineers”, ***London***, (1996).
- [9] Dondurur, D., “Deniz Sismiğinde Veri İşlem”, ***TMMOB Jeofizik Mühendisleri Odası Eğitim Yayınları No:11***, (2009).
- [10] Forsythe, G. E., Wasow, W. R., Finite difference methods for partial differential equations, ***John Wiley and Sons Inc.***, New York (1960).
- [11] Georgakopoulos, S. V., Birtcher, C. R., Balanis, C.A., Renault, R.A., Higher-order finite-difference schemes for electromagnetic radiation, scattering and penetration, Part 1: theory, ***IEEE Antennas and Propagation Magazine 44***, 134 - 142, (2002).

- [12] Hülsenbeck , **German Patent No. 489434**, (1926).
- [13] Hülsmeier, C., **German Patent Number 165545**, (1904).
- [14] Irving, J.D., Knight, R., “Numerical modeling of ground-penetrating radar in 2-D using MATLAB” , **Computers & Geosciences** 32, 1247–1258, (2006).
- [15] Irving, J., “Improving tomographic estimates of subsurface electromagnetic wave velocity obtained from ground-penetrating radar data”, Doctor of Philosophy, **Stanford University**, (2006).
- [16] Knight, R., “Ground Penetrating Radar For Environmental Applications”, **Annu. Rev. Earth Planet. Sci.**, (2001).
- [17] Knödel, E., Krummel, M., Lanke, J., “Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten/BGR” **Bd.3 Geophysik Springer-Verlag, Berlin- Heidelberg**, (1997).
- [18] Kurt, B.B., “Zaman Ortamında Sonlu Farklar Yöntemi İle İki Boyutlu Yer Radarı Modellemesi”, **Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, (2009).
- [19] Kurtuluş, C., “Sismik Arama Ders Kitabı”, **Kocaeli Üniversitesi Yayınları**, Yayın No: 5, (2002).
- [20] Kuzuoglu, M., Mittra, R., “Frequency dependence of the constitutive parameters of causal perfectly matched anisotropic absorbers”, **IEEE Microwave and Guided Wave Letters** 6, 447–449, (1996).
- [21] Liner, C. Seismic Unix Help Page, Colorado School of Mines [online], <http://sepwww.stanford.edu/oldsep/cliner/files/suhelp/suhelp.html>, (**Ziyaret Tarihi: 3 Şubat 2011**).
- [22] Löwy, H., German Patent Number 245517, (1911).
- [23] Luebbers, R. J. and Hunsberger F., “FDTD for Nth-order dispersive media”, **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, 40, 1297-1301, (1992).
- [24] Mala Geoscience, “Basic Radar Theory, Fundamentals of Ground Penetrating Radar (CD)”, **Sweden**, (2003).
- [25] Maloney, J. G., Smith, S. S., “The Use of Surface Impedance Concepts in the

Finite-Difference Time-Domain Method”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 40 No.1, (1992)

[26] Morey, R.M., “Continuous subsurface profiling by impulse radar”, In Proc.Eng.Foundation Conf.on Subsurf. Explor. for Underground Excavation and Heavy Constr., Henniker, NH, 8/11-16/74, *Am.Soc.Civil Engrs.*, 213-232. (1974).

[27] Neal, A., “Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress”, *Earth Science*, 66, 261-330, (2004).

[28] Özkap, K. “Arkeojeofizik Çalışmalarda GPR Verilerine Güncel Veri-İşlem Yöntemlerinin Uygulanması”, *Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2008).

[29] Öztürk, K., “Elektrik ve Elektromanyetik Prospeksiyon Yöntemleri, Temel Kavramlar, Uygulama ve Yorumlama”, *İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, İstanbul*, (1995).

[30] Poynting, J. H., “On the transfer of energy in the electromagnetic field”, *Phil. Trans.*, Vol.174 P.343, (1883).

[31] Roe, K.C., Ellerbruch, D.A., Development and testing of a microwave system to measure coal layer thickness up to 25 cm, *Nat. Bur. Stds.*, Report No.SR-723-8-79 (Boulder, CO), (1979).

[32] Sadiku, M.N.O., “Numerical Techniques in Electromagnetics” 2nd Edition, *CRC Press*, (1992).

[33] Sadiku, M.N.O., “Elements of Electromagnetics”, *Oxford Series in Electrical and Computer Engineering*, (1995).

[34] Schön, J., Physical Properties of Rocks Fundamentals and Principle of Petrophysics”, *Bd. 18, Pergamon*, (1998).

[35] Sears, F.W., Zemansky, M.W., and Young H.D., “University Physics” 6th. Edition *Addison-Westley Publishing Company*, (1982).

[36] Sensors & Softwares, “Practical Processing of GPR Data”, *Canada*, (1999).

[37] Stern, W., “Principles methods and results of electrodynamic thickness measurements of glacier ice”, *Zeitschrift für Gletscherkunde*, 18-24, (1930).

- [38] 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.
- [39] Yılmaz, Ö., “Seismic Data Processing”, ***Society of Exploration Geophysics***, Series: Investigation in Geophysics, Volume:2, (1987).
- [40] Van der Kruk, J., Streich, R., Green, A.G., “Properties of surface waveguides derived from separate and joint inversion of dispersive TE and TM GPR data”, ***Geophysics***, Vol. 71, No.1, (2006).
- [41] Walther, E.G., Pitchford A.M., Olhoeft G.R., “A strategy for detecting subsurface organic contaminants” ***Natl. Water Well Assoc./API Conf. Petrol. Hydrocarb. Org. Chem. Ground Water Prev., Detect. Restor., Houston, Nov. 12–14, pp. 357–81. Dublin***, OH: Natl. Water Well Assoc, (1986).
- [42] Yee, K.S., “Numerical solution of initial boundary problems involving Maxwell’s equations in isotropic media”, ***IEEE Trans. Ant. Prop.***, Ap-14 P 302-309, (1966).
- [43] Weast, R.C., “Handbook of Chemistry and Physics”, 59th Edition, ***CRC Press*** (1978).

EK -1

Poynting Teoremi Ve Enerjinin Korunumu

Poynting vektörü elektromanyetik dalganın ilerlediği yönü ifade eden vektörel bir büyüklüktür. Bu vektör elektrik ve manyetik alan vektörlerinin vektörel çarpımı ile hesap edilir.

$$S = E \times H \quad (E1.1)$$

Burada arayüzeye gelen dalga için ilerleme yönü S_{av}^i , arayüzeyden yansıyan dalga için ilerleme yönü S_{av}^r ve iletilen dalga için ilerleme yönü S_{av}^t ile gösterilirse;

$$S_{av}^i = \frac{1}{2} \text{Re}(E^i \times H^i) \quad (E1.2)$$

$$S_{av}^t = \frac{1}{2} \text{Re}(E^t \times H^t) \quad (E1.3)$$

$$S_{av}^r = \frac{1}{2} \text{Re}(E^r \times H^r) \quad (E1.4)$$

olarak verilir. Buradan;

$$\frac{S_{av}^r}{S_{av}^i} + \frac{S_{av}^t}{S_{av}^i} = 1 \quad (E1.5)$$

ve

$$R + T = 1 \quad (E1.6)$$

olarak ifade edilir. Buradan anlaşılacağı üzere enerjinin korunumu sağlanmıştır. Enerjinin korunumu ile ilgili detaylı bilgi Balanis (1989) ve Sadiku (1995)'den edinilebilir. Konunun daha iyi anlaşılabilmesi için aşağıdaki sayısal örneği inceleyelim.

Göreceli dielektrik sabiti 4 ve göreceli manyetik geçirgenliği 1 olan bir ortamda hareket eden ve ara yüzeye dik olarak gelen bir düzlem dalga göreceli dielektrik sabiti 9 ve göreceli manyetik geçirgenliği 1 olan bir ortama geldiğinde yansıma ve geçirim katsayıları verilsin. Bu değerler Bölüm 2'de (2.22) ve (2.23) bağıntılarında yerine konulursa;

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{\sqrt{\frac{1}{9}} - \sqrt{\frac{1}{4}}}{\sqrt{\frac{1}{9}} + \sqrt{\frac{1}{4}}} = \frac{2-3}{2+3} = -\frac{1}{5} = -0.2$$

$$T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} = \frac{2\sqrt{\frac{1}{9}}}{\sqrt{\frac{1}{9}} + \sqrt{\frac{1}{4}}} = \frac{\frac{2}{3}}{\frac{5}{6}} = 0.8$$

elde edilir. Daha sonra değerler (E1.5)'te yerine konulursa;

$$R = \frac{S_{av}^r}{S_{av}^i} = |R|^2 = |-0.2|^2 = 0.04$$

$$T = \frac{S_{av}^t}{S_{av}^i} = 1 - |R|^2 = 1 - |-0.2|^2 = 0.96$$

hesaplanır. Buradan (E1.6)'nın doğruluğu,

$$R + T = 0.04 + 0.96 = 1$$

şeklinde bulunur ve sınırdaki enerji korunmuş olur.

ÖZGEÇMİŞ

1987 yılında İstanbul’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul’da tamamladı. 2004 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü’nden 2009 yılında Jeofizik Mühendisi olarak mezun oldu. 2009 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı. 2010-2011 öğretim yılında Almanya’nın Christian Albrechts Kiel Üniversitesi’nde öğrenimine devam etti. 2010 yılından beri Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.