

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

DOKTORA TEZİ

**YER RADARI YÖNTEMİ İLE GELİŞMİŞ ÜÇ BOYUTLU
DNAPL MODELLEME**

KEREM ÖZKAP

KOCAELİ 2019

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

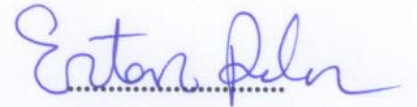
JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

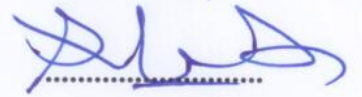
DOKTORA TEZİ

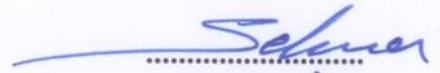
YER RADARI YÖNTEMİ İLE GELİŞMİŞ ÜÇ BOYUTLU
DNAPL MODELLEME

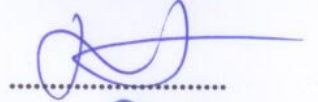
KEREM ÖZKAP

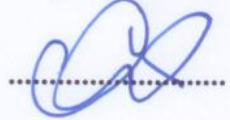
Dr. Öğr. Üyesi Ertan PEKŞEN
Danışman, Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Şerif BARIŞ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Selma KADIOĞLU
Jüri Üyesi, Ankara Üniversitesi
Doç. Dr. Nihat Hakan AKYOL
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Günay BEYHAN
Jüri Üyesi, Sakarya Üniversitesi











Tezin Savunulduğu Tarih: 12.07.2019

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Yer radarı yöntemi, yeraltı yapısını ve gömülü nesnelere derinlik ve pozisyonlarını yüzeyden yapılan ölçümlerle belirlemeye yarayan son derece etkili bir jeofizik yöntemdir. Bu tez çalışması, yeraltı su sistemlerini kirleten kimyasalların laboratuvar ortamında yapılan analizlerine yer radarı yöntemi ile katkı sunmayı hedeflemektedir. Bunun yanı sıra her koşulda kurulamayacak olan laboratuvar setlerine alternatif olarak sayısal modelleme önerileri sunulmaktadır. Bu çalışma içerisinde önerilen sayısal modelleme uygulamalarının farklı problemlere ilişkin çözümler için de araştırmacılara katkı sağlaması hedeflenmektedir.

Bu tez çalışmasının bir kısmı, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı (BİDEB) 2214/A-Yurt Dışı Sırası Araştırma Burs Programı Desteği ile İskoçya'nın Edinburgh Üniversitesi'nde gerçekleştirilmiştir. Katkılarından dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Bu çalışma süresince sayısal hesaplamaların bir kısmı TÜBİTAK ULAKBİM, Yüksek Başarım ve Grid Hesaplama Merkezi'nde (TRUBA kaynaklarında) gerçekleştirilmiştir. Katkılarından dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Tez çalışmamın her aşamasında göstermiş olduğu destek, yakın ilgi ve yüksek motivasyon ile çalışmamı doğrudan katkılarını sunan değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Ertan PEKŞEN'e sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Tez izleme komitesinde yer alarak çalışmamın olgunlaşmasında çok büyük payı olan, görüş ve önerileri ile beni yönlendiren değerli hocalarım Prof. Dr. Selma KADIOĞLU'na ve Doç. Dr. Nihat Hakan AKYOL'a teşekkür ederim.

Öğrencilik hayatım boyunca her zaman desteğini gördüğüm değerli hocam Prof. Dr. Şerif BARIŞ'a teşekkür ederim.

Tüm akademik hayatımda yol göstericiliği ile bana yardımcı olan değerli hocam Prof. Dr. Bülent ORUÇ'a teşekkür ederim.

Üniversite hayatımın ilk gününden bu yana bana her türlü desteğini vermiş, bu tez çalışmada da büyük katkısı olan değerli hocam ve ağabeyim Dr. Deniz ÇAKA'ya teşekkür ederim.

Kıymetli dostum ve meslektaşım Dr. İsmail KAPLANVURAL'a tüm desteği için sonsuz teşekkür ederim.

Karşılıksız yardımseverliği, mesleki bilgi birimi ve manevi desteğiyle hayatımda önemli bir rol model olan değerli hocam Yük. Müh. Ercan ERKUL'a gönülden teşekkürü bir borç bilirim.

Edinburgh Üniversitesi'nden bulunduğum bir yıl boyunca gerek akademik olarak katkıları gerek yönlendirmeleri gerekse de misafirperverliği için değerli hocam Dr. Antonis GIANNAPOULOS'a, her sorumu sabırla yanıtlayan ve bilgi birikimini benimle paylaşan Dr. Craig WARREN ve Dr. Iraklis GIANNAKIS'e teşekkür ederim.

Tez çalışmasında kullanmış olduğum laboratuvar verilerini benimle paylaşan ve çalışmalarımda kullanmama izin veren Roma Sapienza Üniversitesi'nden Prof. Dr. Luciana ORLANDO ve Dr. Lucia PALLADINI'ye katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Yurtdışı çalışmalarım sırasında tanışma fırsatı bulduğum değerli akademisyen arkadaşlarım Ahmet UÇAR, Anıl YEŞİLKAYA, Dr. Muhammed ÜÇÜNCÜ, Sinan ŞENTÜRK ve Dr. Tezcan ÇOĞALAN'a gönülden teşekkür ederim.

Sabancı Üniversitesi'nde çalıştığım dönemde doktora çalışmasına başlama fırsatını bana sunan değerli direktörlerimiz Asuman AKYÜZ ve Deniz BALTACI'ya göstermiş oldukları anlayış için teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca göstermiş oldukları destek için kıymetli arkadaşlarım Cem ÖZEL, Mine AKKURT, Melih YAYLI ve Bahadır BARUT'a teşekkür ederim.

Ve son olarak tüm yaşantım boyunca sonsuz sevgi ve desteklerini yürekten hissettiğim başta annem Nevin ÖZKAP ve babam Turhan ÖZKAP olmak üzere tüm aileme yürekten teşekkür ederim.

Haziran - 2019

Kerem ÖZKAP

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
TABLolar DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
GİRİŞ	1
1. YER RADARI YÖNTEMİNİN TARİHÇESİ VE LİTERATÜRDEKİ YERİ	5
1.1. Yöntemin Tarihçesi	5
1.2. Literatürdeki Yeri	6
2. YER RADARI YÖNTEMİ VE ELEKTROMANYETİK DALGA YAYILIMI	12
2.1. Yer Radarı (GPR) Yönteminin Tanımı	12
2.2. Yer Radarı Yönteminin Teorisi	15
2.2.1. Elektromanyetik dalganın hızı, yansıma özellikleri ve sönümlenmesi	15
2.2.2. Düşey ve yanal ayrımlılık	19
2.2.3. Anten açılımları	20
3. MAXWELL DENKLEMLERİ VE ZAMAN ORTAMINDA SONLU FARKLAR YÖNTEMİ	24
3.1. Maxwell Denklemleri	24
3.2. Zaman Ortamında Sonlu Farklar (FDTD) Yöntemi	27
3.2.1. Notasyon ve 3B Maxwell Denklemleri İçin Sonlu Farklar Uyarlaması	28
3.2.2. Kararlılık koşulu ve sayısal dispersiyon	30
3.2.3. Sınır koşulları	32
4. TOPRAĞIN DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİ	33
4.1. Toprak için Dielektriksel Geçirgenlik Modelleri	33
4.1.1. Topp modeli	34
4.1.2. CRIM modeli	34
4.1.3. Dobson (Peplinski) modeli	35
4.2. Toprak için Elektriksel İletkenlik Modelleri	38
4.2.1. Archie yasası	39
4.2.2. Waxman-Smits modeli	39
5. GPRMAX İLE 3B SAYISAL MODELLEME	40
5.1. gprMax Genel Tanımlamalar	40
5.2. Ticari Anten Modelleri	44
5.3. Gömülü Yapı ve Nesneleri 3B Model Geometrisi İçerisinde Tanımlama	50
5.3.1. Basit geometrik objelerle gömülü nesne oluşturma	50
5.3.2. Resimden (PNG) gömülü nesne geometrisi elde etme	51

5.3.3. Önceden tanımlanmış gömülü nesne geometrisinin sayısal modele çağırılması	53
6. KONTROLLÜ DENEY SETLERİ İÇERİSİNDE DNAPL YAYILIMININ 3B SAYISAL MODELLEME İLE İNCELENMESİ	56
6.1. Model 1	57
6.1.1. Fiziksel parametre değişimlerinin 3B sayısal modellemeye etkileri	58
6.2. Model 2	74
6.2.1. Modellemede kullanılan fiziksel parametrelerin hesaplanması.....	77
6.2.2. DNAPL yayılım senaryosu.....	80
6.3. Model 3	85
6.3.1. Laboratuvar testleri	85
6.3.2. Seçilen testler için 2B ve 3B sayısal modelleme	89
6.3.3. Sentetik sonuçlar ile gerçek sonuçların karşılaştırılması	96
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	99
KAYNAKLAR	104
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	111
ÖZGEÇMİŞ	112

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	WoS veritabanı sayfasında gelişmiş tarama kutucuğu ve seçilen tarama kriterleri	8
Şekil 1.2.	1980-2019 aralığında yer radarı konusunda yapılmış bilimsel makalelerin üretim yıllarına göre dağılımı	8
Şekil 1.3.	Yer radarı yöntemi kullanılarak en çok bilimsel makaleye katkı vermiş ülkelerin dağılımı	11
Şekil 2.1.	Yer radarı yönteminin çalışma prensibi.....	12
Şekil 2.2.	Yer radarı sistemleri	14
Şekil 2.3.	Yer radarı kayıtları a) iz örneği (A-tarama), b) profil vektörel gösterim (B-tarama) ve c) profil resim gösterim (B-tarama).....	15
Şekil 2.4.	Elektromanyetik dalganın boşlukta yayılımı	16
Şekil 2.5.	Ayrımlılık a) düşey yönde, b) yatay yönde.....	20
Şekil 2.6.	Yer radarı ölçümlerinden kullanılan anten açımları a) sabit açılım, b) ortak derinlik noktası, c) geniş açılı kırılma ve yansıma tekniği.....	22
Şekil 2.7.	Yer radarı antenin kullanım pozisyonu a) zemine temaslı, b) zemine temassız	23
Şekil 3.1.	Yee hücresinin 3B gösterimi.....	28
Şekil 3.2.	Soğurucu Sınır Koşulları (SSK) ile sınırlandırılmış ve hücrelere ayrılmış hesaplama alanı	32
Şekil 4.1.	400 MHz anten frekansın için hesaplanmış su içeriği-göreceli dielektriksel geçirgenlik grafiği	37
Şekil 4.2.	2 GHz anten frekansın için hesaplanmış su içeriği-göreceli dielektriksel geçirgenlik grafiği	38
Şekil 5.1.	gprMax ile modelleme için izlenen işlem adımları.....	41
Şekil 5.2.	gprMax giriş dosyası örneği.....	42
Şekil 5.3.	Gaussiandot dalga formu örneği, a) zaman ortamında gösterimi, b) güç spektrumu.....	43
Şekil 5.4.	Şekil 5.2’de verilen gprMax giriş dosyası ile elde edilen model geometrisinin görselleştirilmesi.....	43
Şekil 5.5.	Şekil 5.2’de verilen gprMax giriş dosyası koşturularak elde edilen sentetik radargram.....	44
Şekil 5.6.	Muhafazası açılmış yer radarı antenleri a) GSSI firmasına ait 1,5 GHz, b) MALA firmasına ait 1,2 GHz merkez frekanslı GPR anteni	45
Şekil 5.7.	Ticari anten modelleri a) GSSI firmasına ait 1,5 GHz, b) MALA firmasına ait 1,2 GHz merkez frekanslı GPR anteni.....	47
Şekil 5.8.	Şekil 5.2’de verilen gprMax giriş dosyası ile elde edilen model ile ticari antenlerin konumu; a) GSSI 1,5 GHz anten modeli, b) MALA 1,2 GHz anten modeli.....	48
Şekil 5.9.	3B silindir modeli için a) GSSI 1,5 GHz, b) MALA 1,2 GHz anten ile elde edilen sentetik radargramlar.....	49
Şekil 5.10.	GSSI firmasına ait 400 MHz ticari anten modeli.....	50

Şekil 5.11. Basit geometrik şekillerin model geometrisi içerisinde gösterimi	51
Şekil 5.12. PNG formatında kaydedilmiş 2B çark modeli	52
Şekil 5.13. PNG'den elde edilen çark modelinin üç boyutlu sayısal model içerisindeki gösterimi	52
Şekil 5.14. Bir ineğe ait femur kemiği	53
Şekil 5.15. Artec Space Spider marka 3B tarayıcı ile tarama işlemi	54
Şekil 5.16. 3B tarayıcı ile taranmış femur kemiği geometrisi	54
Şekil 5.17. 3B tarayıcı ile taranmış femur kemiğinin sayısal model içerisinde gösterimi	55
Şekil 6.1. Model-1: 3B sayısal model geometrisi içerisinde temsili DNAPL kütlesi ve sayısal olarak modellenmiş GSSI 1,5 GHz anten modelinin konumu	57
Şekil 6.2. Paraview ile görselleştirilmiş model geometrisi Model-1	58
Şekil 6.3. Model-1, ortama ait göreceli dielektrik değerinin artırılması ile elde edilen sentetik radargramlar a) $\epsilon_0=15$, b) $\epsilon_0=21$ ve c) $\epsilon_0=27$	61
Şekil 6.4. Model-1, ortama ait göreceli dielektrik değerinin artırılması ile ilk 5 ns için elde edilen anlık görüntüler a) $\epsilon_0=15$, b) $\epsilon_0=21$ ve c) $\epsilon_0=27$	62
Şekil 6.5. Model-1, 25 numaralı atışa ait, ortam için göreceli dielektriksel geçirgenlik değerleri değişimi üzerinden elde edilen izlerin karşılaştırması a) $\epsilon_0=15$, b) $\epsilon_0=21$ ve c) $\epsilon_0=27$	63
Şekil 6.6. Model-1, ortama ait elektriksel iletkenlik değerlerinin artırılması ile elde edilen sentetik radargramlar a) $\sigma_0=0,00001$, b) $\sigma_0=0,1$, c) ve $\sigma_0=1$	64
Şekil 6.7. Model-1, 25 numaralı atışa ait, ortam için elektriksel iletkenlik değerleri değişimi üzerinden elde edilen izlerin karşılaştırması a) $\sigma_0=0,00001$, b) $\sigma_0=0,1$, c) ve $\sigma_0=1$	65
Şekil 6.8. Model-1, DNAPL kütlesine ait göreceli dielektrik değerlerinin artırılması ile elde edilen sentetik radargramlar a) Trikloroetilen, b) Tetrakloroetilen, c) Trikloretan ve d) Dikloretan.....	67
Şekil 6.9. Model-1, 25 numaralı atışa ait farklı DNAPL türleri için göreceli dielektriksel geçirgenlik değerleri değişimi üzerinden elde edilen izlerin karşılaştırması	68
Şekil 6.10. Model-1, DNAPL kütlesine ait elektriksel iletkenlik değerlerin artırılması ile elde edilen sentetik radargramlar a) 0, b) 0,1, c) 1 ve d) 10.....	70
Şekil 6.11. Model-1, 25 numaralı atışa ait farklı DNAPL türleri için elektriksel iletkenlik değeri değişimi üzerinden elde edilen izlerin karşılaştırması a) $\sigma_d=0$, b) $\sigma_d=0,1$, c) $\sigma_d=1$ ve c) $\sigma_d=10$	71
Şekil 6.12. Model-1, DNAPL kütlesine ait göreceli manyetik geçirgenlik değerinin artırılması ile elde edilen sentetik radargramlar a) 1, b) 2, c) 10 ve d) 30.....	73
Şekil 6.13. Model-1, 25 numaralı atışa ait DNAPL kütlesi için göreceli manyetik geçirgenlik değeri değişimi üzerinden elde edilen izlerin karşılaştırması a) $\mu_d=1$, b) $\mu_d=2$, c) $\mu_d=10$ ve c) $\mu_d=30$	74
Şekil 6.14. a) DNAPL enjeksiyonu yapılmış, kontrollü bir akifer modeli hücresi senaryosu, (b) gprMax ile sayısal model içerisine yerleştirilmiş DNAPL kütlesi.....	75

Şekil 6.15. Paraview ile görselleştirilmiş model geometrisi ve tabaların konumu Model-2	76
Şekil 6.16. Farklı suya doygunluk değerleri için a) CRIM modeli ile hesaplanmış göreceli dielektriksel geçirgenlik b) Archie kanunu ile hesaplanmış elektriksel iletkenlik değerleri değişimi.....	78
Şekil 6.17. DNAPL zonunda farklı suya doygunluk değerleri için hesaplanmış göreceli dielektriksel geçirgenlik değeri değişimi.....	79
Şekil 6.18. Model-2, Zamana bağlı olarak değişen DNAPL geometrisi ve suya doygunluk oranları; a) DNAPL enjeksiyonu öncesi b) 1 gün sonunda suya doygunluk %90, c) 8 gün sonunda suya doygunluk %70, d) 11 gün sonunda suya doygunluk %50.....	80
Şekil 6.19. Model-2 içerisinde a) DNAPL enjeksiyonu öncesi, b) 1 gün sonrası, c) 8 gün sonrası ve d) 11 gün sonrası.....	81
Şekil 6.20. Model-2, Zamana bağlı olarak değişen DNAPL geometrisi ve suya doygunluk oranları için elde edilen sentetik radargramlar; a) 1 gün sonunda %90, b) 8 gün sonunda %70 ve c) 11 gün sonunda %50 suya doygunluk.....	82
Şekil 6.21. Direkt gelen dalga atıldıktan, kazanç uygulandıktan sonra normalize edilmiş sentetik radargramlar a) 1 gün %90, b) 8 gün %70, c) 11 gün %50	84
Şekil 6.22. Kontrollü deney seti geometrisi	85
Şekil 6.23. Kontrollü deney seti içerisinde tabakaların pozisyonu.....	86
Şekil 6.24. GPR ölçümlerinde kullanılan a) anten görüntüsü, b) alıcı-verici kullanım opsiyonları	87
Şekil 6.25. Deney setlerine ait fotoğraflar a) Lab 1, b) Lab 2, c) Lab 3	88
Şekil 6.26. Deney seti ölçümlerinden elde edilen radargramlar a) Lab 1, b) Lab 2, c) Lab 3	88
Şekil 6.27. Paraview ile görselleştirilmiş model geometrisi ve tabaların konumu Model-3	90
Şekil 6.28. 2B için Model-3 içerisinde a) Lab 1, b) Lab 2 ve c) Lab 3 testi	91
Şekil 6.29. 3B için Model-3 içerisinde a) Lab 1, b) Lab 2 ve c) Lab 3 testi	92
Şekil 6.30. Ortama ait farklı suya doygunluk değerleri için CRIM modeli ile hesaplanmış göreceli dielektriksel geçirgenlik değerleri.....	93
Şekil 6.31. Ortama ait farklı suya doygunluk değerleri için Dobson (Peplinski) modeli ile hesaplanmış göreceli dielektriksel geçirgenlik değerleri	94
Şekil 6.32. HFE-7100 zonunda su doygunluğu artışı ile hesaplanmış göreceli dielektriksel geçirgenlik değeri değişimi.....	95
Şekil 6.33. Lab 1, Lab 2, Lab 3 testleri için normalize edilmiş a-c) gerçek yer radarı ölçümleri, d-f) 2B model için CRIM modeli ile hesaplanan sentetik radargramlar, g-i) 3B model için CRIM modeli ile hesaplanan sentetik radargramlar.....	97
Şekil 6.34. Lab 1, Lab 2, Lab 3 testleri için normalize edilmiş a-c) gerçek yer radarı ölçümleri, d-f) 2B model için Dobson (Peplinski) modeli ile hesaplanan sentetik radargramlar, g-i) 3B model için Dobson (Peplinski) modeli ile hesaplanan sentetik radargramlar.....	98

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Yer radarı konusunda yapılan çalışmaların yer aldığı WoS kategorileri (1980 – 2019)	9
Tablo 1.2. Yer radarı konusunda yapılan çalışmaların en fazla yayınlandığı akademik dergiler ve etki faktörleri (1980 – 2019).....	10
Tablo 2.1. Yer radarı yönteminin kullanım alanlarına örnekler	13
Tablo 2.2. Çeşitli malzemeler için göreceli dielektriksel geçirgenlik değerleri	18
Tablo 2.3. Bazı malzemeler için elektriksel iletkenlik ve sönümlenme değerleri	19
Tablo 3.1. (3.1)-(3.4) eşitliklerinde kullanılan parametreler	25
Tablo 3.2. (3.5)-(3.7) eşitliklerinde kullanılan parametreler	26
Tablo 5.1. Anten modellemesinde kullanılan bazı malzemelerin göreceli dielektriksel geçirgenlik ve elektriksel iletkenlik değerleri	46
Tablo 6.1. Model-1 için 3B sayısal modelde kullanılan parametreler	58
Tablo 6.2. DNAPL türü olarak bilinen bazı kimyasallar ve özellikleri, 15°C için	59
Tablo 6.3. Model-1 seti kullanılarak hazırlanmış Test1 çalışmasına ait parametreler	60
Tablo 6.4. Model-1 seti kullanılarak hazırlanmış Test 2 çalışmasına ait parametreler	63
Tablo 6.5. Model-1 seti kullanılarak hazırlanmış Test 3 çalışmasına ait parametreler	66
Tablo 6.6. Model-1 seti kullanılarak hazırlanmış Test 4 çalışmasına ait parametreler	69
Tablo 6.7. Model-1 seti kullanılarak hazırlanmış Test 5 çalışmasına ait parametreler	72
Tablo 6.8. Model-2 için 3B sayısal modellemede kullanılan parametreler.....	76
Tablo 6.9. Farklı suya doygunluk değerleri için hesaplanan göreceli dielektriksel geçirgenlik ve elektriksel iletkenlik değerleri.....	78
Tablo 6.10. Farklı suya doygunluk değerleri için DNAPL (TCE) kütlesinin alacağı göreceli dielektriksel geçirgenlik ve elektriksel iletkenlik değerleri.....	79
Tablo 6.11. HFE-7100 ve TCE'ye ait özelliklerin karşılaştırılması	86
Tablo 6.12. GPR ölçümlerinin yapıldığı testlere ait zaman ve ortam koşul özellikleri	87
Tablo 6.13. Model-3 için 3B sayısal modellemede kullanılan parametreler	90
Tablo 6.14. Farklı suya doygunluk değerleri için DNAPL (HFE-7100) kütlesinin alacağı göreceli dielektriksel geçirgenlik ve elektriksel iletkenlik değerleri.....	95

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

B	: Manyetik akı yoğunluğu, (W/m ²)
c	: Işığın boşlukta yayılma hızı, ($\approx 3 \times 10^8$ m/s)
D	: Yer değiştirme akımları, (C/m ²)
E	: Elektrik alan şiddeti, (V/m)
f	: Frekans, (Hz)
f _m	: Merkez frekans, (Hz)
H	: Manyetik alan şiddeti, (A/m)
h	: Yükseklik, (m)
J	: Elektrik akım yoğunluğu, (A/m ²)
M	: Eş değer manyetik akım yoğunluğu, (V/m ²)
P	: Kayıp faktörü
R	: Yansımaya katsayısı
R _{Rx}	: Alıcı papyondaki direnç
R _{Tx}	: Verici papyondaki direnç
R _x	: Alıcı anten
S _n	: NAPL doygunluğu
S _w	: Su doygunluğu
T	: İletim katsayısı
T _x	: Verici anten
t	: Zaman, (ns)
V	: Elektromanyetik dalga hızı, (m/ns)
α	: Sönümlenme, (dB/m)
ϵ	: Dielektriksel geçirgenlik katsayısı, (F/m)
ϵ_0	: Boşluğun dielektriksel geçirgenliği, ($8,854 \times 10^{-12}$ F/m)
ϵ_d	: DNAPL'a ait göreceli dielektriksel geçirgenlik
ϵ_e	: Karışımın efektif göreceli dielektriksel geçirgenliği
ϵ_o	: Ortama ait göreceli dielektriksel geçirgenlik
ϵ_r	: Göreceli dielektriksel geçirgenlik
ϕ	: Gözeneklilik
λ	: Elektromanyetik dalga boyu, (m)
μ	: Manyetik geçirgenlik katsayısı, (H/m)
μ_0	: Boşluğun manyetik geçirgenliği, ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m)
μ_d	: DNAPL'a ait göreceli manyetik geçirgenlik
μ_o	: Ortama ait göreceli manyetik geçirgenlik
μ_r	: Göreceli manyetik geçirgenlik
∇	: Nabla operatörü
θ	: Su içeriği
ρ	: Hacim başına düşen birim yük yoğunluğu, (C/m ³)
ρ_b	: Bulk yoğunluğu, (g/cm ³)
ρ_s	: Kumun tanecik yoğunluğu, (g/cm ³)
σ	: Elektriksel iletkenlik, (S/m)

σ_d : DNAPL'a ait elektriksel iletkenlik, (S/m)
 σ_o : Ortama ait elektriksel iletkenlik, (S/m)

Kısaltmalar

2B : İki Boyut
3B : Üç Boyut
CFL : Courant– Friedrichs–Lewy Koşulu
CMP : Common Midpoint (Ortak Derinlik Noktası)
CO : Common Offset (Sabit Açılım)
CPU : Central Processor Unit (Merkezi İşlem Birimi)
CRIM : Complex Refractive Index Model
DNAPL : Dense Non-Aqueous Phase Liquids (Yoğun Suyula Karışmayan Faz Sıvıları)
ERT : Elektrik Rezistivite Tomografi
FDTD : Finite Difference in Time Domain (Zaman Ortamında Sonlu Farklar)
GHz : Gigahertz
GPR : Ground-Penetrating Radar (Yer Radarı)
GPS : Global Positioning System (Küresel Konum Belirleme Sistemi)
GPU : Graphics Processing Unit (Grafik İşlemci Ünitesi)
GSSI : Geophysical Survey Systems, Inc.
HDF : Hierarchical Data Format (Hiyerarşik Veri Düzeni)
HFE : Hidrofloroeter
LNAPL : Light Non-Aqueous Phase Liquids (Yoğunluğu Düşük Suyula Karışmayan Faz Sıvıları)
MHz : Megahertz
NAPL : Non-Aqueous Phase Liquids (Suyula Karışmayan Faz Sıvıları)
PCB : Printed Circuit Board (Baskılı Devre Kartı)
PCE : Tetrakloroetilen
PML : Perfectly Matched Layer (Mükemmel Uyumlu Tabaka)
PNG : Portable Network Graphics (Taşınabilir Ağ Grafiği)
SCI : Science Citation Index
SSK : Soğurucu Sınır Koşulları
TCE : Trikloroetilen
TS : Topic (Konu Başlığı)
UXO : Unexploded Ordnance (Patlamamış Mühimmat)
WARR : Wide Angle Reflection and Refraction (Geniş Açılı Yansıma ve Kırılma)
WoS : Web of Science
YÖK : Yüksek Öğretim Kurumu

YER RADARI YÖNTEMİ İLE GELİŞMİŞ ÜÇ BOYUTLU DNAPL MODELLEME

ÖZET

Bu tez çalışmasının amacı yeraltı su sistemlerini kirletici olarak doğrudan etkileyen suya karışmayan faz sıvıları (NAPL) olarak tanımlanan akışkanların yer radarı yöntemi için 3B sayısal modelleme çalışmaları ile incelenmesidir. Bu amaçla laboratuvar ortamında mini akifer sistemlerini temsil eden deney setleri yer radarı (GPR) yöntemine vereceği tepkiler incelenmek üzere sayısal olarak modellenmiştir. Elektromanyetik dalga yayılımı benzetimleri zaman ortamında sonlu farklar (FDTD) yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışmada NAPL türü olarak yoğun suyla karışmayan faz sıvıları (DNAPL) kullanılmıştır.

Çalışmada, yer radarı yöntemi için sayısal modelleme çalışmalarında aranan nesne veya gömülü yapının model geometrisi içerisine dahil edilmesi ile ilgili olarak üç adet yöntem sunulmaktadır. Bu yöntemlerden ilki; basit geometrik şekiller kullanarak hedef yapıların oluşturulması, ikinci yöntem resimden gömülü nesne geometrisi elde etme yöntemi ve son yöntem ise gömülü nesneye ait önceden elde edilmiş geometrinin sayısal model içerisine dahil edilmesidir. Bu çalışmada incelenmek istenen hedef madde akışkan yapıda kirleticilerden meydana geldiği için model geometrisi ikinci yöntem kullanılarak resimden model geometrileri elde edilmiştir. Bunun için laboratuvar ortamında deney esnasında çekilmiş fotoğraflar kullanılmıştır.

Ortama ait göreceli dielektriksel geçirgenlik değerlerinin hesaplanmasında Complex Refractive Index Model (CRIM) ve Dobson (Peplinski) modelleri kullanılmıştır. DNAPL bölgesinin göreceli dielektriksel geçirgenlik değerini hesaplamak için ise NAPL araştırmaları için düzenlenmiş özel bir CRIM modeli kullanılmıştır. Elde edilen sentetik sonuçlar gerçek yer radarı ölçüleri ile karşılaştırılmıştır. Bu tez çalışması göstermiştir ki; DNAPL türü kirleticilerin laboratuvar fotoğrafları kullanılarak sayısal modellemeye dahil edilmesi mümkün; ancak ortama ve kirletici bölgesine ait dielektriksel parametrelerin hesaplanması üzerinde hassasiyetle durulması gereken bir konudur.

Anahtar Kelimeler: DNAPL, Sayısal modelleme, Yer radarı, Zaman ortamında sonlu farklar.

ADVANCED THREE-DIMENSIONAL DNAPL MODELING WITH GROUND PENETRATING RADAR

ABSTRACT

The aim of this thesis is to examine the fluids defined as Non-Aqueous Phase Liquids (NAPL) which directly affect groundwater systems as a contaminant by 3D numerical modeling for Ground-Penetrating Radar (GPR). For this purpose, the experimental sets representing a mini aquifer system in the laboratory conditions were modeled numerically to investigate the response to the GPR. The simulations of electromagnetic wave propagation were performed by using the finite-difference time-domain (FDTD) method. In this study, Dense Non-Aqueous Phase Liquids (DNAPL) was used as NAPL type.

In this study, three methods are introduced to include the geometry of an object into the numerical model. The first method is to create target structures using simple geometric shapes, the second is to obtain the object geometry from a picture in PNG format, and the last method is to include the pre-obtained geometry of the embedded object into the numerical model. In this study, since the material to be investigated is fluid, the model geometry is obtained by using the second method. For this purpose, photographs taken during the experiment were used in the laboratory.

Complex Refractive Index Model (CRIM) and Dobson (Peplinski) models were used to calculate the relative dielectric permittivity of the surrounding medium. A special CRIM model was used in order to calculate the relative dielectric permittivity of the NAPL zone. Synthetic results were compared with real GPR results. This study suggests that; it is possible to create numerical models of DNAPL contaminants by using pictures; however, calculation of dielectric properties of the surrounding medium and contaminant zone is an issue that needs to be considered with precision.

Keywords: DNAPL, Numerical modeling, Ground penetrating radar, Finite difference time domain.

GİRİŞ

İnsanlık, tarih boyunca yeryüzü ile ilgili birçok soruya yanıt arayıp durmuştur. Kimi zaman güvenle üzerinden yaşadığı yeryüzünün hareket edişini anlamlandırmaya çalışmış, kimi zaman da ayaklarının altında gözle göremediği nasıl bir dünya olduğunu merak etmiştir. Günümüzde halen popülerliğini korumakta olan bir diğer konu ise; yüzeyden ölçüm yaparak yeraltını görüntüleyebilme fikridir. Bu fikri gerçekleştirmek adına günümüze kadar birçok jeofiziksel yöntem geliştirilmiş, bu yöntemler başarıyla uygulanmış ve halen de uygulanmaktadır. Yeraltını, yüzeyden yapılan ölçümler ile görüntülemeye yarayan yöntemlerden bir tanesi de bu tez çalışmasının temelini oluşturan yer radarı (Ground-penetrating radar) yöntemidir. Yer radarı (GPR) yöntemi, başarılı uygulama örnekleriyle geçerliliği kabul edilmiş bir jeofizik yöntemdir. Bu yöntem, yeraltı yapısını veya gömülü hedef nesnelere belirlemeye, konum ve derinliklerini elektromanyetik dalgalar aracılığıyla tespit etmeye yarayan, jeofiziğin tahribatsız yöntemlerinden biridir (Jol, 2009).

Yer radarı yöntemi önceleri doğal jeolojik yapıların incelenmesi amacıyla kullanılmış, ilerleyen yıllarla birlikte uygulama alanlarını diğer mühendislik problemlerini içine alacak şekilde genişletmiştir. Yer radarı yöntemi artık günümüzde başta jeofizik mühendisliği, jeoloji mühendisliği, inşaat mühendisliği ve arkeoloji olmak üzere birçok disipline ait problemin çözümüne katkı sunmaktadır.

Yöntemin popülerliği ve farklı disiplinlere ait sorunların çözümündeki başarısı, literatürde yer radarı konusunda yazılmış olan kaynakların sayısının da artmasına imkân vermiştir. Literatürde yer radarı konusunda yazılmış ya da bir bölümünde ayrıntılı olarak bu yöntemle yer verilmiş kitaplara örnek olarak; (Annan, 2003; Daniels, 2004; Annan, 2005; Blindow, 2006; Jol, 2009; Reynolds, 2011; Benedetto ve Pajewski, 2015; Conyers, 2017) gösterilebilir.

Bu tez çalışması yer altı su sistemlerini başlıca tehdit eden ve toprak kirliliğine de yol açan, suyla karışmayan sıvı faz (non-aqueous phase liquids- NAPL) türündeki organik kirleticilerin davranışlarının yer radarı yöntemi ile irdelenmesini ele

almaktadır. NAPL türü kirleticiler düşük çözünürlükleri, yüksek kirletici özellikleri ile uzun vadeli kirleticiler olarak tanımlanmaktadır. Bu organik kimyasallar yeraltı sularını sürekli kirleten konsantre bileşiklerdir. NAPL türü kirleticiler yoğunluklarına göre farklı isimler almaktadırlar. Örneğin, NAPL bileşeninin yoğunluğu sudan daha düşük ise LNAPL (yoğunluğu düşük suyla karışmayan sıvı faz), yoğunluğu sudan fazla ise DNAPL (yoğun suyla karışmayan sıvı faz) olarak ifade edilirler. Bu tez çalışmasında kirletici kimyasal türü olarak yoğunluğu sudan daha fazla olan DNAPL türü kirleticiler incelenmiştir. Bu kirleticiler, zehirli özellikleri ile insan sağlığını doğrudan etkileyen kanserojen nitelikli kirleticilerdir. Bu amaçla DNAPL türü kirletici gruplarını yer altında kontrol altında tutacak ve ıslahını gerçekleştirecek yöntemlerin geliştirilmesi yer altı su sistemlerinin korunması açısından kritik öneme sahiptir. Hidrojeolojik uygulamalar ıslah ve temizleme süreçlerini sahada gerçekleştirmek amacıyla yapılmaktadır; ancak bu süreçlerin yüzeyden tahribatsız olarak takip edilmesi jeofiziğin ilgilendiği bir araştırma konusudur.

Bu tez çalışması kontrollü deney setleri ile oluşturulan ve yer altı akifer sistemlerini temsil eden düzenekler içerisinde DNAPL yayılım davranışlarını yer radarı yöntemi için 3B sayısal modelleme çalışmaları ile irdelenmeyi ve deney setleri üzerinden toplanmış jeofiziksel veriler ile karşılaştırarak, veri yorumuna katkı sunmayı konu edinmiştir. Bu amaçla, yer radarı benzetimleri için zaman ortamında sonlu farklar (FDTD) yöntemi kullanılarak üç farklı Model seti oluşturulmuştur. Bu model setleri sırasıyla; Model-1, Model-2 ve Model-3 olarak isimlendirilmiştir.

Model-1 olarak isimlendirilen ilk sayısal çalışma, ortama ve kirleticiye ait fiziksel parametre değişimlerinin sentetik sonuçlar üzerindeki etkisini inceleme olanağı vermiştir. Model boyutları kontrollü bir deney setini temsil edecek nitelikte 0,75 x 0,15 x 0,23 m ebatlarında oluşturulmuştur. Model-1, suya doymun ortam ve bu ortam içerisine konumlandırılmış bir kirletici kütesinden oluşmaktadır. Öncelikli olarak ortama ait fiziksel parametreler; ortamın göreceli dielektriksel geçirgenlik değeri (ϵ_0) ve ortamın elektriksel iletkenlik (σ_0) değeri artırılarak meydana gelen değişimler incelenmiştir. İkinci aşamada ise, kirleticiye ait fiziksel parametreler yani DNAPL kütesinin göreceli dielektriksel geçirgenlik değeri (ϵ_d), elektriksel iletkenlik (σ_d) değeri ve son olarak göreceli manyetik geçirgenlik değeri (μ_d) kademeli olarak artırılarak sentetik sonuçlarda meydana gelen değişimler yorumlanmıştır. DNAPL

kütlesinin göreceli dielektriksel geçirgenlik değerini (ϵ_d) belirlerken doğada kirletici olarak sık karşılaşılan DNAPL türleri olan; Trikloroetilen (TCE), Tetrakloroetilen (PCE), Trikloretan ve Dikloroetan'a ait göreceli dielektrik değerleri kullanılmıştır. Bu model çalışmasında kaynak olarak, GSSI firmasının 1,5 GHz merkez frekansına sahip yüksek frekanslı yer radarı anten modeli kullanılmıştır.

Model-2 olarak adlandırılan sayısal çalışma ise laboratuvar ortamında hazırlanmış bir mini akifer sistemini sayısal benzetimler ile irdeleme amacıyla oluşturulmuştur. Bu amaçla Akyol ve Türkkan (2018) tarafından DNAPL yayılım davranışları ve temizlenme sürecini incelemek için hazırlanan deney seti, 3B modele uyarlanmış ve DNAPL yer değiştirmeleri senaryolaştırılarak 3B sayısal modellemeye dahil edilmiştir. Model-2 boyutları 0,70 x 0,15 x 0,40 m ebatlarında olacak şekilde tasarlanmıştır. Model ortamı, yüksek geçirimliliği temsil eden orta taneli kumdan meydana gelmiş suya doymuş tabaka (1. tabaka), düşük geçirimliliği temsil eden ince taneli kumdan meydana gelen kuru kum tabakası (2. tabaka) ve ortama enjekte edilen TCE türünde DNAPL'dan oluşmaktadır. Laboratuvar düzeneğinde, kuru kum tabakasının (2. tabaka) ortası, sudan daha yoğun olan TCE türü kirleticinin zamanla tabaka sınırına doğru birikmesi amacıyla çukur olarak tasarlanmıştır. Oluşturulan bu çukur kısımlara havuz (pool) adı verilmektedir. Bu ayrıntı, modellemede de göz önünde bulundurulmuş ve düşük geçirimli kuru kum tabakası (2. tabaka) çukur olarak modellenmiştir. Ortamdaki suya doymuluk değerinin değişimine bağlı olarak, ortam için göreceli dielektriksel geçirgenlik değerleri (ϵ_o) CRIM modeli ile hesaplanmıştır (Greaves ve diğ., 1996). TCE için göreceli dielektriksel geçirgenlik değerleri ise (ϵ_d) NAPL uygulamaları için yeniden revize edilen CRIM modeli ile hesaplanmıştır (Ajo-Franklin ve diğ., 2004). Ortama ve TCE'ye ait elektriksel iletkenlik değerleri ise Archie (1942) çalışması ile hesaplanmıştır. Ortamın ve TCE fazının farklı suya doymuluk değerleri için 4 aşamalı bir senaryo ile ayrıntılarıyla incelenmiştir. Model-2 çalışmasında 2 GHz merkez frekansına sahip teorik kaynak kullanılmıştır.

Model-3, bu tez çalışmasındaki son sayısal modeldir. Bu sayısal model, Model-2'de olduğu gibi yine laboratuvar ortamında kurulmuş ve mini bir akifer sistemini temsil eden bir düzenektir. Model-3'ü, Model-2'den ayıran özellik ise DNAPL yayılım davranışlarının gözlemsel incelemelerinin dışında, jeofiziksel ölçümler yapılarak

yayımlı davranışları tespit edilmeye çalışılmıştır. Kirletici enjeksiyonu öncesi ve sonrasında laboratuvar deney seti üzerinden periyodik olarak yer radarı verisi toplanmıştır. DNAPL bileşenini temsilen TCE türü kirletici yerine zehirli özelliği bulunmayan, %96 hidrofloroeter ve %4 metil kaprilat'tan oluşan HFE-7100 karışımı kullanılmıştır. Model-3 çalışmasında, farklı fiziksel koşulları temsil eden üç adet test ölçümü 3B sayısal modelleme ile incelenmiş ve sonuçlar gerçek yer radarı sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Model-3 çalışması içerisinde 3B sayısal modellemeye ek olarak 2B sayısal modeller de oluşturulmuştur. Bunun nedeni gerçek yer radarı ölçüm sonuçlarının 2B ve 3B modellerden elde edilen sentetik sonuçlar ile karşılaştırılmak istenmesidir. Ortama ait fiziksel parametreler Model-2'de kullanılan formülasyonların yanı sıra Dobson (Peplinski) yöntemi ile de ayrıca hesaplanmıştır (Peplinski ve diğ., 1995b). Laboratuvar ölçümlerinde 2 GHz merkez frekanslı anten kullanıldığı için, modellemelerde de 2 GHz merkez frekansına sahip teorik kaynak kullanılmıştır.

Laboratuvar ortamında toplanan yer radarı veri seti, Roma Sapienza Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Yapı ve Çevre Mühendisliği (DICEA) Bölümü tarafından sağlanmış ve gerekli izinler çerçevesinde bu çalışmada kullanılmıştır.

1. YER RADARI YÖNTEMİNİN TARİHÇESİ VE LİTERATÜRDEKİ YERİ

1.1. Yöntemin Tarihçesi

Yer radarı yöntemi tarihçesi için genel bir araştırma yapıldığında; elektromanyetik dalgaları kullanarak metalik bir nesnenin tespit edilebileceği ilk olarak Hertz tarafından 1886 yılında deneysel olarak ispatlandığı görülür (Skolnik, 1981). Daha sonra, elektromanyetik sinyaller 1904 yılında Alman mühendis Hulsmeyer (1904) tarafından metal objeleri sahada tespit etmek amacıyla kullanılmıştır; ancak elektromanyetik dalgaları kullanarak gömülü nesnelere bulmak için ilk patent Lowy (1911) tarafından alınmıştır. Hulsbeck (1926) çalışması ile gömülü objelerin yapısının belirlenmesinde darbeli tekniklerin ilk kullanımını gerçekleştirmiştir (Daniels, 2004). Yirmili ve otuzlu yıllar boyunca radar tekniği sürekli bir gelişim içerisinde olup, ikinci dünya savaşıyla birlikte gerçek anlamda sahada kullanılmaya başlanmıştır (Diamanti, 2008). Savaş yıllarında askeri amaçlı olarak kullanılan yöntem daha sonraları jeolojik araştırmalar amacıyla tercih edilmiştir. Buz (Stenson, 1951; Evans, 1963), su-tuz çözeltileri (Unterberger, 1979), çöl kumları ve kayaç tiplerini (Morey, 1974) incelemek amacıyla kullanılmıştır. Kömür aramaları için kullanımı ise Cook (1974) ve Roe ve Ellerbuch (1979) tarafından gerçekleştirilmiştir (Daniels, 2004). 1980 itibarıyla özellikle mühendislik ve arkeoloji alanlarında tercih edilen bir yöntem haline gelmiştir. Gelişen teknoloji ve bilgisayarların artan gücü ile popülerliğini her geçen gün arttıran yer radarı yöntemi uygulama alanlarını da genişletmiştir. Günümüzde ise yer radarı yöntemi artık çok daha özel konularda başarıyla uygulanmaktadır. Bu araştırma alanlarına örnek olarak; jeolojik ve hidrojeolojik uygulamalar (Leandro ve diğ., 2019), buz kalınlığı araştırmaları (Brandt ve diğ., 2009), yeraltı kirliliği çalışmaları (Brewster ve diğ., 1995; Orlando ve Renzi, 2015), arkeoloji (Kadioglu ve diğ., 2013; Rabbel ve diğ., 2015), otoyol ve demiryolu araştırmaları (Bianchini ve diğ., 2019), beton analizleri (Kaplanvural ve diğ., 2018), su ve doğalgaz ve elektrik tesisatlarının tespiti (Zeng ve McMechan, 1997), donatı araştırmaları (Rathod ve diğ., 2019), adli araştırmalar

(Schotsmans ve diğ., 2014), kara mayınlarının tespiti (Giannakis ve diğ., 2016), patlamamış askeri mühimmatların (UXO) tespiti (Nunez-Nieto ve diğ., 2014), Ay yüzeyi (Feng ve diğ., 2019) ve daha güncel konulardan biri olan Mars araştırmaları (Hamran ve diğ., 2015) örnek olarak sayılabilir.

1.2. Literatürdeki Yeri

Araştırmacılar için bilimsel iletişim unsurlarının başında bilimsel çalışmaların akademik dergilerde yayınlanması gelmektedir (Zavadskas ve diğ., 2014). Her geçen gün akademik dergilerde yayınlanan bilimsel araştırmaların sayısı ve buna bağlı olarak akademik dergilerin artışı gözlemlenmektedir. Bir araştırma konusu için; belirli bir bölgede ve belirli bir dönemde gerek kişi gerekse de kurumlar tarafından üretilmiş akademik çalışmaların istatistiksel çözümlenmelerine bibliyometrik analiz denir. Tez çalışmasının bu bölümünde yer radarı yöntemi için bibliyometrik analiz çalışması yapılmıştır. Bibliyometrik analiz araştırmalarında Web of Science (WoS) atıf veritabanı ve özellikle bu veritabanının alt dizinlerinden biri olan Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED) tercih edilmektedir. Bu platform bilimsel araştırmaların performansını belirlemede tercih edilen en önemli araç konumundadır (Wang ve diğ., 2014). Bibliyometrik analiz çalışmaları ile akademik yayınların analizleri yapılarak; ilgilenilen alanda çalışma yapan araştırmacıları, araştırma konularını ve bu yayınların yer aldığı akademik dergileri belirleyebilmek mümkündür. Bireysel ve kurumsal iş birlikleri için ilgilenilen alanda çalışan araştırmacıların ülkeleri ve görev aldıkları kurumlar tespit edilebilmektedir. Bir araştırmacı, alanındaki popüler konuları belirlemek, araştırma alanındaki değişimleri gözlemleyebilmek ve akademik yayınları için en uygun bilimsel dergileri belirleyebilmek adına bu analiz yöntemini kullanabilmektedir. 2019 yılı haziran ayı itibariyle WoS veritabanı içerisinde bibliyometrik analiz konusunda dizinlenmiş toplam 3089 akademik makale bulunmaktadır.

Bu çalışmada, yer radarı yöntemi ile yapılan bilimsel yayınların 1980-2019 (Haziran) yılları arasında en çok tercih edilen atıf veri tabanlarının başında gelmekte olan WoS veritabanı ile analizi yapılmıştır. Bu çalışmada WoS veritabanının tercih edilmesinin bir diğer önemli nedeni, bu veritabanı aboneliğinin Türkiye'deki tüm üniversitelere Yüksek Öğretim Kurumu tarafından (YÖK) sağlanmış olmasıdır. Böylelikle benzer

nitelikte çalışma yapmak isteyen araştırmacılar ilgili veri tabanını kullanarak araştırmalarını yapma olanağına sahip olacaklardır.

Bu analiz çalışması sonucunda yer radarı yöntemi kullanılarak yapılan bilimsel çalışmaların yıllara göre dağılımı, en çok yer aldıkları konu kategorileri, yayımlandıkları dergiler ve çalışmaların yapıldığı ülkeler ayrıntılı olarak belirlenebilecektir. WoS atıf veritabanı içerisinde bilimsel makaleler başta olmak üzere konferans/sempozyum bildirileri ve özetler ağırlıklı olmak üzere onlarca türde bilimsel yayın dizinlenmektedir. Bu çalışma içerisinde yapılan analizlerde sadece makaleler ele alınmıştır.

Bibliyometrik analiz taramaları yapılırken üzerinde önemle durulması gereken nokta, araştırma konusunun birden fazla tanımlayıcı kriter kelime ile taranabileceğidir. Yer radarı yöntemi için yapılan taramada arama kriteri olarak “georadar”, “ground penetrating radar”, “surface penetrating radar”, “ground probing radar” ve bunlara ek olarak ay yüzeyindeki radar araştırmaları için kullanılan “lunar penetrating radar” kriteri taramalara eklenmiştir. Bu tarama kriterlerinin sadece bir tanesini kullanarak analiz yapmak hatalı olmayacak; ancak eksik bir yaklaşım olacaktır. WoS taramalarında arama kutucuğuna girilen kriterlerin dizinlenmiş bilimsel yayınların başlığında, özet metni içerisinde ve anahtar kelimeleri arasında taranabilmesi için konu bazlı tarama seçeneğı kullanılmaktadır. Konu bazlı tarama yapabilmek için gelişmiş tarama kutucuğunda TS (topic) kısaltması kullanılmaktadır (Zhang ve diğ., 2016). Yer radarı yöntemi için yapılan taramada kullanılan konu bazlı kriterler Şekil 1.1’de gösterilmektedir. Tarama kriterleri içerisinde kısaltmaların kullanılması önerilmeyen bir durumdur. Bunun nedeni kısaltmaların farklı bilimsel alanlarda farklı anlamlarda kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Yer radarı yöntemi birçok kaynaktan GPR kısaltması ile kullanılmaktadır; ancak aynı kısaltıma Gaussian Process Regression (GPR) yöntemi için de geçerlidir. Kısaltmalardan kaynaklanan karışıklıklar, tarama sonuçlarına farklı disiplinlere ait sonuçların karışmasına ve analizlerin hata ile sonuçlanmalarına yol açabilmektedir.

Select a database Web of Science Core Collection

Basic Search Cited Reference Search **Advanced Search** Author Search

Use field tags, Boolean operators, parentheses, and query sets to create your query. Results the page. ([Learn more about Advanced Search](#))

Example: TS=(nanotub* AND carbon) NOT AU=Smalley RE
#1 NOT #2 [more examples](#) | [view the tutorial](#)

TS= ("ground penetrating radar" OR "ground probing radar" OR "ground surface radar" OR "lunar penetrating radar" OR "georadar")

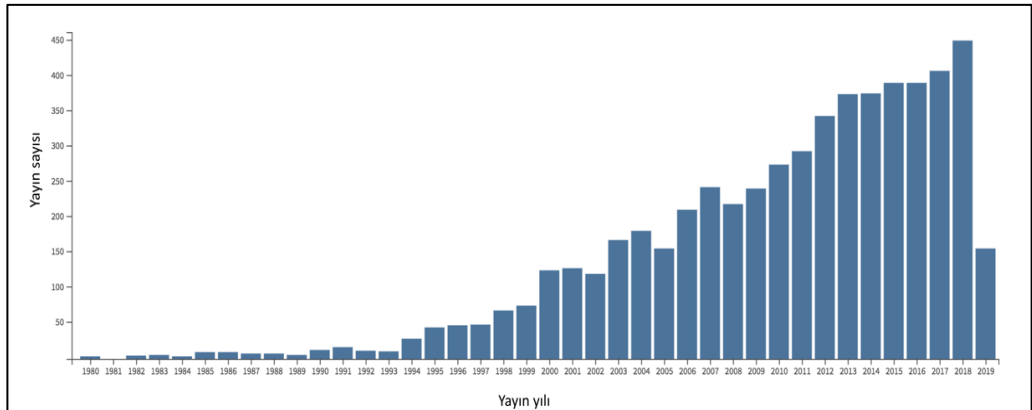
Search

Restrict results by languages and document types:

All languages	All document types
English	Article
Afrikaans	Abstract of Published Item
Arabic	Art Exhibit Review

Şekil 1.1. WoS veritabanı sayfasında gelişmiş tarama kutucuğu ve seçilen tarama kriterleri

Şekil 1.1’de verilen kriterlerin girilmesi ve tarama yapılacak alt dizinin SCI-EXPANDED seçilmesi sonucunda, 1980 – 2019 (Haziran) aralığı için 5586 kayıt elde edilmiştir. Sonuçlar sadece bilimsel makaleler kalacak şekilde daraltıldığında 5356 makaleye indirgenmiştir. 1980-2019 (Haziran) aralığında yayınlanmış ve WoS veritabanında dizinlenmiş bilimsel makalelerin üretim yıllarına göre dağılımı Şekil 1.2’de verilmektedir.



Şekil 1.2. 1980-2019 aralığında yer radarı konusunda yapılmış bilimsel makalelerin üretim yıllarına göre dağılımı

WoS içerisinde tanımlanmış 5 ana başlık bulunmaktadır. Bu başlıklar; sanat ve beşeri bilimler, canlı bilimi ve biyotıp, doğa bilimleri, sosyal bilimler ve teknolojidir. Bu 5 ana başlık altında ise 173 farklı alt kategori bulunmaktadır. Yer radarı konusunda elde edilen 5356 makalenin WoS alt kategorilerine göre dağılımı Tablo 1.1’de verilmektedir.

Tablo 1.1. Yer radarı konusunda yapılan çalışmaların yer aldığı WoS kategorileri (1980 – 2019)

Kategori başlığı	Yayın sayısı	Yüzdellik dilim %
Geoscience Multidisciplinary	1947	34,855
Geochemistry Geophysics	1281	22,932
Engineering Electrical Electronic	812	14,536
Geography Physical	628	11,242
Remote Sensing	530	9,488
Water Resources	492	8,808
Environmental Sciences	466	8,342
Imaging Science Photographic Technology	450	8,056
Mining Mineral Processing	429	7,680
Engineering Civil	413	7,393
Geology	255	4,565
Archaeology	216	3,867
Telecommunications	208	3,724
Construction Building Technology	208	3,724
Soil Science	208	3,724

* Bir bilimsel makale birden fazla WoS kategorisi altında bulunabilmektedir.

Araştırmacılar için bir diğer önemli konu ise bilimsel çalışmaların yayınlanacağı akademik dergilerin belirlenmesidir. Bu bağlamda tercih edilecek derginin araştırma konusu ile ilişkili olması en belirleyici etkidir. Akademik dergilerin tercihinde bir diğer kriter ise derginin etki faktörüdür. Yüksek etki faktörüne sahip akademik dergilerde yayınlanan bilimsel çalışmaların daha geniş kitlelere ulaşma şansı bulunmaktadır. Yer radarı yöntemi konusunda en fazla akademik makale yayınlamış ilk 10 akademik dergi Tablo 1.2’de verilmektedir. WoS veritabanında dizinlenen ve içerisinde yer radarı konusunda en az bir yayın bulunduran toplam 254 akademik dergi yer almaktadır.

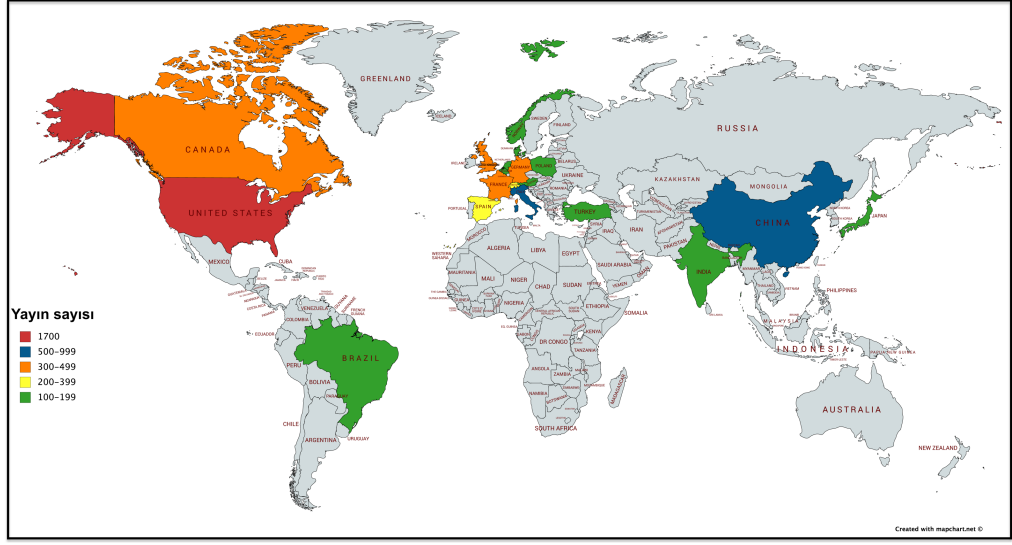
Tablo 1.2. Yer radarı konusunda yapılan çalışmaların en fazla yayınlandığı akademik dergiler ve etki faktörleri (1980 – 2019)

Dergi adı	Etki faktörü	Yayın sayısı	Yüzdellik Dilim %
Journal of Applied Geophysics	1,91	404	7,232
IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Geophysics	5,78	274	4,905
Near Surface Geophysics	3,09	228	4,082
Archaeological Prospection	1,41	215	3,849
Water Resources Research	1,55	127	2,274
NDT E International	4,96	97	1,736
Geomorphology	3,26	96	1,719
Construction and Building Materials	3,87	93	1,665
Vadose Zone Journal	4,68	85	1,522
	2,83	79	1,414

* EF (Etki Faktörü) son 5 yıl için ortalama değer (2014-2018)

Yer radarı yöntemi konusunda yapılmış bilimsel yayınların üretildikleri ülkelere göre dağılımını yapabilmek adına Şekil 1.3’de gösterilen ülkelere göre yayın dağılım haritası oluşturulmuştur. Bu haritada Türkiye 128 akademik yayın ile 100-199 bandında bulunmakta olup bulunduğu gruba ait ülkeler ile birlikte yeşil renk ile gösterilmiştir.

Bu tez çalışmasının ilk bölümü ile yer radarı yöntemi için bibliyometrik analiz çalışması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar irdelediğinde; öncelikli olarak yer radarı konusunda yapılan yayınların her geçen yıl artma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. WoS kategorilerine göre en çok yayın yapılan alt başlıkların “Geoscience Multidisciplinary” ve “Geochemistry Geophysics” olduğu görülmüştür. Akademik dergiler içerisinde “Journal Applied Geophysics” ve “IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing” dergileri yer radarı konusunda en fazla makaleye yer veren akademik dergi konumundadırlar. Amerika Birleşik Devletleri 1700 bilimsel yayın sayısı ile yer radarı yöntemini kullanarak en fazla araştırmanın yapıldığı ülke konumundadır. Bu ülkeyi 567 yayın ile İtalya ve 557 yayın ile Çin’in takip ettiği görülmüştür.

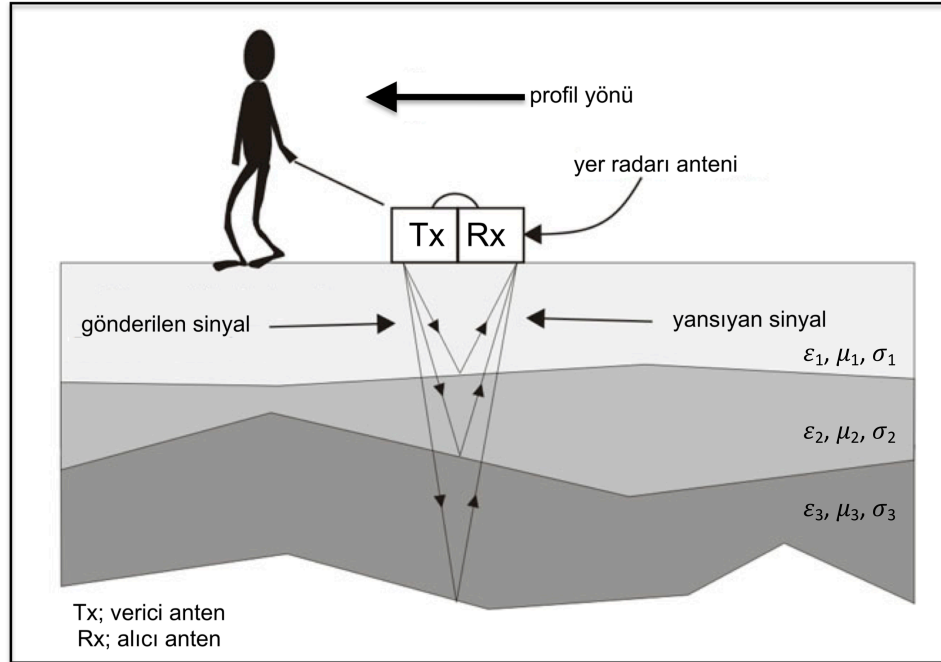


Şekil 1.3. Yer radarı yöntemi kullanılarak en çok bilimsel makaleye katkı vermiş ülkelerin dağılımı

2. YER RADARI YÖNTEMİ VE ELEKTROMANYETİK DALGA YAYILIMI

2.1. Yer Radarı (GPR) Yönteminin Tanımı

Yer radarı (GPR) yöntemi, uygulama alanına hasar vermeyen özelliği ile yeraltı koşullarını, tabakaların konumunu, gömülü objelerin yerini ve derinliğini belirlemek amacıyla elektromanyetik dalgaları kullanan ve son dönem teknolojik gelişmelerle birlikte birçok mühendislik probleminin çözümüne katkı sağlamış bir jeofizik yöntemdir. Bir verici anten vasıtasıyla yeraltına gönderilen elektromanyetik dalgaların farklı dielektriksel niteliklere sahip yansıtıcı ara yüzeylerden yansarak kaydedilmesi ilkesi ile çalışmaktadır. Yer altındaki tabakalar veya gömülü nesnelere, bileşenlerinden kaynaklanan kendilerine özgü farklı fiziksel özelliklere sahip olabilmektedirler. Bu fiziksel farklılıkların elektromanyetik dalgaların yer içerisinde yayılımına etkileri yer radarı yöntemi ile yeraltındaki yapıların ayırt edilebilmesi fikrinin temelini oluşturmaktadır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Yer radarı yönteminin çalışma prensibi [URL:1]

Yer radarı yönteminde kullanılan antenlerin frekansına göre farklı çözünürlük gerektiren problemler başarıyla çözülebilmektedir. Özellikle sığ olarak nitelendirilebilecek araştırmalarda yüksek frekanslı antenlerin kullanılmasıyla gömülü yapılar ve hedef cisimler yüksek çözünürlüklerde tespit edilebilmektedir. Nispeten daha derin araştırmalarda ise düşük frekanslı antenler ve uygun veri işlem adımları ile tatmin edici araştırma derinliklerine ulaşılabilmektedir. Yer radarı yönteminin kullanıldığı alanlara örnekler Tablo 2.1’de verilmektedir.

Tablo 2.1. Yer radarı yönteminin kullanım alanlarına örnekler

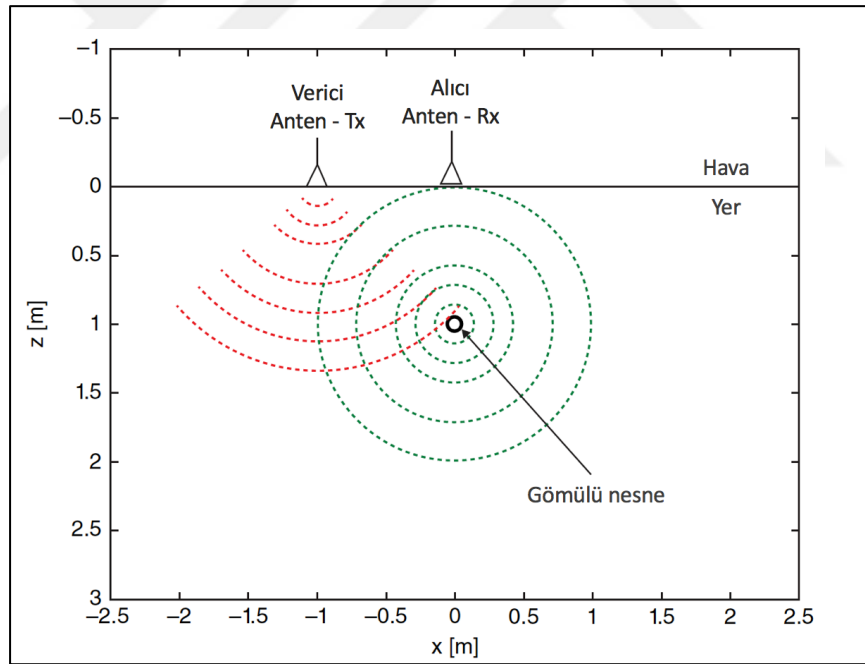
Araştırma alanı	Araştırma konusu
Mühendislik	Zemin, yol, havaalanı, baraj, yeraltı boşluk çalışmaları
Jeoloji	Tabaka kalınlığı, yeraltı su seviyesi, buzul kalınlığı araştırmaları
Arkeoloji	Antik şehir, yapı kalıntısı, su yolu, dehliz, duvar aramaları
Çevre	Endüstriyel atıklar, çöp boşaltım alanları, kimyasal sızıntı tespitleri
Altyapı	Elektrik, su, doğal gaz boru hatları, yeraltı yakıt tanklarının aranması
Adli ve kriminal	Cezaevi firar tünelleri tespiti, ceset veya toplu mezar aramaları
Askeri	Mayın ve patlamamış askeri mühimmat tespiti, gömülü silah ve mühimmat aramaları
Maden	Yüzeye yakın sığ maden aramaları (40 m kadar)
Uzay	Ay ve Mars yüzeyi araştırmaları

Diğer jeofizik yöntemlerde olduğu gibi yer radarı yönteminin de gerek uygulamada gerek yorumlamada avantajlı ve dezavantajlı olduğu durumlar söz konusudur. Yer radarı yönteminin tercih edilmesinde etkin rol oynayan avantajlı durumlara göz atıldığında; yüksek frekanslı bir yöntem olması ve yığma yapılabilmesi bakımından yüksek çözünürlükte sonuçlar elde etmeye olanak sağlar, hedef yapıların derinlik ve konumlarını duyarlı bir şekilde belirleyebilir, arazi uygulamaları diğer birçok jeofizik yönteme oranla daha kolaydır, özellikle son yıllarda üretilen yer radarı ekipmanları kendilerine ait GPS sistemleri ile üretilmektedir böylelikle kareyaj ile çalışma yöntemine alternatif bir seçenek sunmaktadır, diğer birçok klasik yöntemin aksine tahribatsız bir yöntem olması nedeniyle arkeolojide, bina içlerinde, şehir merkezlerinde ve benzeri nitelikte hassas çalışmalar gerektiren alanlarda tercih edilmektedir.

Yöntemin birçok avantajına rağmen kısıtları da söz konusudur. Bunlar; çalışma alanında istenmeyen koşullar (bitki örtüsü, yeryüzü suyu, jeolojiden kaynaklanan bozukluklar vb.) elektromanyetik enerjinin yeraltına nüfuz etmesini

engelleyeabilmektedir, çevrede bulunan radyo vericileri ve baz istasyonları gürültü kaynağı olabilmektedir, çalışma alanındaki duvar, ağaç, otomobil ve benzeri nesnelere kaynaklanan yanal yansımalar kayıtlara karışabilmektedir, metalik nesnelere keskin ve kayıtlarda baskın yansımalar neden olabilmektedir, yüzeyde bulunan yoğun kil içeriği de yöntemin verimliliğini düşüren etkilere örnek olarak sayılabilmektedir.

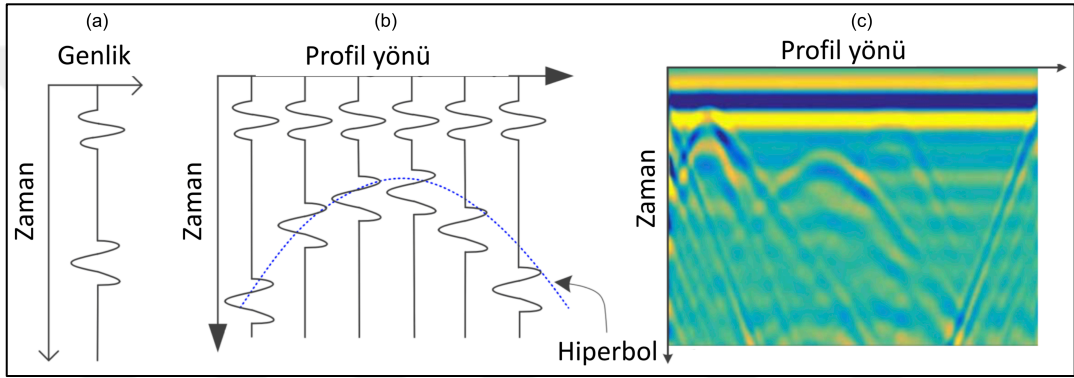
Basit olarak bir yer radarı sistemi, kontrol ünitesi, bilgisayar, anten (alıcı-verici) ve güç kaynağı olmak üzere başlıca bu kısımlardan oluşmaktadır. Bununla beraber yeni yer radarı sistemlerinin çoğunda kontrol ünitesi ve bilgisayar tek bir cihaz içerisinde toplanmıştır. Kontrol ünitesi verici anten tarafından yer altına gönderilen elektromanyetik dalgaları üretmektedir (Persico, 2014). Kontrol ünitesi tarafından üretilen ve verici anten vasıtasıyla yer altına gönderilen elektromanyetik dalgalar her yöne yayılmasına rağmen ağırlıklı olarak konik bir şekilde yayılırlar (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Yer radarı sistemleri (Persico, 2014)

Elektromanyetik dalgalar yer altında bir süreksizlikle karşılaştıklarında (gömülü bir obje, jeolojik tabaka sınırı, yeraltı boşluğu, farklı su içeriğine sahip bir bölge vb.) yansıma ve saçılmaya uğrarlar. Yansıyan bu elektromanyetik dalgaların alıcı anten tarafından kayıt edilmesi sonucunda yer altının elektromanyetik enerjiye verdiği tepki sayısal olarak kayıt edilmiş olur. Elde edilen bu sayısal kayıtlara radagram ya

da radargram adı verilir. Bu tez çalışmasında yer radarı kayıtları için radargram ifadesi kullanılmaktadır. Radargramlar üzerinde düşey eksen radar dalgalarına ait gidiş geliş zamanını, yatay eksen ise ölçü profili boyunca anten sisteminin konumunu ifade etmektedir. Tek bir sinyalin zaman ve genliğe göre çizdirilmesine iz, izlerin bir araya gelmesiyle de radargramlar meydana gelir (Şekil 2.3). Elektronik mühendisleri, yerbilimcilerin iz olarak adlandırdığı çizimlere A-tarama (A-scan), profillere de B-tarama (B-scan) adını vermektedirler. Profillerin bir araya getirilmesi ile elde edilen 3B hacimsel gösterimler ise C-tarama (C-scan) olarak adlandırılmaktadırlar. Bazı akademik yayınlarda her iki türlü kullanım da karşımıza çıkabilmektedir.



Şekil 2.3. Yer radarı kayıtları a) iz örneği (A-tarama), b) profil vektörel gösterim (B-tarama) ve c) profil resim gösterim (B-tarama) (Li ve diğ., 2018)

2.2. Yer Radarı Yönteminin Teorisi

2.2.1. Elektromanyetik dalganın hızı, yansıma özellikleri ve sönümlenmesi

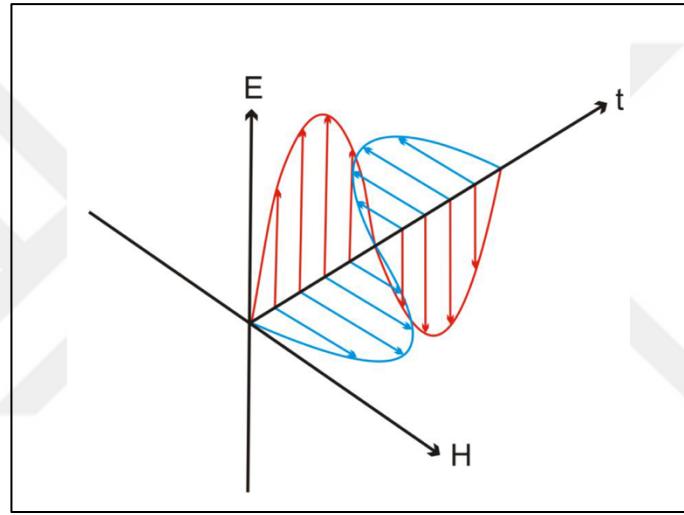
Elektromanyetik dalgalar bir ortam içerisinde yayılırken ortamın fiziksel özelliklerden etkilenirler. Özellikle ortamın dielektriksel geçirgenliği (ϵ_r) ve elektriksel iletkenliği (σ) dalgaların yayılma kabiliyetlerini doğrudan etkilemektedir. Bir diğer fiziksel parametre olan ortamın manyetik geçirgenlik değeri (μ_r) ise doğada çok fazla çeşitlilik göstermemesine rağmen elektromanyetik dalga yayılımına etkisi olan bir diğer parametredir. Elektromanyetik dalganın malzeme içerisindeki hızı (v_m) eşitlik (2.1) ile verilmekte olup, c ışık hızını ifade etmektedir ($\approx 3 \times 10^8$ m/s). Hız;

$$v_m = \frac{c}{\sqrt{\frac{(\epsilon_r \mu_r)}{2} [(1+P^2)+1]}} \quad (2.1)$$

burada; $P = \sigma / \omega \epsilon$, $\omega = 2\pi f$ ve $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ olarak yazılabilir. Burada; P kayıp faktörü, f frekans, ϵ dielektriksel geçirgenlik ve ϵ_0 boşluğun dielektrik sabitidir ($8,854 \times 10^{-12}$ F/m). Düşük kayıplı malzemeler için kayıp faktörü $P \approx 0$ kabul edildiğinde, malzeme içerisindeki elektromanyetik hızı;

$$v_m = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (2.2)$$

olarak ifade edilebilir (Reynolds, 2011). Elektromanyetik dalganın boşlukta yayılımı Şekil 2.4 ile gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Elektromanyetik dalganın boşlukta yayılımı (Balkaya, 2010)

Elektromanyetik dalgaların ara yüzlerdeki davranışları Snell Yasası ile açıklanmaktadır. Bu yasaya göre bir dalga iki ortamı ayıran bir sınır ile karşılaşırsa kırılan ve yansıyan dalgalar meydana gelir. Bu yasa, yansımaya ve kırılmaya uğrayan ışınların genliği konusunda bilgi vermemesine rağmen kırılan ve yansıyan ışınların normale olan doğruları hakkında bilgi verir. Snell Yasası eşitlik (2.3);

$$\frac{\sin \phi_1}{\sin \phi_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad (2.3)$$

ile ifade edilmektedir.

Yansıma ve iletim katsayıları bir ara yüzeyde dalga genliğinin değişimi hakkında bilgi verir. Elektromanyetik dalga hızı bağıntılarından yararlanılarak yansıma (R) ve

iletim (T) katsayıları için aşağıdaki bağıntılar elde edilir (Annan, 2003). Yansıma katsayıları;

$$R = \frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1} = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (2.4)$$

eşitlik (2.4) ile ifade edilirken, iletim katsayıları ise;

$$T = \frac{2V_2}{V_2 + V_1} = \frac{2\sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (2.5)$$

eşitlik (2.5) ile ifade edilmektedir. Yansıma (R) katsayısı ile iletim (T) katsayısı arasında ilişki şu eşit (2.6) ile;

$$T = 1 - R \quad (2.6)$$

tanımlanır.

Elektromanyetik dalga yayılımı konusu Maxwell denklemleri ile açıklanmaktadır. Maxwell denklemleri konusuna ve ilişkili olduğu bağıntılara Bölüm 3 içerisinde ayrıntılı olarak yer verilmiştir.

Yer altına iletilen ve yayılmakta olan elektromanyetik enerji artan derinliğe bağlı olarak enerjisini kaybetme eğilimi göstermektedir. Yer altında bulunan iletken malzemelerden kaynaklanan kayıplar ve yayılmakta olduğu yüzey alanındaki artış elektromanyetik dalganın enerjisinde sönümlenmeye neden olmaktadır. Sönümlenme katsayısı eşitlik (2.7) bağıntısı ile,

$$\alpha = \frac{1}{2} \sigma \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \quad (2.7)$$

verilmektedir. Bu eşitlikte α sönümlenme katsayısını, σ elektriksel iletkenliği, μ_r göreceli manyetik geçirgenliği, ϵ_r ise göreceli dielektriksel geçirgenliği belirtmektedir.

Ortamda bulunan su, özellikle jeolojik yapılar içerisinde elektromanyetik dalganın davranışını doğrudan etkilemektedir. Metalik özelliğe sahip minerallerin bulunduğu ortamlarda iletkenlik baskın hale gelmektedir. Güçlü yansımalar oluşabilmesi için

yansıtıcının alanı ve yüzeyi belirleyici unsurlardır. Güçlü yansımalar düzgün ve geniş yüzeylerden elde edilir, yüzey bozukluğu elektromanyetik enerjinin saçılmasına neden olmaktadır. Doğada karşılaşılan çeşitli malzemelere ait göreceli dielektriksel geçirgenlik değerleri Tablo 2.2’de, aynı malzemeler için elektriksel iletkenlik ve sönümlenme değerleri ise Tablo 2.3’de verilmektedir.

Tablo 2.2. Çeşitli malzemeler için göreceli dielektriksel geçirgenlik değerleri (Daniels, 2004), (Jol, 2009) ve (Reynolds, 2011)

Göreceli dielektriksel geçirgenlik değeri (ϵ_r)			
Malzeme	Daniels (2004)	Jol (2009)	Reynolds (2011)
Hava	1	1	1
Su	81	78 (25 C ⁰)-88	81
Deniz suyu	81	81-88	81-88
Buz	4	3	3.2
Kum (k)	2-6	3-6	3-6
Kum (sd)	10-30	10-30	10-32
Kum taşı (k)	2-5	4-7	4-7
Kum taşı (sd)	5-10	5-15	6
Kil (k)	2-6	2-20	2-5
Kil (sd)	5-40	15-40	8-40
Kireçtaşı (k)	7	4-8	4-8
Kireçtaşı (sd)	8	6-15	6-15
Kumlu toprak (k)	4-10	4-6	-
Kumlu toprak (sd)	10-30	15-30	-
Balçıklı toprak (k)	4-10	4-6	-
Balçıklı toprak (sd)	10-30	10-20	-
Killi toprak (k)	4-10	4-6	-
Killi toprak (sd)	10-30	10-15	-
Toprak (ortalama)	-	16	16
Toprak (donmuş)	4-8	2-8	2-8
Çakıl	-	-	5
Kömür	3.5	-	4-5
Dolomit	-	-	6.8-8
Granit	5	5-8	5-8
Bazalt (sd)	-	-	8
Kuartz	-	-	4.3
Asfalt	2-4	-	3-5
Beton	4-10	4-10	4-30

*k: kuru, sd: suya doygun

Tablo 2.3. Bazı malzemeler için elektriksel iletkenlik ve sönümlenme değerleri (Daniels, 2004)

Malzeme	Elektriksel iletkenlik (σ) (S/m)	Sönümlenme (α) (dB/m)
Hava	0	0
Su	10^{-6} - 10^{-2}	0,01
Deniz suyu	10^2	100
Buz	10^{-4} - 10^{-3}	0,1-2
Kum (k)	10^{-7} - 10^{-3}	0,01-1
Kum (sd)	10^{-3} - 10^{-2}	0,5-5
Kum taşı (k)	10^{-6} - 10^{-5}	2-10
Kum taşı (sd)	10^{-4} - 10^{-2}	4-20
Kil (k)	10^{-1} - 10^{-0}	10-50
Kil (sd)	10^{-1} - 10^{-0}	20-100
Kireçtaşı (k)	10^{-8} - 10^{-6}	0,5-10
Kireçtaşı (sd)	10^{-2} - 10^{-1}	1-20
Kumlu toprak (k)	10^{-4} - 10^{-2}	0,1-2
Kumlu toprak (sd)	10^{-2} - 10^{-1}	1-5
Balçıklı toprak (k)	10^{-4} - 10^{-3}	0,5-3
Balçıklı toprak (sd)	10^{-2} - 10^{-1}	1-6
Killi toprak (k)	10^{-2} - 10^{-1}	0,3-3
Killi toprak (sd)	10^{-3} - 10^{-0}	5-50
Toprak (ortalama)	-	-
Toprak (donmuş)	10^{-5} - 10^{-2}	0,1-5
Çakıl	-	-
Kömür	10^{-3} - 10^{-2}	1-10
Dolomit	-	-
Granit	10^{-8} - 10^{-6}	0,5-3
Bazalt (sd)	-	-
Kuartz	-	-
Asfalt	10^{-2} - 10^{-1}	2-15
Beton	10^{-3} - 10^{-2}	2-12

*k: kuru, sd: suya doymuş

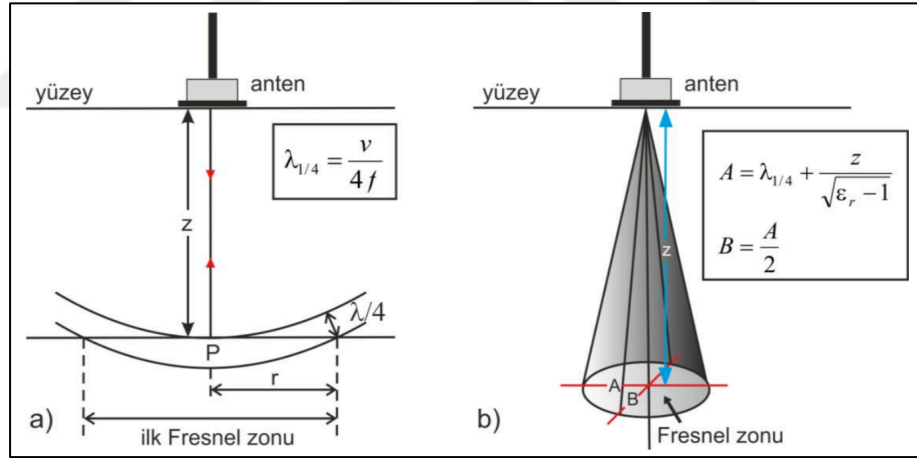
2.2.2. Düşey ve yanal ayrımlılık

Bir yer radarı sisteminde düşey ve yatay ayrımlılık kavramları, belirlenmek istenen yapı veya nesnenin gerek konumu gerekse de geometrisi hakkında bilgi edinebilmek için son derece önemlidir.

Düşey ayrımlılık, komşu iki sinyalin zaman ortamındaki farklılıklarının bir ölçüsüdür (Reynolds, 2011). Düşey ayrımlılık kavramı dalga boyu ile ifade edilir (λ) ve genellikle dalga boyunun dörtte biri olarak kabul edilmektedir. Frekans ile düşey ayrımlılık arasındaki ilişki incelendiğinde; anten frekansındaki artış düşey yönde çözünürlüğün artmasına olanak sağlamaktadır. Bunun nedeni dalga boyu ile frekansın ters orantılı olmasıdır. Frekans arttıkça dalga boyu küçüleceği için düşey

yönde ayrırlılık da artmaktadır. Sonuç olarak, yüksek frekanslı antenlerden yüksek çözünürlüklü radargramlar elde edilmektedir; ancak yüksek frekanslı antenler düşük dalga boylu elektromanyetik dalgalar üreteceği için elde edilen bilgiler sığ derinliklere ait olacaktır. Tam tersi bir durum olarak, düşük frekanslı antenler kullanılarak daha derinlerden bilgi alınabilmesine karşın elde edilen radargramlara ait çözünürlük düşük olacaktır.

Yanal ayrırlılık kavramı ise Fresnel zonu ve bu zonun genişliği ile ilişkilidir. Geniş Fresnel zonu düşük yatay ayrırlılığa neden olurken, bu zonunun dar olması durumunda yatay yönde yüksek ayrırlılık elde edilmektedir (Neal, 2004). Fresnel zonu; dalga boyu, derinlik ve ortamın göreceli dielektriksel geçirgenlik değeri ile ilişkilidir. Artan derinliğe bağlı olarak yayılan enerji genişleyerek ilerleyeceğinden Fresnel zonu da genişleyecektir. Bu durum, birbirine yakın hedef nesnelerin tespitini zorlaştıran sonuçlara neden olacaktır. Şekil 2.5 ile yatay ve düşey yönde ayrırlılık kavramları açıklanmaktadır.



Şekil 2.5. Ayrırlılık a) düşey yönde, b) yatay yönde (Balkaya, 2010)

2.2.3. Anten açımları

Yer radarı yönteminde farklı amaçlar için çeşitli anten açımları kullanılmaktadır. Bu açımlar, alıcı ve verici antenin ölçüm sırasında birbirlerine göre aldıkları pozisyonlara göre belirlenmektedir. Yer radarı çalışmalarında ağırlıklı olarak antenlerin sabit olduğu ve birlikte hareket ettikleri sabit açılım tekniği (common offset, CO) kullanılmaktadır. Ölçümlerde bu açılım tekniğinin en çok tercih edilen açılım olmasının nedeni, birçok problemin çözümünde başarılı sonuçlar vermesi ve

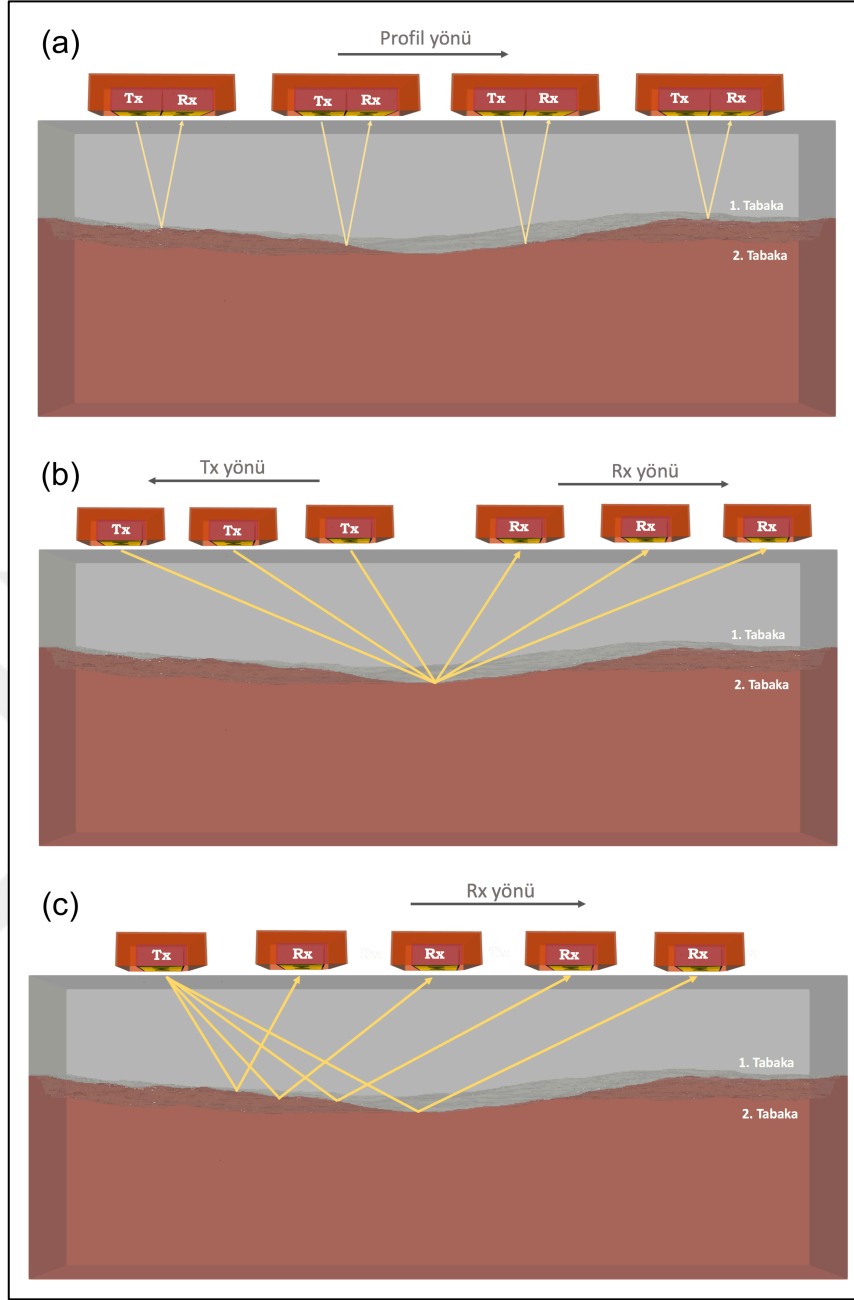
anten üreticisi firmaların kapalı anten modellerinde alıcı ve verici anten bileşenlerini sabit mesafede yerleştirerek bu açılım ile kullanıma olanak vermesi gösterilebilir.

Tercih edilen bir diğer açılım yöntemi ise ortak derinlik noktası (common midpoint, CMP) yöntemidir. Bu yöntem genelde çalışma sahasında hız ölçümleri yapmak amacıyla kullanılmaktadır. Uygulama biçimi; alıcı ve verici anten her bir atıştan sonra birbirlerine göre ters yönde belirli bir mesafe uzaklaştırılır ve verici antenden gönderilen elektromanyetik dalga alıcı anten tarafından kayıt edilir. Bu işlem her yeni atış için, antenler birbirlerinden uzaklaştırılarak tekrar edilir. Bu tür ölçümler araştırma sahasının farklı noktalarından birkaç kez daha tekrarlanarak ölçüm sahasının farklı noktalarına ait hız değişimleri elde edilebilmektedir. Ortak derinlik noktası açılımı özellikle arkeojeofizik araştırmalarda hassas derinlik bilgisini elde edebilmek amacıyla sabit açılım tekniği ile birlikte sıkça uygulanmaktadır.

Verici antenin sabit tutulup alıcı antenin hareket ettirilmesi ile gerçekleştirilen bir diğer açılım yöntemi ise geniş açılı kırılma ve yansıma (Wide angle reflection and refraction- WARR) açılımı olarak adlandırılır. Bu açılım tekniği benzer olarak alıcı antenin sabit tutulup, verici antenin hareket ettiği şekli ile de kullanılabilir. Yeraltındaki yansıtıcı yüzeyin yatay veya çok az eğimli olduğu durumlarda kullanılabilen bir yöntem olması nedeniyle, çok fazla tercih edilmemektedir (Balkaya, 2010).

Bu açılım tekniklerinin dışında karşılıklı kuyular arasında yer radarı ölçümlerinin yapıldığı ve kuyulardan birine verici antenin diğerine alıcı antenin yerleştirildiği transilüminasyon tekniği de kullanılmaktadır. Bu teknik tomografi modu olarak da bilinmektedir (Kaplanvural, 2018). Yer radarı yönteminde en çok tercih edilen açılımlar Şekil 2.6'da verilmektedir.

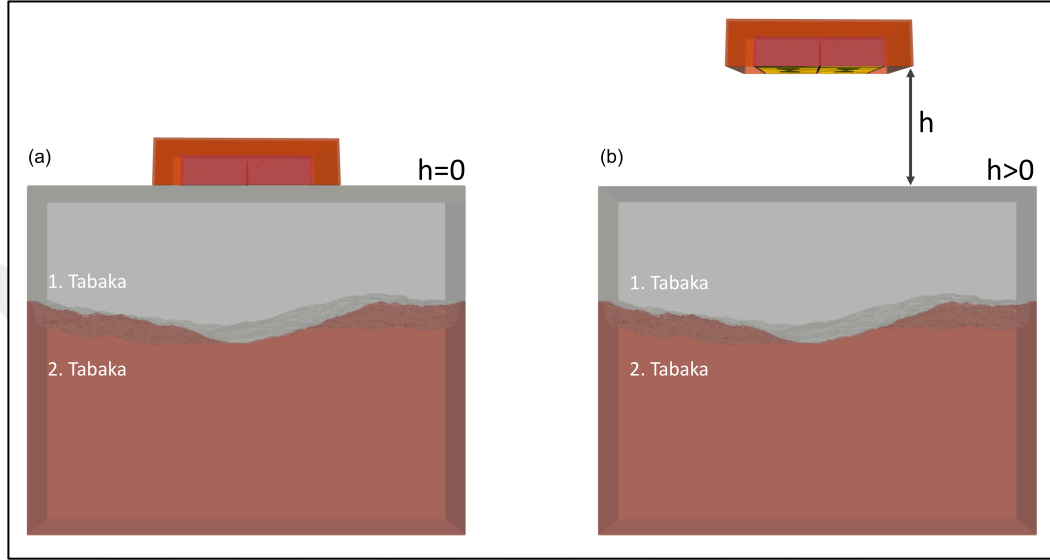
Yer radarı yöntemi antenin zeminle olan ilişkisi bakımından iki farklı şekilde uygulanabilmektedir. Bunlardan ilki yer radarı antenin alt yüzeyinin zemine temas ettiği ($h=0$) zemine temaslı ölçümler, diğer tür ise radar antenin zeminden belirli bir yükseklikte ($h>0$) zemine temassız kullanım şeklidir (Şekil 2.7). Zemine temaslı ölçüm tekniğinde yeraltına daha fazla enerji gönderilip buna bağlı olarak daha fazla enerji geri alınabilmektedir. Bu nedenle elde edilen radargramların yorumlanması nispeten daha kolaydır.



Şekil 2.6. Yer radarı ölçümlerinden kullanılan anten açılımları a) sabit açılım, b) ortak derinlik noktası, c) geniş açılı kırılma ve yansıma tekniği

Zemine temassız ölçümlerde ise radargramları yorumlamak daha zor olmasına rağmen kullanıcılara sağlamış olduğu farklı avantajları vardır. Örneğin, yüzeye yakın ince tabakaların belirlenmesinde bu teknik sıklıkla tercih edilmektedir. Bunun nedeni zemine temassız yöntemle toplanan veride, yerin içerisinde doğrudan gelen baskın sinyaller ile yüzeye yakın ince tabakalardan kaynaklanan yansımalar birbirlerine karışmayacağı için yüzeye yakın ince tabakaların tespit edilmesi daha kolay hale

gelmektedir. Bu amaçla otoyol çalışmalarında hem ince tabakaları bulmak hem de anteni zemine değmeyecek şekilde araçlara yerleştirilerek hızlı ölçüler alınabilmektedir (Viblig, 2013). Zemine temassız ölçüm yönteminin bir diğer kritik kullanım alanı ise kara mayını ya da patlamamış askeri mühimmatların tespit çalışmalarıdır.



Şekil 2.7. Yer radarı antenin kullanım pozisyonu a) zemine temassız, b) zemine temassız

Genellikle zemine temassız yer radarı uygulamalarında papyon adı verilen dipol antenler tercih edilirken, zemine temassız uygulamalarda ise konik antenler tercih edilmektedir (Warren, 2009). Yer radarı sistemlerinde papyon tipi antenler gerek basitliği gerekse de göreceli olarak daha geniş bant aralığında çalışabilmeleri nedeniyle yoğunluk olarak tercih edilmektedirler.

3. MAXWELL DENKLEMLERİ ve ZAMAN ORTAMINDA SONLU FARKLAR YÖNTEMİ

3.1. Maxwell Denklemleri

Elektromanyetik alan teorisi, İskoç fizikçi James Clerk Maxwell tarafından son hali verilmiş bir dizi temel yasa ile açıklanmaktadır. Bu yasalar 19. yüzyılda Ampere, Faraday, Gauss, Lenz, Coulomb ve Volta gibi bilim insanlarının yapmış oldukları çalışmalardan ve deneylerden formüle edilmiştir. James Clerk Maxwell, elektrik ve manyetik alan kavramlarının doğrudan ilişkili olduğunu matematiksel olarak ifade ederek elektromanyetik dalga kavramını ortaya atmıştır. Yaptığı matematiksel çalışmalar sonucunda, boşlukta elektromanyetik dalga hızının ışık hızına eşit olduğunu hesaplayan Maxwell, ışığında bir elektromanyetik dalga olduğu fikrini öne sürmüştür. 1880'li yıllarda ise Alman fizikçi Heinrich Rudolf Hertz, Maxwell'in elektromanyetizma yaklaşımlarının doğruluğunu laboratuvar ortamında yaptığı deneysel çalışmalar ile ispatlamıştır (Warren, 2009).

Maxwell denklemleri dört temel denklemden oluşmakta olup, elektrik ve manyetik alanların, yükler ve akımlar tarafından zamana bağlı olarak nasıl üretildiğini ve değiştirildiğini açıklamaktadır. Maxwell denklemleri hem integral hem de diferansiyel olarak ifade edilebilmektedir. Bu çalışmada Maxwell denklemleri diferansiyel formda verilmektedir. Bu denklemler; eşitlik (3.1), (3.2), (3.3) ve (3.4) ile gösterilmektedir. Elektrik alan için Gauss yasası, bir yüzeyin çevrelediği kapalı alanın oluşturduğu hacimdeki net yükü ifade eder;

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (3.1)$$

Manyetik alan için Gauss yasasına göre ise, kapalı bir yüzeyden geçen net manyetik akı sıfırdır;

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.2)$$

Ampere yasası, manyetik alan ile manyetik alanın kaynağına neden olan akım arasındaki ilişkiyi ifade eder. Bir ortamdan akım geçerse mutlaka manyetik alan oluşur ifadesini açıklar;

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

Faraday yasasına göre, manyetik akı yoğunluğunun zamana bağlı olarak değişimi ters yönde elektrik alan oluşturur;

$$\nabla \times \vec{E} = - \vec{M} - \frac{\partial}{\partial t} \vec{B} \quad (3.4)$$

Burada eşitlikler içerisinde kullanılan parametreler Tablo 2.1’de verilmektedir.

Tablo 3.1. (3.1)-(3.4) eşitliklerinde kullanılan parametreler

Sembol	Parametre	Birim
\vec{E}	Elektrik alan şiddeti	V/m
\vec{H}	Manyetik alan şiddeti	A/m
\vec{B}	Manyetik akı yoğunluğu	W/m ²
\vec{J}	Elektrik akım yoğunluğu	A/m ²
\vec{D}	Yer değiştirme akımları	C/m ²
\vec{M}	Eş değer manyetik akım yoğunluğu	V/m ²
ρ	Hacim başına düşen birim yük yoğunluğu	C/m ³

Bunlara ek olarak homojen ve izotrop ortam için malzeme denklemleri eşitlik (3.5), (3.6) ve (3.7)’de verilmektedir;

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} = \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E} \quad (3.5)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_r \mu_0 \vec{H} \quad (3.6)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (3.7)$$

Tablo 3.2. (3.5)- (3.7) eşitliklerinde kullanılan parametreler

Sembol	Parametre	Birim
ϵ	Dielektriksel geçirgenlik katsayısı	F/m
ϵ_r	Göreceli dielektriksel geçirgenlik	birimsiz
ϵ_0	Boşluğun dielektriksel geçirgenliği	$8,854 \times 10^{-12}$ F/m
μ	Manyetik geçirgenlik	H/m
μ_r	Göreceli manyetik geçirgenlik	birimsiz
μ_0	Boşluğun manyetik geçirgenliği	$4\pi 10^{-7}$ H/m
σ	Elektriksel iletkenlik	S/m

Maxwell denklem sisteminde eğer dışarıdan kaynak olarak ilave güç kaynağı kullanılırsa bu durumda kaynağın elektrik veya manyetik olması durumuna göre denklem sistemine eklenmesi gerekmektedir. Bu durumda aşağıdaki eşitlikler;

$$J = J_{\text{kaynak}} + \sigma E \quad (3.8)$$

$$M = M_{\text{kaynak}} + \sigma^* E \quad (3.9)$$

şeklinde ifade edilir. σ^* değeri eşdeğer manyetik kaybı (ohm/m) ifade etmektedir. Burada (3.8) ve (3.9) eşitlikleri (3.3) ve (3.4) denklemlerinde yerlerine konulması ile Maxwell'in rotasyonel (curl) eşitlikleri elde edilmiş olur (Balkaya, 2010);

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \nabla \times E - \frac{1}{\mu} (M_{\text{kaynak}} + \sigma^* H) \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \nabla \times H - \frac{1}{\epsilon} (J_{\text{kaynak}} + \sigma E) \quad (3.11)$$

buradan (3.10) ve (3.11) denklemleri elde edilir. Bu denklemlerde elektrik ve manyetik alanlar vektör olduğu için toplamda altı denklem bileşenleri şeklinde yazılabilirler. Genel olarak EM alanlarını 3B olarak modellemek için yazılan programlar Maxwell denklemlerinin çözümünü gerektirir. Maxwell denklemlerinin bileşenleri;

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - J_{\text{kaynak}_x} - \sigma E_x \right) \quad (3.12a)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - J_{\text{kaynak}_y} - \sigma E_y \right) \quad (3.12b)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - J_{\text{kaynak}_z} - \sigma E_z \right) \quad (3.12c)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} - M_{\text{kaynak}_x} - \sigma^* H_x \right) \quad (3.13a)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} - M_{\text{kaynak}_y} - \sigma^* H_y \right) \quad (3.13b)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} - M_{\text{kaynak}_z} - \sigma^* H_z \right) \quad (3.14c)$$

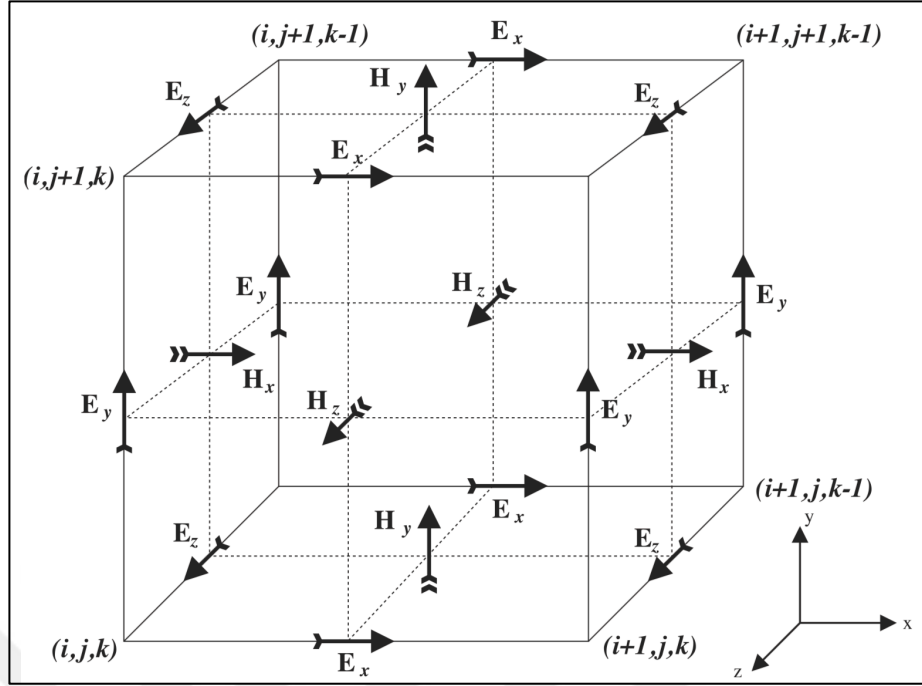
şeklinde yazılabilir (Taflove ve Hagness, 2005).

3.2. Zaman Ortamında Sonlu Farklar (FDTD) Yöntemi

Bu çalışmada Maxwell denklemlerinin sayısal olarak çözümü zaman ortamında sonlu farklar (FDTD) yöntemi ile yapılmıştır. Bu yöntemin tercih edilmesinde birçok etkili neden bulunmaktadır. Bunlardan bazıları; kısmi diferansiyel denklem çözümünde kullanılan sayısal yöntemlerin en etkililerinden biri olması, sade, anlaşılabilir, koşullu olarak kararlı, verimliliği yüksek ve son yıllarda artarak gelişen popüleriteye sahip bir yöntem olmasıdır. Sıkça tercih edilen bir yöntem olması nedeniyle, iyi araştırılmış, olgunlaşmış ve çok sayıda kitap ve araştırma kaynağına konu olmuş, bu bağlamda araştırmacılar tarafından literatürde erişimi kolay bir yöntem haline gelmiş olması başlıca nedenler arasında sayılabilmektedir (Giannopoulos, 2005).

Bu bölüm içerisinde, zaman ortamında sonlu farklar (FDTD) yönteminin temel prensipleri, sayısal eşitlikleri, sistemin kararlılık durumu ve sınır koşulları hakkında temel bilgiler verilmektedir. Zaman ortamında sonlu farklar (FDTD) yöntemi için ayrıntılı bilgi Taflove ve Hagness (2005) çalışmasından elde edilebilir.

Bu yöntem, elektromanyetik problemlerin çözümünde kullanılan en kullanışlı yöntemlerden biri olup, Maxwell denklemlerinin diferansiyel formunu ayrıklaştırarak çözümünü yapmaktadır. Zaman ortamında sonlu farklar yöntemi ilk kez (Yee, 1966) tarafından Maxwell denklemleri için uygulanmıştır. Bir diferansiyel denklemin sonlu farklar yöntemi ile çözümünün yapılabilmesi için, çözüm uzayının daha küçük hücrelere bölünmesi gerekmektedir. Sonlu farklar yönteminin hücresel yapısından dolayı, yeraltı karmaşık durumlar için de modellenebilmektedir (Kurtulmuş ve Drahor, 2008) Yee hücresinin 3B gösterimi Şekil 3.1'de verilmektedir.



Şekil 3.1. Yee hücresinin 3B gösterimi (Warren ve diğ., 2016)

E_x, E_y, E_z ve H_x, H_y, H_z değerleri x, y, z için tanımlanmış elektrik alan ve manyetik alan bileşenleridir. i, j, k ise hesaplama ağındaki hücrenin konumunu göstermektedir.

3.2.1. Notasyon ve 3B Maxwell Denklemleri İçin Sonlu Farklar Uyarlaması

Bu bölümde 3B olarak Maxwell denklemlerinin sayısal bir yaklaşımını elde etmek için sonlu farklar yöntemi anlatılmaktadır. Elektrik ve manyetik alanların 3B uzayda hesaplama ağı içerisinde her bir Yee hücresi şeklinde her üç yön için ayrıklaştırılması gerekmektedir. FDTD yönteminde her bir Yee hücresinin uzaydaki konumu (i,j,k) ile gösterilmek üzere (\vec{E}) ve (\vec{H}) alan bileşenlerinden oluşmaktadır. Şekil (3.1)'deki, hesaplama ağı üzerindeki bir alan noktası;

$$(i,j,k)=(i\Delta x,j\Delta y,k\Delta z) \quad (3.15)$$

ile gösterilmek üzere $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ sırasıyla x, y, z , yönündeki ağınlara göre değişimini ve i, j, k ise indis olarak tamsayılarından oluşmaktadır. Zaman ve konuma bağlı değişim aşağıdaki şekilde herhangi bir u fonksiyonu,

$$u(i\Delta x,j\Delta y,k\Delta z,n\Delta t)=u_{i,j,k}^n \quad (3.16)$$

olarak gösterilebilir (Taflove ve Hagness, 2005). Zamana bağlı değişim Δt ile gösterilirken, n bir tamsayıyı ifade etmektedir. Yee algoritmasında sonlu farklar yöntemi için türevler merkezi farklara göre formüle edilmiştir. $t_n = n\Delta t$ sabit zamanında, x yönünde u 'nun birinci kısmi alan türevi için,

$$\frac{\partial u}{\partial x}(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = \frac{u_{i+\frac{1}{2},j,k}^n - u_{i-\frac{1}{2},j,k}^n}{\Delta x} + O[(\Delta x)^2] \quad (3.17)$$

şeklinde verilebilir. Yee algoritmasında elektrik ve manyetik alan ayrıklaştırmaları aynı noktada yer almazlar. 3B uzayın örneğin x yönündeki her hücresinde hesaplama ağı için tam bir Δx 'lik artış yerine $\Delta x/2$ 'lik bir artış kullanılabilir. Bu durumda, manyetik alan bileşeninin her iki yanında bulunan elektrik alan bileşenleri arasındaki fark Δx kadar olacaktır. Burada H bileşenini adım lamaya olanak sağlayan $\partial E/\partial x$ için sayısal bir yaklaşım sağlamaktadır. $\frac{\partial u}{\partial y}$ ve $\frac{\partial u}{\partial z}$ benzer bir şekilde u 'nun, j ve k indisleri sırasıyla $\pm 1/2 \Delta y$ ya da $\pm 1/2 \Delta z$ kadar arttırılarak elde edilebilir. Sabit bir (i,j,k) noktasında, zamana göre kısmi türev ise izleyen şekilde,

$$\frac{\partial u}{\partial t}(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = \frac{u_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} - u_{i,j,k}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} + O[(\Delta t)^2] \quad (3.18)$$

verilebilir (Balkaya, 2010). Yee algoritmasının E_x alan bileşenine (3.12a) uygulanmış hali eşitlik (3.19)'da verilmektedir.

$$\begin{aligned} \frac{E_x|_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - E_x|_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} &= \left(\frac{1}{\epsilon_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}} \right) \frac{H_z|_{i,j+1,k+\frac{1}{2}}^n - H_z|_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n}{\Delta y} \\ &+ \left(\frac{1}{\epsilon_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}} \right) \frac{H_y|_{i,j+1,k+\frac{1}{2}}^n - H_y|_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n}{\Delta z} - \left(\frac{1}{\epsilon_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}} \right) J_{S_x}|_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n \\ &- \left(\frac{1}{\epsilon_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}} \right) \sigma_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} E_x|_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n \end{aligned} \quad (3.19)$$

$$E_x|_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n - \frac{E_x|_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - E_x|_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^{n-\frac{1}{2}}}{2} \quad (3.20)$$

Buradan da E_x bileşeni için (3.21) eşitliği elde edilir.

$$\begin{aligned} E_x|_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} &= \left(\frac{\sigma_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} \Delta t}{1 - \frac{\sigma_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} \Delta t}{2\varepsilon_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}}} \right) E_x|_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^{n-\frac{1}{2}} \\ &+ \left(\frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} \Delta t}{2\varepsilon_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}}} \right) \frac{H_z|_{i,j+1,k+\frac{1}{2}}^n - H_z|_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n}{\Delta y} \\ &- \left(\frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} \Delta t}{2\varepsilon_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}}} \right) \frac{H_y|_{i,j+\frac{1}{2},k+1}^n - H_y|_{i,j+\frac{1}{2},k}^n}{\Delta z} \\ &- \left(\frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} \Delta t}{2\varepsilon_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}}} \right) J_{s_x}|_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n \end{aligned} \quad (3.21)$$

E_y , E_z , H_x , H_y ve H_z bileşenleri için uyarlama denklemleri benzer şekilde hesaplanmaktadır. İlgili eşitliklere Taflove ve Hagness (2005) çalışmasından ayrıntılı olarak erişilebilir.

3.2.2. Kararlılık koşulu ve sayısal dispersiyon

Zaman ortamında sonlu farklar (FDTD) yönteminde, elektromanyetik alanlar uzay ortamında ayrıklaştırılarak örneklenirler. Örnekleme aralığı, çözümü kararlı kılabilmek için belirli koşullara uygun olarak seçilmelidir. Bu koşul, Courant–Friedrichs–Lewy (CFL) koşulu olarak bilinmektedir (Elsherbeni ve Demir, 2016).

Bu koşula göre; hesaplama alanını yeterli sayıda örnekleyip, örnekler arası katlanmanın önüne geçebilmek ve hassas sonuçlar elde etmek adına hesaplama bölgesindeki hücre aralıklarını $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ problemdeki en küçük dalga boyuna (λ_{\min}) uygun şekilde seçmek gerekmektedir. Seçilecek en büyük zaman aralığı (Δt) sistemi kararlı kılabilmek için Δt ile $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ arasındaki ilişkiyi tanımlayan CFL koşuluna göre belirlenir (3.22) (Çiydem ve Koç, 2014). Bu koşul;

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}} \quad (3.22)$$

denklemleri ile ifade edilir. Burada c ; ışık hızı; zaman adımı, $\Delta x, \Delta y, \Delta z$; hücre aralıklarını ifade etmektedir. Eşitlik (2.4) aşağıdaki şekilde tekrar yazıldığında;

$$c \Delta t \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}} \leq 1 \quad (3.23)$$

elde edilir. Kübik bir hücre modeli için $\Delta x = \Delta y = \Delta z$ ise CFL koşulu;

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{c\sqrt{3}} \quad (3.24)$$

şeklinde yazılabilir.

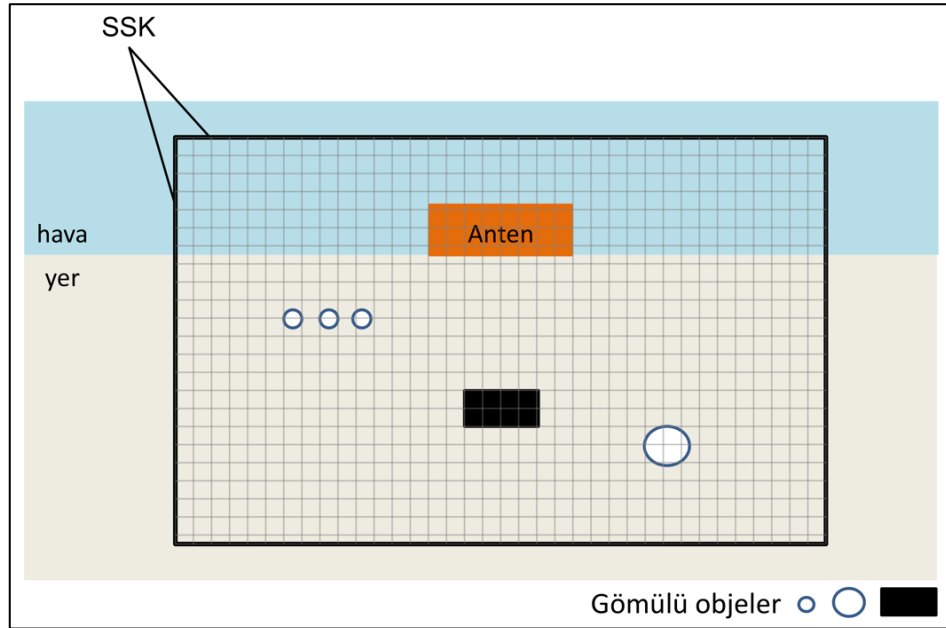
CFL koşulu, FDTD yönteminin önemli kısıtlamalarından biridir. Küçük veya ince objelerin çözümlenmesi ya da küçük dalga boyları içeren modellemelerde hücre ve zaman aralıklarının aynı oranda küçük seçilmesi gerekmektedir. Bu durum modelleme süresinin artmasına ve daha yüksek kapasiteli bilgisayarlara ihtiyaç duyulmasına sebep olmaktadır.

FDTD yönteminde karşılaşılan en önemli hatalardan birisi, sonlu hesaplama alanındaki elektromanyetik dalganın yayılma hızı ile ilişkilidir. Bu durum sayısal dispersiyon olarak bilinmektedir. Sayısal dispersiyon, elektromanyetik dalga hızlarının frekansa bağımlı olma durumu olarak açıklanabilmektedir. Bu gerçek hayatta kayıpsız bir ortam için elektromanyetik dalganın tüm frekanslar için aynı faz hızıyla ilerlemesi anlamına gelse de bir FDTD modelinde sayısal faz hızının gerçek faz hızından farklı olduğu anlamına gelmektedir. Sayısal faz hızının gerçek faz

hızından sapma eğilimi göstermesi, hesaplama alanındaki en küçük dalga boyuna göre seçilmesi gereken hücre aralığına ve aynı zamanda sayısal model içerisindeki elektromanyetik dalgaların yayılma yönüne bağlıdır (Diamanti, 2008). Sayısal dispersiyon analizi Taflove ve Hagness, (2005)'de tüm ayrıntılarıyla verilmektedir.

3.2.3. Sınır koşulları

FDTD metodu sıklıkla uzayın sınırsız veya açık bölgelerini modellemek için kullanılır. Sayısal modellerin FDTD yöntemi ile oluşturulabilmesi için gerçekte sınırları olmayan bölgenin yapay sınırlar ile sonlandırılması gerekmektedir (Balkaya, 2010). FDTD hesaplamasında kullanılacak model alanının gerçeğe yakın bir şekilde temsil edilebilmesi için model çeperi soğurucu sınırlar ile sınırlandırılmaktadır. Böylelikle hem model sınırlarından kaynaklanabilecek gerçekte var olmayan yansımaların önüne geçilmiş olacak hem de sonsuz alan benzetimi yapılmış olacaktır. Modellerin soğurucu sınırlar ile sınırlandırılmasının bir diğer avantajı da bilgisayarlar ile yapılacak işlemlerin makul seviyede tutulmasına olanak sağlamasıdır. Soğurucu sınırlar, modeli oluşturan tüm önemli bileşenleri (kaynak, alıcı, gözlemlenmek istenilen jeolojik katman ya da gömülü herhangi bir obje vb.) içerisine alacak şekilde belirlenmelidir. Şekil 3.2 gerçek problem alanı ile FDTD için belirlenen model alanı arasındaki bu temel farkı göstermektedir.



Şekil 3.2. Soğurucu Sınır Koşulları (SSK) ile sınırlandırılmış ve hücelere ayrılmış hesaplama alanı

4. TOPRAĞIN DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİ

Yer radarı uygulamalarının önemli bir kısmı, çeşitli toprak ve kayaç türlerinden oluşan yeraltı yapılarını ölçmeyi ve haritalandırmayı hedeflemektedir. Yeraltı malzemelerine ait dielektriksel özellikler yer radarı performansını doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle yer radarı yönteminin performansını tahmin edebilmek ve yeraltındaki saçılma mekanizmaları hakkında fikir edinebilmek amacıyla toprağın dielektrik özelliklerinin doğru bir şekilde tanımlanması gerekmektedir (Giannakis, 2016). Literatürde toprak yapısı ve jeofiziksel parametreleri birbirleri ile ilişkilendiren çeşitli modeller yer almaktadır. En yaygın modeller su içeriği ile ilişkili olanlardır (Wunderlich, 2012). Toprağın dielektrik özellikleri; toprak içeriğinin yapısına, bileşenlerine ve su içeriğine göre birçok araştırmacı tarafından ele alınmış bir araştırma konusudur. Bu bölümde toprağın dielektrik özelliklerini tanımlamada kullanılan bazı yöntemlere değinilecektir.

4.1. Toprak için Dielektriksel Geçirgenlik Modelleri

Toprağın dielektrik geçirgenlik değeri, içerisinde barındırdığı su miktarından doğrudan etkilenmektedir. Bu nedenle su içeriği, toprağın dielektriksel özelliklerin tanımlamada kilit rol oynamaktadır. Su içeriği ile dielektriksel geçirgenlik değerini ilişkilendiren modeller bulunmaktadır. Bu modeller; gözlemsel ve yarı gözlemsel, hacimsel karışım modelleri ve efektif karışım modelleri olmak üzere üç grupta ifade edilebilir (Steelman ve Endres, 2011). Literatürde gözlemsel modellere örnek olarak; (Topp ve diğ., 1980; Nadler ve diğ., 1991; Roth ve diğ., 1992; Jacobsen ve Schjønning, 1993); yarı gözlemsel modeller için ise Dobson ve diğ. (1985) ve Peplinski ve diğ. (1995b) gösterilebilir. Hacimsel karışım modelleri için ise; CRIM (Complex Refractive Index Model) olarak Lichtenecker ve Rother (1931)'de tanımlanan Birchak ve diğ., (1974) ve Greaves ve diğ., (1996) ile çeşitlendirilen CRIM modeli sayılabilir. Efektif karışım modellerine örnek olarak; Steelman ve Endres (2011) ve Wunderlich ve diğ. (2013) çalışmaları incelenebilir. Bu tez çalışması kapsamında Topp, CRIM ve Dobson (Peplinski) Modelleri tanıtılacaktır.

4.1.1. Topp modeli

Topp eşitliği ya da modeli olarak bilinen ve Topp ve diğ., (1980) çalışmasında tanımlanmakta olan bu model, toprağın su içeriği ile ortamın bağıl dielektrik geçirgenlik değerini ilişkilendiren ve günümüzde birçok araştırmada halen ilk sırada tercih edilen bir modeldir. Bu model, TDR deneyleri ile kumlu/killi toprakların ölçülen yani gözlemsel bağıl dielektrik geçirgenlik değerlerine göre elde edilmiş üçüncü derecen bir polinom olarak ifade edilebilir. 10 MHz ile 1 GHz aralığındaki frekanslar için geçerlidir (Jol, 2009). Topp modeli eşitlik (4.1) ile verilmektedir;

$$\epsilon_{m(10\text{ Mhz-1Ghz})}=3.03+9.3\theta+146.0\theta^2-76.7\theta^3 \quad (4.1)$$

burada; ϵ_m toprak karışımının göreceli dielektrik geçirgenliğini ifade ederken, θ ise ortamın su içeriğini göstermektedir. Yapılan kapsamlı testler, Topp tarafından önerilen bu modelin birçok toprak türü için makul derece doğru sonuçlar verdiğini göstermiştir; ancak tüm olası su içeriği ve gözeneklilikler üzerinde doğruluğu kanıtlanmamıştır (Noborio, 2001). Topp modeli, ortamın göreceli dielektrik değerinin bir fonksiyonu olarak eşitlik (4.2) formülü ile de verilebilir;

$$\theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \epsilon_m - 5.5 \times 10^{-4} \epsilon_m^2 + 4.3 \times 10^{-6} \epsilon_m^3 \quad (4.2)$$

4.1.2. CRIM modeli

CRIM modeli ilk kez Lichtenecker ve Rother (1931) tarafından ortaya atılan hacimsel bir karışım modelidir. Bu model toprak karışımını; hava, su ve taneciklerden oluşan üç bileşenli, tek boyutlu ve katmanlı bir yapı olarak kabul etmektedir (Jol, 2009). Böylece üç fazlı bu sistem için karışım modeli, hava, su ve taneciğin hacimsel fraksiyonları alınarak elde edilebilir. $V_{\text{hava}} = \phi - \theta$, $V_{\text{su}} = \theta$ ve $V_{\text{tanecik}} = 1 - \phi$ olarak ifade edilebilir. Burada V ; hacim, ϕ ; gözeneklilik ve θ ; su içeriğini ifade etmektedir (Wunderlich, 2012). CRIM modeli;

$$\epsilon_b^\alpha = \sum_{i=1}^n \eta_i \epsilon_i^\alpha \quad (4.3)$$

(4.3) eşitliği ile verilmektedir (Lichtenecker ve Rother, 1931).

Bu model ayrıca α ile gösterilen üstel matematiksel bir değeri de içermektedir. Bu üstel matematiksel değeri 0,5 olarak kabul eden (Greaves ve diğ., 1996) CRIM modelini (4.4)'deki gibi ifade etmektedir;

$$\varepsilon_e = [\phi S_w \sqrt{\varepsilon_w} + (1-\phi) \sqrt{\varepsilon_g} + \phi(1-S_w) \sqrt{\varepsilon_a}]^2 \quad (4.4)$$

burada; ϕ ; gözeneklilik, S_w ; suya doygunluk (sıvı ile dolu gözenek boşluğunun yüzdesi), ε_e ; karışımın efektif göreceli dielektriksel geçirgenlik değerini ifade etmektedir, ε_w ; suya ait göreceli dielektriksel geçirgenlik değerini, ε_g ; taneciğin göreceli dielektriksel geçirgenlik değerini ve ε_a ; havanın göreceli dielektriksel geçirgenlik değerini ifade etmektedir.

Farklı deneysel çalışmalar sonucunda araştırmacılar bu üstel değer için (α) farklı değerler önermiştir; Roth ve diğ., (1990) çalışmasında bu üstel değeri üç fazlı sistem için 0,46 olarak önerirken, Dobson ve diğ., (1985) çalışmasında dört fazlı sistem için bu değeri 0,65 olarak kullanmıştır. Diğer çalışmalar bu parametrenin mineral tanelerinin ve gözenek sıvılarının geometrisine bağlı olarak 0,25 ile 0,80 arasında değişebileceğini göstermiştir (Steelman ve Endres, 2011).

4.1.2.1. NAPL uygulamaları için CRIM modeli

CRIM modeli içerisinde NAPL türü kirleticileri barındıran modeller için yeni bir formda kullanılabilir (Ajo-Franklin ve diğ., 2004). CRIM modeli NAPL içeren ortamlar için eşitlik (4.5)'deki gibi tekrar yazılabilmektedir;

$$\varepsilon_e = [\phi (S_w \sqrt{\varepsilon_w} + S_n \sqrt{\varepsilon_n}) + (1-\phi) \sqrt{\varepsilon_g}]^2 \quad (4.5)$$

burada eşitlik (4.4) ile verilen CRIM modelinden farklı olarak, S_n =NAPL doygunluğu, ε_n = NAPL için göreceli dielektriksel geçirgenlik değerini ifade etmektedir.

4.1.3. Dobson (Peplinski) modeli

Bu model, Dobson ve diğ., (1985) çalışmasıyla ilk kez önerilmiş, toprağın göreceli dielektriksel geçirgenlik değerine; bulk yoğunluğuna, kum parçacıklarının yoğunluğuna, kum oranına, kil oranına ve suyun hacimsel miktarına bağlı olarak

hesaplamaktadır. Bu parametrelerin kullanımı ile gerçekçi model tasarımları gerçekleştirilebilmektedir (Giannakis, 2016).

Bu model ilk olarak, 1,4–18 GHz frekans aralığı için (Dobson ve diğ., 1985) çalışmasında önerilmiştir. Önerilen eşitliğin bu formu 1,4 GHz'den daha küçük olan frekanslar için, bağıl dielektrik geçirgenliğin reel kısmını (ϵ') olduğundan daha küçük hesaplarırken, sanal kısmını ise olduğundan daha büyük hesapladığı (ϵ'') için Peplinski ve diğ., (1995a) ve Peplinski ve diğ., (1995b) ile 0,3–1,3 GHz için yeni bir düzenleme yapılmıştır. Kullanılan antenin merkez frekansına bağlı olarak, kullanılan merkez frekansın 1,4 GHz'den büyük olması durumunda 1,4–18 GHz frekans aralığı için geçerli olan Dobson ve diğ. (1985) tarafından önerilen (4.6) eşitliği kullanılmaktadır. Merkez frekansın 1,4 GHz'in altında olması durumunda 0,3–1,3 GHz için geçerli olan Peplinski ve diğ. (1995b) ile önerilen (4.7) eşitliği kullanılmaktadır. Buna göre;

$$\epsilon'_{(1,4-18 \text{ GHz})} = \epsilon_0 \left(1 + \frac{\rho_b}{\rho_s} (\epsilon_s^a - 1) + m_u^{\beta'} \epsilon_w^{\alpha'} - \theta \right)^{1/\alpha} \quad (4.6)$$

$$\epsilon'_{(0,3-1,4 \text{ GHz})} = 1,15 \epsilon'_{(1,4-18 \text{ GHz})} - 0,68 \quad (4.7)$$

$$\epsilon'' = \epsilon_0 m_u^{\beta''} \left(\frac{\sigma_f (\rho_s - \rho_b)}{\omega \epsilon_0 \rho_s m_u} - \epsilon_w'' \right) \quad (4.8)$$

$$\epsilon_s = (1,01 + 0,44 \rho_s)^2 - 0,062 \quad (4.9)$$

$$\beta' = 1,2748 - 0,519S - 0,152C \quad (4.10)$$

$$\beta'' = 1,33797 - 0,603S - 0,166C \quad (4.11)$$

$$\epsilon_w = \epsilon_{w,\infty} + \frac{\epsilon_{w,s} - \epsilon_{w,\infty}}{1 + j\omega t_{0,w}} \quad (4.12)$$

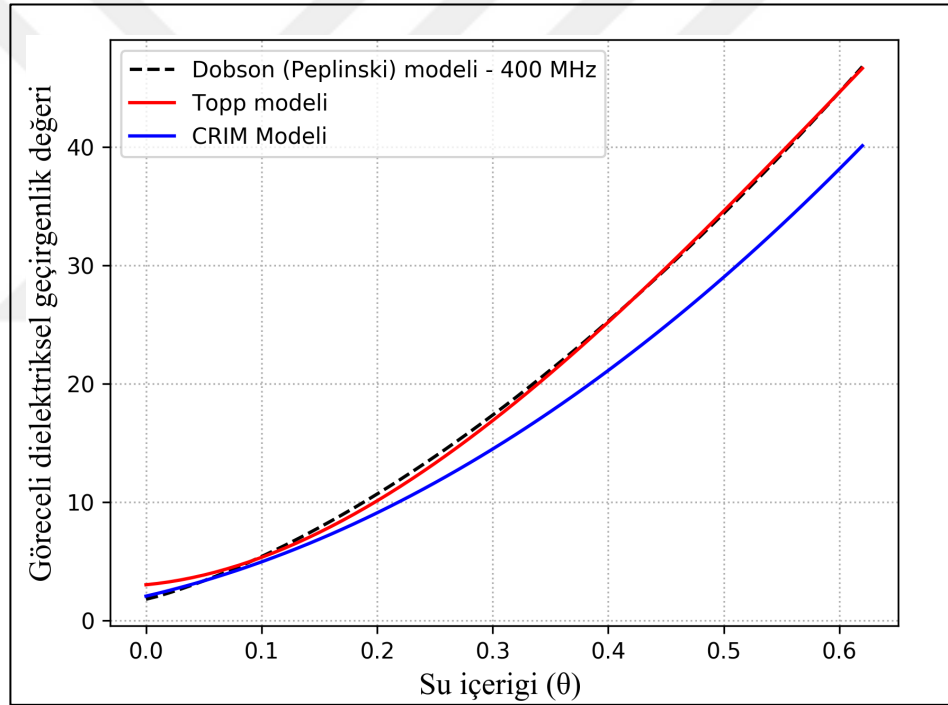
$$\sigma_{f(1,4-18 \text{ GHz})} = -1,645 + 1,939\rho_b - 2,25622S + 1,594C \quad (4.13)$$

$$\sigma_{f(0,3-1,3 \text{ GHz})} = 0,0467 + 0,2204\rho_b - 0,411S + 0,6614C \quad (4.14)$$

olarak ifade edilebilmektedir. (4-6) ve (4-12) arasındaki eşitliklerde kullanılan parametreler incelendiğinde; $\epsilon_m = \epsilon' - j\epsilon''$ malzemenin kompleks dielektriksel geçirgenlik değerini tanımlar, j burada sanal bileşendir. θ suyun hacimsel içeriğidir, ρ_s kumun tanecik yoğunluğu (g/cm^3) iken ρ_b bulk yoğunluğudur (g/cm^3), ϵ_s kum

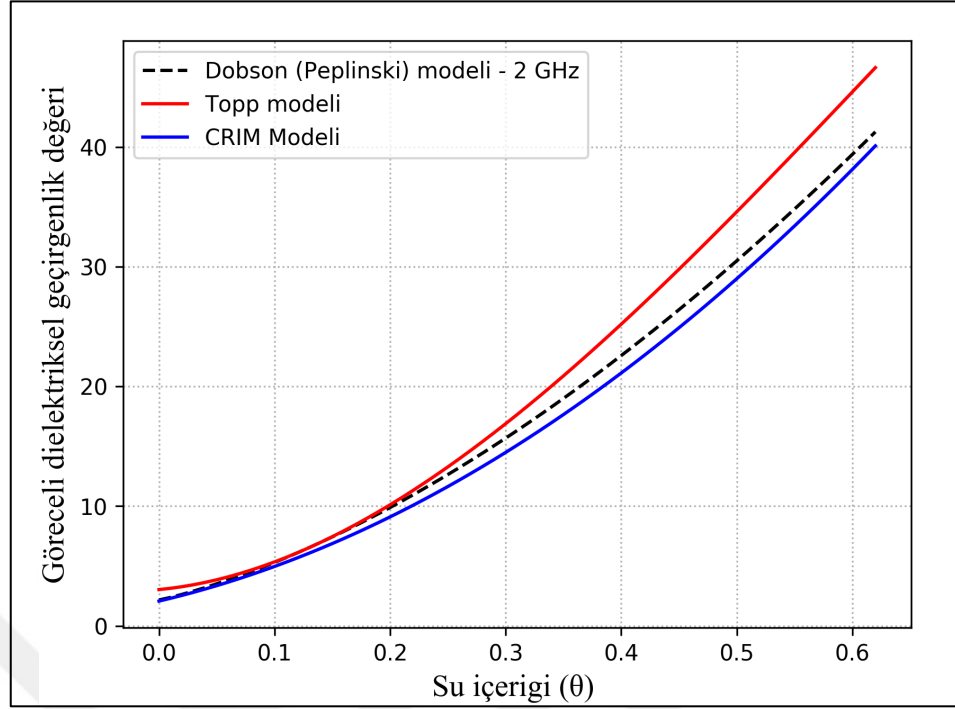
taneciklerinin göreceli dielektriksel geçirgenlik değeridir, $\alpha=0.65$ deneysel olarak türetilmiş üstel bir sabittir, S ve C sırasıyla toprak karışımının içerdiği kum ve kil içerikleridir. $t_{0,w}=9,23 \times 10^{-12}$ sn suyun gevşeme süresidir, $\epsilon_{w,s}$ ve $\epsilon_{w,\infty}$ ise sırasıyla suyun sıfır ve sonsuz frekans için sahip olduğu göreceli dielektriksel geçirgenlik değerleri olup yine sırasıyla 80,1 ve 4,9'dur. (4-13) ve (4-14) eşitliklerinde kullanılan σ_f terimi, iletkenlik ile doğrusal orantılı bir terimdir.

Bu bölümde su içeriği ile toprağa ait göreceli dielektriksel geçirgenlik değerini ilişkilendiren Topp, CRIM ve Dobson (Peplinski) modelleri tanıtılmıştır. 400 MHz'lik merkez anten frekansı için su içeriği ile göreceli dielektriksel geçirgenlik değeri değişimleri Şekil 4.1'de verilmektedir.



Şekil 4.1. 400 MHz anten frekansının için hesaplanmış su içeriği-göreceli dielektriksel geçirgenlik grafiği

Benzer hesaplamalar 2 GHz merkez anten frekansı için yapıldığında Şekil 4.2'deki grafik elde edilmektedir.



Şekil 4.2. 2 GHz anten frekansının için hesaplanmış su içeriği-göreceli dielektriksel geçirgenlik grafiği

Bu örnekte toprak karışımının %10 oranında kum, %90 oranında kil içerdiği $\rho_b=1 \text{ gr/cm}^3$ ve $\rho_s=2,66 \text{ gr/cm}^3$ olarak belirlenmiştir. Elde edilen grafikler incelendiğinde, anten frekansının değişiminin, Topp ve CRIM modelleri üzerinden bir etkisi olmadığı görülmektedir; ancak Dobson (Peplinski) modeli iki farklı frekans aralığında hesaplamalar sunduğu için, beklendiği üzere iki grafik arasında değişiklikler göstermektedir. Şekil 4.1'de görüleceği üzere Dobson (Peplinski) modeli 400 MHz (0,3-1,3 GHz aralığı) için hesaplanan Topp modeli değerlerine yakın iken, 2 GHz merkez frekansı (1,4-18 GHz aralığı) için hesaplanan CRIM modeli değerlerine daha yakın çıkmaktadır (Şekil 4.2).

4.2. Toprak için Elektriksel İletkenlik Modelleri

Bu bölümde toprağın elektriksel iletkenliğini hesaplamada kullanılan iki gözlemsel yöntemle değinilecektir. Bu modeller, elektriksel iletkenlik ile hacimsel su içeriğini ilişkilendirmektedir. İlk yöntem, Archie yasası olarak bilinen, Archie, (1942) tarafından ortaya atılmıştır. Archie yasası, özellikle kumlu ortamlarda son derece başarılı sonuçlar verirken, kil içeriği bulunan karışımlarda ise geçersiz kalmaktadır. Bu tür

örnekler içinse, ikinci yöntem olan Waxman ve Smits (1968) modeli başarılı sonuçlar vermektedir.

4.2.1. Archie yasası

Archie yasası; petrol içeren kumtaşları için geliştirilmiştir. Bu yasa, bulk elektrik rezistivitesini, sıvının rezistivitesi ve suya doymuluk oranı ile ilişkilidir. Archie yasası;

$$\rho_m = \alpha \cdot \rho_w \cdot \phi^{-m} S_w^{-n} \quad (4.15)$$

eşitlik (4.15)'deki şekliyle ya da eşitlik (4.16)'de verildiği şekliyle ifade edilebilir;

$$\frac{1}{\sigma_m} = \frac{1}{\sigma_w} \cdot \frac{\alpha}{\phi^m S_w^n} \quad (4.16)$$

burada; σ_m malzemenin elektriksel iletkenliği, S_w suya doymuluk, formasyon sabitleri olan $\alpha=1$ ve $m=n=2$ olarak kabul edilmiştir. Archie ampirik olarak yüksek tuzluluk derecesine sahip doymuş temiz kumtaşı örnekleri için bu değerleri belirlemiş ve hesaplanmalarında kullanmıştır. σ_w ise gözeneklerdeki suyun iletkenlik değeridir.

Toprak modeli içerisinde ihmal edilemeyecek oranda kil olması durumunda eşitlik geçerliliğini kaybetmektedir. Bunun nedeni, kil minerallerinin elektriksel çift tabakaları nedeniyle ek bir yüzey iletkenliğine sahip olmalarıdır (Wunderlich, 2012).

4.2.2. Waxman-Smits modeli

Waxman ve Smits (1968) çalışmalarıyla, toprağı ya da kayayı iki paralel direnç olarak tanımlayan gözlemsel bir model geliştirmişlerdir. Bunlardan ilki, gözeneklerdeki sıvılardan kaynaklı iletkenlik diğeri ise kil mineralinden kaynaklanan iletkenliktir (Taylor ve Barker, 2006). Bu model;

$$\sigma_m = \frac{\alpha \cdot S_w^n}{\phi^m} \cdot (\sigma_w + \sigma_s) \quad (4.17)$$

eşitlik (4.17) ile verilmektedir. Burada σ_s ; katı cismin elektriksel iletkenliği, m ve n ise sırasıyla sementasyon ve suya doymuluk için üstel bir değerdir.

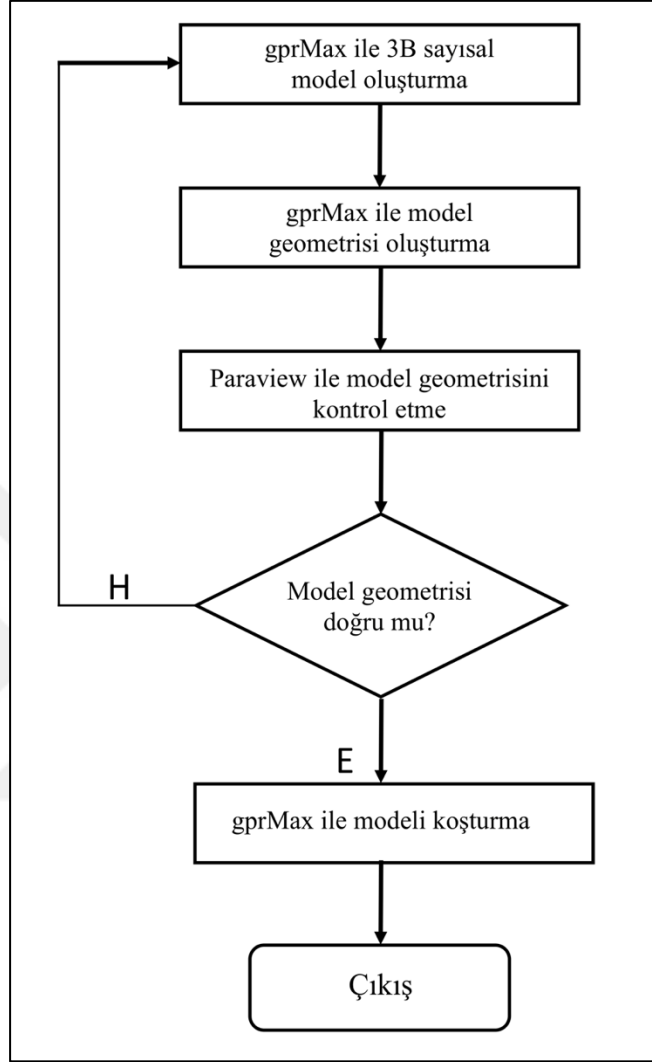
5. gprMax ile 3B SAYISAL MODELLEME

5.1. gprMax Genel Tanımlamalar

Zaman ortamında sonlu farklar (FDTD) yöntemini kullanarak sayısal modelleme yapabilen çeşitli yazılımlar bulunmaktadır. Bu yazılımların bir kısmı akademik amaçla yazılmış olup, tüm kullanıcıların erişebileceği açık kaynak kodlu yazılımlardır (Giannopoulos, 2005; Irving ve Knight, 2006) diğer tür yazılımlar ise ticari amaçla geliştirilmiş olup, kâr amacı taşımaktadırlar [URL:2]. Bu tez çalışmasında sayısal modelleme benzetimleri için gprMax yazılımı kullanılmıştır. gprMax, elektromanyetik dalga yayılımını benzetimi yapan açık kaynak kodlu ve kullanıcıları tarafından geliştirilebilen bir sayısal modelleme yazılımıdır (Warren ve diğ., 2016). gprMax, Yee algoritmasını kullanarak zaman ortamında sonlu farklar yöntemi ile 2B ve 3B modelleme yapabilmektedir. Bu yazılımı kullanarak farklı araştırma konuları için elektromanyetik dalga benzetimleri yapan araştırmacı sayısı günbegün artmaktadır (Gao ve diğ., 2019; Redman ve diğ., 2016; Ponti ve diğ., 2017; Lv ve diğ., 2018). Bu tez çalışması içerisinde yapılan tüm modelleme benzetimlerinde gprMax yazılımı kullanılmıştır. Tez çalışmasında bu yazılımın tercih edilmesinin birçok teşvik edici sebebi bulunmaktadır. Bunlardan bazıları; gprMax yüksek kalitede iki ve üç boyutlu model benzetimi yapma olanağı sunmaktadır. Windows, Unix, Linux, Mac OS işletim sistemlerinde çalışabilmektedir. CPU ve GPU sistemlerine entegre olarak yüksek hızda modellemeler yapabilmektedir. Ticari yer radarı anteni tasarımlarına olanak sağlamaktadır. Kütüphanesinde hâlihazırda modellenmiş ticari antenler bulundurmaktadır. Heterojen ve anizotropik model tasarımlarına olanak sağlamaktadır. Tasarlanan modellere yüzey bozukluğu, yüzey suyu ve bitki örtüsü ekleyerek gelişmiş model tasarımlarına olanak sağlamaktadır. Açık kaynak kodlu ücretsiz bir yazılımdır.

Bu çalışma kapsamında gprMax yazılımı ile oluşturulan modeller bir diğer açık kaynak kodlu görselleştirme yazılımı olan Paraview ile görselleştirilmiştir. Bu yazılım hakkında ayrıntılı bilgi edinmek ve farklı uygulama örnekleri görebilmek

için Ahrens ve diğ., (2005) ve Ayachit ve diğ., (2015) incelenebilir. gprMax ile sayısal benzetimler yapılırken izlenen akış diyagramı Şekil 5.1’de gösterilmektedir.



Şekil 5.1. gprMax ile modelleme için izlenen işlem adımları

Bir sayısal modeli gprMax ile oluştururken herhangi bir metin editörü kullanılabilir. gprMax ile model tasarımı için kullanılan komutlar altı ana başlık altında toplanmaktadır. Bu başlıklar; temel komutlar, genel komutlar, ortam tanımlama komutları, nesne tanımlama komutları, kaynak ve çıktı tanımlama komutları ve sınır koşulları tanımlama komutlarıdır.

Bu komutlar ile ilgili ayrıntılı bilgi [URL:3]'den elde edilebilir. Bu komutlar kullanılarak oluşturulmuş bir giriş dosyası Şekil 5.2’de verilmektedir.

```
#title: 3 boyutlu silindir modeli

#domain: 0.50 0.148 0.235
#dx_dy_dz: 0.001 0.001 0.001
#time_window: 6e-9

#material: 5.0 0.01 1 0 ortam

#box: 0 0 0 0.50 0.148 0.170 ortam
#cylinder: 0.250 0.02 0.060 0.250 0.12 0.060 0.010 pec

#waveform: gaussiandot 1 1.5e9 kaynak
#hertzian_dipole: y 0.105 0.074 0.170 kaynak
#rx: 0.175 0.074 0.170
#src_steps: 0.005 0 0
#rx_steps: 0.005 0 0

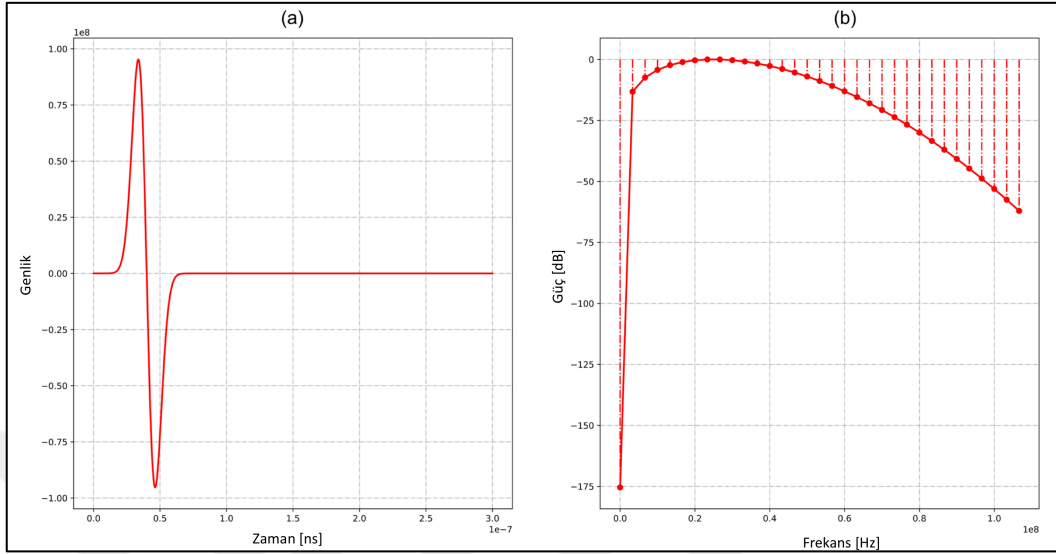
#geometry_view: 0 0 0 0.50 0.148 0.235 0.001 0.001 0.001 model_geometrisi n
```

Şekil 5.2. gprMax giriş dosyası örneği

Bu örnekte kullanılan parametreler incelendiğinde; “title” modelin ismini tanımlanırken, “domain” oluşturulacak modelin boyutlarını tanımlar, “dx_dy_dz” parametresi hücre aralığını belirler, “time_window” kayıt süresini göstermektedir. “material” kullanılan malzemelerin fiziksel özelliklerinin tanımlandığı çok önemli bir parametredir, dört değer ve bir tanımlayıcıdan oluşur. İlk değer malzemeye ait göreceli dielektriksel geçirgenlik değerini, ikinci değer elektriksel iletkenliğini, üçüncü değer göreceli manyetik geçirgenliği, dördüncü değer manyetik kaybı ifade eder. Tanımlayıcı parametre ise fiziksel özellikleri bu dört parametre ile tanımlanan malzemeyi isimlendirir. “box” ve “cylinder” ortama eklenecek nesnelerin geometrisini ifade eder. “waveform” kullanılan kaynak dalgacığının türünü ve merkez frekansını tanımlar. “hertzian dipole” kaynak türünü ve pozisyonunu belirtir. “rx” alıcı pozisyonunu, “src_steps” kaynağın hangi yönde ne aralıkta ilerleyeceğini ifade ederken “rx_steps” ise alıcının hangi yönde ve aralıkta ilerleyeceğini tanımlar. Son olarak “geometry_view” parametresi model geometrisinin 2B veya 3B olarak çizdirilmesine olanak sağlar.

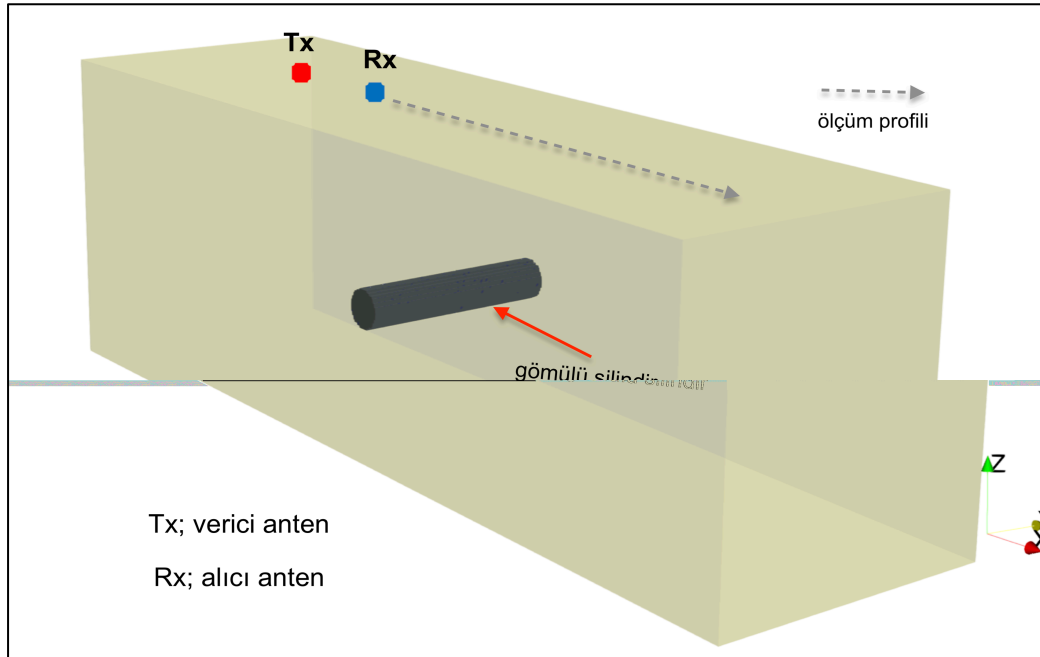
Bu tez çalışmasında model benzetimlerinde kaynak olarak Gaussian dalga formunun ilk türevini temsil eden gaussiandot dalgacığı kullanılmıştır (Şekil 5.3). Bu dalgacığın tercih edilmesinin nedeni, piyasadaki birçok ticari anten modelinin kaynak dalgacığının bu formda olmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 5.2’de verilen giriş dosyasının oluşturduğu modeli görselleştirmek için Paraview yazılımı ile

geometri dosyasının kontrol edilmesi gerekmektedir. Şekil 5.4 bu giriş dosyasının oluşturduğu model geometrisini göstermektedir.



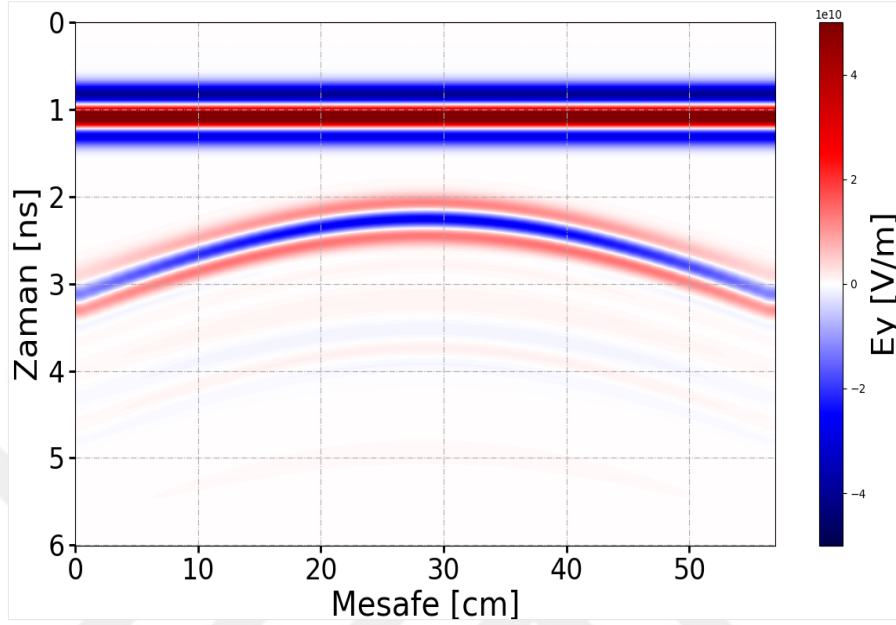
Şekil 5.3. Gaussiandot dalga formu örneği, a) zaman ortamında gösterimi, b) güç spektrumu

Şekil 5.2'deki giriş dosyasından elde edilen geometri dosyası oluşturulduktan sonra ayrıntılı olarak incelenir. Şekil 5.4'de model dosyasının doğru bir şekilde oluşturulduğundan emin olunduktan sonra bir sonraki adıma geçilebilir.



Şekil 5.4. Şekil 5.2'de verilen gprMax giriş dosyası ile elde edilen model geometrisinin görselleştirilmesi

Şekil 5.1’de verilen işlem akış adımlarının “çıkış” adımından bir önceki safhası olan “gprMax ile modeli koşturma” işlemi gerçekleştirilebilir. Bu adımda uygulanması sonucunda ilk sentetik radargram elde edilmiş olur (Şekil 5.5).



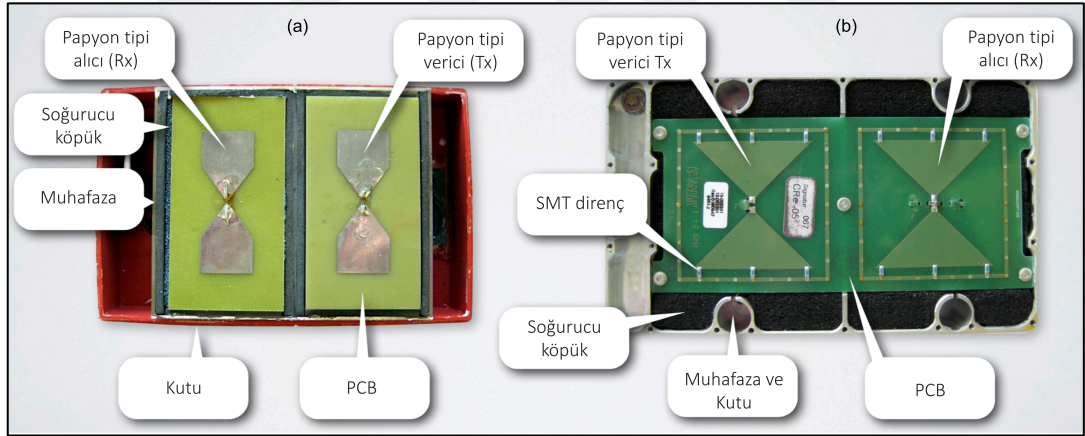
Şekil 5.5. Şekil 5.2’de verilen gprMax giriş dosyası koşturularak elde edilen sentetik radargram

5.2. Ticari Anten Modelleri

Ticari anten modelleme çalışmaları son yıllarda üzerinde önemle durulan bir araştırma konusu haline gelmiştir. Bu çalışmalar ile sahada kullanılan GPR antenleri, spesifik özellikleri göz önünde bulundurularak zaman ortamında sonlu farklar (FDTD) yöntemi ile gerçeğine uygun tasarlanabilmektedir. Gerçek anlamda herhangi bir marka/model anten modellemesi antene ait tüm detay bilgilerin elde edilmesi durumunda başarıyla gerçekleştirilebilmektedir. Bu tür çalışmalarda karşılaşılan en büyük engel ise GPR sistemi üreticisi firmaların ticari kaygılar gözeterek, antenlerin spesifik özellikleri (kullanılan malzemeler, alıcı-verici antenin pozisyonu, soğurucu malzemenin dielektriksel özellikleri vb.) hakkında detayları araştırmacılar ile paylaşmamasından kaynaklanmaktadır. gprMax yazılımı kütüphanesi içerisinde gerçeğine uygun olarak tasarlanmış ve kullanıcıların kullanımına açık olan üç farklı GPR anten modeli bulunmaktadır. Bu antenlerden iki tanesi yüksek frekanslı olup; GSSI firmasının 1,5 GHz ve MALA firmasının 1,2 GHz merkez frekanslı yer radarı antenleridir. Sonuncu anten ise yine GSSI firmasının 400 MHz merkez frekansına

sahip antenidir. Bu antenler modellenirken içleri açılarak ayrıntılı olarak incelenmiş, tüm bileşenlerin analizi yapılmıştır. GSSI 1,5 GHz ve MALA 1,2 GHz anten modeli için Warren ve Giannopoulos (2011) ve GSSI 400 MHz anten modeli için ise Stadler (2017) incelenebilir.

Bugüne dek yer radarı için yapılmış sayısal modelleme çalışmalarının büyük çoğunluğu 2B olarak yapılmıştır. Bu nedenle doğal olarak bu çalışmalarda teorik kaynaklar tercih edilmiştir. 3B modelleme çalışmalarının da önemli bir kısmında teorik kaynaklar yer radarı antenlerini temsilen tercih edilmiştir (Diamanti ve diğ., 2016; Algeo ve diğ., 2018); ancak özellikle iz bazında karşılaştırmalarda elde edilen sentetik sonuçlar ile gerçek saha sonuçlarının kıyaslanamaz genlik değerlerine sahip oldukları görülmüştür. Bu nedenle gerçekçi ticari anten modellemeleri için çalışmalar hız kazanmıştır. Şekil 5.6'da muhafazası açılmış GSSI firmasına ait 1,5 GHz ve MALA firmasına ait 1,2 GHz yüksek frekanslı yer radarı antenleri gösterilmektedir.



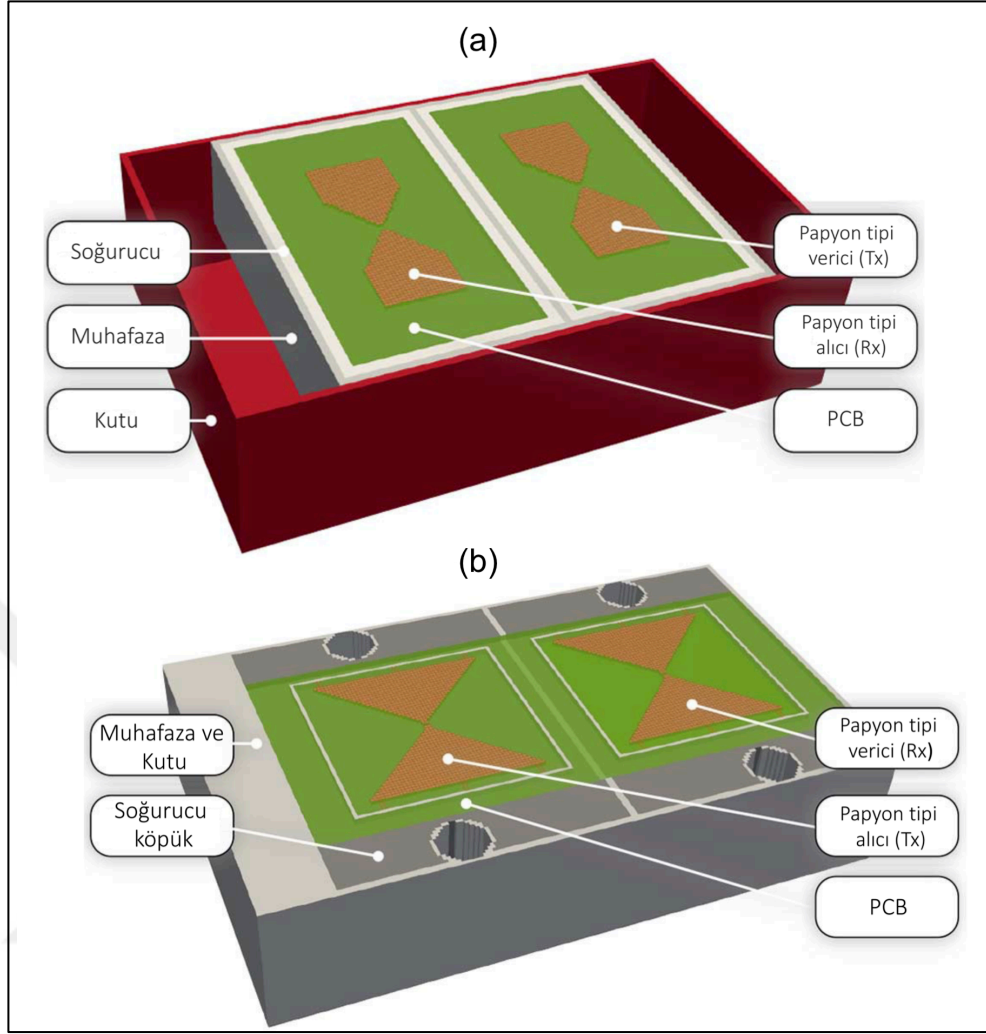
Şekil 5.6. Muhafazası açılmış yer radarı antenleri a) GSSI firmasına ait 1,5 GHz, b) MALA firmasına ait 1,2 GHz merkez frekanslı GPR anteni (Warren ve diğ., 2011)

Ticari bir anten modelinin gerçeğine benzer özelliklerde tasarlanabilmesi için anteni oluşturan tüm parçaların fiziksel ve geometrik özellikleri bilinmelidir. GSSI firmasının 1,5 GHz merkez anten frekansına sahip anteni Tablo 5.1'de verilen dielektriksel özellikler kullanılarak modellenmiştir. Antenin parçalarını oluştururken kullanılan ve dielektriksel özellikleri yaygın olarak bilinen bu malzemelerin (plastik, metal vb.) yanı sıra dielektriksel özellikleri doğrudan bilinmeyen malzemeler de bulunmaktadır.

Tablo 5.1. Anten modellemesinde kullanılan bazı malzemelerin göreceli dielektriksel geçirgenlik ve elektriksel iletkenlik değerleri (Warren ve diğ., 2011)

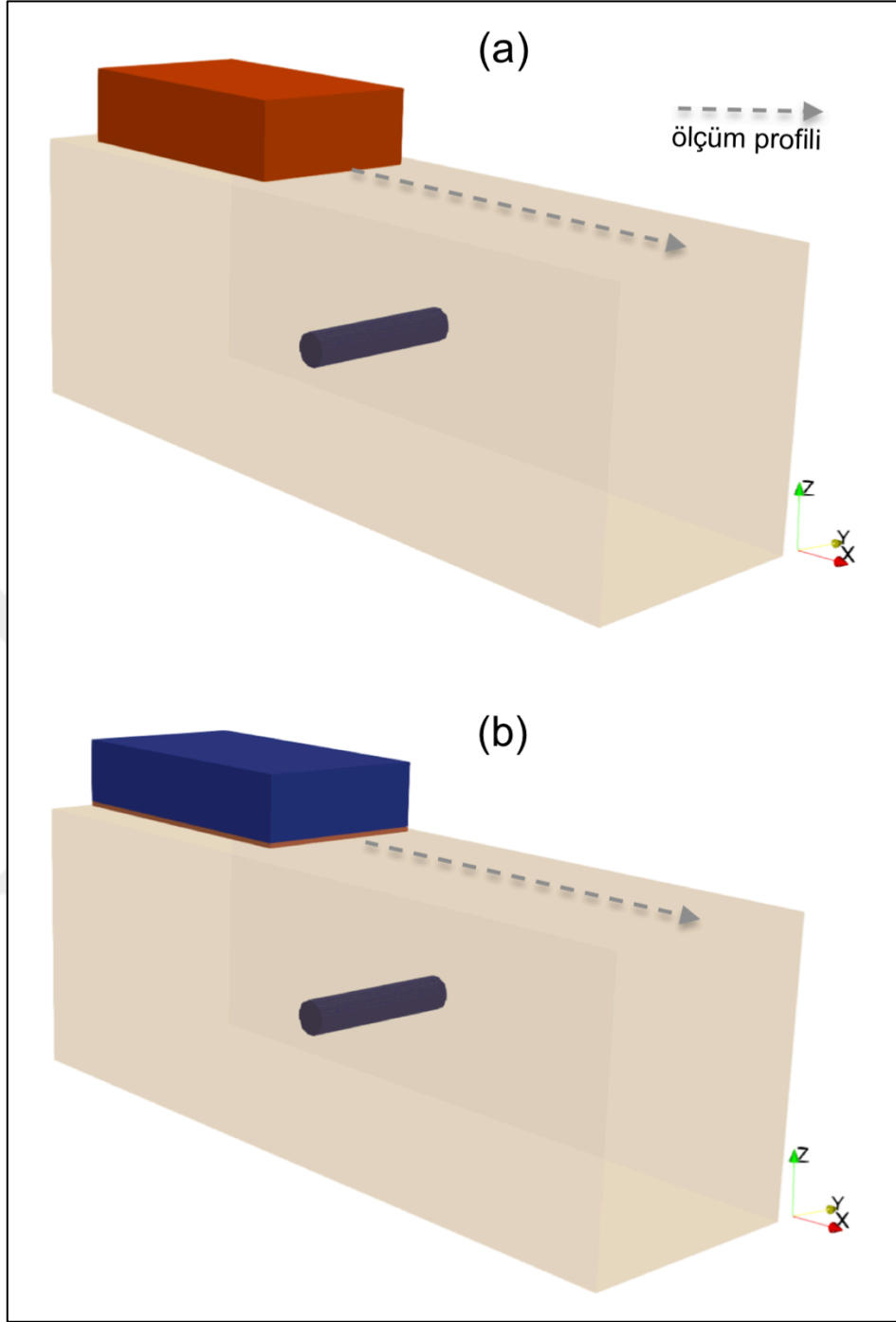
Bileşen	Malzeme türü	Göreceli Dielektrik Sabiti (ϵ)	Elektriksel İletkenlik (σ) (S/m)
Papyon	Bakır	1,00	$59,6 \times 10^6$
Muhafaza	Yüksek yoğunluklu polietilen	2,35	0,998
PCB	Fiberglass	3,00	1
Kutu	Polipropilen	2,26	1

Kullanılan dielektriksel parametreler, üretici firmaların anten tasarımında farklı malzemeleri tercih edebilmeleri nedeniyle antenden antene farklılık gösterebilmektedir. Yer radarı antenlerini gerçeğe uygun modellemede karşılaşılan bir diğer zorluk ise bilinmeyen parametrelerdir. Bu parametreler; kaynağın merkez frekansı (f_m), verici papyondaki direnç (R_{T_x}), alıcı papyondaki direnç (R_{R_x}), soğurucu malzemenin dielektriksel geçirgenliği (ϵ_r) ve soğurucu malzemenin elektriksel iletkenlik (σ_r) değeridir. Bu beş bilinmeyen parametrenin belirlenmesi için optimizasyon yöntemleri kullanılarak kestirimler yapılmaktadır. gprMax ile modellenmiş GSSI 1,5 GHz ve MALA 1,2 GHz merkez frekansına sahip anten modelleri Şekil 5.7’de verilmektedir.



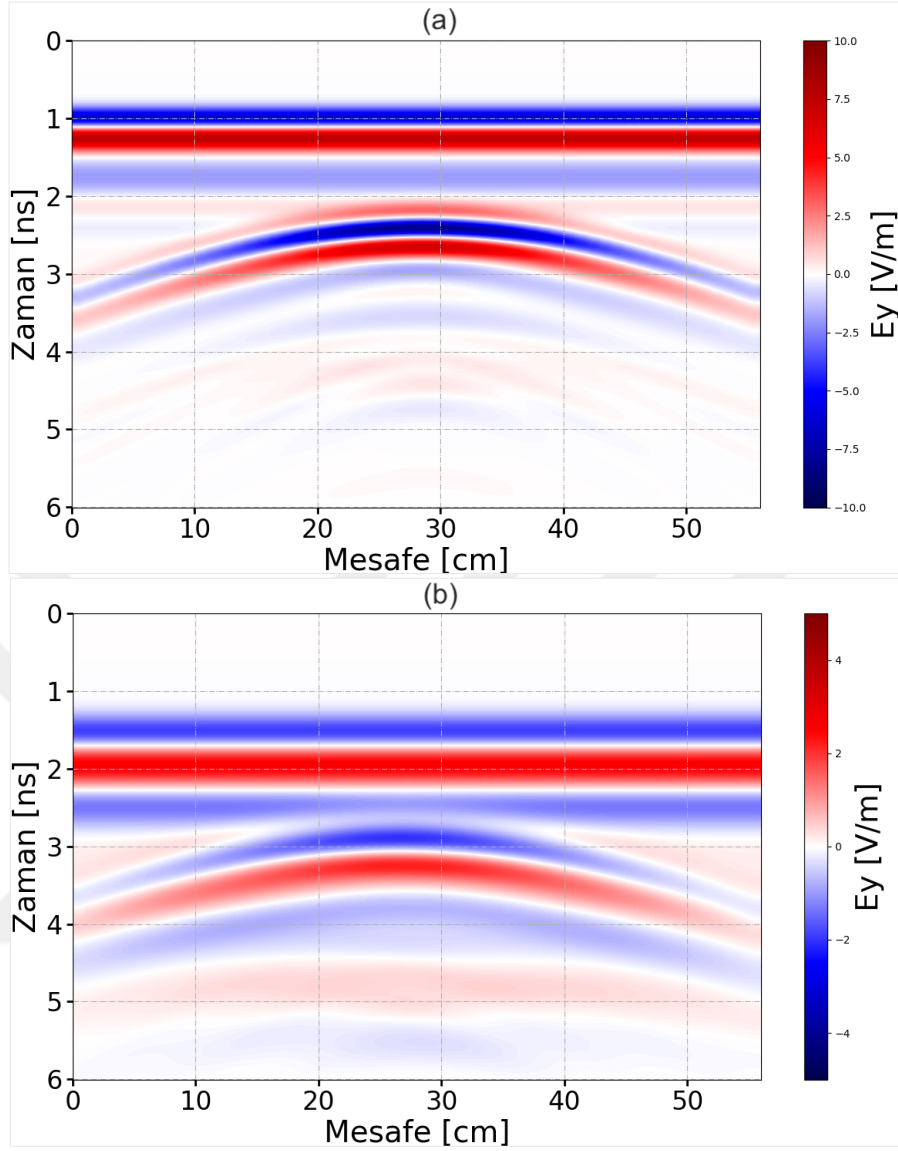
Şekil 5.7. Ticari anten modelleri a) GSSI firmasına ait 1,5 GHz, b) MALA firmasına ait 1,2 GHz merkez frekanslı GPR anteni (Warren ve diğ., 2011)

Giriş doyası Şekil 5.2’de verilen ve geometri dosyası Şekil 5.4’de gösterilen 3B silindir modeli GSSI firmasının 1,5 GHz ve MALA firmasının 1,2 GHz yüksek frekanslı antenleri kullanılarak tekrar modellenmiştir. Bu iki antenin kullanıldığı model geometrileri Şekil 5.8’de verilmektedir.



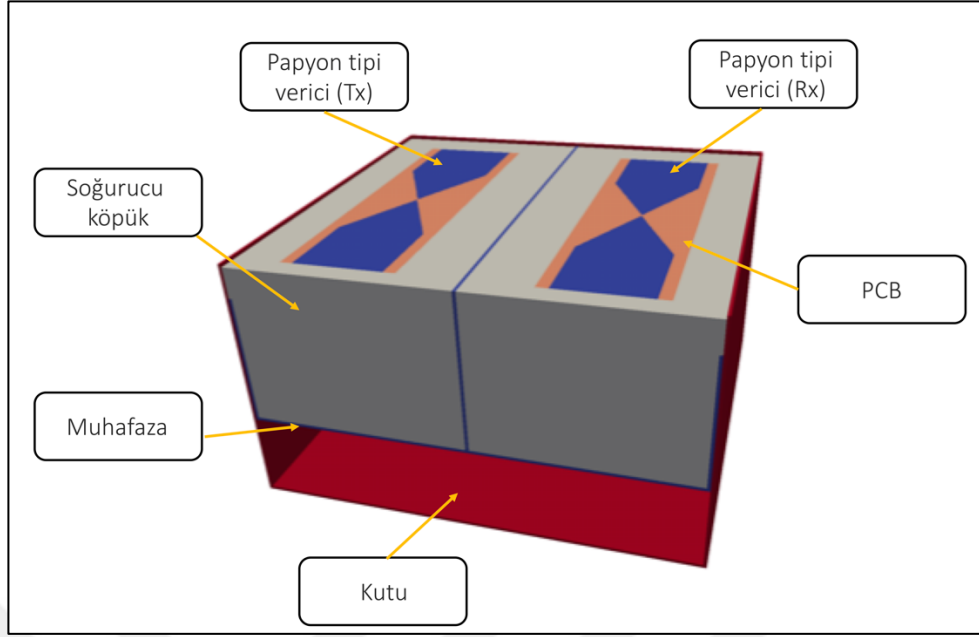
Şekil 5.8. Şekil 5.2’de verilen gprMax giriş dosyası ile elde edilen model ile ticari antenlerin konumu; a) GSSI 1,5 GHz anten modeli, b) MALA 1,2 GHz anten modeli

Ticari amaçla üretilmiş ve piyasada birçok problemin çözümünde kullanılan bu iki antenin kaynak olarak kullanılmasıyla elde edilen sentetik radargramlar Şekil 5.9’da gösterilmektedir.



Şekil 5.9. 3B silindir modeli için a) GSSI 1,5 GHz, b) MALA 1,2 GHz anten ile elde edilen sentetik radargramlar

Bu iki yüksek frekanslı GPR antenin yanı sıra özellikle zemin ve arkeoloji araştırmalarında sıkça kullanılan GSSI firmasına ait 400 MHz yer radarı anteni de gprMax kütüphanesi içerisinde yer almaktadır. Stadler (2017) tarafından modellenen bu antene ait anten geometrisi Şekil 5.10'da verilmektedir.



Şekil 5.10. GSSI firmasına ait 400 MHz ticari anten modeli (Stadler, 2017)

5.3. Gömülü Yapı ve Nesneleri 3B Model Geometrisi İçerisinde Tanımlama

gprMax yazılımı gömülü yapıları, hedef nesnelere ya da yeraltı tabakalarını, sayısal modele dahil ederken çeşitli seçenekler sunmaktadır. Bu seçenekler şu şekilde sıralanabilirler;

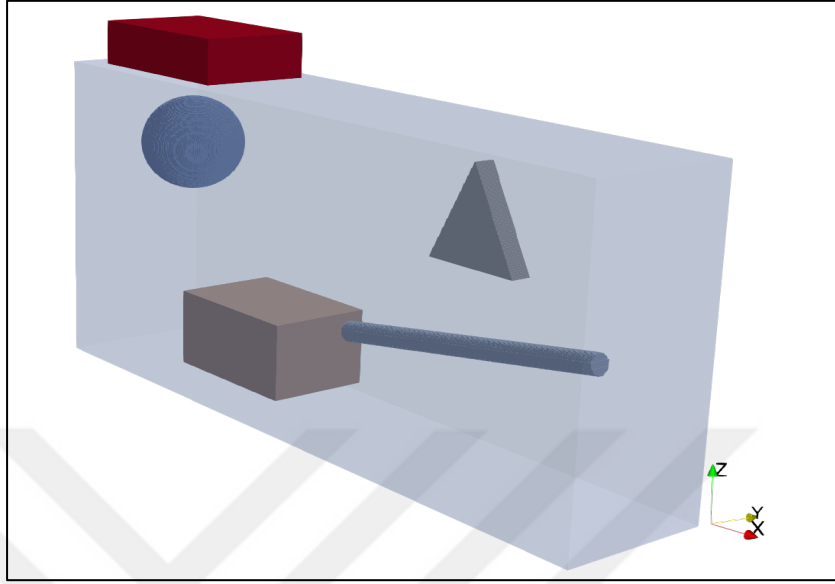
- Basit geometrik şekillerle gömülü nesne oluşturma
- Resimden (PNG) gömülü nesne geometrisi elde etme
- Önceden tanımlanmış gömülü nesne geometrisinin sayısal modele çağırılması

Bu seçeneklerden herhangi biri gömülü nesneyi oluştururken elde edilmek istenilen modelleme hassasiyetine göre tercih edilebilir.

5.3.1. Basit geometrik objelerle gömülü nesne oluşturma

Birçok modelleme çalışmasında gömülü nesnelere ya da hedef yapılar basit geometrik bir şekle indirgenerek tanımlanır. Örneğin; aranan bir mezar dikdörtgen bir şekle benzetilebilir, bir insana veya hayvana ait kafatası basit bir daire ile ifade edilebilir ya da bir kaval kemik aynı boyutlarda bir silindir ile temsil edilebilir. Bu tür benzetimlerde gömülü nesne basit bir geometrik şekil ile model içerisine istenilen

pozisyon ve açı ile dahil edilebilir. Şekil 5.11’de çeşitli geometrik şekillerin sayısal bir model içerisinde gösterimini vermektedir.



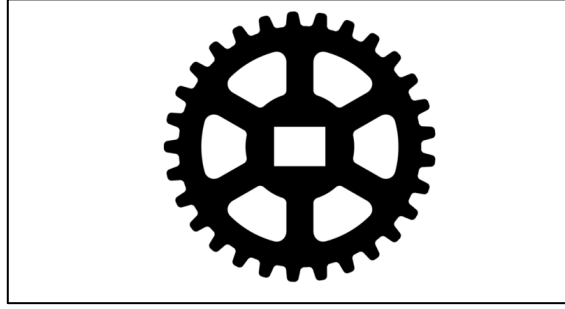
Şekil 5.11. Basit geometrik şekillerin model geometrisi içerisinde gösterimi

Aranan hedef yapıların basit geometrik şekillere indirgenerek tanımlanması, sadece yer radarı yöntemi için değil; elektrik, gravite, manyetik, sismik ve benzeri jeofiziksel yöntemler için de modelleme çalışmalarında da sıklıkla tercih edilen bir yöntemdir.

Basit geometrik şekilleri kullanarak küçük boyutlarda detaylı geometriler oluşturmak da mümkündür; ancak bu tür model tasarımları zaman alıcı olup yoğun dikkat gerekmektedir.

5.3.2. Resimden (PNG) gömülü nesne geometrisi elde etme

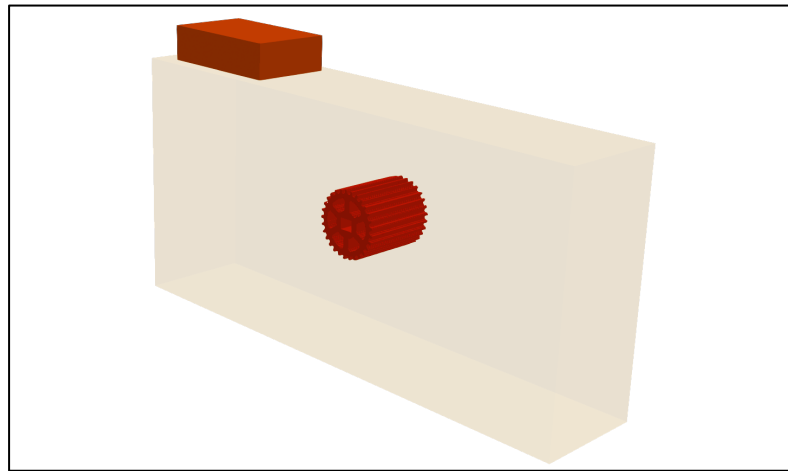
Yeraltı yapısını ya da gömülü nesnelere oluşturmanın bir diğer yolu da resimlerden elde edilen geometriyi sayısal model içerisine aktarmaktır. Bu işlem 2B bir görsele üçüncü boyut katarak yapılmaktadır. gprMax yazılımı bu işlemi gerçekleştirmek için PNG formatındaki görselleri kullanmaktadır. Örneğin Şekil 5.12’de verilmekte olan bir çark modelini, PNG formatında kaydettikten sonra gprMax yazılımının okuyabileceği formata dönüştürerek 3B sayısal model içerisine dahil etmek mümkündür.



Şekil 5.12. PNG formatında kaydedilmiş 2B çark modeli

Bu geometrik şekli bir önceki başlık altında anlatılan basit geometrik nesnelere (kare, dikdörtgen, küre, silindir vb.) kullanarak da oluşturmak mümkündür; ancak bu zaman alıcı ve bir o kadar da dikkat gerektiren bir işlem olacaktır. PNG’den elde edilecek dosyanın, gprMax yazılımı tarafından okunabilmesi için HDF5 formatına dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu amaçla hazırlanan yazılım içerisinde yer alan `convert_png2h5` komutu kullanılmaktadır. Bu komut kullanılmadan önce PNG’den aktarılmak istenen görselin, gprMax ile oluşturulacak model ile piksel olarak aynı büyüklükte olması gereklidir. `convert_png2h5` 2B modeller için geliştirilmiş bir komuttur; ancak bu bu tez çalışmasında modeller 3B olarak oluşturulduğu için 3B modellemelere uyumlu olacak şekilde güncellenmiştir.

PNG’den elde edilen geometri istenilen doğrultuda kalınlaştırılabilir. Bu örnek özelinde çark modeli y yönünde 10 cm kalınlaştırılarak üç boyutlu sayısal model içerisine dahil edilmiştir Şekil (5.13).



Şekil 5.13. PNG’den elde edilen çark modelinin üç boyutlu sayısal model içerisindeki gösterimi (Model y ekseninde 10 cm kalınlaştırılmıştır)

Tasarımı zor geometrik şekillerde ya da sıvıların yayılımlarını modelleyebilmede bu yöntem kullanışlı bir seçenektir.

5.3.3.Önceden tanımlanmış gömülü nesne geometrisinin sayısal modele çağırılması

Bu yöntem, bir nesnenin gerçek formuna en yakın hali ile sayısal model içerisine dahil edilebilmesine olanak sağlamamaktadır. Günümüzde 3B çizim programları ile tasarlanan modeller diğer 3B veri analiz programlarında okunabilecek şekilde çıktı dosyası olarak kaydedilebilmektedir. Örneğin; Solidworks, Matlab ya da benzeri bir yazılım ile tasarlanmış üç boyutlu bir nesne, gprMax yazılımı ile sayısal model içerisine çağırılabilir. Bunun için gprMax yazılımı içerisinde geliştirilmiş olan `geometry_object_reads` komutu kullanılmaktadır.

Bu çalışmada gömülü yapı veya nesnenin sayısal model içerisine dahil edilmesini açık bir şekilde anlatabilmek için gerçek bir kemik ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.14’de bir ineğe ait kurutulmuş femur kemiği gösterilmektedir.



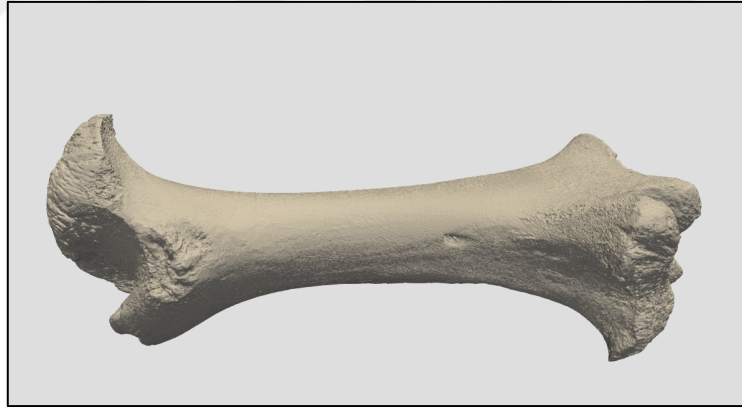
Şekil 5.14. Bir ineğe ait femur kemiği

Femur kemiğine ait geometriyi ayrıntılı olarak elde edebilmek amacıyla 3B tarayıcı teknolojisi kullanılmıştır. Bu çalışma, yer radarı modelleme çalışmaları için ilk defa bu tez çalışması ile uygulanmış bir yöntemdir. Şekil 5.14’de verilen kemik, Artec Space Spider marka 3B tarayıcı ile yüksek çözünürlükte 3B olarak taranmıştır (Şekil 5.15). Elde edilen geometri dosyasının gprMax yazılımı tarafından okunabilmesi için HDF5 formatına dönüştürülmüştür.



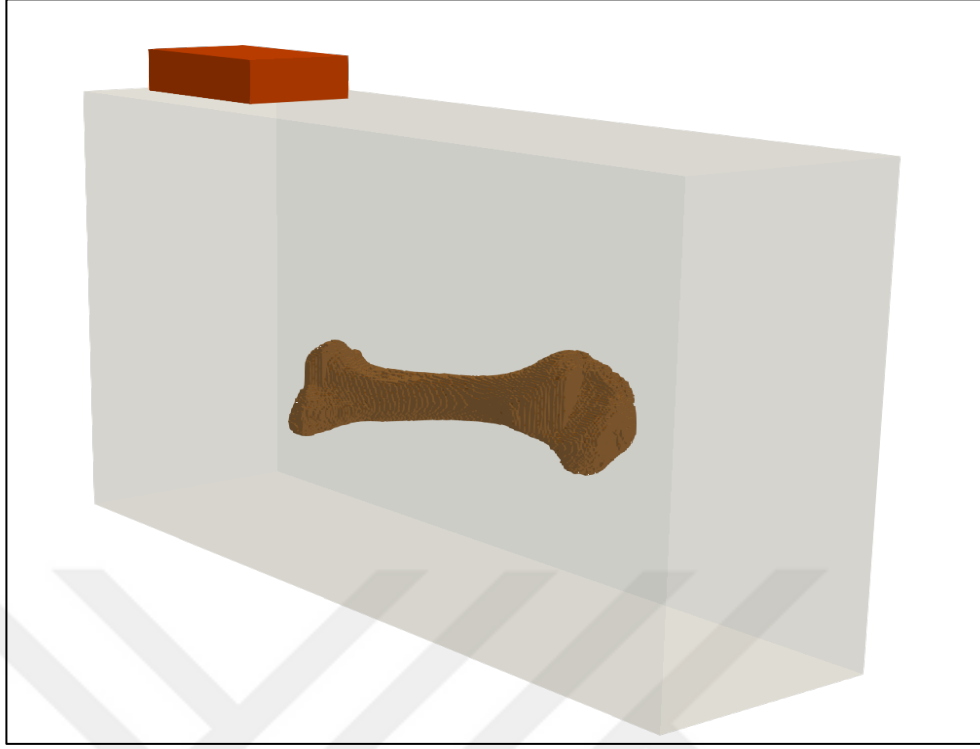
Şekil 5.15. Artec Space Spider marka 3B tarayıcı ile tarama işlemi

3B tarama işlemi sonucunda kemik geometrisi gerçek formuna en yakın şekli ile 3B olarak elde edilmiştir. (Şekil 5.16). Femur kemiğine ait 3B model geometrisi ascii formatında kayıt edilmiş ve gprMax yazılımının okuyabileceği HDF5 formatına dönüştürülmüştür.



Şekil 5.16. 3B tarayıcı ile taranmış femur kemiği geometrisi

Femur kemiğine ait elde edilen model geometrisi yüksek kalite ve çözünürlüğe sahip olmasına rağmen gprMax ile sayısal modellemeye dahil edilmeden önce giderilmesi gereken bir probleme sahiptir. 3B tarayıcılar ile elde edilen model geometrileri nesnenin yüzeyine ait geometrilerdir, yani model içi boş olarak oluşturulmaktadır. Bu problemi gidermek ve kemiğin içini doldurarak modeli gerçeğine uygun hale getirmek amacıyla bir Matlab kodu geliştirilmiş ve sorun giderilmiştir. 3B tarayıcı ile elde edilmiş femur kemiği geometrisini gprMax yazılımı kullanılarak 3B sayısal model içerisine dahil edilmesi ile elde edilen görsel Şekil 5.17’de verilmektedir.



Şekil 5.17. 3B tarayıcı ile taranmış femur kemiğinin sayısal model içerisinde gösterimi

Bu yöntem gömülü bir nesnenin kendine özgü şekli ile sayısal modellemeye dahil edilebileceği en etkin yöntemdir. Bu örnekte yer alan femur kemiği, içerisi doldurulması gereken bir nesne iken farklı amaçlar için taranacak nesnelere için bu işlem gerekmez.

Bu tez çalışmasında, bundan sonraki bölümlerde yer alan modellemelerde gömülü nesneyi modele taşımak için “resimden (PNG) gömülü nesne geometrisi elde etme” yöntemi kullanılmıştır. Bu tercihte modellenmek istenen malzemenin sıvı yani akışkan olması belirleyici etkidir. Laboratuvar deneyleri içerisinde kimyasal davranışlarını kayıt altına almak amacıyla rutin bir işlem olarak belirli zaman aralıklarında deney seti fotoğrafları çekilmektedir. Bu fotoğraflar PNG formatına dönüştürülerek sayısal modellemelerde kullanılmıştır.

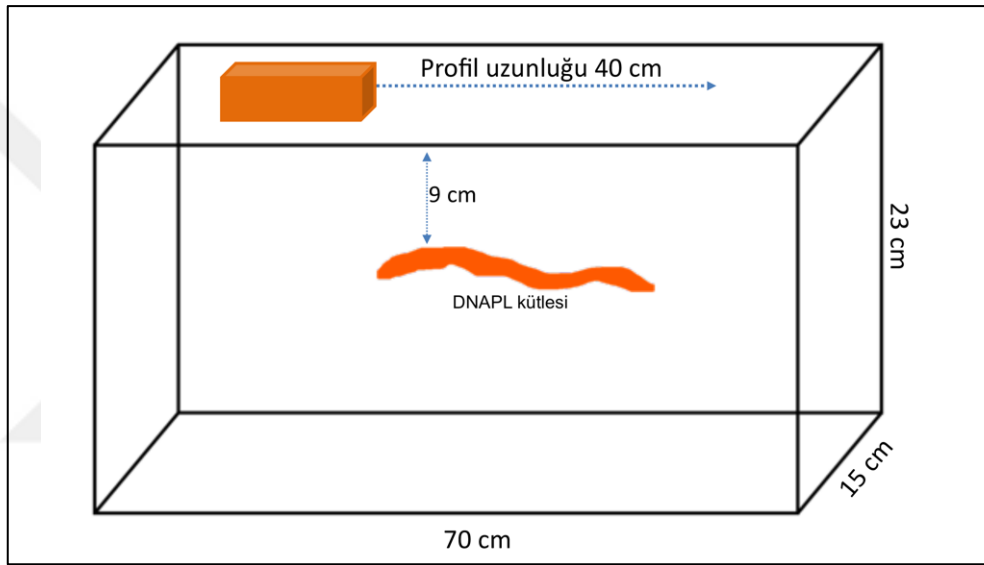
6. KONTROLLÜ DENEY SETLERİ İÇERİSİNDE DNAPL YAYILIMININ 3B SAYISAL MODELLEME İLE İNCELENMESİ

Tez çalışmasının bu bölümünde kontrollü deney setleri içerisinde DNAPL türü kirleticilerin yayılım davranışları ve fiziksel özelliklerindeki değişimler 3B sayısal modelleme benzetimleri ile irdelenmiştir. Bu bağlamda üç farklı model seti oluşturulmuştur. Model-1 olarak isimlendirdiğimiz ilk model çalışmasıyla ortama ve kirleticiye ait fiziksel parametre değişimlerinin sentetik sonuçlar üzerindeki etkisi incelenmiştir. Model-2’de ise laboratuvar ortamında hazırlanmış mini akifer sistemi içerisindeki DNAPL yayılım davranışları bir senaryo çerçevesinden sayısal modellerle incelenmiştir. Model-3, bu tez çalışmasındaki son sayısal modeldir. Bu model, Model-2’de olduğu gibi yine laboratuvar ortamında kurulmuş ve mini bir akifer sistemini temsil etmektedir. Model-3’ü, Model-2’den ayıran özellik ise DNAPL yayılım davranışlarının gözlemsel incelemelerin dışında, üzerinde yer radarı ölçümleri yapılarak yayılım davranışları tespit edilmeye çalışılmıştır. Böylelikle gerçek yer radarı ölçüm sonuçları ile model sonuçlar karşılaştırılabilmektedir.

Sayısal modellemede parametre seçimi son derece önemli bir konu olup, model benzetimleri için tanımlayıcı kıstaslardır. Hücre aralığının uygun seçimi sayısal dispersiyon ihtimalini ortadan kaldıran parametredir. Modellemede kullanılacak kaynağın merkez frekansı gerçek ölçümlerde kullanılan antenin merkez frekansı ile aynı olmalıdır. Sayısal model içerisindeki yansımaları uygun bir şekilde sentetik radarogramlara yansıtabilmek için zaman penceresi tüm bu yansımaları kayıt edebilecek uzunlukta seçilmelidir. Eğer modelleme kullanılan kaynak teorik bir kaynak ise yani tüm bileşenleri ile sayısal ortamda modellenmiş bir ticari anten değilse, alıcı ve verici arasındaki mesafe gerçeğine uygun olarak tanımlanmalıdır. Hücre aralığı ne kadar küçük seçilirse veri kalitesi aynı oranda artacaktır; ancak unutulmamalıdır ki bu durum bilgisayarların yapacağı işlem yükünü arttırmakta ve sonuç olarak iterasyon sürelerini uzatmaktadır.

6.1. Model 1

Bu bölümde 0,70 x 0,15 x 0,23 m ebatlarında 3B homojen ve kayıpsız bir model tasarlanmıştır. Bu modele Model-1 adı verilmiştir. Bu model içerisine DNAPL kütlesini temsil edecek, basit bir geometrik şekille tanımlanamayan bir kütle yerleştirilmiştir. Bu kütlein yüzeye en yakın noktası, yüzeyden 9 cm derinde olup, x eksenini boyunca 20 cm'den başlayarak 45 cm'ye kadar uzanmaktadır. Kütlein en yüksek noktası ile en düşük noktası arasındaki mesafe 4 cm ve kalınlığı 1 cm olarak tasarlanmıştır (Şekil 6.1).



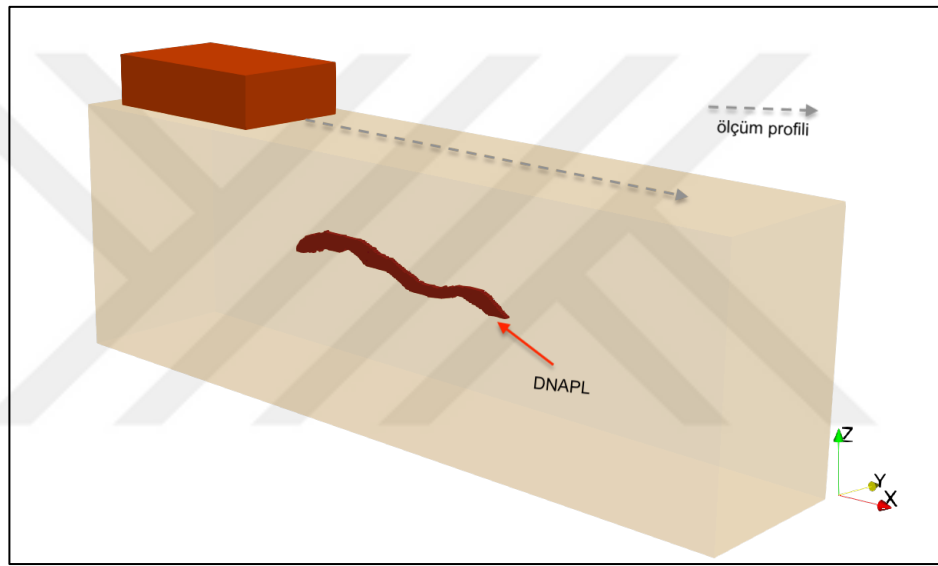
Şekil 6.1. Model-1: 3B sayısal model geometrisi içerisinde temsili DNAPL kütlesi ve sayısal olarak modellenmiş GSSI 1,5 GHz anten modelinin konumu

Kaynak olarak GSSI firmasına ait 1,5 GHz anten modeli kullanılmıştır. Antenin ilk pozisyonunda orta noktası x eksenini üzerinde 10 cm'ye gelecek şekilde konumlandırılmıştır ve son ölçüm noktası 50 cm üzerindedir. Böylelikle profiller üzerinde 40 iz hesaplanmıştır. Profiller y eksenini üzerinde 7,5 cm'den geçecek şekilde ve DNAPL'ı temsilen eden kütleyle paralel olarak toplanmıştır. Model-1'e ait detaylı bilgi Tablo 6.1'de verilmektedir.

Tablo 6.1. Model-1 için 3B sayısal modelde kullanılan parametreler

Parametreler	Değerler
Boyutlar	0,70 x 0,15 x 0,23 m
Hücre aralığı	0,001 x 0,001 x 0,001 m
Anten Modeli	GSSI
Anten merkez frekansı	1,5 GHz
Zaman penceresi	10 ns
İz aralığı	0,01 m
İz sayısı	40

gprMax ile tasarlanmış, Paraview yazılımı ile görselleştirilmiş Model-1'e ait model geometrisi 3B olarak Şekil 6.2'de verilmektedir.



Şekil 6.2. Paraview ile görselleştirilmiş model geometrisi Model-1

6.1.1. Fiziksel parametre değişimlerinin 3B sayısal modellemeye etkileri

Yer radarı yönteminin başarıyla çalışmasında belirleyici rol oynayan üç adet fiziksel parametre bulunmaktadır. Bu parametreler; göreceli dielektriksel geçirgenlik (ϵ_r), elektriksel iletkenlik (σ) ve göreceli manyetik geçirgenlik (μ_r) değerleridir. Bu üç temel parametrenin değişimleri elektromanyetik dalganın yer altındaki davranışlarını doğrudan etkilemektedir.

Bu bölümde, ortama ve gömülü yapıya ait bu üç temel parametrenin değişimi sonucu sentetik radargramlardaki değişimlerin incelenmesi hedeflenmiştir. Böylelikle parametrelere ait değişimlerinin oluşturduğu farklılıkların daha iyi anlaşılması amaçlanmaktadır. Bu bölümde, fiziksel parametre değişimlerinin sentetik

radargramlara etkisi DNAPL kütlesini temsil eden basit bir şekil üzerinden incelenmek istendiği için normal şartlarda DNAPL kütlesinin yoğunluğundan dolayı modelin dibine hareket edeceği gerçeği göz ardı edilmiştir. Ayrıca DNAPL türlerine ait dielektriksel parametreler suya doygunluk durumları ele alınmadan irdelenmiştir. DNAPL kütlesinin yoğunluğundan kaynaklanan davranışları ve farklı suya doygunluklar için sahip olduğu dielektriksel değerleri bir sonraki bölümde ayrıntılı olarak incelenecektir.

Kullanılan DNAPL türleri olarak doğada kirletici olarak sıkça karşılaşılan Trikloroetilen (TCE), Tetrakloroetilen (PCE), Trikloretan ve Dikloroetan seçilmiştir. Bu kimyasallara ait detaylı bilgi Tablo 6.2’de verilmektedir.

Tablo 6.2. DNAPL türü olarak bilinen bazı kimyasallar ve özellikleri, 15°C için (Ajo-Franklin ve diğ., 2006)

Kirletici	Kimyasal Formül	Yoğunluk (kg/m ³)	Göreceli Dielektriksel Geçirgenlik (ϵ_d)
Trikloroetilen (TCE)	C ₂ HCl ₃	1451	3,335 – 3,409
Tetrakloroetilen (PCE)	C ₂ Cl ₄	1606	4,660
Trikloretan	C ₂ H ₃ Cl ₃	1321	7,252
Dikloroetan	C ₂ H ₄ Cl ₂	1238	10,080

Bir sonraki bölümde, ortamı oluşturan malzemenin göreceli dielektrik değeri ve elektriksel iletkenlik değerleri değişimlerinin sentetik radargramlardaki değişimlere etkisi incelenmektedir.

6.1.1.1. Ortama ait fiziksel değerlerin irdelenmesi

Bu bölümde ortamı oluşturan malzemenin göreceli dielektriksel geçirgenlik (ϵ_o) ve elektriksel iletkenlik (σ_o) değerlerinin kademeli olarak değiştirilmesi ile sentetik radargramlardaki değişimler incelenecektir. Bu aşamada DNAPL kütlesine ait parametreler (ϵ_d , σ_d ve μ_d) sabit tutulmuştur.

İlk aşamada, ortamın göreceli dielektriksel geçirgenlik (ϵ_o) değerinin kademeli olarak artırılmasının sentetik radargramlara olan etkisi incelenecektir. Tablo 6.3, Model-1 kullanılarak hazırlanmış, ortamın göreceli dielektriksel geçirgenlik (ϵ_o) değerinin kademeli olarak arttırıldığı Test 1 benzetimlerine ait bilgileri içermektedir.

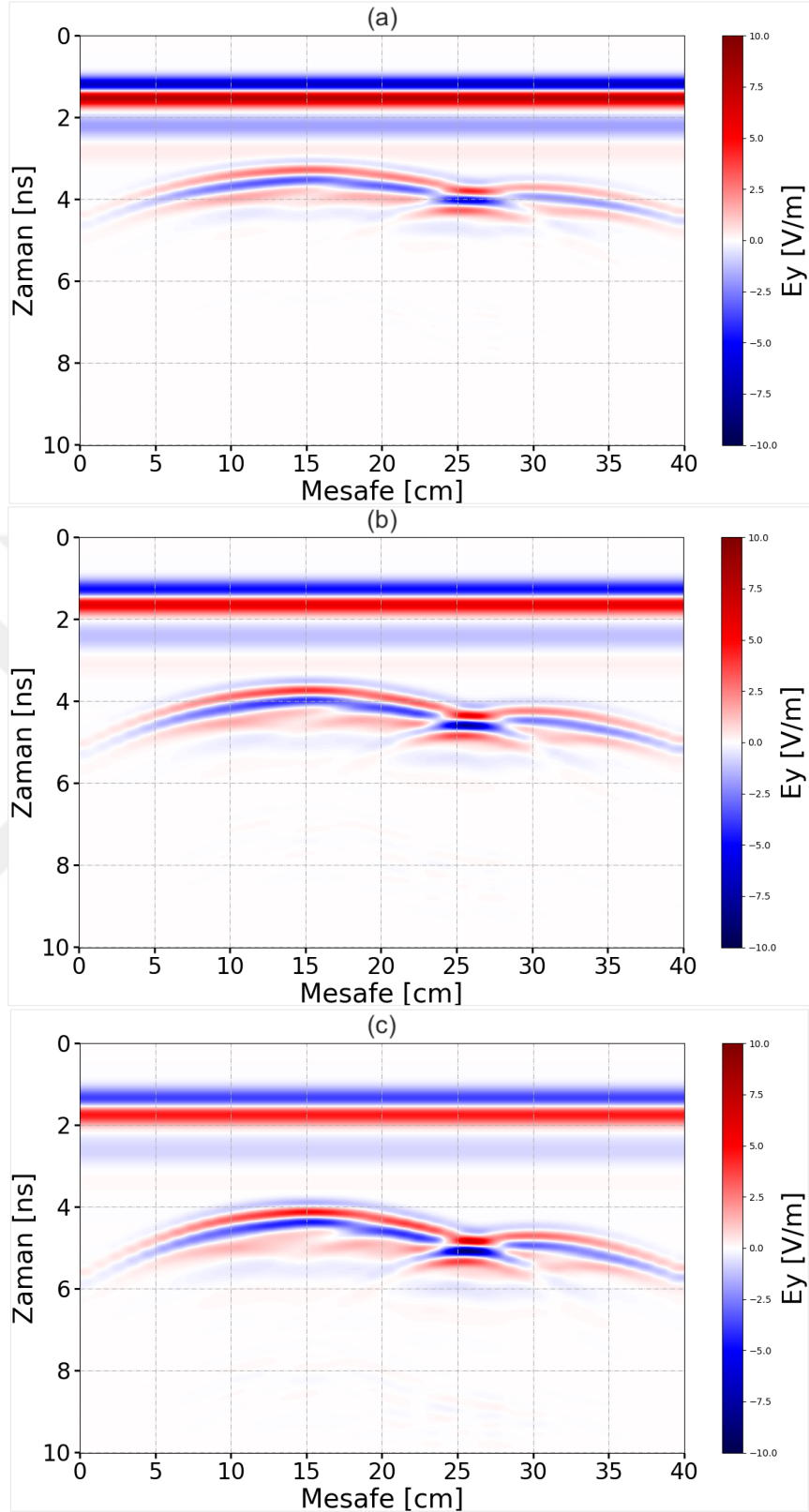
Tablo 6.3. Model-1 seti kullanılarak hazırlanmış Test1 çalışmasına ait parametreler

Model 1	Test 1
Ortam göreceli dielektriksel geçirgenlik (ϵ_0)	(a) 15, (b) 21, (c) 27
Ortam elektriksel iletkenlik (σ_0) (S/m)	0
Ortam göreceli manyetik geçirgenlik (μ_0)	1
DNAPL göreceli dielektriksel geçirgenlik (ϵ_d)	3,409*
DNAPL elektriksel iletkenlik (σ_d) (S/m)	0
DNAPL göreceli manyetik geçirgenlik (μ_d)	1

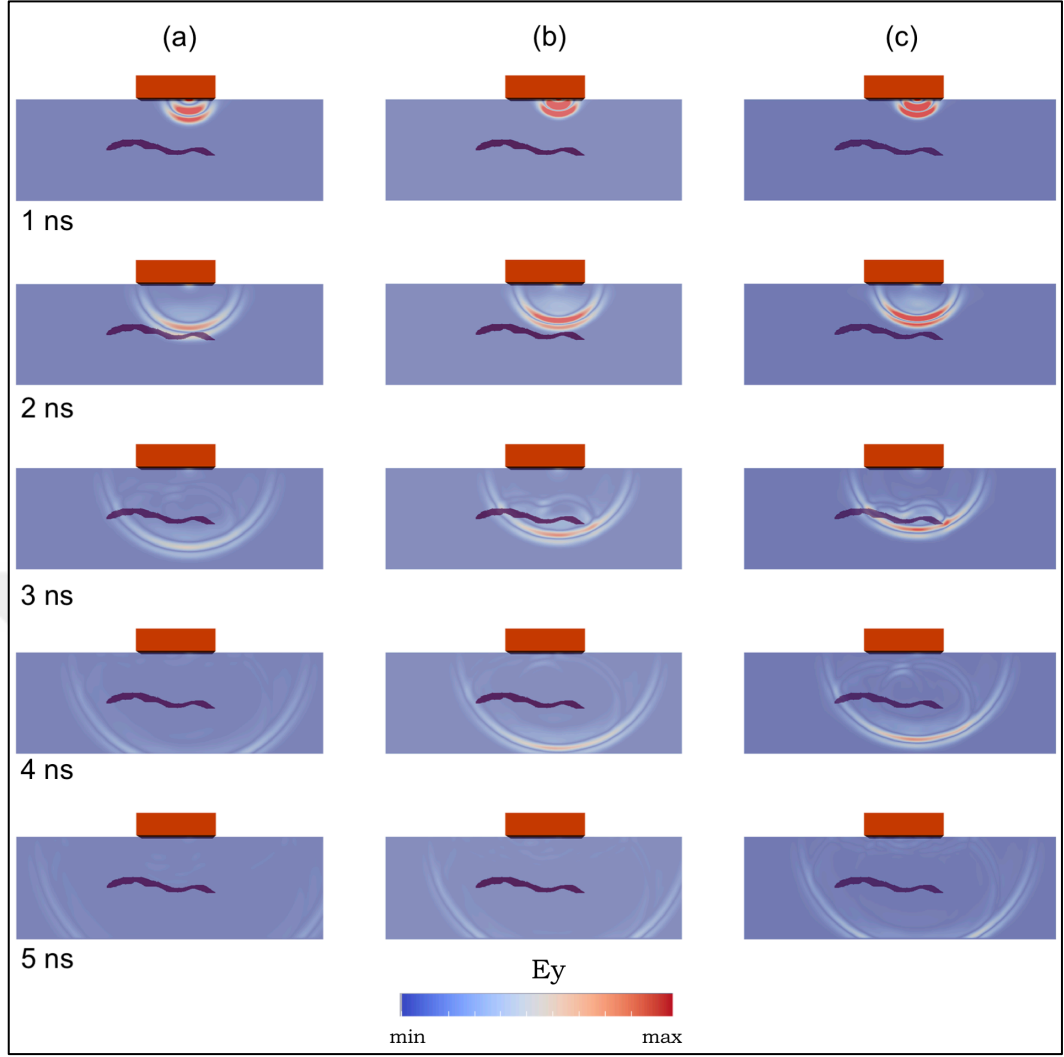
*Trikloroetilen (TCE) kirletici olarak kullanılmıştır.

Ortamın farklı suya doygunluk değerlerini ifade etmek için göreceli dielektrik değerleri Annan (2003)'de verilen suya doygun kumu ifade eden aralıkta seçilmiştir. Ortamın göreceli dielektrik değerlerinin kademeli olarak arttırılması sonucu elde edilen sentetik radargramlar Şekil 6.3'de verilmektedir. Şekil 6.3'de gösterilmekte olan sentetik radargramlar incelendiğinde, DNAPL kütlesini temsil eden yapıdan gelen yansımaların, ortamda göreceli dielektrik değerinin artışıyla birlikte alıcılara daha geç geldiği görülmektedir.

Sayısal modelleme çalışmalarında, elektromanyetik dalga yayılım davranışlarının bir diğer gözlemlenme şekli de anlık görüntülerin karşılaştırılmasıdır. Bu sayede ortama ait fiziksel parametrelerin değişiminin dalga yayılımına olan etkisi incelenebilmektedir. Şekil 6.4'de ortama ait farklı göreceli dielektrik değeri için elektromanyetik dalga yayınımlarının ilk 5 ns'ye ait anlık görüntülerini vermektedir.

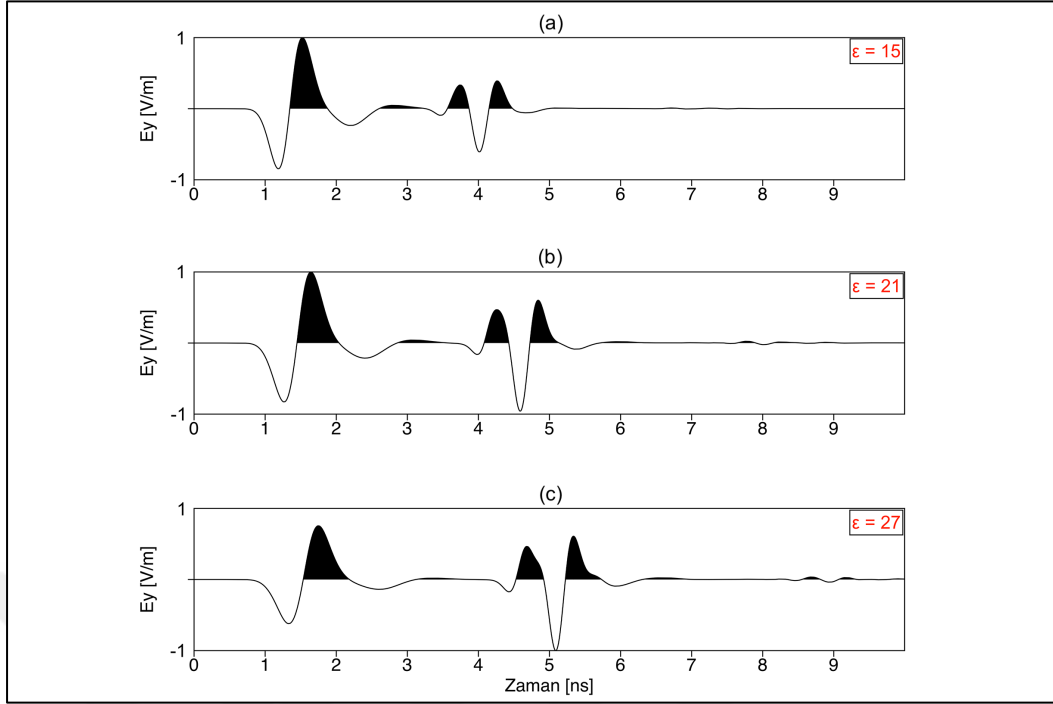


Şekil 6.3. Model-1, ortama ait göreceli dielektrik değerinin artırılması ile elde edilen sentetik radargramlar a) $\epsilon_0=15$, b) $\epsilon_0=21$ ve c) $\epsilon_0=27$



Şekil 6.4. Model-1, ortama ait göreceli dielektrik değerinin arttırılması ile ilk 5 ns için elde edilen anlık görüntüler a) $\epsilon_0=15$, b) $\epsilon_0=21$ ve c) $\epsilon_0=27$

Şekil 6.4'de verilmekte olan anlık görüntülerde anten pozisyonu 25 numaralı atışı temsil etmektedir. 25 numaralı atış baz alınarak, tek iz üzerinden de karşılaştırmalar yapılmıştır. Farklı göreceli dielektrik değerleri için elde edilen izlerin karşılaştırılması Şekil 6.5'de gösterilmektedir. İzler üzerinden yapılan karşılaştırmada da DNAPL kütesinden gelen yansımanın ortama ait göreceli dielektrik değerinin artışı ile kayıtlarda geciktiği görülmektedir. $\epsilon_0=15$ için DNAPL kütesinden gelen ilk yansıma 3,5 ns, $\epsilon_0=21$ için 3,9 ns ve $\epsilon_0=27$ için 4,3 ns'de kayıt edilmiştir.



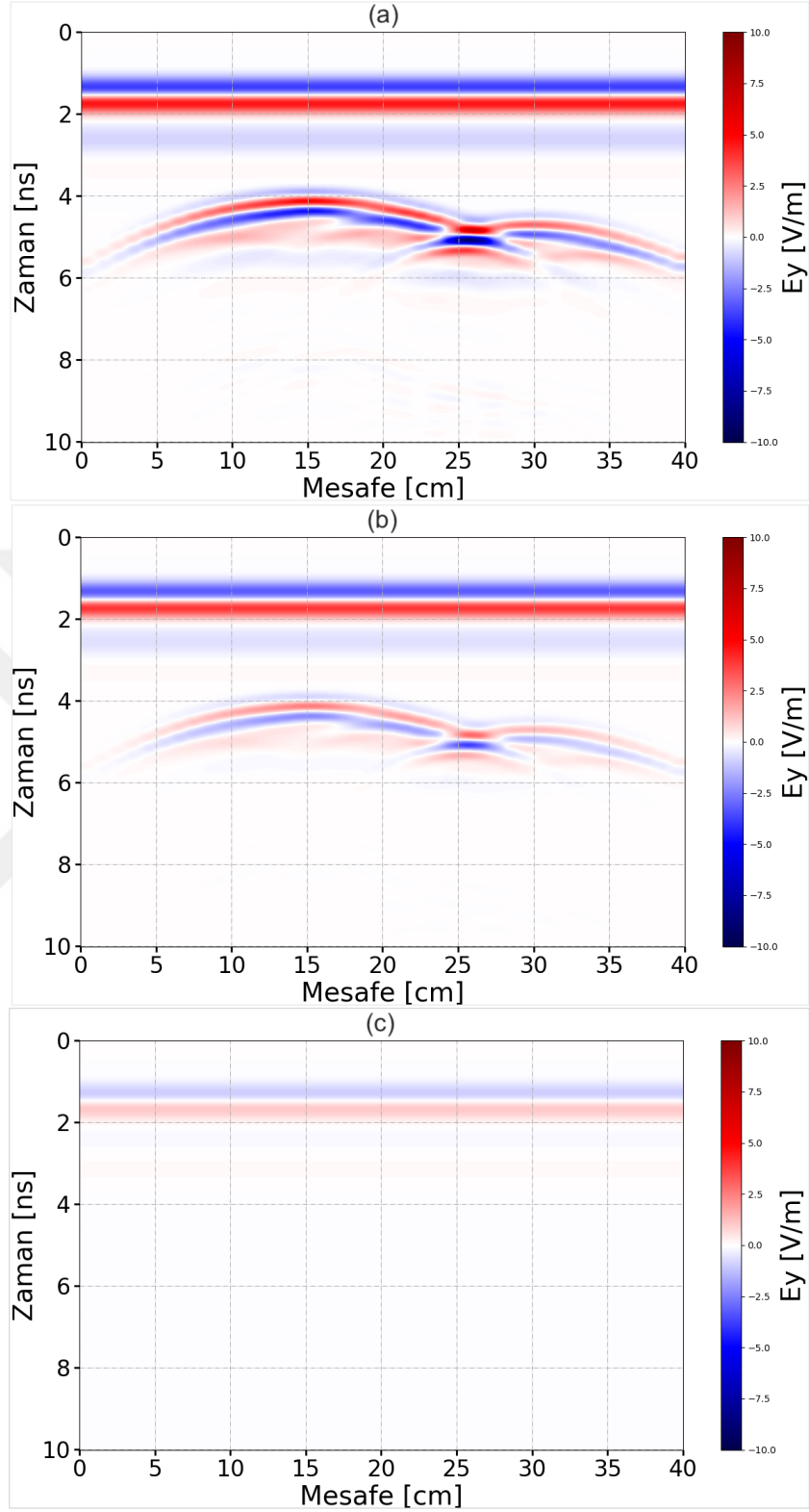
Şekil 6.5. Model-1, 25 numaralı atışa ait, ortam için göreceli dielektriksel geçirgenlik değerleri değişimi üzerinden elde edilen izlerin karşılaştırması a) $\epsilon_0=15$, b) $\epsilon_0=21$ ve c) $\epsilon_0=27$

Ortama ait parametrelerin irdelendiği ikinci test çalışmasında ise ortamın elektriksel iletkenlik değeri (σ_0) kademeli olarak arttırılmıştır ve bu değişimlerin sentetik radargramlar üzerindeki etkileri incelenmiştir. Test 2’de ortama ait göreceli dielektriksel geçirgenlik değeri ve DNAPL kütesine ait diğer parametreler sabit tutulmuştur. Tablo 6.4, Model-1 kullanılarak hazırlanmış, ortamın elektriksel iletkenlik değerinin (σ_0) kademeli olarak arttırıldığı Test 2 benzetimlerine ait bilgileri içermektedir.

Tablo 6.4. Model-1 seti kullanılarak hazırlanmış Test 2 çalışmasına ait parametreler

Model 1	Test 2
Ortam göreceli dielektriksel geçirgenlik (ϵ_0)	27
Ortam elektriksel iletkenlik (σ_0) (S/m)	(a) 0,00001; (b) 0,1; (c) 1
Ortam göreceli manyetik geçirgenlik (μ_0)	1
DNAPL göreceli dielektriksel geçirgenlik (ϵ_d)	3,409*
DNAPL elektriksel iletkenlik (σ_d) (S/m)	0
DNAPL göreceli manyetik geçirgenlik (μ_d)	1

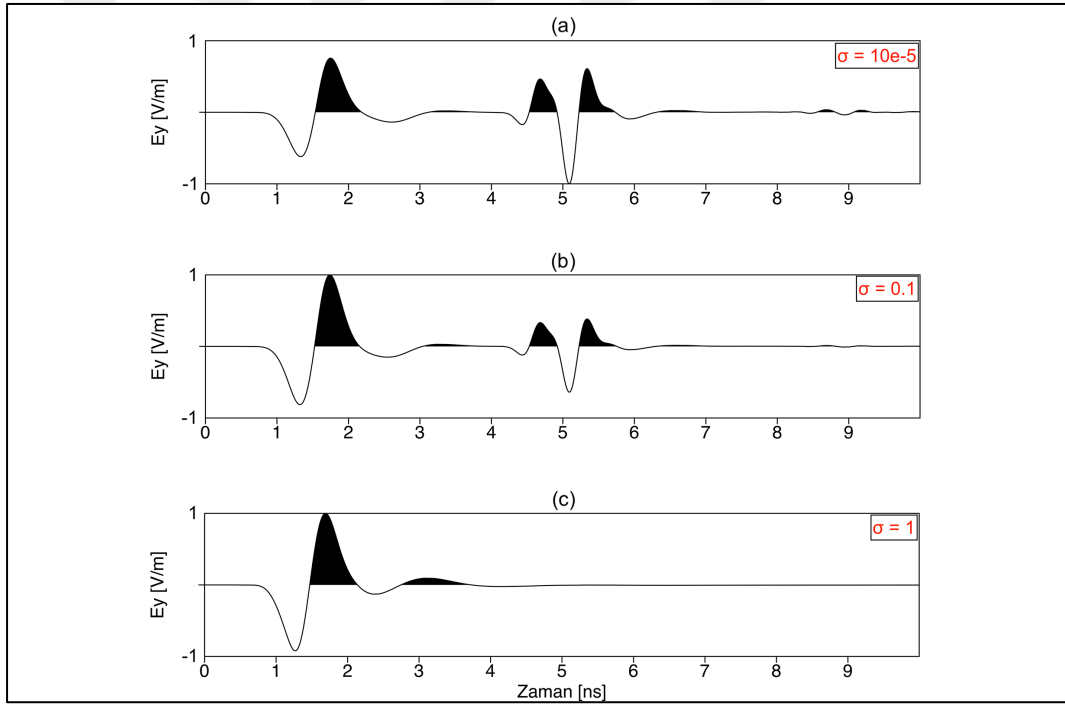
*Trikloroetilen (TCE) kirletici olarak kullanılmıştır.



Şekil 6.6. Model-1, ortama ait elektriksel iletkenlik değerlerinin arttırılması ile elde edilen sentetik radargramlar a) $\sigma_0=0,00001$, b) $\sigma_0=0,1$, c) ve $\sigma_0=1$

Ortamın farklı suya doygunluk değerlerini ifade etmek için iletkenlik değerleri Annan (2003)'de verilen suya doygun kumu ifade eden aralıkta seçilmiştir. Ortamın elektriksel iletkenlik değerlerinin (σ_0) kademeli olarak artırılması sonucu elde edilen sentetik radargramlar Şekil 6.6'da verilmektedir.

Sentetik radargramların karşılaştırılmasının yanı sıra, 25 numaralı atış baz alınarak, tek iz üzerinden karşılaştırma yapılmıştır. Farklı elektriksel iletkenlik değerleri için elde edilen izlerin karşılaştırılması Şekil 6.7'de gösterilmektedir. Bu üç adet iz karşılaştırıldığında DNAPL kütlesinde kaynaklanan yansımanın ortamın elektriksel iletkenliğinin (σ_0) artışına bağlı olarak gücünü kaybederek yansımalarda zayıfladığı açıkça görülmektedir. Ortamın yüksek elektriksel özellikleri, GPR ölçümlerinde tercih edilmeyen ve yöntemin başarısını kısıtlayan önemli faktörlerden birisidir.



Şekil 6.7. Model-1, 25 numaralı atışa ait, ortam için elektriksel iletkenlik değerleri değişimi üzerinden elde edilen izlerin karşılaştırması. a) $\sigma_0 = 0,00001$, b) $\sigma_0 = 0,1$, c) ve $\sigma_0 = 1$

6.1.1.2. DNAPL kütlesine ait fiziksel değerlerin irdelenmesi

Bu bölümde DNAPL kütlesinin göreceli dielektriksel geçirgenlik (ϵ_d), elektriksel iletkenli (σ_d) ve göreceli manyetik geçirgenlik (μ_d) değerlerinin kademeli olarak değiştirilmesi ile sentetik radargramlardaki değişimler incelenecektir. Bu bağlamda

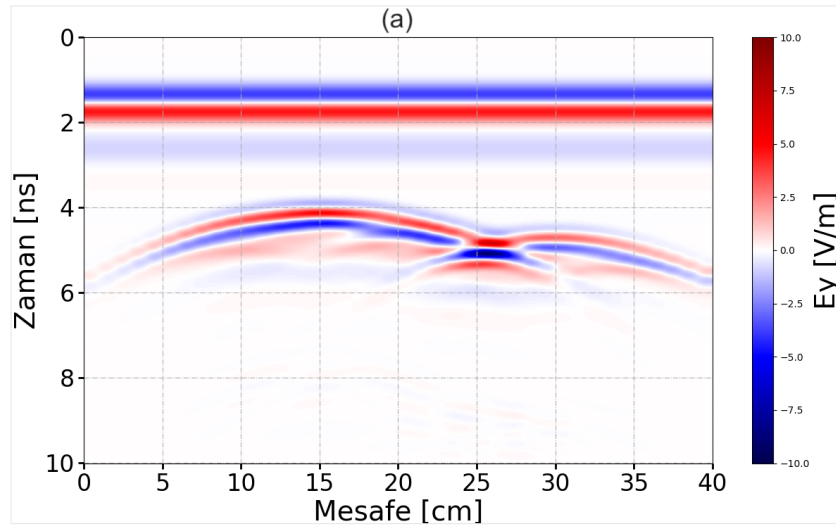
ortama ait parametreler sabit tutulmuştur. Tablo 6.5, Model-1 kullanılarak hazırlanmış, DNAPL kütlesinin göreceli dielektriksel geçirgenlik (ϵ_o) değerini belirlerken doğada kirletici olarak sıkça karşılaşılan DNAPL türleri olan; Trikloroetilen (TCE), Tetrakloroetilen (PCE), Trikloretan ve Dikloroetan'a ait göreceli dielektrik değerleri kullanılmıştır. Bu değerlerin yer aldığı Test 3 benzetimlerine ait bilgiler Tablo 6.5'de verilmektedir.

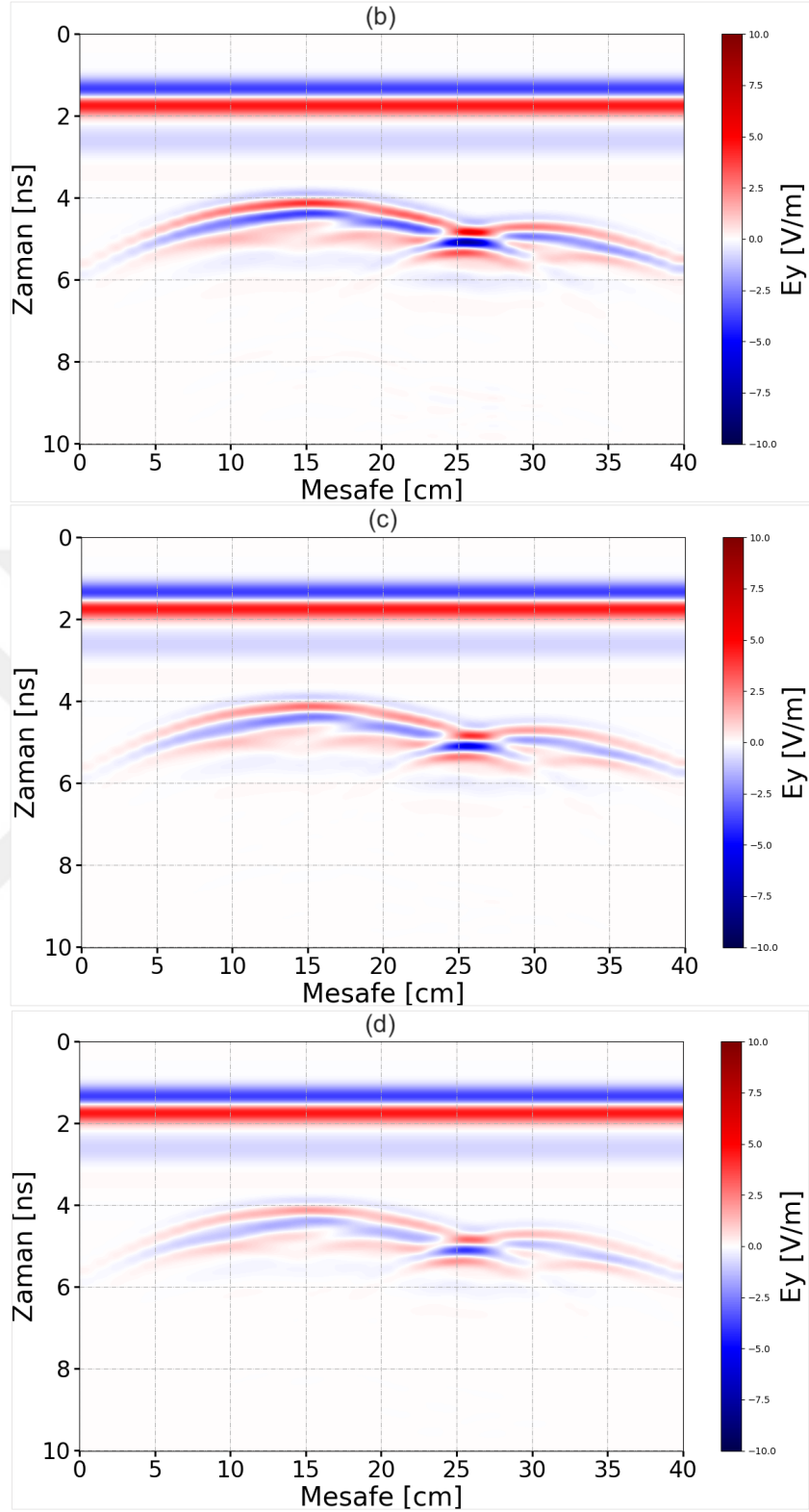
Tablo 6.5. Model-1 seti kullanılarak hazırlanmış Test 3 çalışmasına ait parametreler

Model 1	Test 3
Ortam göreceli dielektriksel geçirgenlik (ϵ_o)	27
Ortam elektriksel iletkenlik (σ_o) (S/m)	0
Ortam göreceli manyetik geçirgenlik (μ_o)	1
DNAPL göreceli dielektriksel geçirgenlik (ϵ_d)*	a) 3,409, b) 4,660, c) 7,252, d) 10,080
DNAPL elektriksel iletkenlik (σ_d) (S/m)	0
DNAPL göreceli manyetik geçirgenlik (μ_d)	1

*Trikloroetilen (TCE), Tetrakloroetilen (PCE), Trikloretan ve Dikloroetan kirletici olarak sırasıyla kullanılmıştır.

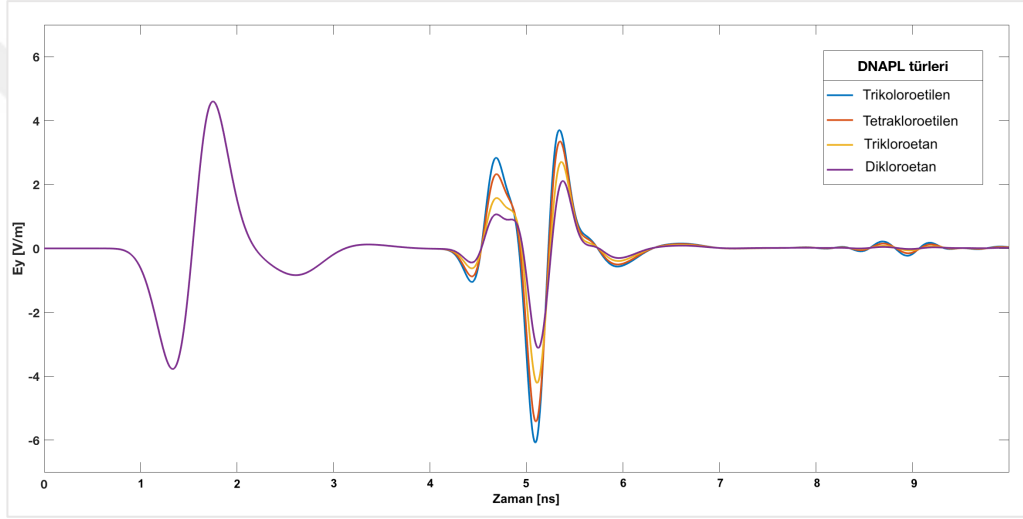
Farklı türde DNAPL kullanılarak elde edilen sentetik radargramlar Şekil 6.8'de verilmektedir.





Şekil 6.8. Model-1, DNAPL kütlesine ait göreceli dielektrik değerlerinin artırılması ile elde edilen sentetik radargramlar a) Trikloroetilen, b) Tetrakloroetilen, c) Trikloretan ve d) Dikloretan

25 numaralı atış baz alınarak, tek iz üzerinden karşılaştırmalar Test 3 için de yapılmıştır. Farklı türde DNAPL kirleticilerin kullanılması sonucu elde edilen izlerin karşılaştırılması Şekil 6.9'da gösterilmektedir. Şekil 6.9 incelendiğinde DNAPL kütlesi için seçilen kirleticilerin göreceli dielektrik değerleri (ϵ_d) arttıkça, sentetik radargramlardaki yansımalar doğru orantılı olarak zayıflamaktadır. Bunun nedeni ortamın göreceli dielektriksel geçirgenlik değeri (ϵ_o) ile DNAPL kütlesinin göreceli dielektriksel geçirgenlik değeri (ϵ_d) arasındaki zıtlığın azalmasından kaynaklanmaktadır. Trikloroetilen (TCE) en güçlü yansımayı verirken, Dikloroetan ise en zayıf yansıma neden olmaktadır.



Şekil 6.9. Model-1, 25 numaralı atışa ait farklı DNAPL türleri için göreceli dielektriksel geçirgenlik değerleri değişimi üzerinden elde edilen izlerin karşılaştırması

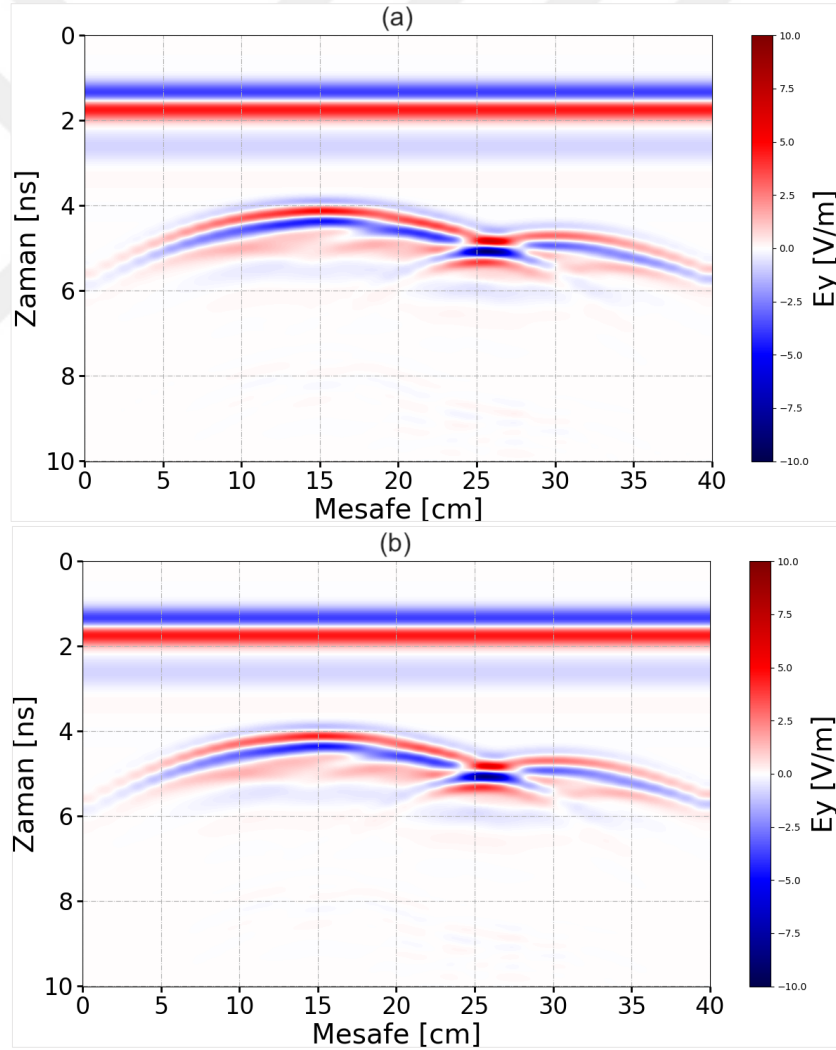
DNAPL kütlesine ait parametrelerin irdelendiği dördüncü test çalışmasında ise DNAPL kütlesinin elektriksel iletkenlik değeri (σ_d) kademeli olarak arttırılmıştır ve bu değişimlerin sentetik radargramlar üzerindeki etkileri incelenmiştir. Tablo 6.6, Model-1 kullanılarak hazırlanmış DNAPL kütlesinin elektriksel iletkenlik (σ_d) değerinin kademeli olarak arttırıldığı Test 4 benzetimlerine ait bilgileri içermektedir.

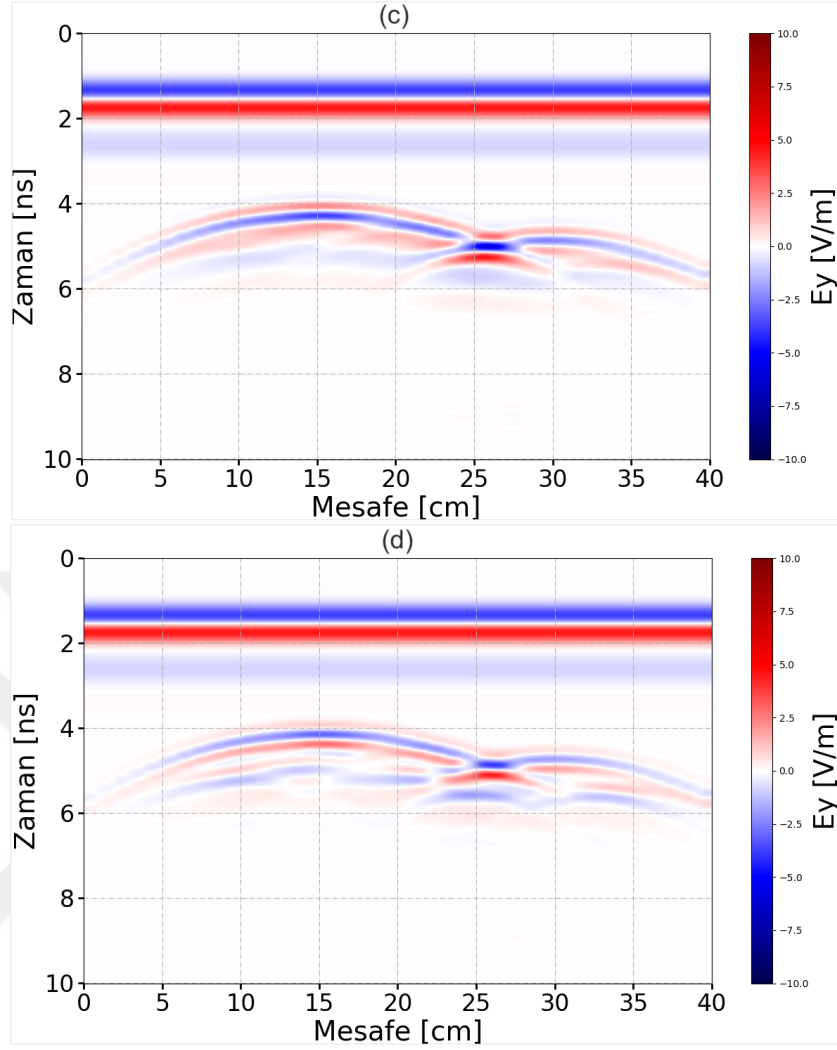
Tablo 6.6. Model-1 seti kullanılarak hazırlanmış Test 4 çalışmasına ait parametreler

Model 1	Test 4
Ortam göreceli dielektriksel geçirgenlik (ϵ_o)	27
Ortam elektriksel iletkenlik (σ_o) (S/m)	0
Ortam göreceli manyetik geçirgenlik (μ_o)	1
DNAPL göreceli dielektriksel geçirgenlik (ϵ_d)	3,409*
DNAPL elektriksel iletkenlik (σ_d) (S/m)	a) 0, b) 0,1, c)1, d)10
DNAPL göreceli manyetik geçirgenlik (μ_d)	1

*Trikloroetilen (TCE) kirletici olarak kullanılmıştır.

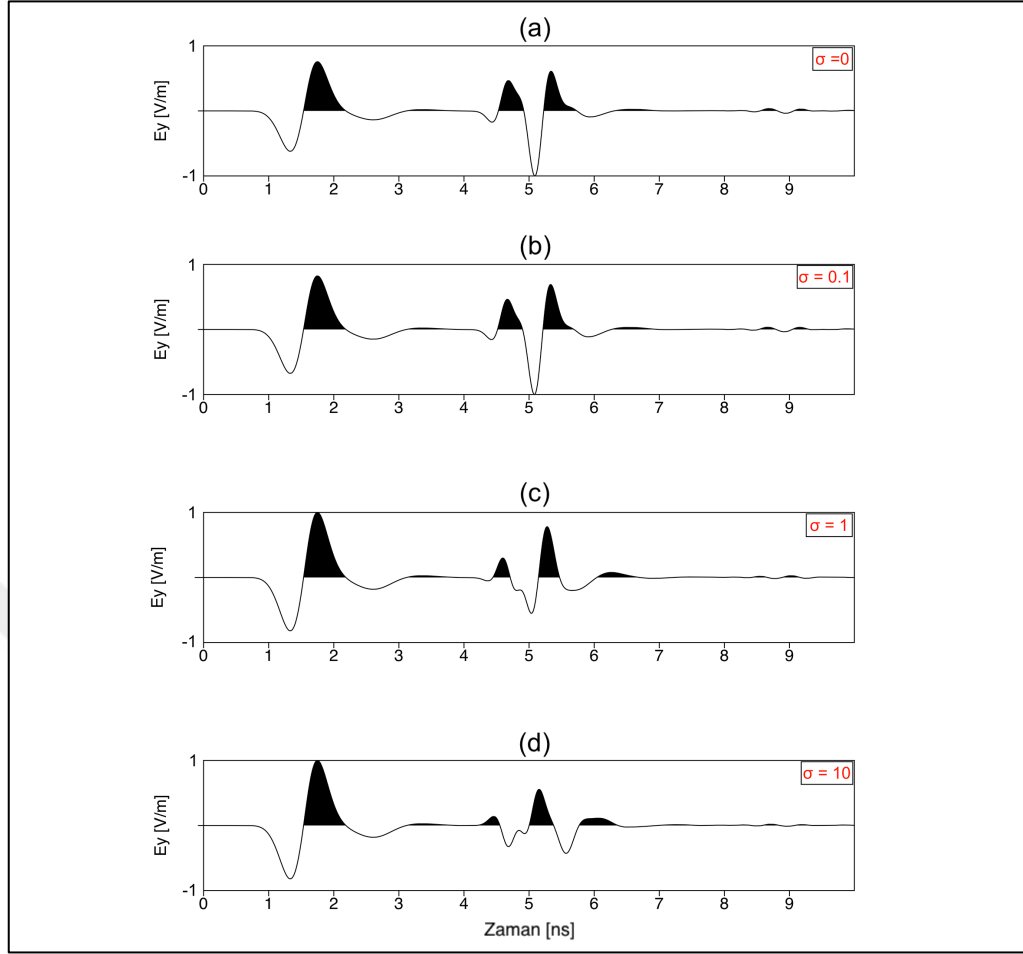
DNAPL kütlesinin elektriksel iletkenlik değerlerinin (σ_d) kademeli olarak artırılması sonucu elde edilen sentetik radargramlar Şekil 6.10'da verilmektedir.





Şekil 6.10. Model-1, DNAPL kütlesine ait elektriksel iletkenlik değerlerin artırılması ile elde edilen sentetik radargramlar a) 0, b) 0,1, c) 1 ve d) 10

25 numaralı atış baz alınarak, tek iz üzerinden karşılaştırma Test 4 için yapılmıştır. DNAPL kütlesinin farklı elektriksel iletkenlik değerleri (σ_d) için elde edilen izlerin karşılaştırılması Şekil 6.11'de gösterilmektedir. DNAPL kütlesinin elektriksel iletkenlik değerinin (σ_d) arttırılmasıyla DNAPL kütlesinden yansiyarak gelen yansımaların gücünün azaldığı ve kayıtlarda zayıfladığı gözlemlenmektedir.



Şekil 6.11. Model-1, 25 numaralı atışa ait farklı DNAPL türleri için elektriksel iletkenlik değeri değişimi üzerinden elde edilen izlerin karşılaştırması a) $\sigma_d=0$, b) $\sigma_d=0,1$, c) $\sigma_d=1$ ve c) $\sigma_d=10$

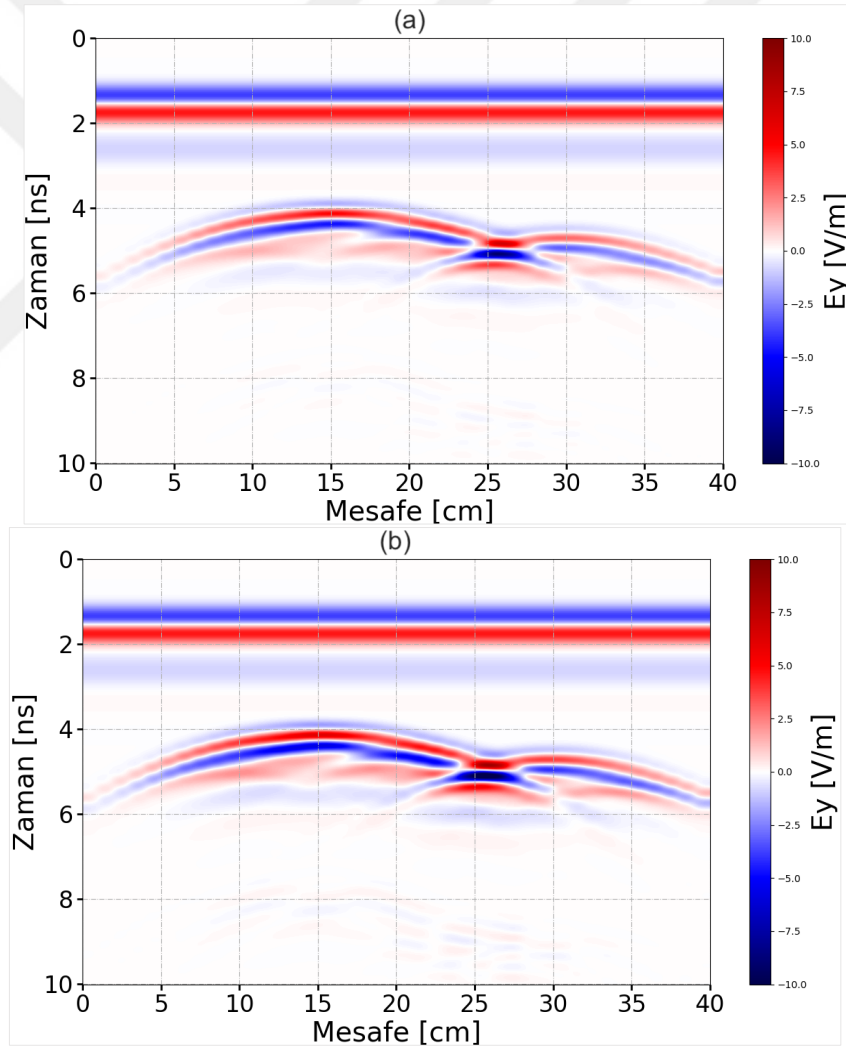
Bu bölümün son test çalışmasında, doğadaki jeolojik yapılar için çok fazla değişiklik göstermemesine rağmen yapı donatılarında karşılaşılabilecek muhtemel olan göreceli manyetik geçirgenlik (μ_d) değeri değişimlerinin sentetik radargramlara etkisi incelenmiştir. Bu bağlamda DNAPL kütlesine ait göreceli manyetik geçirgenlik (μ_d) değeri kademeli olarak arttırılmıştır. Ortama ve DNAPL kütlesine ait diğer parametreler ise değiştirilmemiştir. Tablo 6.7, Model-1 kullanılarak hazırlanmış, DNAPL kütlesinin göreceli manyetik geçirgenlik (μ_d) değerinin kademeli olarak arttırıldığı Test 5 benzetimlerine ait bilgileri içermektedir.

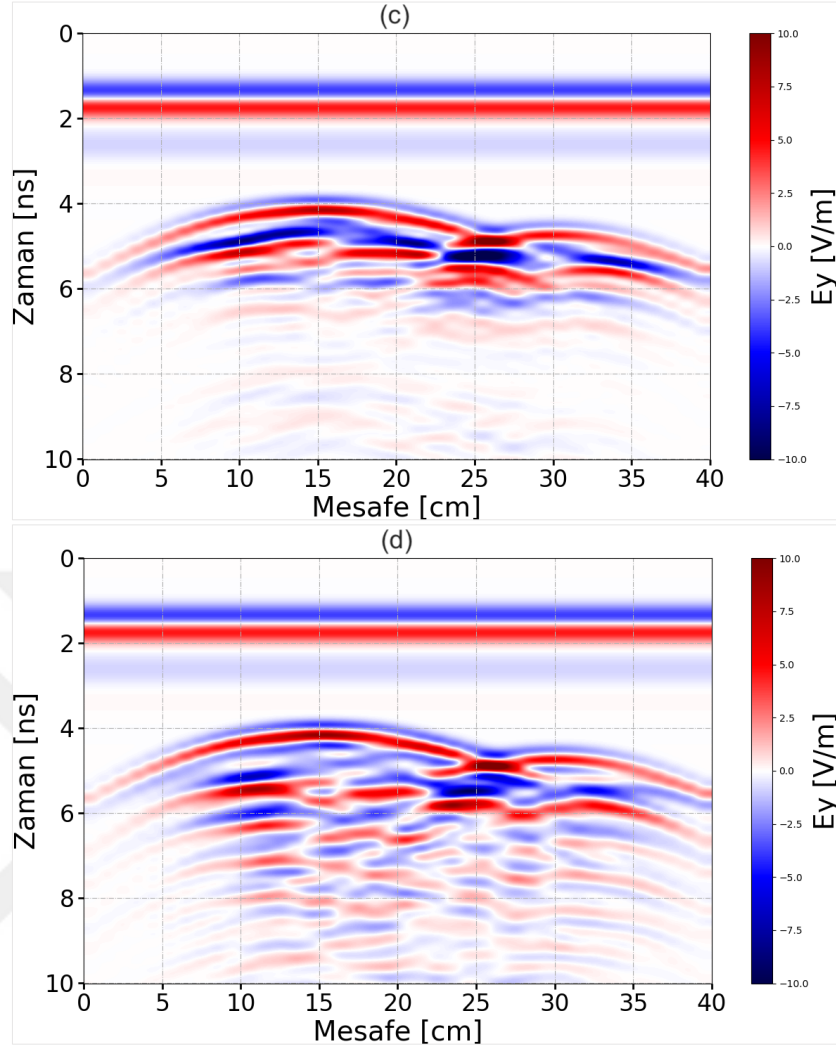
Tablo 6.7. Model-1 seti kullanılarak hazırlanmış Test 5 çalışmasına ait parametreler

Model 1	Test 5
Ortam göreceli dielektriksel geçirgenlik (ϵ_0)	27
Ortam elektriksel iletkenlik (σ_0) (S/m)	0
Ortam göreceli manyetik geçirgenlik (μ_0)	1
DNAPL göreceli dielektriksel geçirgenlik (ϵ_d)	3,409*
DNAPL elektriksel iletkenlik (σ_d) (S/m)	0
DNAPL göreceli manyetik geçirgenlik (μ_d)	a) 1, b) 2, c)10, d)30

*Trikloroetilen (TCE) kirletici olarak kullanılmıştır.

DNAPL kütlesinin göreceli manyetik geçirgenlik (μ_d) değerinin kademeli olarak artırılması sonucu elde edilen sentetik radargramlar Şekil 6.12’de verilmektedir.

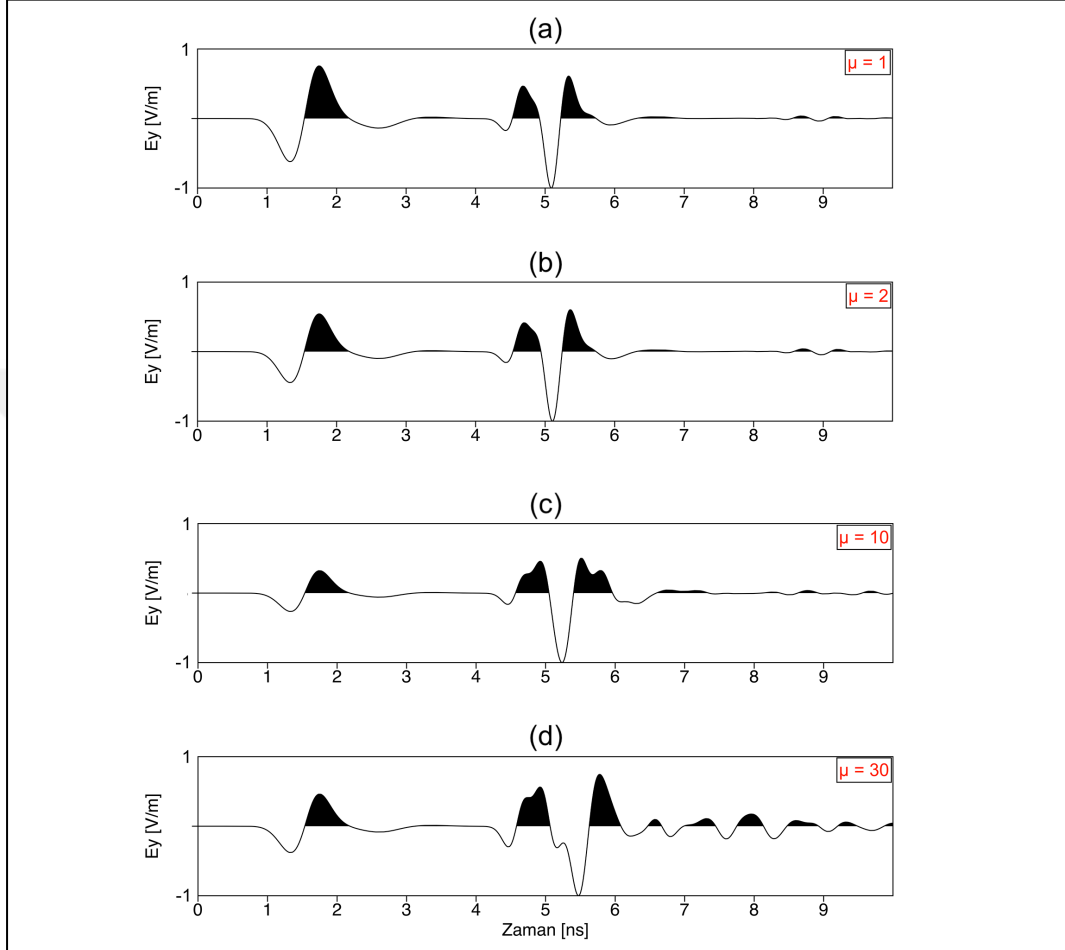




Şekil 6.12. Model-1, DNAPL kütlesine ait göreceli manyetik geçirgenlik değerinin artırılması ile elde edilen sentetik radargramlar a) 1, b) 2, c) 10 ve d) 30

İncelenen son parametre olan göreceli manyetik geçirgenlik değerinin (μ_d) artışının diğer parametrelerin artışından çok daha belirgin farklar meydana getirdiği gözlemlenmiştir. Bu fiziksel parametrenin artışı ile DNAPL kütlesinden gelen yansımaların çok daha güçlü hale gelmektedir. Buna ek olarak, kısa zaman aralıklarında birbirini takip eden ardışık yansımaların kayıtlara girdiği gözlemlenmektedir. Bu tekrarlı yansımaların kaynağı olarak; yüksek manyetik geçirgenliğe bağlı olarak DNAPL kütlesi içerisinde oluşan ardışık yansımaların olduğu düşünülmektedir.

25 numaralı atış baz alınarak, tek iz üzerinden karşılaştırma Test 5 için de yapılmıştır. DNAPL kütlesinin farklı göreceli manyetik geçirgenlik değerinin (μ_d) için elde edilen izlerin karşılaştırılması Şekil 6.13'de gösterilmektedir.

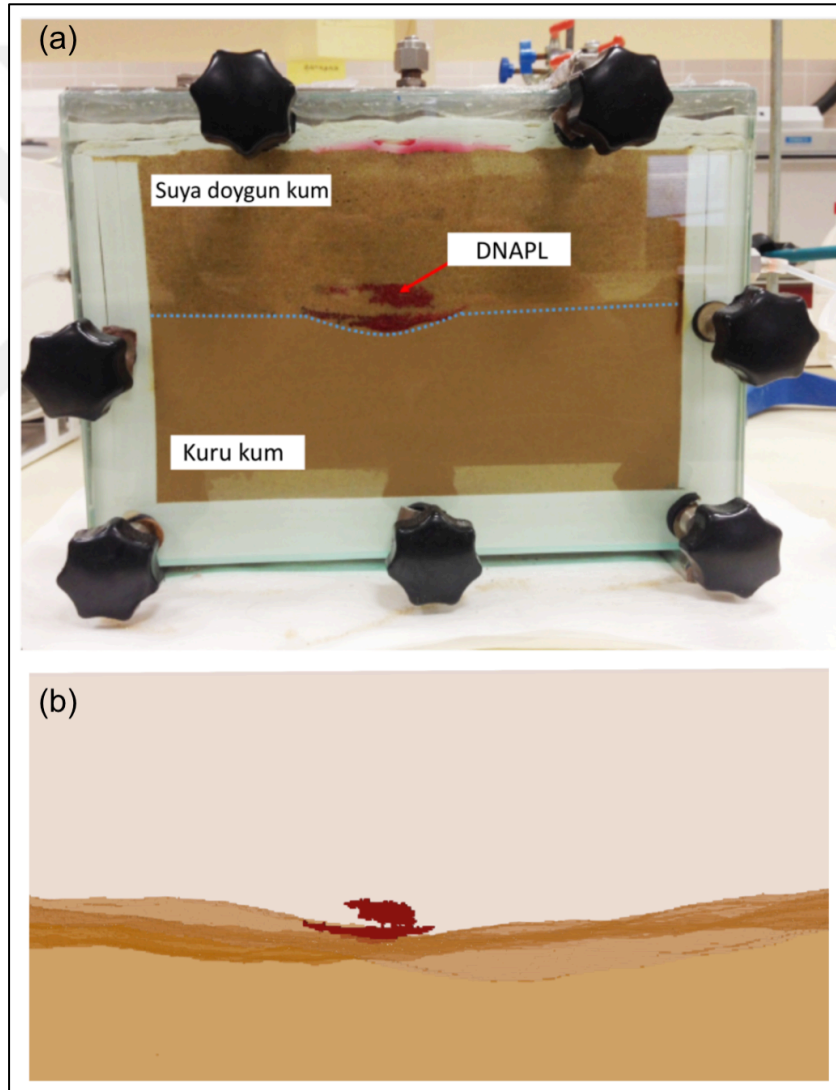


Şekil 6.13. Model-1, 25 numaralı atışa ait DNAPL kütlesi için göreceli manyetik geçirgenlik değeri değişimi üzerinden elde edilen izlerin karşılaştırması a) $\mu_d = 1$, b) $\mu_d = 2$, c) $\mu_d = 10$ ve c) $\mu_d = 30$

6.2. Model 2

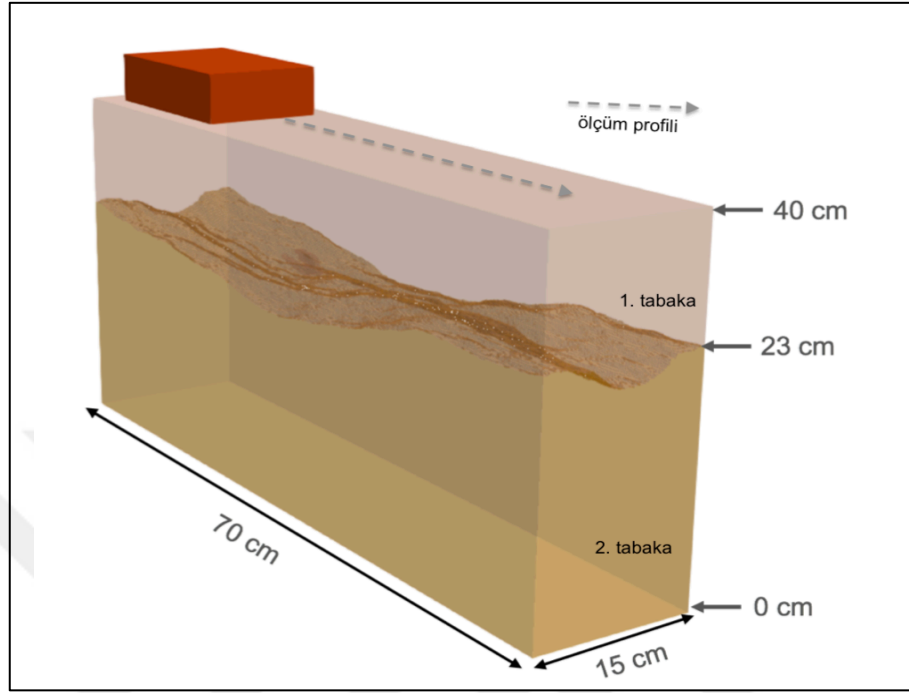
Bu bölümde laboratuvar ortamında hazırlanmış kontrollü bir akifer hücrelerini temsil eden sayısal bir model oluşturulmuştur. Bu modele Model-2 adı verilmiştir. Kontrollü akifer hücrelerini temsil eden sayısal model 0,70 x 0,15 x 0,40 m boyutlarında tasarlanmıştır. Bu model içerisinde suya doymuş kum, geçirimsiz tabakayı oluşturan kuru kum ve DNAPL kirleticisi bulunmaktadır. Kuru kuma ait göreceli dielektriksel geçirgenlik değeri 5 olarak seçilmiştir. DNAPL türü olarak Trikloroetilen (TCE) seçilmiştir. Kuru kum modeli, model hücrenin alt kısmına

yerleştirilerek geçirimsiz tabakayı oluşturmaktadır. Suyu doymun kum ise geçirimsiz bu tabakanın üzerine yerleştirilmiştir. Altaki geçirimsiz tabakanın orta kısmı düşey yönde çukur bir tabaka şeklinde tasarlanmıştır. Bunun nedeni, laboratuvar deneylerinde DNAPL kütlesinin zamanla içine birikeceği bir havuzun özellikle oluşturulmak istenmesidir. Şekil 6.14 laboratuvar ortamında kurulan akifer sistemini ve sayısal olarak hazırlanmış modelden bir kesit sunmaktadır. DNAPL kütlesi, model içerisine bir PNG dosyasından alınan görselin, gprMax programının convert_png2h5 komutu kullanılarak dahil edilmiştir. Bu model senaryosu Akyol ve Türkkan (2018) makalesinden yola çıkılarak hazırlanmıştır.



Şekil 6.14. a) DNAPL enjeksiyonu yapılmış, kontrollü bir akifer modeli hücresi senaryosu (Akyol ve Türkkan, 2018), (b) gprMax ile sayısal model içerisine yerleştirilmiş DNAPL kütlesi

DNAPL enjeksiyonu yapılmamış kontrollü bir akifer hücresi için oluşturulmuş sayısal modele ait model geometrisi Şekil 6.15’de verilmektedir.



Şekil 6.15. Paraview ile görselleştirilmiş model geometrisi ve tabaların konumu Model-2

Şekil 6.15’de verilmekte olan model, DNAPL enjeksiyonu öncesi Model-2’yi göstermektedir. Kuru kumdan oluşan geçirimsiz tabaka 0 ile 23 cm arasında ve minimum yüksekliği 18 cm maksimum yüksekliği 23 cm olacak şekilde yüzey bozukluğu ile eklenmiştir. Suyu doymuş tabaka ise 23 cm ile 40 cm arasında yer almaktadır.

Bu çalışmada sayısal model için seçilmiş parametreler ve bu parametrelere ait tanımlanan değerler Tablo 6.8’de verilmektedir.

Tablo 6.8. Model-2 için 3B sayısal modellemede kullanılan parametreler

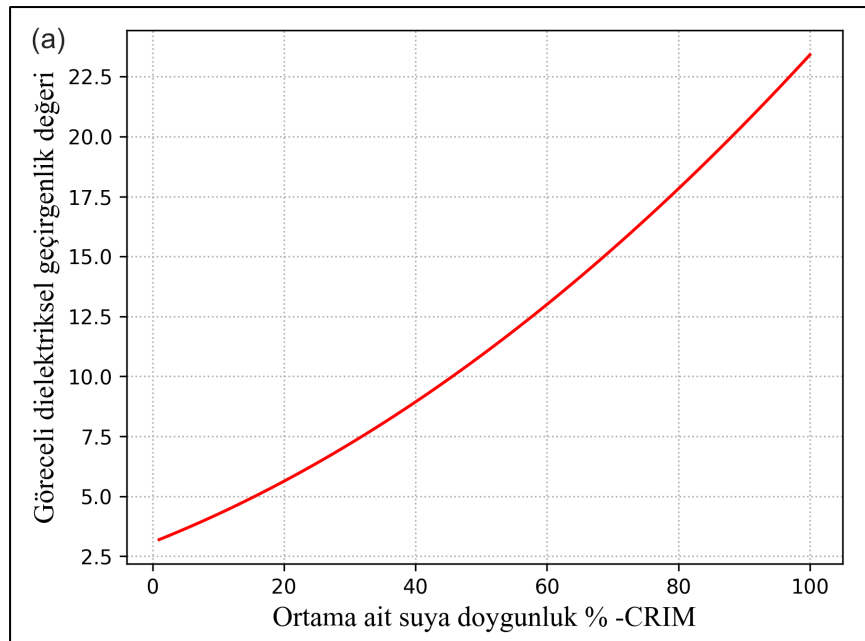
Parametreler	Değerler
Boyutlar	0,70 x 0,15 x 0,40 m
Hücre aralığı	0,01 x 0,001 x 0,001 m
Merkez frekans	2 GHz
Zaman penceresi	10 ns
Alıcı-Verici mesafesi	0,07 m
Kaynak dalgacığı	gaussiandot
Kaynak türü	Teorik kaynak
İz aralığı	0,01 m
İz sayısı	40

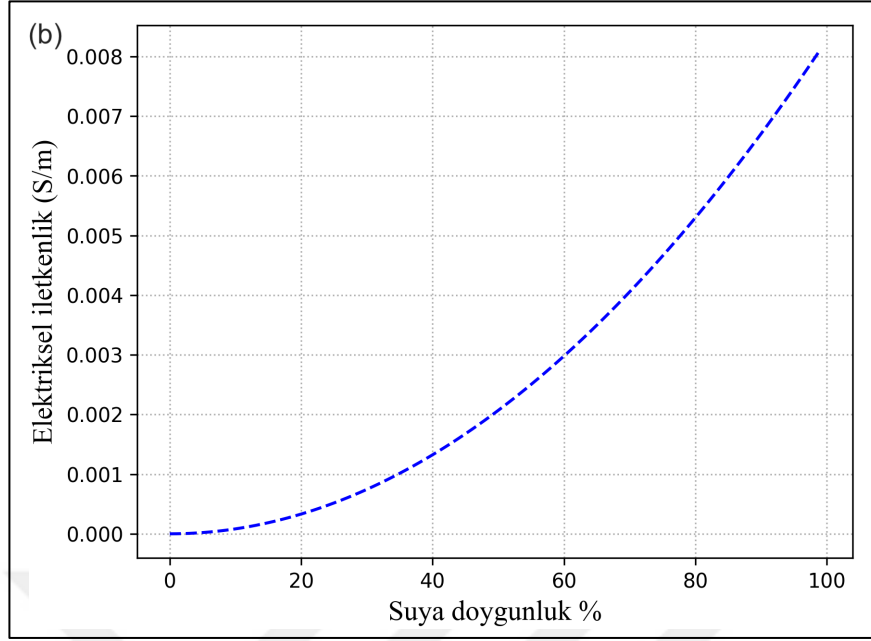
6.2.1. Modellemede kullanılan fiziksel parametrelerin hesaplanması

Bu bölümde, Model-2’de suya doymuş tabaka olarak tanımladığımız 23 cm ile 40 cm arasındaki tabaka için fiziksel parametreler hesaplanmıştır. Model tabanı ile ilk 23 cm arasında kalan tabaka ise tam geçirimsiz olarak varsayılmıştır. Bunun yanı sıra DNAPL bölgesinde farklı suya doymuşluk değerleri için fiziksel hesaplamalar yapılmış ve hesaplanan bu değerler modellemelerde ilgili bölgeleri temsil edecek şekilde tanımlanmıştır.

Suya doymuş tabakanın göreceli dielektriksel geçirgenlik değeri CRIM modeli ile hesaplanmıştır (Greaves ve diğ., 1996). Üç fazlı bir model için w , a , m sırasıyla su, gaz (hava) ve matris (kum) için göreceli dielektrik geçirgenliğini temsil etmektedir ve CRIM modeli bu üç faz için Bölüm 4’de verilen eşitlik (4.4) ile hesaplanmıştır. Model-2’deki suya doymuş tabaka için göreceli dielektrik geçirgenlik değerinin bu eşitlikle hesaplanmasının nedeni; DNAPL enjeksiyonundan önce ortamın su, hava ve kum olmak üzere üç fazdan oluşuyor olmasıdır. Aynı tabaka için elektriksel iletkenlik değerleri ise eşitlik (4.16)’da verilen Archie Kanun’u ile hesaplanmıştır.

Tabaka 1 için göreceli dielektrik değerleri (ϵ_1) ile elektriksel iletkenlik değerleri (σ), sırasıyla %47, %50, %60, %70, %80, %90 ve %100 suya doymuşluk oranları için hesaplanmıştır. Şekil 6.16, farklı suya doymuşluk oranları için elde edilen grafikleri göstermektedir.





Şekil 6.16. Farklı suya doyunluk değerleri için a) CRIM modeli ile hesaplanmış göreceli dielektriksel geçirgenlik b) Archie kanunu ile hesaplanmış elektriksel iletkenlik değerleri değişimi

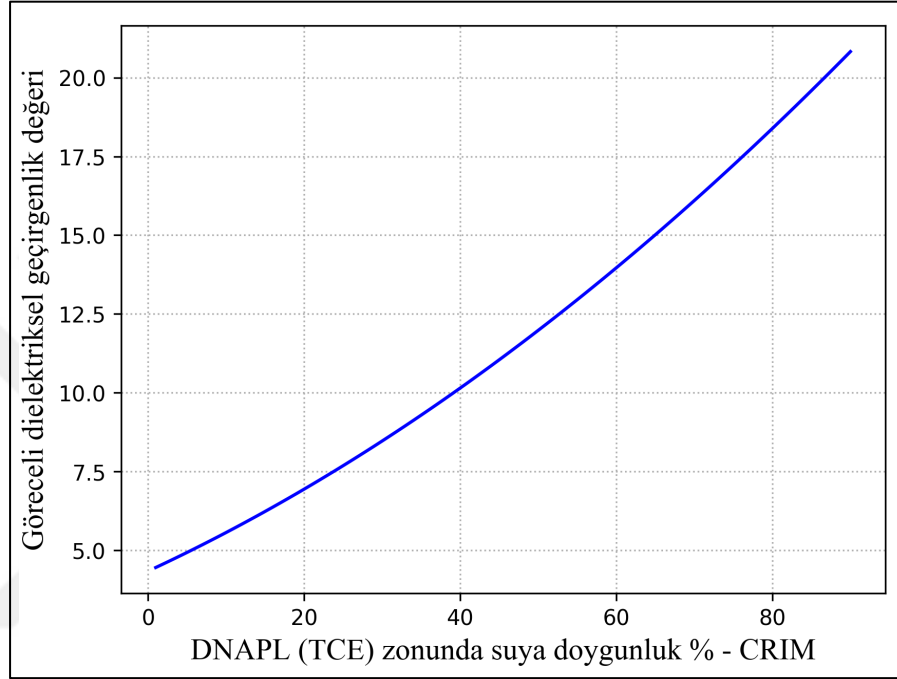
Şekil 6.16'daki grafiklerle gösterilen, tabaka 1 için hesaplanmış farklı suya doyunluk değerleri (ϵ_1) ile elektriksel iletkenlik değerleri (σ_1) Tablo 6.9'da verilmektedir.

Tablo 6.9. Farklı suya doyunluk değerleri için hesaplanan göreceli dielektriksel geçirgenlik ve elektriksel iletkenlik değerleri

Suya doyunluk	Göreceli dielektriksel geçirgenlik değeri (ϵ_1)	Elektriksel iletkenlik (σ_1) S/m
%47	10,27	0,0018
%50	10,87	0,0020
%60	13,00	0,0029
%70	15,32	0,0040
%80	17,82	0,0052
%90	20,52	0,0067
%100	23,41	0,0082

Ortamda NAPL nitelikli kimyasalların bulunması durumunda göreceli dielektrik değeri için ilk CRIM modelinden türetilmiş yeni bir model kullanılabilir (Ajo-Franklin ve diğ., 2006). Bu model, farklı suya doyunluk değerleri için tabakanın alacağı göreceli dielektrik değerini NAPL içeren ortamlar için hesaplamaktadır (Orlando ve Renzi, 2013). Hesaplamalar eşitlik (4.5) ile yapılmıştır.

DNAPL kütlesi için göreceli dielektrik değerleri (ϵ_d) ile elektriksel iletkenlik değerleri (σ_d), sırasıyla %47, %50, %60, %70, %80 ve %90 suya doygunluk oranları için hesaplanmıştır. Şekil 6.17, DNAPL kütlesinin bulunduğu ortamda farklı suya doygunluk değerleri için göreceli dielektriksel geçirgenlik değerine ait değişim grafiğini göstermektedir.



Şekil 6.17. DNAPL zonunda farklı suya doygunluk değerleri için hesaplanmış göreceli dielektriksel geçirgenlik değeri değişimi

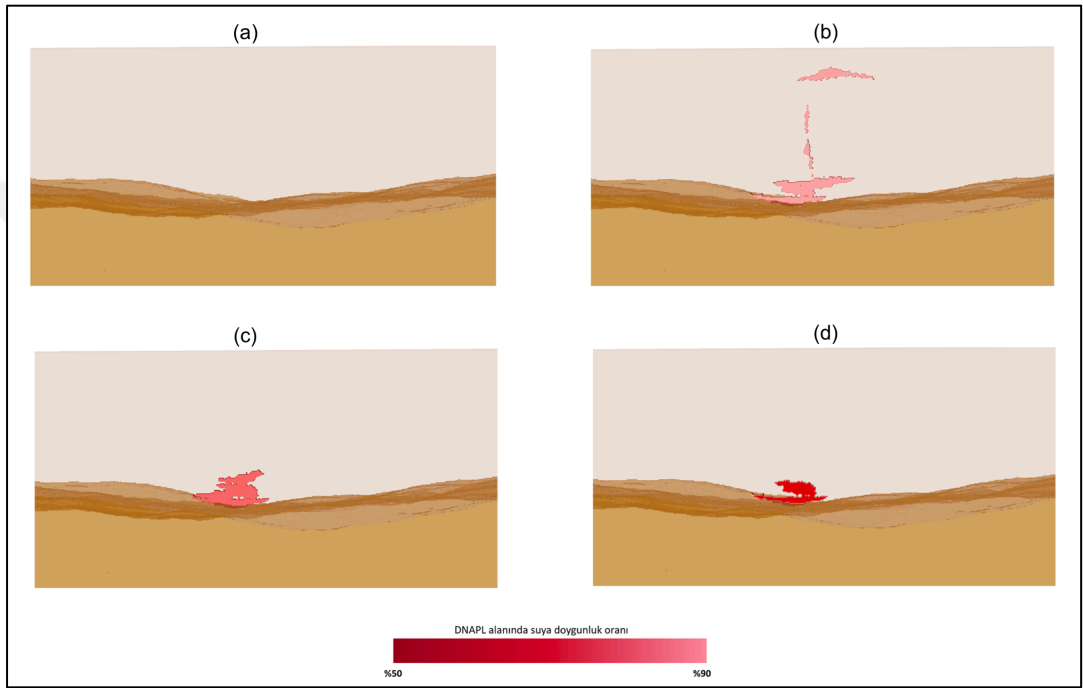
Şekil 6.17'de grafikte gösterilen DNAPL bölgesinde farklı suya doygunluk değerleri için elde edilen göreceli dielektriksel geçirgenlik değerleri (ϵ_d) ile elektriksel iletkenlik değerleri (σ_d) Tablo 6.10'da verilmektedir.

Tablo 6.10. Farklı suya doygunluk değerleri için DNAPL (TCE) kütlesinin alacağı göreceli dielektriksel geçirgenlik ve elektriksel iletkenlik değerleri

Suya doygunluk	Göreceli dielektriksel geçirgenlik değeri (ϵ_d)	Elektriksel iletkenlik (σ_d) (S/m)
%47	11,41	0,0018
%50	11,98	0,0020
%60	13,96	0,0029
%70	16,09	0,0040
%80	18,38	0,0052
%90	20,82	0,0067

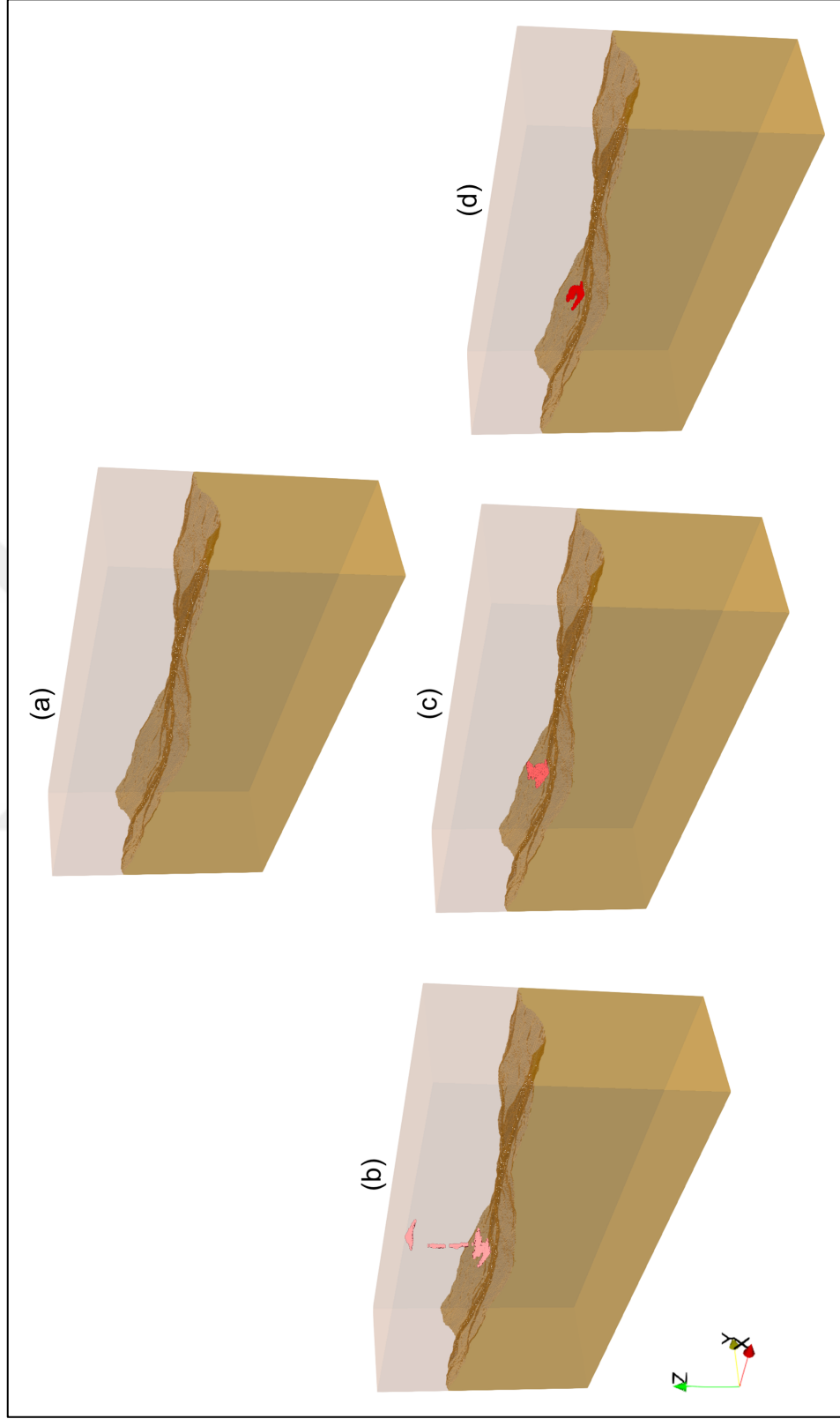
6.2.2. DNAPL yayılım senaryosu

Tez çalışmasının bu bölümünde DNAPL enjeksiyonundan sonra zamana bağlı olarak değişen DNAPL fazlarını temsil eden üç aşamalı bir senaryoya ait sayısal benzetimler yapılmıştır. DNAPL enjeksiyonunun öncesinde ve sonrasında belirli zaman aralıklarında DNAPL fazının yayılım durumunu gösteren anlık görüntüler Şekil 6.18’de verilmektedir.

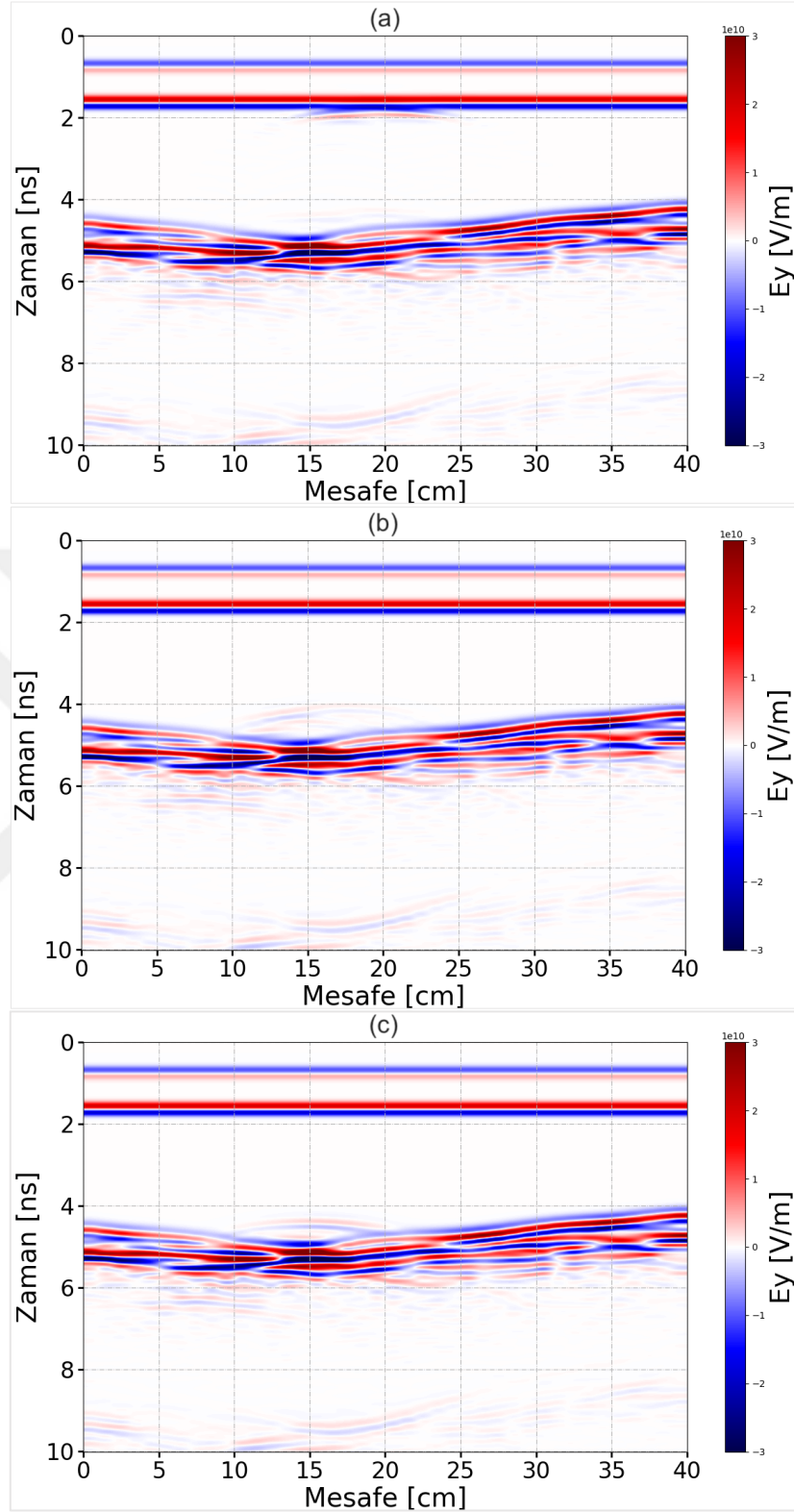


Şekil 6.18. Model-2, Zamana bağlı olarak değişen DNAPL geometrisi ve suya doygunluk oranları; a) DNAPL enjeksiyonu öncesi b) 1 gün sonra suya doygunluk %90, c) 8 gün sonra suya doygunluk %70, d) 11 gün sonra suya doygunluk %50

Birinci tabakanın suya tam doygun olarak kabul edildiği bu senaryoda DNAPL kütlesinin geometrisi ve suya doygunluk oranı zamana bağlı olarak değişim göstermektedir (Şekil 6.18). Bu senaryo bir başka deyişle ortamdaki DNAPL kütlesinin zamana bağlı olarak geçirimsiz tabaka üzerinde birikmesi sonucu yoğunluğunun artmasını ifade etmektedir. Şekil 6.19’da tüm senaryolar 3B model içerisinde gösterilmektedir.



Şekil 6.19. Model-2 içerisinde a) DNAPL enjeksiyonu öncesi, b) 1 gün sonrası, c) 8 gün sonrası ve d) 11 gün sonrası

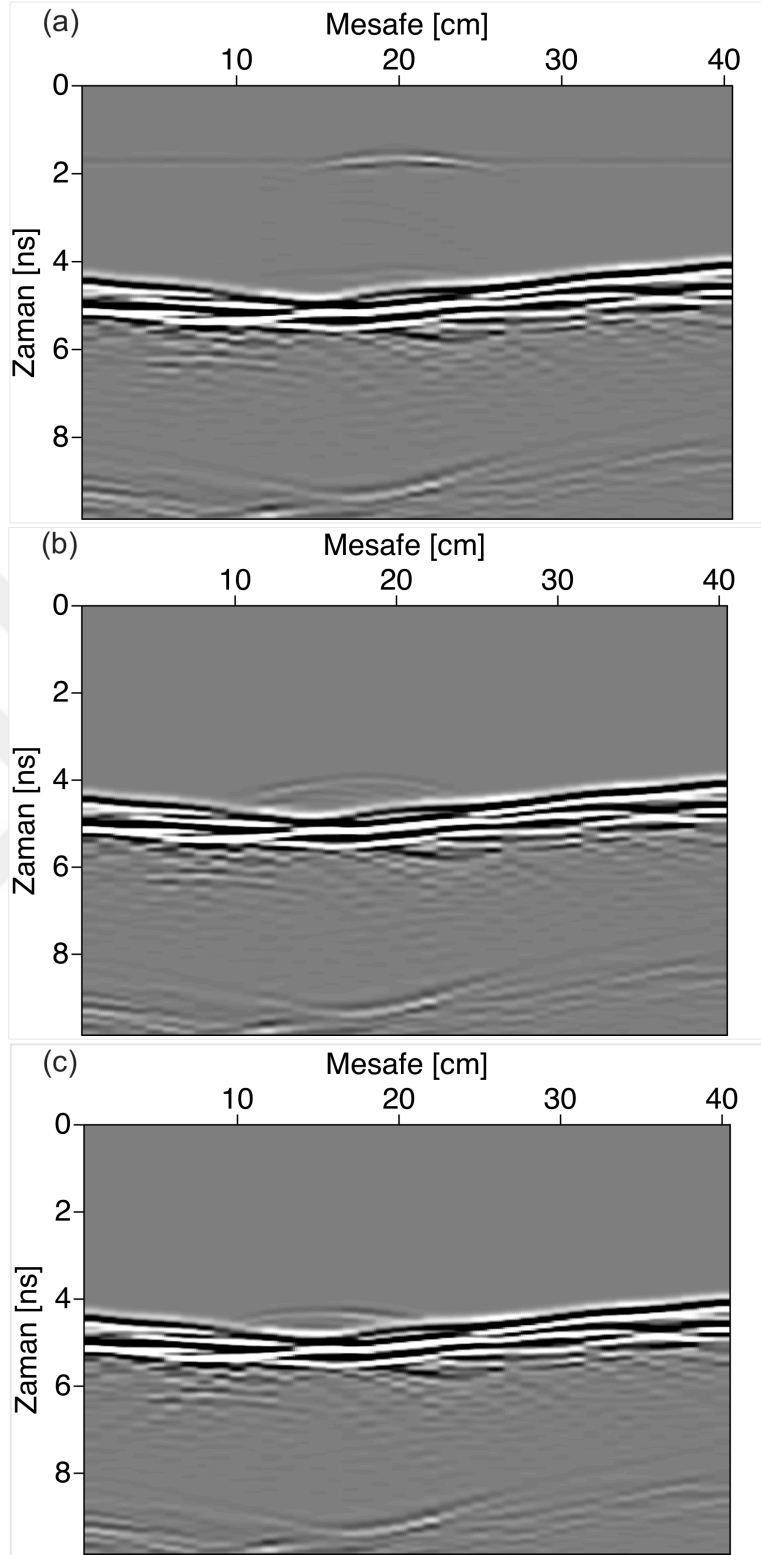


Şekil 6.20. Model-2, Zamana bağlı olarak değişen DNAPL geometrisi ve suya doygunluk oranları için elde edilen sentetik radargramlar; a) 1 gün sonunda %90, b) 8 gün sonunda %70 ve c) 11 gün sonunda %50 suya doygunluk

Şekil 6.19’da gösterilmekte olan ve DNAPL enjeksiyonundan sonra gerçekleşen yayılım senaryoları için elde edilen sentetik radargramlar Şekil 6.20’de verilmektedir.

Yer radarı verilerinin daha sağlıklı yorumlanabilmesi için elde edilen radargramlara çeşitli veri işlem adımları uygulanmaktadır. Veri işlem adımlarının uygulanmasının temel nedeni sinyal/gürültü oranını ve buna bağlı olarak veri kalitesini arttırmaktır. Bu adımlardan bazıları yer radarı ölçümlerinde standart olarak uygulanmakta olup bazıları spesifik problemlerle karşılaşılması durumunda kullanılmaktadır. Yer radarı yönteminde uygulanan veri işlem adımlarına ait ayrıntılı bilgiye Özkap (2008)’den ulaşılabilir.

Şekil 6.20’de elde edilen sentetik radargramlar üzerinde DNAPL kütlesinden kaynaklı yansımaları daha belirginleştirebilmek adına standart veri işlem adımlarından iki tanesi olan havadan gelen dalgaların kayıtlardan çıkartılması ve yansımaları daha belirgin hale getirmek için kazanç adımı uygulanmıştır. Şekil 6.20’de gösterilmekte olan sentetik radargramlardan direkt gelen dalga atıldıktan, kazanç uygulandıktan ve normalize edildikten sonra elde edilen sonuçlar Şekil 6.21’de verilmektedir. Şekil 6.21a incelendiğinde DNAPL kütlesine ait yansımanın 2 ns civarında belirginleştiği görülmektedir. Benzer şekilde Şekil 6.21b ve Şekil 6.21c’de 4 ns’den başlayarak DNAPL kütlesinin havuz içerisine yerleştiği görülmektedir.



Şekil 6.21. Direkt gelen dalgaya atıldıktan, kazanç uygulandıktan sonra normalize edilmiş sentetik radargramlar a) 1 gün %90, b) 8 gün %70, c) 11 gün %50

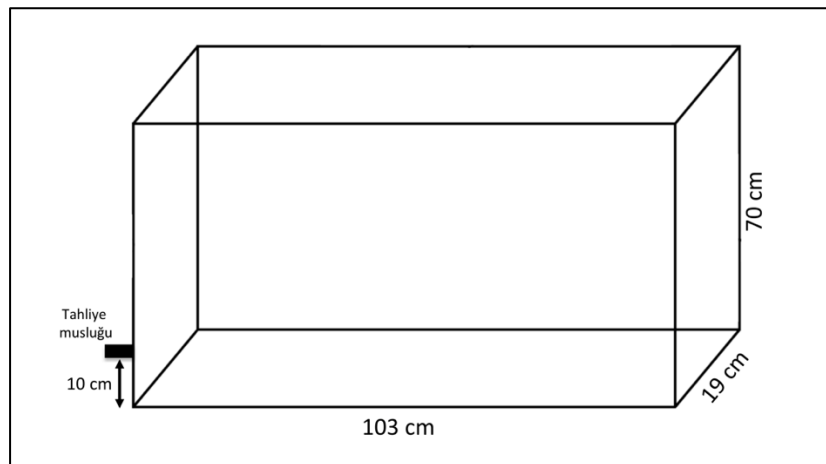
6.3. Model 3

6.3.1. Laboratuvar testleri

Laboratuvar ortamında kontrollü deney seti çalışmaları Roma Sapienza Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Yapı ve Çevre Mühendisliği (DICEA) Bölümü laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir ve yine aynı bölümün izni ile bu tez çalışmasında kullanılmıştır.

Bu deney setinin tasarlanma amacı; yeraltı su sistemleri içerisine karışan kirletici kimyasalların kontrollü bir deney seti içerisindeki davranışlarını izlemektir. Bir diğer amaç ise deney seti üzerinden çeşitli jeofizik yöntemleri kullanarak elde edilen sonuçlar ile ortamdaki değişimler arasında bağlantı kurarak verilerin yorumlanmasındaki belirsizlikleri azaltmaktır. Bu deney seti ile 93 gün boyunca, 39 farklı zaman diliminde test ölçümleri yapılarak, DNAPL türü kirletici kimyasalların zamana bağlı olarak değişimleri izlenmiştir.

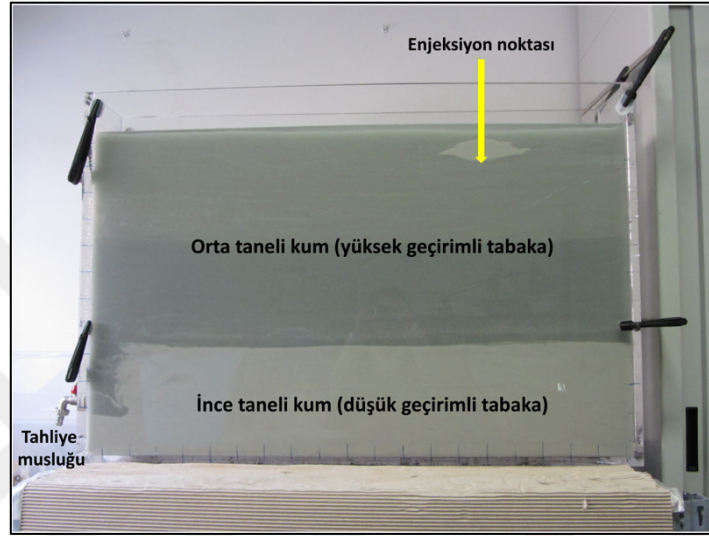
Mini akifer sistemini temsil eden deney seti laboratuvar ortamında 1,03 x 0,19 x 0,70 m ebatlarında olup üst yüzeyi açılabilir şekilde tasarlanmıştır. Deney seti içerisindeki suyun tahliyesi amacıyla tabandan 10 cm yukarıda olacak şekilde, deney setinin sol yüzeyine tahliye musluğu yerleştirilmiştir. Kontrollü deney seti geometrisi Şekil 6.22'de verilmektedir.



Şekil 6.22. Kontrollü deney seti geometrisi

Modelin tabanında 19 cm yüksekliğe kadar ince taneli kum (0,1-0,2 mm) ve bu tabakanın üzerinden 38 cm kalınlığında orta taneli kum (0,4-0,8 mm)

yerleştirilmiştir. İnce taneli kum düşük geçirgenliğe sahip tabakayı oluştururken orta taneli kum ise yüksek geçirgenliğe sahip tabakayı oluşturmaktadır. Katmanların bu şekilde yerleştirilmesinin nedeni DNAPL enjeksiyonundan sonra yoğunluk farkından dolayı model setinin dibine doğru hareket edecek olan DNAPL türü kirleticinin geçirimsiz bir tabaka üzerinde birikmesini sağlayabilmektir. Deney seti içerisindeki tabakaların pozisyonu Şekil 6.23’de verilmektedir.



Şekil 6.23. Kontrollü deney seti içerisinde tabakaların pozisyonu

Kirletici enjeksiyonu 500 ml kirletici kullanılarak, model setinin 75. cm’inde yüzeyden 10 cm derine inilerek enjekte edilmiştir. Bu çalışmada kirletici olarak HFE-7100 karışımı kullanılmıştır. HFE-7100 karışımının zehirli özellikleri bulunmayıp, %96 hidrofloroeter (HFE-7100) ve %4 metil kaprilat’tan oluşmaktadır. HFE-7100 ile Trikloroetilen (TCE)’ye ait özelliklerin karşılaştırılması Tablo 6.11’de verilmektedir.

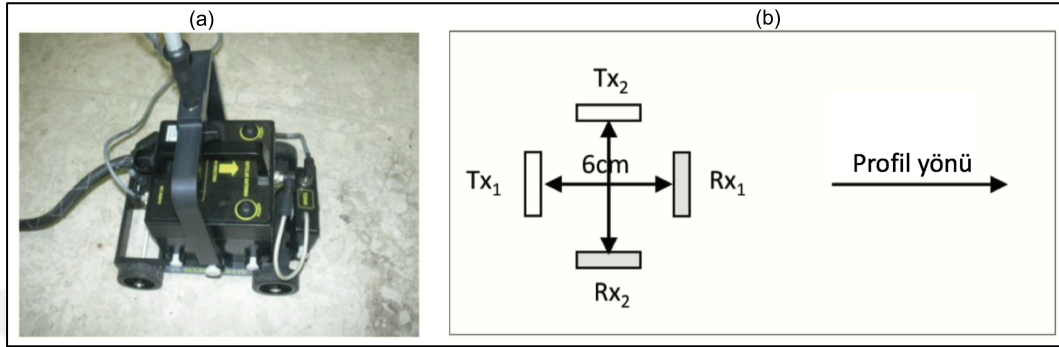
Tablo 6.11. HFE-7100 ve TCE’ye ait özelliklerin karşılaştırılması Orlando ve Renzi (2013)’den düzenlenmiştir

Özellikler	HFE-7100	TCE	Su
Göreceli yoğunluk (g/cm ³)	1,50	1,451*-1,464	1,000
Göreceli viskozite (cP)	0,60	0,59	1,000
Yüzey gerilmesi (mN/m)	13,60	29,30	71,75
Buhar basıncı (kPa)	28	7,73	2,34
Suda çözünübilirlik (mg/L)	12	1100	
Göreceli dielektriksel geçirgenlik	10,4	3,35-3,409*	80
Elektriksel iletkenlik (S/m)	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	5,5x10 ⁻²

* (Ajo-Franklin ve diğ., 2006)

6.3.1.1. Deney seti üzerinde GPR ölçümleri

GPR ölçümleri, laboratuvar düzeneğinin üst yüzeyinden 2 GHz merkez frekansına sahip IDS firmasına ait GPR anteni kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.24 ölçümlerde kullanılan anten görünümünü ve alıcı verici özelliklerini göstermektedir.



Şekil 6.24. GPR ölçümlerinde kullanılan a) anten görüntüsü, b) alıcı-verici kullanım opsiyonları (Orlando ve Renzi, 2013)

Ölçümler sırasında anten alıcı ve verici pozisyonları Şekil 6.24b’de gösterilen Tx₁ ve Rx₁ pozisyonunda, profil yönüne dik olacak şekilde toplanmıştır. Tx₁ ve Rx₁ arasındaki mesafe 6 cm’dir. GPR ölçümlerinde profiller 173 adet iz içermektedir. İzler arasındaki mesafe 0,5 cm’dir. Bu nedenle profil uzunların 86,5 cm’dir. İzler için örnekleme sayısı ise 574’tür.

Bu tez çalışmasında laboratuvarda yapılmış test ölçümlerinden farklı zaman dilimlerinde elde edilmiş üç test incelenmiş ve ardından 3B olarak sayısal modellemeleri yapılmıştır. Bu bölümde kullanılmış olan testler ve bu testlere ait bilgiler Tablo 6.12’de verilmektedir.

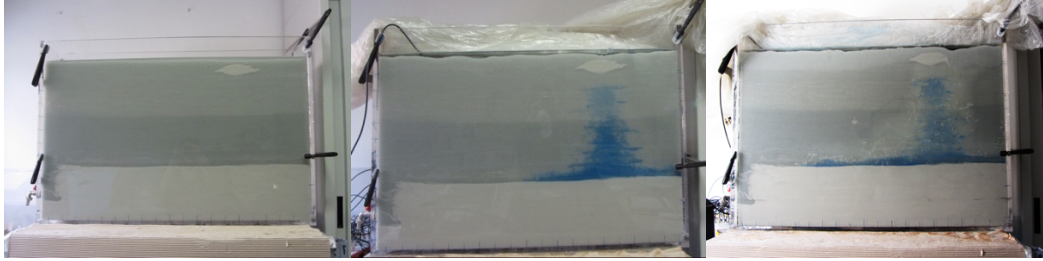
Tablo 6.12. GPR ölçümlerinin yapıldığı testlere ait zaman ve ortam koşul özellikleri

Test numarası	Ortamda kirletici	Ortamda suya doygunluk	Zaman (sa)
Lab 1	Yok	%100	168
Lab 2*	HFE-7100	%100	187,16
Lab 3	HFE-7100	%100	1546

* DNAPL enjeksiyonundan 10 dakika sonra yapılmış test

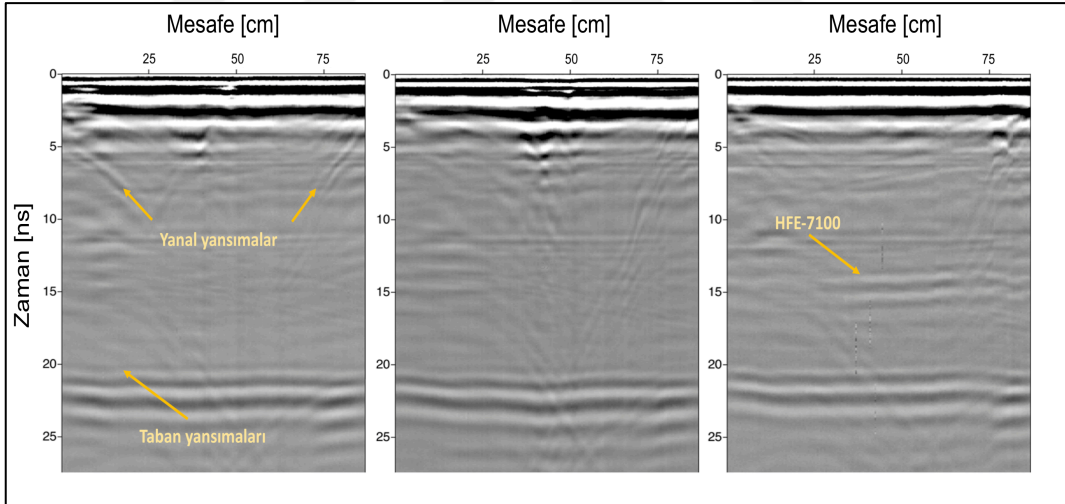
Tabloda belirtildiği gibi Lab 1 testi enjeksiyon öncesinde ve deney seti suya doygun hale getirildikten 168 saat sonra, Lab 2 testi DNAPL deney seti suya doygun hale

getirildikten 187,16 saat ve DNAPL enjeksiyonundan 10 dakika sonrasında gerçekleştirilmiştir. Lab 3 testi deney seti suya doymun hale getirildikten 1546 saat ve DNAPL enjeksiyonunda 1384,16 ölçülmüştür. Tablo 6.12’de tanımlanmakta olan tüm testler için çekilmiş deney seti fotoğrafları bulunmaktadır (Şekil 6.25).



Şekil 6.25. Deney setlerine ait fotoğraflar a) Lab 1, b) Lab 2, c) Lab 3

Lab 1, Lab 2 ve Lab 3 deney setleri üzerinden IDS firmasının 2 GHz merkez frekansına sahip anteni ile ölçülmesi sonucu elde edilen radargramlar yine Şekil 6.26 ile verilmektedir.



Şekil 6.26. Deney seti ölçümlerinden elde edilen radargramlar a) Lab 1, b) Lab 2, c) Lab 3

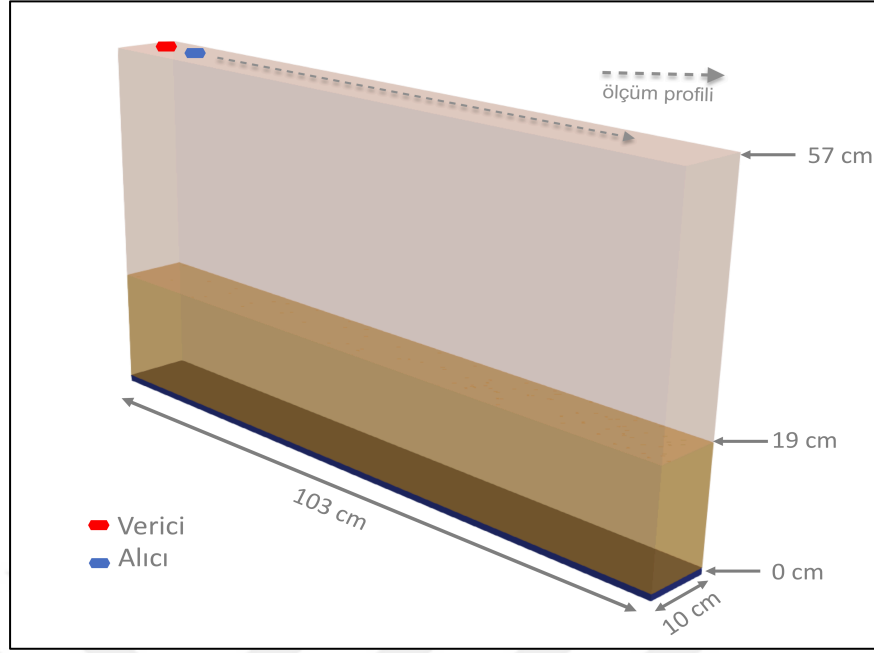
Her üç radargramda da 20 ns’de deney setinin tabanından gelen yansımalar kayıtlara girmektedir. Deney setinin hava ile sınırı olan yan kısımlardan radargramlara girmesi beklenen yanal yansımalar ilk 10 ns içerisinde her üç radargrama da girmiştir. Yanal yansımaların en belirgin olduğu durum enjeksiyon öncesi testi olan Lab 1’de görülmektedir. Lab 2 ve Lab 3 testlerinde ise bu yanal yansımaların HFE-7100’den kaynaklanan yansımalar ile karışmakta olduğu düşünülmektedir. Lab 2 testine ait radargram ayrıntılı incelendiğinde HFE-7100 kütlesine ait herhangi bir yansıma

kayıtlarda gözlemlenmemektedir. Lab 3 testine ait radargram ise hem taban yansımalarını hem de HFE-7100'den kaynaklanan yansımaları içerisinde barındırmaktadır. HFE-7100'e ait yansımalar 15 ns civarından kayıt içerisinde yer almaktadır. Bu durum enjeksiyonundan yaklaşık 22 gün sonra HFE-7100 kimyasalının az geçirimli tabaka üzerine yerleştiğini ve yansımalara neden olacak fiziksel özelliklerde bir tabaka oluşturduğunu göstermektedir. Bu düşünceyle Lab 2 ölçümlerinde kirleticie ait belirgin bir yansımanın elde edilememiş olmasını bu testin HFE-7100 enjeksiyonundan 10 dakika sonrasında alınmasından ve kirleticinin 38 cm derinde bulunan az geçirimli tabaka sınırına henüz yerleşememiş olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

6.3.2. Seçilen testler için 2B ve 3B sayısal modelleme

Bölüm 6.3.1'de detayları verilmekte olan laboratuvar ortamında hazırlanmış kontrollü deney setini temsil eden bir model oluşturulmuştur. Bu modele Model-3 adı verilmiştir. Mini akifer sistemini temsil edecek bu model 1,03 x 0,10 x 0,57 m ebatlarında modellenmiştir (Şekil 6.27). Modelin gerçeğinden daha küçük tasarlanmasının nedeni, Şekil 6.23'de de görüleceği gibi model setinin düşey yönde tamamının kullanılmamış olmasıdır. Model seti düşey yönde 57 cm'ye kadar malzeme ile doldurulmuştur. Bu nedenle sayısal model düşey eksen 57 cm olacak şekilde seçilmiştir. Bunun yanı sıra hesaplamalarda meydana yüksek işlem yükünü hafifletmek adına y eksenini 10 cm olacak şekilde daraltılmıştır.

Model seti içerisindeki tabakalar Şekil 6.27'de gösterilmekte olan deney setindeki tabakalar ile aynı kalınlıkta oluşturulmuştur. Model tabanından başlayarak 19 cm kalınlığında ince taneli kumdan meydana gelen düşük geçirimli tabaka yerleştirilmiştir. Bu tabakanın üzerine de 38 cm kalınlığında orta taneli kumu temsil eden yüksek geçirimli tabaka yerleştirilmiştir. Sayısal modelin taban kısmına deney setinin bittiği bölgenin rahat izlenebilmesi için 1 cm kalınlığında ve tüm taban boyunca uzanan plastik bir katman yerleştirilmiştir. Gerçek deney setinde ise böyle bir plastik katman bulunmamaktadır.



Şekil 6.27. Paraview ile görselleştirilmiş model geometrisi ve tabaların konumu Model-3

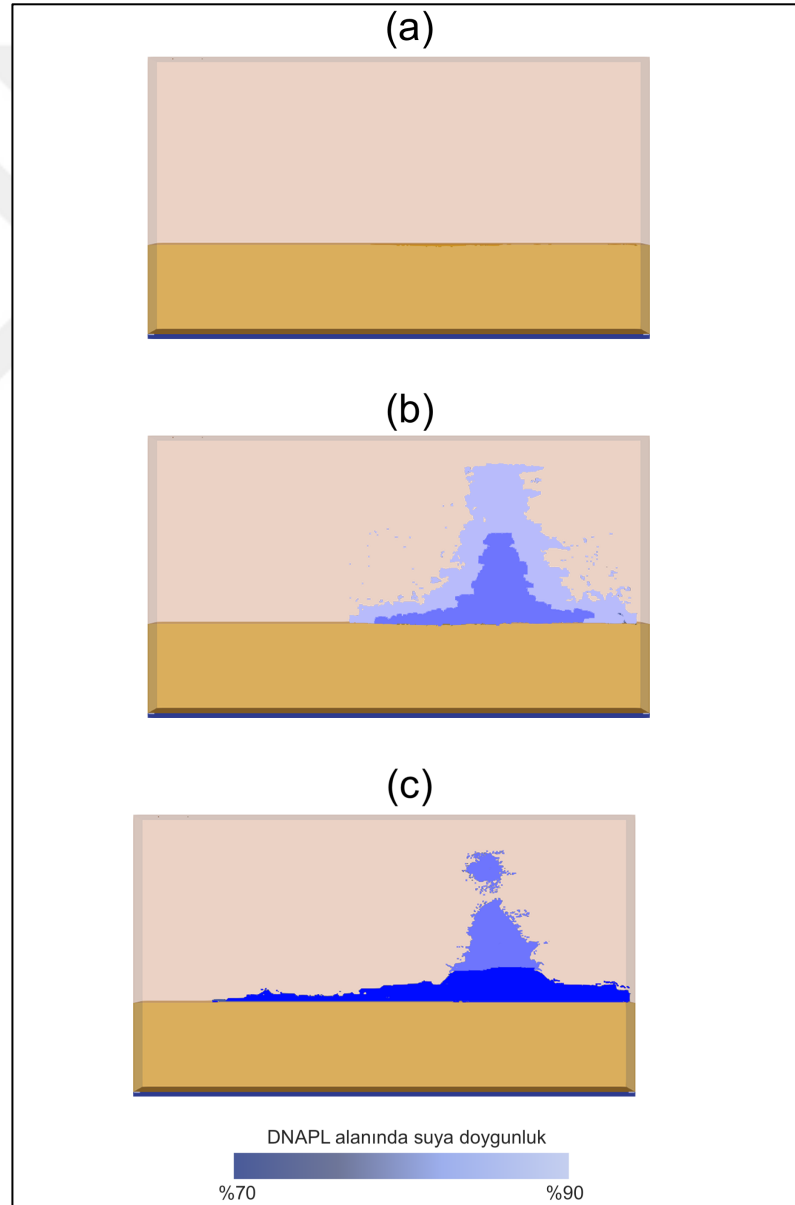
Bu tez çalışması 3B sayısal modelleme konusu üzerine yoğunlaşmış olmasına rağmen, 2B ve 3B modellenme sonuçları arasındaki farkları gözlemleyebilmek adına bu bölümde 2B modelleme de gerçekleştirilmiştir. 2B modellemeye bu bölümde yer verilmesinin bir diğer nedeni gerçek yer radarı ölçümleri ile 2B ve 3B modelleme sonuçlarının karşılaştırılmak istenmesidir. 2B modele ait parametreler 3B modele ait parametreler ile aynı seçilmiş olup 2B model sadece düşey ve yatay olmak üzere iki eksenenden meydana gelmektedir. Bu bölümde yer alan Lab 1, Lab 2 ve Lab 3 testleri için sayısal modelleme çalışmaları Tablo 6.13’de verilmekte olan parametreler çerçevesinde oluşturulmuştur.

Tablo 6.13. Model-3 için 3B sayısal modellemede kullanılan parametreler

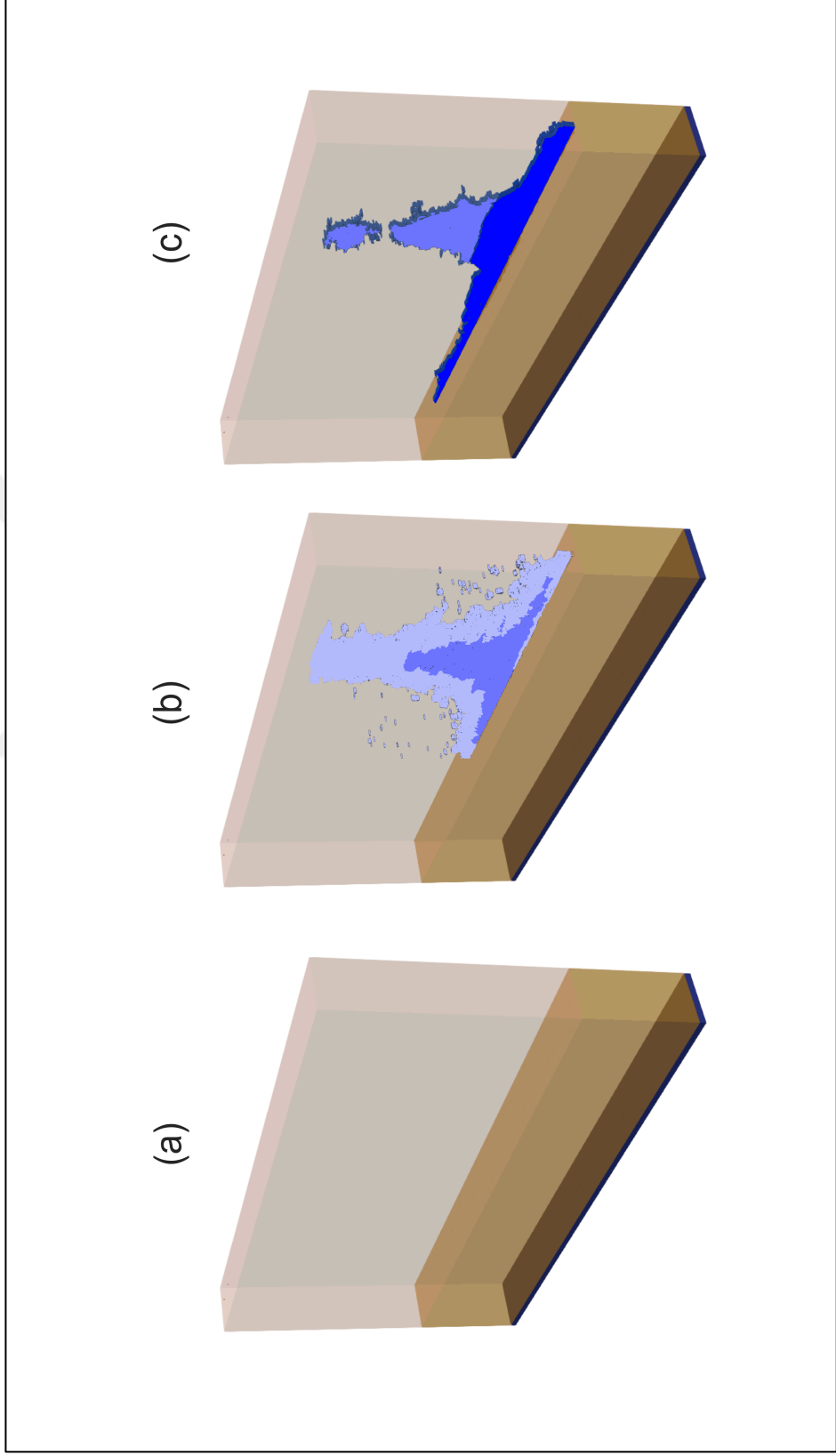
Parametreler	Değerler
Boyutlar *	1,03 x 0,10 x 0,57 m
Hücre aralığı	0,001 x 0,001 x 0,001 m
Merkez frekans	2 GHz
Zaman penceresi	28 ns
Alıcı-Verici mesafesi	0,06 m
Kaynak dalgacığı	gaussiandot
Kaynak türü	Teorik kaynak
İz aralığı	0,01 m
İz sayısı	86

*2B model için boyutlar 1,03 x 0,57 m seçilmiştir.

Şekil 6.25’de verilmekte olan fotoğraflar, Bölüm 5 içerisinde anlatılan resimden (PNG) gömülü nesne geometrisi elde etme yöntemi kullanılarak gprMax yazılımının convert_png2h5 modülü kullanılarak sayısal model içerisine dahil edilmiştir. Lab 1, Lab 2 ve Lab 3 için tasarlanan model geometrileri 2B model için Şekil 6.28 ve 3B model için Şekil 6.29’da gösterilmektedir. DNAPL (HFE-7100) zonundaki suya doygunluk azalıp HFE-7100’e ait doygunluk arttıkça tabakaların renklerinin koyulaştırılarak verildiği görülmektedir. Bu skalada üç farklı tonda renk bulunmaktadır. Mavinin en açık tonu %90 suya doygunluğu temsil ederken en koyu tonu ise %70 suya doygunluğu ifade etmektedir.



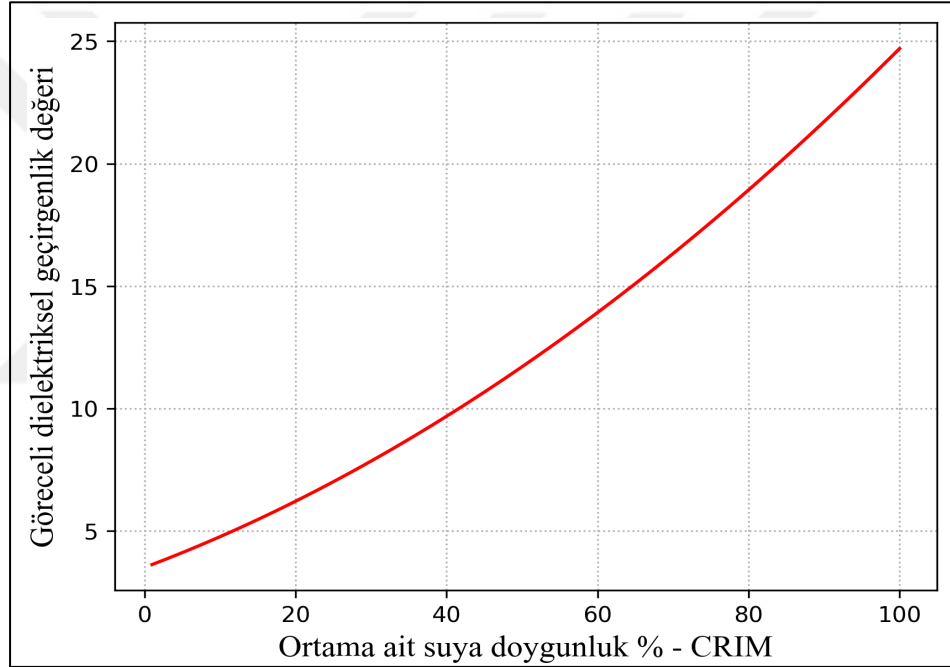
Şekil 6.28. 2B için Model-3 içerisinde a) Lab 1, b) Lab 2 ve c) Lab 3 testi



Şekil 6.29. 3B için Model-3 içerisinde a) Lab 1, b) Lab 2 ve c) Lab 3 testi

6.3.2.1. Modellemede kullanılan fiziksel parametrelerin hesaplanması

Bu bölümde öncelikli olarak Model-3 setinin suya tam doymun olduğu durumlar için ortamın göreceli dielektriksel geçirgenlik ve elektriksel iletkenlik değerleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar CRIM ve Dobson (Peplinski) yöntemleri ile ayrı ayrı yapılmıştır. Bölüm 4’de anlatıldığı gibi üç fazlı ortam için w, a, m sırasıyla su, gaz (hava) ve matris (kum) için CRIM modeli ile eşitlik (4.4) kullanılarak hesaplanmıştır. Aynı tabaka için elektriksel iletkenlik değerleri eşitlik (4.16) kullanılarak ile hesaplanmıştır. Bu tabaka için hesaplanan göreceli dielektriksel geçirgenlik değerleri Şekil 6.30’da verilmektedir.

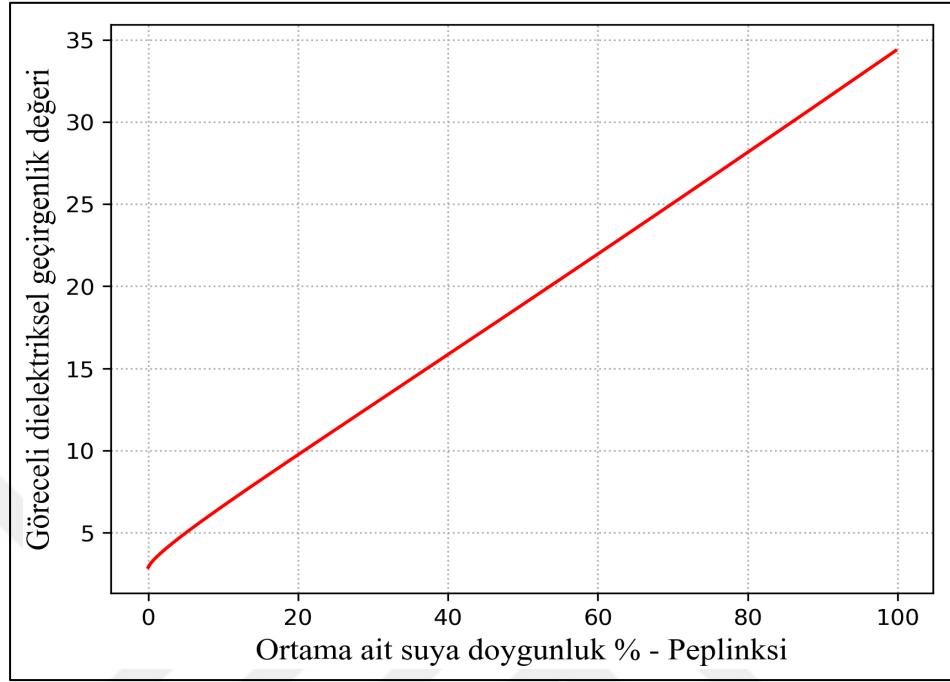


Şekil 6.30. Ortama ait farklı suya doymunluk değerleri için CRIM modeli ile hesaplanmış göreceli dielektriksel geçirgenlik değerleri

CRIM modeli ile suya tam doymun ortam koşulları için efektif göreceli dielektriksel geçirgenlik değeri 24,70 ve elektriksel iletkenlik değeri de 0,0082 S/m olarak hesaplanmıştır.

İkinci yöntem olarak Dobson (Peplinski) modeli ile suya tam doymun koşullar için ortam, eşitlikler (4.6 – 4.14) kullanılarak hesaplanmıştır. Bu yöntem ile yapılan hesaplamalarda ortamın tamamının kumdan oluştuğu, kullanılan kuma ait tanecik yoğunluğu $\rho_b=1,53 \text{ g/cm}^3$, bulk yoğunluğu $\rho_s=2,50 \text{ g/cm}^3$ olarak kullanılmıştır. Bu değerlerin kullanılması ile ortama ait gözeneklilik ve %38,8 olarak hesaplanmıştır.

Hesaplanan göreceli dielektriksel geçirgenlik değerlerine ait grafik Şekil 6.31’de verilmektedir.



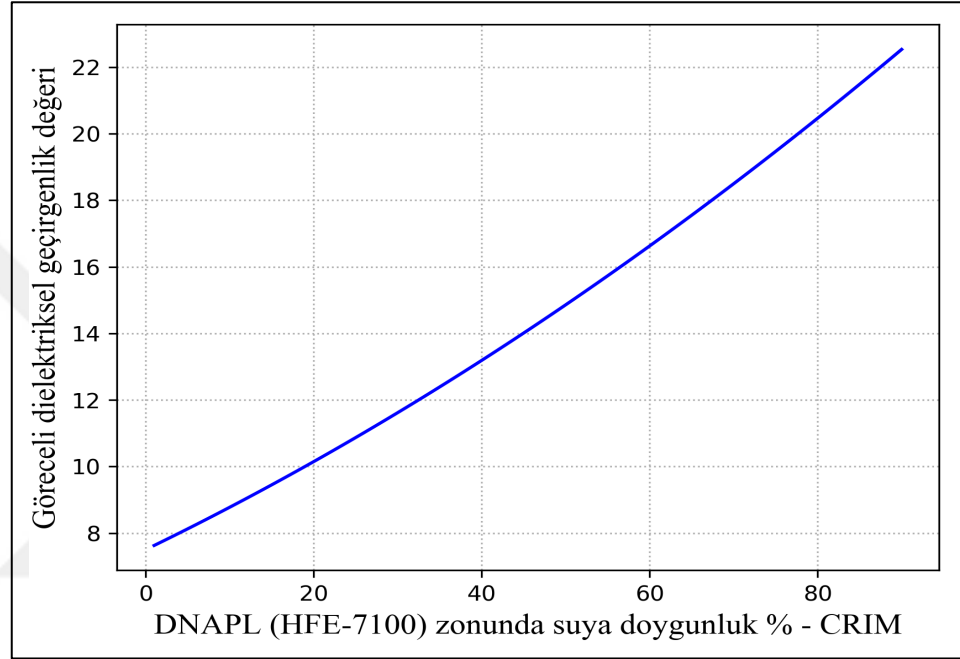
Şekil 6.31. Ortama ait farklı suya doymuluk değerleri için Dobson (Peplinski) modeli ile hesaplanmış göreceli dielektriksel geçirgenlik değerleri

Dobson (Peplinski) modeli ile suya tam doymun ortam koşulları için efektif göreceli dielektriksel geçirgenlik değeri 33,78 ve elektriksel iletkenlik değeri de 0,0092 S/m olarak hesaplanmıştır.

Şekil 6.28 ve Şekil 6.29’da Lab 2 ve Lab 3 testleri için verilmekte olan sayısal model içerisindeki HFE-7100 kimyasalı, baskın renk karakterlerine göre mavinin farklı tonlarında renklendirilmiştir. Farklı renkler farklı suya doymunluk değerlerini ifade etmektedir. Örneğin Lab 2 içerisindeki kirletici alanındaki açık mavi renk %90 suya doymunluğu temsil ederken daha koyu mavi ile verilen iç kısım %80 doymunluğu ifade etmektedir. Lab 3 içerisinde ise üstte yer alan açık renkli kısım %80, koyu renkli kısım ise %70 suya doymunluğu ifade etmektedir. Yani su doymunluğunun yüksek olduğu kirletici alanları açık renklerden başlayarak su doymunluğunun azalması ile birlikte daha koyulaşmaktadır.

Ortam içerisine enjekte edilen HFE-7100 kimyasalı için farklı suya doymunluk derecelerine bağlı olarak göreceli dielektriksel geçirgenlik değerleri eşitlik (4.5)

kullanılarak hesaplanmıştır. DNAPL kütlesi için göreceli dielektriksel geçirgenlik değerleri (ϵ_d) ile elektriksel iletkenlik değerleri (σ_d), sırasıyla %47, %50, %60, %70, %80 ve %90 suya doygunluk oranları için hesaplanmıştır. Şekil 6.32, farklı suya doygunluk oranları için elde edilen göreceli dielektriksel geçirgenlik değerinin DNAPL kütlesinin farklı suya doygunluk değerleri için hesaplandığı grafiği göstermektedir.



Şekil 6.32. HFE-7100 zonunda su doygunluğu artışı ile hesaplanmış göreceli dielektriksel geçirgenlik değeri değişimi

DNAPL bölgesinde farklı suya doygunluk değerleri için elde edilen göreceli dielektriksel geçirgenlik değerleri (ϵ_d) ile elektriksel iletkenlik değerleri (σ_d) Tablo 6.14'de verilmektedir.

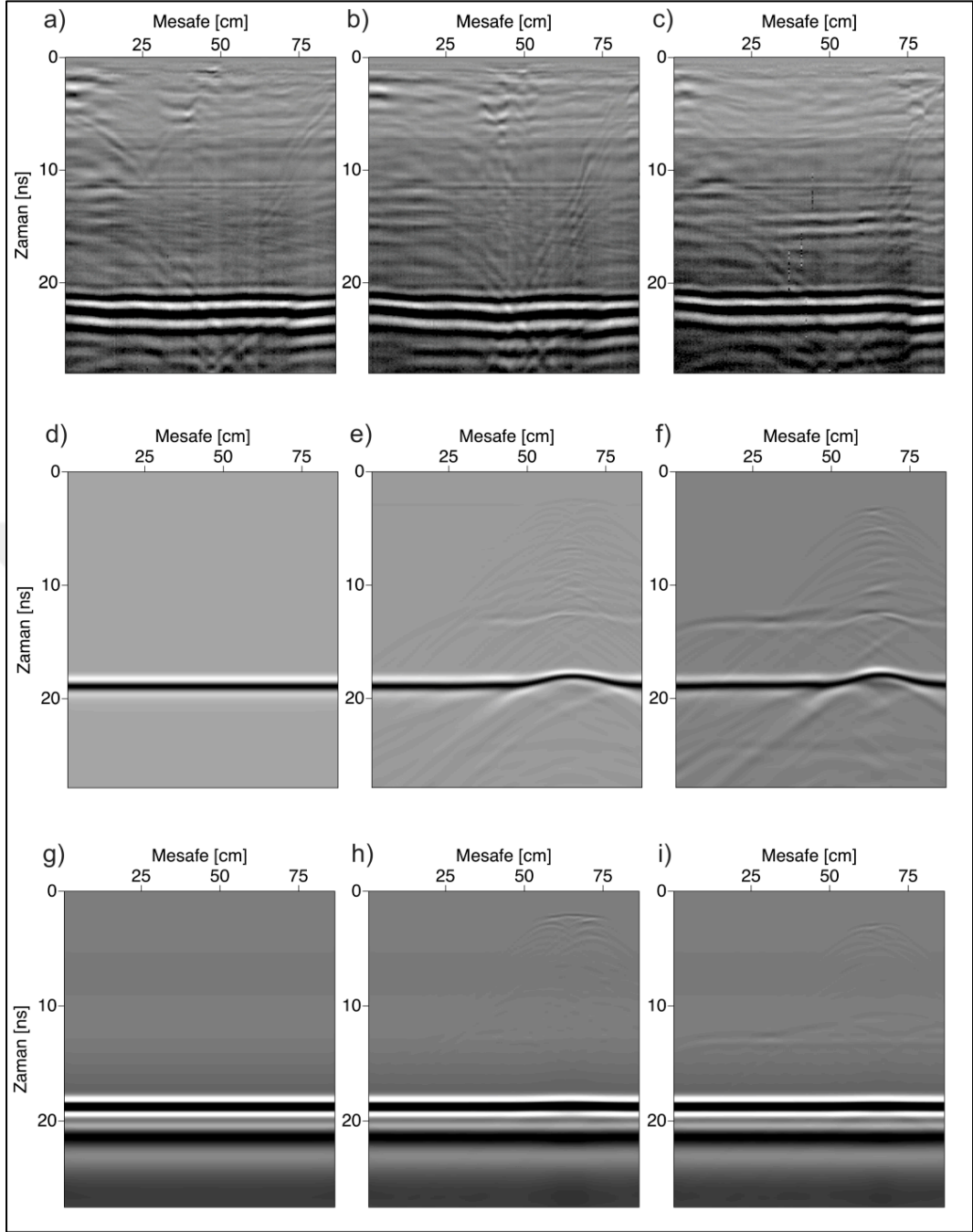
Tablo 6.14. Farklı suya doygunluk değerleri için DNAPL (HFE-7100) kütlesinin alacağı göreceli dielektriksel geçirgenlik ve elektriksel iletkenlik değerleri

Suya doygunluk	Göreceli dielektriksel geçirgenlik değeri (ϵ_d)	Elektriksel iletkenlik (σ_d) (S/m)
%47	14,34	0,0018
%50	14,85	0,0020
%60	16,62	0,0029
%70	18,49	0,0040
%80	20,46	0,0052
%90	22,53	0,0067

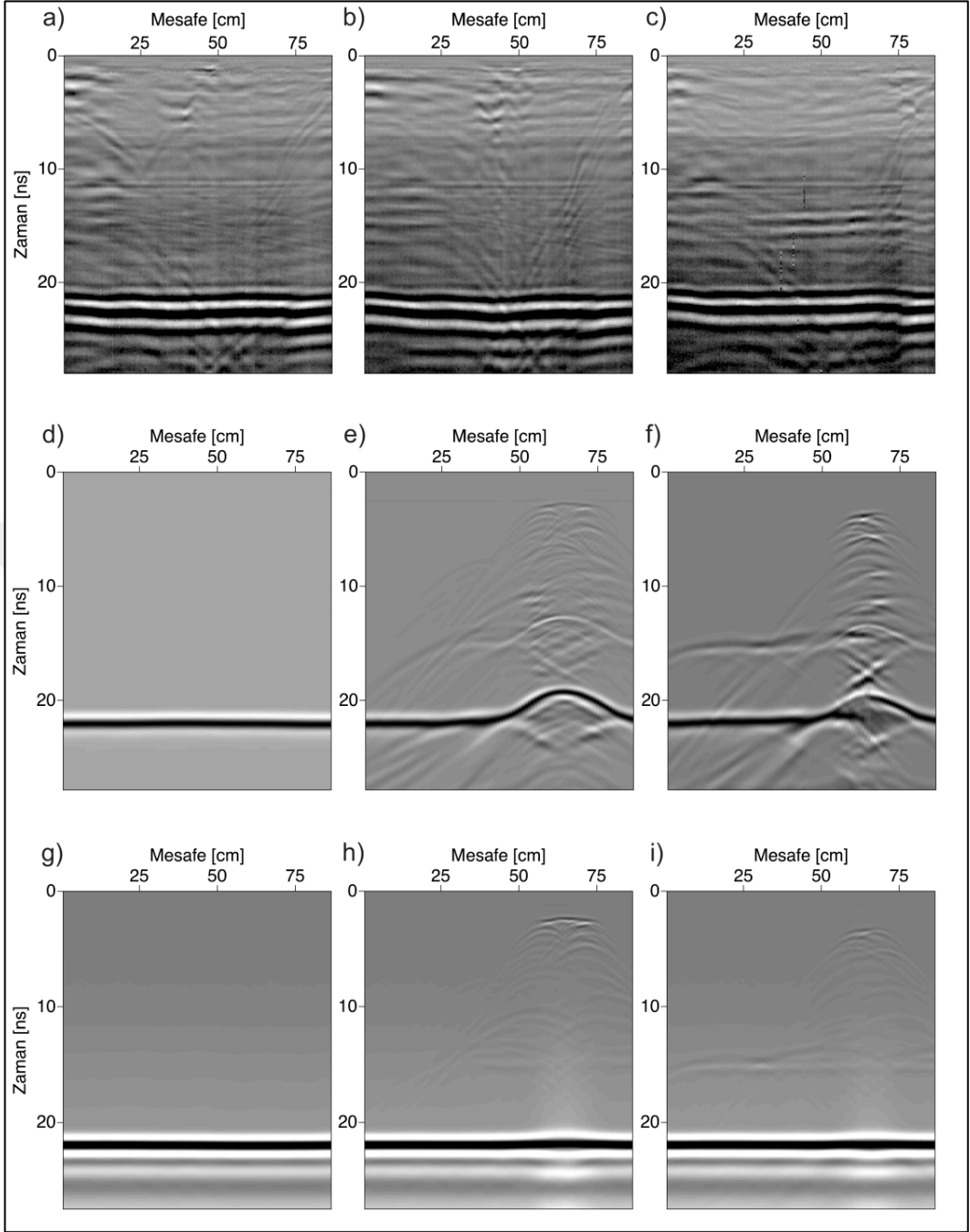
6.3.3. Sentetik sonuçlar ile gerçek sonuçların karşılaştırılması

Tez çalışmasının bu bölümünde ortam ve DNAPL davranışlarını irdelemek amacıyla farklı yöntemlerle ile hesaplanan dielektriksel parametreler kullanılarak elde edilmiş sentetik radargramlar ile gerçek laboratuvar ölçümlerine ait sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu bölüm özelinde oluşturulan 2B sayısal modelleme sonuçları da karşılaştırılmalarında yer verilmiştir.

Şekil 6.26'da verilmekte olan Lab 1, Lab 2 ve Lab 3 testleri üzerinden elde edilen gerçek ölçüm sonuçları CRIM ve Dobson (Peplinski) yöntemleri ile hesaplanmış sentetik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Laboratuvar ortamında toplanan yer radarı verileri Şekil 6.33a-c ve Şekil 6.34a-c'de verilmiştir. CRIM modeli ile hesaplanan 2B ve 3B modellerden elde edilen ait sentetik radargramlar sırasıyla Şekil 6.33d-f ve Şekil 6.33g-i ile gösterilmiştir. Dobson (Peplinski) yöntemi ile hesaplanan 2B ve 3B modellerden elde edilen sentetik radargramlar ise yine sırasıyla Şekil 6.34d-f ve Şekil 6.34g-i ile verilmiştir.



Şekil 6.33. Lab 1, Lab 2, Lab 3 testleri için normalize edilmiş a-c) gerçek yer radarı ölçümleri, d-f) 2B model için CRIM modeli ile hesaplanan sentetik radargramlar, g-i) 3B model için CRIM modeli ile hesaplanan sentetik radargramlar



Şekil 6.34. Lab 1, Lab 2, Lab 3 testleri için normalize edilmiş a-c) gerçek yer radarı ölçümleri, d-f) 2B model için Dobson (Peplinski) modeli ile hesaplanan sentetik radargramlar, g-i) 3B model için Dobson (Peplinski) modeli ile hesaplanan sentetik radargramlar

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması ile laboratuvar ortamında DNAPL türü kirleticilerin davranışları yer radarı yöntemi için sayısal modelleme açısından ayrıntılı olarak incelenmiştir. DNAPL gibi akışkan türdeki hedef yapıların sayısal modellemeye gerçek formuna yakın bir biçimde dahil edilebilmesi için resimden (PNG) gömülü nesne geometrisi elde etme yöntemi kullanılmıştır. Nesnelerin, resimden 2B sayısal modellemeye taşınmaları yeni bir durum olmamasına karşın resimden 3B model geometrisi oluşturma yaklaşımının farklı bir uygulama yöntemi olarak literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Bu amaçla sayısal modelleme benzetimleri için kullanılan açık kaynak kodlu gprMax yazılımında düzenlemeler yapılarak bu amaca uygun hale getirilmiştir. Yine bu tez çalışması içerisinde ilk kez 3B tarayıcılardan elde edilen bir gerçek nesne geometrisi yer radarı yöntemi için sayısal modellemeye dahil edilmiştir. Bir ineğe ait femur kemiği 3B tarayıcı ile tarandıktan sonra 3B sayısal model içerisine dahil edilmiştir. Bu çalışma gömülü hedef yapıların sayısal modelleme en gerçekçi şekilde taşınmasına olanak sağlayan yeni bir yaklaşım olup literatürde önemli bir boşluğu dolduracağı öngörülmektedir.

Tez çalışmasının amacını oluşturan DNAPL türü kirleticileri incelemek adına Model-1, Model-2 ve Model-3 adı verilen üç adet sayısal model oluşturulmuştur. Model-1 çalışmasında kaynak olarak GSSI firmasının 1,5 GHz merkez frekansına sahip anten modeli kullanılmıştır. Model-1 ile önce ortama dair dielektriksel özellikler yani; göreceli dielektriksel geçirgenlik ve elektriksel iletkenlik değerleri kademeli olarak değiştirilmiştir. Ortama ait göreceli dielektriksel geçirgenlik değerinin artışı ile ortamda bulunan kirleticiden kaynaklanan yansımaların radargramlara gecikerek ulaştığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni ortama ait göreceli dielektriksel geçirgenlik değerinin artışı ile elektromanyetik dalga hızlarının azalmış olmalarıdır. Ortama ait elektriksel iletkenlik değerindeki artış ise elektromanyetik enerjinin modelin derinlerine nüfuz edebilmesi açısından önemli bir engel olduğu görülmüştür. Bu durum saha çalışmalarında yüksek iletkenliğe sahip ortamlarda (örneğin fazla killi ortamlar) karşılaşılan önemli bir problemdir. Model-1

çalışmasının ikinci kısmında ise ortama ait dielektriksel parametreler sabit tutulmuş ve DNAPL kütlesine ait parametreler kademeli olarak değiştirilmiştir. DNAPL türü kirleticiye ait göreceli dielektriksel geçirgenlik değerleri doğada sıkça karşılaşılan DNAPL türü kirleticiler olan Trikloroetilen (TCE), Tetrakloroetilen (PCE), Trikloroetan ve Dikloroetan'a ait değerler kullanılarak irdelenmiştir. Ortamın dielektriksel geçirgenliğinin 27 olarak kabul edildiği bu testlerde dielektriksel geçirgenlik değeri en küçük olan DNAPL türü TCE (3,409) arasındaki zıtlığın en fazla olduğu için radargramlarda en belirgin yansımalar bu kimyasalın kullanılmış olduğu modelden elde edilmiştir. DNAPL kütlesinin elektriksel iletkenliğinin artışıyla ise DNAPL türündeki kirleticiden kaynaklı yansımaların genliklerinde zayıflamalar gözlemlenmiştir. Model-1 içerisinde DNAPL kütlesi için irdelenen son parametre olan manyetik geçirgenlik değeri doğada çok rastlanmayacak abartıda sadece etkilerin gözlemlenebilmesi amacıyla değiştirilmiştir. Parametredeki artış, DNAPL kütlesi içerisinde çok kuvvetli ardışık yansımaların meydana gelmesine neden olmuştur. Radargramlarda kayıt edilen DNAPL kaynaklı yansımalar diğer parametrelere oranla yüksek genliklere ulaşmıştır.

Model-2 çalışmasında laboratuvar ortamında kurulmuş kontrollü deney setine ait görseller PNG'den modele aktarılmıştır. Farklı suya doygunluklar için DNAPL fazları bir senaryo çerçevesinde modellenmiştir. DNAPL kütlesinin geçirimsiz tabakaya yerleşmesinden sonra zamanla yoğunluğunun artmasını ifade eden bu senaryoda DNAPL'a ait farklı suya doygunlukların kırmızının farklı tonunda renklerle ifade edilmiştir. DNAPL zonunun suya doygunluk oranı %50'de daha koyu %90'da daha açık renkle ifade edilmiştir. Bunun anlamı ortamda su doygunluğu arttıkça DNAPL'a ait yoğunluk azalmakta olduğudur. Sentetik radargramlarda 4-6 ns aralığında ikinci tabakaya ait yansımalar kayıtlarda kendini göstermiştir. DNAPL kütlesinin enjeksiyondan 1 gün sonrasında yansımaların sentetik radargramlarda 2 ns'den başlayarak, 8 ve 11 gün testlerinde ise 4 ns'den sonra kayıtlara girmiştir. DNAPL ortamında enjeksiyondan 8 ve 11 gün sonraki testlerde DNAPL kütlesinin ikinci tabaka üzerinde biriktiği görülmektedir. Bu model için farklı suya doygunluk değerleri ortam için CRIM modeli ile DNAPL zonu için NAPL zonları için geliştirilen CRIM modeli ile hesaplanmıştır. Her iki ortam için de elektriksel iletkenlik değerleri Archie kanunu ile hesaplanmıştır.

Tez çalışmasında yer alan son model çalışması olan Model-3 ile laboratuvar ortamında kurulan mini bir akifer sistemi Model-2’de olduğu gibi sayısal ortamda modellenmiştir. Laboratuvarda yapılan çalışmalarda hidrojeolojik gözlemlerin dışında yer radarı ölçümlerinin de yapılmış olması bu modeli diğerlerinden ayırmaktadır. Laboratuvar ortamında DNAPL türü olarak kullanılan HFE-7100 kimyasalına ait dielektriksel değerler kullanılmıştır. HFE-7100 özellikle yoğunluk ve viskozite değerleri bakımında TCE ile yakın özelliklere sahip olmasına rağmen göreceli dielektriksel geçirgenlik değeri bakımından Dikoloroetan’a yakın özelliktedir. HFE-7100 kimyasalının bulunduğu zonlara ait hesaplamalar Model-2’de olduğu gibi NAPL zonları için geliştirilen CRIM modeli ile hesaplanmıştır. Ancak ortamın farklı suya doygunluk değerleri önce CRIM modeli ile sonrasında da Dobson (Peplinski) modeli ile hesaplanmıştır. Elektriksel iletkenlik değerleri Archie kanunu ve yine Dobson (Peplinski) yöntemi içerisinde tanımlanan eşitliklerle hesaplanmıştır. Bu bağlamda üç farklı test ölçümü modellenmiştir. HFE-7100 enjeksiyonundan sonra gerçekleştirilen Lab 2 ve Lab 3 testlerine ait kirleticiler geometri laboratuvar fotoğraflarından sayısal model içerisine aktarılmıştır. HFE-7100 her iki test içerisinde iki farklı renge ayrılarak bu renklere farklı suya doygunluk değerleri için hesaplanmış dielektriksel geçirgenlik ve iletkenlik değerleri tanımlanmıştır. Ortamın tamamıyla suya doygun kabul edildiği durum için Dobson (Peplinski) modeli CRIM modeline nazaran çok daha yüksek göreceli dielektriksel geçirgenlik değerleri vermiştir. Archie ve Dobson (Peplinski) ile hesaplanan elektriksel iletkenlik değerleri ise birbirlerine yakın çıkmıştır.

Yapılan tüm çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda bu tez çalışmasından şu sonuçlara ulaşılabilmektedir;

- 1) Model-1 çalışması ile TCE türü kirleticilerin yer radarı yöntemi ile tespitinin diğer kirleticilere oranla daha mümkün olabileceği görülmüştür. Bunun nedeni suya doygun ortam ile TCE türü kirleticinin dielektriksel geçirgenlik değerlerinin diğer kirleticilere oranla daha yüksek zıtlığa sahip olmasıdır.
- 2) Model-2 ve Model-3 uygulamaları ile DNAPL türü kirleticilerin 3B sayısal modellere PNG formatında laboratuvar fotoğrafları kullanılarak dahil edilebileceği gösterilmiştir.

3) Model-3 uygulamasında; 2B sayısal modelleme sonuçları ile 3B sayısal modelleme sonuçları arasında gözle görülür farklılıklar olduğu görülmüştür. 2B modellemede tüm enerjinin iki boyutta yayılmasından dolayı yansımalar 3B modelleme sonuçlarına oranla daha güçlü olduğu görülmüştür.

4) Model-3 uygulamasında; 2B sayısal modellerde DNAPL kütleleri farklı bir tabaka gibi davranarak EM dalga hızlarının artmasına ve taban yansımalarının kayıtlara erken gelmesine neden olmaktadır. Bu durumun sonucu olarak 2B modelleme ile elde edilen sentetik radargramlarda taban yansımalarından kaynaklanan ve gerçek ölçümlerde görülmeyen hiperboller meydana gelmiştir. 3B modelleme ile elde edilen sentetik radargramlarda ise DNAPL kütlesi tüm model boyunca uzanmadığı ve ince bir yapıda olduğu için bir tabaka gibi davranmamıştır. Bu sonucu olarak modelin tabanından gelen yansımalar gerçek sonuçlarda olduğu gibi yatay olarak oluşmuştur.

5) Model-3'de, DNAPL ve model tabanından kaynaklanan yansımaların sentetik radargramlarda kayıt edilme süreleri göz önünde bulundurulduğunda Dobson (Peplinski) modeli ile hesaplanan ortam modeli için elde edilen sentetik sonuçların gerçek ölçüm sonuçlarına daha yakın olduğu görülmektedir. HFE-7100'den kaynaklanan yansımalar CRIM modeline 13 ns civarında ve taban yansımaları ise 18 ns civarında kayıtçıya ulaşırken, Dobson (Peplinski) modeli ile hesaplanan sonuçlar gerçek yer radarı ölçümlerinde olduğu gibi HFE-7100 kaynaklı yansımalar 15 ns civarında ve taban yansımalarını ise gerçeğinden gecikmeli olarak 21 ns'de görülmektedir. Bu durum altta bulunan düşük geçirimli tabakadaki elektromanyetik dalga hızlarının üstte bulunan yüksek geçirimli tabakaya göre daha hızlı olabileceği düşüncesini doğurmaktadır.

6) Laboratuvar çalışmaları göstermiştir ki HFE-7100 türü kimyasalların bir ara yüzde birikmesi ve farklı dielektriksel özellikte bir tabaka oluşturması bu kimyasalların yer radarı yöntemi ile tespitini daha muhtemel hale getirmektedir.

7) Tüm jeofiziksel problemlerin çözümünde tercih edildiği gibi NAPL türü kirleticilerin gerek laboratuvar ortamında gerekse de saha çalışmalarında takip ve tespit edilmesi konusunda mutlaka ikinci bir yöntem ihtiyacı duyulmaktadır. Rezistivite değerlerinden elektriksel iletkenlik değerlerinin elde edilebilmesi ve suya doygunluk-rezistivite ilişkili bağıntıların başarılı sonuçlar vermesi nedeniyle Elektrik

rezistivite tomografi (ERT) yöntemi yer radarı yönteminin yanı sıra uygulanması gereken bir yöntem olarak önerilmektedir.



KAYNAKLAR

Ahrens J., James A., Berk G., Law C., *ParaView: An End-User Tool for Large Data Visualization Handbook*, Elsevier, Amsterdam, 2005.

Ajo-Franklin J. B., Geller J. T., Harris J. M., A Survey of the Geophysical Properties of Chlorinated DNAPLs, *Journal of Applied Geophysics*, 2006, **59**(3), 177-189.

Ajo-Franklin J. B., Geller J. T., Harris J. M., The Dielectric Properties of Granular Media Saturated with DNAPL/water mixtures, *Geophysical Research Letters*, 2004, **31**(17),1-4.

Akyol N. H., Lee A. R., Brusseau M. L., Impact of Enhanced-Flushing Reagents and Organic-Liquid Distribution on Mass Removal and Mass-Discharge Reduction, *Water Air Soil Pollut.*, 2013, **224**(1731), 1-9.

Akyol N. H., Turkkkan S., Effect of Cyclodextrin-Enhanced Dissolution on Mass Removal and Mass-Flux Reduction Relationships for Non-uniformly Organic Liquid Distribution in Heterogeneous Porous Media, *Water Air Soil Pollut.*, 2018, **229**(30),1-11.

Algeo J., Slater L., Binley A., Van Dam R. L., Watts C., A Comparison of Ground-Penetrating Radar Early-Time Signal Approaches for Mapping Changes in Shallow Soil Water Content, *Vadose Zone Journal*, 2018, **17**(1) ,1-11.

Annan A.P., Ground-Penetrating Radar, Editor: Butler D.K., *Near-Surface Geophysics*, 1st ed., Society of Exploration Geophysicists, Oklahoma, 357-434, 2005.

Annan, A. P., *Ground Penetrating Radar Principles, Procedures & Applications*, Sensors and software, Mississauga, ON, Canada, 2003.

Archie G. E., The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics, *Transactions of the AIME*, 1942, **146**(1), 54-62.

Ayachit U., Bauer A., Geveci B., O'Leary P., Moreland K., Fabian, N., Mauldin J., Paraview catalyst: Enabling in Situ Data Analysis and Visualization, *Proceedings of the First Workshop on In Situ Infrastructures for Enabling Extreme-Scale Analysis and Visualization*, ACM, 2015.

Balkaya Ç., Karşılıklı Kuyu Yer Radarı Verisinin İki Boyutlu Seyahat Zamanı Tomografisi, Doktora Tez, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 2010, 283667.

Benedetto A., Pajewski L., *Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar*, Springer, 2015.

- Bianchini L., Tosti F., Economou N., Benedetto F., Signal Processing of GPR Data for Road Surveys, *Geosciences*, 2019, **9**(96), 1-20.
- Birchak J. R., Gardner C. G., Hipp J. E., Victor J. M., High Dielectric Constant Microwave Probes for Sensing Soil Moisture, *Proceedings of the IEEE*, 1974, **62**(1), 93.
- Blindow N., Ground Penetrating Radar, Editor: Kirch, R., *Groundwater Geophysics A Tool for Hydrogeology*, 2nd ed., Springer, Flintbek, 2006.
- Brandt O., Taurisano A., Giannopoulos A., Kohler J., What Can GPR Tell Us About Cryoconite Holes? 3D FDTD Modeling, Excavation and Field GPR Data, *Cold Regions Science and Technology*, 2009, **55**(1), 111-119.
- Brewster M., Annan A., Greenhouse J., Kueper B., Olhoeft G., Redman J., Sander K., Observed Migration of a Controlled DNAPL Release By Geophysical Methods, *Groundwater*, 1995, **33**(6), 977-987.
- Conyers, L. B., *Ground-Penetrating Radar and Magnetometry for Buried Landscape Analysis*, Springer, 2017.
- Cook, J. C., Status of Ground-Probing Radar and Some Recent Experience, *Subsurface Exploration for Underground Excavation and Heavy Construction*, ASCE, 1974.
- Çiydem M., Koç S., Zaman-Uzayda Sonlu Farklar Yöntemin Dezavantajları için Geometrik Optik Yöntemlerin Kullanımı, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2014, **29**(1), 121-129.
- Daniels D. J., *Ground Penetrating Radar*, 2nd ed., The Institution of Electrical Engineers, London, England, 2004.
- Diamanti N., An Efficient Ground Penetrating Radar Finite-Difference Time-Domain Subgridding Scheme and Its Application to the Non-Destructive Testing of Masonry Arch Bridges, Doktora Tezi, The University of Edinburgh, School of Engineering, 2008.
- Diamanti N., Annan A. P., Giannakis I., Predicting GPR Performance for Buried Victim Search & Rescue, *16th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*, Hong Kong, 13-16 June, 2016.
- Dobson M. C., Ulaby F. T., Hallikainen M. T., El-Rayes M. A., Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil-Part II: Dielectric Mixing Models, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1985, GE-**23**(1), 35-46.
- Elsherbeni A. Z., Demir V., *The Finite-Difference Time-Domain Method for Electromagnetics with MATLAB Simulations*, ACES Series on Computational Electromagnetics and Engineering, 2016.
- Evans S., Radio Techniques for the Measurement of Ice Thickness, *Polar Record*, 1963, **11**(73), 406-410.

Feng J., Su Y., Li C., Dai S., Xing S., Xiao Y., An Imaging Method for Chang'e- 5 Lunar Regolith Penetrating Radar, *Planetary and Space Science*, 2019, **167**, 9-16.

Gao X., Podd F., van Verre W., Daniels D., Peyton A., Investigating the Performance of Bi-Static GPR Antennas for Near-Surface Object Detection, *Sensors*, 2019, **19**(170), 1-19.

Giannakis I., Realistic Numerical Modelling of Ground Penetrating Radar for Landmine Detection, Doktora Tezi, The University of Edinburgh, School of Engineering, 2016.

Giannakis I., Giannopoulos A., Warren C., A Realistic FDTD Numerical Modeling Framework of Ground Penetrating Radar for Landmine Detection, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, **9**(1), 37-51.

Giannopoulos A., Modelling Ground Penetrating Radar by GprMax, *Construction and Building Materials*, 2005, **19**(10), 755-762.

Greaves R. J., Lesmes D. P., Lee J. M., Toksöz M. N., Velocity Variations and Water Content Estimated from Multi-Offset, Ground-Penetrating Radar, *Geophysics*, 1996, **61**(3): 683-695.

Hamran S. E., Berger T., Brovoll S., Damsgård L., Hellenen Ø., Øyan M. J., Amundsen H. E., Carter L., Ghent R., Kohler J., RIMFAX: A GPR for the Mars 2020 Rover Mission, 8th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR), IEEE, Italy, 2015.

Hulsenbeck, German Patent, Number 489434, Germany, 1926.

Hulsmeyer C., German Patent, Number 165546, Germany, 1904.

Irving J., Knight R., Numerical Modeling of Ground-Penetrating Radar in 2-D Using MATLAB, *Computers & Geosciences*, 2006, **32**(9): 1247-1258.

Jacobsen O. H., Schjønning P., A Laboratory Calibration of Time Domain Reflectometry for Soil Water Measurement Including Effects of Bulk Density and Texture, *Journal of Hydrology*, 1993, **151**(2), 147-157.

Jol H. M., *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*, Elsevier Science, London, 2009.

Kadioglu S., Kadioglu Y. K., Catapano I., Soldovieri F., Ground Penetrating Radar and Microwave Tomography for the Safety Management of A Cultural Heritage Site: Miletos Ilyas Bey Mosque (Turkey), *Journal of Geophysics and Engineering*, 2013, **10**(6), 1-11.

Kaplanvural İ., Yer Radarı Verilerinin Ters Çözümü ile Gömülü Boru Özelliklerinin Belirlenmesi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2018.

- Kaplanvural İ., Pekşen E., Özkap K., Volumetric Water Content Estimation of C-30 Concrete Using GPR, *Construction and Building Materials*, 2018, **166**, 141-146.
- Kurtulmuş T., Drahor M., Yer Radarı Modellemesinde Fiziksel ve Geometrik Parametre Etkilerinin Araştırılması, *Yerbilimleri*, 2008, **29**(2), 37-52.
- Leandro C. G., Barboza E. G., Caron F., de Jesus F. A., GPR Trace Analysis for Coastal Depositional Environments of Southern Brazil, *Journal of Applied Geophysics*, 2019, **162**, 1-12.
- Li H., Chou C., Fan L., Li B., Wang D., Song D., Robotic Subsurface Pipeline Mapping with a Ground-penetrating Radar and a Camera. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE, China, 2018.
- Lichtenecker K., Rother K., Die Herleitung Des Logarithmischen Mischungsgesetzes Aus Allgemeinen Prinzipien der stationären Strömung, *Physikalische Zeitschrift*, 1931, **32**, 255-260.
- Lowy H., German Patent Number 254517, Germany, 1911.
- Lv G., Yang J., Li N., Hu D., Zhang Y., Zhao F., Dielectric Characteristics of Unsaturated Loess and the Safety Detection of the Road Subgrade Based on GPR, *Journal of Sensors*, 2018, 1-8.
- Morey R. M., Continuous Subsurface Profiling by Impulse Radar, *Proc. Engineering Foundation Conf.*, 1974, 213-232.
- Nadler A., Dasberg S., Lapid I., Time Domain Reflectometry Measurements of Water-Content and Electrical-Conductivity of Layered Soil Columns, *Soil Science Society of America Journal*, 1991, **55**(4), 938-943.
- Neal A., Ground-Penetrating Radar and Its Use in Sedimentology: Principles, Problems and Progress, *Earth-Science Reviews*, 2004, **66**, 261-330.
- Noborio K., Measurement of Soil Water Content and Electrical Conductivity by Time Domain Reflectometry: A Review, *Computers and electronics in agriculture*, 2001, **31**(3), 213-237.
- Núñez-Nieto X., Solla M., Gómez-Pérez P., Lorenzo H., GPR Signal Characterization for Automated Landmine and UXO Detection Based on Machine Learning Techniques, *Remote sensing*, 2014, **6**(10), 9729-9748.
- Orlando L., Renzi B., Time-lapse Monitoring of DNAPL in a Controlled Cell, *Near Surface Geophysics*, 2013, **11**(2), 129-142.
- Orlando L., Renzi B., Electrical Permittivity and Resistivity Time Lapses of Multiphase DNAPLs in A Lab Test, *Water Resources Research*, 2015, **51**(1), 377-389.

Peplinski N. R., Ulaby F. T., Dobson M. C., Corrections to Dielectric Properties of Soils in the 0.3-1.3-GHz Range, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, **33**(6), 1340.

Peplinski N. R., Ulaby F. T., Dobson M. C., Dielectric Properties of Soils in the 0.3-1.3-GHz range, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995a, **33**(3), 803-807.

Peplinski N. R., Ulaby F. T., Dobson M. C., Corrections to Dielectric Properties of Soils in the 0.3-1.3-GHz Range, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995b, **33**(6), 1340.

Persico R., *Introduction To Ground Penetrating Radar: Inverse Scattering and Data Processing*, John Wiley & Sons, Piscataway, NJ, 2014.

Ponti C., Santarsiero M., Schettini G., Electromagnetic Scattering of a Pulsed Signal by Conducting Cylindrical Targets Embedded in a Half-Space Medium, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, **65**(6), 3073-3083.

Rabbel W., Erkul E., Stumpel H., Wunderlich T., Pasteka R., Papco J., Niewohner P., Baris S., Cakin O., Peksen E., Discovery of a Byzantine Church in Iznik/Nicaea, Turkey: An Educational Case History of Geophysical Prospecting with Combined Methods in Urban Areas, *Archaeological Prospection*, 2015, **22**(1), 1-20.

Rathod H., Debeck S., Gupta R., Chow B., Applicability of GPR and a Rebar Detector to Obtain Rebar Information of Existing Concrete Structures, *Case Studies in Construction Materials*, 2009, **11**, e00240.

Redman J. D., Hans G., Diamanti N., Impact of Wood Sample Shape and Size on Moisture Content Measurement Using a GPR-Based Sensor, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, **9**(1), 221-227.

Reynolds J. M., *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, 2nd ed., Wiley-Blackwell, West Sussex 2011.

Roe K., Ellerbruch D., Development And Testing of a Microwave System to Measure Coal Layer Thickness up to 25 cm, *National Bureau of Standards, Boulder*, FE-8881-1, sr-723-8-79, 1979.

Roth C. H., Malicki M. A., Plagge R., Empirical-Evaluation of the Relationship Between Soil Dielectric-Constant and Volumetric Water-Content as the Basis for Calibrating Soil-Moisture Measurements by Tdr, *Journal of Soil Science*, 1992, **43**(1), 1-13.

Roth K., Schulin R., Flüßler H., Attinger W., Calibration of Time Domain Reflectometry for Water Content Measurement Using A Composite Dielectric Approach, *Water Resources Research*, 1990, **26**(10), 2267-2273.

Schotsmans E. M. J., Fletcher J. N., Denton J., Janaway R. C., Wilson A. S., Long-Term Effects of Hydrated Lime and Quicklime on the Decay of Human Remains Using Pig Cadavers as Human Body Analogues: Field Experiments, *Forensic Science International*, 2014, **238**, 13, 141.e1-141.e13.

Skolnik M. I., *Introduction to Radar Systems*, McGraw-Hill, New York, 1981.

Stadler S., A Forward Modeling Study for the Investigation of the Vertical Water-Content Distribution Using Guided GPR Waves, Yüksek Lisans Tezi, TU Bergakademie, Freiberg, 2017.

Steelman C. M., Endres A. L., Comparison of Petrophysical Relationships for Soil Moisture Estimation Using GPR Ground Waves, *Vadose Zone Journal*, 2011, **10**(1), 270-285.

Steenson B. O., Radar Methods for the Exploration of Glaciers, Doktora Tezi, California Institute of Technology, California, 1951.

Taflove A., Hagness S. C., *Computational Electrodynamics : The Finite-Difference Time-Domain Method*, 3rd ed., Artech House, Boston, 2005.

Taylor S., Barker R., Modelling the DC Electrical Response of Fully and Partially Saturated Permo-Triassic Sandstone, *Geophysical prospecting*, 2006, **54**(3), 351-367.

Topp G. C., Davis J. L., Annan A. P., Electromagnetic Determination of Soil-Water Content-Measurements in Coaxial Transmission-Lines, *Water Resources Research*, 1980, **16**(3), 574-582.

Unterberger, R., Radar and Sonar Probing of Salt, *5th Int. Symp. on Salt*, Hamburg (Northern Ohio Geological Society), 1979.

URL-1: <http://environmental-geophysics.co.uk/>, (Ziyaret tarihi: 10 Nisan 2019).

URL-2: <https://www.gpr-survey.com/gprsim.html/>, (Ziyaret tarihi: 11 Kasım 2018).

URL-3: <http://www.gprmax.com/>, (Ziyaret tarihi: 20 Mart 2019).

Viblig A. R., Air-Coupled and Ground- Coupled Ground Penetrating Radar Techniques, Yüksek Lisans Tezi, Northeastern University, Boston, 2013.

Wang Q., Yang Z., Yang Y., Long C., Li H., A Bibliometric Analysis of Research on the Risk of Engineering Nanomaterials During 1999–2012, *Science of the Total Environment*, 2014, **473**, 483-489.

Warren C., Numerical Modelling of High-Frequency Ground-Penetrating Radar antennas, Doktora Tezi, The University of Edinburgh, Edinburgh, 2009.

Warren C., Giannopoulos A., Creating Finite-Difference Time-Domain Models of Commercial Ground-Penetrating Radar Antennas Using Taguchi's Optimization Method, *Geophysics*, 2011 **76**(2), G37-G47.

Warren C., Giannopoulos A., Giannakis I., gprMax: Open Source Software to Simulate Electromagnetic Wave Propagation for Ground Penetrating Radar, *Computer Physics Communications*, 2016, **209**, 163-170.

Waxman M. H., Smits L., Electrical Conductivities in Oil-Bearing Shaly Sands, *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1968, **8**(02), 107-122.

Wunderlich, T., Geophysical Methods for the Investigation of Soils, Doktora Tezi, Christian-Albrechts University, Kiel, 2012.

Wunderlich T., Petersen H., Attia al Hagrey S., Rabbel W., Pedophysical Models for Resistivity and Permittivity of Partially Water-Saturated Soils, *Vadose Zone Journal*, 2013, **12**(4), 1-14.

Yee K., Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1966, **14**(3), 302-307.

Zavadskas E. K., Skibniewski M. J., Antucheviciene J., Performance Analysis of Civil Engineering Journals Based on the Web of Science® Database, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2014, **14**(4), 519-527.

Zeng X., McMechan G. A., GPR Characterization of Buried Tanks and Pipes, *Geophysics*, 1997, **62**(3), 797-806.

Zhang K., Wang Q., Liang Q. M., Chen H., A Bibliometric Analysis of Research on Carbon Tax from 1989 to 2014, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, **58**, 297-310.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Kaplanvural İ., Pekşen E., **Özkap K.**, Volumetric Water Content Estimation of C-30 Concrete Using GPR, *Construction and Building Materials*, 2018, **166**, 141-146.

Özkap K., Pekşen E., Fiziksel Parametre Değişimlerinin Üç Boyutlu Yer Radarı Modellemesine Etkileri, *7. Yer Elektrik Çalıştayı*, Isparta, Türkiye, 7-9 Mayıs 2018.

Özkap K., Pekşen E., Kaplanvural İ., Yer Radarı Çalışmaları ile İlgili 1980-2015 Yılları Arasında Yapılmış Yayınların Bibliyometrik Analizi, *6. Yer Elektrik Çalıştayı*, Kocaeli, Türkiye, 23-25 Mayıs 2016.

Kaplanvural İ., Yas T., Pekşen E., **Özkap K.**, Parçacık Sürü Optimizasyonu ile Radargramlar Üzerinden Otomatik Hız Hesabı, *6. Yer Elektrik Çalıştayı*, Kocaeli, Türkiye, 23-25 Mayıs 2016.

Rabbel W., Hoffman-Wieck G., Jacobsen O., **Özkap K.**, Stümpel H., Suhr W., Szalaoia E., Wölz S., Seismic Survey of the Silted Bays of the Medione and Gorgo Cotone Rivers. Evidence of the Location of the Harbour of the Ancient city of Selinus, Scily. *Mitteilungen Des Deutschen Archäologischen Instituts - Römische Abteilung "Römische Mitteilungen"*, 2014, **120**, 135-150

Özkap K., Stümpel H., GPR Investigations at the Roman Necropolis of Tuna el-Gebel, Egypt, *Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft (DGG)*, Kiel, Germany, 2009.

Özkap K., Stümpel H., Investigations of the Archaeological Site of Tuna el-Gebel, Egypt, with GPR, *Symposium on Geophysics and Remote Sensing in Determination of Near- Surface, Structures*, Izmir, Turkey, 2008.

ÖZGEÇMİŞ

1983 yılında Sakarya’da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Sakarya’da, lise öğrenimini ise Kocaeli’nde tamamladı. 2001 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü’nden 2005 yılında mezun oldu. 2005 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeofizik Mühendisliği Ana Bili Dalı’nda başladığı yüksek lisans çalışmasını 2008 yılında tamamladı. Kasım 2006 yılında Erasmus öğrenci değişim programı kapsamında Almanya’nın Christian Albrechts Üniversitesi’nde 8 ay boyunca misafir öğrenci olarak eğitimine devam etti. Ardından aynı okulda 2009 yılının Aralık ayına kadar araştırmacı olarak çalışmalarına devam etti. Bu süreçte özellikle arkeojeofizik alanında otuzdan fazla arkeolojik alanda çalışmalarını sürdürdü. Ağustos 2017 – Ağustos 2018 tarihleri arasında TÜBİTAK 2214-A Doktora Sırası Araştırma Bursu ile İskoçya’nın Edinburgh Üniversitesi’nde ziyaretçi araştırmacı olarak yer radarı yöntemi için sayısal modelleme konusunda çalışmalarını sürdürdü.