

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YERALTINA NÜFUZ EDEN RADAR (YNER)
MODELLEMESİNDE IŞIN İZLEME VE FDTD
YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

Caner ÖZTÜRK

Aralık, 2011

İZMİR

**YERALTINA NÜFUZ EDEN RADAR (YNER)
MODELLEMESİNDE IŞIN İZLEME VE FDTD
YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Caner ÖZTÜRK

**Aralık, 2011
İZMİR**

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

CANER ÖZTÜRK, tarafından PROF.DR. MAHMUT G. DRAHOR yönetiminde hazırlanan “YERALTINA NÜFUZ EDEN RADAR (YNER) MODELLEMESİNDE IŞIN İZLEME VE FDTD YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof.-Dr. Mahmut G. Drahor

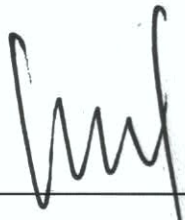
Yönetici


Doç. Dr. Nihal AKÇOL

Jüri Üyesi


Doç. Dr. Derman DONDURUR

Jüri Üyesi


Prof. Dr. Mustafa SABUNCU
Müdür
Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Danışman hocam Prof. Dr. Mahmut G. DRAHOR bu tezin her aşamasında çok değerli bilgi ve tecrübeleriyle bana yol göstermiştir. Kendilerine şükranlarımı sunarım.

Burada, saymakla bitiremeyeceğim birçok sebepten dolayı hayatımın en değerli varlıkları canım aileme çok teşekkür ederim.

Tezin yazım aşamasında desteklerini esirgemeyen Araş. Gör. Meriç A. BERGE ve Araş. Gör. Nuray Alpaslan'a çok teşekkür ederim.

Caner ÖZTÜRK

YERE NÜFUZ EDEN RADAR (YNER) MODELLEMESİNDE IŞIN İZLEME VE FDTD YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

ÖZ

Sentetik yeraltına nüfuz eden radar (YNER) modelleme çalışmalarının, faylanma, tabakalanma, aşınma ve benzeri sığ jeolojik özelliklerin yorumlanmasında büyük önemi vardır. Bu çalışmanın amacı, bazı sığ jeolojik yapıların ışın-izleme ve zaman ortamında sonlu-farklar (FDTD) yöntemleri kullanarak modellenmesidir aynı zamanda da iki tekniğin birbirleriyle karşılaştırılmasıdır. Başarılı bir yorumlama yapabilmek için, radar sinyallerini etkileyen farklı elektriksel değişken değerleri kullanarak bazı fay türleri (normal, bindirme ve doğrultu atımlı faylar gibi) için sentetik modelleme çalışması gerçekleştirilmiştir. Modelleme çalışması sırasında, çeşitli yer altı koşulları için birçok model üretilmiştir. Ayrıca, gerçek YNER verileri, fay ve tabakalanma probleminin olduğu bir alandan toplanmıştır. Sonuç olarak, gerçek YNER verileri ile sentetik modellemenin birlikte kullanımı, sığ jeolojik yapılarda tümleşik yorumlamaya katkı sağladığı görülmüştür.

Anahtar sözcükler: YNER, modelleme, ışın-izleme, zaman ortamında sonlu-farklar

COMPARISON OF RAY TRACING AND FDTD METHODS IN GROUND PENETRATING RADAR (GPR) MODELING

ABSTRACT

The synthetic ground penetrating radar (GPR) modelling studies are quite important in the interpretation of shallow geological properties such as faulting, bedding, weathering etc. This study aims to simulate some shallow geological structures using ray-tracing and finite-differences time-domain (FDTD) techniques and to compare each other. To obtain a successful interpretation, we performed the synthetic modelling studies for some fault types (such as normal, thrust and strike-slip faults) using different values of electrical parameters that affect the radar signals. The variations that depend on the electrical and magnetic properties of the subsurface materials were investigated with the synthetic modeling studies of these geological structures. During the modelling studies, we produced several models with various subsurface conditions. Additionally, real GPR data was collected from an area that has faults and bedding problems. As a result, the combined usage of the real GPR data and synthetic modelling could be contribute the joint interpretation on shallow geological structures.

Keywords: GPR, modeling, ray-tracing, finite-differences time-domain

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	v
BÖLÜM BİR – GİRİŞ	1
BÖLÜM İKİ - YERALTINA NÜFUZ EDEN RADAR (YNER) YÖNTEMİ.....	4
2.1 Maxwell Denklemleri	6
2.2 Yeraltına Nüfuz Eden Radar Dalgasının Yayınımını ve Bunu Etkileyen Fiziksel Değişkenler	8
2.2.1 Dielektrik Geçirgenlik	13
2.2.2 Elektriksel İletkenlik	18
2.2.3 Manyetik Geçirgenlik.....	20
2.3 YNER’de Ayrımlık ve Etki Zonu	23
2.4 Saçılım Atenüasyonu	25
2.5 Merkez Frekansı	27
2.6 Anten Özellikleri	28
2.7 Anten Yönlenmesi	29
2.8 Anten Koruması	33

2.9 Örneklem Ölçütü	35
 BÖLÜM ÜÇ - YERALTINA NÜFUZ EDEN RADAR (YNER)	
MODELLEMESİ.....	37
3.1 Giriş	37
3.2 Işın- İzleme (Ray- Tracing) Tekniği.....	40
3.3 Zaman Ortamında Sonlu Farklar (FDTD) Tekniği	47
3.3.1 Kuram.....	49
3.3.1.1 Ana Analitik Denklemler	49
3.3.1.2 Sonlu-Farklar Yaklaşımı	52
3.3.1.3 Sayısal Kararlılık ve Saçılım Ölçütü	57
3.3.1.4 PML Soğurma Sınırları.....	57
BÖLÜM DÖRT - IŞIN İZLEME VE FDTD YÖNTEMLERİNİN SENTETİK	
MODELLER ANLAMINDA KARŞILAŞTIRILMASI VE	
UYGULAMALAR	60
4.1 Sentetik Modellerin Tanıtımı ve Çalışmanın Amacı.....	60
4.1.1 Normal Fay Modeli	60
4.1.2 Bindirme Fay Modeli	62
4.1.3 Doğrultu Atımlı Fay Modeli.....	64
4.2 YNER Modellemesinde Kullanılan Yazılımlar	65
4.2.1 Işın İzleme (Ray-Tracing) Tekniği	66

4.2.2 Zaman Ortamında Sonlu Farklar (FDTD) Tekniği.....	69
4.2.2.1 Sentetik Model Örneği.....	72
4.3 Sığ Jeolojik Özelliklerin Modellemesi	76
4.3.1 Normal Fayın Sentetik YNER Modellemesi	76
4.3.2 Bindirme Fayının Sentetik YNER Modellemesi	79
4.3.3 Doğrultu Atımlı Fayın Sentetik YNER Modellemesi	82
4.4 Arazi Uygulamaları	86
 BÖLÜM BEŞ – SONUÇLAR.....	 92
 KAYNAKLAR.....	 94

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Yeraltına nüfuz eden radar (YNER-*Ground Penetrating Radar GPR*) jeofiziğin sığ uygulamalarında kullanılan ve kullanım alanı oldukça geniş bir araştırma tekniğidir. Yüksek frekanslı elektromanyetik dalgalar (10 MHz ile 3 GHz arasında) yeraltına bir gönderici anten yoluyla radar sinyalleri gönderir ve bunların yer içindeki yansımalarının gidiş-geliş zamanlarından yararlanılarak oluşturulan radargramlar ile yeraltındaki yapılar yüksek ayrımlı biçimde incelenir. Yeraltına dalgalar bir merkez frekansı içinde gönderilir ve ortamdaki dalga nüfuz derinliği, saçılım ve soğrulma olgusunda bu kaynak frekansın önemi büyüktür. Ayrıca yeraltındaki materyallerin dielektrik geçirimsizlik, elektrik iletkenlik ve manyetik geçirgenlik değerleri de yeraltında seyahat eden dalga alanları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Tüm bu nedenler birlikte göz önüne alındığında YNER yönteminin doğası karmaşıktır ve özellikle yeraltının da önemli oranda heterojen olduğu düşünüldüğünde, yorumlama zorlukları ortaya çıkmaktadır.

Yöntemin kullanım alanları çok yaygındır ve hemen hemen tüm sığ jeofizik sorunlar üzerinde uygulanmaktadır. Özellikle sığ jeolojik sorunlar (stratigrafi, fay belirlemeleri, heyelan, karstik boşluk belirlemeleri, sığ yeraltısuyu akifer araştırmaları vb.), arkeolojik yapıların ve yaşayan kültürel mirasın incelenmesi, mühendislik uygulamalar (boru hatları araştırması, tünel-otoyol ve demiryolu hatlarının incelenmesi, bina donatılarının ve bina içindeki sorunların araştırılması vb), patlamamış askeri malzeme ve mayın saptama, adli tıp ve doğal felaketler, kirlilik ve yeraltında kimyasal akışkan sızıntılarının belirlenmesi, katı atık alanları üzerinde araştırmalar, maden yatakları tespitleri ve cevher arama ile mermer çalışmaları gibi birçok alanda zengin bir uygulama genişliğine sahiptir (Klein ve Santamarina, 2003; Huisman ve diğ., 2003; Lucius ve diğ., 1992; Bristow ve diğ., 2000; Drahor ve diğ., 2005; Drahor, 2006).

Ancak yeraltındaki doğal durumun ve özellikle de sığ ortamlarda çok karışık özelliklerin olması, yöntemin doğasından gelen zorluklar, ortamların genelde yitimli, saçılımlı, dalgayı soğuran ve yayan özelliklerinin olması yöntemde yorumlamalarda

önemli sorunlara ve yanlış yorumlamalara neden olmaktadır. Bu nedenle bir araştırmaya başlamadan önce ilgilenilen yeraltı özelliğinin sayısal biçimde modellenmesi yorumun güçlenmesi anlamında önemli bir yarar sağlayacaktır. Son yıllarda bilgisayar donanımı ve olanaklarındaki hızlı artış YNER yönteminde modelleme tekniklerinin de gelişmesini sağlamıştır. YNER’de modelleme tek frekans modelleri, zaman ortamı modeller, ışın izleme, aktarma ve yansıma teknikleri (transmission-reflection), integral teknikleri (MOM- momentler yöntemi) ve ayrık eleman yöntemlerinden oluşur. Sonlu farklar zaman ortamı (FDTD- *Finite Difference Time Domain*) tekniği bunların içinde en popüler olanıdır ve göreceli bir yeterlilik içinde bir masaüstü bilgisayar yardımıyla gerçekleştirilebilir. İlk çalışmalar YNER antenlerinin modellenmesi üzerinde yapılanlardır ve daha sonra toprak etkileri de ışın içine katılmışlardır. Karmaşık ve heterojen ortamlarda YNER verisinin analizi, değerlendirilmesi ve yorumlaması yakın-alan anten kuplajlanması/indüksiyon etkileri, anten radyasyon örüntüsündeki değişiklikler, inhomojenliğin varlığı, anizotropi, kayıplı materyallerin varlığı ve arama sırasında yapılan hatalardan dolayı oldukça karmaşıktır.

Temel ışın izleme ve basit aktarma-yansıma tekniklerinin temeli keskin arayüzeyli cisimlerin göreceli elektriksel geçirimsizlik (ϵ) ve iletkenliği (σ) karşılaştırılarak nesneleri geometrik olarak tanımlayan modellere dayanır. Bu yöntemlerle modellenen YNER yanıtları her bir ara yüzey için temel kaynak dalgacık (çoğunlukla merkezi anten frekansı ile ilişkili Ricker dalgacığı kullanılır) yardımıyla hesaplanır. Böylece ilişkili yeraltı modelleri için geometrik temeller üzerinde yeraltı modellerinin iki boyutlu yapay radargramları oluşturulur. sonlu farklar zaman ortamı (FDTD) modelleme tekniği kullanılır (Cassidy, 2007). Böylece daha karışık ortamların gelişmiş modelleme araçları ile modellenmesinde popüler bir yöntemdir (Taflov ve Hagness, 2005). Bu teknik özellikle karmaşık, kayıplı ve dağıtıcı özelliği olan yüzeyaltı durumlarının modellenmesinde ışın izleme yöntemine göre daha uygun modeller üreten bir yöntemdir. Özellikle YNER anteni ile yüzeyaltı yapılarını doğru bir üç boyutlu geometri içinde gösterebilmek için çok gerçekçi bir yöntemdir.

Bu çalışmada birbirinden oldukça farklı olan iki modelleme tekniği (ışın izleme ve FDTD) sığ jeolojik sorunlar anlamında ayrıntılı biçimde incelenmiş ve sonuçları tartışılmıştır. Bu amaçla yapılan benzeşim model çalışmalarında tabakalı ve faylanma oluşturan ortamlar temel üç fay türü anlamında irdelenmiştir. Işın izleme tekniğinde bu yapıların yanıtları bir boyutlu bir modelleme temelinde hesaplanırken, FDTD tekniğinde 2-boyutlu bir yaklaşım kullanılmıştır. Yöntemlerde parametre seçimi, ayırıklaştırma, kaynak seçimi, ideal uyumlu katman durumu, sınır koşulları gibi birçok özellik ve modellemedeki etkileri de incelenmiştir.

Yapılan modelleme çalışmalarında yeraltındaki sığ jeolojik özelliklerin modellenmesinde FDTD yönteminin yeraltını daha gerçekçi modellediği görülmüştür. Ancak modelleme zamanı, ışın izleme yöntemine göre daha uzundur ve bu durum bir dezavantajdır. Ayrıca modeller karmaşıktıkça ortamlarda oluşan saçılım etkileri FDTD modellemesinde açıkça ortaya çıkarken, ışın izleme tekniğinde ortamın fiziksel özellikleri ilke doğrudan ilintili olduğu görülmüştür.

Sığ jeolojik ortamlar üzerinde yapılan bu modellemeler değişik yeraltı ortamlarının modellenmesinin yorumlamada ve olayın fiziğinin anlaşılmasında büyük önem taşıdığını ortaya çıkarmıştır. Özellikle bu tez kapsamında faylanma türü yapılar üzerinde yapılan deneysel model çalışması ile alansal uygulama sonuçlarının karşılaştırılması sonucunda, modelleme çalışmalarının yorumlama üzerinde büyük etkisinin olduğunu ve yorumlamayı doğrudan güçlendirdiği saptanmıştır.

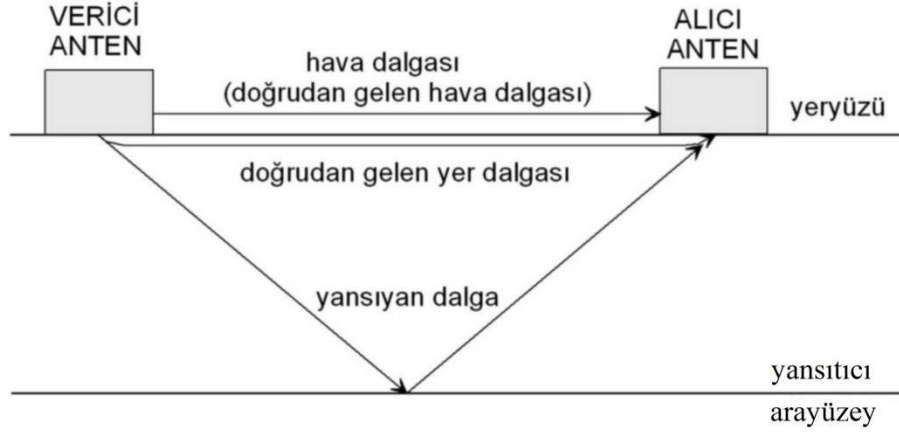
BÖLÜM İKİ

YERALTINA NÜFUZ EDEN RADAR (YNER) YÖNTEMİ

Yeraltına nüfuz eden radar (Ground penetrating radar- GPR) son yıllarda, özellikle 1980'lerden sonra sığ jeofizik araştırmalarda yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. II. Dünya savaşı sırasında savunma amaçlı kullanılan bu yöntem, 1970'li yıllarla birlikte jeoloji, arkeoloji, çevresel, mühendislik vb. problemlerin araştırılmasında yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Yöntemin geniş radyo frekans spektrumu doğadaki birçok yitimli dielektrik özelliğinde bulunduğu göz önüne alındığında, yönteme çok geniş bir uygulama olanağı sağlamaktadır. Böylece yöntem km boyutundaki araştırmalardan cm boyutundaki araştırmalara değin çok geniş bir alanda kullanım olanağı bulmaktadır. Böylece geniş ölçekli glasiyolojik araştırmalardan bir binanın içindeki donatıların özelliklerinin saptanmasına değin birçok alanda yaygın bir biçimde kullanılır (Tablo 2.1). Yöntem birçok sığ jeolojik sorunun belirlenmesi ve özellikle de aktif tektonik araştırmalarında son yıllarda yaygın biçimde kullanılmaya başlanmıştır. Bu amaçla diri fay sistemlerinin belirlenmesine yönelik uygulanan yere nüfuz eden radar (YNER) yöntemi, özellikle 2000'li yıllarla birlikte kullanım yoğunluğunu artırmıştır (Green ve diğ., 2003; Rashed ve diğ., 2003; Avila-Olivera ve diğ., 2008).

YNER yönteminde, verici antenden yeraltına gönderilen yüksek frekanslı (10-3000 MHz) radar sinyali yeraltında ilerlerken yansıtıcı bir süreksizlikle karşılaştığında enerjisinin bir kısmı yansıyıp alıcı antende kaydedilir. Bu yöntem, radar sinyalinin verici antenden çıkıp, alıcı antene ulaşınca değin geçen seyahat süresinin (two-way traveltime- TWT) ns mertebesinde ölçülmesi prensibine dayanır (Şekil 2.1). Bu olayda elektromanyetik dalganın yayılım özellikleri ve bununla ilişkili kuramın yanı sıra geometrik optik kurallarda büyük önem taşır. Böylece yeraltındaki her bir madde ya da ortamın dielektrik özellikleri önem taşır ve her biri elektriksel anlamda yalıtıcı bir ortam olarak düşünülerek, bu özelliklere bağlı olarak yer altı tanımlanmaya çalışılır. Doğal olarak bu olayda elektriksel iletkenlik ve manyetik geçirgenlikte önem taşıyan olgulardır ve matematiksel denklemin çözümü sırasında göz önüne alınırlar. Optik kuram özellikle yeraltındaki ortamın kuru olması

durumuyla oldukça ilişkilidir. Materyallerin su ve nem içermeleri durumunda iletimde ortamdaki dielektrik durum önem kazanacaktır.



Şekil 2.1 Verici antenden çıkan radar dalgalarının yer içindeki yayılımı ve alıcı antene ulaşmasını gösteren basitleştirilmiş şekil (Conyers ve Goodman 1997'den düzenlenmiştir).

Yöntemin temeli elektromanyetik kurama dayanır ve matematiksel olarak Maxwell denklemleri yoluyla EM dalganın tanımlanma ilkeleri YNER içinde geçerlidir. Serbest uzayda manyetik duyarlık ve elektriksel geçirgenlik sabittir. Böylece bu özellikler frekanstan bağımsız ve ortamda dağıtıcı olmayan bir özelliğe sahiptir. Bu durum mükemmel bir dielektrik ortamdır ve ortamda hiçbir yayılım kaybı olmaz. Yani ortamda herhangi bir sönümlenme söz konusu değildir. Yeryüzünde bu durum tam anlamıyla gerçekleşmemekle birlikte ortamın son derece kuru olması kireçtaşı ve kum içeren kuru birimlerden oluşması durumunda çok az bir yitimle yukarıda tanımlanan duruma yakın bir durum elde edilir (Şekil 2.2). Ancak ortamda suyun ve nemin artışına bağlı olarak kayıplı, EM dalganın dağılmaya başladığı ve sönümlenmenin olduğu bir durum söz konusudur ve bu olgu ortamın su ve nem içeriğine bağlı olarak artar.

Tablo 2.1 Yeraltına nüfuz eden radar (YNER) yönteminin uygulama alanları.

YNER Yönteminin Uygulama Alanları
• Arkeolojik aramalar • Sığ yer altı suyu araştırmaları • Kar, su ve glasiyer (buzul) araştırmaları • Sığ jeolojik sorunların saptanması, özellikle diri fay zonlarının saptanması • Kuyu içi uygulamalar • Kirlenmiş alan araştırmaları • Gömülü mayın veya patlamamış askeri madde araştırmaları • Adli tıp uygulamaları • Mermer, taşocağı maden araştırmaları • Boru ve kablo hattı belirleme • Karayolu donatı araştırmaları • Demiryolu hatları ve travers ile rayların altındaki zemin özelliklerinin saptanması • Bina içi donatılarının özelliklerinin saptanması • Yaşayan kültürel mirası olan tarihi yapıların özelliklerinin belirlenmesi • Tünel ve otoyol incelemeleri • Köprü donatılarının incelenmesi • Güvenlik uygulamaları • Sızıntı araştırmaları • Kerestelerin içinin incelenmesi (ormancılık) • Tıbbi uygulamalar • Gezegen araştırmaları

2.1 Maxwell Denklemleri

YNER yönteminin temeli elektromanyetik (EM) kurama dayanır ve EM dalgası Maxwell'in elektromanyetik alan eşitlikleri anlamında irdelenir. Bu vektör eşitlikleri niceliksel olarak uzamsal ve birbirine bağlı elektrik ve manyetik alanları ve onlar arasındaki ilişkiyi tanımlar. Bağlıntılar, frekans spektrumunun tümü için geçerlidir ve

tüm materyaller için EM enerji yüklenme ve kayıp proseslerini tanımlar. Bunlar klasik anlamda zaman ortamında aşağıdaki biçimde tanımlanır.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

Bu ifade Faraday Kanunun matematiksel ifadesidir. E - elektrik alan kuvvet vektörü (V/m); B - manyetik akı yoğunluk vektörünü (Tesla-T) gösterir. Bu denklemin anlamı, elektrik alanın vektörel kaynağının, manyetik akının zamanla değişen bir özelliğini göstermesidir. Herhangi bir kapalı eğri üzerinde elektrik alanın sirkülasyonu (dolaşımı), eğrinin çevrelediği yüzey üzerindeki manyetik akının negatifinin zamanla değişimine eşittir.

Maxwell'in ikinci eşitliği, Ampere Kanununun matematiksel ifadesidir ve aşağıdaki biçimde gösterilir;

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.2)$$

H - manyetik alan kuvvet vektörü (A/m); D - elektrik akı yoğunluk vektörü (C/m²); J - akım yoğunluğu vektörü (A/m²) gösterir. Bu denklemin anlamı, manyetik alanın kapalı bir halka boyunca çizgisel integrali, o halka içinde kalan akım ile orantılıdır.

Üçüncü eşitliği, Gauss Yasası olarak bilinir ve genel gösterimi aşağıda verilmektedir.

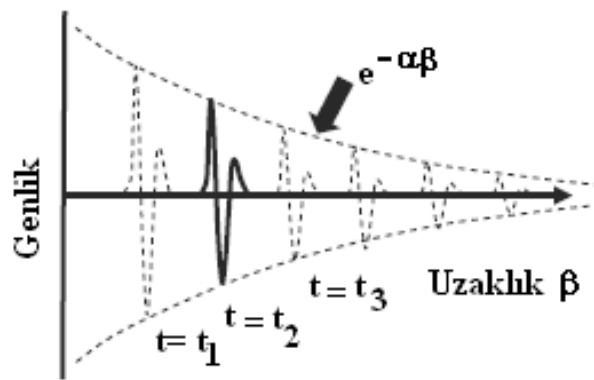
$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.3)$$

D - elektrik akı yoğunluk vektörü (C/m²); ρ - şarj yoğunluğu (C/m³) ifade eder. Bu denklemin anlamı elektrik alanın skaler kaynağının yük yoğunluğu olduğudur veya elektrik alanın noktasal olarak yüklerde sonlandığını belirtmektedir. Herhangi bir kapalı yüzeydeki elektrik alanın akısı o yüzeyin içindeki toplam yük ile doğru orantılıdır.

Aynı şekilde dördüncü eşitlikte de manyetik alanın skaler kaynağının olmadığı (manyetik yük yoktur) ifade edilir.

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

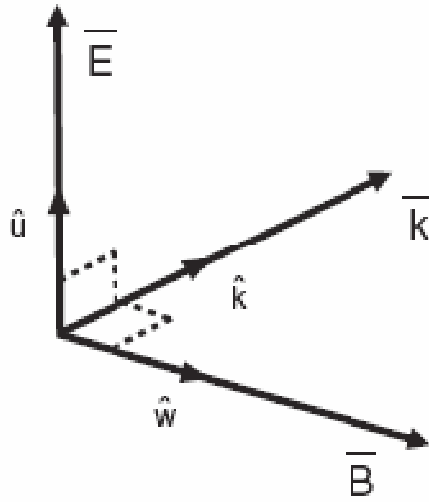
Bu denklemin anlamı, Diğer bir deyişle, manyetik alanın hep kendi üzerine sonlandığıdır. Herhangi bir kapalı yüzeydeki manyetik alanın akısı sıfırdır.



Şekil 2.2 Düşük kayıplı bir ortamda elektromanyetik dalganın sonlu bir uzunlukta yayını ve genlik düşüşü (Annan, 2008'den düzenlenmiştir).

2.2 Yeraltına Nüfuz Eden Radar Dalgasının Yayınımı ve Bunu Etkileyen Fiziksel Değişkenler

Elektromanyetik dalga, elektrik ve manyetik alanların bileşkesinden oluşur. Elektrik ve manyetik alanlar birbirlerine ortogonaldır ve dışarıdan gelen herhangi bir etki olmadığı müddetçe aynı fazdadırlar (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 E elektrik alan, B manyetik alan ve k yayınım doğrultusu ortogonaldir (Annan, 2008'den düzenlenmiştir).

Maxwell denklemleri elektrik ve manyetik alan çiftinin zamanla değişmesi olgusunu tanımlar. Serbest uzayda bu dalga yayılımı Şekil 2.4'deki gibidir. Enerji yitimi (iletkenlik ile ilişkili) ve enerji yüklenmesinin (elektiriksel ve manyetik geçirgenlikle ilişkili) göreli büyüklüğüne bağlı olarak alanlar dalga olarak yayılır ya da saçılır. YNER yönteminde koşullar dalga benzeri bir yanıtı ortaya çıkardığı zaman tutarlı olur.

Maxwell eşitlikleri elektrik ya da manyetik alanlardan biri yok edilerek yazıldığı zaman, dalga karakteri belirgin olacaktır. Elektrik alan kullanılarak yeniden yazma sonucunda enine vektör dalga eşitliği (2.5) bağıntısıyla elde edilir.

$$\nabla \times \nabla \times \bar{E} + \mu\sigma * \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} + \mu\epsilon * \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.5)$$

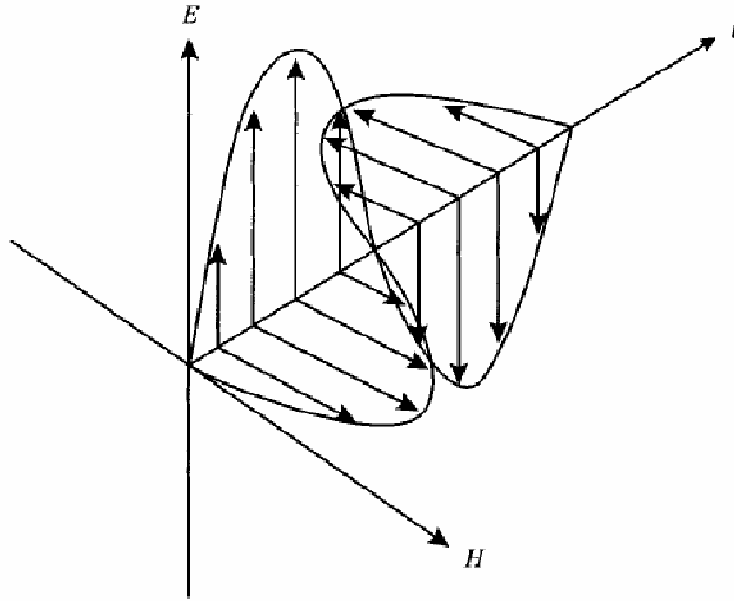
Burada ortamdaki yayılımın hız ve sönümlenmesi (2.6) bağıntılarıyla hesaplanır (v, hız; α , sönümlenme).

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}, \quad \alpha = \frac{1}{2}\sigma\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (2.6)$$

Boşluktaki ışık hızı ise (2.7) bağıntısıyla verilmiştir.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (2.7)$$

Burada; boş uzayın mutlak manyetik duyarlığı, $\mu_0 = 1.26 \times 10^{-6} \text{ Hm}^{-1}$, boş uzayın mutlak elektriksel geçirgenliği, $\epsilon_0 = 8.86 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$, ortamın mutlak manyetik duyarlığı, $\mu = \mu_0 \mu_r$ ve ortamın mutlak elektriksel geçirgenliği $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ 'dir.



Şekil 2.4 Serbest uzayda elektromanyetik dalganın yayılımı (E elektrik alan; H manyetik alan). Daniels, 2004'den düzenlenmiştir.

ϵ_r birçok jeolojik materyal için 1-88 aralığına sahip bir değer olarak göreceli elektriksel geçirgenliktir (Tablo 2.2). μ_r ise manyetik olmayan jeolojik materyaller için 1 değerini alan göreceli manyetik duyarlıktır.

Böylece, ortamın bağıl hızı olan (2.8) bağıntısına ulaşılır.

$$v_r = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.8)$$

Ortamin gerçek empedansı (elektrik ile manyetik alanın oranı) (2.9) bağıntı ile tanımlanır.

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (2.9)$$

Elektromanyetik bir dalga olan radar dalgası, üç önemli fiziksel değişkenden etkilenmektedir. Bunlar, önem sırasına göre; bağıl dielektrik geçirgenlik (ϵ), elektriksel iletkenlik (σ) ve manyetik geçirgenliktir (μ). Birçok YNER uygulamalarında, radar dalgalarının yayınımlı sırasında bağıl dielektirk geçirimlilik ve elektriksel iletkenlik değişkenlerinin çok önemli olduğu, manyetik geçirgenlik değişkeninin ise bazı durumlarda önemli olduğu görülmüştür (Annan, 2008).

Yüzeyaltı materyalleri genellikle dielektriktir ve onların dielektrik özelliği geçirgenlik ve iletkenlik kayıpları ile tanımlanır. Eğer bir ortamda özgür şarj varsa ve daha sonra bu alan bir EM alana maruz kalırsa, bunlar enerji yitimi ve zayıflamayla (attenuation) birlikte materyal boyunca akacaktır. Doğada tüm yüzeyaltı materyaller değme elektronları ve iyonları gibi bazı özgür şarj formlarını içerir. Bu materyaller en iyi biçimde EM zayıflamasının bazı derecelerini gösteren “*yitik dielektrik*” olarak tanımlanır. U durumlarda yüksek derecede özgür şarj içeren bir materyal EM enerjinin çoğunun ısı iletim prosesinde yiteceği bir iletici olarak ortaya çıkacaktır. Bu durum çok yüksek iletkenlik içeren ortamlarda (tuz ve kil içeriği gibi) YNER yönteminin etkili olmayacağı nedeni ortaya çıkarır.

Tablo 2.1 Farklı yer altı ortamlarının bağıl dielektrik geçirgenlik katsayısı ϵ_r , elektrik iletkenlik σ ve sönümlenme α değerleri (Daniels, 2004'den düzenlenmiştir).

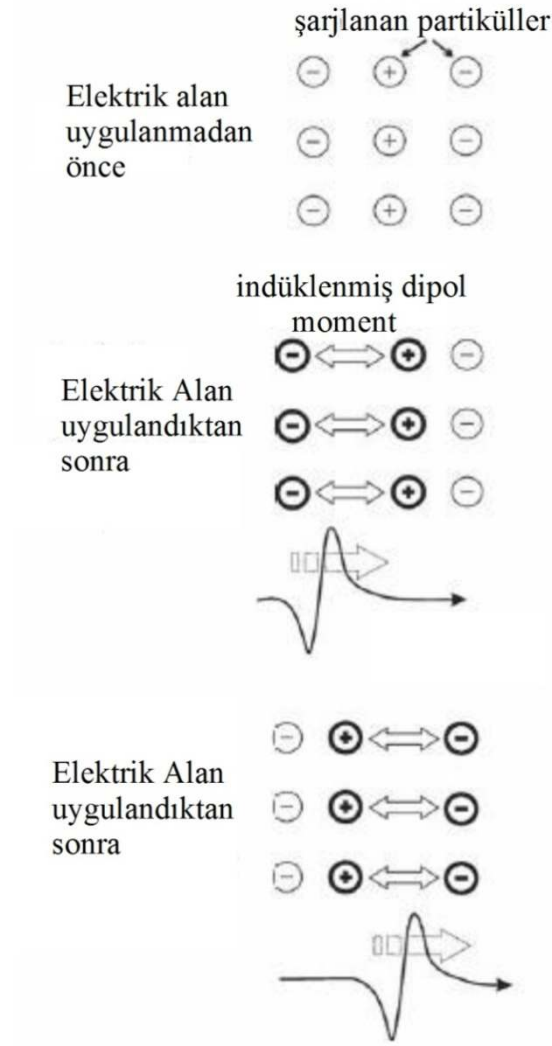
Malzeme	ϵ_r	σ (mSm ⁻¹)	α (dBm ⁻¹)
Hava	1	0	0
Asfalt (kuru)	2-4	1-10	2-15
Asfalt (ıslak)	6-12	0,1-10	2-20
Kil (kuru)	2-6	100-10 ³	10-50
Kil (ıslak)	5-40	100-10 ³	20-100
Kömür (kuru)	3,5	0-100	1-10
Kömür (ıslak)	8	0-10	2-20
Beton (kuru)	4-10	0-100	2-12
Beton (ıslak)	10-20	0-10	10-25
Tatlı su	81	10 ⁻³ -10	0,01
Tatlı su buz	4	0,1-0	0,1-2
Granit (kuru)	5	10 ⁻⁵ -10 ⁻³	0,5-3
Granit (ıslak)	7	0-10	2-5
Kireçtaşı (kuru)	7	10 ⁻⁵ -10 ⁻³	0,5-10
Kireçtaşı (ıslak)	8	10-100	1-20
Donmuş toprak	4-8	0,01-10	0,1-5
Kaya tuzu (kuru)	4-7	0,1-10	0,01-1
Kum (kuru)	2-6	10 ⁻³ -0	0,01-1
Kum (ıslak)	10-30	0-10	0,5-5
Kumtaşı (kuru)	2-5	10 ⁻³ -10 ⁻²	2-10
Kumtaşı (ıslak)	5-10	0,1-10	4-20
Deniz suyu	81	10 ⁵	100
Deniz-su buz	4-8	10-100	1-30
Killi şist (kuru)	4-9	0-10	1-10
Killi şist (doymuş)	9-16	0-100	5-30
Kar (sert)	6-12	10 ⁻³ -10 ⁻²	0,1-2
Killi toprak (kuru)	4-10	10-100	0,3-3
Killi toprak (ıslak)	10-30	0-10 ³	5-50
Tınlı toprak (kuru)	4-10	0,1-0	0,5-3
Tınlı toprak (ıslak)	10-30	10-100	1-6
Kumlu toprak (kuru)	4-10	0,1-10	0,1-2
Kumlu toprak (ıslak)	10-30	10-100	1-5

2.2.1 Dielektrik Geçirgenlik

Von Hippel (1954) bir ortamın dielektrik geçirgenliğini, ortamının enerjiyi depolama ve daha sonra ortamın elektromanyetik enerjinin geçişine izin vermesi olarak tanımlar. Olhoelf (1981) ise bu değişkeni, ortamda elektromanyetik alan etkisiyle oluşan kutuplaşmayla açıklar ve bu kutuplaşmanın elektronik, iyonik ve moleküler biçimde olabileceğini söyler (Kurtulmuş, 2007).

Bağıl dielektrik geçirgenlik katsayısı (ϵ_r), bir maddenin elektrik geçirgenliğinin (ϵ) boşluğun elektrik geçirgenliğine (ϵ_0) oranı ile hesaplanabilir. Ortamların dielektrik geçirgenlikleri; onların bileşimleri, nem içeriği, hacim yoğunluğu, gözeneklilik, sıcaklık ve fiziksel yapılarına bağlıdır (Olhoeft, 1981).

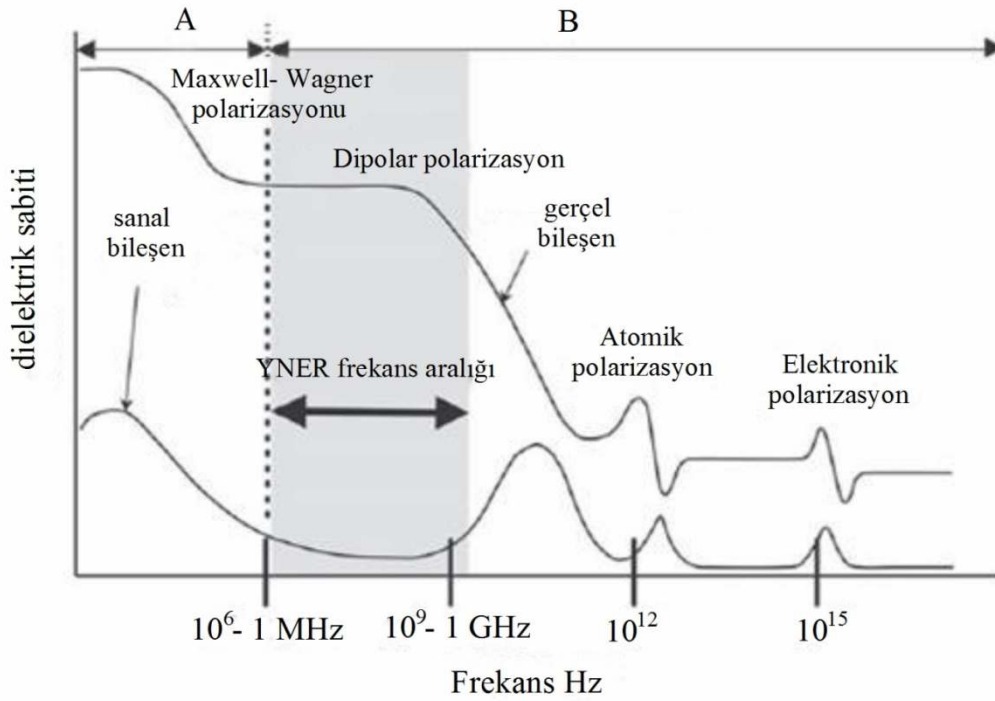
Şekil 2.5’de herhangi bir elektrik alanın olmadığı pozitif ve negatif şarjlardan oluşan uniform bir madde göz önüne alınarak ve daha sonra bunların herhangi bir elektrik alana maruz kalmaları durumunda oluşacak dipol momentler ve yükler arasındaki yer değiştirme durumu irdelenmiştir. Herhangi bir elektrik alan uygulanmadığı durumda, şarjlanan partiküllerin polarize olmadığı ve materyal için tümüyle sıfır şarjdan oluşan bir ağırlık var olduğu görülmektedir. Elektrik alana maruz kaldıktan sonra negatif ve pozitif partiküllerin materyal boyunca EM yayınına göre darbeler (pulse) biçiminde seyahat ettiği, enerji darbelerinin yükselen kenarlarında şarj ayrımı (enerji depolanması) olması durumunda ise partiküllerin transfer yoluyla seyahat ettiği görülür. Karşı karşıya gelen partiküller fiziksel olarak yer değiştirir ya da onların orijinal pozisyonları ile ilişkili olarak polarlanır. Böylece materyalde yerleşmiş dipol moment indüklenmiş olur. Bir sonraki durumda, enerji darbeleri seyahat yoluyla enerji darbenin izleyen sınırları üzerinde açığa çıktığı ve yakınındaki partiküller, şarj ayrımına uğramaya ve böylece yukarıda tanımlandığı gibi polarizasyonun oluşmaya başladığı görülür. Böylece yer değiştiren akımlar yoluyla bir EM dalga ışınım ortaya çıkar. Dielektrik geçirgenlik değişkeni materyaldeki EM dalganın doğrudan yayının hızıyla bağlantılıdır.



Şekil 2.5 Bir materyal boyunca elektromanyetik dalga yayındığı zaman, oluşan bir dipol momentin gelişimi, şarj polarizasyonu ve enerji yüklenme/geri salınım sürecini gösteren kavramsal diyagram (Cassidy, 2008'den düzenlenmiştir).

Polarizasyon prosesinin frekansa bağımlılığı, zaman bağımlı yer değiştirme mekanizmasının uygulanan elektrik alanın alternatifine göre farklı oranlarda davranan elektriksel geçirgenlik gevşeme (relaxation) olayının bir dışavurumu olarak tanımlanabilir.

Bu dağılımın doruk değeri *gevşeme frekansı* olarak adlandırılır. Farklı özgün gevşeme mekanizmaları (elektronik, atomik, dipolar ve Maxwell-Wagner) materyal için tüm yanıtları veren bir bütünsellik taşır. Bu olay Şekil 2.6'da açıkça görülmektedir. Burada sınırlı ve özgür şarjlarla (genellikle su) ilişkili dipolar polarizasyon YNER yöntemi için çok önemlidir. Halbuki diğerleri YNER frekans aralığının dışına düşerler.



Şekil 2.6 İdealize olmuş kayıplı bir dielektrik materyal ile ilişkili elektriksel geçirgenlik gevşeme olayı (phenomena). A bölgesi özgür şarj ve materyal etkileşimi ile ilişkili polarizasyonları gösterirken, B bölgesi limitli şarjlarla ilişkili atomik ve moleküler polarizasyonları göstermektedir (Daniels, 1996'dan uyarlanmıştır).

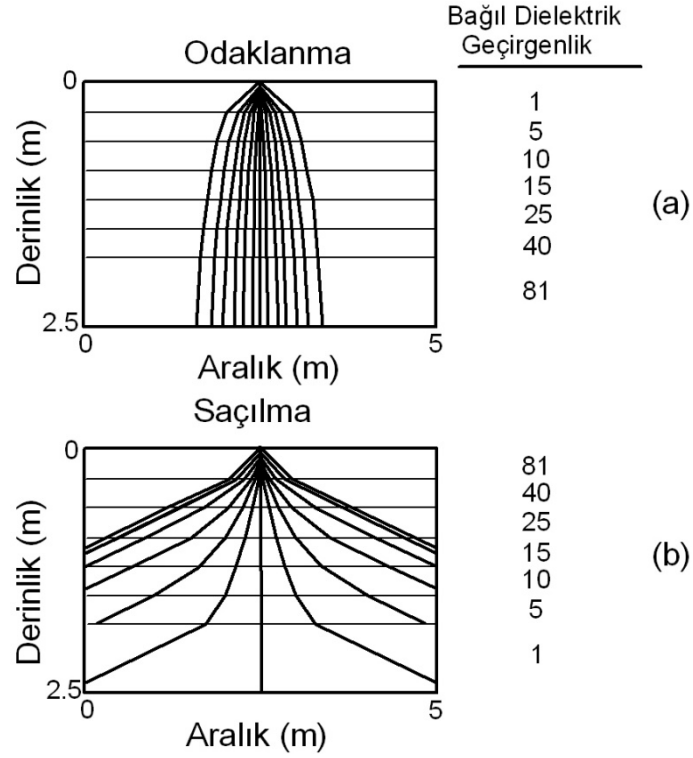
Bu mekanizmalar iki gruba ayrılabilir;

- Sınırlı (limitli) şarj etkileri: Elektronik, atomik ve dipolar polarizasyonları içeren ve sadece atom ile moleküllerin etkilerinin gevşemesiyle ilgili olanlar.
- Özgür şarj etkileri: Maxwell-Wagner polarizasyon etkisi olarak adlandırılanları kapsayan, suda ve tane yüzeyleri üzerindeki 'tutulmuş' özgür iyonik şarjların gevşeme olayını tanımlar.

Elektronik ve atomik polarizasyon: Birçok kuru, katı materyal için GPR frekansının üzerinde hemen hemen sabit bir geçirgenliğe neden olan ve oluşan polarizasyon mekanizmasıdır. Onlar atomik ve atom altı durumlarda geçerlidir ve bağlanmış bireysel atomlar ya da elektron bulutlarının yer değiştirmesi ile ilişkilidir (Von Hippel, 1954). Bu olay ılıman bölgelerdeki YNER uygulamalarında her ne kadar önem taşımasa da, arid ve glasiyal bölgelerde önemlidir.

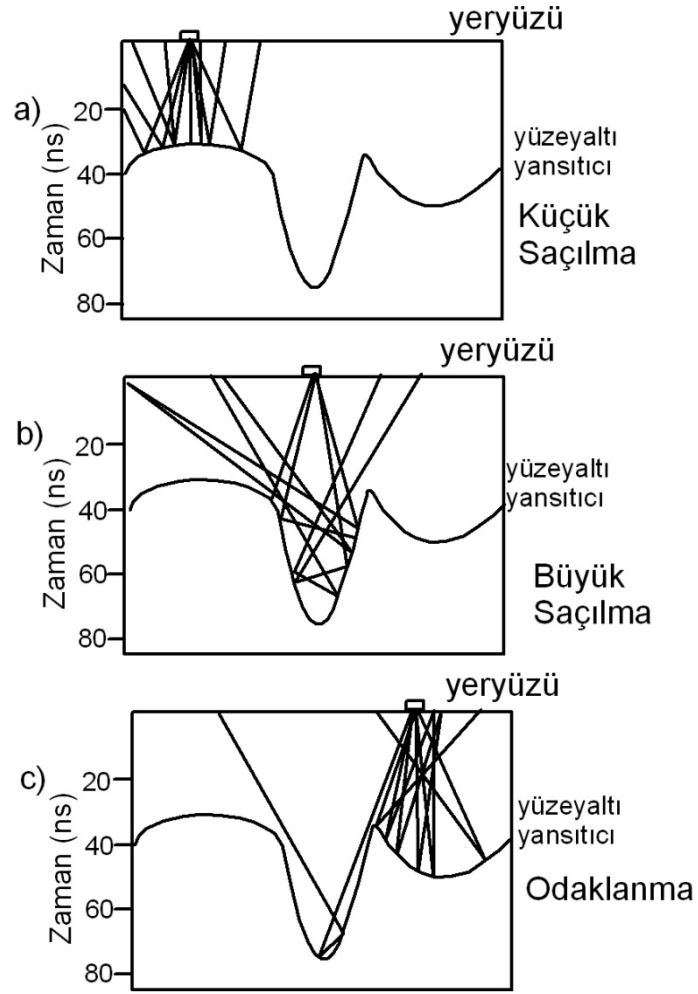
Dipolar ve yönllemeli (orientational) polarizasyon: Bu gevşeme mekanizması kalıcı elektrik dipol momentlere sahip moleküllerdeki materyallerde oluşur. Bunlar kovalent bağlı gazlar, sıvılar ya da iyonik bağlı örgü bozukluklu kristalin katılar olabilir. Topraklar, kumlar ve gözenekli kayalar gibi çok fazlı materyallerin karmaşık yanıtını etkileyen dipolar su moleküllerinin gevşemesinin nasıl olduğunu anlama açısından önemlidir.

Radar sinyalinde penetrasyonu etkileyen diğer bir önemli etkende, dielektrik değişkene bağlı olarak gerçekleşen odaklanma ve saçılma olgularıdır. Şekil 2.7’de yatay tabakalı bir ortamda radar sinyalinin dielektrik değişkene bağlı olarak odaklanma ve saçılma durumları irdelenmiştir. Dielektrik değişken derinlikle doğru orantılı arttığında radar sinyalinin yer içinde odaklandığı, tersi durumda ise saçılıma uğradığı görülmektedir.



Şekil 2.7 Derinliğe bağlı olarak bağıl dielektrik geçirgenlik katsayılarının yüzeyden başlayarak (a) artışı, (b) azalışı için dalga kırılma etkileri (Conyers ve Goodman 1997'den düzenlenmiştir).

Odaklanma ve saçılma olguları yansıtıcı ara yüzeye bağlı olarak da gerçekleşebilmektedir. Şekil 2.8'de tümsek biçimindeki bir yansıtıcı yüzeyin radar sinyallerinin bir kısmını saçtığı, derin bir hendek biçimli yansıtıcı yüzeyde ise radar sinyallerinin büyük bir kısmının saçıldığı ve verici antenden çıkan radar sinyalin büyük bir kısmının alıcı antene ulaşamadığı görülmektedir. Ayrıca içbükey biçimli bir ara yüzeyde radar sinyallerinin odaklandığı ve verici antenden çıkan radar sinyallerinin çoğunun farklı noktalardan yansıyıp alıcı antene ulaştığı gözlenmektedir.



Şekil 2.8 Farklı anten konumlarında saçılma ve odaklanmayı ortaya koyan gömülü yüzeyin şematik görüntüsü (Conyers ve Goodman, 1997).

2.2.2 Elektriksel İletkenlik

Elektromanyetik radar dalgasını etkileyen diğer bir etken ise ortamın elektriksel iletkenliğidir. Bir ortamda elektrik yükünün bulunması o ortamda bir elektrik alanının var olmasına ve böylece bir elektrik akımının oluşmasına neden olur.

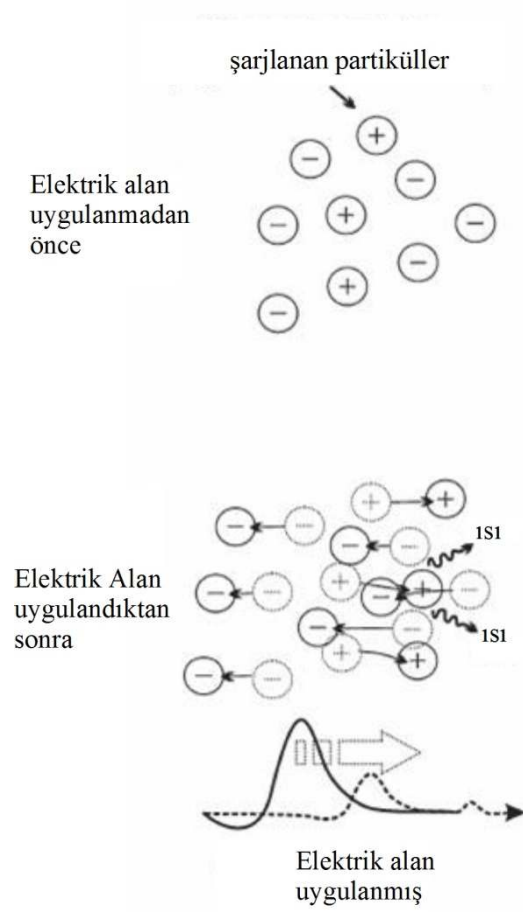
Elektriksel iletkenlik, basit anlamda iletkenlik uygulanan bir alanın etkisi altında özgür elektrik şarjların akması için bir materyalin yeteneğini tanımlar. Metallerde bu şarjlar metal atomunun özgür elektronları ile ilişkilidir. Oysa sıvılarda şarjlar çözünmüş anyon ve katyonların (Na^+ , Ca^{2+} , Cl^- , CO_3^{2-} gibi) şarjları yoluyla gösterilir.

Bu şarjlar içsel iletim akımları üreten bir bağlantı hızını çabuk biçimde ivmelendirir. Onların yayınımindaki gibi, bunlar ısı biçiminde enerji yitimi üreten diğer atom, iyon ve elektronlara karşı rastlantısal olarak çarparlar (Şekil 2.9). Alçak YNER frekanslarında şarj yanıtı etkili biçimde anidir ve iletim akımı elektrik alanla faz içindedir (Turner and Siggins, 1994). Bu durumda iletkenlik (σ) bir gerçel, statik ya da DC değeri ile S/m biriminde gösterilebilir.

Şekil 2.9'da ilk durumda, bir elektrik alan yokluğunda özgür iyonik tanecikler sıvı içinde statiktir ve ısı üretimine neden olmadığı gösterilmiştir. Elektrik alan uygulandıktan sonra, bir materyal boyunca seyahat eden EM puls yayınında olduğu gibi enerji pulsun artan kenarında hızlıca ivmelenerek iyonik şarjlara dönüştüğü gözlenir. Taşınım boyunca şarjlanan tanecikler çarpışır (birbirini etkiler) ve tümüyle bir enerji yitimine neden olan içsel ısı enerjisine dönüştüğü görülmektedir.

Yüksek frekanslarda ivmeli şarjların içsel etkisi fiziksel yanıtta bir duraklamaya ve elektrik alan değişimi ile faz dışı bir iletim akımına neden olur. Böylece iletkenlik, akımın faz dışı (out of phase) bileşenini gösteren sanal bileşeni olan karmaşık değerli bir nicelik olarak tanımlanmalıdır. Bu tipik olarak frekansla artar ve geçirgenliğin enerji depolama yeteneğine eklenir. Radar frekansları için bu sıklıkla küçük ve önemsizdir (Turner ve Siggins, 1994) ve sanal bileşen genel olarak göz önüne alınmaz ve böylece iletkenlik basit olarak sadece onun gerçel bileşeni ile tanımlanabilir. Bununla birlikte, doğal materyaller çok karmaşıktır ve değişik özgür şarjlar küçük bir yüzey altı hacim (elektronlar, sıvıdaki hareketli katyon/anyonlar, katılardaki örgü ve yer değiştirme iyonları, yüzey şarjları ve özgür polimer şarjları) içinde gösterilebilir. Bunların her biri farklı içsel özelliklere ve potansiyel olarak iletkenliğin sanal bileşeni üzerinde farklı etkilere sahiptir. Bu özellikle ağır anyon ve katyonların uygulanan alan değişimlerine yanıtının yavaş olduğu elektrolit çözeltilerinde doğrudur. Bunlara karşın, sanal bileşen ile ilişkili enerji yüklenmesinin derecesi gerçel bileşenle gösterilmiş enerji yitiminin derecesinden büyük ölçüde daha düşük olmalıdır (King ve Smith, 1981). Dolayısıyla iletkenlik gevşemesinin

etkisi küçük olacaktır ve bir statik iletkenlik değerin sadeleşmesi birçok durumda basit anlamda yaklaşıktır.



Şekil 2.9 Anyonlar ve katyonlar gibi özgür şarjlar içeren bir materyaldeki iletim prosesini gösteren kavramsal diyagram (Cassidy, 2008'den düzenlenmiştir).

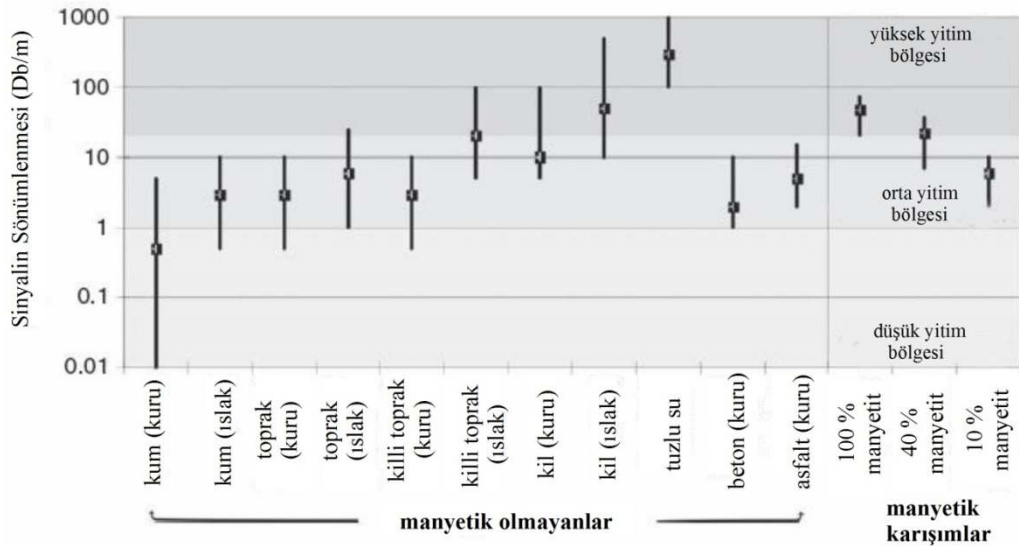
2.2.3 Manyetik Geçirgenlik

Birçok durumda maddelerin manyetik etkisi (diamanyetik, paramanyetik ve supermanyetik olaylar) YNER dalga yayınında küçük bir etkiye sahiptir ve onların manyetik geçirgenliği (μ) sıklıkla boş uzayın değeri olan $1.26 \times 10^{-6} \text{H/m}$ ile tanımlanır. Bununla birlikte ferromanyetik mineraller YNER dalga hızı ve sinyal sönümlenmesinde önemli bir değere sahip olabilir. Demir, nikel ve sülfür/oksitler manyetik domen duvar sınırlarının yeniden dağılımı ve elektron spin manyetik

momentlerinin yeniden yönlenmesi ve gelişimi ile ilişkili mekanizmalarla azımsanmayacak miktarda ferromanyetik gevşeme olayına sahiptirler. Manyetik gevşeme frekansları domen/tane boyu ve fiziksel yapı/manyetik materyalin (tek-domen, nanometre boyutlu partiküller ya da daha geniş olanlar, çoklu-domen, mikrodan milimetre boyulu polikristalin kazanımlar) büyüklüğüne bağlıdır. Yüzeyaltı jeolojik maddelerin birçoğunda ferromanyetik materyallerin miktarı önemsiz düşünülebilir (tipik olarak $<2\%$). Bununla birlikte doğal maddelerdeki ferromanyetik minerallerin anahtarı olan manyetit, maghemit ve hematitin kayda değer miktarları bazı volkanik kayalar, demirce zengin kumlar ve topraklar, gevşeme nedenleri ve geçirgenlik yoluyla üretilmiş ve onlarla karşılaştırılabilir yitim etkileri bulundurulabilir. Örneğin Mars yüzeyinde yapılacak bir YNER çalışmasında gezegenin yüksek manyetik özellik gösteren toprağı yüzünden manyetik geçirgenlik burada önem taşıyacak ve gelecekte burada yapılacak radar çalışmalarında etkisi yadsınmaz bir özelliğe sahip olacağı görülecektir. Dünya üzerinde de benzeri alanlarda bu etkinin hesaplamalar ve modelleme çalışmalarında göz ardı edilmesi önemli sorunlara neden olabilir. Bu nedenle bu tür alanlarda bu özelliğinde işleme katılması gerekli olacaktır.

Yüzeyaltı materyallerinin birçoğunun göreceli geçirgenliği yaklaşık olarak $\epsilon_{\text{ort}} \approx 3-30$, yani eşitlenmiş olan en düşük değerden 0.3 mks birimli bir hacim manyetik duyarlılığı (eşdeğer manyetik hacim 7%) arasında sıralanır. Bu birçok kayada, çökeller ve topraklarda ve nadiren insan yapımı maddelerde doğal biçimde bulunduğu için çok daha yüksektir. Sonuç olarak manyetik etkilerin varsayımı yüzey altında demir içermeyen materyallerin varlığı olduğu sürece haklı olarak önem taşımamaktadır. Eğer materyaller bu durumda değilse, yani manyetitçe zengin magmatik kayalar, hematitik kumlar ve insan yapısı eritilmiş atıkların varlığı gibi, göreceli manyetik geçirgenliğin bütünlük taşımayan bir değeri ve manyetik bileşenlerin etkisinin elektrik bileşenlerden daha büyük olabileceği varsayılmalıdır. Elektrik geçirgenliğe göre bu maddelerin manyetik geçirgenliği karmaşıktır ve enerji yitimlerini gösteren sanal kısım ile enerji yükleme/salma mekanizmasını gösteren gerçel kısım ile birlikte frekans bağımsızdır.

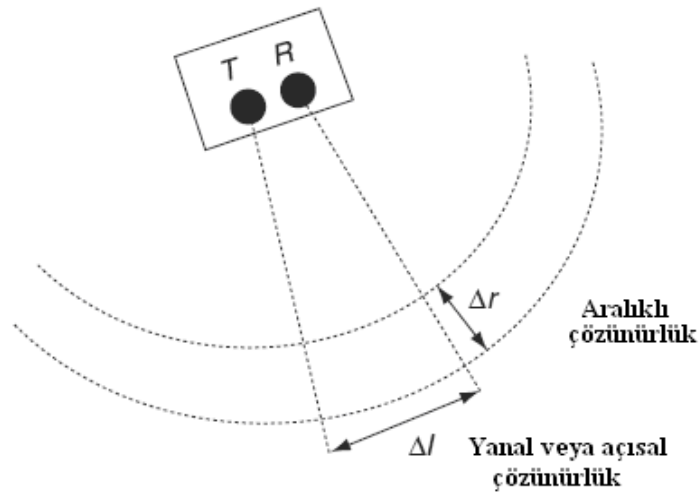
Şekil 2.10'da yeraltında manyetik olmayan ve belirli yüzdelerde manyetiklik içeren materyallerin sinyal sönümlenmesine bağlı olarak bir grafiği verilmektedir. Bu grafikte koyu ile taralı alanlar sönümlenme olayında yüksek yitime uğrayan bölgeleri, açık taralı bölgeler orta yitim içeren ve çok açık taralı alanlar ise düşük yitimin olduğu bölgeleri göstermektedir. Bu grafikten de açıkça görülebildiği gibi sadece kuru kumda düşük yitim oluşmaktadır. Yani çok az bir yitimle EM dalgası ortamda yayılmaktadır. Oysa bu durum dünya yüzeyinde sadece çöllerle kaplı grid alanlar için geçerli olabilir. Oysa dünya yüzeyinin büyük çoğunluğunda toprak ve kayaç birimleri su ve nem içermektedir. Bu nedenle bu tür yerlerde orta derecede kayıplar ortaya çıkmaktadır. Eğer ortam çok ıslak ve/veya killi ise, o zaman EM dalgasında önemli yitimlerin olduğu görülmektedir. İnceleme alanında manyetit içeriği çok yüksek bir birim varsa, yitimin yine yüksek olacağı, ancak bu oranın düşmesi ile birlikte yitim miktarının da hızla azaldığı ve orta yitim grubunda kaldığı görülmektedir. Sonuçta manyetit içeren bir birimde mutlaka bir yitim olacaktır ve modellemelerde probleme bağlı olarak böylesi durumların olduğu sorunlarda göz önüne alınmasının ve hesaba katılmasının önem arz edeceği bu grafikten açıkça görülmektedir.



Şekil 2.10 Alışıl gelmiş yüzeye yakın materyallerin bir aralığı için tipik materyal sönüm değerleri ve 200-1200 MHz aralığına karşılık gelen nano boyuttan mikro ölçekli manyetit karışımlarına değin değişimleri gösteren grafik. Düz çizgi tam sönüm aralığını gösterirken, kare işaretler tipik (materyaller için) ya da ortalama (manyetit için) değerleri göstermektedir (Daniels, 1996, 2004 ve Cassidy, 2008 'den düzenlenmiştir).

2.3 YNER’de Ayrımlık ve Etki Zonu

YNER yönteminde belirli bir uzaklıktaki nesneler belirlenebilir. Bu belirlemede hedef nesne nerede bulunmalı ve nesnenin geometrisi hakkında bilgiler nasıl elde edilmelidir? Bu sorunların yanıtı Şekil 2.11’deki çizimde görülmektedir. Şekilde bir gönderici ve birde alıcı anten bulunmaktadır. Bu nesnenin belirlenmesinde ayrımlık büyük önem taşır ve ayrımlık, hedef yapının geometrik özellikleri (genişlik, şekil ve kalınlık) ve pozisyonunun belirlenmesinde kesin sınırları gösterir ve o gözlem prosesleri ile denetlenir. YNER’de ayrımlık iki bileşene sahiptir; boyuna (aralık ya da derinlik) ve yanal (açısal ya da yanal yerdeğiştirme) ayrımlık uzunluğu. Bu olgu Şekil 2.11’de açıkça görülmektedir.



Şekil 2.11 Yeraltına nüfuz eden radar (YNER) için çözünürlük ikiye ayrılır, aralıklı çözünürlük ve yanal (açısal) çözünürlük (Annan, 2008’den uyarlanmıştır).

Aslında ayrımlık dalga temelli yöntemlerin çoğunda temel bir kavramdır ve üretilen bir puls ve onun yansımaları temelinde şekillenir. Bu olgu Şekil.2.12’de açıkça görülmektedir. Burada yansımalar birbirinden açıkça ayrılmış, birbirinin üstüne binmiş ya da birbiri ile çakışmış biçimlerde görülmektedir. Eğer iki puls zaman içinde birbiri ile çakışırsa, o zaman sonuçta daha büyük genlikli bir olayla karşılaşılacaktır. Bu pulsların birbirinde açıkça ayrı olduğu durumda her bir puls’ın yarı genişliği W ile tanımlanmış ve aralarındaki uzaklıkta T zamanı ile belirlenmiş

olmaktadır. Böylece her birinin ayrı birer olay olduğu açıkça görülmektedir ve zamansal puls ayrımı Annan (2005)'de verildiği gibi, uzamsal bir ayrımlığa dönüşmektedir. Böylece radyal ayrımlık uzunluğu (2.10) bağıntısı ile tanımlanabilir olmaktadır.

$$\Delta r \geq \frac{Wv}{4} \quad (2.10)$$

Materyaldeki puls genişliği ve hız, ayrımlık uzunluğunu belirler. Radyal ayrımlık uzunluğu kaynaktan olan uzaklıktan bağımsızdır. Uygulamada büyük aralıklar için pulse dağılımı ve saçılımı radyal ayrımlığı etkileyecektir. Böylece yanal ayrımlık uzunluğu (2.11) denklem ile gösterilecektir.

$$\Delta l \geq \sqrt{\frac{vrW}{2}} \quad (2.11)$$

Burada r hedefe olan uzaklıktır. Yanal ayrımlık sistemden olan uzaklık kadar hız ve puls genişliğine de bağlıdır. Uzaklığın büyük olduğu yerlerde yanal ayrımlık uzunluğu da daha büyük olacaktır. Bu kavram Frensel zone kavramı ile yakın bir ilişki içindedir. YNER'de zaman içindeki puls genişliği, W, band genişliği, B, ile de doğrudan ilişkilidir. Band genişliği ise merkez frekansı, f_c , ile doğrudan ilişkilidir. Bu ilişkiler doğrultusunda, puls genişliği (2.12) bağıntı ile tanımlanabilecektir.

$$W = \frac{1}{B} = \frac{1}{f_c} \quad (2.12)$$

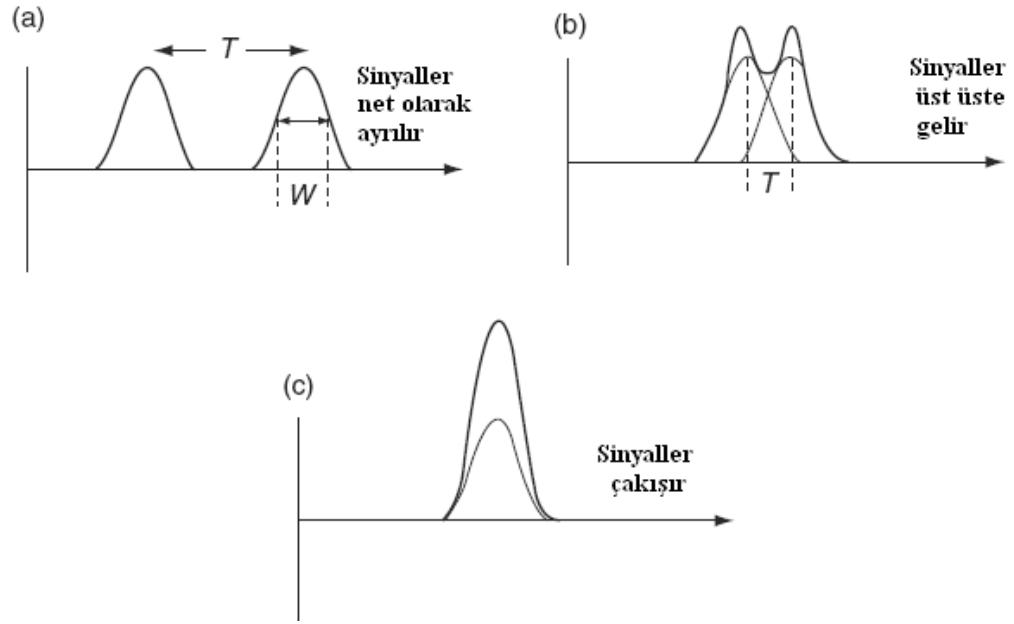
Merkez frekansının dalga boyu ise,

$$\lambda_c = \frac{f_c}{v} \quad (2.13)$$

Merkez frekansı hıza oranıdır. Böylece yanal ayrımlık uzunluğu,

$$\Delta l = \sqrt{\frac{d\lambda_c}{2}} \quad (2.14)$$

bağıntısı ile tanımlanacaktır. Burada f_c frekansı tek renkli sinyaller için Frensel zon çapına özdeş olmaktadır.



Şekil 2.12 W yarı genişliğinde geçici sinyaller. (a) $T \gg W$ olduğunda sinyaller net olarak ayrılabilir. (b) Her iki sinyalde birbirlerine yaklaşık eşit olana kadar görülebilir ($T \approx W$). (c) $T \ll W$ olduğunda her iki olay da görülemez (Annan, 2008'den uyarlanmıştır).

2.4 Saçılım Atenüasyonu

YNER sinyalleri karmaşık ortam içinde her durumda iletilir. Sinyaller birçok ölçekte heterojen elektrik ve manyetik özelliklerle karşılaşır. Küçük ölçeli heterojenlikler zayıf ya da belirlenemez yanıtlar üretirler, ama onların varlığı geçişleri ile birlikte sinyaller üzerinde bir etkiye sahiptir. Heterojenlikler tüm doğrultular boyunca geçen ya da saçılan EM alanı olarak enerjiyi çıkarır. Şekil 2.13 enerji bakış açısından saçılımın nasıl gözlenebileceğini göstermektedir. Bir dalga cephesi üzerindeki herhangi bir noktada ve bir birim alanda güçle birlikte gelen

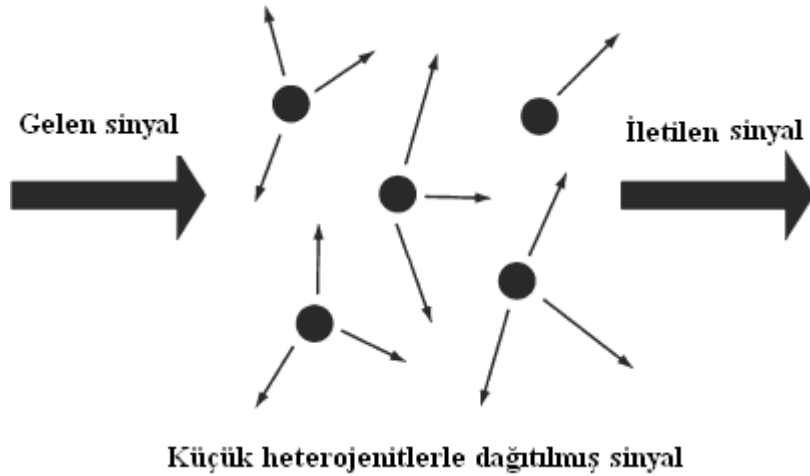
sinyal yerelde çarpışır ki burada a gibi uzamsal bir uzaklıkla karakterize edilen küçük ölçekli saçılımlar ve birim hacimdeki her sayının, N , olduğu yerellikler geçerlidir. Elektrik ya da manyetik alan bir saçılım atenüasyon katsayısı (α_s) ile sönümlenecektir. Diğer bir deyişle elektrik alan r uzaklığı ile azalacaktır. Bu olay;

$$E = E_0 e^{-\alpha_s r} \quad (2.15)$$

bağıntısı ile gösterilir. Burada,

$$\alpha_s = \frac{NA}{2} \quad (2.16)$$

Saçılan atenüasyon katsayısıdır ve A , saçıcının saçılma kesitinde gösterir.



Şekil 2.13 Yeraltına nüfuz eden radar (YNER) yönteminde sinyaller materyalin özelliklerinde bulunan ve iletilen sinyali azaltan küçük heterojenitler tarafından dağıtılır (Annan, 2008'den uyarlanmıştır).

Saçınma atenüasyonu frekansa çok bağlıdır ve bir puls'un Rayleigh saçınım kesiti (2.17) bağıntısı yardımıyla tanımlanır.

$$A = C \alpha^6 f^4 \quad (2.17)$$

Burada C , $1/m^4 \text{ Hz}^4$ olan bir birimlik sabit ve a ise kürenin yarıçapıdır. f ise, frekanstır.

Saçınma atenüasyonu, heterojen bir kayıplı dielektrik ortam boyunca seyahat edenler olarak görülecek YNER sinyalinin tüm atenüasyonunu belirlemek için materyalin kayıp atenüasyonuna ya da ohmik atenüasyona eklenmelidir. Bu durum (2.18) basit bağıntısı ile verilebilir.

$$\alpha_{toplam} = \alpha_{ohmik} + \alpha_{saçılma} \quad (2.18)$$

Hacimsel saçınma buz içinde çok önemlidir. Çünkü ohmik atenüasyon birçok toprak ya da kaya materyalindekinde oluşandan çok daha küçüktür.

2.5 Merkez Frekansı

Band genişliği YNER frekansını belirlemez. Spektrumun herhangi bir yerindeki bir frekans bandı tatmin edici ayrımlığa gereksinim duyacaktır. Etkili bir YNER için atenüasyon olasılıkla geçiş frekansının üzerindeki kadar az tutma frekansını gerektirir. Doğal malzemelerde atenüasyon elektrik kayıpları ve saçınma yitiminin bir kombinasyonudur.

YNER sinyalleri merkez frekans oranı için band genişliği ile karakterize edilirler.

$$R = \frac{B}{f_c} \quad (2.19)$$

R 'nin olabildiğince geniş olması istenir. Cihazda hedef her zaman pratik uygulamalarda geçerli olmak üzere B 'yi en büyükmek ve f_c 'yi de en küçükleme. Birçok pratik radarcı bir monopuls dalgacık karakteri elde eder ve geniş band radarlar, impuls ya da temelband radarlara göre en uygun şekilde atfedilir. $R \approx 1$ olduğundan, radarcılar onların merkez frekanslarıyla, f_c , normalde karakterize

ederler. Bir 100 MHz'lik YNER, 10 ns geçici genişliğe uygun 100 MHz'de odaklanmış bir 100 MHz band genişlikli olarak yorumlanır.

2.6 Anten Özellikleri

YNER antenleri EM alanlar yaratan ve onları saptayan özelliklere sahiptir. Gönderici anten kestirilebilir bir geçici ya da uzamsal olarak dağılmış alan içine uyarı voltajı nakletmelidir. Alıcı anten ise, onu kayıt edilebilir bir sinyale çevirmeli ve EM alanının bir vektör bileşeninin geçici değişimini belirlemelidir. Bu nedenle arzulanan anten özellikleri aşağıdaki gibi olmalıdır.

- a) Kesin kaynak ve belirleme yerleri tanımlanabilir olmalı,
- b) Gönderici ve alıcı yanıtları (voltaj akımına ya da akımından dönüştürülen elektrik alan dönüşüm fonksiyonları) zaman ve uzayda sabit olmalı,
- c) Kaynak voltaj ile alınan voltajın birleştirici alanının vektör karakteri ölçülebilir olmalıdır,
- d) Antenlerin band genişliği sistem uygulama gereksinimlerine uygun olmalıdır.

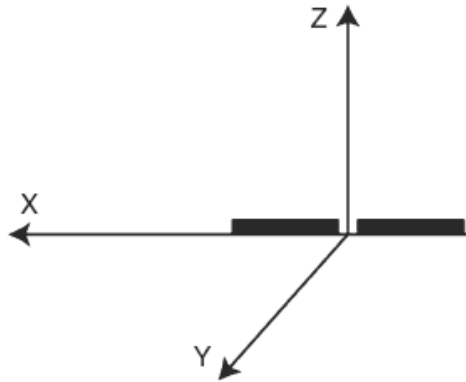
Bu gereksinimleri elde etmek kolay değildir ve etkili alan oluşumu ile belirlenme antenlerin sonlu boyutuna greksinim duyar. Yani anten boyutu sinyalin dalgaboyuna benzer olmalıdır. Etkili işlemler için sonlu boyutta antenler kullanılmalıdır ve bunlar aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır.

- a) Yaratılan alan ve belirleme uzamsal (ve geçici) bir bölge üzerinde oluşur. Diğer bir deyişle, kaynak ve belirleme noktaları kesin değildir.
- b) YNER uygulamalarında alan geçiş zamanı (ya da dalgaboyu) bulunduğu ortama bağlıdır ve sabit değildir. Diğer bir deyişle anten yanıtı ideal olarak değişmez olmayabilir.
- c) Uzamsal bir biçimde yayılmış bir anten, tek bir vektör bileşeni ile yanıtın izolasyonu geometrik anlamda zor olacağından, yanıtın daha az hassas vektör özelliğini ifade eder.

d) Sonlu boyutlara sahip antenler yapı üzerinde rezonans üreten frekanstaki enerjiyi göndermek için bir önceliğe sahiptir. Band genişliği çevresine daha az duyarlı ve az etkili olan bir anten sönümlenmesi ile en iyi genişlikte olmalıdır.

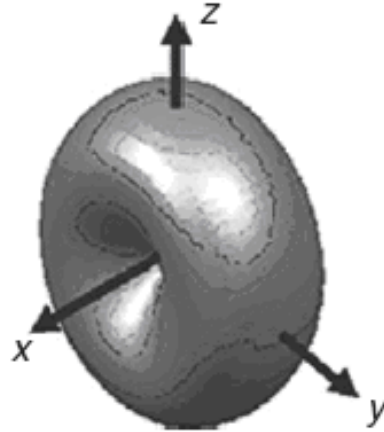
2.7 Anten Yönlenmesi

Kısa bir elektrik dipol antenin yönsel özellikleri yer tarafından denetlenir. Her ne kadar bu sorunun analizi karmaşıksa da, temel özellikler tanımlanabilir. Bu konudaki temel bilgiler Annan (1973), Engheta vd. (1982) ve Smith (1984)'de verilmektedir. Kısa ve merkezden beslemeli bir elektrik dipol aşağıdaki Şekil 2.14'de betimlenmektedir.



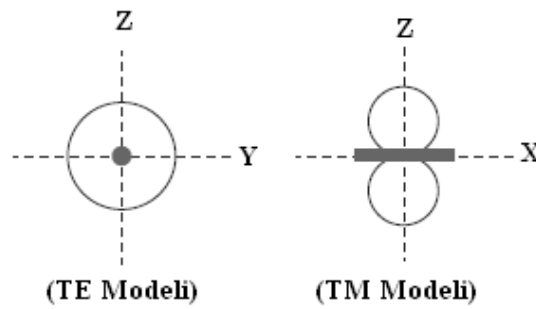
Şekil 2.14 Bir elektrik dipol anteni için geometri ve koordinat sistemi. Yere konduğunda X ve Y düzlemleri yer yüzeyi temsil eder (Annan, 2008'den uyarlanmıştır).

Geniş bir uzaklıktaki göreceli elektrik alan genliği ise Şekil 2.15'de betimlendiği gibi halka şeklindedir. Enerji dipol eksenine dik bir düzlemde tekdüze olarak yayılırken, antenin sonundan yayılan bir enerji yoktur.

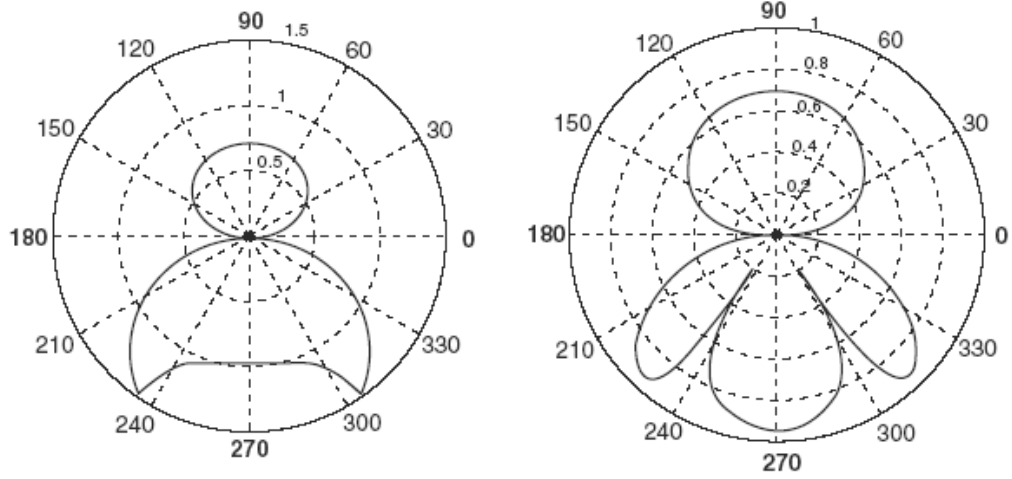


Şekil 2.15 Küçük bir elektrik dipol modelinin üç-boyutlu gösterimi uniform bir malzeme de bir halka şeklindedir. Dipolün sonlarında ışıma yoktur (Annan, 2008'den düzenlenmiştir).

Şekil 2.16'da ise çoğunlukla TE ve TM olarak tanımlanan halka boyunca olan dik kesitler görülmektedir. Dipol anten örüntüsü yeryüzüne yerleştirildiği zaman, örüntü Şekil 2.17'de görüldüğü gibi değişmektedir. Yönlenmedeki değişim, hava-yer arayüzeyi ile ilişkili kırıcı odaklanma yoluyla oluşur. Bu örüntü alanların uzak-alan ışıma bileşenini gösterir. Antenlerin yakınındaki alanlar daha karmaşıktır ve sayısal benzeşimlere gereksinim duyar.



Şekil 2.16 Şekil 2.17'deki üç boyutlu dipol modelleri boyunca, enine elektrik (TE) ve enine manyetik (TM) yönlü olarak belirtilen dik kesitler (Annan, 2008'den düzenlenmiştir).

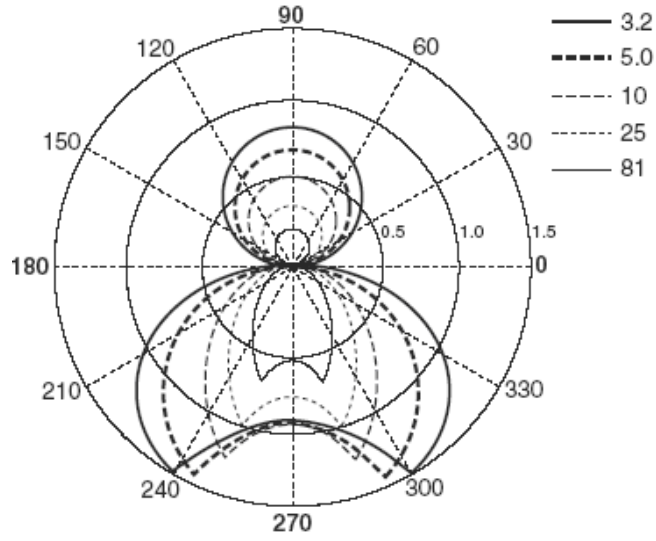


Şekil 2.17 Dipol yer yüzünde ise, yönü şiddetle değişir ve yerin elektriksel geçirgenliğine bağlıdır. Yer elektriksel geçirgenliğinin 3.2 olduğu bu modelde TE ve TM gösterilmiştir (Annan, 2008'den düzenlenmiştir).

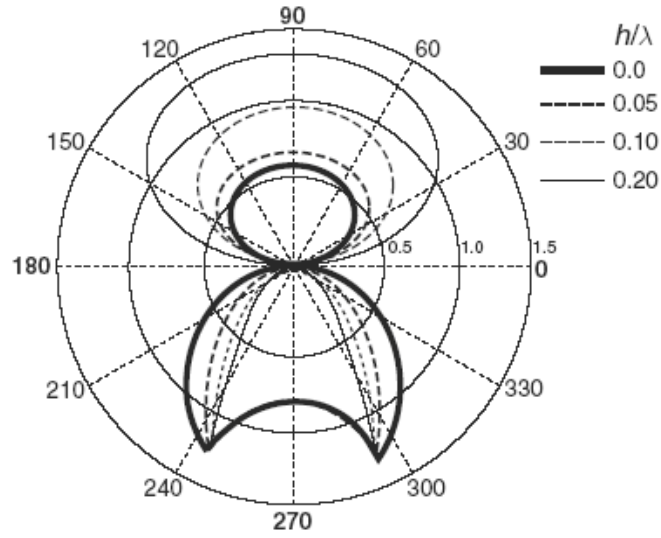
TE (H düzlemi) örneğindeki pikler hava-yer arayüzünün kritik bir açısında oluşur. Bu olay aşağıdaki bağıntıda verilmektedir.

$$\theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{V_g}{c} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{1}{\sqrt{K_g}} \right) \quad (2.20)$$

Yüzeyaltı geçersizlikleri kritik açı doğrultusunda TM (E düzlemi) 'de oluşur. Anten yönlenmesi yer-bağımsızdır. Yeraltı özelliklerinin değişmesi gibi, anten yönlenmesi de değişir. Şekil 2.18 yer altı geçirgenlik değerlerinin 3.2 ile 80 arasında olduğu örüntülerin bir dizisini göstermektedir. Yeryüzünün dışındaki anten eğimlerinin etkisi de önemlidir. Gerçel alan durumunda, yüzey pürüzlüğü ve yüzey üzerinde seyahat eden antenlere gereksinim yer kontağına yakın sonlanabilir. Anten yüksekliği Şekil 2.19'da görüldüğü gibi, anten yönlenmesini azaltır.



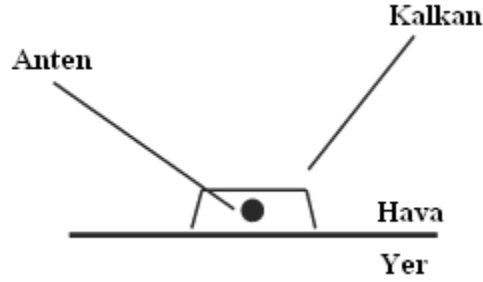
Şekil 2.18 Yer elektrik geçirgenliği değiştiğinde model de değişir. Buz (düşük) ve su (yüksek) arasındaki elektrik geçirgenliği değerlerinde enine elektrik model gösterilmiştir (Annan, 2008'den düzenlenmiştir).



Şekil 2.19 Anten yüksekliği de yön üzerinde etkilidir. Enine elektrik yönlenmesindeki değişim dalga boyunun merkez frekansına karşı normalize edilmiş bir fonksiyon olarak gösterilmiştir (Annan, 2008'den düzenlenmiştir).

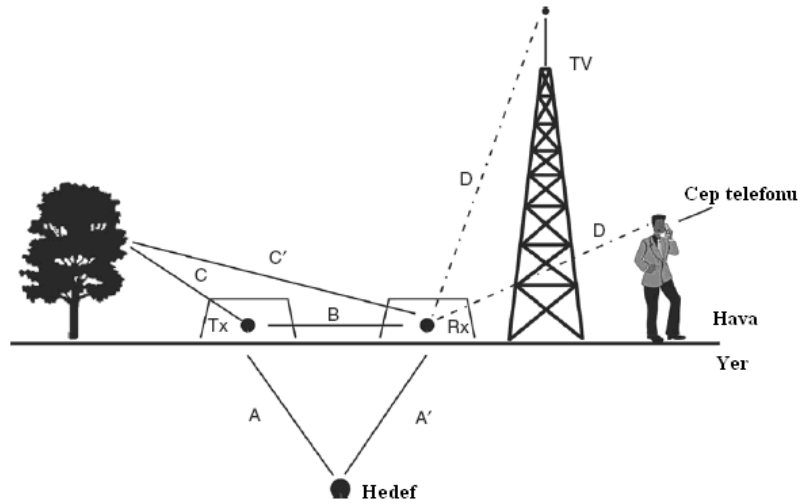
2.8 Anten Koruması

YNER antenleri normalde hava-yer arayüzüne yakın olarak yerleştirilmelidir. Şekil 2.20'deki gibi bir kapsayıcı bir koruma ile çevrelendiği zaman, buna dış etkilerden korumalı (shielded) anten adı verilir.



Şekil 2.20 Bir yeraltına nüfuz eden radar anteninin kalkanı antenin havadaki sinyallerle bağlanmasını sağlar. Bu sinyaller yer radarı sisteminin kendisiyle veya harici bir kaynak tarafından üretilmiş olabilir (Annan, 2008'den düzenlenmiştir).

Gerçekte YNER yönteminin uygulamasında onu etkileyen oldukça fazla dış koşullar vardır. Bunlar Şekil. 2.21'de açıkça görülmektedirler. Bu şekilden de görüldüğü gibi, bir vericiden çıkan sinyaller alıcıya gelinceye değin birçok değişik yol kat ederler.

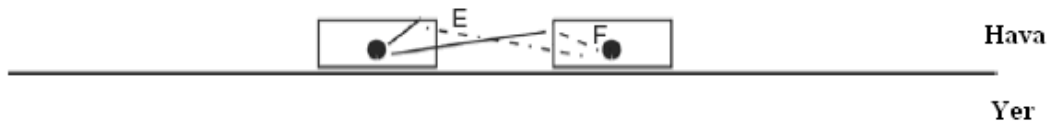


Şekil 2.21 Bir yeraltına nüfuz eden radar sistemi radyo dalgası sinyalleri üretir ve yayar. Birçok muhtemel sinyal ve yol vardır ve amaç hedef yanıtını maksimum ve diğer etkileri minimum hale getirmektir (Annan 2008'den düzenlenmiştir).

Bu durum YNER verilerinde önemli olumsuzluklara neden olur. Bu nedenle bu etkilerden kurtulabilmek için bir korumaya gereksinim vardır ve korumanın görevi seçime bağlı olarak bazı sinyalleri güçlendirirken, diğerlerini de bastırmaktır. Temel koruma tasarımlarının amaçları şunlardır;

- a) Yüzey altındaki bir hedefe yönelen ve ondan tekrar alıcıya gelmek için bir AA' yolunda seyahat eden sinyalin enerjisini en büyük haline getirmek (örneğin, odaklamak ya da sinyali doğrudan aşağı göndermek),
- b) Alıcı ve verici arasında B hattı boyunca doğrudan seyahat eden dalgayı en küçük haline getirmek,
- c) Bir CC' yolu üzerinde havada seyahat eden etkilerden kaçınmak için enerjinin en küçüklenmesi,
- d) Bir D sinyalinden kaynaklanan dış EM gürültülerini en küçükmektir.

Anten koruması bir EM yanıtına sahip bir yapıya gereksinim duyar. Enerji, bir gönderici antenden yola çıkar ve hem gönderici hem de alıcı anten korumalarına seyahat eder; daha sonra Şekil 2.22'deki gibi alıcı antene gelir. Üretilmiş koruma sinyalleri büyük olabilir ve uzun bir zaman boyunca, büyük oranda da sistem durdurma devresi artışıyla, yansımalar üretebilir. Korumanın kendisinin EM yanıtının dışında etkili bir koruma aslında geniş dönüştürücü boyutuna, daha büyük bir ağırlığa ve üretimde maliyet artışına neden olur. Anten korumaları çözdüklerinin dışında başka sorunlara da neden olabilir. Sonuç olarak birçok korumasız anten düzeni özellikle düşük frekanslı çalışmalarda kullanılmaktadır. Ancak burada ağırlık ve boyut önemli durumlardır.



Şekil 2.22 Antenin kalkanları etki olabilmek için radyo dalgalarıyla etkileşmelidir. Kalkan dizaynında ekstra bir özen gösterilmediğinde kalkan, istenen ölçüme ek olarak zararlı bir etkileşim oluşturabilecek bir yanıt oluşturabilir (Annan 2008'den uyarlanmıştır).

Korunmalı antenler daha çok yüksek frekans YNER sistemlerinde (tipik olarak 100 MHz üstü) kullanılırlar ve boyut olarak bir ölçüde de olsa kullanılabilir ölçülerdedir. Sıkı yer kuplajlanması havaya ve sıklıkla koruma düzenlenmesinde korumanın bir kısma olacak sızıntıyı en küçükler. Pratik anten koruma etkenleri aşağıda verilmektedir;

- a) Koruma asla mükemmel olmaz.
- b) Tüm uygulamalarda koruma gerekli değildir. En yüksek uygunluk ve açık bir alandaki penetrasyon en yüksek koruma antenleri olmaksızın elde edilebilir.
- c) Çok ideal bir koruma bile şüpheli sinyal sızıntılarına neden olabilir. Deneyimli YNER uygulayıcıları bile bu yanıtları bazen yanlış yorumlayabilir.

2.9 Örneklemeye Ölçütü

YNER aramalarının ana hedefi radyo dalgaları kullanarak doğrudan olmayan bir biçimde yer altı hakkında bilgi elde etmektir. Uzayın ve zamanın bir fonksiyonu olan EM alan örneklenmeli ve kayıt edilmelidir. Arama tasarımı temel örneklemeye ilkelerine göre yapılmalıdır. Verilen bir f sinüsoidal frekansı için zaman ve uzamsal örneklemeye aralıkları, Δt ve Δx , Nyquist örneklemeye aralığını başarmak için aşağıda verildiği gibi olmalıdır.

$$\Delta t \leq \frac{1}{2f} \quad (2.21)$$

$$\Delta x \leq \frac{v}{2f} \quad (2.22)$$

Merkez frekans oranına uyumlu bir bant genişliğine sahip geçici YNER sinyalleri için bu oran aşağıdaki gibi olmalıdır.

$$\Delta t \leq \frac{1}{3f_c} \quad (2.23)$$

$$\Delta x \leq \frac{v}{3f_c} \quad (2.24)$$

Bu ölçüt idealdir ve geniş değerlerin yarısı için seçilen değerlere uygundur. Böylece aşağıda verilen ve frekansın iki katına sahip olan ve aslında değeri yarılayan değerler tüm araştırmaların tasarımı ve düzenlenmesinde yeterli olacaktır.

BÖLÜM ÜÇ

YERALTINA NÜFUZ EDEN RADAR (YNER) MODELLEMESİ

3.1 Giriş

YNER’de modelleme tek frekans modelleri, zaman ortamı modeller, ışın izleme, aktarma ve yansıma teknikleri (transmission-reflection), integral teknikleri (MOM-momentler yöntemi) ve ayrık eleman yöntemlerinden oluşur. Sonlu farklar zaman ortamı (FDTD- *Finite Difference Time Domain*) tekniği bunların içinde en popüler olanıdır ve görece yeterli bir masaüstü bilgisayar yardımıyla da gerçekleştirilebilir. En temel modelleme tekniği alınan sinyal düzeylerinin bir kestirimini, dinamik aralığı ve belirleme olasılığını kullanarak radar denklemleri ile yapılan çözümlemedir. Ancak bu modelleme birçok zayıflığa da sahiptir; YNER sistemlerinin aralığının çok kapalı olmasından dolayı yakın alanlarda kullanılması ya da antenlerin tepkime alanında kullanılması gibi. İlk çalışmalar YNER antenlerinin modellemesi üzerinde yapılanlardır ve daha sonra toprak etkileri de işin içine katılmışlardır (Huang vd., 1996; Rappaport ve Weedon, 1996; Teixeira vd., 1998; Martel vd., 2001; Gürel ve Oğuz, 2000, 2001). Yeraltı yapılarının modellenmesinde ise bir boyutlu ışın izleme ve aktarma-yansıma (Goodman, 1994 ve Olhoeft, 2001), sonlu farklar zaman ortamı (Bergman vd., 1998, Cassidy, 2001, Giannopoulos, 2005), sonlu-hacim, Z-dönüşümü ve ayrık eleman (Robert ve Daniels, 1997; Yee ve Chen, 1997; Nishioka vd., 1999) teknikleri ve onların hibritleri kullanılmaktadır. Değişik yaklaşımlara rağmen, bunların hepsi, elektromanyetik (EM) dalgaların yeraltındaki materyallerle etkileşimiyle YNER dalgasının yayınımini modellemeye çalışır.

Karmaşık ve heterojen ortamlarda YNER verisinin analizi, değerlendirilmesi ve yorumlaması yakın-alan anten kuplajlanması/indüksiyon etkileri, anten radyasyon örüntüsündeki değişiklikler, inhomojenliğin varlığı, anizotropi, kayıplı materyallerin varlığı ve arama sırasında yapılan hatalardan dolayı oldukça karmaşıktır. Bu zorluklar yüzeye yakın verinin yorumunda zorluklar, başarısızlıklar, uygun olmayan sonuçlar, önemli zaman ve para yitimleri ile karşımıza çıkar. Bu nedenle matematiksel modelleme yorumlamayı artırıcı ve yoruma yarar sağlayan önemli bir

tekniktir. Bu teknik yardımıyla yapılacak karmaşık yüzeyaltı modellerinin vereceği yanıtlar, alan çalışmaları için yorumlama anlamında önemli yararlar sağlayacaktır.

Temel ışın izleme ve basit aktarma-yansıma tekniklerinin temeli keskin arayüzeyli cisimlerin göreceli elektriksel geçirgenliği (ϵ) ve iletkenliği (σ) karşılaştırılarak nesneleri geometrik olarak tanımlayan modellere dayanır. Bu yöntemlerle modellenen YNER yanıtları her bir ara yüzey için temel kaynak dalgacık (çoğunlukla merkezi anten frekansı ile ilişkili Ricker dalgacığı kullanılır) yardımıyla hesaplanır. Böylece ilişkili yer altı modelleri için geometrik temeller üzerinde yer altı modellerinin iki boyutlu yapay radargramları oluşturulur. Ancak bunlarla çok sofistike ortamların modellenmesi olanaklı olmamaktadır. Bu nedenle bu tür ortamların modellenebilmesi için sonlu farklar zaman ortamı (FDTD) modelleme tekniği kullanılır (Cassidy, 2007). Bu teknik daha karışık ortamların gelişmiş modelleme araçları ile modellenmesinde popüler bir yöntemdir (Taflove ve Hagness, 2005). Bu teknik özellikle karmaşık, kayıplı ve dağıtıcı özelliği olan yüzeyaltı durumlarının modellenmesinde ışın izleme yöntemine göre daha uygun modeller üreten bir yöntemdir. Özellikle YNER anteni ile yüzeyaltı yapılarını doğru bir üç boyutlu geometri içinde gösterebilmek için çok gerçekçi bir yöntemdir. Böylece karmaşık ortamların modellenebilmesine olanak sağlar ve böylece gerçek veri içindeki çözümü zor yorumsal bilgileri ortaya çıkarmaya yardımcı olur (örneğin yansımaların varlığı ve hızının ölçülmesi, yüzeyaltı ortamın dağıtıcı karakteri, hedef materyalin özellikleri gibi).

Elektromanyetik dalga yayınımları ile ilgili sorunlarda FDTD tekniği diğer modelleme tekniklerine göre yararlılığı ortada bir tekniktir ve bunlar genel olarak şu biçimde tanımlanabilir (Cassidy, 2007);

- Green fonksiyonlarının çözümünü içermez,
- Elektrik ve manyetik potansiyelleri değerlendirmeye gerek duymaksızın üç boyutlu uzayda Maxwell'in elektromanyetik alan denklemlerinin doğrudan uygulamasını kullanır,

- Matris ya da artımlı yöntemleri kullanarak kapalı formdaki denklemleri açık biçimde çözebilir,
- Yöntem uygulamada robust, kesin ve göreli olarak doğrudur.
- Bir toplam alan çözüm önerisi (örneğin üç boyutlu) ve elektrik ile manyetik alan vektörlerinin her ikisini de kullanır,
- Genişband, darband ya da harmonik zaman ortamı sorunlara uygulanabilir,
- Yankı yapan ya da yayılmış zaman sorunları için uygundur,
- Modellenebilen yanıtların farklı tiplerine izin verir (örneğin, saçılmış ve/veya yayın alanlar, yüzey etkileri, akımlar, güç kaynakları vb.),
- İletken, kayıplı dielektrik ve dağıtıcı manyetik materyalleri içerir,
- Tasarımın matematiksel tanımlarında değişikliğe gereksinmeksizin madde özelliklerini değiştirerek bunları içerebilir,
- Farklı grid tiplerini ve düzenlemeleri kullanarak keyfi, üç boyutlu yüzeyaltı geometrileri, karmaşık matematiksel özellikler ve sofistike anten düzenlemelerini kapsayabilir,
- Tek bir işlemci ya da paralel işlemlere uygundur,
- Standart bilgisayar dillerinde yazılım için göreli olarak açıktır ve bilgisayar platformlarının çeşitliliğinde etkilidir,
- Zaman ve uzayda elektromanyetik alan ve dalgaların kapsamlı görüntülenmesine izin verir.

Bu özelliklerden de görülebildiği gibi, yöntem elektromanyetik dalganın modellenebilmesinde etkili niteliklere sahiptir ve diğer tekniklerle karşılaştırıldığında, karmaşık ortamların modellenebilmesi için oldukça etkili olduğu görülmektedir. Özellikle YNER yöntemi gibi hem karmaşık ortamların belirlenmeye çalışıldığı hem de yorumun önem taşıdığı yöntemlerin modelleme aşamasında önemli bir yaklaşımı sağlar ve yapılacak modellemelerde karmaşık ortamların yorumlanabilmesine olanak sağlar. Bu bağlamda tez kapsamında ışın izleme ve FDTD yöntemleri sığ jeolojik sorunlar üzerinde yapılan modellemelerle tartışılacaktır.

3.2 Işın İzleme (Ray- Tracing) Tekniği

Işın izleme tekniği sismik yöntemde yaygın bir kullanıma sahiptir. Sismik yorumlamaya büyük katkı sağlayan 2-boyutlu ve 3-boyutlu düz çözüm modelleri bu teknik kullanılarak geliştirilmiştir. Sismik endüstrisinde kullanılan 2-boyutlu ve 3-boyutlu migrasyon, karmaşık dalga-sayısı filtreleri, ters-evrişim, hız analizi vb. gibi teknikler YNER yönteminde de benzer yaklaşımları devreye sokmuştur. Ama sismik yorumlamada ışın izlemede genelde iki ve üç-boyutlu düz çözüm modellemesi kullanılırken, bu YNER için sadece bir boyutla sınırlı kalmıştır. Belki gelecekte bu yöntem ile 2- ve 3-boyutlu modellemelerde olası olabilecektir. YNER yönteminin ışın izleme tekniklerinde kullanılan birçok bilimsel terim, doğal olarak sismoloji literatüründe bulunanlarla benzerlik göstermektedir (Telford ve diğ., 1990). YNER ile sismik yöntem modellemeleri arasında bazı farklılıklar vardır. Bunlardan en önemli olanı, YNER yönteminde verilerin verici ve alıcı sinyallerinin uzamsal pencere-anten açıklığına bağlı olarak kaydedilmesidir. Sismik yöntemde ise, alıcıların (jeofonların) yer hareketlerinin noktasal ölçümünü yaptığı bilinmektedir. Anten açıklığının etkisi, radar sinyalinin genliklerinin önkestirimi için temel bir etkidir (özellikle anten yakınındaki yansıtıcılar için). 1-boyutlu sentetik radargramlar literatürde çok yaygın bir kullanıma sahiptir. Ancak, yeraltındaki 1-boyutlu yapılardan tam anlamıyla önkestirilen radar izleri geometrik yayılımıda olduğu gibi anten açıklığının etkisi içinde daha yüksek boyutlu modelleme yapmanın gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Basit elastik sismik dalga ışınlımından ayırt edilebilir özellik taşıyan diğer etkenlerden mikrodalga ışınlımının doğası dağıtıcı özelliktedir. Elastik olmayan sismik dalgalar halinde benzeşimler ise ancak dağıtıcı mikrodalgalar ile sismik dalgalar arasında çizilebilir. Bu çalışmada yer içine gönderilen radar dalgasının tek frekanslı olduğu düşünülerek mikrodalgaların dağıtıcı karakteri modelleme içine katılmamıştır.

Hava radarından evrimleştirilerek elde edilen YNER yönteminin tarihsel gelişimi göz önüne alındığında, hava hedeflerinden geri gelen sinyalleri tanımlamak için

aşağıda verilen (3.1) bağıntısı yitimli ortamlarda hedeften alınan gücü tanımlar (Skolnik, 1990):

$$P_r = \frac{G_t P_t A_e C}{(4\pi)^2 R_t^2 R_r^2} \exp[-2\alpha(R_t - R_r)] \quad (3.1)$$

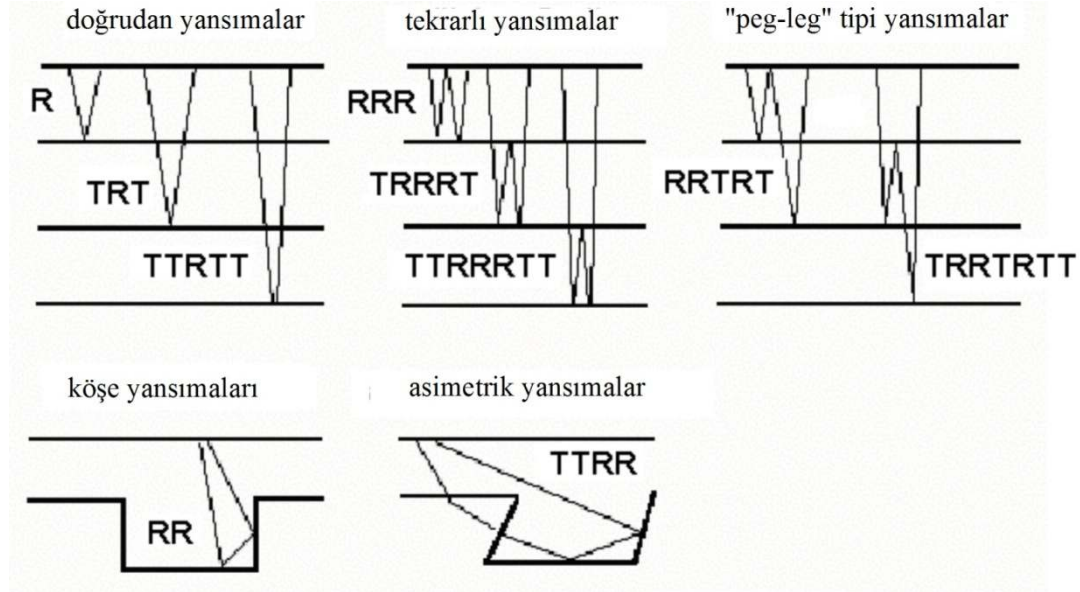
Burada, G_t vericinin genliği; P_t iletilen güç; R_t verici ile hedef arasındaki mesafe; R_r alıcı ile hedef arasındaki mesafe; α sönümlenme (attenuation) katsayısı; A_e alıcı antenin etki alanı; C hedef radar kesitidir.

Bu radar denklemi uçuş algılama problemleri için kullanılan denklemden türetilmiş olmasına rağmen bu denklemin gömülü hedef yapıların YNER yanıtlarına vereceği etki, (1) alıcı antenin etki alanı, (2) hedef kesit, (3) sinyal sönümlenmesi ile açıklanabilir.

Zamana bağlı değişen YNER sinyallerinin benzeşiminin yapılabilmesi için, sentetik radargramı açıklayan (3.2) bağıntısı verilmiştir.

$$S(t) = I_t(t) * I_r(t) * \sum_{\theta} D(\theta) \sum_k Q_k(t) \quad (3.2)$$

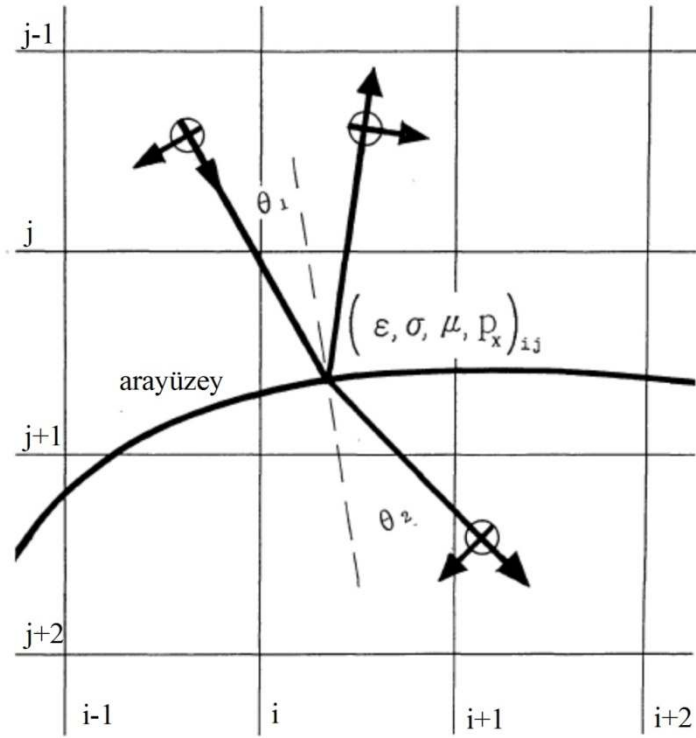
Burada, S sentetik izi; I_t iletilen dürtü dalgacığı; I_r alıcı dürtü yanıtı; D yönlü anten yanıtı; Q bir ışın için geriye dönük genlik yanıtı ki bir “kth” dalga tipli yol boyunca yansıma, iletim, kırılma ve sönümlenme olaylarına maruz kalabilecek olması göz önüne alınır; t zaman. Kth dalga tipi, özel bir tek ışın için seyahat komutunun bir dizisini simgeler. Örneğin, “R” olarak tasarımılanan bir kth dalga tipi için ışın yolu tek bir yansıma içerecektir. “TRT” olarak tasarımılanmış bir başka kth dalga tipi dalgada ise, önce bir iletim olayı, sonra yansıma ve takiben de çeşitli yapı sınırları vd. yerlerden gelecek iletimleri tanımlayacaktır. Böylece benzer birçok kth dalga tipi ışın izleme tekniğinde kullanılmaktadır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Bazı önemli kth dalga tiplerinin sentetik modeller üzerinden iletiminin gösterimi (Goodman, 1994'den uyarlanmıştır).

Sentetik radar izi dalga türlerinin bir toplamı ve antenin yönlü yanıtının tümü üzerinde yapılan bir toplamla gösterilir. Farklı dalga türleri ayrık bir grid içine sayısallaştırılan yapı boyunca oluşan izlerdir. Grid hücreleri toplamda dört değişkenden oluşur; üçü materyal değişkenleri (ϵ - dielektrik geçirimsizlik, σ - elektriksel iletkenlik, μ - manyetik geçirimsizlik) ve biri de tanımlayıcı P_x (grid hücreleri boyunca yapısal arayüzeylerin tanımı olan işlevsel ya da polinomal ya da spline bir bağıntının katsayıları) içerir (Şekil 3.2).

Polinomlar tek-grid hücresi içinde olası eğim belirlemelerinin sonsuz bir sayısına izin verir. Bu nedenle, yöntem, tek bir hücre içindeki “tek eğim (singleslope)” değeri ya da “sonlu” olanından ayırmak için “sonsuz eğim yöntemi (infinite slope method)” (Goodman and Nishimura, 1992) olarak tanımlanır. Yöntemin avantajı küçük ölçekli yapıların göreceli olarak kaba bir grid içine sayısallaştırılmasıdır. Bu arada tüm yapı/eğim bilgisi korunmaktadır. Buna ek olarak yöntem grid hücreleri sadece yapısal sınırların yerini belirlemek için kullanıldığından hücre biçiminden bağımsızdır. Anten açıklığı, her ne kadar sentetik radargram bağıntısı içine açık biçimde yazılmıyorsa da, birçok grid hücresi boyunca var olan alıcı antenin varlığının benzeşimi ile olayın içine eklenir.



Şekil 3.2 YNER simülasyonunda ayrık grid kullanımının gösterimi. Her grid hücresi dielektrik geçirimsizlik, iletkenlik, gözeneklilik ve bir eğimli yapının şekil fonksiyonu tanımlayıcıyı içerir (Goodman, 1994).

Sonsuz eğim yönteminde (ISM) kullanılmış elektromanyetik dalga yayılımı değişen yayılım modellerine kolayca dahil edilebilir; günümüzde bir iletken-yitim dalga kuramı dahil edilmemiştir (Jackson, 1977). Z yönündeki elektrik alan yayılımı için ana elektromanyetik dalga denkleminin formu (3.3) bağıntısıyla verilmiştir.

$$\frac{d^2 E(z)}{dz^2} = \gamma^2 E(z) \quad (3.3)$$

Yayılım vektörü γ 'nin hem gerçel hem de sanal kısmı vardır ve $(a+ib)$ şeklinde tanımlanır. Gerçel kısım elektromanyetik dalganın sönümlenme katsayısı verir. Ayrık bir açısal frekansta sönümlenme katsayısı, w , (3.4) bağıntısıyla verilmiştir.

$$\alpha = \omega \left(\frac{1}{2} \mu \epsilon' \left[(1 + \tan^2 \delta)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.4)$$

Yayınım vektörünün sanal kısmı, yani faz sabiti, (3.5) bağıntısıyla verilmiştir.

$$b = \omega \left(\frac{1}{2} \mu \varepsilon' \left[(1 + \tan^2 \delta)^{\frac{1}{2}} + 1 \right] \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.5)$$

Burada, $\tan \delta$ yitim tanjantıdır ve (3.6) bağıntısıyla tanımlanır.

$$\tan \delta = \left[\frac{(\sigma + \varepsilon'')}{\omega \varepsilon'} \right] \quad (3.6)$$

Burada, ε' gerçel kısmın dielektrik geçirimsizliğini; ε'' sanal kısmın dielektrik geçirimsizliğini gösterir. Bu denklem de, sanal kısmın hem elektriksel iletkenliği hem de manyetik geçirgenliğinin sıfır olduğu düşünülür. Bazı metallerin dışında birçok materyal için yukarıdaki denklemlerdeki manyetik geçirgenliğin gerçel kısmı serbest uzaydaki değer olan $4\pi 10^{-7} H/m$ olarak alınabilir. Yitim tanjantı dc iletim ve dielektrik gevşemeden kaynaklı elektromanyetik dalga enerjisinin frekansa bağımlı kaybının ölçüsünü verir (Duke, 1990).

Elektromanyetik ışının yansıma ve iletim gösterimi için kullanılan genel optik kuram kuralları ISM sentetik radargramlar için de geçerlidir. Bu durumda, yapıların dalga boyunun mikrodalga ışınının dalga boyundan büyük olduğu kabul edilir. Paralel polarize olmuş mikrodalgaların yansıma ve iletim durumları (3.7), (3.8) bağıntılarıyla verilmiştir.

$$R = \frac{Z_2 \cos \theta_1 - Z_1 \cos \theta_2}{Z_2 \cos \theta_1 + Z_1 \cos \theta_2} \quad (3.7)$$

$$T = \frac{2Z_2 \cos \theta_1}{Z_2 \cos \theta_1 + Z_1 \cos \theta_2} \quad (3.8)$$

Burada, karmaşık elektromanyetik impedansın (Z) bağıntısı (3.9)'da verilmiştir.

$$Z = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\varepsilon}} \quad (3.9)$$

Karışmış polarizasyon iletim özellikleri böylesi antenler için, dik polarize dalga bileşenlerini de kapsayabilecektir.

İki farklı materyaller arasındaki arayüzlerdeki kırılmalar Snell yasasıyla tanımlanır.

$$b_1 \sin\theta_1 = b_2 \sin\theta_2 \quad (3.10)$$

Sönümlenen ve yansımalar ($R_1, R_2 \dots R_i$) ile iletimlere ($T_1, T_2 \dots T_j$) uğrayan kth tipi dalga için YNER radargram simülasyonlarında hesaplanmıştır dönen genlik yanıtı (3.11) bağıntısında verilmektedir.

$$Q_k(t) = A_k(R_1 R_2 \dots R_i)_k (T_1, T_2 \dots T_j)_k \delta(t - t_k) \quad (3.11)$$

Burada, dalganın (ϕ) yol boyunca sönümlenme faktörü (3.12)' de verilmektedir.

$$A = \int_{\phi} e^{-\alpha(\phi)} d(\phi) \quad (3.12)$$

Dizinler olan $1 \dots i$ ve $1 \dots j$ ışın-yolu boyunca karşılaşan iki ortamı gösterir. Kth ışınının gecikme zamanı (t_k), kth dalga tipi ışının yolu üzerindeki ters dalga hızının (dalga yavaşlaması) integrali ile (3.13) bağıntısıyla tanımlanmıştır.

$$t_k = \int_{\phi} \frac{1}{v(\phi)} d(\phi) \quad (3.13)$$

Burada, mikrodalga faz hızı: $v = \omega/b$. Delta fonksiyonunun kullanımıyla, dönen genlik yanıtı piklerin bir dizisini içerir. Pik'lerin büyüklükleri t_k zamanında

konumla birlikte kth dalga tipi için sönümlenme faktörleriyle birlikte yansıma ve iletim katsayılarının birleşimine uygundur.

Sentetik radar izi oluşturmada son işlem, alıcı ve verici antenleri içeren enstrümantasyon yanıtları ile evrişimi kapsar. Her ne kadar yakın-alan etkileri kullanılabilir de, eğer onlar biliniyor ve yansıyan dalgalar yakın-alan zaman penceresi içinde kayıt edilirse, impuls yanıt dalgacığı normalde antenin bir uzak-alan yanıtını göstermede varsayılır. Birçok yer radarı anteni impulsları yer içinde bir yarım dalgaboyu içerisinde uzak-alan anten yanıtlarına yaklaşır (Duke, 1990).

YNER radargram hesaplamasına başlamak için, ışınlar yönlü yanıtlar (directional response- radiation pattern) tarafından tanımlanmış başlangıç genliği ve bir yöne sahip grid içine gönderilir. Işın seyahati sırasında karşılaştığı farklı sınırlarda oluşacak yansıma ve/veya iletimin her ikisini de gösteren belli bir dalga tipi tanımlama özelliğine sahiptir. Eğer dalgalar grid başlangıcına ya da antenin yatay açıklığını gösteren gridlerin içine dönerse, o zaman onlar kayıt edilir. Eğer dalga tasarımlanan zaman penceresini aşarsa, dalga kaydedilmez ve bir sonraki dalga tipi başlatılır. Eğer bir dalga kth dalga tipi özelleşmiş olanlardan çok daha fazla arayüzle karşılaşarsa, o dalga da göz önüne alınmayacaktır.

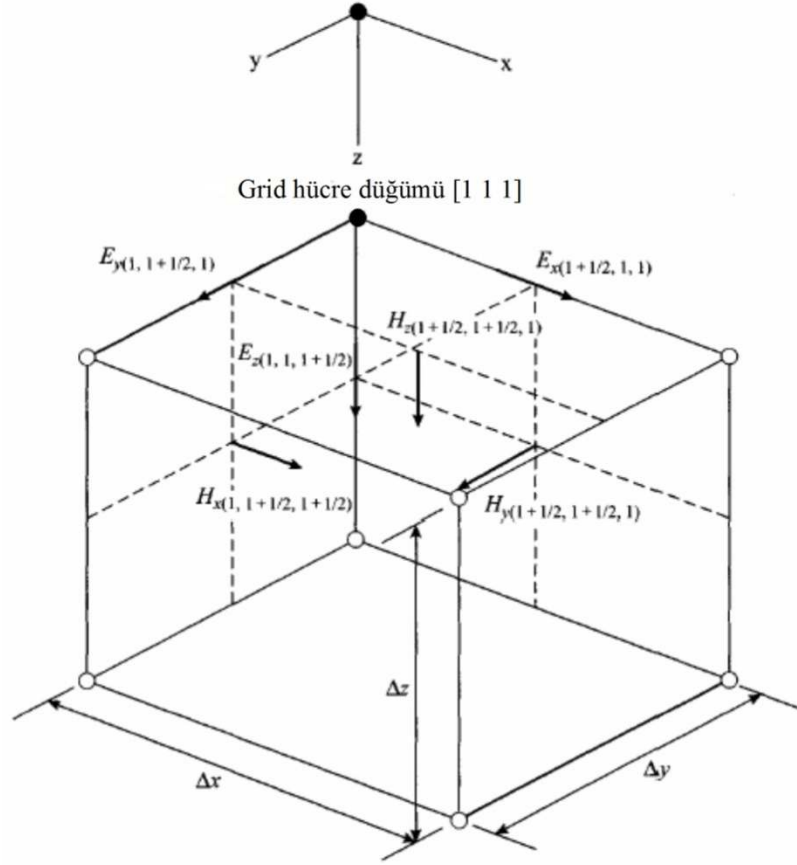
Sentetik radargram simülasyonu hakkında baskı elde etmek için önemli bir noktada kırıcı ortamda geometrik yayılımın etkilerini kestiren ve barındıran yöntemdir. Modeldeki özelliklerin bağlı genlikleri istatistiksel olarak örneklenebilir ve gömülü hedefler/yapılar için radar kesitleri kestirilebilir. Geometrik yayılım etkilerini başarıyla gerçekleştirmek ve önkestirmek için radar antenin yönlü yanıtlarını benzeştirmek için kullanılmış bir uygun sayısallaştırma aralığına gereksinim vardır. Büyük derinliklerdeki küçük nesnelerdeki yapısal modelleri için, yanıtın sayısal örnekleme oranının çok ince olması hedefin kaydını garanti altına almada gereklidir. Uygun bir sayısallaştırma aralığıyla YNER sinyallerinin tüm dalga-biçimi kestirilebilir.

3.3 Zaman Ortamında Sonlu Farklar (FDTD) Tekniği

YNER modellemesinde FDTD tekniği son 15 yıldan beri uygulanan ve yukarıdaki bölümde de genel tanımları verildiği gibi sönümlü, dağıtıcı ve heterojen yeraltı yapılarının modellenmesinde gerçeğe uygun yanıtlar veren önemli bir tekniktir. Günümüzde genel olarak basitliği, keyfi biçimli karmaşık modellerdeki kesinliği, gerçekçi anten düzenlemelerine olanak sağlaması ve elektriksel özelliklerdeki dağılım gibi özellikleri daha iyi açıklaması nedeniyle birçok araştırmacı tarafından kullanılmaktadır (Wang ve Tripp, 1996; Bourgeois ve Smith, 1996; Bergman vd., 1996; Teixeira vd., 1998; Holiger ve Bergman, 2002; Irving ve Knight, 2006).

FDTD formüllerinin çok değişik uygulamaları bulunmaktadır ve içerdikleri yararlılıklar ve olumsuzluklar anlamında birçok yazar tarafından tartışılmıştır. Bu teknikte üç-boyutlu bir grid ağı içinde hacimsel olarak modelleme yapılır ve alan hücreleri Δ_x , Δ_y ve Δ_z hücre boylarında seçilir. Her bir hücre içindeki elektrik alan (E) ve manyetik alan (H) Yee hücre geometrisi içinde uzayda zigzak bir biçimde Kartezyen $E(x,y,z)$ ve $H(x,y,z)$ bileşenleri ile tanımlanır (Şekil 3.3). Maxwell'in elektromanyetik alan eşitliklerinden yola çıkılarak, sonlu farklar yaklaşımı içerisinde herhangi bir noktadaki (ve zamandaki) elektrik alan ve onun komşusu manyetik alan hakkında hesaplama yapmak olasıdır. Böylece bir YNER anteninde çıkacak bir kaynaktan yayınacak dalganın her bir hücre için dalga alanlarını belirli zaman aralıkları içinde hesaplamak olası olacaktır. Böylece tüm hücreler boyunca bu işlem her bir zaman adımı için tekrarlandığında yeraltı üç boyutlu olarak modellenmiş olacaktır. Yüzeyaltının fiziksel benzeşimini elde edebilmek için tanımsal materyal özellikleri her bir hücre içine dielektrik geçirimsizlik, manyetik geçirgenlik ve elektriksel iletkenlik olarak atanacak ve geometrik anlamda karmaşık yapılar bu yolla modellenebilecektir. Uygun kaynak bağıntılarının kullanımıyla da değişik anten özellikleri için benzeşimler başarılabilecektir. Böylece ortamlardaki sinyal yansımaları, saçılım, atenüasyon ve saçınım açık biçimde görülebilecektir. Bu işlemlerde uzamsal örnekleme aralıkları büyük önem taşır ve bunların olası ölçülerde seçilmesi önemlidir. Bunun için iyi bir YNER yayılım modellemesi yapabilmek için

yüzeyaltının baskın sinyal dalgaboyunun 1/8 ile 1/15 arasında hücrelere ayrılan bir grid şebekesinden oluşturulması gereklidir (Cassidy, 2007).



Şekil 3.3 Elektrik (E) ve manyetik alan vektörlerinin Yee hücre geometrisi ortogonal uzayda zigzaglıdır (Cassidy, 2007).

Başarılı bir FDTD modellemesi için aşağıdaki olguları kapsayan bir şema yararlı olacaktır.

- Anizotropik ve frekans-bağımlı elektriksel geçirimsizlik ve iletkenlik, gerektiğinde de manyetik geçirgenlik, içeren maddelerin geniş bir aralığı,
- üç boyutlu hedef yapılar ve karmaşık yüzeyaltı geometrisi,
- korumayı da içeren gerçekçi anten tasarımları, etkili sinyal indirgeme ve kesin kaynak sinyal tanımları,
- zamanı belirlemek için ‘hafıza değişimleri’ ve böylece EM dalga yayılımı üzerinde materyallerin bağımlı etkisi

Günümüzde yöntemin çözümünü yapan birçok bilgisayar programı olayın anlaşılması ve geliştirilmesi anlamında sanal ortamda ücretsiz olarak dağıtılmaktadır. Bu kodlardan biride bu çalışmaya söz konusu olan Irving ve Knight (2006) tarafından MATLAB kodunda iki boyutlu olarak yazılmış programdır. Bu program hem yüzey hem de kuyu içi uygulamalarda iki boyutlu modellemeye olanak vermektedir. Her ne kadar iki-boyutlu modellemeler anten davranışları ve materyal özelliklerindeki düzlemde sapan değişimler için tüm olguları hesaba katamıyorsa da, Irving ve Knight (2006) tarafından yazılan kod YNER araştırması için gerekli birçok önemli özelliği yakalamakta ve tümüyle üç-boyutlu algoritmaların hesaplama maliyetinin bir bölümünde çalışmaktadır. Buradaki kodlar modelleme gridinin kenarlarından kaynaklanan yansılardan kaçınmak için sınırları emen kusursuz uyumlu katman (PML-*Perfectly Matched Layer*) özelliğindedir. Bu kodun oluşumuna neden olan kuramsal olgu ise aşağıda sunulmaktadır. Bu bölümde ana analitik denklemler, onların sonlu fark çözümleri, sayısal durağanlık ve saçılım ölçütü ile sınır koşulları tartışılacaktır.

3.3.1 Kuram

3.3.1.1 Ana Analitik Denklemler

İlk olarak frekans ortamında Maxwell'in dalga denklemleri ile YNER modelleme kodları arasındaki genel denklemler verilirse; Bunlar,

$$\nabla \times E = -i\omega\mu H \quad (3.14)$$

$$\nabla \times H = \sigma E + i\omega\epsilon E \quad (3.15)$$

Burada $i = \sqrt{-1}$; ω , açısal frekans, ϵ , μ ve σ ise sırasıyla dielektrik geçirgenlik, manyetik geçirgenlik ve elektriksel iletkenliktir. Burada E ve H elektrik ve manyetik alan vektörleridir. Olayı sınırları emen PML durumuna getirmek için karmaşık bir gergin koordinat uzayının genel durumu düşünülmelidir. Bu olgu Chew ve Weedob, 1994 ile Gedney, 1998'de daha açık biçimde tartışılmaktadır.

$$\nabla = x \frac{1}{s_x} \frac{\partial}{\partial x} + y \frac{1}{s_y} \frac{\partial}{\partial y} + z \frac{1}{s_z} \frac{\partial}{\partial z} \quad (3.16)$$

Burada

$$S_k = K_k + \frac{\sigma_k}{\alpha_k + i\omega\epsilon_0} \quad k = x, y, z \quad (3.17)$$

ve sadece k doğrultusunda değişim gösteren karmaşık gergin koordinat dönüşümlerini vermektedir (Kuzuoglu ve Mittra, 1996). Burada ϵ_0 serbest uzayın dielektrik geçirgenliği ve σ_k , K_k ve α_k ise PML sınır bölgesinde dalga soğurumu ve modelleme gridinin iç kısmındaki dalga yayılımına izin vermek için özelleştirilmiş parametreleri göstermektedir. Bunların gerçek elektriksel parametreler olmadığı da vurgulanmalıdır.

(3.16) numaralı denklemde özdeşliği kullanarak (3.14) ve (3.15) nolu denklemlerin bileşenleri alınır ve iki-boyutlu modelleme için y doğrultusunda bir değişimin olmadığı göz önüne alınırsa, H_x , H_z , E_y ve E_x , E_z , H_y alan bileşenlerini içeren kısmi diferansiyel denklemlerin iki çözülmüş biçimine ulaşırız. Bunlar,

$$i\omega\mu H_x = -\frac{1}{s_z} \frac{\partial E_y}{\partial z} \quad (3.18a)$$

$$i\omega\mu H_z = \frac{1}{s_x} \frac{\partial E_y}{\partial x} \quad (3.18b)$$

$$\sigma E_y + i\omega\epsilon E_y = \frac{1}{s_x} \frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{1}{s_z} \frac{\partial H_x}{\partial z} \quad (3.18c)$$

ve

$$\sigma E_x + i\omega\epsilon E_x = \frac{1}{s_z} \frac{\partial H_y}{\partial z} \quad (3.19a)$$

$$\sigma E_z + i\omega\epsilon E_z = -\frac{1}{s_x} \frac{\partial H_y}{\partial x} \quad (3.19b)$$

$$i\omega\mu H_y = \frac{1}{s_z} \frac{\partial E_x}{\partial z} - i\omega\mu H_z = \frac{1}{s_x} \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (3.19c)$$

Bu iki denklem grubundaki (3.18) ve (3.19) ile gösterilenler sırasıyla gergin koordinat uzayında enine manyetik (TM-*transverse magnetic*) ve enine elektrik (TE-*transverse electric*) modların bir dizisini vermektedir. Yüzey bazlı YNER yansıma modellemesinde, antenler x-z araştırma düzlemine dik yönde bulunduğundan TM mod denklemleri kullanılır. Eğer araştırma kuyu içinde ya da düşey radar profillemesi (VRP-*Vertical Radar Profiling*) biçiminde yapılıyorsa, burada antenler araştırma düzlemi içinde olacaklarından TE mod denklemleri kullanılacaktır. Modelleme gridinin iç kısmında $s_x=s_z=1$ olacaktır. Gridin PML sınır bölgesinde s_x ve s_z karmaşık değerlerde olacaktır. Aksine bu bölgelerde elektrik iletkenlikte bir değişimin daha basit durumunda gergin koordinat değişimlerindeki değişimden dolayı (soğurulma nedeniyle de oluşabilecek) gridin iç kısmında elektromanyetik impedansta bir değişim oluşmayacaktır. Böylece olmayan yansımalar PML ortamının kenarlarında yaratılmayacaktır.

Bu algoritmada evrişimsel PML (CPML) yaklaşımı (Roden ve Gedney, 2000) kullanılmıştır. Bu yöntem FDTD formülasyonunda $1/s_x$ ve $1/s_z$ için zaman-ortamı tanımları yerine getirir ve diğer PML yaklaşımlarındaki elektrik ve manyetik alan bileşenlerindeki bölünmeden kaçınır (Berenger, 1994; Fang ve Wu, 1996). Bu nedenle bu algoritma bu kod içinde kullanılmıştır. (3.17) numaralı eşitliğin tersinin ters Fourier dönüşümü alınırsa, aşağıdaki (3.20) nolu denklem elde edilir.

$$s_k^{-1}(t) = \frac{\delta_t}{K_k} - \frac{\sigma_k}{\epsilon_0 K_k^2} \exp\left[-\frac{t}{\epsilon_0} \left(\frac{\sigma_k}{K_k} + \alpha_k\right)\right] u(t) = \frac{\delta_t}{K_k} + \zeta_k(t) \quad (3.20)$$

Burada $\delta(t)$ dirac delta fonksiyonu ve $u(t)$ ise birim adım fonksiyonudur. Bu denklemi kullanarak ve frekans-bağımsız materyal özellikleri varsayılarak, (3.18) ve (3.19)'daki denklem grupları zaman ortamında aşağıdaki biçimlere dönüştürülür;

$$\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} = -\frac{1}{K_z} \frac{\partial E_y}{\partial z} - \zeta_z(t) * \frac{\partial E_y}{\partial z} \quad (3.21a)$$

$$\mu \frac{\partial H_z}{\partial t} = -\frac{1}{K_x} \frac{\partial E_y}{\partial x} + \zeta_x(t) * \frac{\partial E_y}{\partial x} \quad (3.21b)$$

$$\sigma E_y + \varepsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{K_x} \frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{1}{K_z} \frac{\partial H_x}{\partial z} + \zeta_x(t) * \frac{\partial H_z}{\partial x} - \zeta_z(t) * \frac{\partial H_x}{\partial z} \quad (3.21c)$$

ve

$$\sigma E_x + \varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{K_z} \frac{\partial H_y}{\partial z} + \zeta_z(t) * \frac{\partial H_y}{\partial z} \quad (3.22a)$$

$$\sigma E_z + \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} = -\frac{1}{K_x} \frac{\partial H_y}{\partial x} - \zeta_x(t) * \frac{\partial H_y}{\partial x} \quad (3.22b)$$

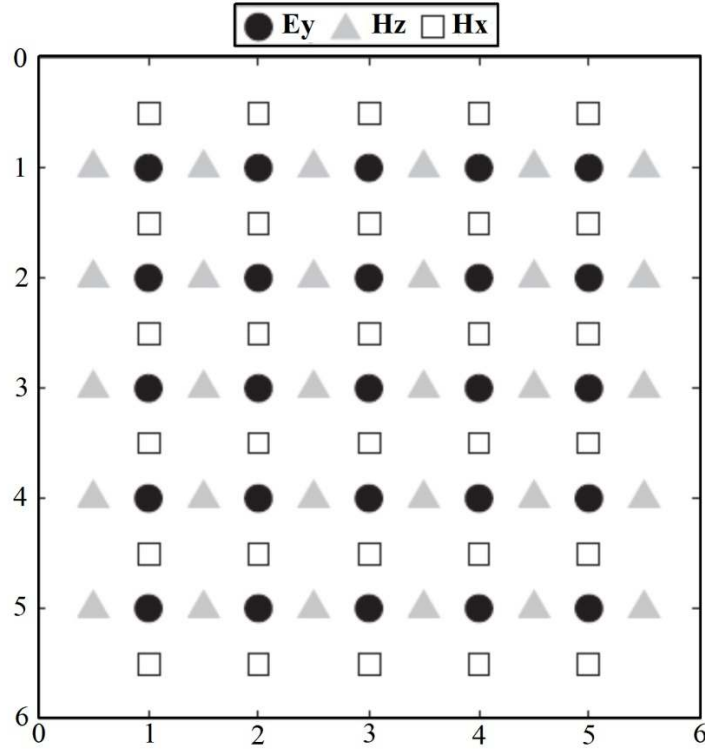
$$\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{K_z} \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{1}{K_x} \frac{\partial E_z}{\partial x} + \zeta_z(t) * \frac{\partial E_x}{\partial z} - \zeta_x(t) * \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (3.22c)$$

Burada $*$ evrişimi gösterir. Bu aşamadan sonra artık bu denklemlerin sonlu farklarda nasıl tanımlanacağına sıra gelmiştir ve bunlar hem TM hem de TE modları için aşağıdaki bölümde tanımlanacaktır.

3.3.1.2 Sonlu-Farklar Yaklaşımı

(3.21) nolu denklem takımlarını modellemek için aynı spatio-geçici yerleşim üzerinde her bir denklemdeki kısmi türevlerin merkezileştirildiği sonlu-farklar

yaklaşımı uzay ve zaman ortamının her ikisinde de elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin denkleştirilmesini kapsayan kurbağa sıçramalı zigzag grid kullanılmıştır. Bu konuda gerekli ayrıntılar Yee (1966) tarafından verilmektedir. Bu olay Şekil 3.4’de verilmektedir. Tüm uzamsal türevler 4. dereceden kesin sonlu farklar tanımlamaları kullanılarak yaklaşım sağlanır.



Şekil 3.4 TM-mod modellemesi için H_x , H_z ve E_y alan bileşenlerinin uzamsal planı. Elektrik ve manyetik alan bileşenleri $\Delta t/2$ kadar zamanda zigzaglanır (Irving ve Knight, 2006).

Zaman türevlerinde ikinci dereceden kesin tanımlar kullanılarak yaklaşım sağlanır. Bu O (2,4) şeması 1-b YNER modellemesi için Bergmann vd. (1996) tarafından tanımlandığı gibi tanımsaldır. (3.18c) eşitliğindeki iletim akım yoğunluğu terimi yarı-kapalı bir yaklaşım kullanılarak çözülür (Taflove, 1995). Burada bu terim için tek taraflı tanımlama üzerinde yüksek sayısal özelliklere sahip olmak için gösterim yarı kapalı yaklaşımı verir.

(3.21) nolu denklem takımları içine uygun sonlu-farklar yaklaşımı yerine konulduktan ve güncellenmiş elektrik ve manyetik alan bileşenleri çözüldükten sonra, aşağıda verilen güncellenmiş FDTD denklemlerine ulaşılır.

$$H_x|_{ij+1/2}^{n+1/2} = H_x|_{ij+1/2}^{n+1/2} - D_{bz}|_{ij+1/2} \left[-E_y|_{ij+2}^n + 27E_y|_{ij+1}^n - 27E_y|_{ij}^n + E_y|_{ij-1}^n \right] - D_c|_{ij+1/2} \left[\Psi_{H_{zx}}|_{ij+1/2}^n \right] \quad (3.23a)$$

$$H_z|_{i+1/2j}^{n+1/2} = H_z|_{i+1/2j}^{n+1/2} - D_{bx}|_{i+1/2j} \left[-E_y|_{i+2j}^n + 27E_y|_{i+1j}^n - 27E_y|_{ij}^n + E_y|_{i-1j}^n \right] + D_c|_{i+1/2j} \left[\Psi_{H_{zx}}|_{i+1/2j}^n \right] \quad (3.23b)$$

$$E_y|_{ij}^{n+1} = C_a|_{ij} [E_y|_{ij}^n] + C_{bx}|_{ij} \left[-H_z|_{i+\frac{3}{2}j}^{n+\frac{1}{2}} + 27H_z|_{i+\frac{1}{2}j}^{n+\frac{1}{2}} - 27H_z|_{i-\frac{1}{2}j}^{n+\frac{1}{2}} + H_z|_{i-\frac{3}{2}j}^{n+\frac{1}{2}} \right] - C_{bz}|_{ij} \left[-H_x|_{ij+\frac{3}{2}}^{n+\frac{1}{2}} + 27H_x|_{ij+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - 27H_x|_{ij-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} + H_x|_{ij-\frac{3}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \right] + C_c|_{ij} \left[\begin{array}{c} \Psi_{E_{yx}}|_{ij}^{n+\frac{1}{2}} \\ -\Psi_{E_{yz}}|_{ij}^{n+1/2} \end{array} \right] \quad (3.23c)$$

Burada alt indisler uzamsal pozisyonu ve üst indisler ise zamanı gösterir. (Örneğin $H_x|_{(i,j)}^{(n)}$ $(i\Delta x, (j+1/2)\Delta z)$ pozisyon ve $t=(n+1/2)\Delta t$ zamandaki H_x alan bileşenini gösterir ve Δx ile Δz yatay ve düşey alan ayırıklaştırma aralıklarıdır. Bu denklemleri kullanarak FDTD modellemesi sırayla güncellenen elektrik ve manyetik alanlar tarafından yerine getirilir. Bu iki alan geçici olarak $\Delta t/2$ yardımıyla zigzaglandığından dolayı zamanda düz hareket eder.

(3.23) nolu denklem takımlarındaki güncellenmiş C_a , C_{bx} , C_{bz} , C_c , D_{bx} , D_{bz} ve D_c katsayıları aşağıdaki denklemlerde izlendiği gibi elektriksel özellikler ve grid parametreleri anlamında verilmektedir.

$$C_a = \left(1 - \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon}\right) \left(1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon}\right)^{-1} \quad (3.24a)$$

$$C_{b_k} = \frac{\Delta t}{\varepsilon} \left(1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon}\right)^{-1} (24K_k \Delta k)^{-1} \quad (3.24b)$$

$$C_c = \frac{\Delta t}{\varepsilon} \left(1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon}\right)^{-1} \quad (3.24c)$$

$$D_{b_k} = \frac{\Delta t}{\mu} (24K_k \Delta k)^{-1} \quad (3.24d)$$

$$D_c = \frac{\Delta t}{\mu} \quad (3.24e)$$

Her ne kadar bariz biçimde gösterilmemişse de bu katsayılar genelde uzamsal değişken olan ε , μ , σ , K_x ve K_z değerlerinden dolayı pozisyonun tüm fonksiyonlarıdır. (3.21) nolu denklem takımındaki evrişim terimi tekrarlanan (recursive) evrişim tekniği kullanılarak modellenir ve $\psi_{H_{xz}}$, $\psi_{H_{zx}}$, $\psi_{E_{yx}}$ ve $\psi_{E_{yz}}$ terimleri arasında (3.23) numaralı denklem takımları için hesaplanır (Luebbers ve Hunsberger, 1992). Bunlar aşağıdaki biçimlerde tanımlanmaktadır.

$$\psi_{H_{xz}}|_{ij+\frac{1}{2}}^n = B_z|_{ij+\frac{1}{2}} \left[\psi_{H_{xz}}|_{ij+\frac{1}{2}}^{n-1} \right] + A_z|_{ij+\frac{1}{2}} \left[\begin{array}{l} -E_y|_{ij+2}^n + 27E_y|_{ij+1}^n - 27E_y|_{ij}^n \\ + E_y|_{ij-1}^n \end{array} \right] \quad (3.25a)$$

$$\psi_{H_{zx}}|_{i+\frac{1}{2j}}^n = B_x|_{i+\frac{1}{2j}} \left[\psi_{H_{zx}}|_{i+\frac{1}{2j}}^{n-1} \right] + A_x|_{i+\frac{1}{2j}} \left[-E_y|_{i+2j}^n + 27E_y|_{i+1j}^n - 27E_y|_{ij}^n + E_y|_{i-1j}^n \right] \quad (3.25b)$$

$$\psi_{E_{yx}}|_{ij}^{n+\frac{1}{2}} = B_x|_{ij} \left[\psi_{E_{yx}}|_{ij}^{n-\frac{1}{2}} \right] + A_x|_{ij} \left[\begin{array}{l} -H_z|_{i+\frac{3}{2j}}^{n+\frac{1}{2}} + 27H_z|_{i+\frac{1}{2j}}^{n+\frac{1}{2}} - 27H_z|_{i-\frac{1}{2j}}^{n+\frac{1}{2}} + H_z|_{i-\frac{3}{2j}}^{n+\frac{1}{2}} \end{array} \right] \quad (3.25c)$$

$$\psi_{E_{yz}}|_{ij}^{n+\frac{1}{2}} = B_z|_{ij} \left[\psi_{E_{yz}}|_{ij}^{n-\frac{1}{2}} \right] + A_z|_{ij} \left[\begin{array}{l} -H_x|_{ij+\frac{3}{2}}^{n+\frac{1}{2}} + 27H_x|_{ij+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - 27H_x|_{ij-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} + H_x|_{ij-\frac{3}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \end{array} \right] \quad (3.25d)$$

Burada

$$A_k = \frac{\sigma_k}{\sigma_k K_k + \alpha_k K_k^2} (B_k - 1) \quad (3.26a)$$

$$B_k = \exp \left[-\frac{\Delta t}{\varepsilon_0} \left(\frac{\sigma_k}{K_k} + \alpha_k \right) \right] \quad (3.26b)$$

ve tekrar model gridindeki lokasyonlarla birlikte değişen güncellenmiş PML katsayılarıdır. (3.25) nolu denklem takımlarından görülebildiği gibi, güncel zaman adımlarındaki evrişim terimlerinin değerleri önceki zaman adımlarındakinden hesaplanır. Burada, $\psi_{H_{xz}}, \psi_{H_{zx}}, \psi_{E_{yx}}$ ve $\psi_{E_{yz}}$ değerleri FDTD benzeşimi sırasında H_x, H_z ve E_y alan bileşenlerine ek olarak depolanmalıdır. Bu hesaplamalar boyunca Roden ve Gedney (2000)'in çalışmasından gelen notasyonlar göz önünde tutulmuştur.

(3.23) ve (3.26) nolu denklem takımlarını kullanarak yapılan FDTD modellemesi sırasında grid içindeki bir elektrik alan kaynağını tanıtmak için arzulanan uzamsal lokasyonlardaki E_y alan bileşeni için yapılan güncelleme ile bir kaynak puls fonksiyonu eklenmiştir. Bu Maxwell'in denklemlerindeki akım yoğunluğu teriminin y-bileşenine kaynak fonksiyonunun eklenmesi anlamına gelir. Kullanılan bu koddaki model alıcıları için alıcı lokasyonlarındaki zamanın bir fonksiyonu olarak E_y alan bileşeni basit anlamda kayıt edilir. Kullanılan bu model iki-boyutlu bir kod olduğundan dolayı tüm böylesi kaynaklar ve alıcılar güncel olarak hat elemanlarıdır ve araştırma düzlemine dik boyutlarda bunların pozitif ve negatife uzandığı vurgulanmalıdır. Sonuç olarak, dipol tipli YNER antenleri için gerçekçi geometrik yayılım ve radyasyon örüntüleri bu kodla tam anlamıyla çözülemez. Bu durum tüm ya da pseudo 3-D bir yaklaşımından birini gerektirecektir (Moghaddam vd., 1991; Xu ve McMechan, 1997). Yine de kullanılan bu iki-boyutlu kod yansımali YNER araştırmasının önemli özelliklerinin çoğunu kapsamaktadır ve karmaşık bir yüzeyaltına sahip ortamlardaki elektromanyetik dalgalarının etkileşimi içinde önemli bir kavrayışı da öngörebilir. Yine de verinin nasıl analiz edileceği konusunda anten radyasyon örüntüleri kritik bir öneme sahip olduğunda, dikkatli biçimde kullanılmalıdır.

3.3.1.3 Sayısal Kararlılık ve Saçılım Ölçütü

FDTD modellemesinde önemli bir adım bir benzeşim için uygun zaman ve uzamsal ayrıklaştırma aralıklarının seçimidir. İdealde benzeşimi yapabilmek için bunları (Δ_x , Δ_z ve Δ_t) olabildiğince büyük seçmeye çalışırız. Bununla birlikte eğer Δ_t çok geniş olursa, yukarıda tanımlanan FDTD şeması sayısal anlamda durağan olmayabilecektir. Ek olarak, eğer Δ_x ya da Δ_z çok geniş olursa, o zaman elektrik ve manyetik alanlar yetersiz olarak boşlukta örneklenmiş olacak ve sayısal saçılım oluşabilecektir. Burada sunulan O(2,4) şeması sayısal anlamda durağan kalan bir şema elde edebilmek için maksimum zaman adımını kullanır (Georgakopoulos vd., 2002).

$$\Delta t_{\max} = \frac{6}{7} \sqrt{\frac{\mu_{\min} \varepsilon_{\min}}{(1/\Delta x^2 + 1/\Delta z^2)}} \quad (3.27)$$

Burada $\mu_{\min}$ ve $\varepsilon_{\min}$ modelleme gridindeki minimum manyetik geçirgenlik ve dielektrik geçirimsizlik değerlerini gösterir. Sayısal saçılımı denetlemek için, O(2,4) şeması her minimum dalgaboyu için beş alan örneklemesine izin vermelidir (Bergmann vd., 1996; Georgakopoulos vd., 2002) Kullanılan MATLAB programındaki `finddt.m` ve `finddx.m` yazılımları giriş olarak bir modelin elektriksel özelliklerinin verildiği Δ_x , Δ_z ve Δ_t 'nin olası maksimumunu belirler ve herhangi bir benzeşime başlamak için öncelikli onu çalıştırmak gerekir.

3.3.1.4 PML Soğurma Sınırları

Diğer soğurucu sınır tipleri ile karşılaştırıldığında, PML sınırları önemli avantajlara sahiptir. Öncelikle PML yaklaşımı modelleme gridinin kenarlarından oluşan yansımaların yüksek kalitede atenuasyonuna izin verir ve çok etkili olabilecek sadece az sayıda hücreye gereksinir (Gedney, 1998). İkinci olarak, PML gerçekleştirmek için sadece koordinat germe değişimleri FDTD güncel denklemlerine değil (örneğin, aynı güncel denklemler gridin her yerinde kullanılır), sınır bölgelerinde değişime gereksinim duyar. Bu nedenle, PML paralel uygulamaya çok uygundur. Sonuç olarak buradaki kodda seçilen CPML yaklaşımı ortamdan

bağımsız bir yaklaşıma sahiptir (Roden ve Gedney, 2000). Yani yaklaşım modellenen maddenin özelliklerinin her durumda aynı şekilde sağlanmasıdır. Örneğin, burada kullanılan FDTD formülasyonu ϵ , μ ve σ 'nun saçılımına izin vermek için düzenlenebilecektir (Bergmann vd., 1998'in tekniği kullanılarak) ve (3.23) denklem takımlarındaki çağrılı CMPL için Ψ terimi değişmez kalacaktır.

Daha öncede önerildiği gibi, modelleme gridinin iç kısmındaki koordinat gergin değişimler, s_x ve s_z , gergin olmayan bir koordinat uzayında TM modunda güncel FDTD denklemlerini standart olan (3.23) ve (3.26) denklemlerine birleştirmek için tayin edilir. Bu durum bu bölgelerde $K_x = K_z =$ ve $\sigma_x = \sigma_z = 0$ 'a gereksinim duyar (Bkz (3.17) nolu denklem). Bununla birlikte PML sınır bölgelerinde bu parametreler farklı değerler verir. σ_x ve σ_z sıfırdan daha büyük bir değere tayin edilmesi (gerilen değişkenleri karmaşık yapar) soğurulmuş olmak için yayınım dalgalarına izin verir. Diğer bir deyişle, K_x ve K_z 'yi birden büyük yapmak, genliği azalan dalgaları soğurmak için PML bölgelerine izin vermektir. α_x ve α_z 'nin sıfırdan büyük tayin edilmesi her ne kadar buradaki kodda ön değer olarak bu parametrelerin sıfıra atanması seçilmekte ise de, genliği azalan modların soğurulmasını da artırabilecektir (Kuzuoglu ve Mittra, 1996; Roden ve Gedney, 2000).

Kuramda K_x , K_z , σ_x ve σ_z için s_x ve s_z 'deki bir değişim ile ilişkili elektromanyetik impedansta herhangi bir değişim olmadığından dolayı, yayınan ve genliği azalan dalgaların en yoğun soğurumunu başarmak için PML bölgelerindeki olasılıkla en yükseğe tayin edilmelidir. Bununla birlikte uygulamada ayırık FDTD uzayında sayısal yansımalar nodlar arasında elektriksel değişimlerin çok fazla olduğu zaman oluşur. Bundan dolayı, PML parametreleri grid kenarlarındaki bazı maksimum değerler için gridin iç tarafındaki onların değerlerinden ötürü dereceli olarak artışa göre tayin edilmelidir. K_x ve K_z için biz aşağıdaki bağıntıyı elde ederiz.

$$K_k = \left\{ 1 + \left(\frac{d}{\delta} \right)^m (K_{k_{\max}} - 1) \right\} \quad (3.28)$$

Burada d , iç/PML sınırından PML bölgesi içine olan uzaklık, δ PML bölgesinin kalınlığı, m PML üssü olarak bilinir ve $K_{k_{\max}}$ maksimum değerdir. Benzer biçimde σ_x ve σ_z için aşağıdaki bağıntıyı elde ederiz.

$$\sigma_k = \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ \left(\frac{d}{\delta} \right)^m \sigma_{k_{\max}} \end{array} \right\} \quad (3.29)$$

Burada $\sigma_{k_{\max}}$ maksimum değerdir. K_k ve σ_k burada koordinat germe değişkenleri bir-boyutlu fonksiyonlar olduğundan dolayı, sadece k doğrultusu boyunca değişir. Örneğin, σ_x modelleme gridinin iç tarafı baştan sona sıfır olacaktır ve sıfır olmayan sadece sağ ve sol PML bölgeleri olacaktır. Diğer bir deyişle, K_z parametresi gridin içinde baştan sona bir olacak ve birden büyük olanlar sadece PML bölgelerinin alt ve üstünde bulunacaktır. Bu kodda $m=4$ ve $K_{x_{\max}} = K_{z_{\max}} = 5$ olarak geçerli kabul edilmektedir ve genliği azalan dalgaların etkili soğurulması için yeterli olarak kabul edilmektedir. σ_k için maksimum değer aşağıda verilen ölçüt kullanılarak belirlenir (Gedney, 1998).

$$\sigma_{k_{\max}} = \frac{m+1}{150\pi\sqrt{\varepsilon_r}\Delta k} \quad (3.30)$$

Burada ε_r PML sınırlarına en yakın gridin iç tarafındaki göreceli dielektrik geçirimsiliktir (geçirimsilik boş uzayda onun değerine normalize edilmiştir). Diğer bir deyişle, heterojen bir ortamda $\sigma_{k_{\max}}$ modelleme ortamının iç tarafını kuşatan geçirimsilik değerlerine bağlı olarak değişebilecektir. Gridin iç kısmındaki doğal sınırlar bir benzeşime başlamadan önce, PML hücreleriyle doldurularak PML bölgesi içine doğru uzatılır (Chen ve Chew, 1997).

BÖLÜM DÖRT

IŞIN İZLEME VE FDTD YÖNTEMLERİNİN SENTETİK MODELLER ANLAMINDA KARŞILAŞTIRILMASI VE UYGULAMALAR

4.1 Sentetik Modellerin Tanıtımı ve Çalışmanın Amacı

Yeraltına nüfuz eden radar (YNER) modellemesi, sığ jeolojik özelliklerin (faylanma, tabakalanma vb.) değerlendirilmesi ve yorumlanması açısından çok önemlidir. Bu çalışmada sığ jeolojik yapıların tabakalanma ve faylanma anlamında modellenmesine çalışılmış ve bu amaçla bilinen üç temel fay türü (normal, bindirme ve doğrultu atımlı) YNER yönteminin ışın izleme ve zaman ortamında sonlu-farklar (FDTD) teknikleri kullanılarak modellenmiştir. Bu amaçla her bir fay modeli için farklı elektriksel özelliklere sahip ortamlar kullanılarak yapay benzetim modelleri hazırlanmıştır. Modelleme çalışmaları sırasında farklı yeraltı koşullarını ve bunların YNER anlamında sentetik yanıtlarını yorumlayabilmek çok sayıda model üretilmiştir (Twiss, 1992). Elde edilen sentetik radargramlar birbirleri ile karşılaştırılarak uygulanan iki farklı modelleme tekniğinin ilgili jeolojik sorunları tanımlama yetenekleri ve birbirlerine göre olan farklılıkları bu çalışma kapsamında irdelenmiştir. Ayrıca, bu çalışmadan elde edilen sonuçların gerçek bir arazi verisi ile karşılaştırılabilmesi amacıyla bu tür yapılanmanın görüldüğü İzmir Kuşçenneti'nde bulunan Üçtepeler mevkiinde (Leukai Antik Kenti) 25 MHz'lik merkez frekansına sahip korumasız bir anten yardımıyla iki farklı ölçüm düzeninde YNER verileri toplanmıştır. Böylece, yapay modelleme çalışmalarının yararı, kullanılan yöntemler arasındaki farklar ve yorumlamaya etkisi ile gerçek alan verisinin yorumlanmasına katkısı bu çalışma kapsamında irdelenmiştir.

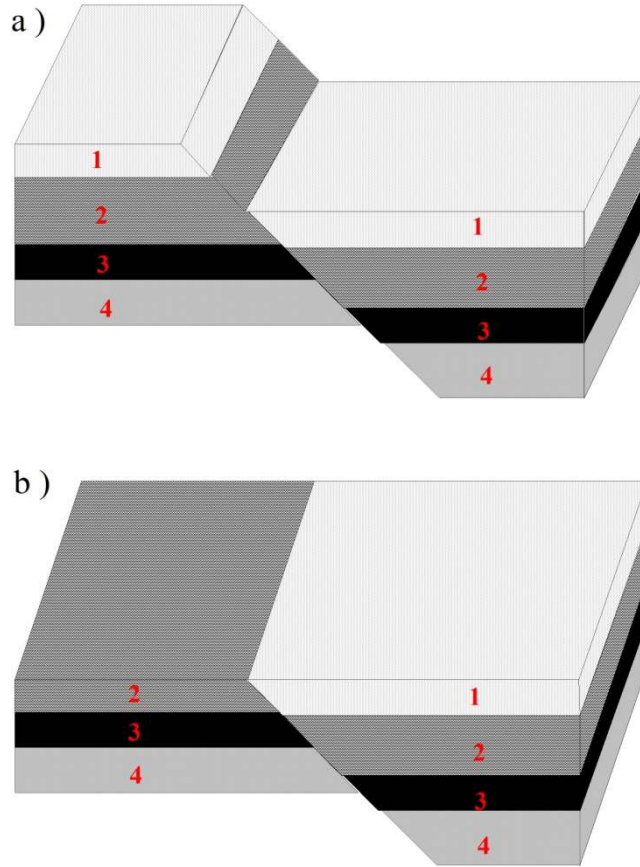
4.1.1 Normal Fay Modeli

Normal faylar, tavan bloğunun (hanging wall) taban bloğu (footwall) boyunca aşağı doğru hareket etmesiyle ortaya çıkan eğim-atımlı faylardır. Genellikle, bu tür ortamlarda genç kayalar yaşlı kayaların üstünde bulunur ve faydan dolayı düşey kesitte, stratigrafik kısım kaybolur. Birçok normal fay yaklaşık 60° eğime sahiptir,

fakat bazıları daha düşük eğimli, bazıları da yataya yakındır. Tavan bloğunun aşağıya doğru hareketinin sonucu olarak, normal faylar yerkabuğunun uzamasını ya da esnemesini sağlar (Twiss, 1992). Normal faylanma tarafından üretilen doğrultu ve eğim ayrılımları fayın bağlı yönelmelerine ve stratigrafik tabakalanmaya bağlıdır. Bu tür bir faylanmanın bir örneğinin geometrisi Şekil 4.1a'da verilmektedir ve bu örnekte bir normal fayın yatay katmanlanma gösteren birimlerinin basit bir faylanma ile kesilerek, stratigrafik katmanlar arasında bir süreksizliğin oluşumu tasarlanmıştır. Burada, bir eğim-atımlı bir normal fay tarafından yaratılan stratigrafik ayrılımlar açık biçimde görülmektedir. Daha sonra erozyonel etkiler sonucunda tavan bloğunun aşındığı ve yok olduğu durumun taslağı ise Şekil 4.1b'de verilmektedir. Buradaki her bir katmanın jeolojik birimleri ve bu birimlere karşılık gelen elektriksel parametreleri Tablo 4.1'de verilmektedir.

Tablo 4.1 Normal fay modelinde her bir katmanın jeolojik birimi ve bu birimlere karşılık gelen elektriksel parametreleri.

Malzeme	Tabaka		ϵ_r	σ (mS/m)
	Numara	Sı		
Kireçtaşı	1		8	0,001
Kumtaşı	2		12	0,01
Killi toprak	3		22	0,001
Kil (kuru)	4		32	0,001

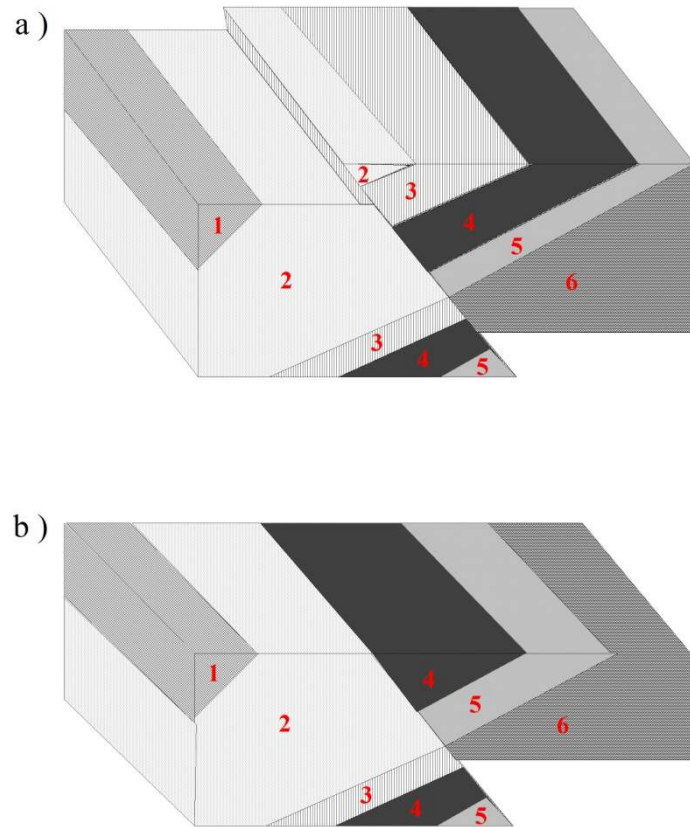


Şekil 4.1 Yatay tabakaların bir normal fay tarafından kesilmesini gösteren diyagram. (a) Normal fayın oluşum anı ve atım oranını gösteren taslak. (b) Bu taslağın stratigrafik kısmının kaybolması sonrası görünümü (Twiss, 1992'den uyarlanmıştır).

4.1.2 Bindirme Fay Modeli

Bindirme ve ters faylar, tavan bloğunun taban bloğuna göre yukarı doğru hareketini sağlayan eğim-atımlı bir fay türüdür. Genellikle, yaşlı kayalar onlardan daha genç kayaların altında bulunmaktadır. Bu faylar, yer kabuğunun kısalmasını sağlar. Ters faylar, 45° eğimden büyük olurken, bindirme fayları 45° eğimden küçük olanlardır. Bindirme fayları gezegenimizde ters faylara göre daha çok görülmektedir (Twiss, 1992).

Yatay ayrılmaya çapraz olan bindirme fayları değişken olabilir, faylanma önce tabakaların konumlarına bağlıdır. Şekil 4.2a’da gösterilen blok diyagram böylesi bir faylanmanın özelliğini gösteren bir taslaktır ve tabakalanma fay aynasına dik konumdadır. Burada altı ayrı jeolojik katman bulunmaktadır. Blok diyagramlardan üste olan tavan bloğu taban bloğunun üzerinde asılı kalmaktadır. Daha sonra aşınma nedeniyle bu asılı durumdaki blok ortadan kalkmakta ve birbirleri ile çapraz konumlarda fay aynasına dik tabakalanmalar oluşmaktadır (Şekil 4.2). Modeldeki her bir katmanın jeolojik birimleri ve bu birimlere karşılık gelen elektromanyetik parametreleri Tablo 4.2’de verilmektedir.



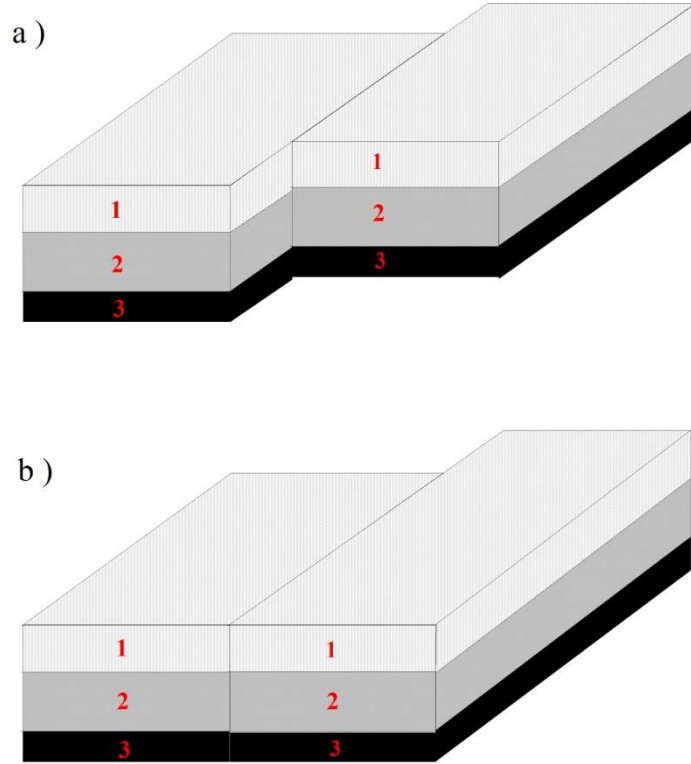
Şekil 4.2 Bindirme fay diyagramı (a) Oluşum anı (b) Tavan bloğunun aşınması ve taban bloğuyla aynı seviyeye gelmesi (Twiss, 1992’den uyarlanmıştır).

Tablo 4.2 Bindirme fay modelinde her bir katmanın jeolojik birimi ve bu birimlere karşılık gelen elektriksel parametreleri.

Malzeme	Tabaka Numarası	ϵ_r	σ (mS/m)
Kireçtaşı	1	8	0,001
Kumtaşı	2	12	0,0001
Killi toprak	3	22	0,001
Kumlu killi toprak	4	17	0,0001
Kiltaşı	5	20	0,001
Kil (kuru)	6	30	0,001

4.1.3 Doğrultu Atımlı Fay Modeli

Doğrultu atımlı (strike-slip) faylar genellikle kabuk içinde yatay yönde ötelemeye neden olan düşey faylardır. Bu tür fayların yeryüzeyindeki izleri düzdür ve doğrultuları ise ortama bağlı olarak düz ya da sıçramalı biçimde görülür. Birçok doğrultu atımlı fay yaklaşık olarak düzlemsel ve düşey özelliğe sahiptir. Sonuç olarak, bu tür faylarda baskın olarak yatay kayma, doğrultu atımlı fayların genellikle belirtisi olarak kullanılan yatay ayrışmayı üretir. Faydaki tabakalanmanın bitiş çizgisi yerdeğiştirme için paraleldir, bununla birlikte herhangi bir ayrışmanın olmadığı belirgindir. Şekil 4.3a’da sol yönlü doğrultu atımlı faydan dolayı stratigrafik birimler ve Şekil 4.3b’de ise düşey yönlü bir yitimden sonra ortaya çıkan mekanizma görülmektedir. Buradan da görüldüğü gibi, doğada böyle bir aşınma sonrasında faylanmanın izlenebilmesi çok zordur ve eğer yüzey kırık izleri ya da fay düzlemi saptanamazsa, bu tür fayları belirlemek olası olmayabilir. Doğrultu atımlı fay modelinin her bir katmanın jeolojik birimleri ile bu birimlere karşılık gelen elektromanyetik parametreler Tablo 4.3’de verilmektedir.



Şekil 4.3 Sol yönlü doğrultu atımlı fay diyagramları. (a) Oluşum anı. (b) Faylanmadan sonra düşey kesitin görünümü (Twiss, 1992'den uyarlanmıştır)

Tablo 4.3 Doğrultu atımlı fay modelinde her bir katmanın jeolojik birimi ve bu birimlere karşılık gelen elektriksel parametreleri.

Malzeme	Tabaka		ϵ_r	σ (mS/m)
	Numara	Sı		
Kireçtaşı	1		8	0,001
Kum taşı	2		15	0,001
Kil (kuru)	3		25	0,003

4.2 YNER Modellemesinde Kullanılan Yazılımlar

YNER yönetiminde ışın izleme tekniğini kullanarak modelleme yapan çok az çalışma ve yazılım bulunmaktadır. En çok bilinen yazılım GPRSIM v3.0'dır ve bu

çalışma kapsamında da bu yazılım kullanılmıştır. Diğer taraftan kullanımı çok yaygın olan zaman ortamın sonlu-farklar (FDTD) tekniğiyle YNER modellemesi yapan birçok çalışma ve yazılım vardır. Bu yazılımları birçoğu ücretsiz kullanıma açıktır. Bu çalışma kapsamında Irving ve Knight (2006) tarafından Matlab programa diliyle hazırlanmış FDTD modelleme programı kullanılmıştır.

Çalışmalar sırasında gerçekleştirilen modellemelere girmeden önce kullanılan bu iki yazılım ve bazı özellikleri hakkında ayrıntıların verilmesi yararlı olacaktır. Bunlardan ilki ışın izleme tekniği ile GPRSIM yazılımını ve Goodman (1994) tarafından yapılan deneysel test çalışmalarını kapsayacaktır. İkinci teknik FDTD'dir ve Irving ile Knight (2006) tarafından yazılan yazılımı başarısını test etmek için hazırlanmış örneğin sonuçlarını içerecektir.

4.2.1 Işın İzleme (Ray-Tracing) Tekniği

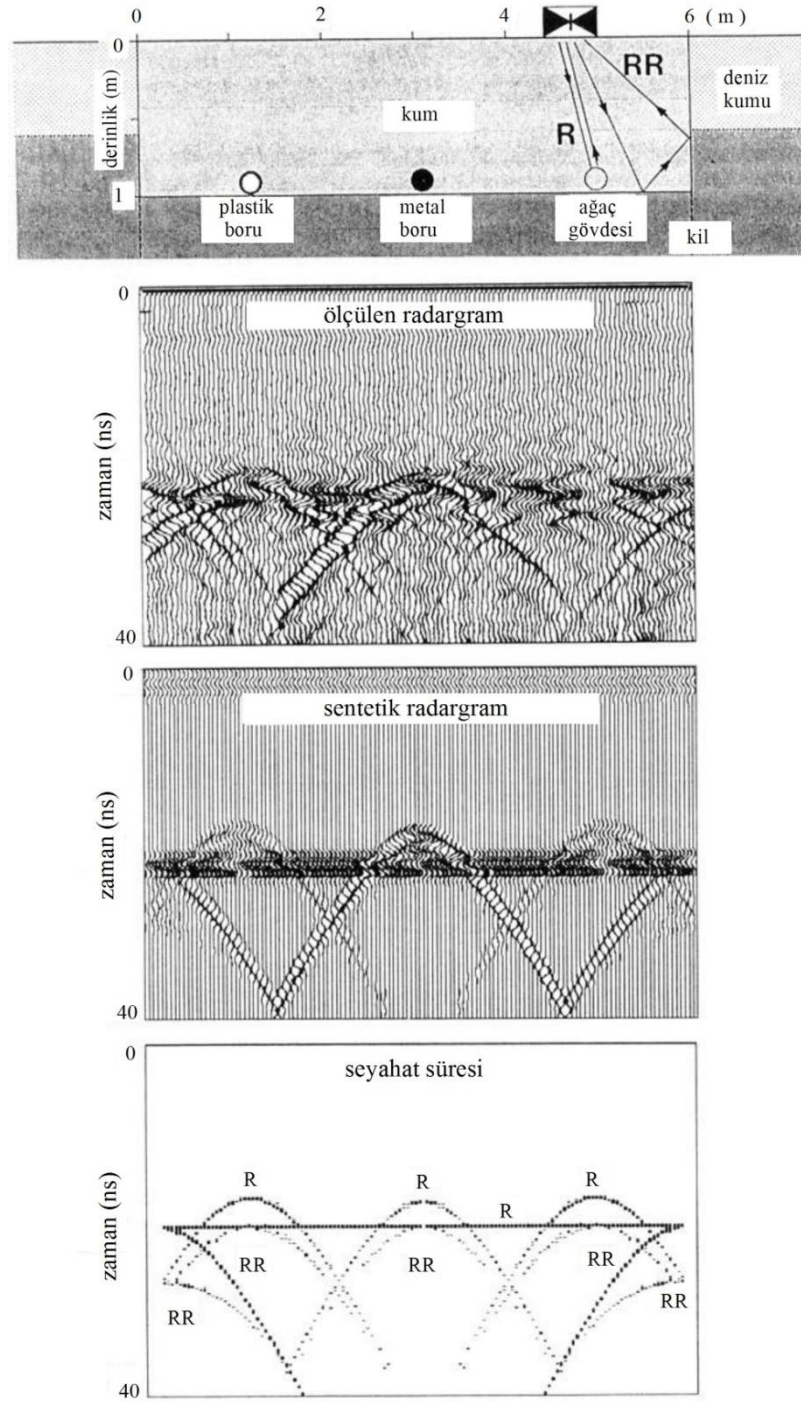
Yöntem hakkında Goodman (1994) tarafından yapılan deneysel test karşılaştırmaları yöntemin uygulamada yararlı sonuçlar verebildiğini ortaya koymuştur. Bu çalışmalar sırasında oluşturulan GPRSIM yazılımı deneysel anlamda bir test alanından toplanan verilerle test edilmiştir. Göreli olarak homojen kabul edilebilecek plaj kumu 0 ile 60 cm'lik kısımda bulunmaktadır ve bunun altına kil yerleşmiştir. Böylesi bir alanda bu amaçla 6x3 m boyutlarında bir test çukuru 1m derinlikte kazılmış ve içine değişik maddeler yerleştirilmiştir. Bir plastik boru, bir metal boru ve kabuğu soyulmuş bir ağaç kütüğünden oluşan üç silindirik yapı bir metre derinliğe gömülmüştür. Daha sonra genelde yol inşaatlarında kullanılan temiz çakıllı kum test çukurunu doldurmak için kullanılmıştır (Şekil 4.4).

Yönlü yanıt fonksiyonu içeren 500 MHz'lik korumalı bir anten yardımıyla radar verisi test sahasında 40 ns zaman penceresi içinde toplanmıştır. Impuls yanıtı gömülü metal borudan ölçülmüş yansılardan kestirilmiştir. Test sahası 2x2 cm boyutlarında grildenmiş ve yönsel yanıt fonksiyonu her 0.1 derecede örneklenmiştir. İki temel dalga tipi olan R ve RR'nin önkestirim seyahat zamanları test yapısı boyunca hesaplanır. Ölçülen radargram aynı ortam için sentetik olarak GPRSIM

yazılımı tarafından modellenmiş radargramla birlikte karşılaştırma yapabilmek için Şekil 4.4’de verilmektedir. Bu model benzeşimi sonucunda elde edilen elektromanyetik parametreler ise aşağıdaki Tablo 4.4’de verilmektedir. Buradan da görülebildiği gibi, ortamın yapay benzeşimi amacıyla yapılan modelleme doğal sonuçla çok benzer bir yanıtı üretmiştir. Radargramların her ikisinde de silindirik yapılardan kaynaklanan yansıma hiperbollerini açıkça izlenmektedir. Ayrıca köşe yansımalarının etkisi de her iki radargramda’da görülmektedir. Bu çalışmada kullanılan dalga tiplerinin radargramda seyahat zamanları uzaklığa bağlı olarak verilmiş ve hangi dalga tiplerinin hangi tür etkileri ürettiği gözlenmiştir.

Tablo 4.4 Test sahasında kullanılmış malzemelerin bağıl dielektrik geçirgenlik (ϵ_r) ve elektriksel iletkenlik (σ) değerleri.

Malzeme	ϵ_r	σ (mS/m)
Kum	10,5	0,001
Deniz kumu	8	0,0001
Kil	7	0,01
Plastik boru	4	0,0001
Metal boru	1	100000
Ağaç gövdesi	5	0,001

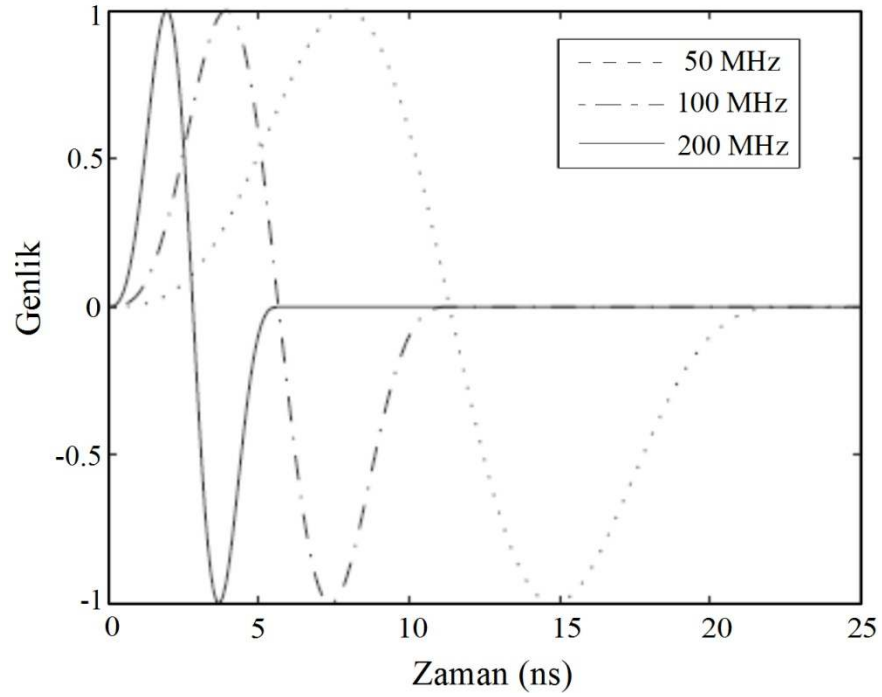


Şekil 4.4 Test sahasında 500 MHz'lik antenle yapılan ölçümlerden sonra elde edilen radargram ile aynı model için hazırlanmış sentetik radargramın karşılaştırması. Ayrıca R ve RR dalga tiplerinin, silindirik objelerden ve duvardan ya da test çukurundan köşe yansımaları ile yansıma tekrarlılarının GPRSIM yazılımıyla gösterimi (Goodman, 1994).

4.2.2 Zaman Ortamında Sonlu Farklar (FDTD) Tekniği

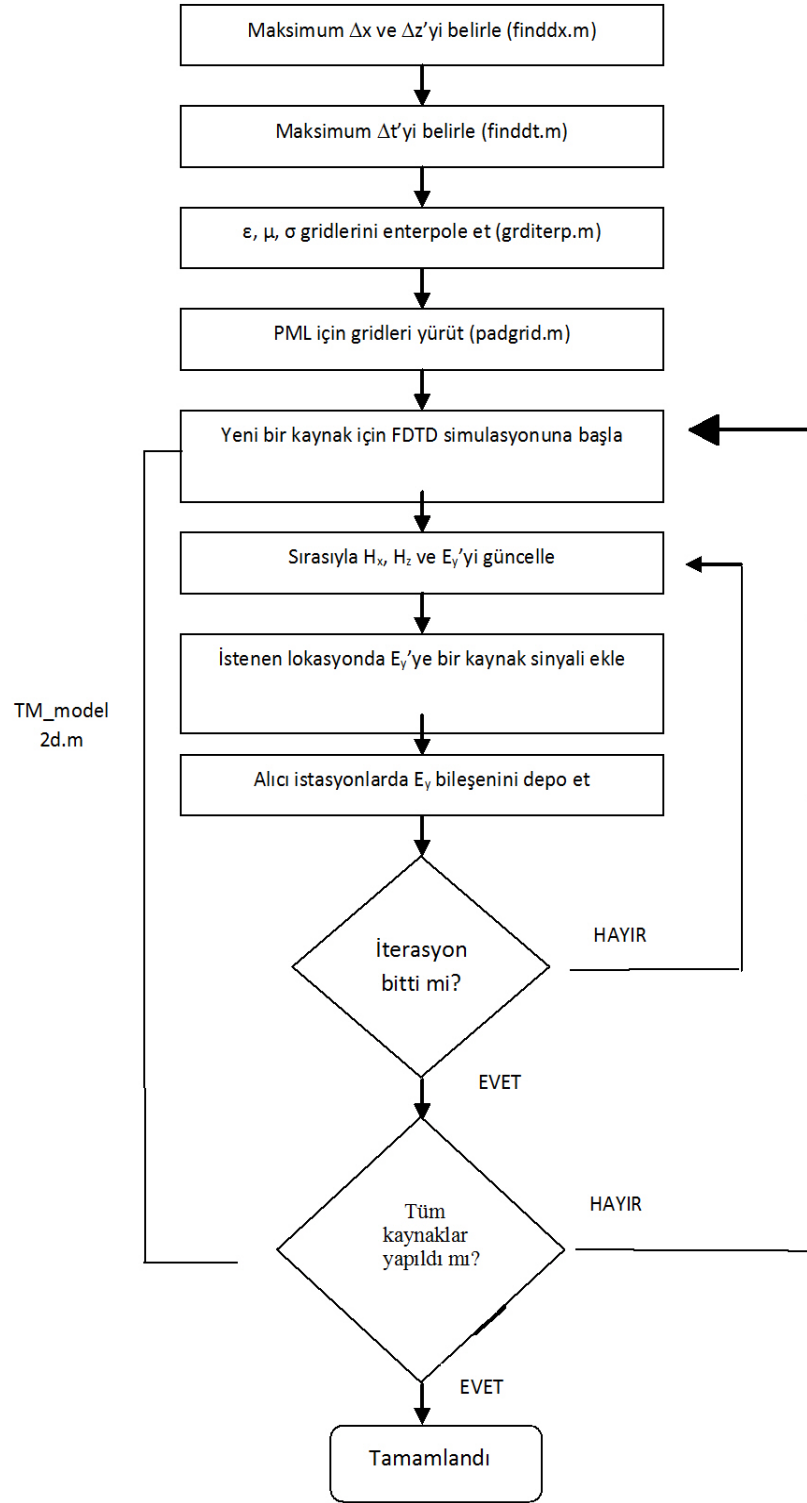
Bölüm üçte tanımlanan matematiksel tanımların MATLAB yazılımı yardımıyla uygulaması Irving ve Knight (2006) tarafından verilmiştir. Bu uygulamanın TM-mod uygulaması `TM_model2d.m` kodu tarafından YNER yansıma modellemeleri için uygulanmaktadır. MATLAB’de FDTD benzeşimlerini yerine getirmek için elektrik özellikler ve tüm alan bileşenlerini depolamak için matrisleri kullanırız. Özellik matrislerinde ϵ , μ ve σ her bir elektrik ve manyetik alan bileşen lokasyonunda gereksinileceğinden dolayı matrislerin alanının boyutu çifttir. Giriş olarak `TM_model2d.m` elektriksel özellik matrislerine, tüm kaynak ve alıcı lokasyonlarına, bir zaman vektörü, uygun bir Δt ile örneklenmiş uygun kaynak puls’ına ve kullanım için PML sınır hücrelerinin sayısına gereksinim duyar. FDTD güncel denklemlerinde tüm sonlu farklar MATLAB’de hız için kodları en iyilemek için döngüler yerine matris notasyonunu kullanarak hesaplanır. Ek olarak FDTD ve PML güncel katsayıları benzeşime başlamadan önce elektriksel özellik matrisleri olarak aynı boyuttaki matrislerde depolanır ve hesaplanır. Yani her bir yineleme boyunca gereksinilen hesaplamaların sayısı azaltılır. Sonuçta, (3.23) nolu denklem takımlarındaki Ψ terimi hesaplanır ve sadece PML bölgeleri içindeki (modelleme gridinin iç kısmındaki) elektrik ve manyetik alanlara eklenir ve bu terimler sıfır olur.

Bu koddaki kaynak dalgacık için bir Blackman-Harris pencere fonksiyonunun normalize olmuş birinci türevi kullanılır (Harris, 1978) Bu puls `blackharrispulse.m` programında yaratılır. Şekil 4.5’de 50, 100 ve 200 MHz değerleri için Blackman-Harris puls’ları görülmektedir. TM-mod kodunda arzulanan kaynak lokasyonundaki E_y alan bileşeni içine beslendiği zaman grid boyunca seyahat eden sonuçlanmış puls kabaca bir Ricker dalgacığını andıran alıcı lokasyonlarında kayıt edilir.



Şekil 4.5 Blackman-Harris pulslarından bazı örnekler (Irving ve Knight, 2006).

Şekil 4.6'da TM-modunda modelleme kodu ile ilgili bir YNER yansıma benzeşimini sağlamayı içeren adımlar bir akış diyagramı biçiminde verilmektedir. Öncelikle kullanılabilecek maksimum uzamsal ayrıklaştırma aralıkları, aynı zamanda sayısal soğurmayı da denetlemek için, modeldeki elektriksel özellikleri veren `finddx.m` ve giriş olarak kullanılacak kaynak dalgacık belirlenir. Daha sonra `finddt.m` kodu modellerin elektriksel özellikleri Δ_x ve Δ_z aralıklarında sayısal durağanlığı yerine getirmek için maksimum zaman aralığını belirlemede kullanılır. Eğer gerekliyse, elektriksel özellik matrisleri alan matrislerinin boyutları çift olduğundan, uzamsal ayrıklaştırma aralığının yarısı olacak biçimde `gridinterp.m` kodu kullanılarak interpolate edilir. Daha sonra bir benzeşime başlamadan önce bir sonuç adımı olarak özellik matrisleri `padgrid.m` programı kullanılarak PML soğurucu sınır hücrelerinin uygun sayısı ile kenarlar boyunca takviye edilir. PML bölgelerindeki σ , ϵ ve μ değerleri gridin iç kısmındaki onların basit biçimde bir genişletilmesi ile tayin edilir.



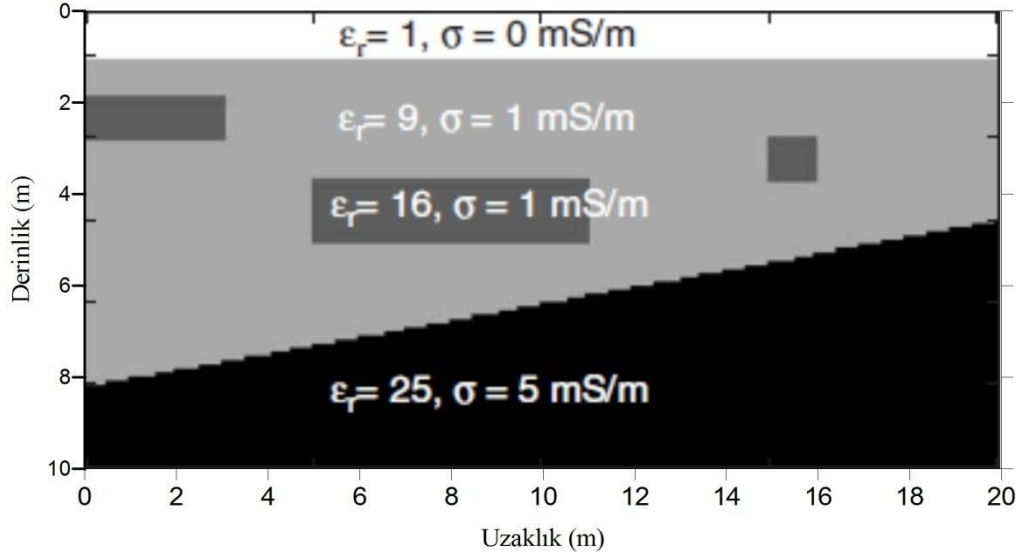
Şekil 4.6 FDTD modellemesi akış diyagramı.

TM_model2d.m kodunda bir dış döngü kaynağın sayıları üzerinde ve bir iç döngüde her bir kaynak için gereksinilen FDTD yinelemelerinin sayısı üzerinde çalışır. Her bir FDTD yinelemesinde H_x , H_z ve E_y alan matrisleri (3.23) ve (3.26)

nolu denklem takımları kullanılsın diye ilkin güncellenir. Kaynak puls fonksiyonunun yaklaşık zaman örnekleme daha sonra akım kaynak lokasyonundaki E_y alan bileşeninin içine beslenir ve E_y dalga alanı alıcı lokasyonlarının tümünde kayıt edilir. Kodun çıktısı ortak-kaynakları bir araya getiren bir diziyi içeren bir veri kübudür. Burada ortak-ofsetli veri kayıt edilir. YNER profillemeye yansıması boyunca tipik olarak elde edilen ortak-ofset verisinin çok-ofsetli veri küplerinden çıkarılması MATLAB’de oldukça kolaydır.

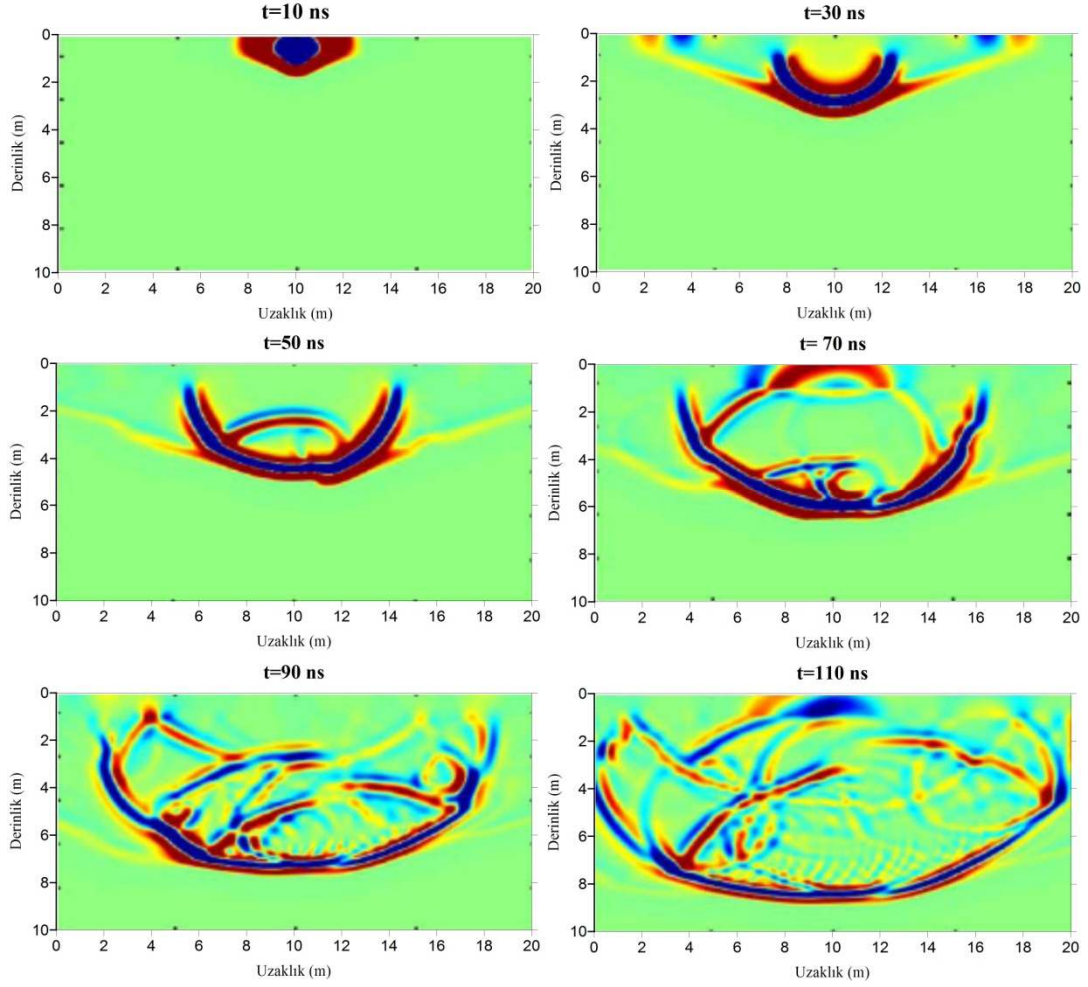
4.2.2.1 Sentetik Model Örneği

Bu konuda kodun sonucunu gösterebilmek için Irving ve Knight (2006) tarafından verilen model ve onun FDTD modelleme sonuçları bu bölümde sunulmaktadır. Hazırlanan model değişik yeraltı şekillerinden oluşan ve ortamın karmaşık olduğu bir yapıdadır. Geometrik yapıların yanı sıra eğin katman özelliği de burada bulunmaktadır (Şekil 4.7). Yeraltı eğimli biçimde iki farklı tabakadan oluşmaktadır. Üstteki tabaka $\epsilon_r = 9$ ve $\sigma = 1$ mS/m değerlerine sahip bir suya doygun çökeli göstermektedir. Bunun altındaki tabaka ise $\epsilon_r = 25$ ve $\sigma = 5$ mS/m olan doymuş zondaki materyallerden oluşan bir ortamı göstermektedir. İlk katmanın içine $\epsilon_r = 16$ ve $\sigma = 1$ mS/m olan değişik boyutlarda üç ayrı anomalik blok yerleştirilmiştir. Tüm materyaller için μ değeri serbest uzay değeri olan μ_0 ’a atanmıştır. Modelin en üstüne sıfırdan yukarıya olacak biçimde ince bir hava tabakası konmuştur. Bunun değerleri ise $\epsilon_r = 1$ ve $\sigma = 0$ olarak atanmıştır. Kaynak ve alıcılar ise hava-yer arayüzeyine yansıma araştırması her 0.2 m’de bir yerleştirilmiştir. Burada 100 MHz’lık bir Blackman-Harris kaynak puls’ı kullanılmıştır. Bu puls ve modeldeki elektrik özellikler için `finddx.m` 0.0423m’lik olası olarak bir maksimum uzamsal ayırıklaştırmayı yerine getirmiştir. $\Delta_x = \Delta_z = 0.04$ m olarak atanmış ve olası maksimum zaman adımı ise `finddt.m` yazılımı kullanılarak 0.0801 ns olarak belirlenmiştir. Burada $\Delta_t = 0.08$ ns’dir.



Şekil 4.7 TM- mod yansıma YNER örneği için sentetik model.

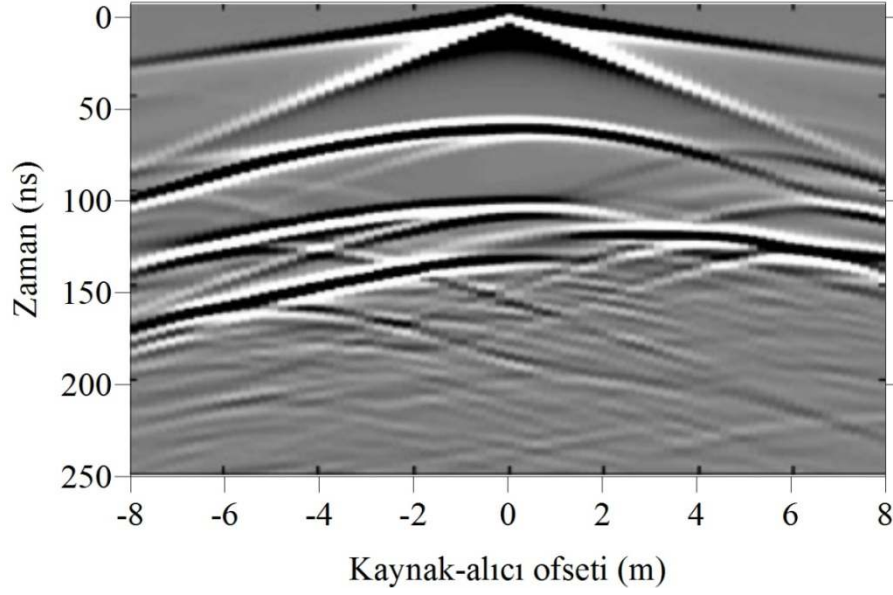
Şekil 4.8’de $x = 10$ m’de kaynağın yerleştiği durum için FDTD benzeşiminin değişik zaman aralıklarındaki E_y alan bileşeninin anlık görüntüleri verilmektedir. Burada PML soğurma sınırları kullanıldığı için modellemede kenarlardan kaynaklanan herhangi bir etki görülmemektedir. Anlık görüntülerden $t = 30$ ns’deki dalga alanının yeraltındaki herhangi bir heterojen ortama girmeden önceki durumu görülmektedir. Baş dalgası hava tabakasında ve yer içinde derine doğru yayılımını sürdürmektedir. Zamanın $t = 50$ ns olduğu benzeşimde dalga alanının üstteki katmanın ortasındaki büyük blok cisme girdiği ve yüzeye doğru kısmi yansımaların varlığı izlenmektedir. Kaynak lokasyonundan hava boyunca ilerlemesini sürdüren doğrudan gelen dalga ise model ortamının sınırlarında kalmaktadır. Dalga alanının $t = 70$ ns olduğu durumu gösteren benzeşimde ise üst katmandaki bloktan yansıyan enerji hava-yer arayüzeyine ulaşmıştır. Zaman $t = 90$ ns olduğunda, alt ve üst katmanlar arasındaki eğimli sınırdan kaynaklanan yansımaların dalga alanını görmekteyiz. Şekil 4.6’de verilen basit bir yer modelinin Şekil 4.7’de verilen yanıtlarından da görülebildiği gibi, yayılan dalga alanları çok kısa zamanda oldukça karmaşık olmaktadır.



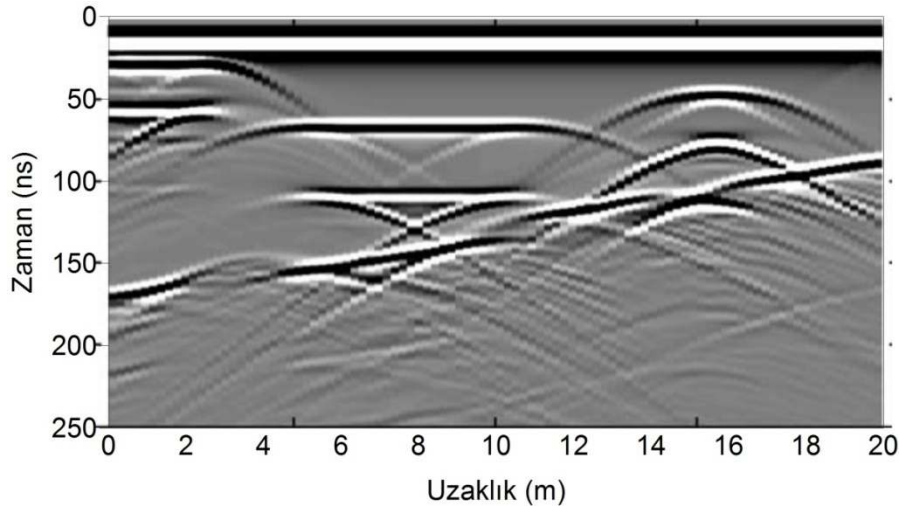
Şekil 4.8 Farklı zamanlarda E_y dalga alanının genliğinin anlık gösterimi (kaynak, $x=10$ m ve $z=0$ m'ye yerleştirilmiştir).

Şekil 4.9'da Şekil 4.7'deki sentetik modelin $x = 10$ m'de yerleştirilen kaynak için ortak kaynak iz grubunu göstermektedir. Bu çok-ofsetli veri küpünün çıktısının bir kesmesidir. Görüntüdeki doğrusal olaylar doğrudan hava ve yerden gelenlerdir. Hiperbolik olanlar alt ve üst tabaka arasındaki eğimli sınır ve üst katmanın ortasındaki blok anomalilerinin alt ve üst kenarlarından gelen yansımalarıdır. Şekil 4.10'da ise veri küpünden çıkarılmış ortak-ofset yansıma YNER verisini göstermektedir. Bu görüntü için kaynak-alıcı ofseti 1 m'dir. Görüntüde blok anomalilerinin her bir köşesinden kaynaklanan saçılımlar açıkça görülmektedir. Ayrıca alt ve üst yüzeyler arasındaki eğimli sınır, her ne kadar üst katmandaki hız anomalilerinin neden olduğu zaman kaymalarından dolayı YNER kesitinde ideal olarak doğru bir arayüzey görünmese de, kuvvetlice görünür olmaktadır. Sonuç

olarak doğrudan hava ve yer dalgaları şeklin üstünde bir arada ve iç içe geçmiş biçimde görülmektedir.



Şekil 4.9 Kaynağın konumu $x=10$ m ve $z=0$ m olması durumu için ortak-kaynak iz grubu.



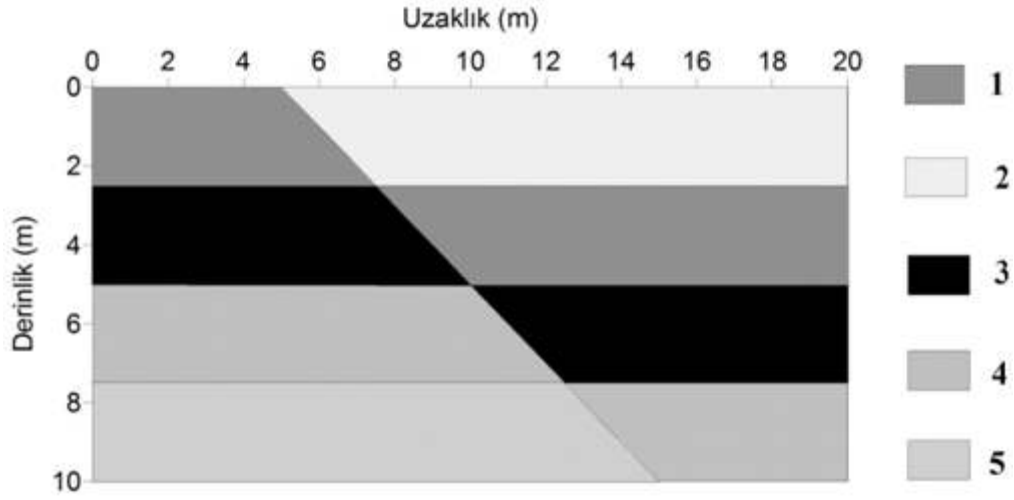
Şekil 4.10 TM-mod yansıma YNER modelleme örneği için sentetik radargram.

4.3 Sığ Jeolojik Özelliklerin Modellemesi

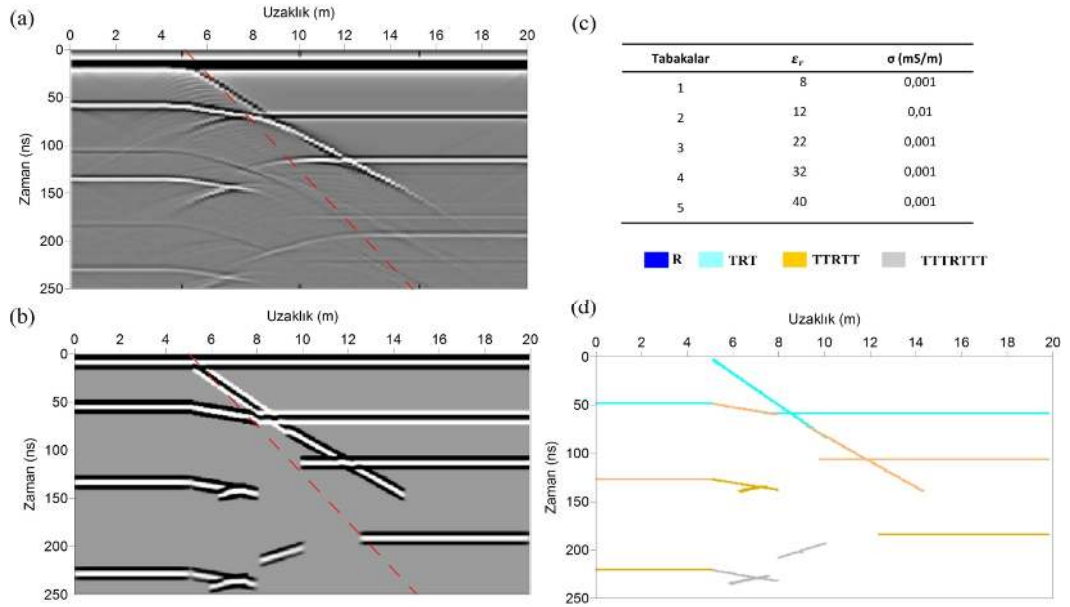
Bu çalışmada Twiss'1992'den düzenlenen Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3'deki normal, bindirme ve doğrultu atımlı fay diyagramlarının 2-boyutlu sentetik modelleri hazırlanmıştır. Yatay ya da eğim tabakalı ortamlar yukarıdaki tablolarda da verildiği gibi, farklı elektromanyetik parametrelere sahiptir ve bu değişkenlerinin radargramlar üzerindeki etkileri bu çalışma ile irdelenmiştir. Bunun sonucunda, belirlenen parametrelerle, ışın izleme ve zaman ortamında sonlu-farklar (FDTD) teknikleriyle 1- ve 2-boyutlu YNER modellemesi yapılmıştır. Bu çalışmada ışın izleme tekniği kullanılarak elde edilmiş sonuçlar bir boyutlu çözüm yapan GPRSIM v3.0 yazılımıyla elde edilmiştir. FDTD tekniği kullanılarak elde edilen sonuçlar ise, iki boyutlu çözüm üreten Irving ve Knight (2006)'nin MATLAB programlama diliyle geliştirdiği modelleme programı kullanılmıştır. Her iki teknikte de kullanılan merkezi anten frekansı 100 MHz (ışın izleme tekniğinde bir ricker dalgacığı kullanılırken, FDTD tekniğinde bu dalgacığa benzer bir Blackman-Harris dalgacığı kullanılmıştır), zaman penceresi ise 250 ns olarak seçilmiştir. Tüm materyaller için μ değeri serbest uzay değeri olan μ_0 'a atanmıştır. Örnekleme aralığı ise 0,2 m seçilmiştir. Aşağıdaki kısımlarda bu iki tekniğin farklı fay türleri için hazırlanmış modelleme sonuçları verilecektir.

4.3.1 Normal Fayın Sentetik YNER Modellemesi

Yatay tabakalı bir ortamın normal bir fay tarafından kesilmesi sonucunda oluşan durumu gösteren Şekil 4.1' deki diyagram kullanılarak 2-boyutlu sentetik model hazırlanmıştır. Bu sentetik model Şekil 4.11'de ve ışın izleme ile FDTD teknikleri kullanılarak elde edilmiş modelleme sonuçları da Şekil 4.12a'de verilmektedir. Modelleme çalışmasında kullanılan tabakaların elektriksel özellikleri (bağıl dielektrik geçirimsizlik ve elektriksel iletkenlik) Tablo 4.1'de verilmektedir. Bu sentetik model için ışın izleme tekniğinde kullanılan kth dalga tipleri ise Şekil 4.12d'de görülmektedir.



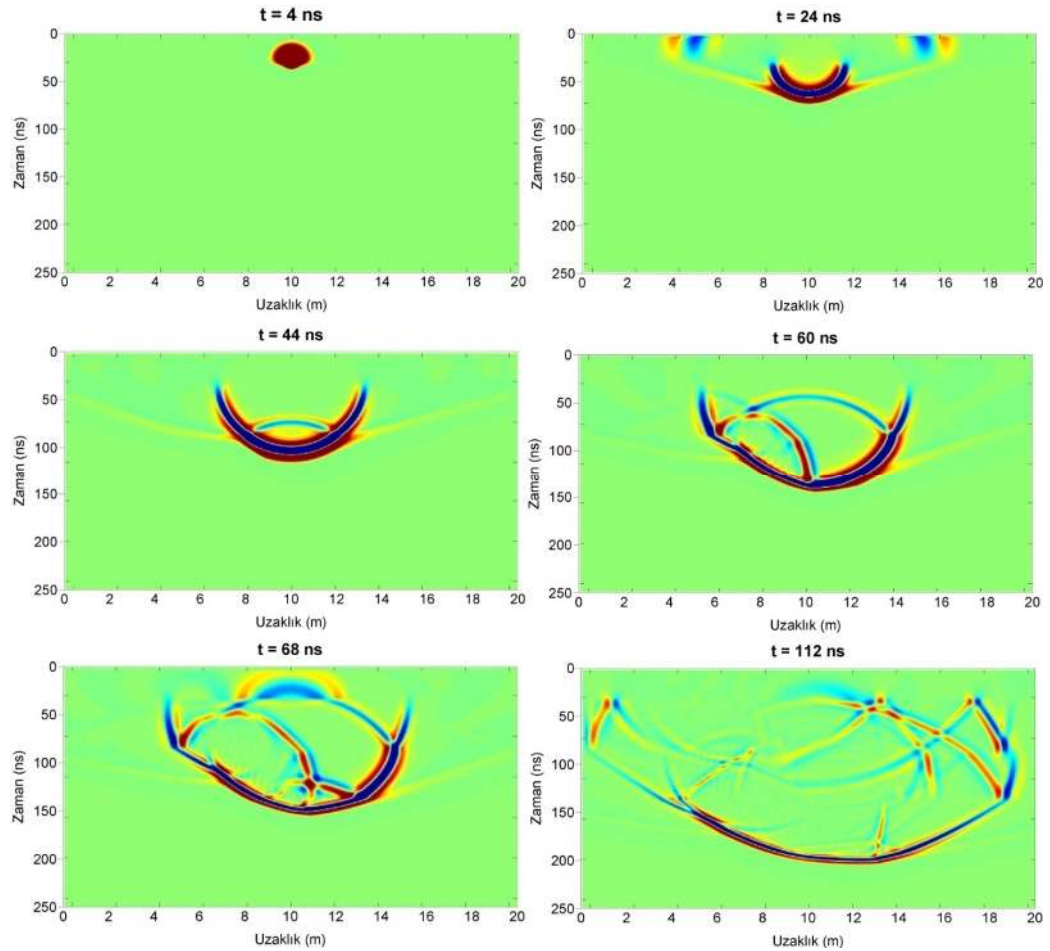
Şekil 4.11 2-boyutlu sentetik normal fay modeli.



Şekil 4.12 Normal fay modeli için hesaplanan sentetik radargramlar, tabakaların elektriksel özellikleri ve seyahat süresi çizimi. (a) FDTD tekniği kullanılarak elde edilen sentetik radargram, (b) ışın izleme tekniği kullanılarak elde edilen sentetik radargram, (c) Tabakaların elektriksel değişken değerlerini gösteren tablo, (d) Seyahat süresini gösteren plot çizimi.

Şekil 4.12'deki radargramlarda fay düzlemi kesikli kırmızı çizgiyle gösterilmiştir. Işın izleme ve FDTD teknikleri kullanılarak elde edilen radar sonuçları, birbirleriyle büyük benzerlik göstermektedir. Tabaka sınırlarındaki yansıma arayüzeyleri her iki teknikte de net olarak görülebilmektedir. Ancak fay düzlemi burada açıkça görülmemektedir ve bu durum kullanılan elektriksel değişken değerlerine bağlı

olarak değişim göstermektedir. Bu değişimi, ortamların dielektrik zıtlığının etkisi, faylanma nedeniyle birbirinden ayrılan katmanların elektriksel özelliklerinin farklı olması ve bunlara arasında ışınların tekrarlamalara ve istenmeyen yansımalara neden olması ile yitimli ortamlardaki dalga atenüasyonunun etkisi gibi bir çok etkenin bu olayı oluşturduğu düşünölmelidir. Ayrıca ortamlara arasındaki zıtlık azaldıkça yansıma arayüzeyi fay düzlemine daha çok yaklaşacaktır. Yansıma ara yüzeylerinin polarlama durumu ortamların elektriksel geçirimlilik değerleriyle ilgidir; yani iki farklı elektriksel özelliğe sahip bir ortamda radar sinyalleri yüksek dielektrik sabitten düşük olana geçerken, yansıma ara arayüzeydeki polarlanma durumu pozitiften negatife doğru gider, tersi durumda ise polarlanma negatiften başlayarak pozitifte doğru gitmektedir.



Şekil 4.13 Sentetik normal fay modeli için farklı zamanlarda E_y dalga alanının genliğinin anlık gösterimi (kaynak, $x=10$ m ve $z=0$ m'ye yerleştirilmiştir).

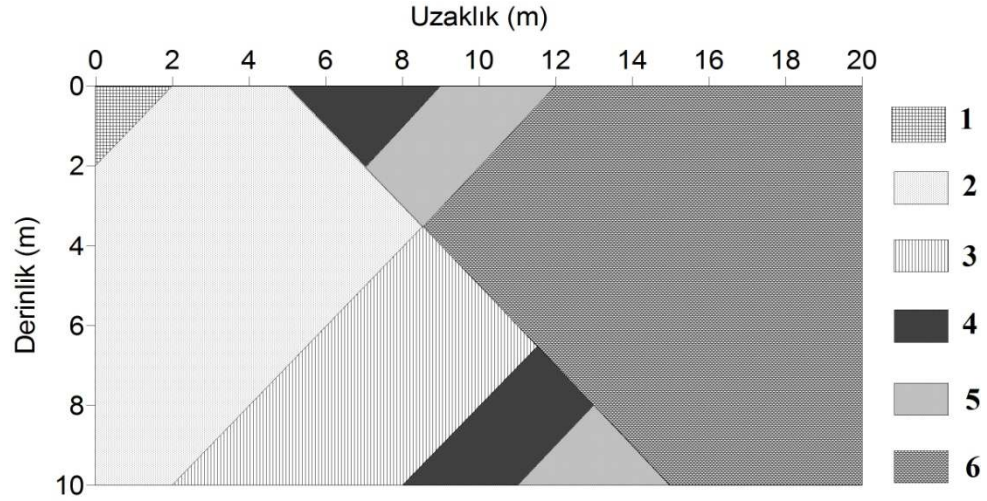
Şekil 4.13’de bu sentetik model için FDTD tekniğiyle farklı zamanlarda E_y dalga alanının gösterimi verilmektedir. Bu şekilde, kaynak $x=10$ m ve $z=0$ m’ye yerleştirilmiştir. $t=4$ ns anında kaynağın ilk çıkış anı verilmektedir. Herhangi bir heterojen ortama girmeden önce $t=24$ ns anında hiçbir yansıma, iletim ya da kırılma olayına maruz kalmadan yer içinde dalga alanının durumu görülmektedir. $t=44$ ns’de dalga ilk yansımaları gerçekleştirirken, $t=60$ ns’de ise dalga alanının fay düzleminde yansımalarının etkisi görülmektedir. Burada şöyle bir saptama yapılabilir: Yansıyan dalga cephesi ile kırılıp yer içinde ilerlemeye devam eden dalga cephesinin birleşim yeri yansıma arayüzeyini verir. $t=68$ ns anında yansıyan bir dalga alanının alıcı antenlere ulaşma anı görülmektedir ve dalga alanı daha fazla kırılma ve yansımaya uğrayarak daha karmaşık bir hale gelmektedir. Ve son olarak, ortamın heterojenliği ve yansıma arayüzeyleri arttıkça birçok yansımanın dalga alanları $t=112$ ns anında olduğu gibi çok karışık bir biçimde görülebilmektedir.

Her iki teknikte kullanılarak yapılan sentetik modelleme aralarında yeterli bir elektriksel zıtlık bulunan yatay tabakalı ortamların YNER yöntemi ile kolayca saptanabileceğini, hatta polarite yönlenmelerine bağlı olarak ortamların elektriksel özellikleri hakkında yaklaşık bir yorum bile yapılabilmektedir. Ancak, normal faylanma geometrisinden kaynaklanan olgu fay düzleminin açıkça görülemeyeceğini bu ve benzeri modeller için ortaya çıkarmıştır. Ayrıca ışın izleme yönteminde her yatay tabaka net olarak görülürken, bu durum FDTD’de daha farklıdır ve derinliğe bağlı olarak soğurulma ve enerjideki yitimler nedeniyle son tabakalar arasındaki ayırım daha bulanık görünmektedir. Ayrıca ortamlardaki difraksiyon ve ikincil yansılarda bu yöntemin radargramında açıkça görülmektedir. Bu farklar daha önce kuramsal kısımda da açıklandığı gibi yöntemlerin çözüm farklılıklarından oluşmaktadır ve FDTD her zaman doğal sonuca daha benzer modeller üretmektedir.

4.3.2 Bindirme Fayının Sentetik YNER Modellemesi

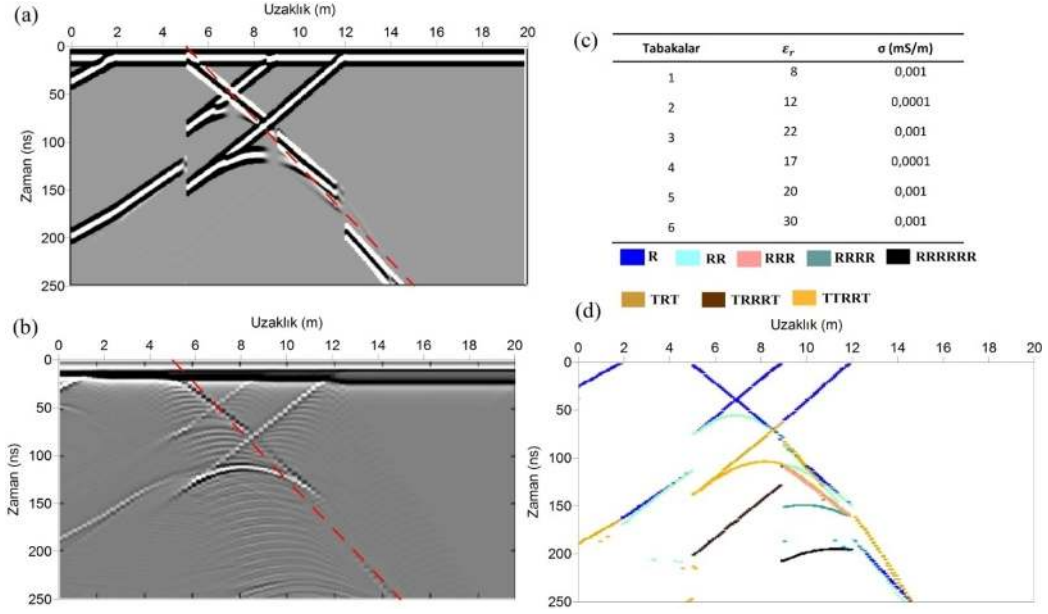
Farklı yönlü yaklaşık 40° eğimli tabakalardan oluşan bir jeolojik özelliğin bir bindirme fayı tarafından kesildiğini gösteren Şekil 4.2’deki diyagramdan yararlanılarak 2-boyutlu sentetik model hazırlanmıştır (Şekil 4.14). Bu model ışın

izleme ve FDTD teknikleri kullanılarak modellenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.15a'da verilmiştir. Ayrıca, Şekil 4.15c'de kullanılan elektriksel değişken değerlerinin verildiği tablo ve Şekil 4.15d'de ise ışın izleme tekniğinde bu sentetik model için kullanılan kth dalga tipleri ve radar sinyallerinin seyahat süresi gösteren bir plot çizimi bulunmaktadır.



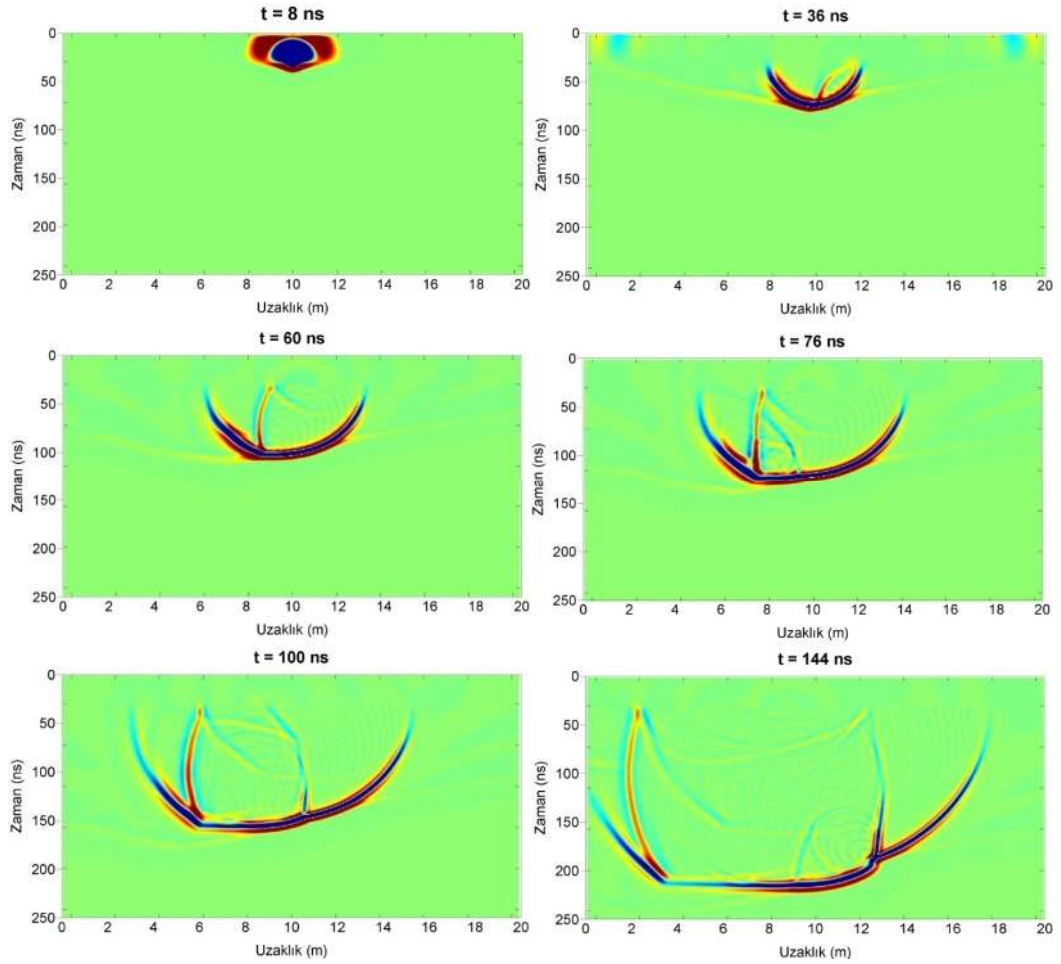
Şekil 4.14 2-boyutlu sentetik bindirme fay modeli.

Şekil 4.15'deki sentetik radargramlar incelendiğinde, bu fay türü için modellemede normal faya göre daha başarılı bir sonuç elde edildiği görülmektedir. Bu modelin sonuçlarında fay düzleminin olduğu yer daha net görülebilmektedir. Işın izleme tekniğinde bir önceki modelde de görüldüğü gibi tüm arayüzler açıkça görülmektedir ve hatta polarite değişimleri bile açıkça izlenmektedir. Ama bu durum daha öncede tartışıldığı gibi, FDTD sonucunda açıkça izlenememektedir. Bu teknikle elde edilen radar verisinin radargramında yansıma ara yüzeylerindeki genliklerin derinlik artışına bağlı olarak azaldığı ve özellikle ortamın geometrisine bağlı olarak hiperbol türü bir eğrinin çıktığı görülmektedir. Ayrıca tekrarlı yansımalar ve saçınımdan kaynaklanan yayılım etkileri açıkça görülmektedir. Bunun sebebi; FDTD tekniğinin 2-boyutlu, ama ışın izlemenin bir boyutlu algoritmalar ile çözüm yapmasıdır. Her iki teknikle elde edilen radargramlarda da modelde en derinde bulunan iki tabaka görülememektedir. Bunun nedeninin tabakaların boyutlarının küçük ve derinde olması ile radar dalgasının sönümlenme etkisinden kaynaklanmış olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.14 Bindirme fay modeli için hesaplanan sentetik radargramlar. (a) ışın izleme tekniği kullanarak elde edilen sentetik radargram. (b) FDTD tekniği kullanılarak elde edilen sentetik radargram. (c) Tabakaların elektriksel değişken değerlerini gösteren tablo. (d) Seyahat süresini gösteren plot çizimi.

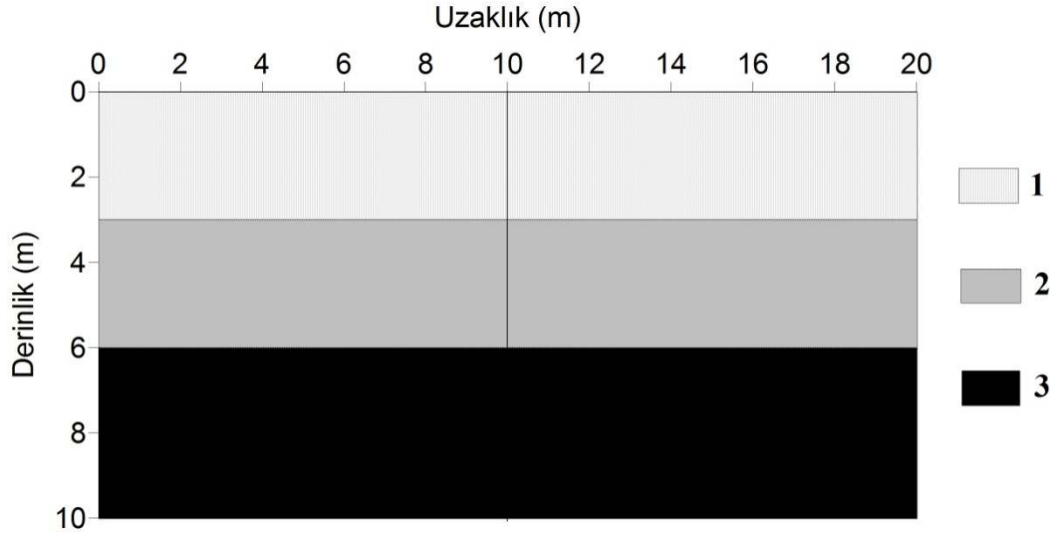
Şekil 4.15’de FDTD tekniğinde radar dalgalarının yer içinde nasıl yayıldığı ve ara yüzeylerden yansıma sırasında dalga alanlarının davranışları görülmektedir. Tekrarlı yansımalar ve saçılımların radar yanıtlarında neden görüldüğü aşağıdaki şekillerden açıkça anlaşılmaktadır. $t=0$ ns’de kaynaktan çıkan dalga 5 nolu ortamda ilerlerken, $t=36$ ns’de tabaka sınırından ilk yansıma ortaya çıkmaktadır. Daha sonra $t=60$ ns ve sonrasındaki tüm görüntülerde yansıma ve saçılmalar tabaka sayısına ve ortamların elektriksel özelliklerine bağlı olarak gittikçe karmaşıklaşmaktadır. Özellikle katmanların köşelerinden yayınan difraksiyon etkileri izleyen zaman kesmelerinde açıkça görülmektedir.



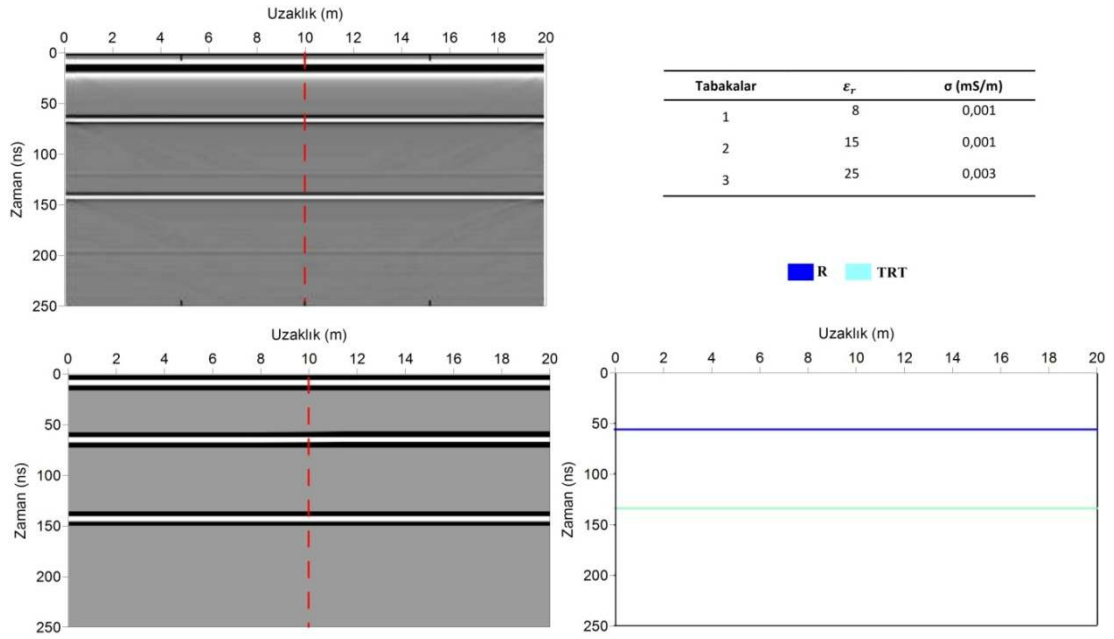
Şekil 4.15 Sentetik bindirme fay modeli için farklı zamanlarda E_y dalga alanının genliğinin anlık gösterimi (kaynak, $x=10$ m ve $z=0$ m'ye yerleştirilmiştir).

4.3.3 Doğrultu Atımlı Fayın Sentetik YNER Modellemesi

Yatay üç tabakadan oluşan bir ortam ve bunu doğrultu atımlı bir fay tarafından kesildiği durumu gösteren Şekil 4.3'deki fay diyagramından yararlanılarak hazırlanan 2-boyutlu sentetik model Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Aynı modelin ışın izleme ve FDTD teknikleri kullanılarak modellenmesi sonucunda elde edilen sentetik radargramlar Şekil 4.17a ve 4.17b'de verilmiştir. Tabakaların elektriksel değişken değeri Şekil 4.17c'deki tabloda belirtilmiştir. Ayrıca bu model için ışın izleme tekniğinde kullanılan kth dalga tipleri de Şekil 4.17d verilmiştir.



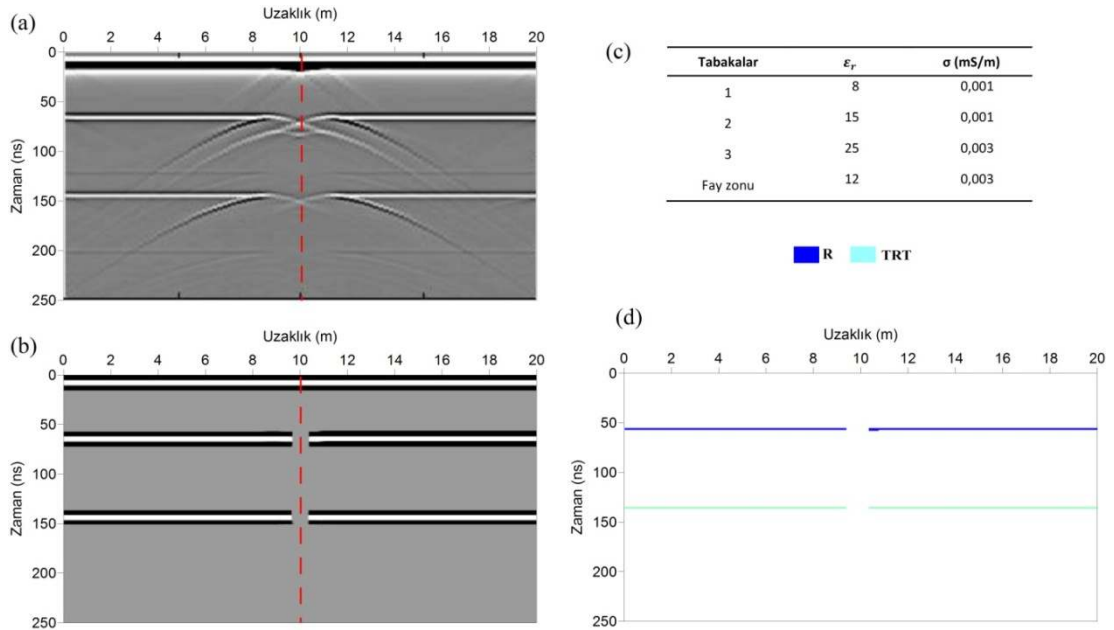
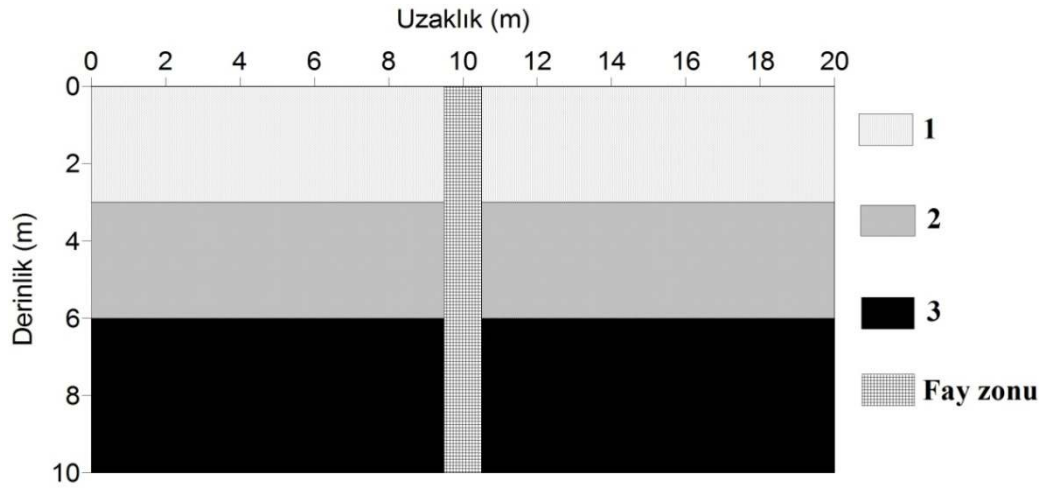
Şekil 4.16 2-boyutlu doğrultu atımlı fay modeli.



Şekil 4.17 Doğrultu atımlı fay modeli için hesaplanan sentetik radargramlar. (a) FDTD tekniği kullanılarak elde edilen sentetik radargram. (b) ışın izleme tekniği kullanılarak elde edilen sentetik radargram. (c) Tabakaların elektriksel değişken değerlerini gösteren tablo. (d) Seyahat süresini gösteren plot çizimi.

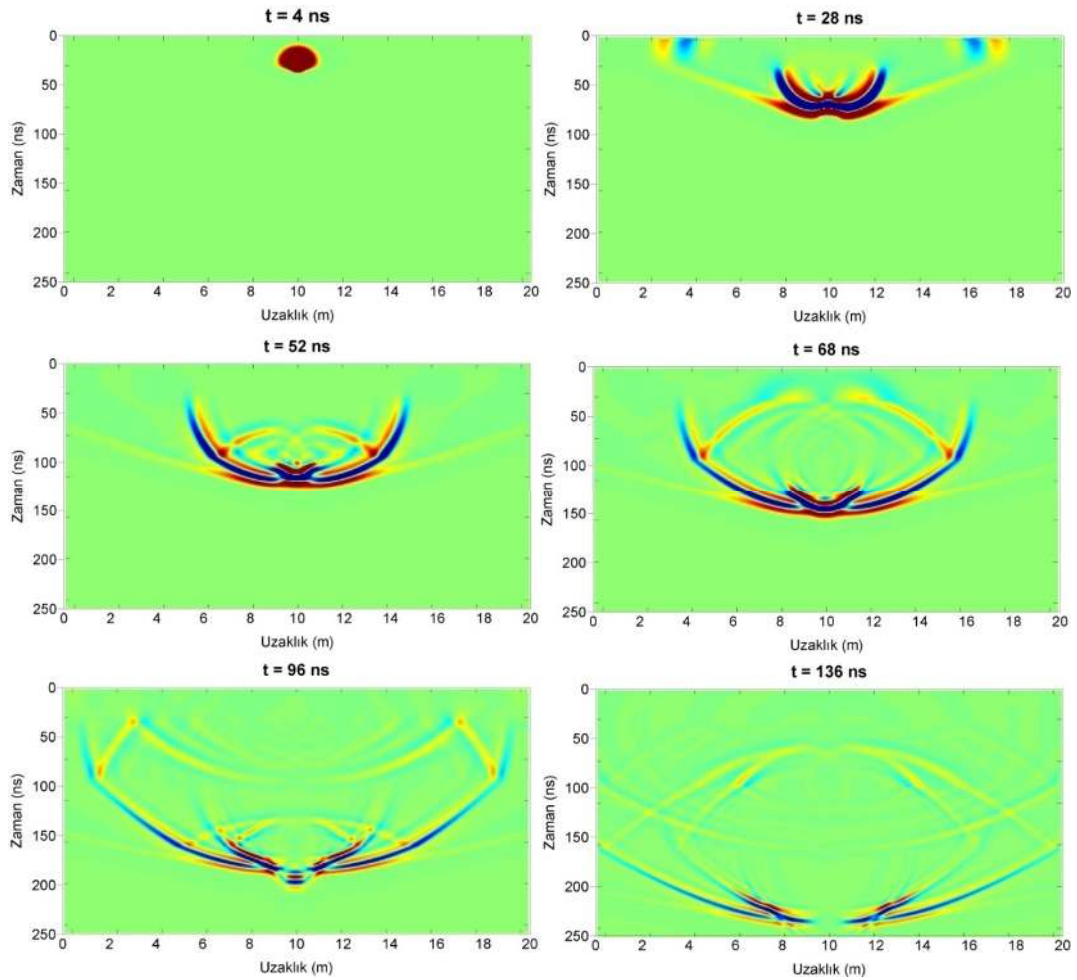
Şekil 4.17’de görüldüğü gibi fay düzleminin çizgisel olması fay yüzeyinin radargramlarda görülememesine sebep olmuştur. Fakat fay yüzeyi çizgisel değil de bir zon şeklinde olursa ve bu zon elektriksel olarak ortamdaki tabakalardan farklı olması durumunda fay düzlemi örnekleme aralığı ve zonun genişliğine bağlı olarak belirlenebilir. Şekil 4.18’de aynı fay türü için bu sefer fay düzleminin zon olduğu

düşünülerek yeniden sentetik model hazırlanmıştır. Şekil 4.19a ve 4.19b ise sırasıyla FDTD ve ışın izleme teknikleri kullanılarak elde edilen radargramlar verilmiştir. Şekil 4.19c'de tabakaların ve kendi içinde homojen olan fay zonunun elektirksel özellikleri tablo halinde görülmektedir. Son olarak bu model için ışın izleme tekniğinde kullanılan kth dalga tipleri ve radar dalgalarının seyahat süreleri plot çizimi olarak verilmiştir.



Şekil 4.19 Fay yüzeyi zonlanmış doğrultu atımlı fay modeli için hesaplanan sentetik radargramlar. (a) FDTD tekniği kullanılarak elde edilen sentetik radargram. (b) ışın izleme tekniği kullanılarak elde edilen sentetik radargram. (c) Tabakaların elektirksel değişken değerlerini gösteren tablo. (d) Seyahat süresini gösteren plot çizimi.

Şekil 4.19’da görüldüğü gibi, fay zonu her iki teknikte de görülebilmektedir. Zon boyunca yansıma ara yüzeyleri görülmemekte, bu da fay zonunun yerini göstermektedir. İki radargram arasındaki en büyük farklılık; FDTD tekniği kullanılarak elde edilen radar sonuçlarında, tabakaların bitiş noktalarında oluşan saçılma hiperbollerinin, ışın izleme de görülmemesidir. Bu durum FDTD’nin doğasından kaynaklanmaktadır ve tabaka sayısına bağlı olarak derine doğru inildikçe bunların orta noktaya göre olan kaymaları gittikçe artmaktadır. Yani fay düzleminden kaynaklanan difraksiyon hiperbolünün arasındaki açıklık azalmaktadır ve bu durum aynı ortamda, yani fay zonunda seyahat eden radar dalgası ile ilişkilidir.



Şekil 4.20 Sentetik doğrultu atımlı fay modeli için farklı zamanlarda E_y dalga alanının genliğinin anlık gösterimi (kaynak, $x=10$ m ve $z=0$ m’ye yerleştirilmiştir).

Şekil 4.20’de FDTD tekniğinde E_y dalga alanlarının yansıma ara yüzelerinde davranışları gösterilmektedir. Kaynaktan çıkan dalğanın $t=4$ ns’deki görüntüsünde fay zonunun kenarlarından kaynaklanan etki az da olsa görünmektedir. Ama $t=28$ ns’de ortamdaki yansıma etkisi ve buna bağlı olarak simetri etkisi ile ortaya çıkan ikizlenme açık biçimde izlenmektedir. Derine doğru indikçe birçok difraksiyon etkisi görülmektedir ve bu durum radar dalga alanlarının oldukça karışmasına neden olmaktadır. Özellikle $t= 96$ ve 136 ns düzeylerinde düşeye doğru olan yatay katmanlanmanın da etkisi ile karmaşıklık daha da artmaktadır. Bu durum özellikle karmaşık yeraltı özelliklerinin olması durumunda böylesi bir faylanma türünün daha da zor belirlenebileceğini ortaya koymaktadır.

Yapılan sentetik model çalışmaları burada kullanılan modeller için her iki yöntemde yararlı sonuçlar verdiğini, özellikle FDTD tekniğinin doğaya daha uygun sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. Böylece karmaşık yer altı özelliklerine sahip jeolojik ortamların incelenmesinden önce yapılacak sentetik radar modelleme çalışmalarının önemli yararlar sağlayacağını ve yorumcuya olayın doğasını anlama anlamında önemli katkılar sağlayacağı yapılan bu modelleme çalışmaları ile ortaya çıkmıştır.

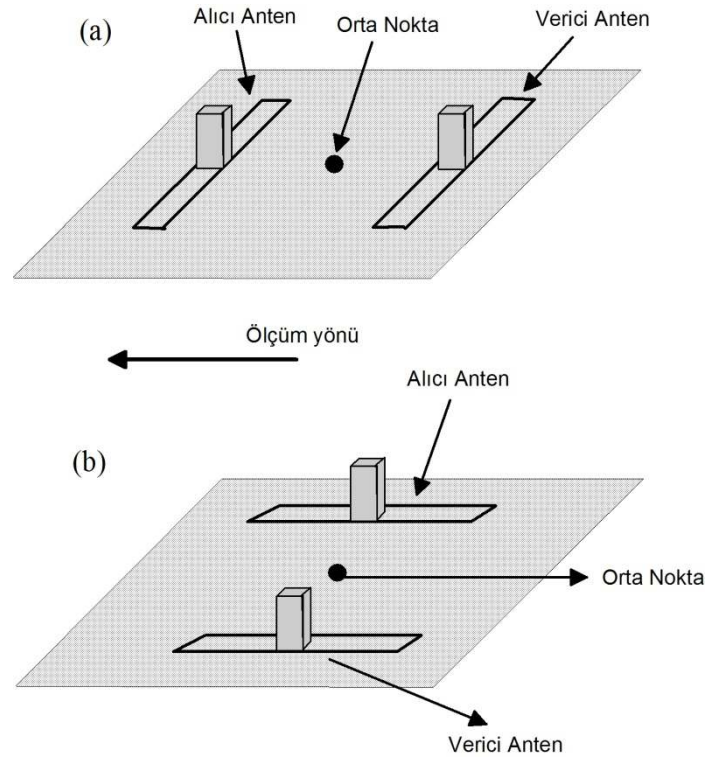
4.4 Arazi Uygulamaları

Bu tez çalışması kapsamında, yapılan sentetik model çalışmaları ile alan verisi arasındaki ilişkiyi kurabilmek ve radar yorumunu artırmak için İzmir Kuşçenneti’nde bulunan Üçtepeler mevkiinde (Leukai Antik Kenti) bir normal faylanma üzerinde YNER verisi toplanmıştır. Çalışmada yaklaşık güzey- kuzey yönlü 90 m uzunluğundaki bir profil üzerinde iki farklı ölçüm tekniğinde YNER verisi toplanmıştır (Şekil 4.21). YNER verisi toplanması sırasında Mala RAMAC firmasının ürettiği 25 MHz merkez anten frekansına sahip korumasız bir anten kullanılmıştır. Antenlerin bağımsız olması, bunların farklı ölçüm düzenlerinde kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada iki farklı tür anten dizilimi kullanılmıştır. Bunlardan ilki, alıcı ve verici antenlerin ölçüm düzlemine paralel

olduğu dizilimdir. Diğer dizilim ise, alıcı ve verici antenlerinin ölçüm yönüne dik olması durumunu göstermektedir (Şekil 4.22).



Şekil 4.21 YNER çalışma alanının uydu görüntüsü ve YNER ölçüm profili.



Şekil 4.22 YNER anten dizilimleri. (a) Antenleri ölçüm yönüne dik olması durumu. (b) Antenlerin ölçüm yönüne paralel olması durumu.

Çalışma alanı büyük oranda Ege'deki tektonik etkiler sonucunda şekillenmiş bir özelliktedir ve alanda tabakalanma, faylanma ile fay yüzeyi ve atım açıkça görülebilmektedir (Şekil 4.23). Faylanma doğrultusu KKD-GGB'dır ve faylanma genelde dike yakın özelliktedir. Alanda hakim birim kireçtaşlarıdır ve üstte bulunmaktadır. Bu birimin altında killi, kumlu ve siltli katmanlara sahip ardalanmalı bir stratigrafi izlemektedir. Buradaki örnek kuramsal olarak tasarlanan sentetik model çalışmalarına benzer bir modelin arazide görülen bir örneğini temsil etmektedir. Faylanma ve katmanlanma ile ilişkili görüntüler Şekil 4.23'de açıkça görülmektedir.

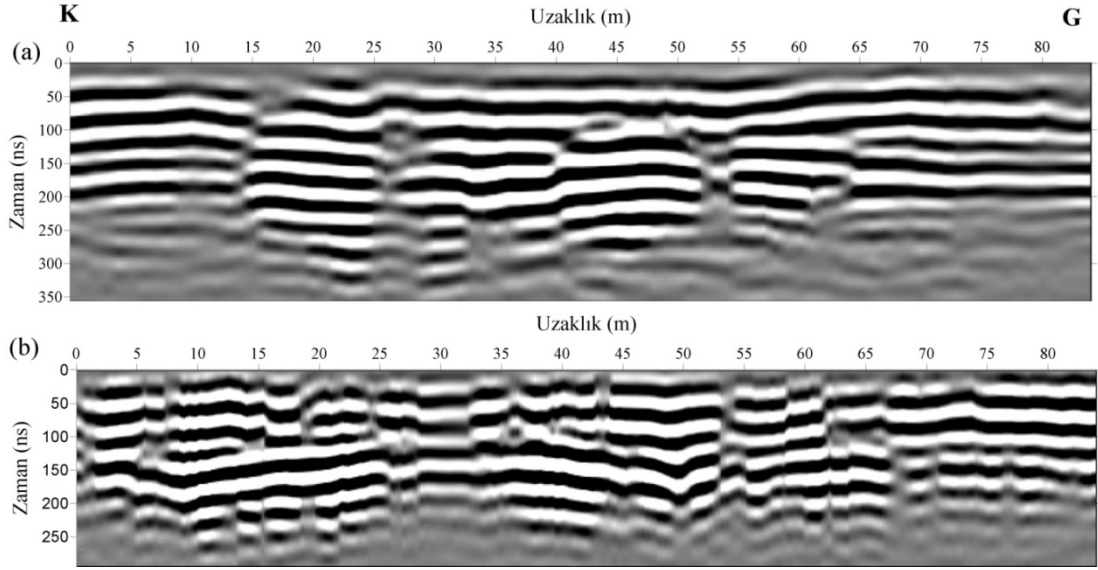


Şekil 4.23 İzmir Kuşçenneti'ndeki tabakalanmayı ve faylanmayı gösteren bazı fotoğraflar.

Veriler, 0,5 m ve 1 m örnekleme aralıkları kullanılarak toplanmıştır. Ayrıca, antenler arası mesafe 3 m seçilmiştir. Örnekleme aralığı ve anten dizilimlerinin radar sonuçları üzerine etkisi Şekil 4.24'de verilen radargramlardan açıkça görülebilir. Şekil 4.24a'da verilen radargram, antenler ölçüm yönüne paralel olarak ve örnekleme aralığı 1 m olarak verilerin elde edildiği radargramdır. Şekil 4.24b'deki radargramda ise, antenlerin ölçüm yönüne dik ve örnekleme aralığının 0,5 m olduğu durumda verilerin toplandığıdır.

Araziden elde edilen radar verileri görüntü ve veri kalitesinin arttırılması amacıyla değişik sinyal analiz işlemlerinden geçirilerek, daha seçilebilir ve kaliteli radargramlar elde etmek olasıdır (Drahor, 2007). Bu çalışma kapsamında elde edilen radargramlar GPR-SLICE v7.0 yazılımı kullanılarak değerlendirilmiştir. Radargramlara sırasıyla; yüzey koşullarından kaynaklanan radar izlerinde oluşan zamansal kaymayı düzelten statik düzeltme, yüksek genlikli aletsel etkiyi kaldırmak için background removal süzgeci, düşük genlikli anomalilerin genliklerini arttırmak için re-gain işlemi, belirli frekans aralıklarındaki gürültüleri radar yanıtlarından arındırmak için band-pass filtresi ve son olarak saçılma etkilerini ortadan kaldırmak için migrasyon işlemleri uygulanmıştır.

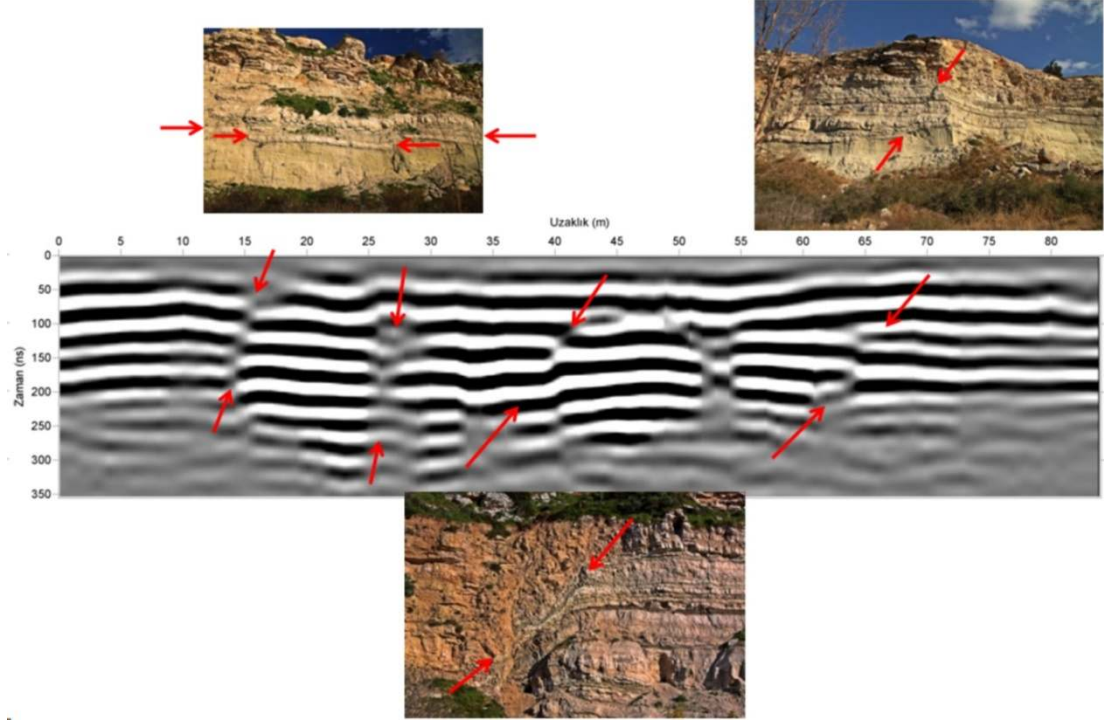
Radargramlardan da görülebileceği gibi, tüm jeofizik yöntemlerde olduğu gibi YNER yönteminde de örnekleme aralığı çok önemlidir. 1 m örnekleme aralığı kullanılarak elde edilmiş radargramda yansıma yüzeyleri daha yuvarlatılmış (smooth) bir görünüm verirken, 0,5 m örnekleme aralığıyla elde edilen radargram da ise, daha küçük ayrıntıların bulunduğu görülmektedir. Ayrıca anten dipollerin dizilimi de radar yanıtlarını büyük oranda etkilemektedir. Bu nedenle çalışma amacına bağlı olarak seçilecek farklı anten dizilimleri kullanmak, yorumlama aşamasında büyük kolaylık sağlayacaktır.



Şekil 4.24 Merkez anten frekansı 25 MHz olan ve farklı anten dizilimleri ve örnekleme aralığı kullanılarak elde edilmiş radargramlar. (a) Antenlerin Şekil 4.22b’de gösterildiği gibi ölçüm yönüne paralel ve örnekleme aralığının 1 m olması durumunda elde edilmiş radargram. (b) Antenlerin Şekil 4.22a’da gösterildiği gibi ölçüm yönüne dik ve örnekleme aralığının 0,5 m olması durumunda elde edilmiş radargram.

Şekil 4.25’de ölçüm profilinin yakınlarından çekilmiş fotoğraflar ile Şekil 4.24a’daki radargramın birlikte bakıldığında, yansıma ara yüzeylerindeki ani değişimler ile fotoğraflardaki yüzeylerin oldukça iyi biçimde örtüştüğü görülmektedir. Radargramdan da görüldüğü gibi yaklaşık 15 m’deki dike yakın kesikli ve zamansal farkların olduğu yerde sol üst köşede bir fay görülmektedir. Yaklaşık 20 m civarında yitimin olduğu zon ortamda içi yitimli bir madde ile dolmuş bir ortamın olabileceğini göstermektedir ve nitekim burada da diğer fayın olduğu sol üstteki şekilden görülmektedir. Kesitin ortasında görülen ve yüksek bir atım miktarına sahip fay (alttaki fotoğraf) radargramda benzer eğim içinde açıkça görülmektedir. Ayrıca yüzeylenmemiş ama kesitte görülen bir başka fayda (sağ üstteki fotoğraf) yine radargramın güneyinde tabakalı bir ortamın altında açıkça izlenmektedir. Bu çalışma genelde YNER yönteminin aktif tektonikte diri fayların belirlenmesinde kullanılabilecek önemli bir yöntem olduğunu göstermektedir. Ayrıca bu çalışma daha karmaşık sentetik radargramların gerçek arazi verisini sınamada etkili olacağını ortaya koymuştur. Ancak ortamların karmaşık olması, hesaplama gridinin aşırı büyümesi ve çok fazla bilgisayar zamanına ve gücüne sahip bilgisayarlar gerektirdiğinden, ne yazık ki şu aşamada bu çalışmalar dünya üzerinde

yapılamamaktadır. Ancak yakın gelecekte teknolojik gelişimlerin etkisi ile aranılan ortama uygun sentetik modelleme çalışmalarının yapılabileceği düşünülmektedir.



Şekil 4.25 Çalışma alanında çekilen fotoğraflar ile bir radargramın birlikte yorumu.

BÖLÜM BEŞ

SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, YNER modellemesinde kullanılan ışın izleme ve zaman ortamında sonlu-farklar teknikleri ayrıntılı biçimde irdelenmiş ve bu tekniklerin birbirine göre üstün ve zayıf noktaları belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada eğimli ve/veya yatay tabakalı ortamların normal, bindirme ve doğrultu atımlı faylar tarafında kesildiği bazı sentetik modeller oluşturulmuş ve hem ışın izleme hem de FDTD teknikleri kullanılarak bunların sentetik radargramları elde edilerek, bunların birbirleri ile karşılaştırılması ve yöntemlerin bu modellere tepkileri incelenmiştir. Ayrıca sentetik veriler ile gerçek radar verileri arasındaki ilişkiyi kurabilme, yorumlamayı geliştirebilme ve yapılacakları belirleme anlamında İzmir Kuşçenneti alanındaki birçok faylanma içeren bir tepede uygulanan bir YNER çalışmasıyla; hem yöntemin diri fayları belirlemede etkin bir yöntem olduğu hem de sentetik radargramların, eğer karmaşık bir biçimde üretilmiyorsa, yeterince yorumu güçlendirmede sonucuna varılmıştır.

Işın izleme tekniğinin temeli keskin arayüzeyli cisimlerin elektriksel geçirgenliği (ϵ) ve iletkenliği (σ) karşılaştırılarak nesneleri geometrik olarak tanımlayan modellere dayanır. Bu yöntemlerle modellenen YNER yanıtları her bir ara yüzey için Ricker dalgacığı gibi kaynak dalgacık yardımıyla hesaplanır. Böylece ilişkili yeraltı modelleri için geometrik temeller üzerinde yeraltı modellerinin iki boyutlu yapay radargramları oluşturulur. Ancak bu teknikle çok karmaşık ortamların modellenmesi olanaklı olmamaktadır. Anten açıklığı ve geometrik yayılım radar sinyallerinin genliklerinin önkestirimi için gereksinilen temel etkenlerdir. Fakat ışın izleme tekniği bir-boyutlu modelleme yaptığı için bunların etkileri ışın izlemede ihmal edilmektedir. Bu yüzden karmaşık ortamların modellenmesinde daha çok FDTD tekniği kullanılır. FDTD, YNER modellemesi görece ışın izlememeye göre daha yavaş çözüm üretmesine rağmen, elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında gerçeğe daha yakın veriler türetmektedir. Bu teknik üç-boyutlu çözüm üretebildiğinden elektromanyetik alanın hem elektrik alan hem de manyetik alan kısmını kullanır. Fay modelleri için gerçekleştirilen modelleme sonuçları incelendiğinde, FDTD tekniğinin

özellikle iletken ve saçılımlı ortamlarda gerçeğe çok daha yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.

Bu çalışma kapsamında iki teknik kıyaslandığında; ortaya çıkan genel durum, ışın-izleme tekniğinin göreceli olarak FDTD tekniğinden daha hızlı çözüm üretmesidir; ama bir boyutlu düz-çözüm modellemesi yapmasından ötürü radar yanıtlarını etkileyecek önemli bazı parametreleri ihmal eder. Bu da elde edilen radar yanıtlarını gerçeğinden uzaklaştırır. Karmaşık ortamların modellenmesinde FDTD tekniği belli koşullar altında kullanılabilir. Matematiksel çözümü görece kolay olan bu teknik iki ve üç-boyutlu düz-çözüm modellemesi yapabilmesi, bu tekniğin ışın izleme tekniğinden ayıran en belirgin özelliğidir. Ancak tekniğin ortamların aşırı karmaşık olduğu durumlarda; hesaplama gridinin aşırı büyümesi ve çok fazla bilgisayar zamanına ve gücüne sahip bilgisayarlara gereksinim ortaya çıktığından, ne yazık ki günümüzde doğal duruma yakın oldukça karmaşık yeraltı koşullarının modellenmesi olanaksızdır. Ancak yakın gelecekte teknolojik gelişimlerin etkisi ile çalışma ortamına uygun sentetik modelleme çalışmalarının yapılabileceği düşünülmelidir.

Bu çalışma kapsamında korunaksız (unshielded) ve merkez frekansı 25 MHz olan antenle yapılan araştırmalarda kullanılan iki dizilim ve farklı dipol yönlerinin radar sonuçlarını önemli oranda etkilediği görülmüştür. Aynı profil için 0,5 ve 1 m örnekleme aralığı kullanılarak elde edilen radargramlarda örnekleme aralığı seçiminin yanıtları ne derece etkilediği ve bu anlamda hem modelleme hem de alan çalışmalarında uygun örnekleme aralığı seçiminin önemi de bu çalışma sırasında görülmüştür. Ayrıca alanda yapılan YNER çalışmalarının bölgedeki faylar ile önemli oranda uyum sağladığı da alandan çekilen fotoğraflar ile bunların ilişkilendirilmesinde görülmüştür. Sentetik modelleme çalışmaları ve arazi uygulaması tümleşik olarak yorumlandığında, YNER yönteminin sığ jeolojik özelliklerin (fay, tabakalanma vb.) belirlenmesinde etkin bir yöntem olduğu söylenebilir.

KAYNAKLAR

- Alila-Olivera, J.A. & Garduno-Monroy, V.H. (2008). A GPR study of subsidence-creep-fault processes in Morelia, Michoacán, Mexico. *Engineering Geology*. 100, 69-81.
- Annan, A.P. (1973). Radio interferometry depth sounding: Part I – Theoretical discussion. *Geophysics*, Vol. 38, pp. 557–580.
- Annan, A.P. (2005). Ground penetrating radar, in near surface geophysics, in D.K. Butler (eds). *Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK, USA, Investigations in Geophysics No. 13*, pp. 357–438.
- Annan, A.P. (2008). Electromagnetic Principles of Ground Penetrating Radar. H.M. Jol, (Ed), *Ground Penetrating Radar: Theory and Application* (3-38). Elsevier. Part 1, 4-38.
- Bergmann, T., Robertsson, J.O.A. & Holliger, K. (1996). Numerical properties of staggered finite-difference solutions of Maxwell's equations for ground-penetrating radar modeling. *Geophysical Research Letters* 23, 45–48.
- Bergmann, T., Robertsson, J.O.A. & Holliger, K. (1998). Finite-difference modelling of electromagnetic wave propagation in dispersive and attenuating media. *Geophysics* 63, 856–867.
- Berenger, J.P. (1994). A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. *Journal of Computational Physics*. 114, 185–200.
- Bristow, C.S., Chroston, P.N. and Bailey, S.D. (2000). The structure and development of foredunes on a locally prograding coast: Insights from ground penetrating radar surveys, Norfolk, England. *Sedimentology*, Vol. 47, pp. 923–944.

- Bourgeois, J.M. & Smith, G.S. (1996). A fully three-dimensional simulation of a ground-penetrating radar: FDTD theory compared with experiment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 34, 36–44.
- Cassidy, N. (2001). *The application of mathematical modelling in the interpretation of ground penetrating radar data*. PhD thesis, Keele University.
- Cassidy, N. J. (2007). A review of practical numerical modelling methods for the advanced interpretation of ground-penetrating radar in near-surface environments. *Near Surface Geophysics.*, vol. 5, pp. 5–22, 2007.
- Cassidy, N.J. (2008). Electrical and Magnetic Properties of Rocks, Soil and Fluids. H.M. Jol, (Ed), *Ground Penetrating Radar: Theory and Application* (41-67). Elsevier. Part 1, 4-38.
- Chen, Y.H. & Chew, W.C. (1997). Application of perfectly matched layers to the transient modeling of subsurface EM problems. *Geophysics* 62, 1730–1736.
- Chew, W.C. & Weedon, W.H. (1994). A 3-D perfectly matched medium from modified Maxwell's equations with stretched coordinates. *IEEE Microwave and Optical Technology Letters* 7, 599–604.
- Conyers, L. B., & Goodman, D. (1997). Ground-penetrating radar, an introduction for archaeologists. Altimira, press, 232 pp.
- Daniels, D.J. (1996). *Surface Penetrating Radar, Radar, Sonar, Navigation and Avionics Series 6*, The Institute of Electrical Engineers, London, UK.
- Daniels, David J. (2004). *Ground Penetrating Radar (2nd Ed.)*. Institution of Engineering and Technology. London, UK.

- Drahor, M.G, Göktürkler, G, Berge, M.A & Kurtulmus, TÖ. (2005). Large-scale geophysical studies at the some Roman legionary military sites in Turkey. *Proceedings, 6th International Conference on Archaeological Prospection*, September, Rome; 341–345.
- Drahor, M.G. (2007). Arkeolojik Alan İncelemelerinde Yer Radarı Prospeksiyonu. *Arkeoloji ve Sanat*, 125, 107-138.
- Drahor, M.G. (2006). Integrated geophysical studies in the upper part of Sardis archaeological site, Turkey. *Journal of Applied Geophysics* 59: 205–223.
- Duke, S. (1990). *Calibration of ground-penetrating radar and calculation of attenuation and dielectric permittivity versus depth*: M.S. thesis, Colorado School of Mines, T-3920.
- Engheta, N., Papas, C.H. & Elachi, C. (1982). Radiation patterns of interfacial dipole antennas. *Radio Science*, Vol. 17, pp. 1557–1566.
- Fang, J. & Wu, Z. (1996). Generalized perfectly matched layer for the absorption of propagating and evanescent waves in lossless and lossy media. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 44, 2216–2222.
- Gedney, S. (1998). The perfectly matched layer absorbing medium. In: Taflove, A. (Ed.), *Advances in Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*. Artech House, Norwood, MA, pp. 263–343.
- Georgakopoulos, S.V., Birtcher, C.R., Balanis, C.A. & Renaut, R.A. (2002). Higher-order finite-difference schemes for electromagnetic radiation, scattering, and penetration, Part 1: theory. *IEEE Antennas and Propagation Magazine* 44, 134–142.

- Giannopoulous, A. ,(2005). Modelling ground penetrating radar by GprMax. *Construction and Building Materials* 19, 775–762.
- Goodman, D., & Nishimura, Y. (1992). 2-D synthetic radargrams for archaeological investigation: Finland Geol. Sur. *4th International Conference on Ground-Penetration Radar, special paper 16*, 339-343.
- Goodman, D.J. (1994). Ground-penetrating radar simulation in engineering and archaeology. *Geophysics* 59, 224–232.
- Green, A., Gross, R., Holliger, K., Horstmeyer, H. & Baldwin, J. (2003). Results of 3-D georadar surveying and trenching the San Andreas fault near its northern landward limit. *Tectonophysics*. 368, 7-23.
- Gürel, L. and Oğuz, U. (2000). Three-dimensional FDTD modeling of a ground-penetrating radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 38, 1513–1521.
- Gürel, L. ve Oğuz, U. (2001). Modeling of ground-penetrating-radar antennas with shields and simulated absorbers. *IEEE Trans. Antennas Propagation.*, vol. 49, no. 11, pp. 1560-1567.
- Huang, Z., Demarest, K.R. & Plumb, G. (1999). An FDTD/MOM hybrid technique for modeling complex antennas in the presence of heterogeneous grounds. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 37, 2692–2699.
- Holliger, K., Bergman, T. (2002). Numerical modeling of borehole georadar data. *Geophysics* 67, 1249–1257.
- Huisman, J.A., Hubbard, S.S., Redman, J.D. and Annan, A.P. (2003). Measuring soil water content with ground penetrating radar: *A review. Vadose Zone Journal*, Vol. 2, pp. 476–491.

- Irving, J. & Knight, R. (2006). Numerical modelling of ground-penetrating radar in 2D using MATLAB, *Computer and Geosciences*, 35, 1247-1258.
- Jackson, J. D. (1977). *Classical electrodynamics*: John Wiley & Sons, Inc.
- King, R.W.P. & Smith, G.S. (1981). *Antennas in Matter*, MIY Press, Cambridge, MA, USA.
- Klein, K.A. & Santamarina, J.C. (2003). Electrical conductivity of soils: Underlying phenomena. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, Vol. 8, No. 4, pp. 263–273.
- Kurtulmuş, T. Ö. (2007). *Sığ Jeofizik Aramacılıkta Yer Radarı Modellemesi*. Yüksek lisans tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kuzuoglu, M. & Mittra, R. (1996). Frequency dependence of the constitutive parameters of causal perfectly matched anisotropic absorbers. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters* 6, 447–449.
- Lucius, J.E., Olhoeft, G.R., Hill, P.L. and Duke, S.K. (1992). *Properties and hazards of 108 selected substances -1992 Edition*, U.S. Geological Survey Open-File Report 92-527.
- Luebbers, R.J. & Hunsberger, F. (1992). FDTD for Nth-order dispersive media. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 40, 1297–1301.
- Moghaddam, M., Yannakakis, E.Y. & Chew, W.C. (1991). Modeling of subsurface interface radar. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications* 5, 17–39.

- Martel, C., Philippakis, M., Daniels, D.J. & Underhill, M. (2001). *Modelling the performance of realistic ultra-wide band ground penetrating radar (GPR) antennas*. IET Conference Publications, 2, 655-659.
- Nishioka, Y., Maeshima, O., Uno, T. & Adachi, S. (1999). FDTD analysis of resistor-loaded antenna covered with ferrite-coated conducting cavity for subsurface radar. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 47, 970–977.
- Olhoeft, G. R. (1981). *Electrical properties of rocks*, in *Physical Properties of Rocks and Minerals*, in Touloukian, Y. S., Judd, W. R., and Roy, R. F., eds.: New York, McGraw-Hill, p. 257-330.
- Olhoeft, G.R. (2001). *GRORADAR™, acquisition, processing, modeling and display of dispersive ground penetrating radar data*, version 2001.01.
- Rappaport, C., & Weedon, W. (1996). Efficient Modeling of Electromagnetic Characteristics of Soil for FDTD Ground Penetrating Radar Simulation, *1996 Antennas and Propagation Society/URSI Symposium Digest*, pp. 620-623.
- Rashed, M., Kawamura, D., Nemoto, H., Miyata, T. & Nakagawa, K. (2003). Ground penetrating radar investigations across the Uemachi fault, Osaka, Japan. *Journal of Applied Geophysics*. 53, 63-75.
- Roberts, R.L. & Daniels, J.J. (1997). Modelling near-field GPR in three dimensions using the FDTD method. *Geophysics* 62, 1114–1126.
- Roden, J. & Gedney, S. (2000). Convolution PML (CPML): an efficient FDTD implementation of the CFS-PML for arbitrary media. *IEEE Microwave and Optical Technology Letters* 27, 334–339.
- Skolnik, M.I. (1990). *Radar Handbook*. McGraw-Hill Book Co.

- Smith, G.S. (1984). Directive properties of antennas for transmission into a material half-space. *IEEE Trans. Antennas propagate, Vol. AP-32*, pp. 232–246.
- Taflove, A. (1995). *Computational Electrodynamics: The Finite- Difference Time-Domain Method*. Artech House, Norwood, MA, 599pp.
- Taflove, A. & Hagness, S.C. (2005). *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method, 3rd ed.* Norwood, MA: Artech House.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics*. Cambridge Univ. Press.
- Teixeira, F.L., Chew, W.C., Straka, M., Oristaglio, M.L. & Wang, T. (1998). Finite-difference time-domain simulation of groundpenetrating radar on dispersive, inhomogeneous, and conductive soils. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 36, 1928–1936.
- Turner, G. & Siggins, A.F. (1994) Constant Q attenuation of subsurface radar pulses. *Geophysics, Vol. 59, No. 8*, pp. 1192–1200.
- Twiss, R.J. & Moores, E.M. (1992). *Structural Geology*. Freeman, New York.
- von Hippel, A.R. (1954). *Dielectric Materials and Applications*, John Wiley and Sons, New York, 438 p.
- Wang, T. & Tripp, A.C. (1996). FDTD simulation of EM wave propagation in 3-D media. *Geophysics* 61, 110–120.
- Xu, T. & McMechan, G.A. (1997). GPR attenuation and its numerical simulation in 2.5 dimensions. *Geophysics* 62, 403–414.

Yee, K., (1966). Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation AP-14*, 302–307.

Yee, K.S. & Chen, J.S. 1997. The finite-difference time-domain (FDTD) and the finite-volume time-domain (FVTD) methods in solving Maxwell's equations. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation 45*, 354–363.