KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YER RADARI VERİLERİNİN ÇOK HIZLI BENZETİMLİ TAVLAMA YÖNTEMİ İLE TERS ÇÖZÜMÜ

KADİR BAHADIR KARA

KOCAELİ 2017

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YER RADARI VERİLERİNİN ÇOK HIZLI BENZETİMLİ TAVLAMA YÖNTEMİ İLE TERS ÇÖZÜMÜ

KADİR BAHADIR KARA

Yrd.Doç.Dr. Ertan Pekşen
Danışman, Kocaeli Üniv. .....

Prof.Dr. Bülent Oruç
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv. .....

Doç.Dr. Emin Ulugergerli
Jüri Üyesi, Çanakkale 18 Mart Üniv. .....

Tezin Savunulduğu Tarih: 15.12.2017

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Jeofizik mühendisliğinde yer altı araştırmaları, yer altının yapısının belirlenmesi ve yer altındaki olası yapıların bulunmasını amaçlamaktadır. Bu nedenle günümüze kadar birçok jeofizik yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler derin ve sığ yöntemler olmak üzere başlıca ikiye ayrılabilir. Bilgisayar teknolojisinin ilerlemesiyle ve kolay uygulanabilir olması nedeniyle yer radarı yöntemi günümüzde sıklıkla kullanılan sığ yöntemlerden biridir.

Yer radarı yönteminde arazi çalışmasından sonra, arazi verilerinin yorumlanabilmesi için yer altından gelen yanıtların çözümlenmesi gerekmektedir. Arazi verilerinin modellenmesi verilerin yorumlanmasını kolaylaştıracaktır. Bu çalışmada bir boyutlu ve iki boyutlu yer radarı modellemesi yapılarak, yerin fiziksel ve geometrik parametrelerinin radargramlar üzerindeki etkisi incelenmesi hedeflenmiştir. Bir boyutlu verilerin ters çözümü yapılarak radargramların yorumu kolaylaştırılmaya çalışılmıştır.

Bu çalışmam boyunca, desteğini benden esirgemeyen ve düşünceleriyle bana ilerlemek için yol gösteren, danışmanım Yrd. Doç. Dr. Ertan PEKŞEN'e çok teşekkür ederim.

Sondaj verilerini benimle paylaşan Karadeniz Mühendisliğe teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca bana maddi manevi her türlü desteği sağlayan ailemin her bir üyesine sonsuz teşekkür ederim.

Tezin oluşma sürecinde düşüncelerini benimle paylaşan ve tezimin düzenlenmesine yardım eden, Çevre Müh. İpek TEZYAPAR'A teşekkür ederim.

Aralık – 2017 Kadir Bahadır KARA

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ viii
ÖZET ix
ABSTRACT x
GİRİŞ 1
1. YER RADARI YÖNTEMİ 3
1.1. Yöntemin Tanıtılması 3
1.2. Yer Radarı Kuramı 4
1.2.1. Ortamın özdirenci ve iletkenliği 5
1.2.2. Ortamın dielektrik sabiti 6
1.2.3. Ortamın manyetik geçirgenliği 6
2. ELEKTROMANYETİK ALAN DENKLEMLERİ 7
2.1. Maxwell Denklemleri 7
2.2. Zaman Ortamında Elektromanyetik Dalga Denklemleri 7
2.2.1. Elektrik alan dalga denklemi 7
2.2.2. Manyetik alan dalga denklemleri 9
2.3. Frekans Ortamında Elektromanyetik Dalga Denklemleri 10
3. SONLU FARKLAR YÖNTEMİ İLE MAXWELL DENKLEMLERİNİN ÇÖZÜLMESİ 12
3.1. Sonlu Farklar Yöntemi 12
3.2. Maxwell Denklemlerinin Sonlu Farklarla Çözülmesi 15
3.2.1. Bir boyutlu ortam 15
3.2.2. İki boyutlu ortam 19
3.2.2.1.TE modu denklemleri 20
3.2.2.2.TM modu denklemleri 22
3.3. Mükemmel Uyumlu Tabaka (PML) Sınır Koşulu 24
3.3.1. Boşluk-PML arayüzeyinde PML teorisi 25
3.3.2. PML-PML arayüzeyinde PML teorisi 28
3.3.3. PML kayıp fonksiyonu 31
3.3.4. PML sınır koşulu ile TM modu denklemleri 32
3.4. Kararlık Koşulu ve Dağılma 33
4. YER RADARI VERİLERİNDE KLASİK VERİ İŞLEM VE ANTEN SEÇİMİ 35
4.1. İlk Gelen Dalganın Veriden Atılması 35
4.2. Filtreleme 36
4.3. Göç (Migrasyon) 37
4.4. Anten Seçimi ve Anten Dizilimleri 38
5. GLOBAL TERS ÇÖZÜM 40
5.1. Çok Hızlı Benzetimli Tavlama (VFSA) Optimizasyon Yöntemi 40
6. MODEL ÇALIŞMALARI 44
6.1. Bir Boyutlu Ortamda Düz Çözüm 44

6.2. İki Boyutlu Ortamda Düz Çözüm 47
6.3. Bir Boyutlu Ortamda Sentetik Radargramların Ters Çözümü 54
6.4. Bir Boyutlu Ortamda Laboratuvar ve Arazi Verilerin Ters Çözümü 64
6.4.1. Beton blok üzerinde alınan yer radarı ölçüsünün ters çözümü 64
6.4.2. Kum havuzu üzerinde alınan yer radarı ölçüsünün ters çözümü 70
6.4.3. Zonguldak'ta alınan yer radarı ölçüsünün ters çözümü 74
SONUÇLAR 80
KAYNAKLAR 82
EKLER 84
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 86
ÖZGEÇMİŞ 87

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Yer radarı çalışma prensibi 3
Şekil 3.1. P noktasındaki ileri, geri ve merkezi farklar gösterimi 12
Şekil 3.2. İki bağımsız değişken için sonlu farklar ağı 14
Şekil 3.3. Elektrik (E_y) ve manyetik alanın (H_z) bir boyutlu durumda FDTD'ye göre konumları 15
Şekil 3.4. Elektrik (E_z) ve manyetik alanın (H_y) bir boyutlu durumda FDTD'ye göre konumları 17
Şekil 3.5. TE modu için iki boyutlu FDTD bileşenleri ve konumları 21
Şekil 3.6. TM modu için iki boyutlu FDTD bileşenleri ve konumları 23
Şekil 3.7. İki PML ortamı arasındaki ara yüzeyden düzlem dalga geçişi 29
Şekil 4.1. Beton üzerinde alınan veri a)ham veri b)ilk gelen dalganın veriden atıldıktan sonraki görüntüsü 36
Şekil 4.2. Beton üzerinde alınan veri a) ilk gelen dalganın veriden atıldıktan sonraki görüntüsü b) veriye bant geçişli filtre uygulandıktan sonraki görüntüsü 37
Şekil 4.3. Beton üzerinde alınan veri a) veriye bant geçişli filtre uygulandıktan sonraki görüntüsü b) veriye göç işlemi uygulandıktan sonraki görüntüsü 38
Şekil 5.1. VFSA programının akış şeması 43
Şekil 6.1. İki tabakalı ortamda bir boyutlu sentetik GPR izi 45
Şekil 6.2. İki tabakalı ortamda bir boyutlu sentetik GPR izi 45
Şekil 6.3. Üç tabakalı ortamda bir boyutlu sentetik GPR izi 46
Şekil 6.4. Kireçtaşlarında olası boşluk modelinin bir boyutlu sentetik GPR izi 47
Şekil 6.5. Yer altında kare şeklindeki yapı modeli ve iki boyutlu GPR izi 48
Şekil 6.6. Yer altında kare şeklindeki yapı modeli ve iki boyutlu GPR izi 49
Şekil 6.7. Yer altında daire şeklindeki yapı modeli ve iki boyutlu GPR izi 50
Şekil 6.8. Yer altında kare şeklindeki boşluk modeli ve iki boyutlu GPR izi 51
Şekil 6.9. Yer altındaki yatay tabaka modeli ve iki boyutlu GPR izi 52
Şekil 6.10. Yer altındaki yatay tabaka modeli ve iki boyutlu GPR izi 53
Şekil 6.11. Geliştirilen iki boyutlu Matlab yer radarı düz çözümü programının Irving ve Knight (2005) tarafından geliştirilen iki boyutlu yer radarı düz çözümü programı ile karşılaştırılması 54
Şekil 6.12. a) Tabakalı yer altı modeli, b) bir boyutlu sentetik radargram ve VFSA sonucu 55
Şekil 6.13. İki tabakalı ortamda VFSA yöntemi kullanılarak tahmin edilen her bir parametrenin frekans dağılımları 56
Şekil 6.14. İki tabakalı ortamda VFSA yöntemi kullanılarak tahmin edilen her bir parametrenin olasılık yoğunluk fonksiyonu 56
Şekil 6.15. a) Tabakalı yer altı modeli, b) bir boyutlu AGC uygulanmış sentetik radargram ve VFSA sonucu 57

Şekil 6.16. İki tabakalı ortamda AGC uygulanmış izin VFSA yöntemi kullanılarak tahmin edilen her bir parametrenin frekans dağılımları 57
Şekil 6.17. İki tabakalı ortamda AGC uygulanmış izin VFSA yöntemi kullanılarak tahmin edilen her bir parametrenin olasılık yoğunluk fonksiyonu 58
Şekil 6.18. Tabakalı yer altı modeli, b) ilk gelen dalga atılarak elde edilen bir boyutlu sentetik radargram ve VFSA sonucu 58
Şekil 6.19. İki tabakalı ortamda ilk gelen dalga atılarak elde edilen izin VFSA yöntemi kullanılarak tahmin edilen her bir parametrenin frekans dağılımları 59
Şekil 6.20. İki tabakalı ortamda ilk gelen dalga atılarak elde edilen izin VFSA yöntemi kullanılarak tahmin edilen her bir parametrenin olasılık yoğunluk fonksiyonu 59
Şekil 6.21. a) Tabakalı yer altı modeli, b) Bir boyutlu sentetik radargram ve VFSA sonucu 60
Şekil 6.22. Üç tabakalı ortamda VFSA yöntemi kullanılarak tahmin edilen her bir parametrenin frekans dağılımları 60
Şekil 6.23. Üç tabakalı ortamda VFSA yöntemi kullanılarak tahmin edilen her bir parametrenin olasılık yoğunluk fonksiyonu 61
Şekil 6.24. a) Tabakalı yer altı modeli, b) Bir boyutlu AGC uygulanmış sentetik radargram ve VFSA sonucu 61
Şekil 6.25. Üç tabakalı ortamda AGC uygulanmış izin VFSA yöntemi kullanılarak tahmin edilen her bir parametrenin frekans dağılımları 62
Şekil 6.26. Üç tabakalı ortamda AGC uygulanmış izin VFSA yöntemi kullanılarak tahmin edilen her bir parametrenin olasılık yoğunluk fonksiyonu 62
Şekil 6.27. a) Tabakalı yer altı modeli, b) ilk gelen dalga atılarak elde edilen bir boyutlu sentetik radargram ve VFSA sonucu 63
Şekil 6.28. Üç tabakalı ortamda ilk gelen dalgası atılan izin VFSA yöntemi kullanılarak tahmin edilen her bir parametrenin frekans dağılımları 63
Şekil 6.29. Üç tabakalı ortamda ilk gelen dalgası atılan izin VFSA yöntemi kullanılarak tahmin edilen her bir parametrenin olasılık yoğunluk fonksiyonu 64
Şekil 6.30. Beton üzerinde alınan yer radarı ölçüsü 65
Şekil 6.31. a) Beton blok üzerinde alınan GPR ölçüsü, b) GPR ölçüsüne ait 26. iz 65
Şekil 6.32. Morlet dalgacığı ve ilk gelen dalga 66
Şekil 6.33. Beton blok üzerinde alınan ölçünün yer altı modeli a) VFSA ile elde edilen yer altı modeli, b) bir boyutlu GPR izi ve Morlet dalgacığı ile hesaplanan GPR izi 67
Şekil 6.34. Beton blok üzerinde alınan yer radarı ölçüsünün VFSA yöntemi ile tahmin edilen parametrelerin frekans dağılımları 67
Şekil 6.35. Beton blok üzerinde alınan yer radarı ölçüsünün VFSA yöntemi ile tahmin edilen parametrenin olasılık yoğunluk fonksiyonu 68

Şekil 6.36. Beton blok üzerinde alınan ölçünün yer altı modeli a) VFSA ile elde edilen yer altı modeli, b) bir boyutlu GPR izi ve ilk gelen dalga kullanılarak hesaplanan GPR izi 68
Şekil 6.37. Beton blok üzerinde alınan yer radarı ölçüsünün VFSA yöntemi ile tahmin edilen parametrelerin frekans dağılımları 69
Şekil 6.38. Beton blok üzerinde alınan yer radarı ölçüsünün VFSA yöntemi ile tahmin edilen parametrenin olasılık yoğunluk fonksiyonu 69
Şekil 6.39. Kum havuzunda alınan yer radarının ölçü düzeneği 70
Şekil 6.40. a) Kum üzerinde alınan yer radarı ölçüsü b) ölçünün altmış üçüncü izi 70
Şekil 6.41. Kum havuzu üzerinde alınan ölçünün yer altı modeli a) VFSA ile elde edilen yer altı modeli, b) bir boyutlu GPR izi ve Morlet dalgacığı ile hesaplanan GPR izi 71
Şekil 6.42. Kum havuzu üzerinde alınan yer radarı ölçüsünün VFSA yöntemi ile tahmin edilen parametrelerin frekans dağılımları 72
Şekil 6.43. Kum havuzu üzerinde alınan yer radarı ölçüsünün VFSA yöntemi ile tahmin edilen parametrenin olasılık yoğunluk fonksiyonu 72
Şekil 6.44. Kum havuzu üzerinde alınan ölçünün yer altı modeli a) VFSA ile elde edilen yer altı modeli, b) bir boyutlu GPR izi ve ilk gelen dalga kullanılarak hesaplanan GPR izi 73
Şekil 6.45. Kum havuzu üzerinde alınan yer radarı ölçüsünün VFSA yöntemi ile tahmin edilen parametrelerin frekans dağılımları 73
Şekil 6.46. Kum havuzu üzerinde alınan yer radarı ölçüsünün VFSA yöntemi ile tahmin edilen parametrenin olasılık yoğunluk fonksiyonu 74
Şekil 6.47. İnceleme alanı 75
Şekil 6.48. Araştırma alanı jeoloji haritası 76
Şekil 6.49. a) Zonguldak bölgesinde alınan yer radarı ölçüsü, b) GPR ölçüsüne ait 78. iz 76
Şekil 6.50. Onuncu profilin veri işlem uygulanmış hali 77
Şekil 6.51. Zonguldak'ta alınan ölçünün yer altı modeli a) VFSA ile elde edilen yer altı modeli, b) bir boyutlu GPR izi ve hesaplanan GPR izi 77
Şekil 6.52. İki nolu sondaj kuyusunun sandık fotoğrafı 78
Şekil 6.53. Zonguldak'ta alınan yer radarı ölçüsünün VFSA yöntemi ile tahmin edilen parametrelerin frekans dağılımları 79
Şekil 6.54. Zonguldak'ta alınan yer radarı ölçüsünün VFSA yöntemi ile tahmin edilen parametrenin olasılık yoğunluk fonksiyonu 79

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Yer radarı yönteminin kullanıldığı alanlar..... 4
Tablo 4.1. Anten frekansına göre maksimum araştırma derinliği..... 39
Tablo 6.1. İki nolu kuyuda kesilen birimler..... 78

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

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

Kısaltmalar

1B : Bir Boyutlu Ortam
2B : İki Boyutlu Ortam
AGC : Otomatik Kazanç Kontrol
FDTD : Zaman Ortamı Sonlu Farklar Yöntemi
GPR : Yer Radarı
GHz : Gigahertz
MHz : Megahertz
PML : Mükemmel Uyumlu Tabaka Sınırı Koşulu
TE : Transverse Electric (Enine Elektrik)
TM : Transverse Magnetic (Enine Manyetik)
VFSA : Çok Hızlı Benzetimli Tavlama

YER RADARI VERİLERİNİN ÇOK HIZLI BENZETİMLİ TAVLAMA YÖNTEMİ İLE TERS ÇÖZÜMÜ

ÖZET

Arazide alınan yer radarı verilerinin yorumlanması zor bir görevdir. Karmaşık yer altı yapısının aydınlatılması için yer parametrelerinin belirlenmesi gerekir. Yer altından yansıyarak gelen elektromanyetik dalgalar bu karmaşık yer altının farklı elektriksel özellikli alanlarından geldiğinden radargramları doğrudan etkilemektedir. Bu yüzden yer altının karmaşık yapısının parametrelerinin belirlenmesi gerekir.

Bu tez çalışmasında Matlab programlama dili kullanarak sonlu farklar yöntemi ile bir boyutlu ve iki boyutlu yer radarı düz çözümü programı geliştirilmiştir. Programlarda mükemmel uyumlu tabaka (PML) sınır koşulu uygulanmıştır. Matlab programlama dili kullanılarak geliştirilen yer radarı programlarında kaynak dalgacığı olarak Ricker dalgası kullanılmıştır. Bir boyutlu ve iki boyutlu ortamlarda yerin fiziksel ve geometrik parametrelerinin radargramlar üzerinde etkisini incelemek amacıyla yer altındaki jeolojik yapıların modelleri oluşturulmuştur. Aynı yer altı ortamı için hazırlanan bir boyutlu ve iki boyutlu radargramların izleri bir birleri ile karşılaştırılmıştır.

Çok hızlı benzetimli tavlama (VFSA) optimizasyon yöntemi ile bir boyutlu sentetik radargramlardan modelin fiziksel ve geometrik parametreleri hesaplanmıştır. Ayrıca, Kocaeli Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Uygulamalı Jeofizik Laboratuvarı'nda ve Zonguldak İl'inde alınan gerçek yer radarı ölçülerinin parametreleri hesaplanmıştır. Gerçek radargramlarda verici antenden çıkan elektromanyetik dalgalar Morlet dalgacığına benzediğinden optimizasyon yönteminde Morlet dalgacığı kullanılmıştır. Ayrıca laboratuvarda alınan yer radarı ölçülerinde, ilk gelen dalga kaynak dalgacığı olarak kullanılmıştır. Böylece hata daha da düşürülmüştür. Zonguldak'ta alınan yer radarı ölçüleri çalışma alanında yapılan araştırma sondajları ile karşılaştırılmıştır. VFSA yöntemi ile hesaplanan parametreler sondaj verileri ile örtüştüğü görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: GPR, Modelleme, Sonlu Farklar, VFSA, Yer Radarı.

INVERSION OF GROUND PENETRATING RADAR DATA USING VERY FAST SIMULATED ANNEALING METHOD

ABSTRACT

Interpretation of GPR data is difficult task. The earth parameters should be determined to interpret the complex underground. Propagation of electromagnetic field through this type of complex underground with various electrical properties affects directly radargrams. Therefore, the parameters of the complex structure of underground should be determined.

In this study, one dimensional and two dimensional ground penetrating radar programs were developed with the finite difference method using Matlab programming language. Perfectly matched layer (PML) was applied as a boundary condition in the programs. The Ricker wavelet was used as a source wavelet in the developed program. Possible geological structures as earth models were constructed to study the effect of physical and geometrical parameters on radargrams in one dimensional and two dimensional environments. The developed programs were compared with the response of an existing program using the same earth model.

The physical and geometrical parameters of model were estimated using a trace by the very fast simulated annealing (VFSA) optimization method. As field examples, the parameters of the GPR data acquired in the laboratory and Zonguldak were estimated. The direct electromagnetic waves emitted from the transmitter in real radargrams were similar to the Morlet wavelet in our observations. Thus the Morlet wavelet was used in the optimization method. Further, when the first arrival wave was used as a source wavelet, the RMS error was reduced better than the results of other source wavelets.

Keywords: GPR, Modeling, Finite Difference, VFSA, Ground Penetrating Radar.

GİRİŞ

Gömülü yapıların yüzeyden belirlenmesi insanların tarih boyunca ilgisini çekmiştir. Bu amaçla birçok çalışma yapılmış ve birçok jeofizik yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden bir tanesi yer radarı (Ground Penetrating Radar, Georadar) yöntemidir. Bu yöntem, yerbilimi için sığ sayılacak derinlikleri araştıran bir yöntemdir ancak hızlı bir yöntemdir.

Yer radarı yönteminin tarihi yaklaşık olarak yüzyıl öncesine dayanmaktadır. Bu yöntem ilk olarak 1929 yılında Avusturya'da buz kalınlığını ölçmek için kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar 1930 yılında geliştirilerek içme suyu, buz, tuz depozitleri araştırılmıştır (Stern, 1930).

1970 yılların başlarında ilk yer radarı cihazı Ohio Devlet Üniversitesi tarafından üretilmiştir. Bu tarihten iki yıl sonra Rex Morey ve Art Darke tarafından "Geophysical Survey System Inc. (GSSI)" şirketi ile ticari olarak temelleri atılmıştır (Cook, 1974; Cook, 1975). Bu gelişmelerin sonucunda kömür ve kaya araştırmaları yapılmıştır, bu çalışmalar ışığında sinyallerin bir kaç on metreden sonra sönümlendiği belirlenmiştir.

Yer radarı yönteminin araştırma derinliği, araştırma yapılan formasyon ve araştırma için kullanılacak anten frekansına bağlıdır. Yer radarı yöntemi sığ yöntem olmasına karşın, yer altı yapısını veya yer altındaki yapıların şeklini, boyutunu, derinliğini hassas şekilde belirlemek mümkündür (Annan, 2004).

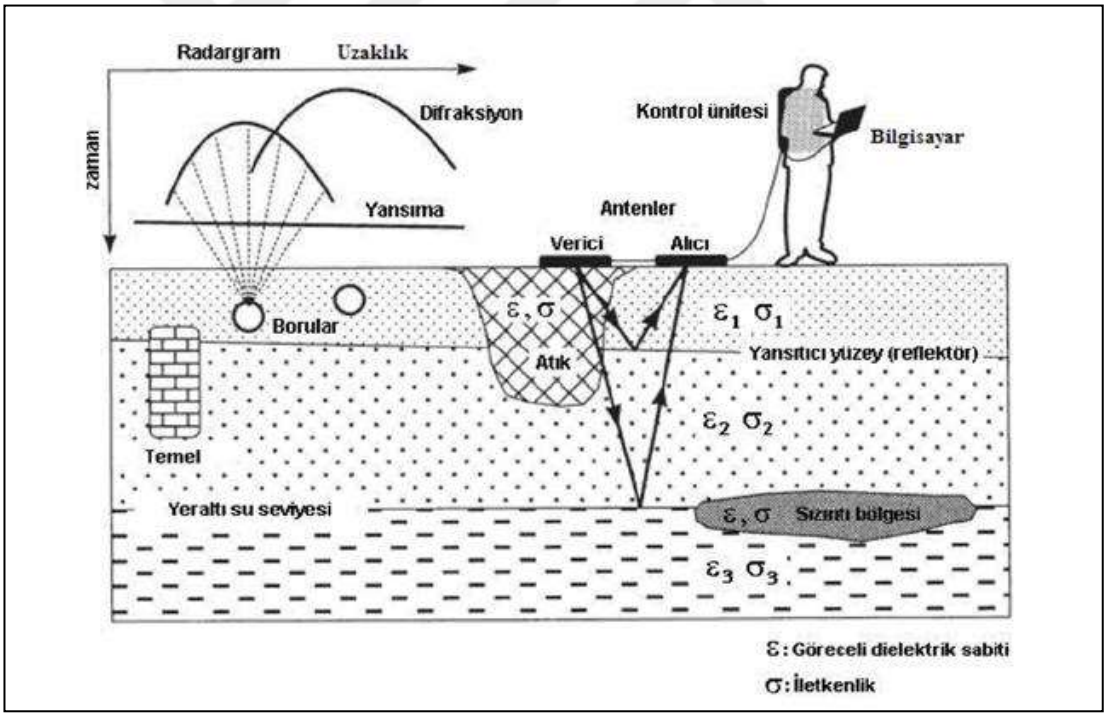
Yer radarı yönteminin hızlı olması ve yer altındaki yapıların fiziksel ve geometrik parametrelerini hassas şekilde belirleyebilmesi nedeniyle geniş kullanım alanı vardır. Bu çalışmada zaman ortamı sonlu farklar (FDTD) yöntemi ile Matlab programlama dili kullanılarak bir boyutlu (1B) ve iki boyutlu (2B) ortamlar için yer radarı düz çözümü programı geliştirilmiştir. Programlarda mükemmel uyumlu plaka (PML) sınır koşulu uygulanmıştır. Daha sonra geliştirilen Matlab programları ile farklı geometrik ve fiziksel parametreler denenerek radargram olarak adlandırılan sinyaller elde edilmiştir ve bu parametrelerin radargramlar üzerindeki etkisinin incelenmesi

amaçlanmıştır. Daha sonra global optimizasyon yöntemi olan çok hızlı benzetimli tavlama (VFSA) yöntemi ile 1B radargramların parametreleri hesaplanmıştır. VFSA yöntemi ile sentetik radargramlar yanı sıra Kocaeli Üniversitesi Uygulamalı Jeofizik Mühendisliği Laboratuvarında alınan yer radarı ölçüleri ve Zonguldak İl'inde alınan yer radarı ölçüsünün parametreleri VFSA yöntemi hesaplanmıştır.

1. YER RADARI YÖNTEMİ

1.1. Yöntemin Tanıtılması

Yer radarı cihazı, bir adet verici anten, bir adet alıcı anten, kontrol ünitesi ve bu kontrol ünitesine bağlı bilgisayardan oluşmaktadır. Yer radarı yöntemi, verici anten ile yer altına gönderilen sinyalin, yer altındaki farklı elektriksel özellikteki yapılardan yansıyarak alıcı anten tarafından algılanarak kayıt edilmesine dayanır. Yer altında farklı dielektrik özellikte bir yapı varsa, verici anten tarafından gönderilen yüksek frekanslı elektromanyetik dalganın bir kısmı, bu yapıdan yansıyarak alıcı anten tarafından kayıt edilir (Şekil 1.1). Bir kısmı ise bu yapı içerisinde ilerlemeye devam eder ve sönümlenir.



Şekil 1.1. Yer radarı çalışma prensibi (Knödel ve diğ., 1997)

Yer altına gönderilen sinyal gidiş-geliş zamanı olarak kayıt edilir. Verici anten frekansı 10 MHz ile 2.5 GHz arasında değişmektedir. Alıcı tarafından kayıt edilen sinyallere "radargram" denir. Yer radarı yönteminin geniş kullanım alanı vardır (Tablo 1.1).

Tablo 1.1. Yer radarı yönteminin kullanıldığı alanlar (Özkap, 2008)

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

1.2. Yer Radarı Kuramı

Yer radarı yöntemi elektromanyetik teoriye dayanır. Klasik Maxwell denklemleri dört adet denklemden oluşmaktadır. Maxwell denklemlerinin iki adedi Gauss yasasından, bir adedi Faraday yasasından, diğer bir adedi Ampere yasasından oluşmaktadır (Saduki, 2001). Bu bölümde dört adet denkleme yer verilecektir. Bölüm ikide zaman ortamında ve frekans ortamında Maxwell denklemleri ayrıntılı biçimde incelenecektir.

Faraday kanunu; manyetik akının zamanla değişimi elektrik alanı oluşturacağını ifade eder ve Denklem (1.1) ile verilir;

$$\nabla \times \vec{E} = -\left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\right) - \vec{M} \tag{1.1}$$

Ampere kanunu ise; zamanla değişen elektrik akı yoğunluğu değişen manyetik alan şiddeti oluşturacağını, sabit akımın zamanla değişmeyen sabit manyetik alan oluşturacağını ifade eder ve Denklem (1.2) ile verilir;

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}\right) \tag{1.2}$$

Elektrik ve manyetik alanlar için Gauss yasaları aşağıdaki gibi verilmiştir. Gauss kanunu; herhangi bir kapalı yüzeyin tanımladığı hacim içinde manyetik akının sıfır elektrik alanın ise bu kapalı hacmin içindeki toplam yük miktarına eşit olduğunu ifade etmektedir. Bir başka değişle diverjans teoreminin manyetik ve elektrik alana uygulanmasıdır, Denklem (1.3) ve (1.4)'deki gibi ifade edilir;

$$\nabla.\vec{B} = 0 \tag{1.3}$$

$$\nabla.\vec{D} = q \tag{1.4}$$

Homojen ortam için, elektrik akı yoğunluğu ($\vec{D}$), manyetik akı yoğunluğu ($\vec{B}$) ve akım yoğunluğu ($\vec{J}$), sırasıyla Denklem (1.5), (1.6) ve (1.7) ile ifade edilir;

$$\vec{D} = \varepsilon\vec{E} \tag{1.5}$$

$$\vec{B} = \mu\vec{H} \tag{1.6}$$

$$\vec{J} = \sigma\vec{E} \tag{1.7}$$

Bu bağıntılar bünye denklemleri olarak tanımlanır. Bu bağıntılarda $\vec{E}$ elektrik alan şiddeti (V/m), $\vec{H}$ manyetik alan şiddeti (A/m), $\vec{D}$ elektrik akı yoğunluğu (C/m^2) $\vec{B}$ manyetik alan yoğunluğu$(W/m^2$ veya nT), $\vec{J}$ akım yoğunluğu (A/m^2), $\vec{M}$ manyetik akım yoğunluğu (V/m^2) ve manyetik akım yoğunluğu sıfırdır ε, dielektrik sabiti (F/m), σ sigma(S/m), μ manyetik geçirgenlik (H/m), q yük yoğunluğu (C/m^3) olarak tanımlanır (Saduki 2001).

Boşlukta manyetik geçirgenlik ve dielektrik sabiti değerleri sırasıyla; $\mu_0=4\pi\times10^{-7}$ H /m ve $\varepsilon_0=8{,}854\times10^{-12}$ F /m'dir.

1.2.1. Ortamın özdirenci ve iletkenliği

Doğada bulunan tüm yapı ve malzemeler elektronların akışına karşı bir direnç gösterir, bu dirence malzemenin özdirenci denir. Bu yapı ve malzemelerde özdirencin geniş bir yelpazesi vardır. Yer altındaki yapılar aynı malzemeden oluşsa dahi farklı fiziksel koşullarda, farklı özdirenç değerleri verirler. Farklı özdirenç değerlerinin olmasının nedeni yapının; formasyon faktörünün, su doygunluğunun,

porozitesinin, mineral içeriğinin vb. özelliklerinin farklılık göstermesinden kaynaklanır. Özdirenç ile iletkenlik terstir, özdirenç artarken iletkenlik düşer (Öztürk, 1995).

1.2.2. Ortamın dielektrik sabiti

Dielektrik sabiti bir malzemenin üzerinde yük depolayabilme kapasitesidir (Cassidy, 2009). Dielektrik sabiti Denklem (1.8) bağıntısı ile ifade edilir;

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \left(1 + \chi_e\right) \tag{1.8}$$

Burada ε malzememin dielektrik sabiti, ε_0 boşluğun dielektrik sabiti χ_e ise ortamın elektrik hassasiyetidir. Yapının dielektrik sabiti ile boşluğun dielektrik sabitine oranı bağıl dielektrik sabitini verir, Denklem (1.9);

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \tag{1.9}$$

Dielektrik sabitinin özdirenç gibi geniş bir aralığı yoktur. Bağıl dielektrik sabiti 1-81 arasında değişmektedir (Annan, 2004).

1.2.3. Ortamın manyetik geçirgenliği

Ortamların manyetik geçirgenliği (μ), demir içeren malzemeler dışında jeolojik olarak fazla değişim göstermez. Ortamın manyetik geçirgenliği, ortamın dielektrik sabitine benzer şekilde ifade edilebilir. Statik manyetik geçirgenlik Denklem (1.10) bağıntısı ile verilir,

$$\mu = \mu_0 \left(1 + \chi_m\right) \tag{1.10}$$

burada μ_0 boşlukluğun manyetik geçirgenliği, χ_m ortamın manyetik duyarlılığıdır. Dielektrik sabitinde olduğu gibi göreceli manyetik geçirgenlik, ortamın manyetik geçirgenliği ile boşluğun manyetik geçirgenliğinin birbirine oranıdır ve Denklem (1.11) ile verilir.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \tag{1.11}$$

2. ELEKTROMANYETİK ALAN DENKLEMLERİ

Bu bölümde elektromanyetik alan denklemleri çıkartılacaktır. Yer radarı kuramı bölümünde Maxwell denklemleri yazılmıştır, yazılan denklemler yardımı ile zaman ve frekans ortamında elektromanyetik dalga denklemleri çıkartılacaktır.

2.1. Maxwell Denklemleri

Bölüm 1.2 de klasik Maxwell denklemleri yazılmıştır. Klasik Maxwell denklemlerini hatırlarsak, bunlar; Faraday, Ampere ve Gauss kanundan oluşmaktadır. Bu denklemler yardımı ile elektromanyetik alan denklemleri türetilecektir.

2.2. Zaman Ortamında Elektromanyetik Dalga Denklemleri

2.2.1. Elektrik alan dalga denklemi

Bu bölümde zaman ortamı için elektromanyetik dalga denkleminin elektrik alan bileşeni türetilecektir. Denklem (1.1)'de, Denklem (1.6) yerine yazıldığında;

$$\nabla \times \vec{E} = -\left(\frac{\partial \mu \vec{H}}{\partial t} \right) \tag{2.1}$$

μ sabit olduğundan, dışarı alınırsa

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \left(\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \right) \tag{2.2}$$

Denklem (2.2) elde edilir. Denklem (2.2)'nin rotasyoneli alırsa;

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = -\mu \left(\frac{\partial \left(\nabla \times \vec{H} \right)}{\partial t} \right) \tag{2.3}$$

denklemi elde edilir. Denklem (2.3)'de $\left(\nabla \times \vec{H} \right)$ eşitliğini yerine yazarsak

$$\nabla \times \nabla \times \overset{r}{E} = -\mu \left(\frac{\partial \left(J + \left(\frac{\partial \overset{r}{D}}{\partial t} \right) \right)}{\partial t} \right) \tag{2.4}$$

denklemi elde edilir. Son olarak Denklem (2.4)'de Denklem (1.5) ve (1.7) yerine yazılırsa;

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = -\mu \left(\frac{\partial \left(\sigma \vec{E} + \left(\frac{\varepsilon \vec{E}}{\partial t} \right) \right)}{\partial t} \right) \tag{2.5}$$

ε ve σ sabit olduğundan,

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = -\mu\sigma \left(\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) - \mu\varepsilon \left(\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t} \right) \tag{2.6}$$

olur.

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} = \nabla \left(\nabla . \vec{A} \right) - \nabla^2 \vec{A} \tag{2.7}$$

özelliğinden yararlanırsak ve $-\mu$ parantezine alırsak;

$$\nabla \left(\nabla . \vec{E} \right) - \nabla^2 \vec{E} = -\mu \left(\sigma \left(\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) - \varepsilon \left(\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t} \right) \right) \tag{2.8}$$

Denklem (1.4) $\nabla . \vec{D} = \rho$ şeklinde yazılabilir. Yük yoğunluğu (ρ), iletkenliği (σ) sıfırdan farklı bir ortamda çok kısa zamanda dengeye ulaşacağından $\nabla . \vec{E} = 0$ yazılabilir. Bu durumda zaman ortamında elektromanyetik alan denklemleri,

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu\sigma \left(\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) + \mu\varepsilon \left(\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \right) \tag{2.9}$$

Denklem (2.9) şeklinde yazılabilir (Sadiku, 2001).

2.2.2. Manyetik alan dalga denklemleri

Bu bölümde zaman ortamında elektromanyetik dalga denkleminin manyetik alan bileşeni çıkartılacaktır. Denklem (1.2)'de, Denklem (1.5) ve (1.7) yerine yazılırsa;

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \left(\frac{\partial \varepsilon \vec{E}}{\partial t} \right) \tag{2.10}$$

denklemi elde edilir. ε, sabit olduğundan, parantez dışına alınırsa;

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \varepsilon \left(\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \tag{2.11}$$

Denklem (2.11)'de her iki tarafın rotasyoneli alındığında;

$$\nabla x \nabla x \vec{H} = \sigma \left(\nabla \times \vec{E} \right) + \varepsilon \left(\frac{\partial \left(\nabla \times \vec{E} \right)}{\partial t} \right) \tag{2.12}$$

$$\nabla x \nabla x \vec{H} = \sigma \left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) + \varepsilon \left(\frac{\partial \left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right)}{\partial t} \right) \tag{2.13}$$

$$\nabla x \nabla x \vec{H} = \sigma \left(\frac{-\partial \left(\mu \vec{H} \right)}{\partial t} \right) + \varepsilon \left(\frac{\partial^2 \left(\mu \vec{H} \right)}{\partial t^2} \right) \tag{2.14}$$

Denklem (2.14) elde edilir. Manyetik geçirgenlik sabit olduğundan dışarı alınırsa ve Eşitlik (2.7)'den yararlanıldığında;

$$\nabla^2 \vec{H} = \sigma \mu \left(\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \right) + \varepsilon \mu \left(\frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \right) \tag{2.15}$$

manyetik alan dalga denklemi elde edilir (Sadiku, 2001).

2.3. Frekans Ortamında Elektromanyetik Dalga Denklemleri

Frekans ortamında elektromanyetik dalga denklemi yazılabilmesi için zaman ortamında çıkartılan denklemlere Fourier dönüşümü yapılması gereklidir. Zamana göre elektromanyetik dalga değişimini $e^{i\omega t}$ alınırsa ve Fourier dönüşümünün izleyen türev özellikleri;

$$\frac{\partial}{\partial t} \rightarrow i\omega \tag{2.16}$$

ikinci dereceden zamana göre değişimi;

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \rightarrow i^2\omega \tag{2.17}$$

$i^2 = -1$, olduğundan Eşitlik (2.17);

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \rightarrow -\omega \tag{2.18}$$

şeklinde yazılabilir. Denklem (2.9)'a Fourier dönüşümü yapılırsa;

$$\nabla^2\vec{E} = \mu\sigma\left(\frac{\partial\vec{E}}{\partial t}\right) + \mu\varepsilon\left(\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2}\right) \leftrightarrow \nabla^2\vec{e} = i\omega\mu\sigma\vec{e} - \omega^2\mu\varepsilon\vec{e} \tag{2.19}$$

Eşitlik (2.19) elektrik alan parantezine alınırsa,

$$\nabla^2\vec{e} = \vec{e}\left(i\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\varepsilon\right) \rightarrow \nabla^2\vec{e} = \vec{e}k^2 \tag{2.20}$$

elektrik alan Denklem (2.19) şeklinde yazılabilir. Aynı işlemler zaman ortamındaki manyetik alan denklemine, Denklem (2.15)'e uygulandığında;

$$\nabla^2\vec{H} = \sigma\mu\left(\frac{\partial\left(\vec{H}\right)}{\partial t}\right) + \varepsilon\mu\left(\frac{\partial^2\left(\vec{H}\right)}{\partial t^2}\right) \leftrightarrow \nabla^2\vec{h} = i\omega\mu\sigma\vec{h} - \omega^2\mu\varepsilon\vec{h} \tag{2.21}$$

$$\nabla^2\vec{h} = \vec{h}\left(i\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\varepsilon\right)\nabla^2\vec{h} = \vec{h}k^2 \tag{2.22}$$

denklemi yazılabilir. k^2 dalga sayısıdır. Denklem (2.20) ve (2.22) $\vec{e}k^2$ ve $\vec{h}k^2$ terimleri karşı tarafa atıldığın da Helmholtz denklemlerini elde ederiz, Denklem (2.23) ve (2.24) (Saduki, 2001).

$$\nabla^2\vec{e} - \vec{e}k^2 = 0 \tag{2.23}$$

$$\nabla^2\vec{h} - \vec{h}k^2 = 0 \tag{2.24}$$

Burada elde edilen denklemler elektromanyetik dalgaların davranışını kaynak bağımsız bir ortamda tanımlamaktadır.

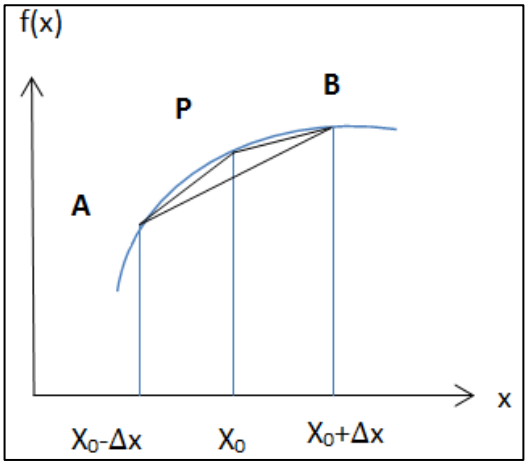
3. SONLU FARKLAR YÖNTEMİ İLE MAXWELL DENKLEMLERİNİN ÇÖZÜLMESİ

Sonlu farklar yöntemi 1920'li yıllarda A. Thom tarafından doğrusal olmayan hidrodinamik denklemlerin çözümü için geliştirilmiştir. Günümüzde farklı problemlerin çözümünde kullanılmaktadır (Saduki, 2001).

Sonlu farklar yöntemi uzun yıllardır bilinmesine rağmen zaman ortamında Maxwell denklemlerine kademeli ızgara (staggered gird) yöntemi ile ilk kez Kane S. Yee (1966) tarafından uygulanmıştır. Yee, Maxwell denklemlerini izotropik ortamlarda başlangıç sınır değer problemlerinin çözümünü doğrudan zaman ortamında bu sayısal yöntem ile gerçekleştirmiştir (Yee, 1966). Kısaca FDTD olarak bilinen yöntemin açılımı Finite Diffirence Time Domain'dir.

3.1. Sonlu Farklar Yöntemi

Sonlu farklar yöntemi sayısal türev alma işlemidir. Sonlu farklar yöntemi ile analitik çözüme yaklaşılmaya çalışılır. Sayısal türev yaklaşımları Taylor serisinin açılması ile elde edilir.



Şekil 3.1. P noktasındaki ileri, geri ve merkezi farklar gösterimi

İleri farklar;

$$f'(x_0) \cong \frac{f(x_0+\Delta x)-x_0}{\Delta x} \tag{3.1}$$

Geri farklar;

$$f'(x_0) \cong \frac{x_0-f(x_0-\Delta x)}{\Delta x} \tag{3.2}$$

Merkezi farklar;

$$f'(x_0) \cong \frac{f(x_0+\Delta x)-f(x_0-\Delta x)}{2\Delta x} \tag{3.3}$$

şeklinde yazılır. Ayrıca P noktasındaki ikinci türev ise;

$$f''(x_0) \cong \frac{f(x_0+\Delta x)-2f(x_0)+f(x_0-\Delta x)}{\Delta x^2} \tag{3.4}$$

Eşitlik (3.4) ile ifade edilir. Daha genel yaklaşım için Taylor serisi açılırsa;

$$f(x_0+\Delta x)=f(x_0)+\Delta x f'(x_0)+\frac{1}{2!}(\Delta x)^2 f''(x_0)+\frac{1}{3!}(\Delta x)^3 f'''(x_0)+\ldots \tag{3.5}$$

Eşitlik (3.5) düzenlenir ise;

$$f(x_0+\Delta x)+f(x_0-\Delta x)=2f(x_0)+(\Delta x)^2 f''(x_0)+O(\Delta x)^4 \tag{3.6}$$

Denklem (3.6) elde edilir. Burada $O(\Delta x)^4$ terimi dizinin kesilmesinden kaynaklanan hata terimidir. Bu terim ihmal edilirse Denklem (3.6);

$$f''(x_0) \cong \frac{f(x_0+\Delta x)-2f(x_0)+f(x_0-\Delta x)}{\Delta x^2} \tag{3.7}$$

$$f'(x_0) \cong \frac{f(x_0+\Delta x)-f(x_0-\Delta x)}{2\Delta x} \tag{3.8}$$

Eşitlik (3.8) şeklinde yazılabilir. Yüksek mertebeden Taylor serisi açılabilir. Taylor serisi ne kadar çok açılırsa hata o mertebede azalır. Fakat uygulamada genellikle ikinci dereceden sonra terim kesilir. Bu nedenle yaklaşımlar içerisinde hatalar bulunur. Bu çalışmada merkezi farklar ile sayısal türev alınacaktır. Merkezi farklar ile alınan türevler ileri ve geri farklara göre daha hassas sonuçlar vermesinden dolayı seçilmiştir.

Bir fonksiyonun sonlu farklar yöntemine göre çözümünü bulmak için çözüm alanı, küçük alanlara bölünerek ağ tasarımı yapılması gereklidir. Çözüm alanı x, t olsun, bu çözüm alanı Δx, Δt alanlarına bölünürse;

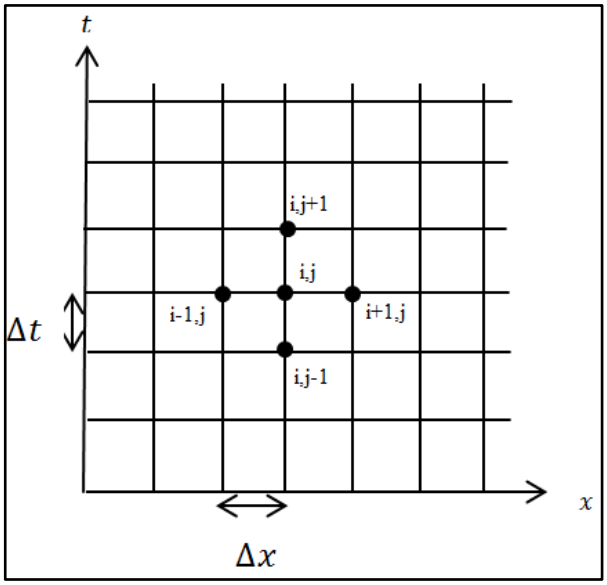
$$x = i\Delta x, \qquad i = 0,1,2,\ldots$$

$$t = j\Delta t, \qquad t = 0,1,2,\ldots \tag{3.9a}$$

ve ağ tasarımı Şekil 3.1'deki P noktası için yapılırsa;

$$\phi_p = \phi(i\Delta x, j\Delta t) = \phi(i, j) \tag{3.9b}$$

Eşitlik (3.9b) şeklinde yazılır.



Şekil 3.2. İki bağımsız değişken için sonlu farklar ağı

P noktası için bağımsız değişkenlerle sonlu farklar eşitlikleri yazılırsa;

$$\phi_{x_{i,j}} \cong \frac{\phi(i+1,j)-\phi(i-1,j)}{2\Delta x} \tag{3.9c}$$

$$\phi_{t_{i,j}} \cong \frac{\phi(i,j+1)-\phi(i,j-1)}{2\Delta x} \tag{3.9d}$$

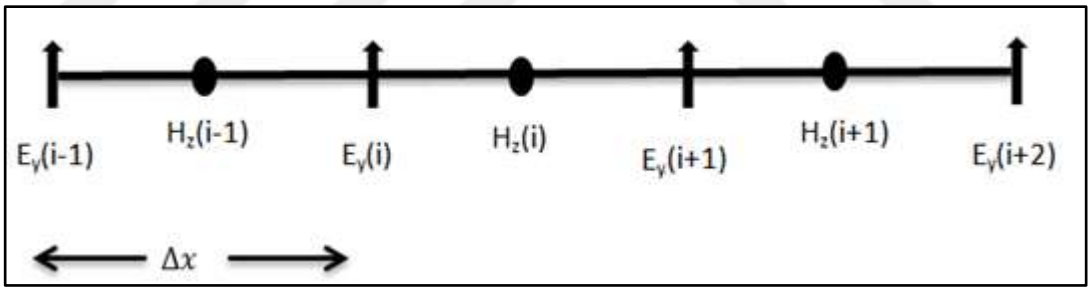
Denklem (3.9c) ve (3.9d) elde edilir (Sadiku, 2001).

3.2. Maxwell Denklemlerinin Sonlu Farklarla Çözülmesi

Bir boyutlu ve iki boyutlu ortamlar için kullanılan elektromanyetik dalga denklemlerinin türetilmesi Ek-A bölümünde verilmiştir.

3.2.1. Bir boyutlu ortam

Elektrik alanın y bileşeni ve bu bileşene dik olan manyetik alanın z bileşeni varsa elektromanyetik dalga, iki bileşene dik yönde ilerleyecektir. Elektrik alanın z bileşeni ve manyetik alanın y bileşeni sıfır kabul edilir.



Şekil 3.3. Elektrik (E_y) ve manyetik alanın (H_z) bir boyutlu durumda FDTD'ye göre konumları

İki boyutlu Maxwell denklemleri ele alındığında;

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon_x}\left(-\sigma_x^e E_x - J_{ix}\right) \tag{3.10a}$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon_y}\left(-\frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma_y^e E_y - J_{iy}\right) \tag{3.10b}$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon_z}\left(-\frac{\partial H_y}{\partial x} - \sigma_z^e E_z - J_{iz} \right) \tag{3.10c}$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu_x}\left(-\sigma_x^m H_x - M_{ix} \right) \tag{3.10d}$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu_y}\left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \sigma_y^m H_y - M_{iy} \right) \tag{3.10e}$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu_z}\left(-\frac{\partial E_z}{\partial x} - \sigma_z^m H_z - M_{iz} \right) \tag{3.10f}$$

Denklem (3.10)'daki J ve M terimleri kaynak terimleridir. Denklem (3.10a) ve (3.10d)'ye bakıldığında zamana bağlı türevler bulunmakta fakat konuma bağlı türevler bulunmadığı görülmektedir. Bu nedenle bu iki denklem yayılım gösteren alanları temsil etmemektedir. Diğer dört denklem yayılım gösteren alanları temsil eder ve bu denklemlerde bulunan elektrik ve manyetik alan bileşenleri x doğrultusuna eninedir. Buna göre elektrik ve manyetik alan TEM_x, bir boyutlu durumda düzlem dalga halinde yayılır (Elsherbeni ve Demir, 2009).

Bir boyutlu durumda elektrik alan ve manyetik alan iki farklı durum için hesaplanabilir. Denklem (3.10b) ve (3.10f) kullanılarak E_y ve H_z hesaplanabilir, Denklem (3.10c) ve (3.10e) ile E_z ve H_y hesaplanabilir. Bir boyutlu FDTD denklemleri, Şekil 3.3'te gösterildiği gibi bir boyutlu alan konumlaması ve merkezi farklar formülü kullanılarak, Denklem (3.10b) ve (3.10f)'den elde edilirse;

$$E_y^{n+1}(i) = C_{eye}(i) \times E_y^n(i) + C_{eyhz}(i) \times \left(H_z^{n+\frac{1}{2}}(i) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i-1) \right) + C_{eyj}(i) \times J_{iy}^{n+\frac{1}{2}}(i) \tag{3.11}$$

burada, J_{iy} terimi kaynağı temsil etmektedir. C_{eye}, C_{eyhz} ve C_{eyj} terimleri açık şekilde yazılırsa;

$$C_{eye}(i)=\frac{2\varepsilon_y(i)-\Delta t\sigma_y^e(i)}{2\varepsilon_y(i)+\Delta t\sigma_y^e(i)} \tag{3.11a}$$

$$C_{eyhz}(i)=-\frac{2\Delta t}{\left(2\varepsilon_y(i)+\Delta t\sigma_y^e(i)\right)\Delta x} \tag{3.11b}$$

$$C_{eyj}(i)=-\frac{2\Delta t}{2\varepsilon_y(i)+\Delta t\sigma_y^e(i)} \tag{3.11c}$$

$$H_z^{n+\frac{1}{2}}(i)=C_{hzh}(i)\times H_z^{n-\frac{1}{2}}(i)+C_{hzey}(i)\times\left(E_y^n(i+1)-E_y^n(i)\right) +C_{hzm}(i)\times M_{iz}^n(i) \tag{3.12}$$

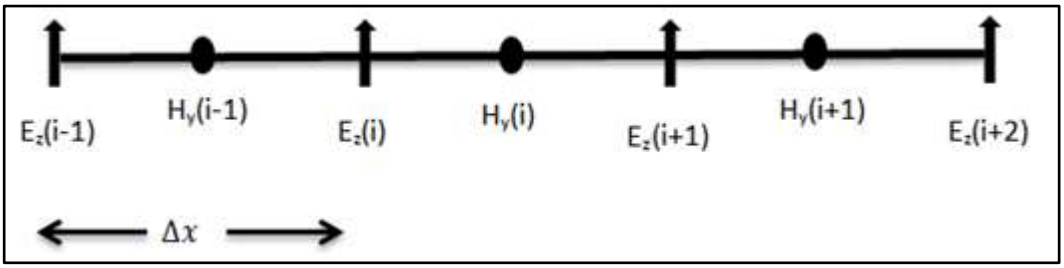
C_{hzh}, C_{hzey}ve C_{hzm} terimleri açık şekilde yazılırsa;

$$C_{hzh}(i)=\frac{2\mu_z(i)-\Delta t\sigma_z^m(i)}{2\mu_z(i)+\Delta t\sigma_z^m(i)} \tag{3.12a}$$

$$C_{hzey}(i)=-\frac{2\Delta t}{\left(2\mu_z(i)+\Delta t\sigma_z^m(i)\right)\Delta x} \tag{3.12b}$$

$$C_{hzm}(i)=-\frac{2\Delta t}{2\mu_z(i)+\Delta t\sigma_z^m(i)} \tag{3.12c}$$

denklemleri elde edilir (Elsherbeni ve Demir, 2009).



Şekil 3.4. Elektrik (E_z) ve manyetik alanın (H_y) bir boyutlu durumda FDTD'ye göre konumları

Benzer şekilde Denklem (3.10c) ve (3.10e) kullanılarak ve konumları Şekil 3.4'te gösterildiği gibi bir boyutlu FDTD denklemi yazılırsa;

$$E_z^{n+1}(i) = C_{eze}(i) \times E_z^n(i) + C_{ezhy}(i) \times \left(H_y^{n+\frac{1}{2}}(i) - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i-1) \right) + C_{ezj}(i) \times J_{iz}^{n+\frac{1}{2}}(i) \tag{3.13}$$

burada J_{iz} terimi kaynağı temsil etmektedir ve C_{eze}, C_{ezhy} ve C_{ezj} terimleri açık biçimde yazılırsa;

$$C_{eze}(i) = \frac{2\varepsilon_z(i) - \Delta t \sigma_z^e(i)}{2\varepsilon_z(i) + \Delta t \sigma_z^e(i)} \tag{3.13a}$$

$$C_{ezhy}(i) = \frac{2\Delta t}{\left(2\varepsilon_z(i) + \Delta t \sigma_z^e(i)\right)\Delta x} \tag{3.13b}$$

$$C_{ezj}(i) = -\frac{2\Delta t}{2\varepsilon_z(i) + \Delta t \sigma_z^e(i)} \tag{3.13c}$$

$$H_y^{n+\frac{1}{2}}(i) = C_{hyh}(i) \times H_y^{n-\frac{1}{2}}(i) + C_{hyez}(i) \times \left(E_z^n(i+1) - E_z^n(i)\right) + C_{hym}(i) \times M_{iy}^n(i) \tag{3.14}$$

C_{hyh}, C_{hyez} ve C_{hym} terimleri açık şekilde yazılırsa;

$$C_{hyh}(i) = \frac{2\mu_y(i) - \Delta t \sigma_y^m(i)}{2\mu_y(i) + \Delta t \sigma_y^m(i)} \tag{3.14a}$$

$$C_{hyez}(i) = \frac{2\Delta t}{\left(2\mu_y(i) + \Delta t \sigma_y^m(i)\right)\Delta x} \tag{3.14b}$$

$$C_{hym}(i) = -\frac{2\Delta t}{2\mu_y(i) + \Delta t \sigma_y^m(i)} \tag{3.14c}$$

Denklem (3.14a), (3.14b) ve (3.14c) elde edilir (Elsherbeni ve Demir, 2009).

3.2.2. İki boyutlu ortam

İki boyutlu ortamda elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin bir tanesinde değişiklik olmadığı kabul edilir. Bunun sonucunda türev alındığında değişiklik olmayan bileşen kaybolur.

İki boyutlu durumda elektrik ve manyetik alanın bileşenlerine göre iki durum bulunmaktadır. Bunlar TE (transverse electric) ve TM (transverse magnetic) modlarıdır. Bu iki durum ayrı başlıklar altında incelenecektir.

Örneğin problem, z bileşeninden bağımsız ise 2 boyutlu durum için, Denklem (3.15) ile ifade edilir;

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon_x}\left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \sigma_x^e E_x - J_{ix}\right) \tag{3.15a}$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon_y}\left(-\frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma_y^e E_y - J_{iy}\right) \tag{3.15b}$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon_z}\left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma_z^e E_z - J_{iz}\right) \tag{3.15c}$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu_x}\left(-\frac{\partial E_z}{\partial y} - \sigma_x^m H_x - M_{ix}\right) \tag{3.15d}$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu_y}\left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \sigma_y^m H_y - M_{iy}\right) \tag{3.15e}$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu_z}\left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} - \sigma_z^m H_z - M_{iz}\right) \tag{3.15f}$$

J ve M terimleri kaynak terimleridir. Denklem (3.15a), (3.15b) ve (3.15f) sadece E_x, E_y ve H_z bileşenlerine bağlı iken, Denklem (3.15c), (3.15d) ve (3.15e) sadece E_z, H_x ve H_y bileşenlerine bağlıdır. Bu nedenle bu altı denklem iki ayrı denklem kümesi

olarak ele alınabilir. Yani problem ayrı ayrı çözülebilir ve ana problem bu iki çözümün toplamı olarak elde edilebilir (Elsherbeni ve Demir, 2009).

3.2.2.1. TE modu denklemleri

TE modu için FDTD denklemleri Şekil 3.5'te gösterilen alan konumlarına göre merkezi farklar formülü kullanılarak yazılabilir. TE modu için sonlu farklar denklemi yazılırsa;

$$E_x^{n+1}(i,j) = C_{exe}(i,j) \times E_x^n(i,j) + C_{exhz}(i,j) \times \left(H_z^{n+\frac{1}{2}}(i,j) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i,j-1) \right) + C_{exj}(i,j) \times J_{ix}^{n+\frac{1}{2}}(i,j) \tag{3.16}$$

Denklem (3.16)'daki C_{exe}, C_{exhz} ve C_{exhz} terimleri açık şekilde yazılırsa;

$$C_{exe}(i,j) = \frac{2\varepsilon_x(i,j) - \Delta t\sigma_x^e(i,j)}{2\varepsilon_x(i,j) + \Delta t\sigma_x^e(i,j)} \tag{3.16a}$$

$$C_{exhz}(i,j) = \frac{2\Delta t}{\left(2\varepsilon_x(i,j) + \Delta t\sigma_x^e(i,j)\right)\Delta y} \tag{3.16b}$$

$$C_{exj}(i,j) = -\frac{2\Delta t}{2\varepsilon_x(i,j) + \Delta t\sigma_x^e(i,j)} \tag{3.16c}$$

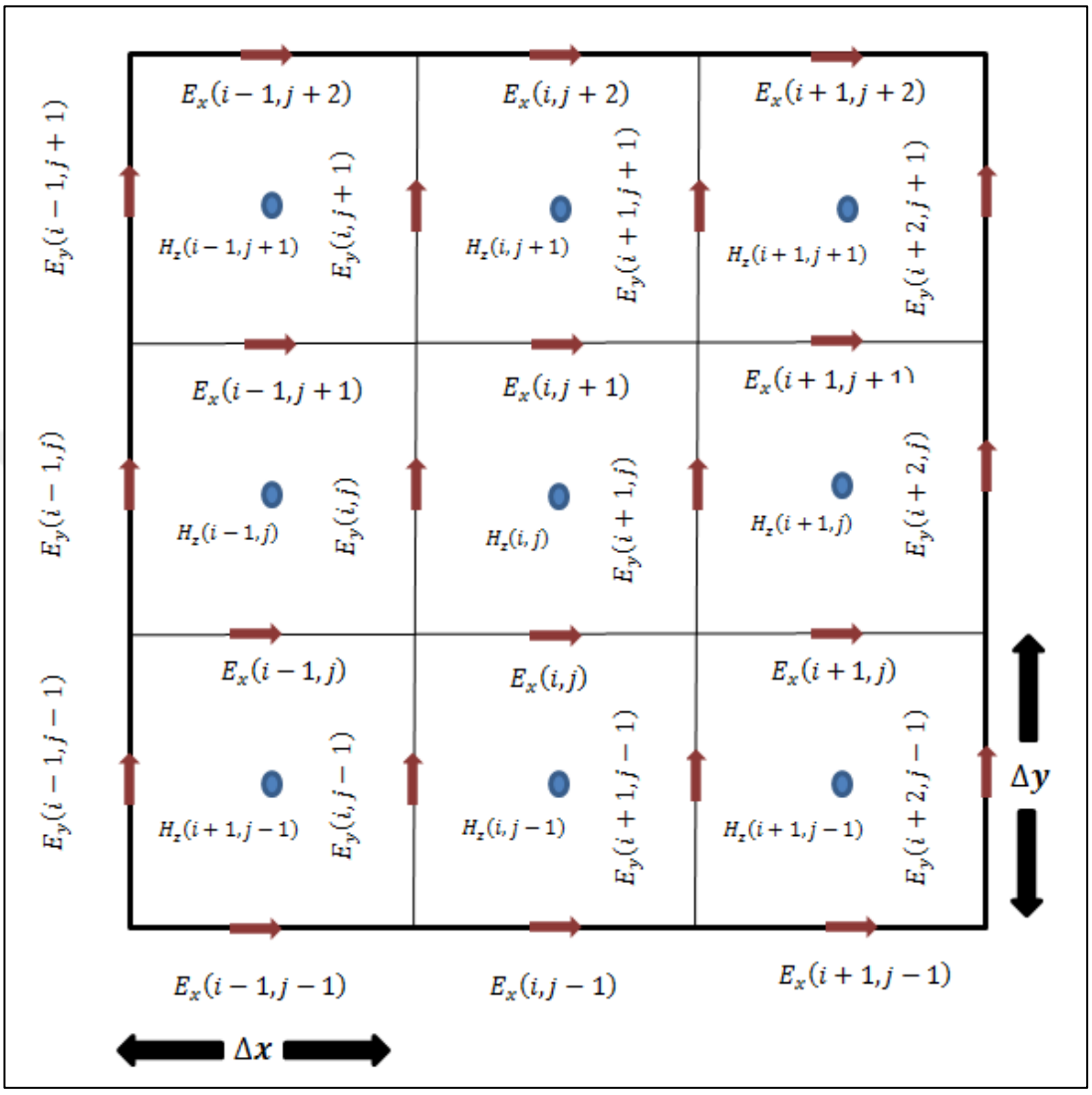
$$E_y^{n+1}(i,j) = C_{eye}(i,j) \times E_y^n(i,j) + C_{eyhz}(i,j) \times \left(H_z^{n+\frac{1}{2}}(i,j) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i,j-1) \right) + C_{eyj}(i,j) \times J_{iy}^{n+\frac{1}{2}}(i,j) \tag{3.17}$$

Denklem (3.17)'deki C_{eye}, C_{eyhz} ve C_{eyhz} terimleri açık şekilde yazılırsa;

$$C_{eye}(i,j) = \frac{2\varepsilon_y(i,j) - \Delta t\sigma_y^e(i,j)}{2\varepsilon_y(i,j) + \Delta t\sigma_y^e(i,j)} \tag{3.17a}$$

$$C_{eyhz}(i,j) = -\frac{2\Delta t}{\left(2\varepsilon_y(i,j) + \Delta t\sigma_y^e(i,j)\right)\Delta x} \tag{3.17b}$$

$$C_{eyj}(i,j) = -\frac{2\Delta t}{2\varepsilon_y(i,j) + \Delta t\sigma_y^e(i,j)} \tag{3.17c}$$



Şekil 3.5. TE modu için iki boyutlu FDTD bileşenleri ve konumları

$$H_z^{n+\frac{1}{2}}(i,j) = C_{hzh}(i,j) \times H_z^{n-\frac{1}{2}}(i,j) + C_{hzex}(i,j) \times \left(E_x^n(i,j+1) - E_x^n(i,j)\right) + C_{hzey}(i,j)\left(E_y^n(i+1,j) - E_y^n(i,j)\right) + C_{hzm}(i,j) \times M_{iz}^n(i,j) \tag{3.18}$$

Denklem (3.18)'deki C_{hzh}, C_{hzex}, C_{hzey}, ve C_{hzm} terimleri açık yazılırsa;

$$C_{hzh}(i,j) = \frac{2\mu_z(i,j) - \Delta t\sigma_z^m(i,j)}{2\mu_z(i,j) + \Delta t\sigma_z^m(i,j)} \tag{3.18a}$$

$$C_{hzex}(i,j)=\frac{2\Delta t}{\left(2\mu_z(i,j)+\Delta t\sigma_z^m(i,j)\right)\Delta y} \tag{3.18b}$$

$$C_{hzey}(i,j)=-\frac{2\Delta t}{\left(2\mu_z(i,j)+\Delta t\sigma_z^m(i,j)\right)\Delta x} \tag{3.18c}$$

$$C_{hzm}(i,j)=-\frac{2\Delta t}{2\mu_z(i,j)+\Delta t\sigma_z^m(i,j)} \tag{3.18d}$$

Eşitilik (3.18a), (3.18b), (3.18c) ve (3.18d) elde edilir (Elsherbeni ve Demir, 2009).

3.2.2.2. TM modu denklemleri

TM modu hesaplanırken Maxwell denklemlerinden bir yönde değişim olmadığı kabul edilir ve FDTD denklemleri çıkartılır. FDTD denklemlerinin bileşenleri ve konumları Şekil 3.6'da verilmiştir. TM modu için merkezi farklar formülü kullanılarak sonlu farklar denklemi yazılırsa;

$$\begin{aligned}E_z^{n+1}(i,j)&=C_{eze}(i,j)\times E_z^n(i,j)+C_{ezhy}(i,j)\times\left(H_y^{n+\frac{1}{2}}(i,j)-H_y^{n+\frac{1}{2}}(i-1,j)\right)\\&+C_{ezhx}(i,j)\left(H_x^{n+\frac{1}{2}}(i,j)-H_x^{n+\frac{1}{2}}(i,j-1)\right)+C_{ezj}(i,j)\times\Gamma_{iy}^{n+\frac{1}{2}}(i,j)\end{aligned} \tag{3.19}$$

Denklem (3.19)'daki C_{eze} , C_{ezhy}, C_{ezhx} ve C_{ezj} terimleri açık şekilde yazılırsa;

$$C_{eze}(i,j)=\frac{2\varepsilon_z(i,j)-\Delta t\sigma_z^e(i,j)}{2\varepsilon_z(i,j)+\Delta t\sigma_z^e(i,j)} \tag{3.19a}$$

$$C_{ezhy}(i,j)=\frac{2\Delta t}{\left(2\varepsilon_z(i,j)+\Delta t\sigma_z^e(i,j)\right)\Delta x} \tag{3.19b}$$

$$C_{ezhx}(i,j)=-\frac{2\Delta t}{\left(2\varepsilon_z(i,j)+\Delta t\sigma_z^e(i,j)\right)\Delta y} \tag{3.19c}$$

$$C_{ezj}(i,j)=-\frac{2\Delta t}{2\varepsilon_z(i,j)+\Delta t\sigma_z^e(i,j)} \tag{3.19d}$$

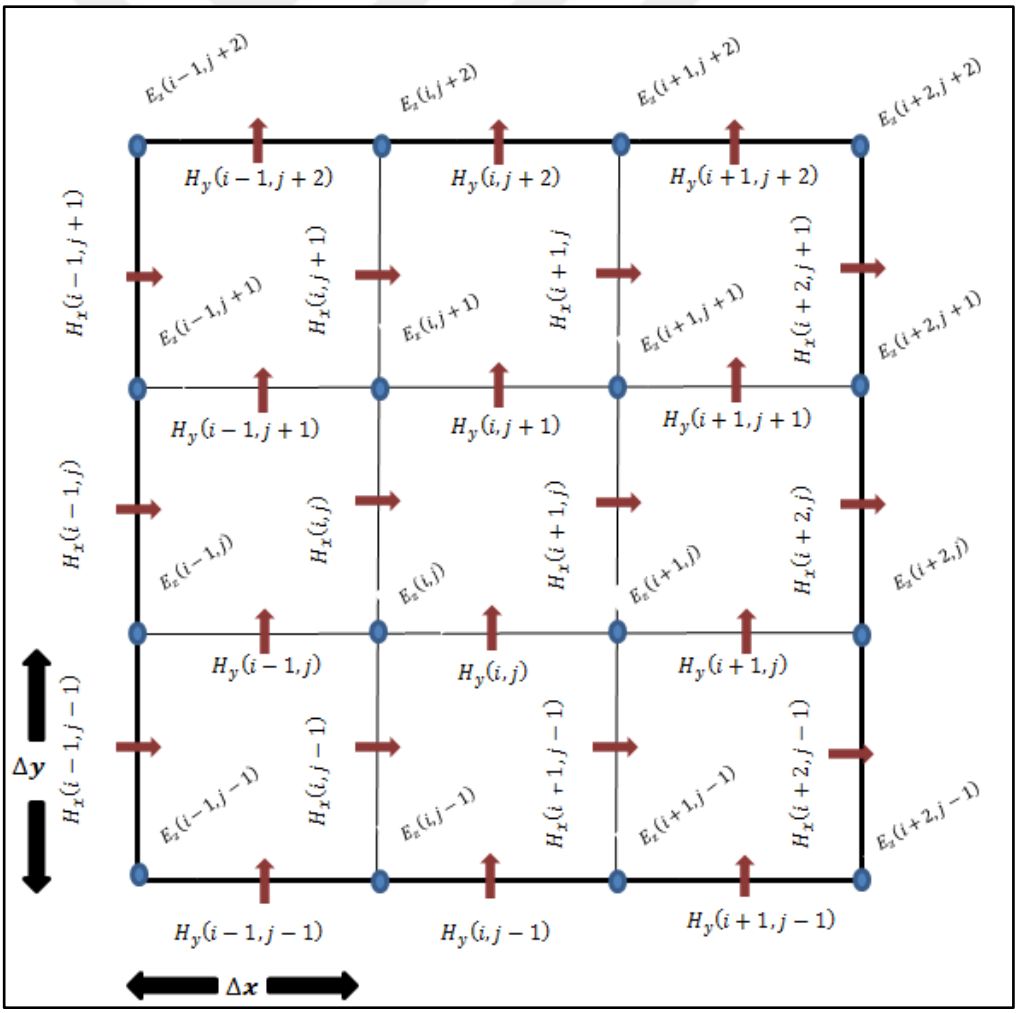
$$H_x^{n+\frac{1}{2}}(i,j) = C_{hxh}(i,j) \times H_x^{n-\frac{1}{2}}(i,j) + C_{hxez}(i,j) \times \left(E_z^n(i,j+1) - E_z^n(i,j)\right) + C_{hxm}(i,j) \times M_{ix}^n(i,j) \quad (3.20)$$

Denklem (3.20)'deki C_{hxh}, C_{hxez} ve C_{hxm} terimlerinin açık şeklini yazarsak;

$$C_{hxh}(i,j) = \frac{2\mu_x(i,j) - \Delta t\sigma_x^m(i,j)}{2\mu_x(i,j) + \Delta t\sigma_x^m(i,j)} \quad (3.20a)$$

$$C_{hxez}(i,j) = -\frac{2\Delta t}{\left(2\mu_x(i,j) + \Delta t\sigma_x^m(i,j)\right)\Delta y} \quad (3.20b)$$

$$C_{hxm}(i,j) = -\frac{2\Delta t}{2\mu_x(i,j) + \Delta t\sigma_x^m(i,j)} \quad (3.20c)$$



Şekil 3.6. TM modu için iki boyutlu FDTD bileşenleri ve konumları

$$H_y^{n+\frac{1}{2}}(i,j) = C_{hyh}(i,j) \times H_y^{n-\frac{1}{2}}(i,j) + C_{hyez}(i,j) \times \left(E_z^n(i,j+1) - E_z^n(i,j)\right) + C_{hym}(i,j) \times M_{iy}^n(i,j) \quad (3.21)$$

Denklem (3.21)'deki C_{hyh}, C_{hyez} ve C_{hym} terimlerinin açık hali yazılırsa;

$$C_{hyh}(i,j) = \frac{2\mu_y(i,j) - \Delta t\sigma_y^m(i,j)}{2\mu_y(i,j) + \Delta t\sigma_y^m(i,j)} \quad (3.21a)$$

$$C_{hyez}(i,j) = \frac{2\Delta t}{\left(2\mu_y(i,j) + \Delta t\sigma_y^m(i,j)\right)\Delta x} \quad (3.21b)$$

$$C_{hym}(i,j) = -\frac{2\Delta t}{2\mu_y(i,j) + \Delta t\sigma_y^m(i,j)} \quad (3.21c)$$

Denklem (3.21a), (3.21b) ve (3.21c) elde edilir (Elsherbeni ve Demir, 2009).

3.3. Mükemmel Uyumlu Tabaka (PML) Sınır Koşulu

Bilgisayarın belleklerinin sınırlı olması nedeniyle, hesaplanacak alanın ve hesaplama süresinin sınırlı olması gereklidir ve bu alan sınır koşulu ile sonlandırılmalıdır. Sınırlı olan alandan yansıyan elektromanyetik dalgalar sınır koşulu olmadığında saçılmalara neden olacaktır ve alanın sınırlarından yansıyan dalgalar ayrımı düşürecektir.

Bu zamana kadar çeşitli emici (absorbe) sınır koşulları geliştirilmiştir. Bununla birlikte Berenger (1994) tarafından geliştirilen Perfectly Matched Layer (PML) sınır koşulu diğer absorbe edici sınır koşullarına göre daha iyi sonuç verdiği kanıtlanmıştır. PML tabakası belli kalınlıkta ve hesaplama alanını çevrelemektedir (Berenger, 1994).

Yer radarı yönteminde sonlu farklar yöntemi ile sentetik radargramlar elde edildiğinde eğer PML sınır koşulu gibi sınır koşulu uygulanmazsa sınırlardan yansıyan ve saçılan elektromanyetik dalgalar radargramlarda sınır etkisi olarak gürültü şeklinde görünecektir. Bu da radargramlarda aslında olmayan yansımalara neden olacaktır. Bu nedenle sentetik radargramlar elde edilirken mutlaka sınır koşulu uygulanmalıdır.

3.3.1. Boşluk-PML arayüzeyinde PML teorisi

İki boyutlu ortamda, TE modu için alan bileşenleri zaman-harmonik ortamda yazılırsa, Denklem (3.22), (3.23) ve (3.24) elde edilir,

$$E_x = -E_0 \sin\phi_0 e^{j\omega(t-ax-\beta y)} \tag{3.22}$$

$$E_y = E_0 \cos\phi_0 e^{j\omega(t-ax-\beta y)} \tag{3.23}$$

$$Hz = H_0 e^{j\omega(t-ax-\beta y)} \tag{3.24}$$

Kutuplaşmış dalga için TE modu Maxwell eşitliği Denklem (3.25), (3.26) ve (3.27) ile ifade edilir;

$$\varepsilon_0 \frac{\partial E_x}{\partial t} + \sigma^e E_x = \frac{\partial H_z}{\partial y} \tag{3.25}$$

$$\varepsilon_0 \frac{\partial E_y}{\partial t} + \sigma^e E_y = -\frac{\partial H_z}{\partial x} \tag{3.26}$$

$$\mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial t} + \sigma^m H_z = \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \tag{3.27}$$

TE modu için H_z iki sanal bileşene ayrılabilir. H_z x ve y yönüne bağımlı iki sanal bileşen olarak yazarsak;

$$H_{zx} = H_{zx0} e^{-j\omega\beta y} e^{j\omega(t-ax)} \tag{3.28}$$

$$H_{zy} = H_{zy0} e^{-j\omega a x} e^{j\omega(t-\beta y)} \tag{3.29}$$

Denklem (3.28) ve (3.29) elde edilir. $H_z = H_{zx} + H_{zy}$ olur. PML sınır koşulu için Maxwell denklemleri için düzenlenirse;

$$\varepsilon_0 \frac{\partial E_x}{\partial t} + \sigma_{pey} E_x = \frac{\partial \left(H_{zx} + H_{zy} \right)}{\partial y} \tag{3.30}$$

$$\varepsilon_0 \frac{\partial E_y}{\partial t} + \sigma_{pex} E_y = -\frac{\partial \left(H_{zx} + H_{yz} \right)}{\partial x} \tag{3.31}$$

$$\mu_0 \frac{\partial H_{zx}}{\partial t} + \sigma_{pmx} H_{zx} = -\frac{\partial E_y}{\partial x} \tag{3.32}$$

$$\mu_0 \frac{\partial H_{zy}}{\partial t} + \sigma_{pmy} H_{zy} = -\frac{\partial E_x}{\partial y} \tag{3.33}$$

burada $\sigma_{pex}, \sigma_{pey}, \sigma_{pmx}$ ve σ_{pmy} kuramsal iletkenliklerdir. E_y ve H_{zx} x yönünde ilerleyen dalgayı tanımlarken, $E_x$ve H_{zy} y yönünde ilerleyen dalgayı tanımlamaktadır. Denklem (3.22), (3.23) ve (3.28), (3.29) düzenlenmiş Maxwell denklemlerinde yerine yazıldığında;

$$\varepsilon_0 E_0 \sin\phi_0 - j\frac{\sigma_{pey}}{\omega} E_0 \sin\phi_0 = \beta \left(H_{zx0} + H_{zy0} \right) \tag{3.34}$$

$$\varepsilon_0 E_0 \cos\phi_0 - j\frac{\sigma_{pex}}{\omega} E_0 \sin\phi_0 = \alpha \left(H_{zx0} + H_{zy0} \right) \tag{3.35}$$

$$\mu_0 H_{zx0} - j\frac{\sigma_{pmx}}{\omega} H_{zx0} = \alpha E_0 \cos\phi_0 \tag{3.36}$$

$$\mu_0 H_{zy0} - j\frac{\sigma_{pmy}}{\omega} H_{zy0} = \beta E_0 \cos\phi_0 \tag{3.37}$$

Denklem (3.36) ve (3.37)'de kullanılan manyetik alan terimini ortadan kaldırmak için Denklem (3.34) ve (3.35) kullanıldığında;

$$\varepsilon_0 \mu_0 \left(1 - j\frac{\sigma_{pey}}{\varepsilon_0 \omega} \right) \sin\phi_0 = \beta \left[\frac{\alpha \cos\phi_0}{\left(1 - j\left(\sigma_{pmx} / \mu_0 \omega \right) \right)} + \frac{\beta \sin\phi_0}{\left(1 - j\left(\sigma_{pmy} / \mu_0 \omega \right) \right)} \right] \tag{3.38}$$

$$\varepsilon_0 \mu_0 \left(1 - j\frac{\sigma_{pex}}{\varepsilon_0 \omega} \right) \sin\phi_0 = \alpha \left[\frac{\alpha \cos\phi_0}{\left(1 - j\left(\sigma_{pmx} / \mu_0 \omega \right) \right)} + \frac{\beta \sin\phi_0}{\left(1 - j\left(\sigma_{pmy} / \mu_0 \omega \right) \right)} \right] \tag{3.39}$$

Bilinmeyen α ve β terimleri Denklem (4.38) ve (4.39) elde edilebilir.

$$\alpha = \frac{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}{G}\left(1 - j\frac{\sigma_{pex}}{\varepsilon_0 \omega}\right)\cos\phi_0 \tag{3.40}$$

$$\beta = \frac{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}{G}\left(1 - j\frac{\sigma_{pey}}{\varepsilon_0 \omega}\right)\sin\phi_0 \tag{3.41}$$

burda G;

$$G = \sqrt{w_x \cos^2\phi_0 + w_y \sin^2\phi_0} \tag{3.42}$$

w_x, w_y terimleri;

$$w_x = \frac{1 - j\left(\sigma_{pex} / \varepsilon_0 \omega\right)}{1 - j\left(\sigma_{pmx} / \mu_0 \omega\right)} \tag{3.42a}$$

$$w_y = \frac{1 - j\left(\sigma_{pey} / \varepsilon_0 \omega\right)}{1 - j\left(\sigma_{pmy} / \mu_0 \omega\right)} \tag{3.42b}$$

Genelleştirilmiş alan bileşeni Denklem (3.43) ile ifade edilebilir.

$$\Psi = \Psi_0 e^{j\omega\left(t - \frac{x\cos\phi_0 + y\sin\phi_0}{cG}\right)} e^{-\frac{\sigma_{pex}\cos\phi_0}{\varepsilon_0 cG}x} e^{-\frac{\sigma_{pey}\cos\phi_0}{\varepsilon_0 cG}y} \tag{3.43}$$

Denklem (3.43)'de birinci üstel düzlem dalganın fazını temsil eder, ikinci ve üçüncü üstel ise sırayla x, y yönündeki azalımı temsil eder. α ve β terimleri belirlendiğinden x ve y yönlü bileşenlerine ayrılmış Denklem (3.36) ve (3.37) yerine yazıldığında;

$$H_{zx0} = E_0\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}}\frac{w_x \cos^2\phi_0}{G} \tag{3.44}$$

$$H_{zy0} = E_0\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}}\frac{w_y \sin^2\phi_0}{G} \tag{3.45}$$

Toplam manyetik alan büyüklüğü H_z;

$$H_0 = H_{zx0} + H_{zy0} = E_0 \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} G \tag{3.46}$$

Denklem (3.46) elde edilir. TE modu için PML ortamında dalga empedansı;

$$Z = \frac{H_0}{E_0} = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \frac{1}{G} \tag{3.47}$$

Denklem (3.47) olur. İletkenlik parametreleri aşağıda verilen gibi seçilirse;

$$\frac{\sigma_{pex}}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma_{pmx}}{\mu_0} \tag{3.48a}$$

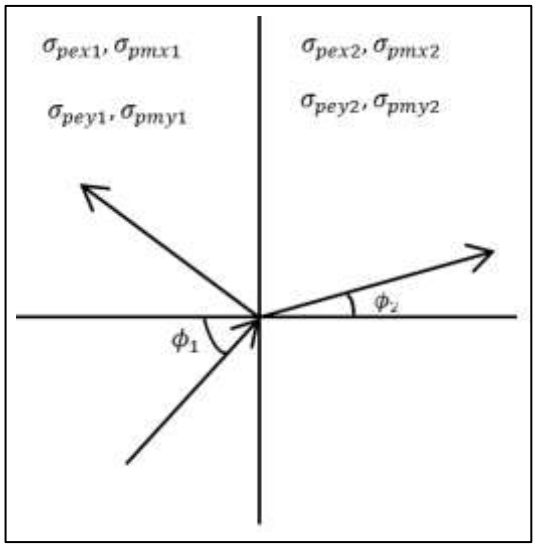
$$\frac{\sigma_{pey}}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma_{pmy}}{\mu_0} \tag{3.48b}$$

Denklem (3.48a) ve (3.48b) sağlandığında TE modu için polarize dalga serbest uzaydan tüm frekanslar için ve Denklem (3.42)'den çıkan bütün açılar için PML sınır bölgesinde yayılacaktır (Elsherbeni ve Demir, 2009).

3.3.2. PML-PML arayüzeyinde PML teorisi

TE modu için PML ara yüzeyinden geçen polarize dalga ara yüzeyin x eksenine dik olduğu Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Kayıplı iki ortam arasındaki bir dalga için yansıma katsayısı aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$r_p = \frac{Z_2 \cos\phi_2 - Z_1 \cos\phi_1}{Z_2 \cos\phi_2 + Z_1 \cos\phi_1} \tag{3.49}$$



Şekil 3.7. İki PML ortamı arasındaki ara yüzeyden düzlem dalga geçişi

Denklem (3.49)'da bulunan Z_1 ve Z_2 terimleri ortamın asıl empedansıdır. Denklem (3.47) uygulandığında yansıma katsayısı;

$$r_p = \frac{G_1 \cos\phi_2 - G_2 \cos\phi_1}{G_1 \cos\phi_2 + G_2 \cos\phi_1} \tag{3.50}$$

Kayıplı ortamda ara yüzeyden yansıyan dalga Snell-Descartes yasasına göre aşağıdaki gibi tanımlanabilir;

$$\left(1 - i\frac{\sigma_{y1}}{\varepsilon_0 \omega}\right)\frac{\sin\phi_1}{G_1} = \left(1 - i\frac{\sigma_{y2}}{\varepsilon_0 \omega}\right)\frac{\sin\phi_2}{G_2} \tag{3.51}$$

Farklı ortamların iletkenliği yani olduğunda; $\sigma_{pey1} = \sigma_{pey2} = \sigma_{pey}$ ve $\sigma_{pmy1} = \sigma_{pmy2} = \sigma_{pmy}$ olduğunda;

$$\frac{\sin\phi_1}{G_1} = \frac{\sin\phi_2}{G_2} \tag{3.52}$$

Eğer $(\sigma_{pex1}, \sigma_{pmx1})$, $(\sigma_{pex2}, \sigma_{pmx2})$, ve $(\sigma_{pex}, \sigma_{pmx})$ Denklem (3.48)'deki koşul sağlanıyorsa $G_1 = G_2 = 1$ olmalıdır. Daha sonra Denklem (3.52)'deki $\phi_1 = \phi_2$ indirgenir ve Denklem (3.39)'daki yansıma katsayısı (r_p) sıfır olur. Bu nedenle teorik olarak yansıma olmaz ve dalga herhangi bir frekansta ve açıyla iletilebilir. İki

ortamın iletkenlik değeri aynı olmasına rağmen ($\sigma_{pex}, \sigma_{pmx}$), Denklem (3.48)'i sağlamıyorsa yansıma katsayısı;

$$r_p = \frac{\sin\phi_1 \cos\phi_2 - \sin\phi_2 \cos\phi_1}{\sin\phi_1 \cos\phi_2 + \sin\phi_2 \cos\phi_1} \tag{3.53}$$

Denklem (3.52), Denklem (3.53)'de yerine yazıldığında; eşleşmeyen PML ortamının yansıma katsayısı Denklem (3.54) ile ifade edilir;

$$r_p = \frac{\sqrt{w_{x1}} - \sqrt{w_{x2}}}{\sqrt{w_{x1}} + \sqrt{w_{x2}}} \tag{3.54}$$

Eşleşmeyen PML ortamında yansıma katsayısı, büyük ölçüde frekansa bağlıdır. Bu yöntem y eksenindeki ara yüz için de uygulanabilir. Bu ara yüzle ilgili Snell-Descartes yasası;

$$\left(1 - i\frac{\sigma_{x1}}{\varepsilon_0 \omega}\right)\frac{\sin\phi_1}{G_1} = \left(1 - i\frac{\sigma_{x2}}{\varepsilon_0 \omega}\right)\frac{\sin\phi_2}{G_2} \tag{3.55}$$

Denklem (3.55) şeklinde yazılabilir. Ortamın iletkenliklerinin aynı olması durumunda, $\sigma_{pex1} = \sigma_{pex2} = \sigma_{pex}$, $\sigma_{pmx1} = \sigma_{pmx1} = \sigma_{pmx}$ Denklem (3.55), Denklem (3.52) gibi yazılabilir. Benzer şekilde ($\sigma_{pex1}, \sigma_{pmx1}$), ($\sigma_{pex2}, \sigma_{pmx2}$), ve ($\sigma_{pex}, \sigma_{pmx}$), Denklem (3.47)'yi sağlıyorsa $G_1 = G_2 = 1$ olur. Denklem (3.54) düzenlenirse $\phi_1 = \phi_2$elde edilir ve arayüzeyde yansıma katsayısı sıfır olur.

Problem alanına uygun PML kalınlığı seçilirse, PML sınırına gelen dalgalar, yasıma olmadan absorbe edilecektir. PML bölgesine uygun iletkenlik değerleri seçilmelidir. PML bölgelerinin birbirleri ile kesiştiği bölgelerde iletkenlik değerlerinin bir arada bulunması gereklidir. Aynı yöntem kullanılarak TM modu için de benzer denklemler yazılabilir (Elsherbeni ve Demir, 2009).

$$\varepsilon_0 \frac{\partial E_{zx}}{\partial t} + \sigma_{pex} E_{zx} = \frac{\partial H_y}{\partial x} \tag{3.56}$$

$$\varepsilon_0 \frac{\partial E_{zy}}{\partial t} + \sigma_{pey} E_{zy} = -\frac{\partial H_y}{\partial y} \tag{3.57}$$

$$\mu_0 \frac{\partial H_x}{\partial t} + \sigma_{pmy} H_x = -\frac{\partial \left(E_{zx} + E_{zy} \right)}{\partial y} \tag{3.58}$$

$$\mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial t} + \sigma_{pmx} H_y = -\frac{\partial \left(E_{zx} + E_{zy} \right)}{\partial x} \tag{3.59}$$

3.3.3. PML kayıp fonksiyonu

PML bölgesine uygun iletkenlik değerleri verildiğinde hesaplama alanın sınırını oluşturabilir. Böylece PML bölgesine çarpan elektromanyetik dalgalar yansıma olmadan PML bölgesinde zayıflayarak ilerleyebilir. İletkenlik dağılımın tek düze olmadığı bir PML ortamında bir yasıma katsayısı vardır. Bu yansıma katsayısı Denklem (3.60) şeklinde yazılabilir.

$$R\left(\phi_0\right) = e^{-2\frac{\sigma \cos\phi_0}{\varepsilon_0 c}\delta} \tag{3.60}$$

burada, σ ortamın iletkenliğidir. Üstel fonksiyon, Denklem (3.43)'de gösterildiği gibi düzlem dalganın azalım faktörü, δ ise PML tabakasının kalınlığını ifade etmektedir. Eğer ϕ_0 ise Denklem (3.60)'da normal orana sahip yansıma katsayısıdır. ϕ_0, $\pi/2$ olduğunda düzlem dalga PML ortamında dik PML sınırları ile zayıflatılır. PML ortamı tek düze iletkenlik değerinden oluştuğunda büyük ölçüde yansımalar gözlenir. Bunu engellemek amacıyla alan ve PML ara geçişinde çok küçük olan iletkenlik değeri PML bölgesinin sonunda maksimum olacak şekilde düzenlenir. İletkenlik dağılımı için iki adet matematiksel fonksiyon bulunmaktadır. Bu fonksiyonlar Denklem (3.61) ve (3.62) gibi yazılabilir.

$$\sigma_{(\rho)} = \sigma_{max} \left(\frac{\rho}{\delta} \right)^{n_{pml}} \tag{3.61}$$

$$\sigma_{max} = -\frac{\left(n_{pml} + 1 \right) \varepsilon_0 c \ln\left(R\left(0\right) \right)}{2 \Delta s N} \tag{3.62}$$

Denklem (3.61) ρ hesaplama alanı ile PML arayüzüne olan uzaklığıdır ve δ ise PML hücre kalınlığıdır. N terimi PML hücre sayısıdır, Δs PML hücresi için kullanılan hücre boyutudur, son olarak $R(0)$ ise yansıma katsayısıdır. Genellikle n_{pml}, 3, 4, 5 gibi değer alırken, $R(0)$, 10^{-8} gibi çok küçük değer alır (Elsherbeni ve Demir, 2009).

3.3.4. PML sınır koşulu ile TM modu denklemleri

Bu bölümde PML sınır koşulu ile birlikte iki boyutlu ortam için sonlu farklar yöntemi kullanılarak TM modu bileşenleri yazılacaktır. Yazılan Matlab programında TM modu kullanıldığından TE modu için Maxwell denklemleri yazılmayacaktır.

TM modu için Şekil 3.6'da alan konumlandırmaları gösterildiği gibi, PML sınır koşulu ile birlikte merkezi farklar yaklaşımı uygulanarak bileşenleri yazılırsa;

$$E_{zx}^{n+1}(i,j) = C_{ezxe}(i,j) \times E_{zx}^{n}(i,j) + C_{ezxhy}(i,j) \times \left(H_{y}^{n+\frac{1}{2}}(i,j) - H_{y}^{n+\frac{1}{2}}(i-1,j) \right) \tag{3.63}$$

Denklem (3.63)'deki C_{ezxe} , C_{ezxhy} terimleri açık şekilde yazılırsa;

$$C_{ezxe}(i,j) = \frac{2\varepsilon_0(i,j) - \Delta t \sigma_{pmx}(i,j)}{2\varepsilon_0(i,j) + \Delta t \sigma_{pmx}(i,j)} \tag{3.63a}$$

$$C_{ezhy}(i,j) = \frac{2\Delta t}{\left(2\varepsilon_0(i,j) + \Delta t \sigma_{pmx}(i,j)\right)\Delta x} \tag{3.63b}$$

$$E_{zy}^{n+1}(i,j) = C_{ezye}(i,j) \times E_{z}^{n}(i,j) + C_{ezyhx}(i,j) \times \left(H_{x}^{n+\frac{1}{2}}(i,j) - H_{x}^{n+\frac{1}{2}}(i-1,j) \right) \tag{3.64}$$

Denklem (3.64)'deki C_{ezye} , C_{ezyhx} terimleri açık şekilde yazılırsa;

$$C_{ezye}(i,j) = \frac{2\varepsilon_0(i,j) - \Delta t \sigma_{pmy}(i,j)}{2\varepsilon_0(i,j) + \Delta t \sigma_{pmy}(i,j)} \tag{3.64a}$$

$$C_{ezyhx}(i,j) = -\frac{2\Delta t}{\left(2\varepsilon_0(i,j) + \Delta t\sigma_{pmy}(i,j)\right)\Delta y} \tag{3.64b}$$

$$H_x^{n+\frac{1}{2}}(i,j) = C_{hxh}(i,j) \times H_x^{n-\frac{1}{2}}(i,j) + C_{hxez}(i,j) \times \left(E_z^n(i,j+1) - E_z^n(i,j)\right) \tag{3.65}$$

Denklem (3.65)'deki C_{hxh}, C_{hxez} terimlerinin açık şeklini yazarsak;

$$C_{hxh}(i,j) = \frac{2\mu_0(i,j) - \Delta t\sigma_{pmy}(i,j)}{2\mu_0(i,j) + \Delta t\sigma_{pmy}(i,j)} \tag{3.65a}$$

$$C_{hxez}(i,j) = -\frac{2\Delta t}{\left(2\mu_0(i,j) + \Delta t\sigma_{pmy}(i,j)\right)\Delta y} \tag{3.65b}$$

$$H_y^{n+\frac{1}{2}}(i,j) = C_{hyh}(i,j) \times H_y^{n-\frac{1}{2}}(i,j) + C_{hyez}(i,j) \times \left(E_z^n(i,j+1) - E_z^n(i,j)\right) \tag{3.66}$$

Denklem (3.66)'daki C_{hyh}, C_{hyez} terimlerinin açık şeklini yazarsak;

$$C_{hyh}(i,j) = \frac{2\mu_0(i,j) - \Delta t\sigma_{pmx}(i,j)}{2\mu_0(i,j) + \Delta t\sigma_{pmx}(i,j)} \tag{3.66a}$$

$$C_{hyez}(i,j) = -\frac{2\Delta t}{\left(2\mu_0(i,j) + \Delta t\sigma_{pmy}(i,j)\right)\Delta x} \tag{3.66b}$$

denklemleri elde edilir (Elsherbeni ve Demir, 2009). TM modu için PML sınır koşulu uygulanmış sentetik radargramlarda hesaplama alanı için Denklem (3.19), (3.20) ve (3.21) kullanılırken, PML bölgesinde Denklem (3.63), (3.64), (3.65) ve (3.66) eşitlikleri kullanılır.

3.4. Kararlık Koşulu ve Dağılma

FDTD yönteminde önemli parametrelerden bir diğeri de kararlılık (stabilite) koşuludur yani zaman aralıklarının seçilmesidir. Zaman aralıklarının büyük seçilmesi kararlılık koşulunu sağlamayacaktır. Çok küçük seçilirse yer radarı için hazırlanan

simülasyon yavaş çalışacaktır. Zaman aralığı (Δt) belirlenirken konum aralıkları (Δx, Δy) ile ilişkili olmalıdır. Maksimum zaman aralığı konum aralıkları ile ilişki yazılırsa;

$$\Delta t_{max} = \frac{6}{7}\sqrt{\frac{\varepsilon_{min}\mu_{min}}{\left(1/\Delta x^2 + 1/\Delta y^2\right)}} \tag{3.67}$$

Denklem (3.67) elde edilir. (Georgakopoulos ve diğ., 2002). Konum aralıklarının gereğinden fazla büyük seçilmesi radargramlarda çözünürlüğü düşürecektir (Kaplanvural, 2011). Konum aralıkları vericiden gönderilen anten frekansı ile ilişkili olmalıdır. Konum aralıkları Denklem (3.68) ile ifade edilir;

$$\lambda_{min} = \frac{c}{f} \tag{3.68}$$

burada c ışık hızı, f anten frekansı, λ_{min} ise dalga boyudur. Konum aralıkları λ_{min} /10 ile λ_{min} /100 arasında olmalıdır.

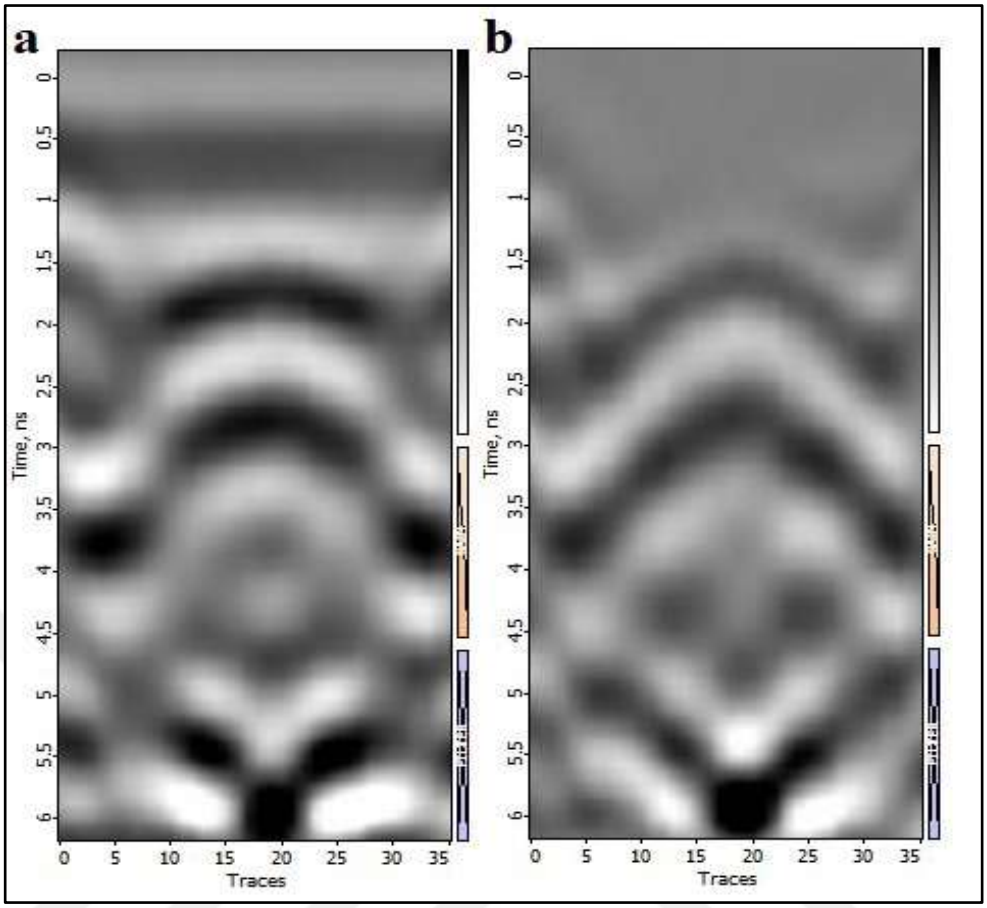
4. YER RADARI VERİLERİNDE KLASİK VERİ İŞLEM VE ANTEN SEÇİMİ

Veri işlem aşamalarının amacı alınan jeofizik verilerinin Sinyal/Gürültü oranını arttırmaktır. Yer radarı verilerine uygulanan veri işlem aşamaları hemen hemen sismik yansıma verilerine uygulanan veri işlem aşamalarına benzemektedir. Yer radarına veri işlem aşamalarının uygulanması yorumu kolaylaştıracaktır. Bu bölümde kısaca yer radarı verilerine uygulanan klasik veri işlem aşamalarından bahsedilecektir. Veri işlem aşamaları, beton blok üzerinde alınan veri için Prism 2.60 programında yapılmıştır (URL-1).

Yer radarı yönteminde önemli konulardan bir tanesi de anten seçimidir. Bunun nedeni istenilen derinliğe inilebilmesi ve istenilen çözünürlükte sinyal alına bilmesi için; her ne kadar anten frekansı önemli olsa da, ortamın dielektrik sabiti, manyetik geçirgenliği, su içeriği vb. parametrelerde göz önünde bulundurulmalıdır. Ortamın iletkenliği yüksek olduğunda yani özdirenci düşük olduğunda elektromanyetik dalga yayılamadan sönümlenecektir.

4.1. İlk Gelen Dalganın Veriden Atılması

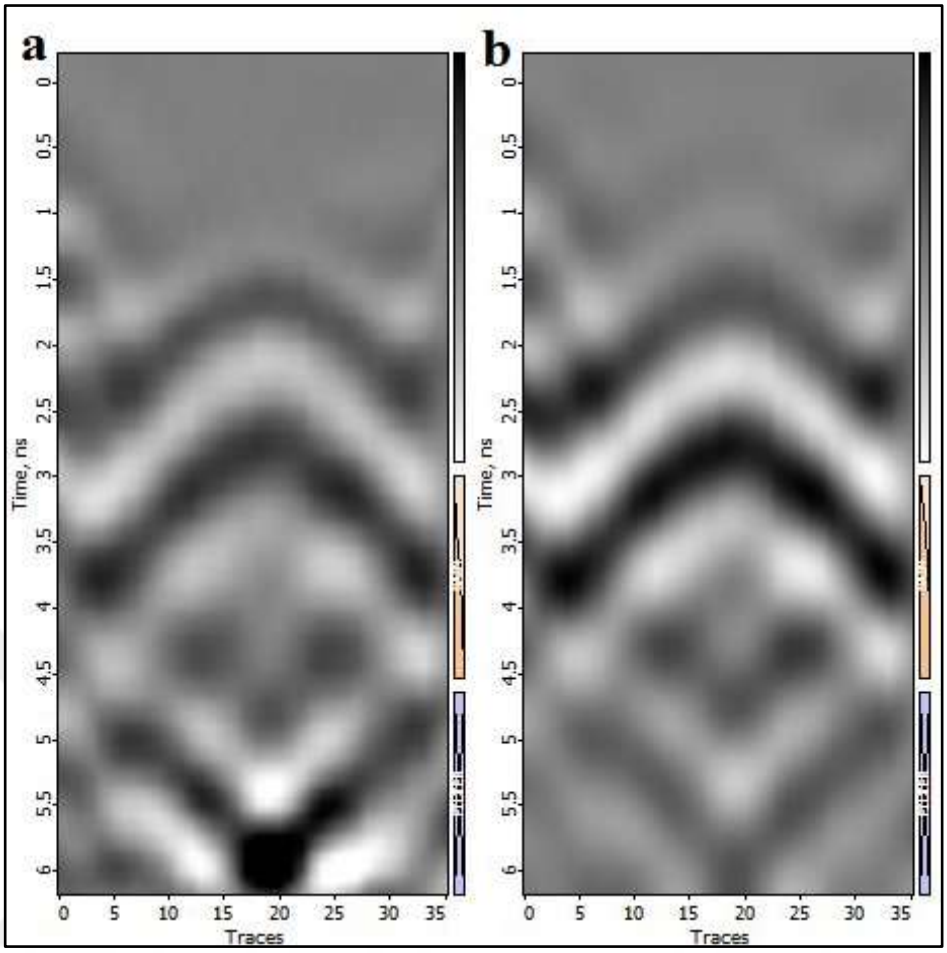
Radargramlarda ilk gelen dalga doğrudan vericiden alıcıya havadan gelmektedir. İkinci gelen dalga ise yerin içinden vericiden doğrudan alıcıya gelen dalgadır. Genel olarak bu tip dalgalar radargramlardan atılırlar.



Şekil 4.1. Beton üzerinde alınan veri a)ham veri b)ilk gelen dalganın veriden atıldıktan sonraki görüntüsü

4.2. Filtreleme

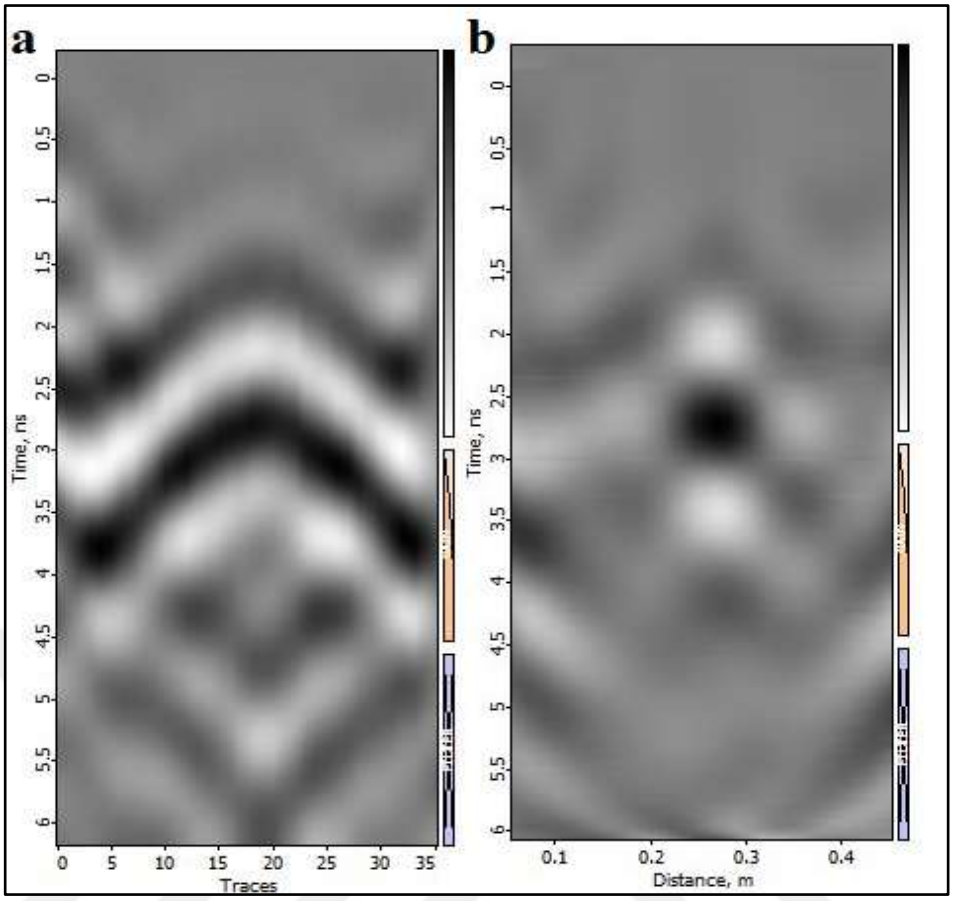
Yer radarı verilerinde cihazdan ya da çevresel etkilerden dolayı istenmeyen frekansta etkiler görünecektir. Bu etkilerin ortadan kaldırılması amacıyla yer radarı verilerine yüksek frekansları geçiren yüksek geçişli filtreler, alçak frekansları geçiren alçak geçişli filtreler ve belli bir frekans aralığını geçiren bant geçişli filtreleme teknikleri kullanılabilir (Kaplanvural, 2011). Beton blok üzerinde alınan yer radarı verisine bant geçişli filtre uygulanmıştır (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Beton üzerinde alınan veri a) ilk gelen dalganın veriden atıldıktan sonraki görüntüsü b) veriye bant geçişli filtre uygulandıktan sonraki görüntüsü

4.3. Göç (Migrasyon)

Kayıt edilen yer radarı verilerinin, yansıma noktalarına göre yeniden düzenlenmesi gerekir. Alınan yer radarı verilerinde yansımanın nereden geldiği hakkında doğrudan bilgi yoktur ve bu nedenle elektromanyetik dalganın nereden yansıdığının belirlene bilmesi için göç işlemi yapılmalıdır (Kaplanvural, 2011).



Şekil 4.3. Beton üzerinde alınan veri a) veriye bant geçişli filtre uygulandıktan sonraki görüntüsü b) veriye göç işlemi uygulandıktan sonraki görüntüsü

Bu veri işlem aşamaları sırasıyla diğer verilere de uygulanmıştır. Veri işlem ile elde edilen bağıl dielektrik sabiti ve tabaka kalınlığı gibi parametreler ters çözüm ile elde edilen parametreler ile karşılaştırılmıştır.

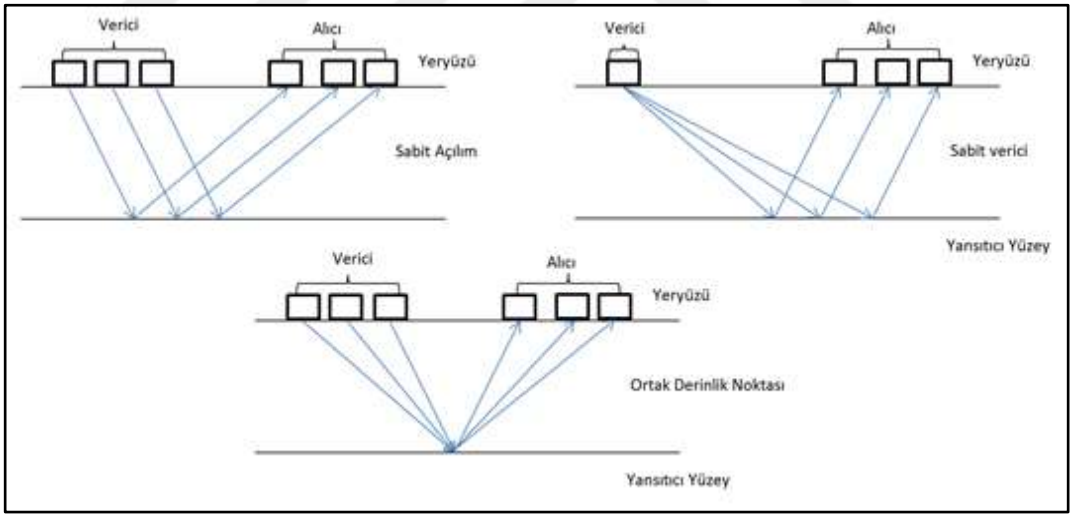
4.4. Anten Seçimi ve Anten Dizilimleri

Tablo 4.1'de gösterilen derinlikler maksimum derinliklerdir ve anten frekansı ile derinlik arasında doğrusal ilişki yoktur. Fakat tabloda gösterilen anten frekansı ile derinlik ilişkisi kabaca fikir vermektedir.

Tablo 4.1. Anten frekansına göre maksimum araştırma derinliği (Mala Geoscience, 2003)

Anten Frekansı (MHz)	Maksimum derinlik (m)
10	60
25	50
50	40
100	25
200	12
500	6
1000	1.5
1600	1

Yer radarı yönteminde kullanım açısından iki farklı anten bulunmaktadır bunlar kapalı antenler ve açık antenlerdir. Yer radarı yönteminde kullanılan anten açık anten ise farklı anten dizilimleri yapılabilir. Genel olarak üç farklı anten dizilimi bulunmaktadır. Bunlardan ilki ve en sık kullanılanı sabit açılım olanıdır, ikincisi ortak derinlik noktası dizilimidir, üçüncüsü sabit kaynak dizimi, bu dizilimde verici antenin sabit olduğu alıcı antenin ilerletildiği dizilimidir.



Şekil 4.1 Yer radarında kullanılan anten dizilimleri

Bu çalışmada yazılan 1B ve 2B programlarda sabit açılım kullanılmıştır.

5. GLOBAL TERS ÇÖZÜM

Jeofizik mühendisliğinde kullanılan ters çözüm yöntemleri yerel (türev tabanlı) ve global yöntemler olmak üzere iki ana başlıkta toplanabilir. Global yöntemler benzetimli tavlama (SA), parçacık sürü optimizasyonu (PSO), genetik algoritma (GA) gibi yöntemlerdir.

Benzetimli tavlama (SA) yöntemi, kolay uygulanabilir olduğundan, jeofizik mühendisliğinde bir çok alanda kullanılmaktadır. Fakat SA yöntemi yeteri kadar hızlı olmadığından farklı modifikasyonlar geliştirilmiştir. Bunlardan bir tanesi, Rosen ve Ingber (1992) tarafından geliştirilen çok hızlı benzetimli tavlama (VFSA) yöntemidir.

Bu tez çalışmasında, hem uygulanmasının kolay olması, hem diğer global optimizasyon yöntemlerinden daha başarılı sonuçlar vermesi ve sonuçları daha hızlı tahmin edebilmesi nedeni ile VFSA optimizasyon yöntemi kullanılmıştır.

5.1. Çok Hızlı Benzetimli Tavlama (VFSA) Optimizasyon Yöntemi

Optimizasyon problemlerine benzetimli tavlama yöntemi ilk olarak 1983 yılında uygulanmıştır (Kirkpatrick ve diğ., 1983). VFSA, global optimizasyon problemleri için rastgele arama yöntemidir. Bir metal, yüksek enerjide iken çok yavaş şekilde soğutularak, metalin kusurlarının ortadan kaldırılmasına dayanır. SA süreci, sıcaklığın ve soğuma oranının dikkatli bir şekilde kontrolü ile sağlanır (Yang, 2010).

Eğer soğutma işlemi çok hızlı yapılırsa metalin kristal yapısında düzensizliklere neden olabilir (Yang ve dig., 2005). Türev tabanlı yöntemlerin yerel en küçük değere takılması dezavantajının aksine VFSA yönteminin asıl avantajı yerel yerel en küçük değerden kurtulabilme kabiliyetinin olmasıdır. Eğer SA sürecinde, yeteri kadar rastgele arama ile birlikte soğutma işlemi yeteri kadar yavaş yapılırsa optimizasyon yönteminin global en küçük değere yaklaştığı kanıtlanmıştır.

VFSA yönteminin temel fikri, hedef fonksiyonun minimuma yaklaşması için geliştirilen değerleri kabul etmesinin yanı sıra ideal olmayan bazı değişiklikleri de tutmasına dayanan bir Markov zinciri açısından bir rastgele arama kullanır. Markov zinciri, tahmin edilen rastgele değerlerin bir önceki değerden bağımsız olması anlamına gelmektedir. Bu nedenle bir minimizasyon probleminde, hedef fonksiyonunun değerini düşüren herhangi bir iyi değişim kabul edilecektir ancak, bazı değişimler hedef fonksiyonun değerini artırsa dahi olasılık tarafından kabul edilecektir. Değişim olasılığı (p) olarak adlandırılan bu olasılık Denklem (5.1) ile ifade edilir;

$$p = e^{-\frac{\Delta E}{k_B T_i}} \tag{5.1}$$

Burada, k_B Boltzmann sabitidir ve genellikle $k_B = 1$ olarak kullanılır. T_i, benzetimli tavlama süreci için sıcaklık kontrolüdür. ΔE ise enerji seviyesi değişimidir (Yang, 2010). Bu değişim olasılığı fizikte Boltzmann dağılımına dayanmaktadır.

ΔE'nin hedef fonksiyonu ile değiştirmenin basit yolu,

$$\Delta E = \gamma \Delta f \tag{5.2}$$

burada γ bir sabit ve Δf hedef fonksiyonudur. Genellikle $\gamma = 1$ olarak alınır bu durumda değişim olasılığı (p), Denklem (5.3) ile verilir;

$$p(\Delta f, T) = e^{-\frac{\Delta f}{T}} \tag{5.3}$$

Değişimin kabul edilip edilmeyeceği belirlenen bir eşik değeri kıyaslanması ile olur. r, rasgele üretilen eşik değeri olmak üzere,

$$p = e^{-\frac{\Delta f}{T}} > r \tag{5.4}$$

değişimi kabul edilir.

Doğru başlangıç sıcaklığının seçimi çok önemlidir. Eğer başlangıç sıcaklığı (T_0) çok yüksek seçilirse sistem yüksek enerjili olacağından ve global minimuma yaklaşması zorlaşacaktır. Eğer başlangıç sıcaklığı çok düşük seçilirse (T_0) sistem düşük enerjili olacak ve yerel en küçük değere sıkışacaktır.

Bir N X M boyutlu uzayda, her bir model parametresi farklı bir sonlu aralığa sahiptir ve bu sonlu aralığa sahip her bir parametre enerji fonksiyonunu farklı etkiler. Bu nedenle sıcaklığın farklı şekilde bozunmasına izin verilmelidir (Sen ve Stoffa, 2013).

N X M boyutlu problemde parametrelerin tahmini için SA yöntemindeki gibi Gaussian dağılımı kullanırsa çok yavaş bir soğutmaya ihtiyaç duyulacaktır. VFSA yönteminde yavaş soğutmadan kurtulmak amacı ile Cauchy dağılımı kullanılmıştır. Parametre tahmini aşağıdaki Denklem (5.5) ile verilir;

$$m_i^{min} \le m_i^k \le m_i^{mak} \tag{5.5}$$

burada, m_i^{min} model parametresinin en küçük değeri, m_i^{mak} model parametresinin en büyük değeri, m_i^k ise, tahmin edilen parametre ve k yineleme sayısıdır. Bir sonraki yineleme için yani $k+1$ inci yinelemede tahmin edilen değer,

$$m_i^{k+1} = m_i^k + y_i(m_i^{mak} - m_i^{min}) \tag{5.6}$$

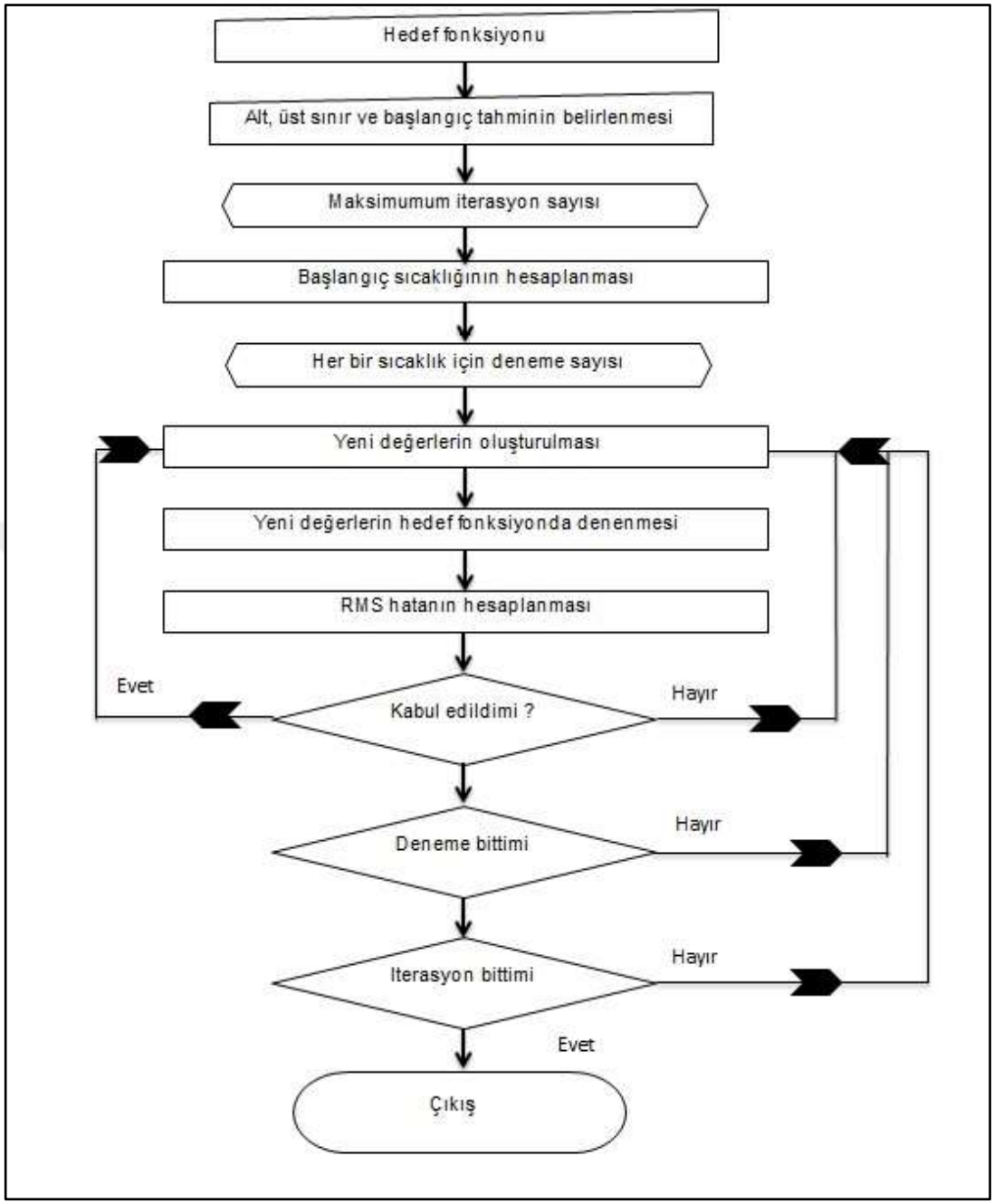
burada, m_i^{k+1}, bir sonraki iterasyondaki model parametresi, sgn terimi işaret fonksiyonu ve -1 ile 1 arasında değişen dağılımdır ve aşağıdaki Eşitlik (5.7) ile hesaplanabilir.

$$y_i = \mathrm{sgn}(u_i - 0.5)T_i\left[\left(1+\frac{1}{T_i}\right)^{|2u_i-1|} - 1\right] \tag{5.7}$$

burada, u_i rasgele üretilen ve 0 ile 1 arasında değişen bir sayı, T_i ise hesaplanan sıcaklıktır. T_i sıcaklık terimi Denklem (5.8) ile hesaplanır.

$$T_i(k) = T_0 \exp(-c_i k^{1/NM}) \tag{5.8}$$

burada, $\boldsymbol{c_i}$ soğutma kontrolü için kullanılan katsayı ve farklı problemler için değiştirilebilir (Sen ve Stoffa, 2013). Model çalışmalarında bu katsayı 1 olarak kullanılmıştır.



Şekil 5.1. VFSA programının akış şeması

Ek olarak, her sıcaklık için hedef fonksiyonunda denemeler yapılmalıdır. Eğer her sıcaklık için yapılan denemeler çok fazlaysa sistem yavaş çalışacak ve zaman alacaktır. Eğer yapılan denemeler çok az ise sistem dengede olmayacak ve global minimuma yaklaşamayacaktır.

6. MODEL ÇALIŞMALARI

Bu bölümde yer altında olası jeolojik yapılar ve olası yapılar için sentetik veriler hazırlanmıştır. Yer altındaki olası yapıların radargamlar üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sentetik veriler hazırlanırken Matlab programlama dili ile geliştirilen bir boyutlu ve iki boyutlu yer radarı düz çözümü programları kullanılmıştır. Ayrıca geliştirilen yer radarı düz çözüm programları Irving ve Knight (2005) tarafından geliştirilen Matlab programı ile kıyaslanmıştır.

Matlab programları yazılırken kaynak türü olarak Ricker dalgacığı kullanılmıştır. Yer altında manyetik geçirgenlik (μ) ve iletkenlik (σ) değerleri çok fazla değişmediğinden bu değerler için değişiklik yapılmamıştır. Model parametrelerinde değişken olarak dielektrik sabiti (ε) kullanılmıştır. Bir boyutlu ve iki boyutlu Matlab programlarında sınır koşulu olarak PML uygulanmıştır.

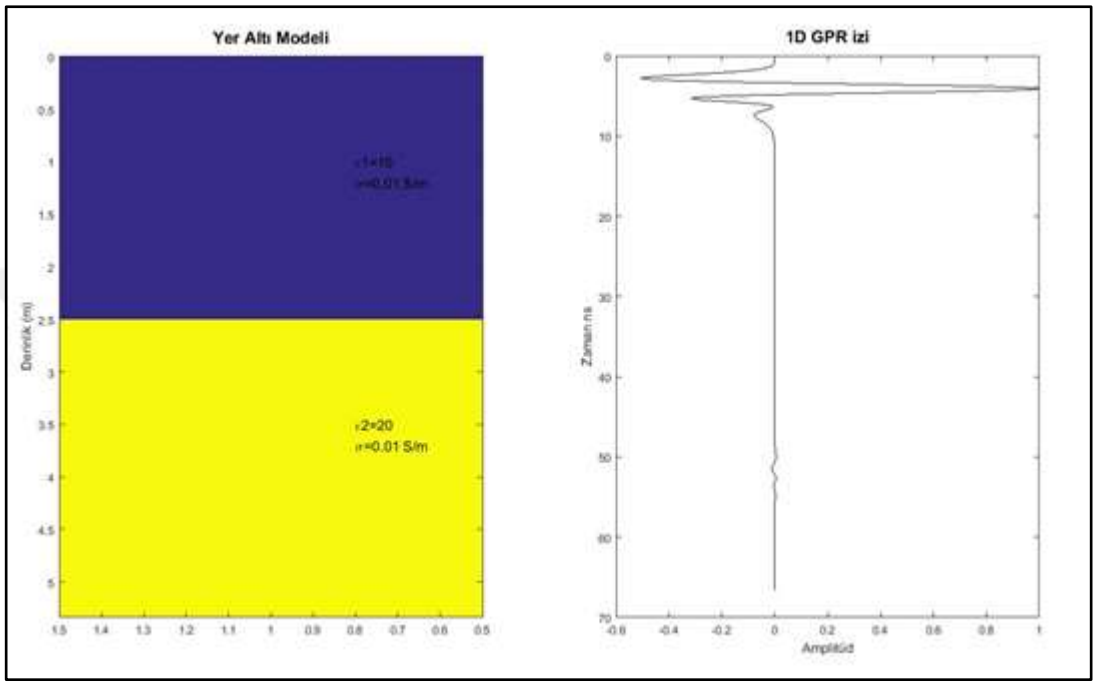
Daha sonra bir boyutlu ortamda sentetik veriler için, VFSA optimizasyon yöntemi ile sentetik radargramların ters çözümü yapılmıştır. Son olarak beton blok üzerinde, kum havuzu üzerinde ve Zonguldak İl'inde alınan gerçek yer radarı ölçülerinin VFSA optimizasyon yöntemi ile ters çözümü yapılmıştır.

6.1. Bir Boyutlu Ortamda Düz Çözüm

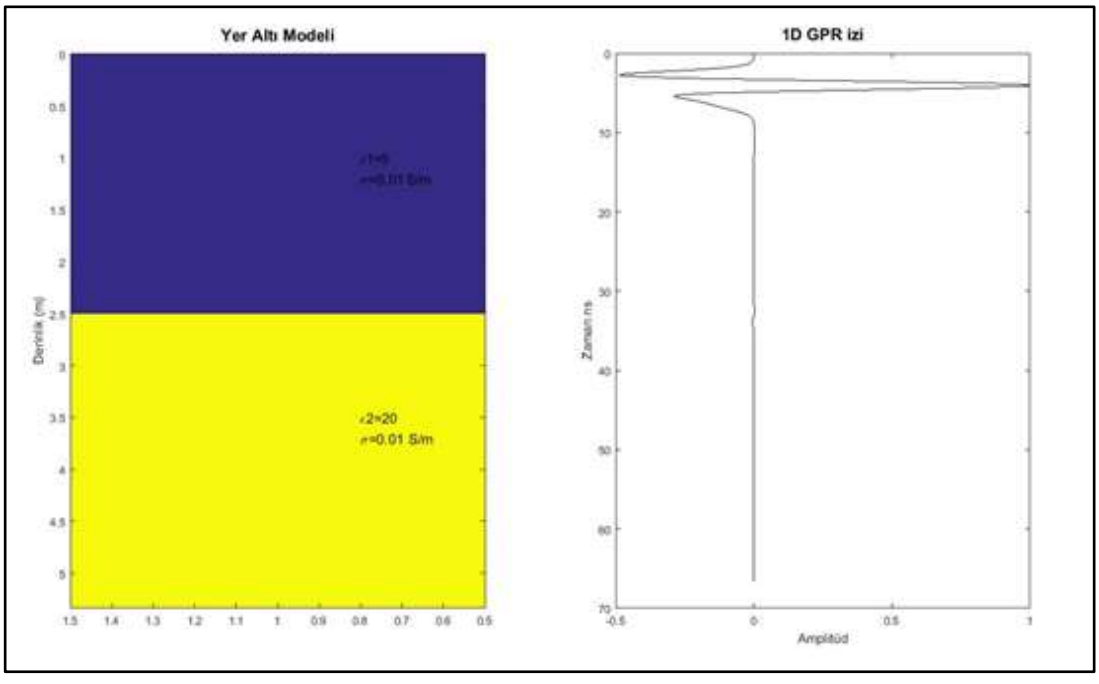
Bir boyutlu iki tabakalı ortam için tabaka kalınlığı 2,5 m seçilmiştir. Her iki tabaka için iletkenlik σ=0,01 S/m olarak alınmıştır. Bağıl dielektrik sabiti birinci tabaka için ε_1=10, ikinci tabaka için ε_2=20 seçilmiştir. Anten frekansı 300 MHz'dir, Δz=0,013 m seçilmiş ve toplam hücre sayısı 400'dür, ayrıca Δt=0,04 ns seçilmiştir. PML hücre sayısı 20 ve kullanılan dalgacık türü Ricker'dir (Şekil 6.1).

İkinci bir boyutlu modelde ise sadece birinci tabakanın bağıl dielektrik sabiti değiştirilmiştir ve ε_1 =5 olarak alınmıştır (Şekil 6.2).

İki sentetik bir boyutlu model karşılaştırıldığında birinci modelde tabaka sınır izi yaklaşık olarak 50 ns iken, ikinci modelde 32 ns'dir. Bunun nedeni ortamın dielektrik sabiti ile elektromanyetik dalga hızının ters orantılı olmasından kaynaklanmaktadır. Yani dielektrik sabiti (ε) büyükdükçe elektromanyetik dalga hızı yavaşlamaktadır.

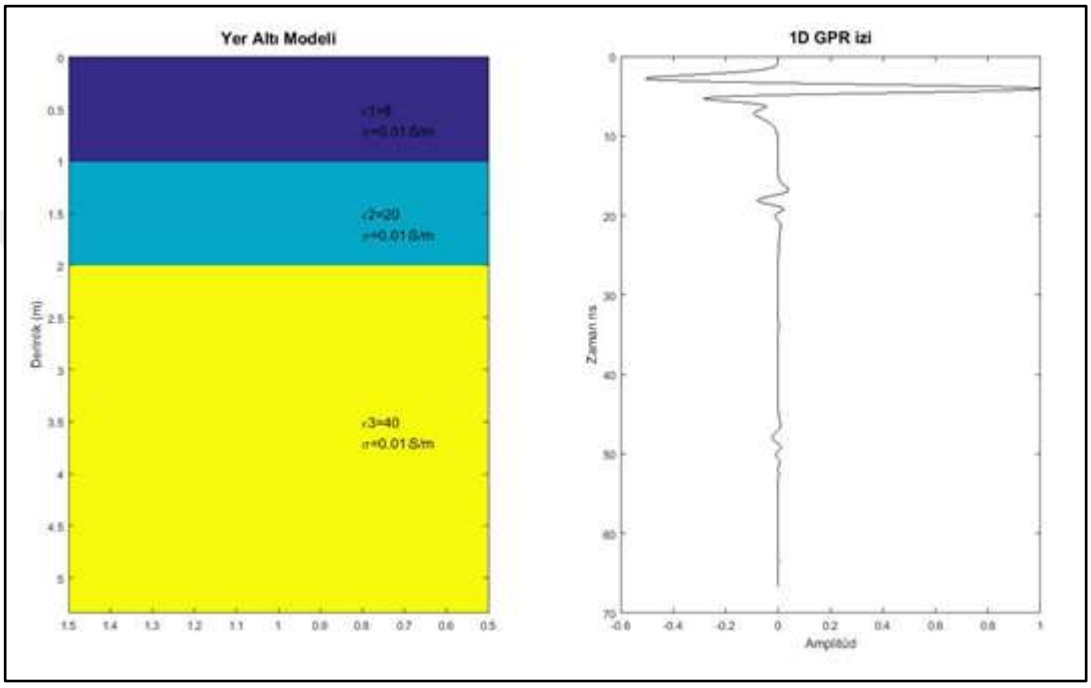


Şekil 6.1. İki tabakalı ortamda bir boyutlu sentetik GPR izi



Şekil 6.2. İki tabakalı ortamda bir boyutlu sentetik GPR izi

Üçüncü modelde ise ortam üç tabakalı olarak seçilmiştir. Birinci tabakanın kalınlığı 1 m ikinci tabakanın kalınlığı 1 m'dir. Bütün tabakların iletkenlik değeri σ = 0,01 S/m seçilmiştir. Bağıl dielektrik sabiti birinci tabaka için ε_1=8, ikinci tabaka için ε_2=20 ve üçüncü tabaka için ε_3=40 seçilmiştir. Anten frekansı 300 MHz, Δz ve Δt sırayla 0,013 m, 0,04 ns olarak belirlenmiştir. Hücre sayısı 400 PML hücre sayısı 20'dir.

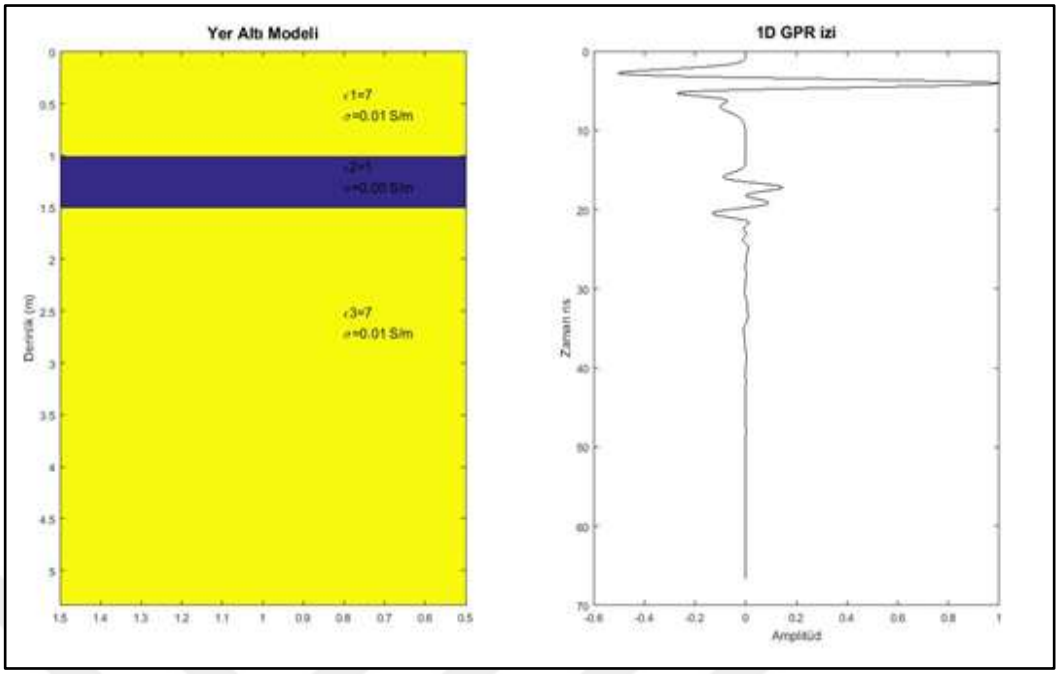


Şekil 6.3. Üç tabakalı ortamda bir boyutlu sentetik GPR izi

Üç tabakalı ortamda bir boyutlu izde ikinci tabakanın radargram izi yaklaşık olarak 15 ns'de, ikinci tabakanın izi yaklaşık olarak 45 ns olduğu görülmektedir.

Kireçtaşlarından oluşan bölgelerde yer altı boşlukları olabilir, böyle bölgelerde yer altının bir boyutlu modellemesi yapıldığında, kireçtaşının iletkenlik değeri σ=0,01 S/m, boşluğun iletkenliği σ=0,0 S/m alınmıştır. Kireçtaşının bağıl dielektrik sabiti ε=7, havanın ise ε=1 olarak alınmıştır. Diğer parametreler önceki modellerde kullanılan değerlerin aynısıdır.

Boşluğun modellendiği sentetik GPR izine bakıldığında dalga formunda bozulmalar olduğu görülmektedir. Üst sınır yaklaşık olarak 13 ns'de alt sınır ise 21 ns'dir. Elektromanyetik dalgalar havada saçılmalara ve ardışık yansımalara neden olmaktadır.



Şekil 6.4. Kireçtaşlarında olası boşluk modelinin bir boyutlu sentetik GPR izi

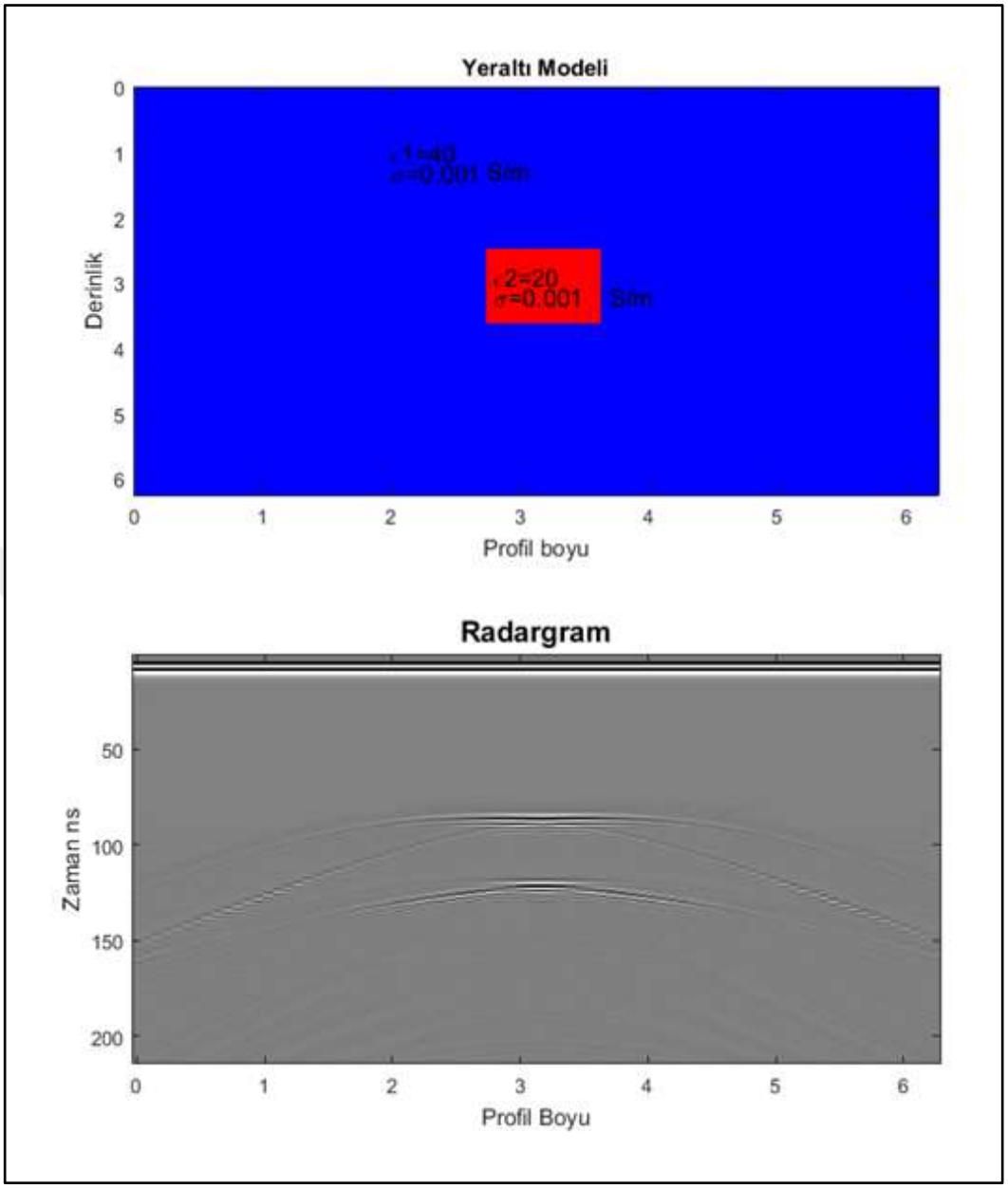
6.2. İki Boyutlu Ortamda Düz Çözüm

Bu bölümde yer altında bulunması muhtemel yapı ve jeolojik yapıların 2 boyutlu modellemesi yapılacaktır.

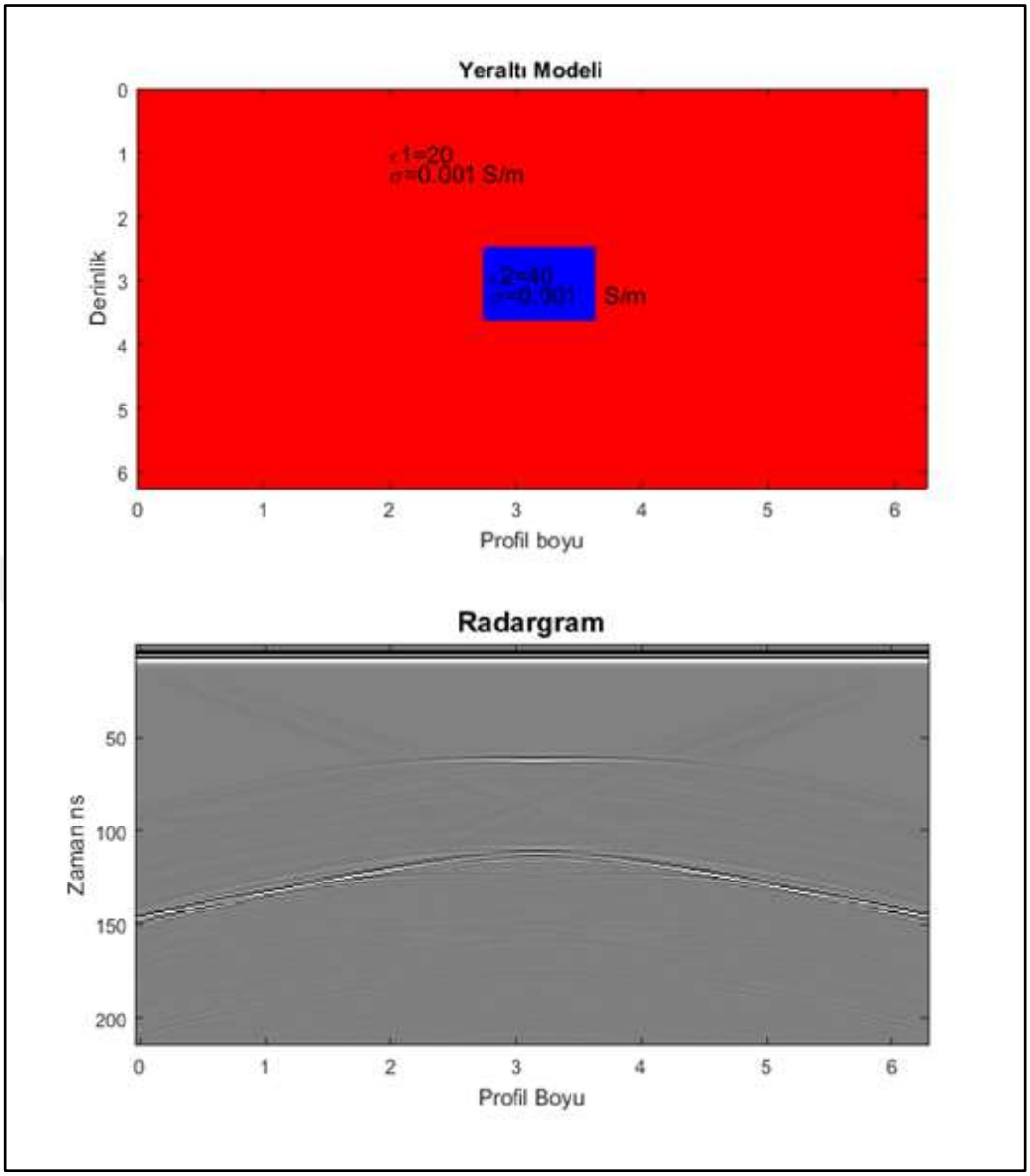
İlk üç model için Δx ve Δz aralıkları 0,0125 m, Δt aralığı ise 0,01 ns olarak seçilmiştir. Hücre sayısı x ve z yönünde 500 ve anten frekansı 300 MHz olarak seçilmiştir. PML hücre sayısı 50 seçilmiştir.

Birinci modelde yer altında kare şeklinde bir yapı olduğu düşünülerek hazırlanan modelde ortamın bağıl dielektrik sabiti ε=40, kare şeklindeki yapının bağıl dielektrik sabiti ε =20 olarak seçilmiştir. Ortamın iletkenliği ve kare şeklindeki yapının iletkenliği, σ =0,001 S/m seçilmiştir (Şekil 6.5).

İkinci modelde yine yer altında kare şeklinde bir yapı olduğu varsayılarak modellenmiştir fakat kare şeklindeki yapının bağıl dielektrik sabiti ile ortamın bağıl dielektrik sabitinin yeri değiştirilmiştir. Diğer bütün parametreler aynı bırakılmıştır, ortamın bağıl dieletrik sabiti ile modelin bağıl dielektrik sabiti arasındaki ilişkinin radargramlar üzerine etkisi incelenmiştir (Şekil 6.6).



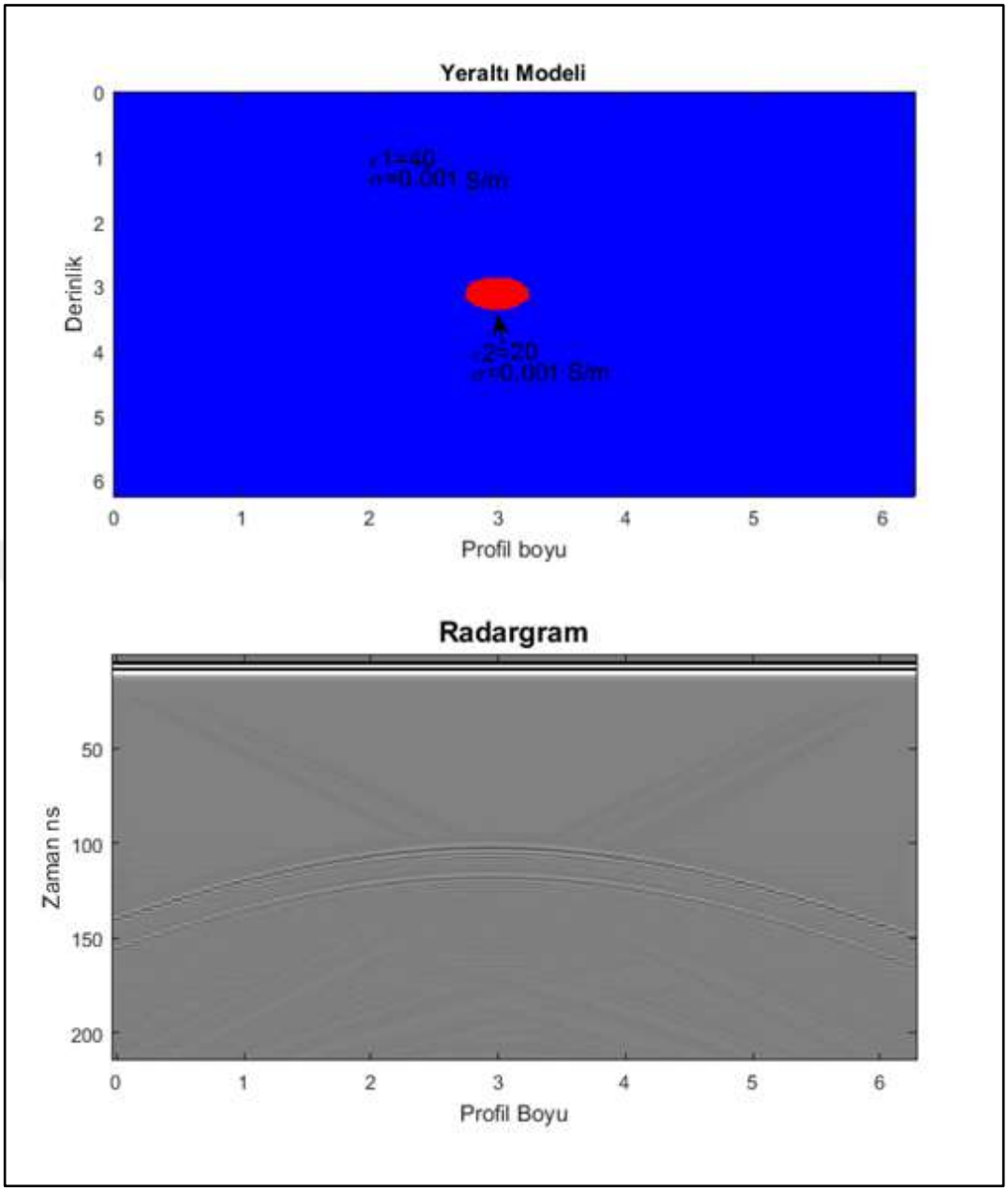
Şekil 6.5. Yer altında kare şeklindeki yapı modeli ve iki boyutlu GPR izi



Şekil 6.6. Yer altında kare şeklindeki yapı modeli ve iki boyutlu GPR izi

Bir boyutlu ortamdan hatırlanacağı üzere ortamın dielektrik sabitinin büyük olması elektromanyetik dalga hızını yavaşlatmaktaydı. İki model kıyaslandığında, birinci sentetik radargramda üst sınır yaklaşık olarak 80 ns iken, ikinci sentetik radargramda yaklaşık olarak 60 ns civarındadır.

Üçüncü model de ise daire şeklinde bir yapı modellenmiştir (Şekil 6.7). Daire şeklindeki yapının bağıl dielektrik sabiti ε=20, ortamın bağıl dielektrik sabiti ε=40 seçilmiştir, ortamın ve daire şeklindeki yapının iletkenliği σ =0,001 olarak seçilmiştir.

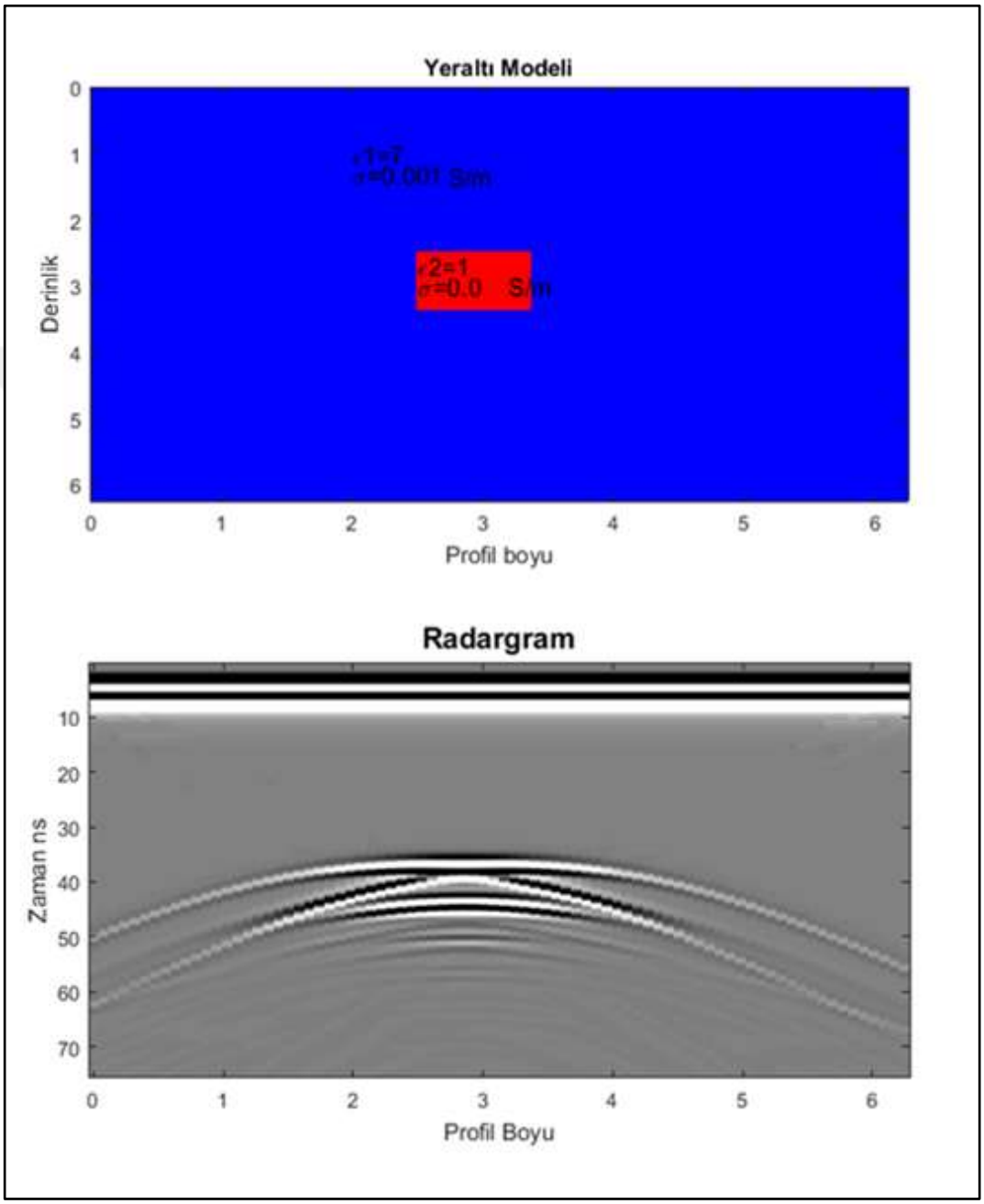


Şekil 6.7. Yer altında daire şeklindeki yapı modeli ve iki boyutlu GPR izi

Daire şeklindeki modelin sentetik radargramı ile kare şeklindeki model kıyaslandığında daire şeklindeki radargramın üst sınırının daha oval olduğu görülmektedir.

Dördüncü modelde kare şeklinde boşluk modellenmiştir (Şekil 6.8). Modelleme yapılırken ortamın kireçtaşlarından oluştuğu düşünülmüştür. Bu nedenle ortamın bağıl dielektrik sabiti ε=7, kare şeklindeki boşluğun bağıl dieletrik sabiti ise ε =1 olarak seçilmiştir. Ortamın elektrik iletkenliği σ=0,001 S/m, boşluğun iletkenliği σ =0,0 S/m seçilmiştir.

Δx ve Δz aralıkları 0,0125 m, Δt aralığı ise 0,025 ns olarak seçilmiştir. Hücre sayısı x ve z yönünde 500 ve anten frekansı 300 MHz olarak seçilmiştir. PML hücre sayısı 50'dir.

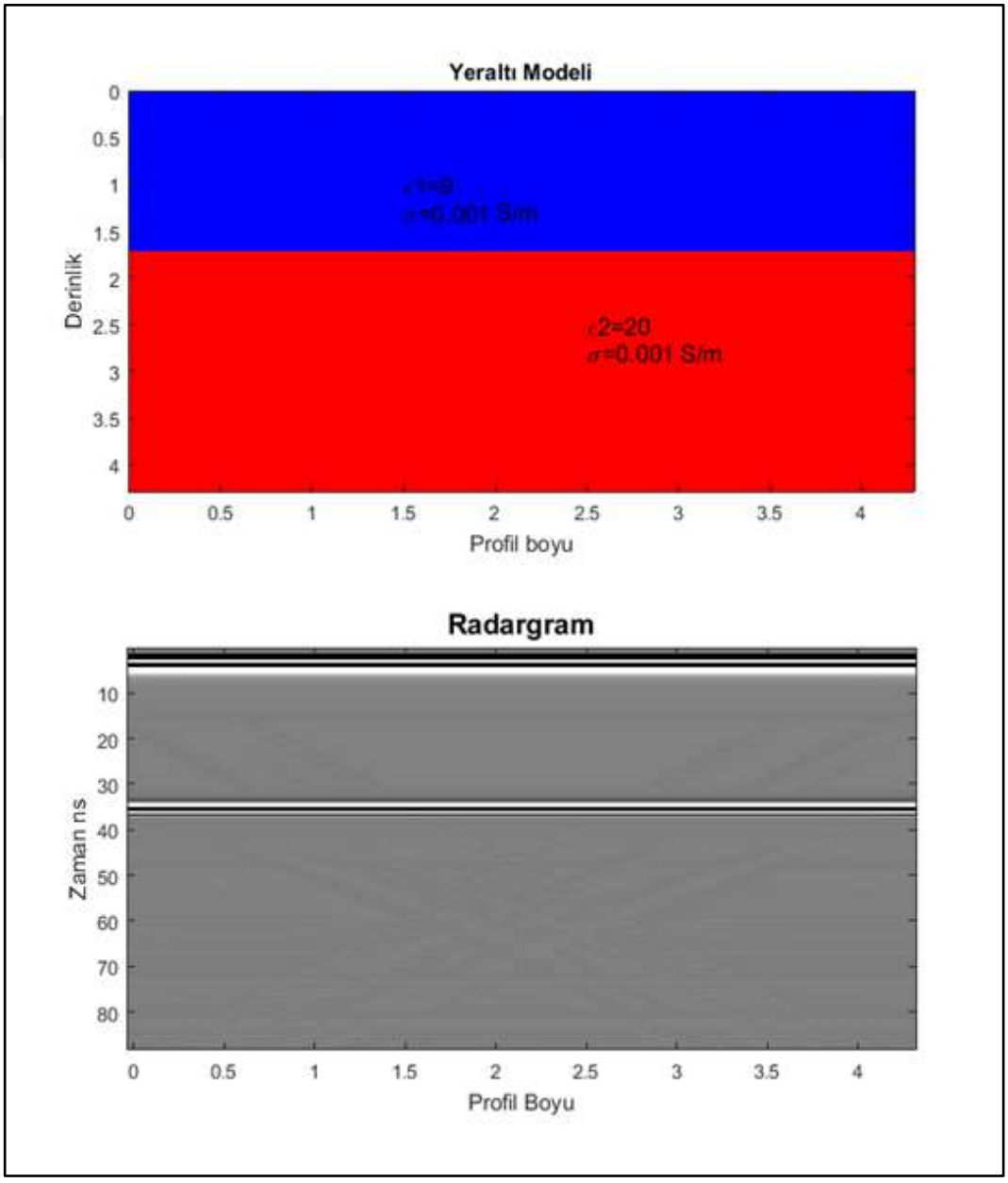


Şekil 6.8. Yer altında kare şeklindeki boşluk modeli ve iki boyutlu GPR izi

Boşluğun üst sınırı yaklaşık olarak 33 ns'de, alt sınır ise yaklaşık olarak 45 ns'de görülmektedir. Kare şeklindeki boşluğun izi diğer kare şeklindeki yapılardan daha belirgin ve saçılmaların daha fazla olduğu görülmektedir.

Şekil 6.9'daki modelde yatay iki tabakalı ortam modellenmiştir. İlk tabakanın bağıl dielektrik sabiti ε_1=9, ikinci tabakanın bağıl dielektrik sabiti ε_2=20 seçilmiştir, ayrıca her iki ortam için iletkenlik değeri σ=0,001 seçilmiştir. Tabaka derinliği yaklaşık 1,7 m toplam derinlik ise 4,28 m'dir.

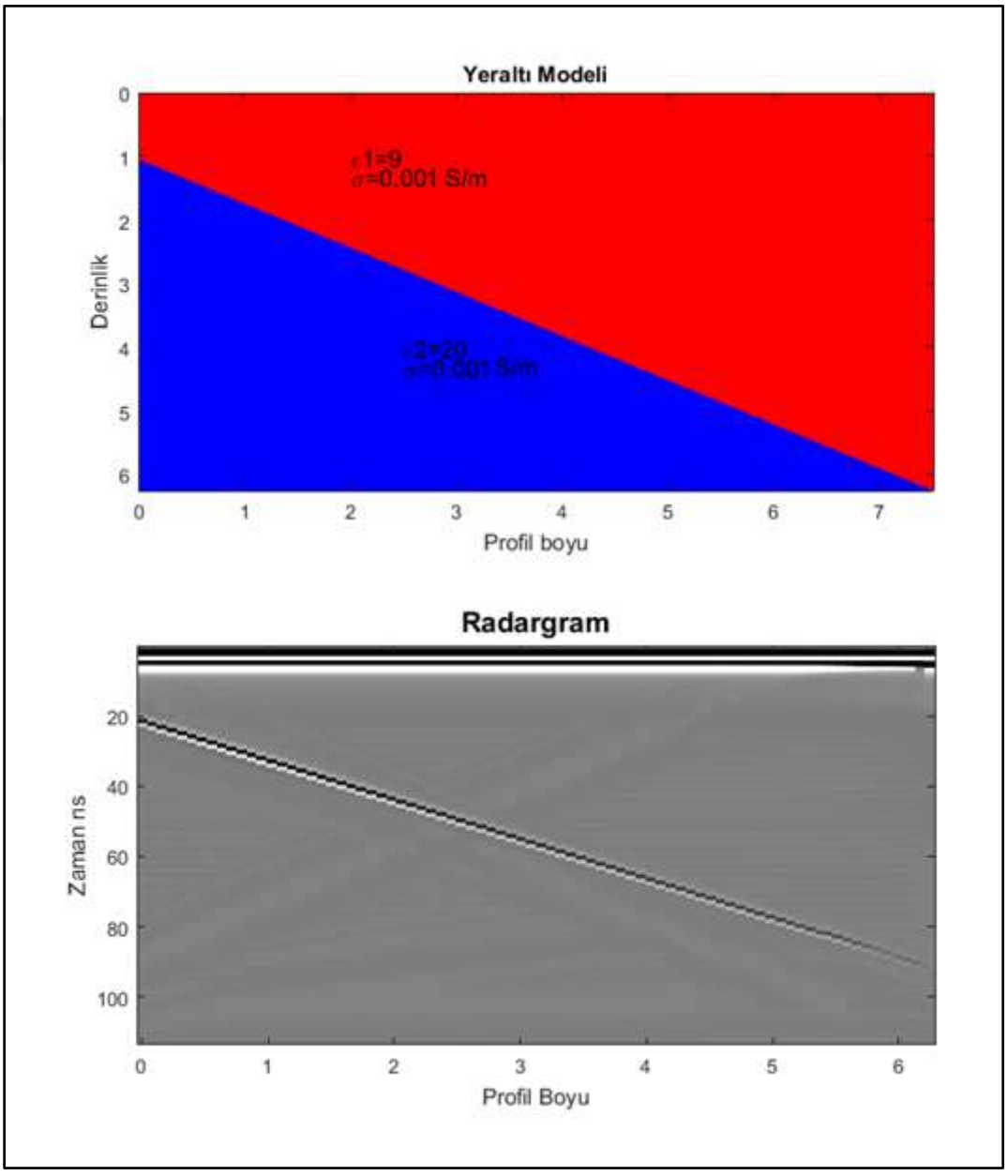
Δx ve Δz aralıkları 0,0086 cm, Δt aralığı ise 0,05 ns olarak seçilmiştir. Hücre sayısı x ve z yönünde 500 ve anten frekansı 500 MHz olarak seçilmiştir. PML hücre sayısı 75 seçilmiştir.



Şekil 6.9. Yer altındaki yatay tabaka modeli ve iki boyutlu GPR izi

Şekil 6.10'da eğimli tabaka modellenmiştir. İlk tabakanın bağıl dielektrik sabiti ε=9, ikinci tabakanın bağıl dielektrik sabiti ε=20 seçilmiştir ayrıca her iki ortam için iletkenlik değeri σ=0,001 S/m seçilmiştir. Anten frekansı 300 MHz, PML hücre sayısı 100 olarak seçilmiştir. Eğimli tabakanın başlangıcı 1,5 metredir ve toplam derinlik 6,2 metredir.

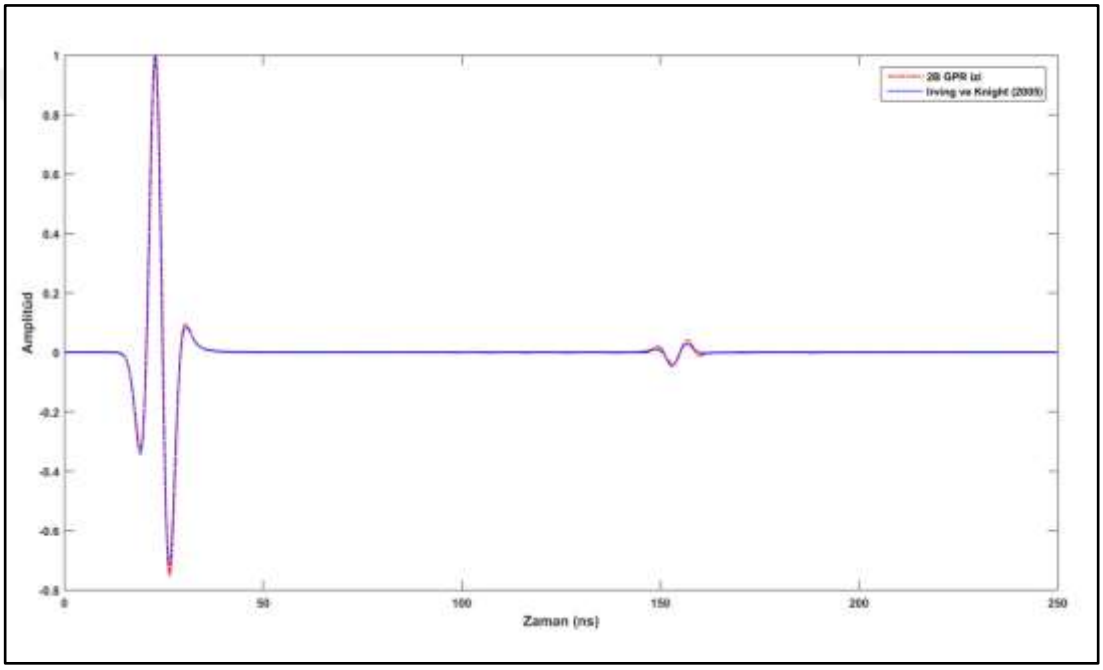
Δx ve Δz aralıkları 0,0125 m, Δt aralığı ise 0,25 s olarak seçilmiştir. Hücre sayısı x yönünde 600 ve z yönünde ise 500 seçilmiştir.



Şekil 6.10. Yer altındaki yatay tabaka modeli ve iki boyutlu GPR izi

Şekil 6.11'de ise geliştirilen iki boyutlu yer radarı düz çözüm programı, Irving ve Knight (2005) tarafından geliştirilen iki boyutlu program ile karşılaştırılmıştır. Kaynak dalgacığı olarak her iki programda Ricker dalgacığı kullanılmıştır. Irving ve Knight (2005) tarafından geliştirilen programda CPML sınır koşulu uygulanmıştır (Irving ve Knight, 2005).

Modelde yatay iki tabakalı ortam modellenmiştir, konum aralıkları Δx ve Δz 0,033 m zaman aralığı ise Δt = 0,26 ns olarak seçilmiştir. Toplam zaman adım sayısı 937'dır. Sınır koşulları iki program için 10 hücre seçilmiştir ve anten frekansı 100 MHz'dir.



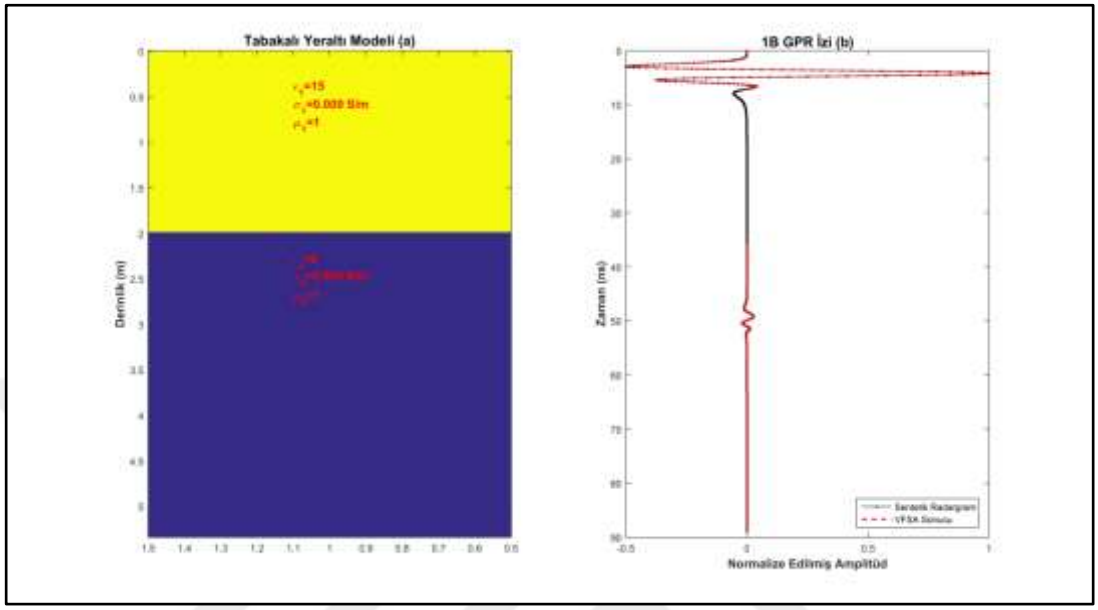
Şekil 6.11. Geliştirilen iki boyutlu Matlab yer radarı düz çözümü programının Irving ve Knight (2005) tarafından geliştirilen iki boyutlu yer radarı düz çözümü programı ile karşılaştırılması

Sentetik radargram izlerine bakıldığında iki programda da tabaka sınırının yaklaşık 150 ns'de olduğu görülmektedir ve herhangi bir saçılma görülmemektedir. İki boyutlu program izleri üst üste çakışmıştır.

6.3. Bir Boyutlu Ortamda Sentetik Radargramların Ters Çözümü

Bu bölümde sentetik GPR izlerinin VFSA optimizasyon yöntemi ile ters çözümü yapılmıştır. Ters çözüm işlemi her bir sentetik iz için ilk olarak veri işlem yapmadan daha sonra otomatik kazanç düzeltmesi (AGC) yapılarak ve son olarak ilk gelen dalga atılarak tekrarlanmıştır. Şekil 6.12'de verilen bir boyutlu sentetik radargramda

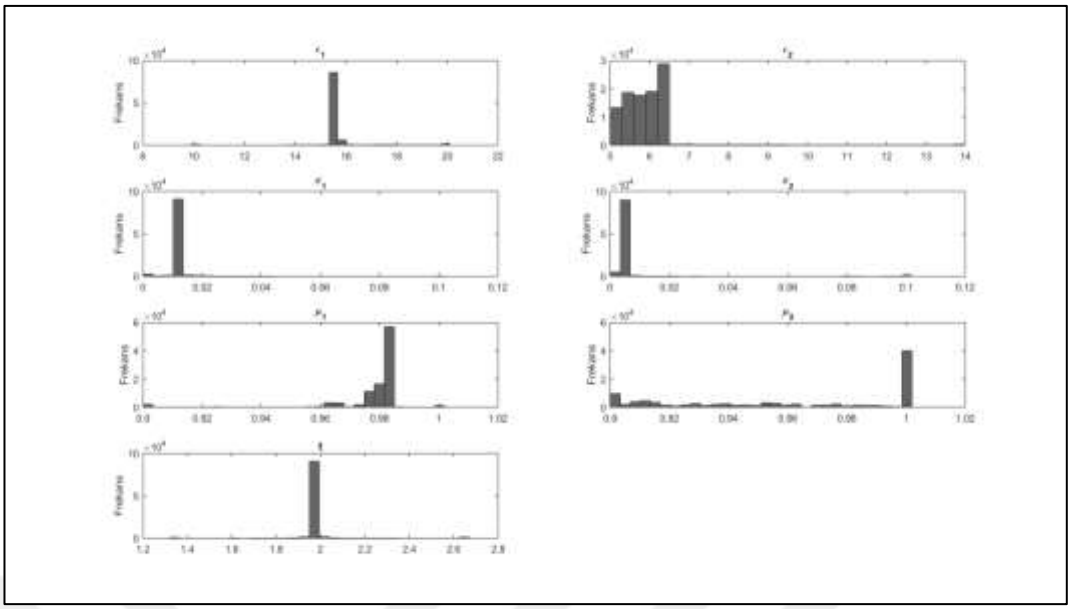
model parametreleri; birinci tabaka için $\varepsilon_1 = 15$, $\sigma_1 = 0{,}009$ S/m, $\mu_1=1$, ikinci tabaka için $\varepsilon_2 = 8$, $\sigma_2 = 0{,}005$ S/m, $\mu_2 = 1$ ve tabaka kalınlığı 1,99 metredir. Anten frekansı 300 MHz, $\Delta z = 0{,}0133$ m, $\Delta t=0{,}0444$ ns'dir.



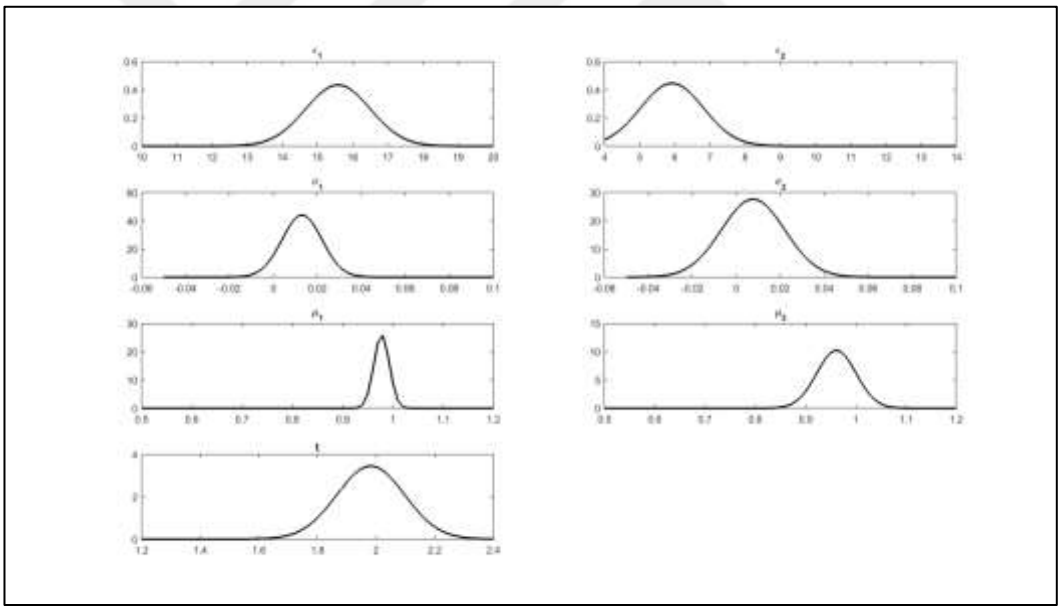
Şekil 6.12. a) Tabakalı yer altı modeli, b) bir boyutlu sentetik radargram ve VFSA sonucu

VFSA optimizasyon yöntemi ile tahmin edilen parametreler ise; birinci tabaka için $\varepsilon_1 = 15{,}4$, $\sigma_1 = 0{,}011$ S/m, $\mu_1 = 0{,}98$, ikinci tabaka için ise; $\varepsilon_2 = 6{,}26$, $\sigma_2 = 0{,}0048$ S/m, $\mu_2=1$ ve tabaka kalınlığı 1,98 metre olarak tahmin edilmiştir. Tahmin edilen parametrelerin hazırlanan bir boyutlu sentetik radargramın parametrelerine oldukça yakın olduğu görülmüştür. RMS hata % 0,02 hesaplanmıştır. VFSA yöntemi ile tahmin edilen parametrelerin sırasıyla frekans dağılımı ve olasılık yoğunluk fonksiyonları Şekil 6.13 ve Şekil 6.14'de verilmiştir.

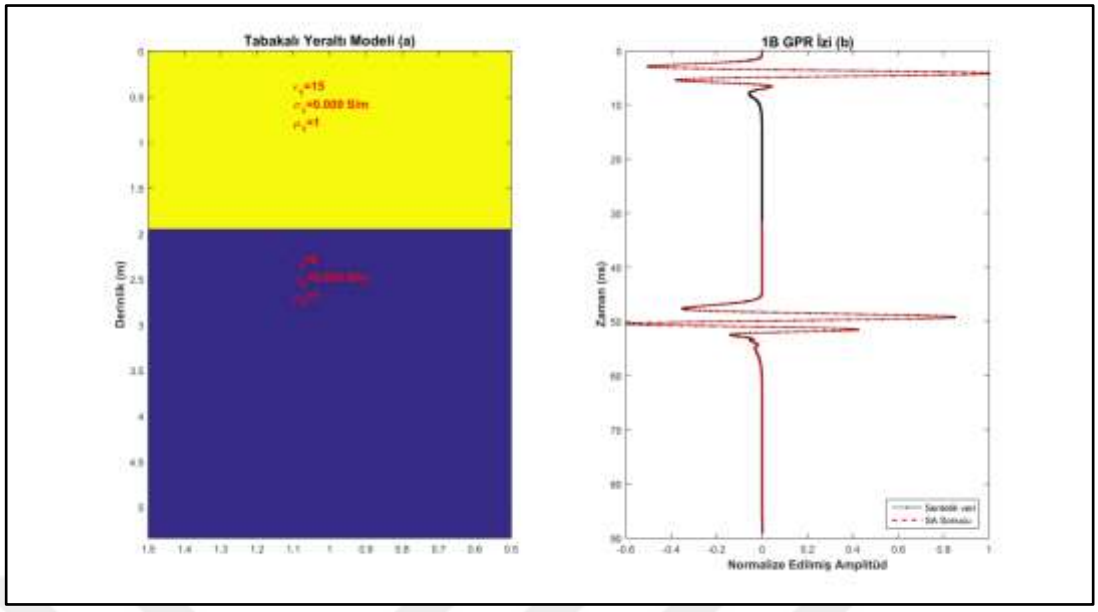
VFSA gibi rastgele arama yapan optimizasyon yöntemlerinde, frekans dağılımı ve olasılık yoğunluk fonksiyonları problem çözümü için tahmin edilen parametrelerin ne kadar tutarlı olduğunu anlamak için kullanılır. Eğer frekans dağılımlarında çok fazla saçılma var ise tahmin edilen parametreler tutarsız olarak nitelendirilir. Eğer frekans dağılımlarında saçılma yok ise tahmin edilen parametrelerin tutarlı olduğu anlamına gelir.



Şekil 6.13. İki tabakalı ortamda VFSA yöntemi kullanılarak tahmin edilen her bir parametrenin frekans dağılımları

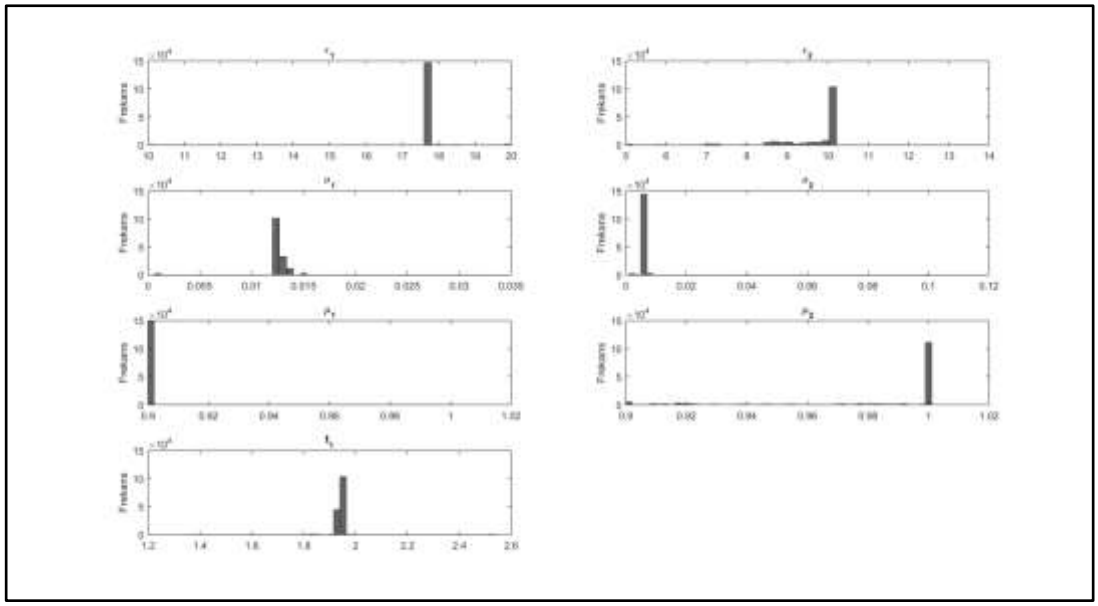


Şekil 6.14. İki tabakalı ortamda VFSA yöntemi kullanılarak tahmin edilen her bir parametrenin olasılık yoğunluk fonksiyonu

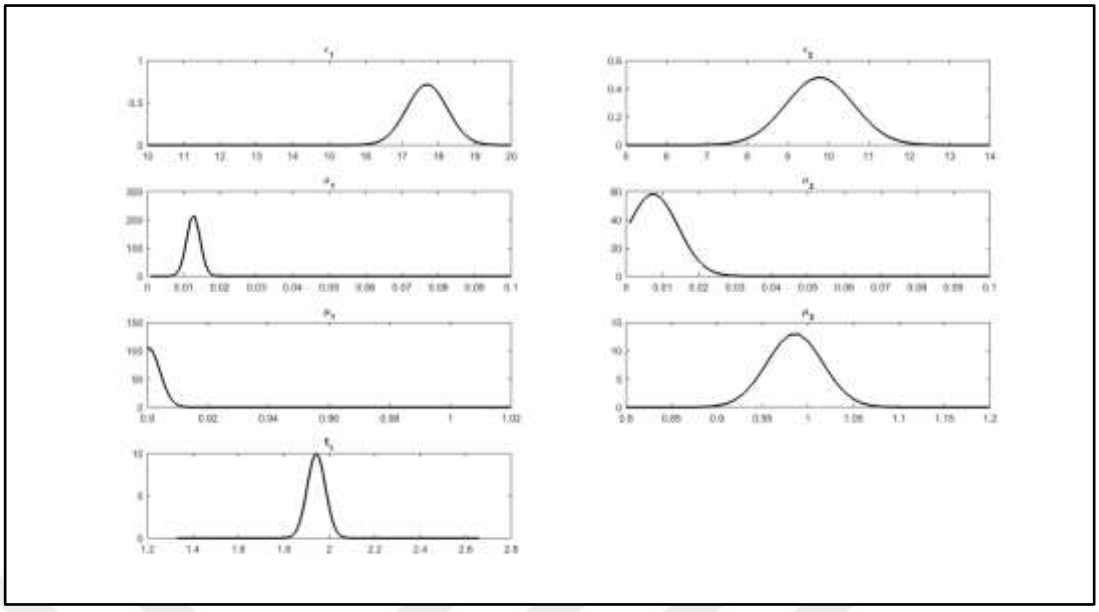


Şekil 6.15. a) Tabakalı yer altı modeli, b) bir boyutlu AGC uygulanmış sentetik radargram ve VFSA sonucu

Şekil 6.15'de verilen sentetik ize AGC uygulandıktan sonra ters çözüm yapılmıştır. VFSA optimizasyon yöntemi ile tahmin edilen parametreler; birinci tabaka için ε_1 = 17,69, σ_1 = 0,013 S/m, μ_1 = 0,90, ikinci tabaka için ise; ε_2 = 10,17, σ_2 = 0,007 S/m, μ_2=0,90 ve tabaka kalınlığı 1,94 metre olarak tahmin edilmiştir. RMS hata % 0,3 hesaplanmıştır. VFSA yöntemi ile tahmin edilen parametrelerin sırasıyla frekans dağılımı ve olasılık yoğunluk fonksiyonları Şekil 6.16 ve Şekil 6.17'de verilmiştir.

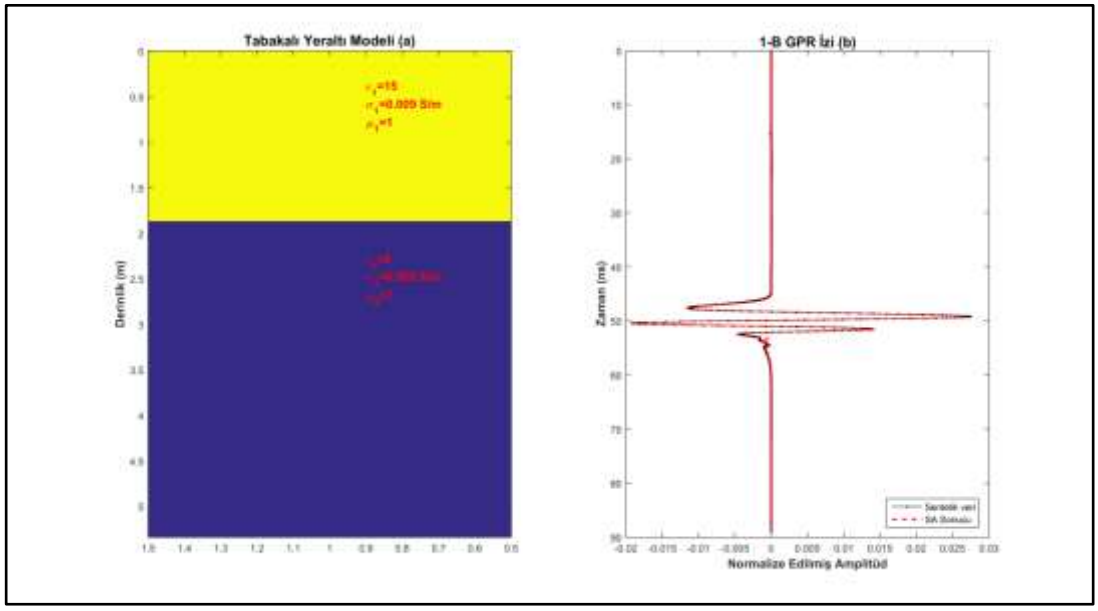


Şekil 6.16. İki tabakalı ortamda AGC uygulanmış izin VFSA yöntemi kullanılarak tahmin edilen her bir parametrenin frekans dağılımları



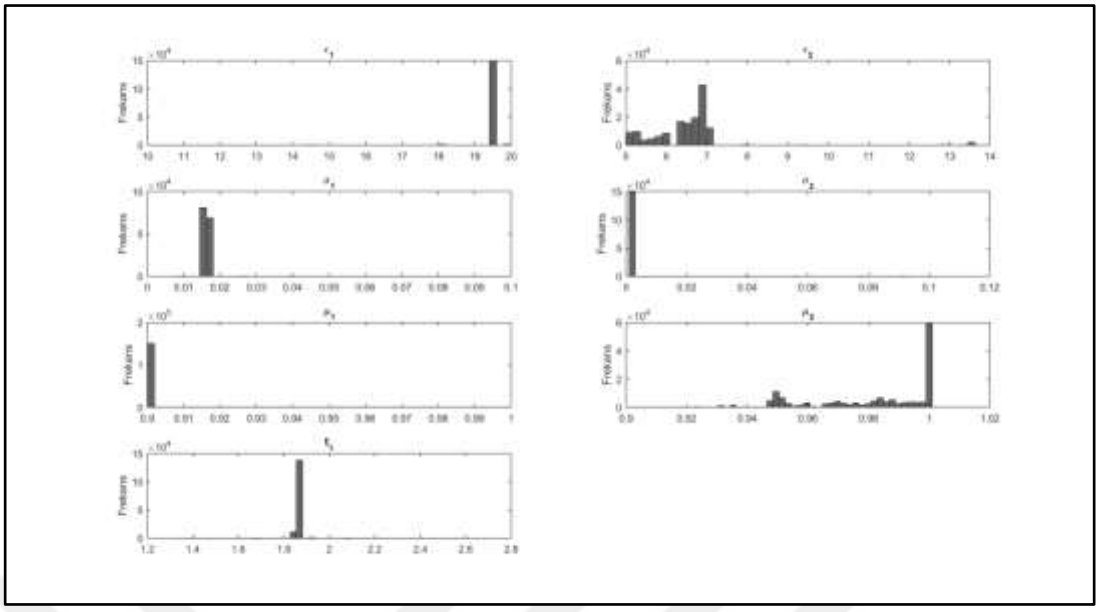
Şekil 6.17. İki tabakalı ortamda AGC uygulanmış izin VFSA yöntemi kullanılarak tahmin edilen her bir parametrenin olasılık yoğunluk fonksiyonu

Aynı iki tabakalı ortam için ters çözüm işlemi ilk gelen dalga atılarak tekrarlanmıştır (Şekil 6.18). Birinci tabaka için ε_1 = 19,47, σ_1 = 0,016 S/m, μ_1 = 0,90, ikinci tabaka için ise; ε_2 = 7,06, σ_2 = 0,002 S/m, μ_2=0,90 ve tabaka kalınlığı 1,86 metre olarak tahmin edilmiştir. RMS hata % 0,02 hesaplanmıştır.

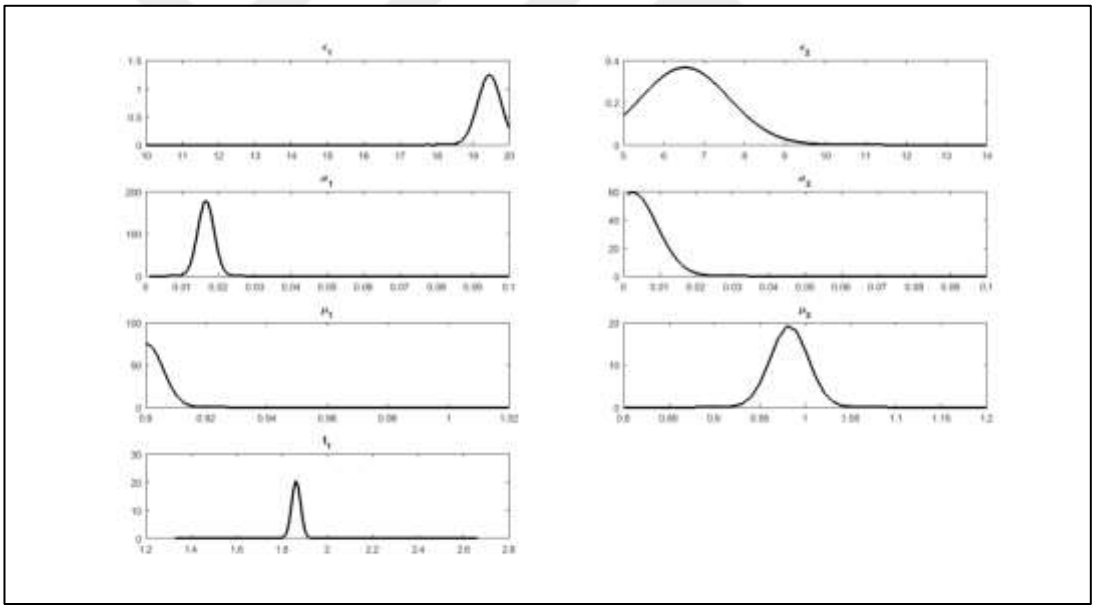


Şekil 6.18. Tabakalı yer altı modeli, b) ilk gelen dalga atılarak elde edilen bir boyutlu sentetik radargram ve VFSA sonucu

Şekil 6.18 verilen izin VFSA ile elde edilen parametrelerin frekans dağılımları ve olasılık yoğunluk fonksiyonları sırasıyla Şekil 6.19 ve Şekil 6.20'de verilmiştir.

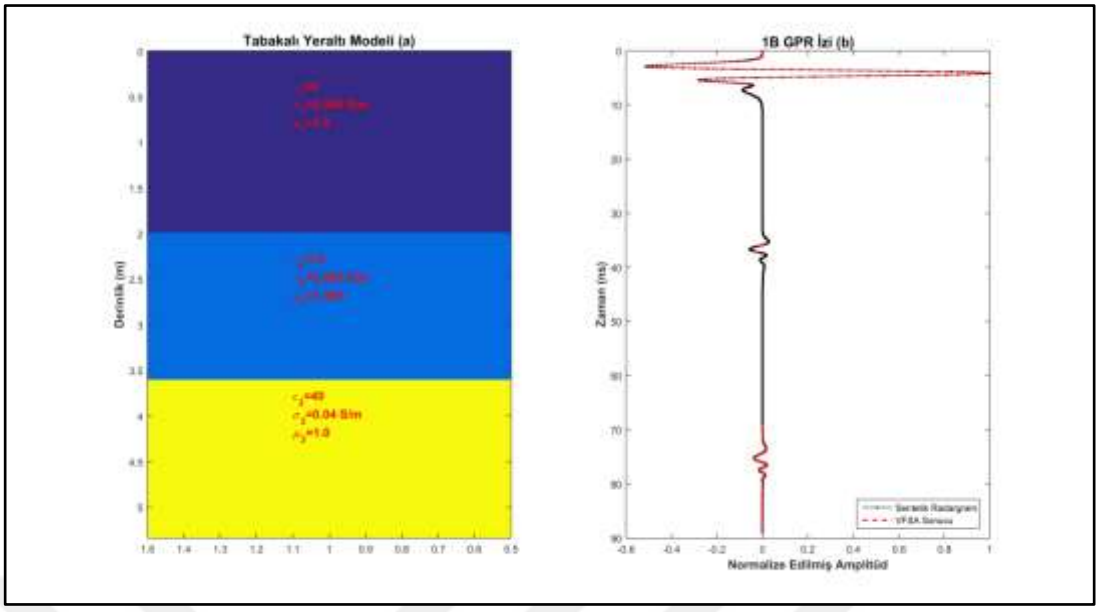


Şekil 6.19. İki tabakalı ortamda ilk gelen dalga atılarak elde edilen izin VFSA yöntemi kullanılarak tahmin edilen her bir parametrenin frekans dağılımları



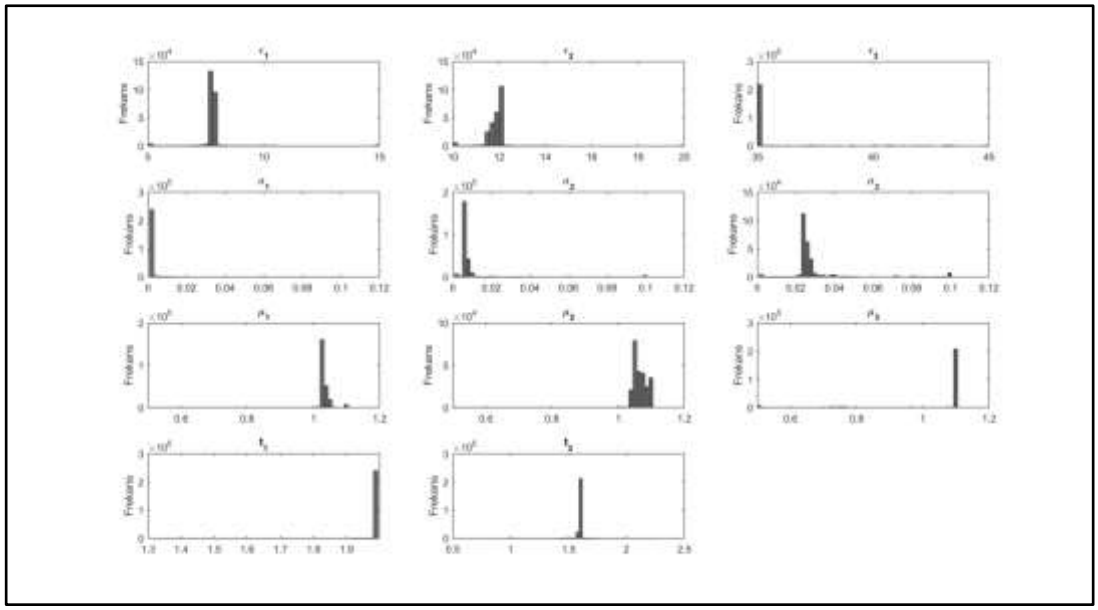
Şekil 6.20. İki tabakalı ortamda ilk gelen dalga atılarak elde edilen izin VFSA yöntemi kullanılarak tahmin edilen her bir parametrenin olasılık yoğunluk fonksiyonu

Bu modelde ise 3 tabakalı ortam modellenmiştir. Sentetik radargramın model parametreleri; birinci tabaka için $\varepsilon_1 = 8$, $\sigma_1 = 0{,}004$ S/m, $\mu_1 = 1$, ikinci tabaka için; $\varepsilon_2 = 15$, $\sigma_2 = 0{,}005$ S/m, $\mu_2 = 1{,}005$, üçüncü tabakanın için ise; $\varepsilon_3 = 40$, $\sigma_3 = 0{,}04$ S/m, $\mu_3 = 1{,}0$ seçilmiştir. Tabaka kalınlığı, birinci tabaka için 1,99 m, ikinci tabaka için 1,60 m seçilmiştir. Anten frekansı 300 MHz, $\Delta z = 0{,}0133$ m, $\Delta t = 0{,}0444$ ns'dir.

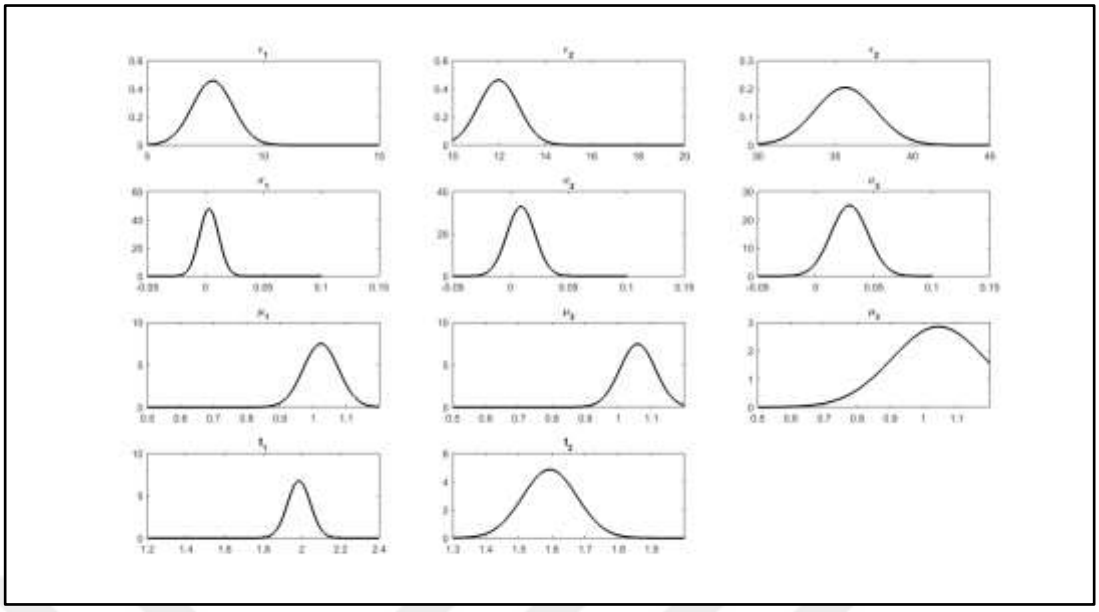


Şekil 6.21. a) Tabakalı yer altı modeli, b) Bir boyutlu sentetik radargram ve VFSA sonucu

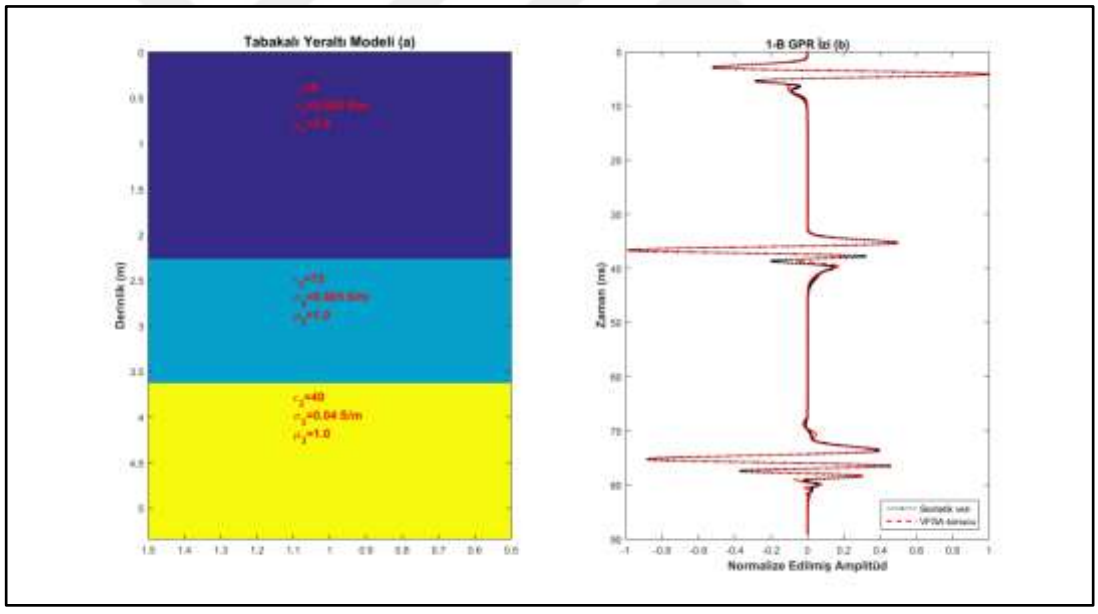
Tahmin edilen parametreler; birinci tabaka için $\varepsilon_1 = 7{,}83$, $\sigma_1 = 0{,}002$ S/m, $\mu_1 = 1{,}02$, ikinci tabaka için $\varepsilon_2 = 12{,}18$, $\sigma_2 = 0{,}006$ S/m, $\mu_2 = 1{,}04$, üçüncü tabaka için ise, $\varepsilon_3 = 35$, $\sigma_3 = 0{,}023$ S/m, $\mu_3 = 1{,}1$ ve birinci tabakanın kalınlığı 1,99 m ikinci tabakanın kalınlığı 1,60 m olarak tahmin edilmiştir. RMS hata % 0,05 hesaplanmıştır. Üç tabakalı ortam için hesaplanan parametrelerin frekans dağılımı ve olasılık yoğunluk fonksiyonları Şekil 6.22 ve Şekil 6.23' de verilmiştir.



Şekil 6.22. Üç tabakalı ortamda VFSA yöntemi kullanılarak tahmin edilen her bir parametrenin frekans dağılımları

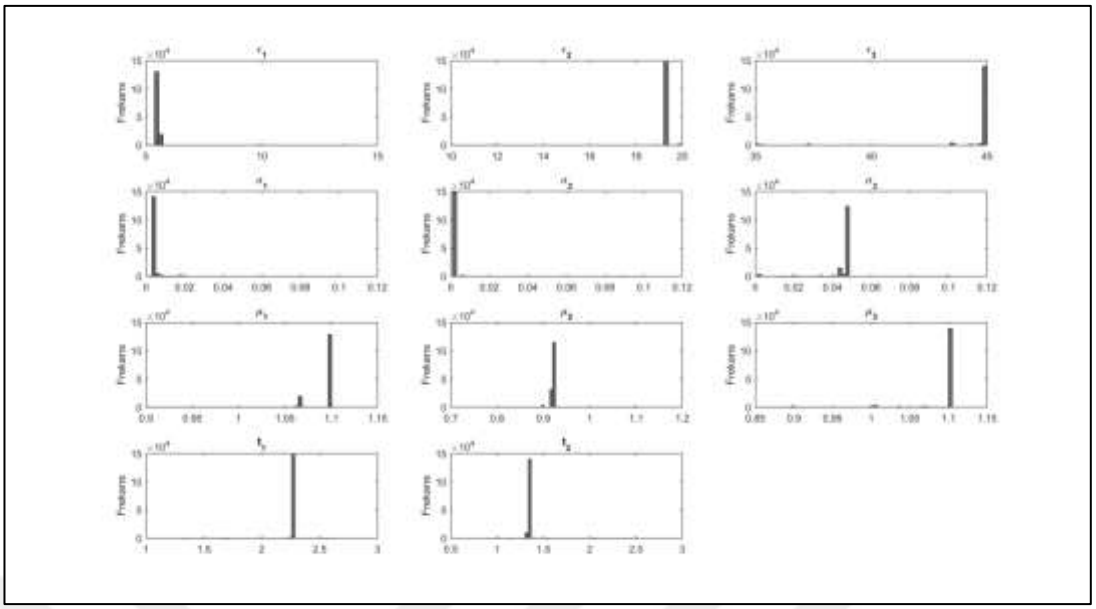


Şekil 6.23. Üç tabakalı ortamda VFSA yöntemi kullanılarak tahmin edilen her bir parametrenin olasılık yoğunluk fonksiyonu

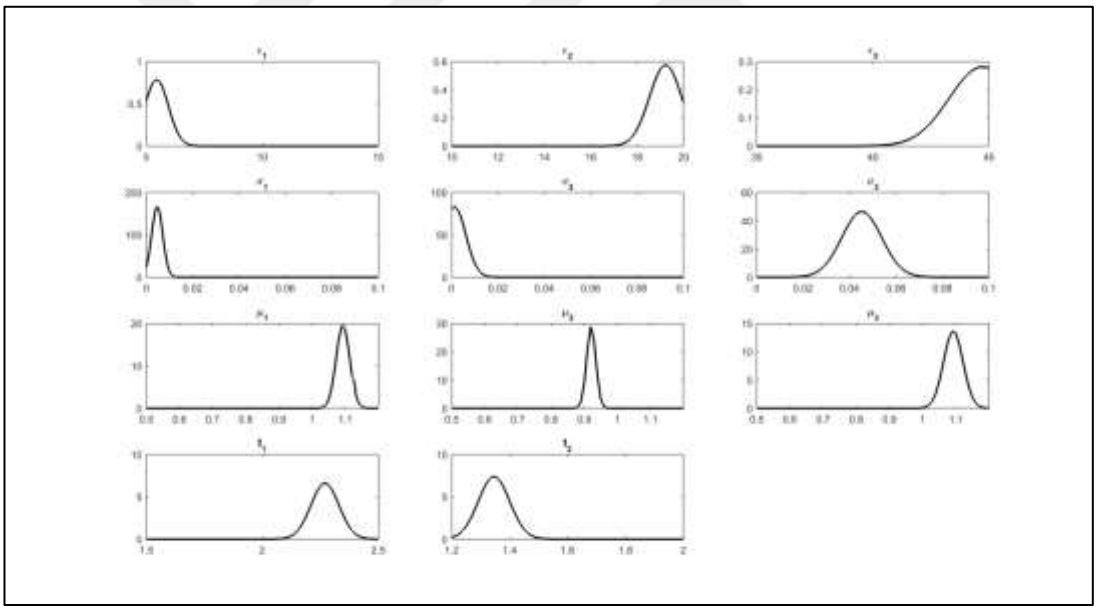


Şekil 6.24. a) Tabakalı yer altı modeli, b) Bir boyutlu AGC uygulanmış sentetik radargram ve VFSA sonucu

Tahmin edilen parametreler; birinci tabaka için ε_1=5,38, σ_1=0,004 S/m, μ_1=1,1, ikinci tabaka için ε_2=19,27, σ_2=0,001 S/m, μ_2=1,02, üçüncü tabaka için ise, ε_3=45, σ_3=0,047 S/m, μ_3 = 1,1 ve birinci tabakanın kalınlığı 2,27 m ikinci tabakanın kalınlığı 1,34 m olarak tahmin edilmiştir. RMS hata % 2 hesaplanmıştır. AGC uygulanıp çözülen üç tabakalı ortam için hesaplanan parametrelerin frekans dağılımı ve olasılık yoğunluk fonksiyonları Şekil 6.25 ve Şekil 6.26' da verilmiştir.

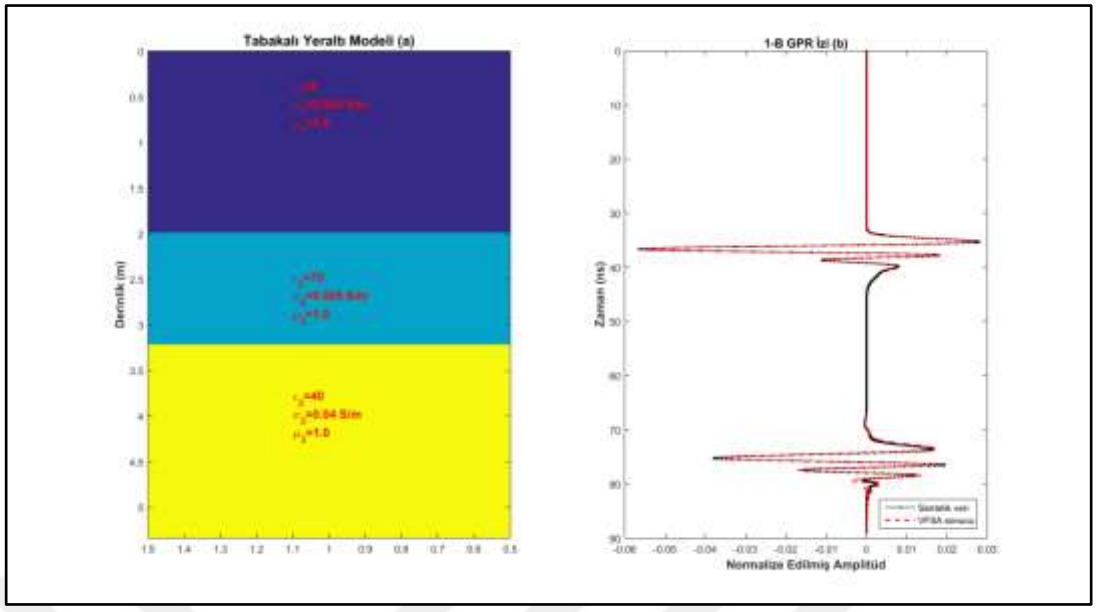


Şekil 6.25. Üç tabakalı ortamda AGC uygulanmış izin VFSA yöntemi kullanılarak tahmin edilen her bir parametrenin frekans dağılımları



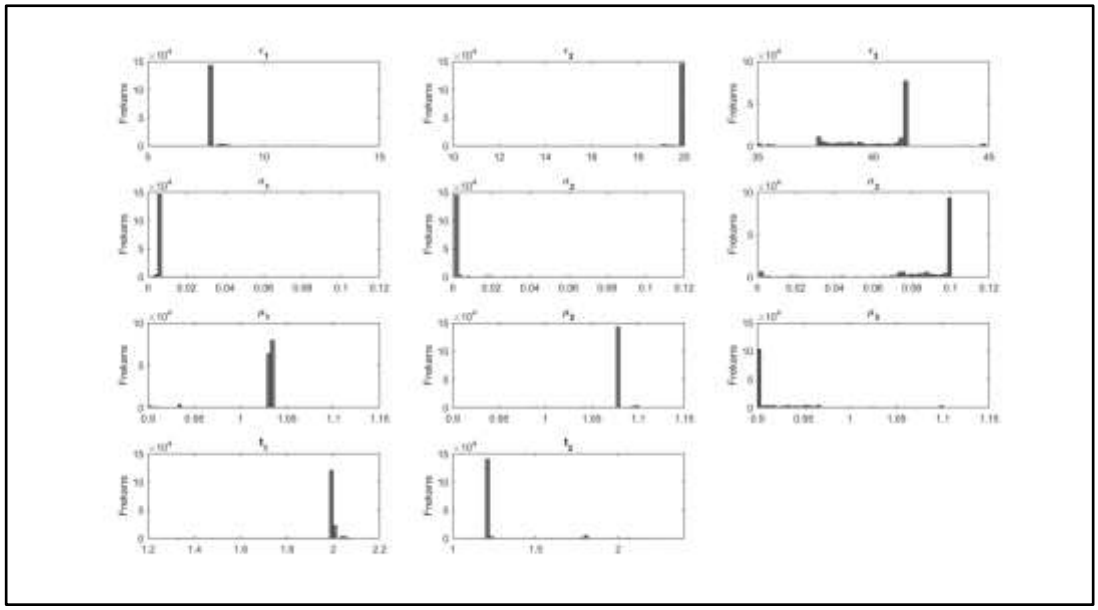
Şekil 6.26. Üç tabakalı ortamda AGC uygulanmış izin VFSA yöntemi kullanılarak tahmin edilen her bir parametrenin olasılık yoğunluk fonksiyonu

Üç tabakalı ortam için aynı model parametreleri kullanılarak optimizasyon işlemi tekrarlanmıştır (Şekil 6.27).

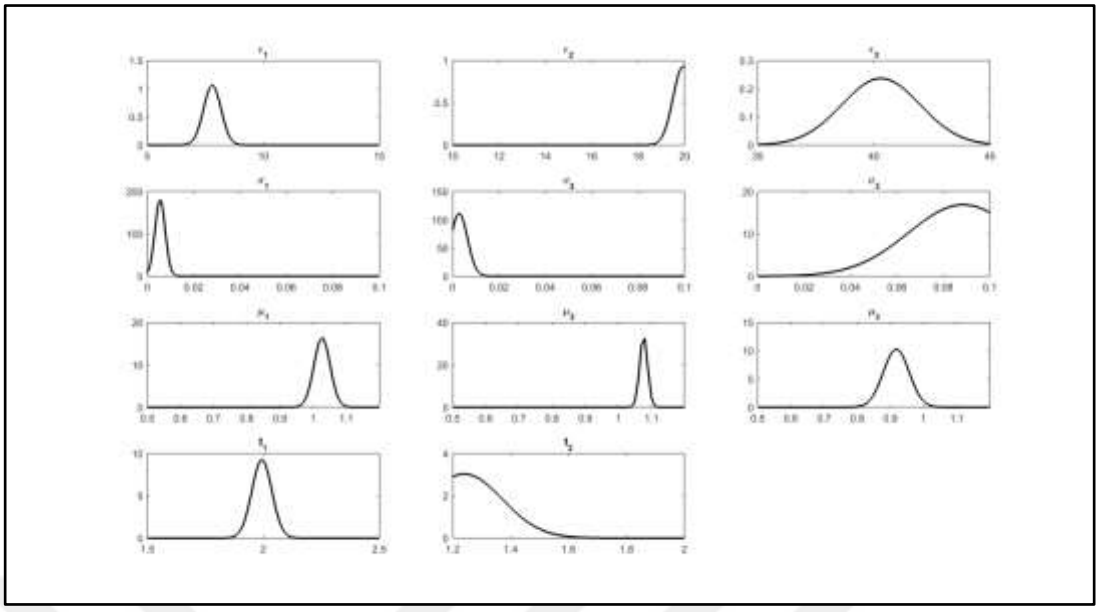


Şekil 6.27. a) Tabakalı yer altı modeli, b) ilk gelen dalga atılarak elde edilen bir boyutlu sentetik radargram ve VFSA sonucu

Tahmin edilen parametreler; birinci tabaka için $\varepsilon_1 = 7{,}76$, $\sigma_1 = 0{,}006$ S/m, $\mu_1 = 1{,}03$, ikinci tabaka için $\varepsilon_2 = 19{,}98$, $\sigma_2 = 0{,}003$ S/m, $\mu_2 = 1{,}08$, üçüncü tabaka için ise, $\varepsilon_3 = 41{,}36$, $\sigma_3 = 0{,}1$ S/m, $\mu_3 = 0{,}90$ ve birinci tabakanın kalınlığı 1,99 m ikinci tabakanın kalınlığı 1,21 m olarak tahmin edilmiştir. RMS hata % 0,07 hesaplanmıştır. İlk gelen dalga atılıp çözülen üç tabakalı ortam için hesaplanan parametrelerin frekans dağılımı ve olasılık yoğunluk fonksiyonları Şekil 6.28 ve Şekil 6.29' da verilmiştir.



Şekil 6.28. Üç tabakalı ortamda ilk gelen dalgası atılan izin VFSA yöntemi kullanılarak tahmin edilen her bir parametrenin frekans dağılımları



Şekil 6.29. Üç tabakalı ortamda ilk gelen dalgası atılan izin VFSA yöntemi kullanılarak tahmin edilen her bir parametrenin olasılık yoğunluk fonksiyonu

Üç farklı şekilde çözülen iki tabakalı ve üç tabakalı sentetik verilerde tahmin edilen parametreler ve RMS hatalar karşılaştırılmıştır. AGC uygulandığında ve ilk gelen dalga atılarak ters çözüm yapıldığında tahmin edilen parametreler model parametrelerinden uzaklaştığı görülmüştür. Ayrıca bu iki çözümde RMS hatalarda yükselme olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle laboratuvar verilerinin ve arazi verisinin ters çözümünde AGC düzeltmesi ve ilk gelen dalga atılmadan devam edilmiştir.

6.4. Bir Boyutlu Ortamda Laboratuvar ve Arazi Verilerin Ters Çözümü

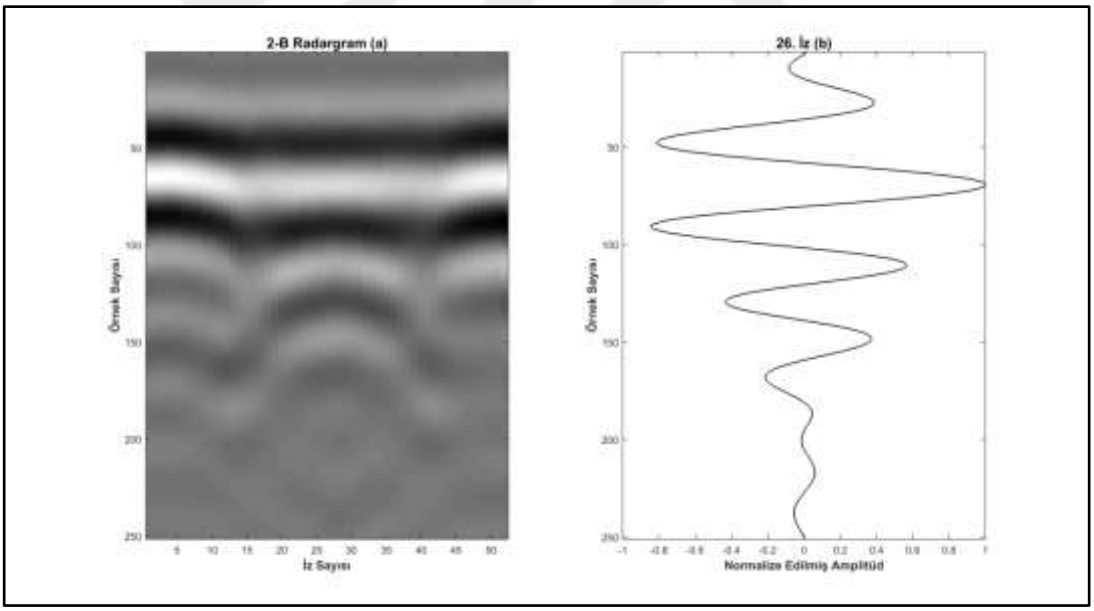
Bu bölümde, Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü Uygulamalı Jeofizik Laboratuvarı'nda beton blok ve kum havuzu üzerinde alınan yer radarı (GPR) ölçüleri ile Zonguldak İl'inde alınan yer radarı (GPR) ölçüsünün ters çözümü yapılmıştır.

6.4.1. Beton blok üzerinde alınan yer radarı ölçüsünün ters çözümü

Jeofizik Mühendisliği laboratuvarında, beton blok üzerinde 2 GHz kapalı anten ile GPR ölçüsü alınmıştır. Betonun yüzeyinden 10 cm aşağıda 1 cm çaplı inşaat demiri bulunmaktadır (Şekil 6.30). Ölçü inşaat demirini dik kesecek şekilde 45 cm boyunca alınmıştır ve 52 adet izden oluşmakta olup, her bir iz ise de 251 adet örnekten oluşmaktadır. Ters çözüm için inşaat demirinin üzerinde olan 26. iz kullanılmıştır (Şekil 6.31).



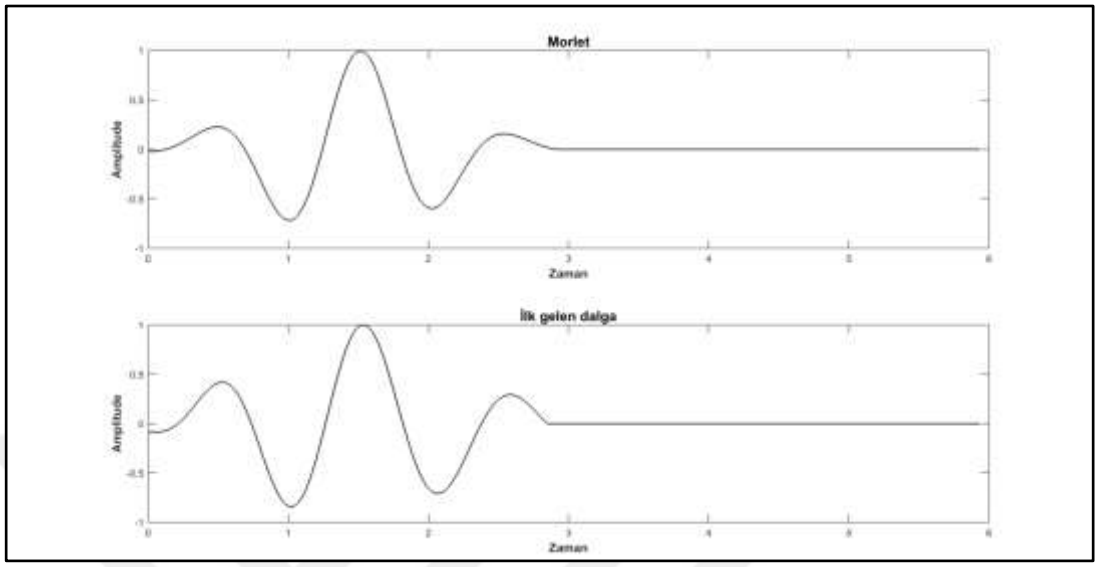
Şekil 6.30. Beton üzerinde alınan yer radarı ölçüsü



Şekil 6.31. a) Beton blok üzerinde alınan GPR ölçüsü, b) GPR ölçüsüne ait 26. iz

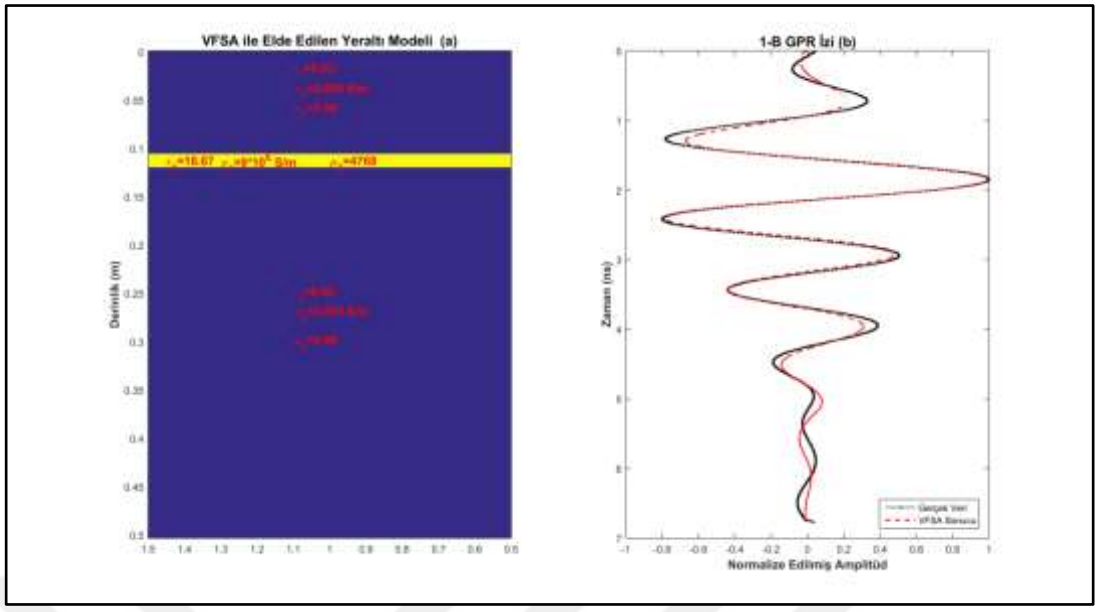
Yer radarı ölçüsünde bağıl dielektrik sabiti, ε = 6,1 olarak belirlenmiştir ve ölçü 2,0 GHz anten ile alınmasına karşın, baskın frekans 860 MHz belirlenmiştir. Dalgacık yapısı Morlet dalgacığına daha çok benzediği için geliştirilen bir boyutlu yer radarı programında ilk çözümde Morlet dalgacığı kullanılmıştır. Daha sonra ise ilk gelen dalga kesilerek kaynak dalgacığı kullanılmıştır. Beton blok ve kum havuzu üzerinde

alınan ölçüler tekrar çözülmüştür. Şekil 6.32'de Morlet ve ilk gelen dalga gösterilmiştir.



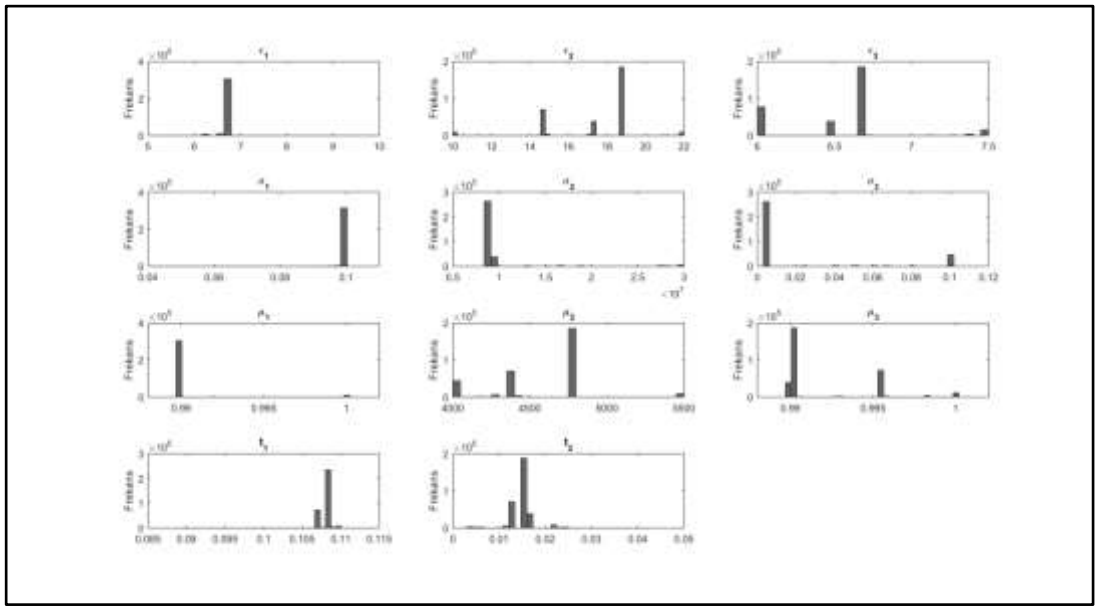
Şekil 6.32. Morlet dalgacığı ve ilk gelen dalga

Beton blok üzerinde alınan yer radarı ölçüsü, üç tabakalı ortam olarak değerlendirilmiştir. Morlet dalgacığı ile çözüldüğünde; birinci tabakanın parametreleri, $\varepsilon_1 = 6{,}65$, $\sigma_1 = 0{,}099$ S/m, $\mu_1 = 0{,}99$, ikinci tabakanın parametreleri, $\varepsilon_2 = 18{,}37$, $\sigma_2 = 9\times10^6$ S/m, $\mu_2 = 4768$, üçüncü tabakanın parametreleri ise $\varepsilon_3 = 6{,}69$, $\sigma_3 = 0{,}024$ S/m, $\mu_3 = 0{,}99$, olarak belirlenmiştir. Birinci tabakanın kalınlığı 10,8 cm ikinci tabakanın kalınlığı ise 1,2 cm olarak tahmin edilmiştir. RMS hata % 5,1 olarak hesaplanmıştır (Şekil 6.33).

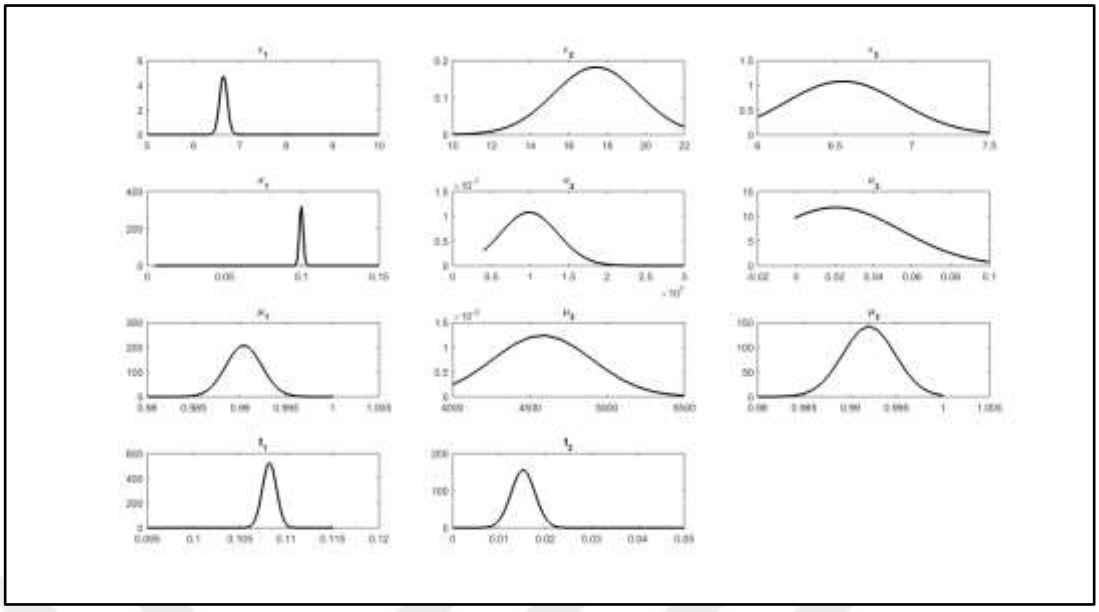


Şekil 6.33. Beton blok üzerinde alınan ölçünün yer altı modeli a) VFSA ile elde edilen yer altı modeli, b) bir boyutlu GPR izi ve Morlet dalgacığı ile hesaplanan GPR izi

Parametreler incelendiğinde ve tabaka kalınlıkları karşılaştırıldığında VFSA sonucunda elde edilen parametrelerin literatürdeki değerlere oldukça yakın olduğu görülmüştür (Balanis, 1989). Tahmin edilen parametrelerin frekans dağılımları ve olasılık yoğunluk fonksiyonları Şekil 6.34 ve Şekil 6.35'de verilmiştir.

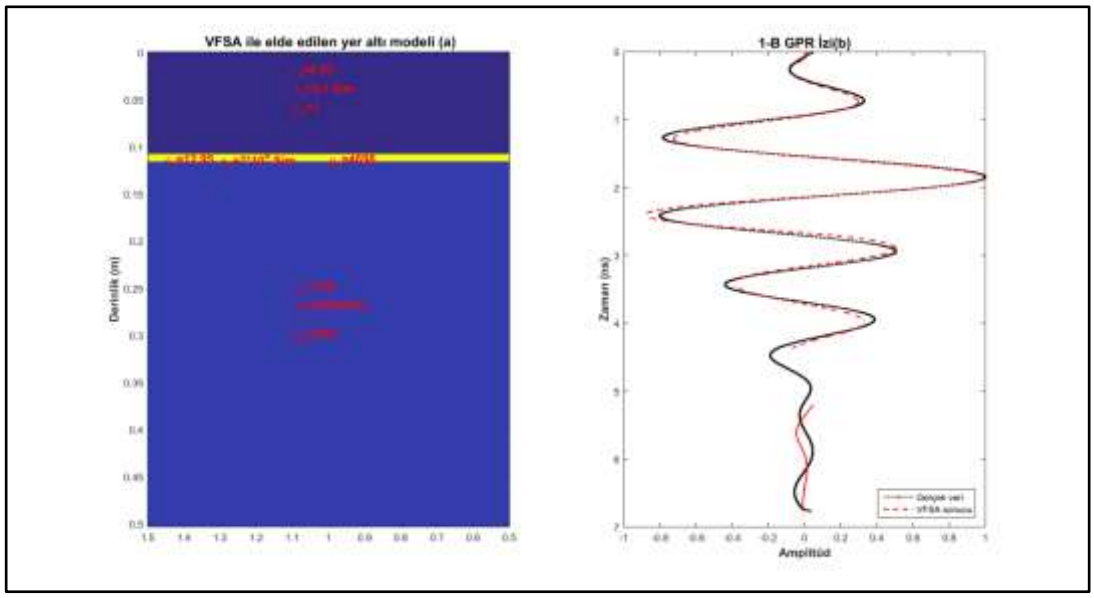


Şekil 6.34. Beton blok üzerinde alınan yer radarı ölçüsünün VFSA yöntemi ile tahmin edilen parametrelerin frekans dağılımları



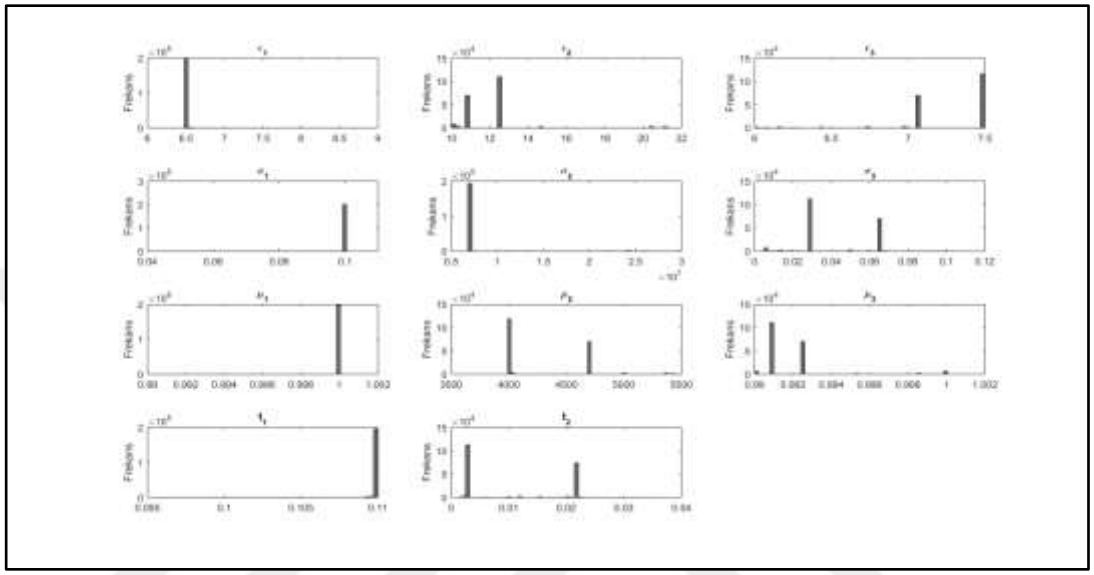
Şekil 6.35. Beton blok üzerinde alınan yer radarı ölçüsünün VFSA yöntemi ile tahmin edilen parametrenin olasılık yoğunluk fonksiyonu

İlk gelen dalga kaynak dalgacığı olarak kullanılıp yirmi altıncı iz tekrar çözüldüğünde ise; birinci tabakanın parametreleri, $\varepsilon_1 = 6{,}53$, $\sigma_1 = 0{,}01$ S/m, $\mu_1 = 1$, ikinci tabakanın parametreleri, $\varepsilon_2 = 12{,}95$, $\sigma_2 = 7\times10^{6}$ S/m, $\mu_2 = 4698$, üçüncü tabakanın parametreleri ise $\varepsilon_3 = 7{,}08$, $\sigma_3 = 0{,}06$ S/m, $\mu_3 = 0{,}99$, olarak belirlenmiştir. Birinci tabakanın kalınlığı 11 cm ikinci tabakanın kalınlığı ise 0,6 cm olarak tahmin edilmiştir. RMS hata % 5,2 olarak hesaplanmıştır (Şekil 6.36).

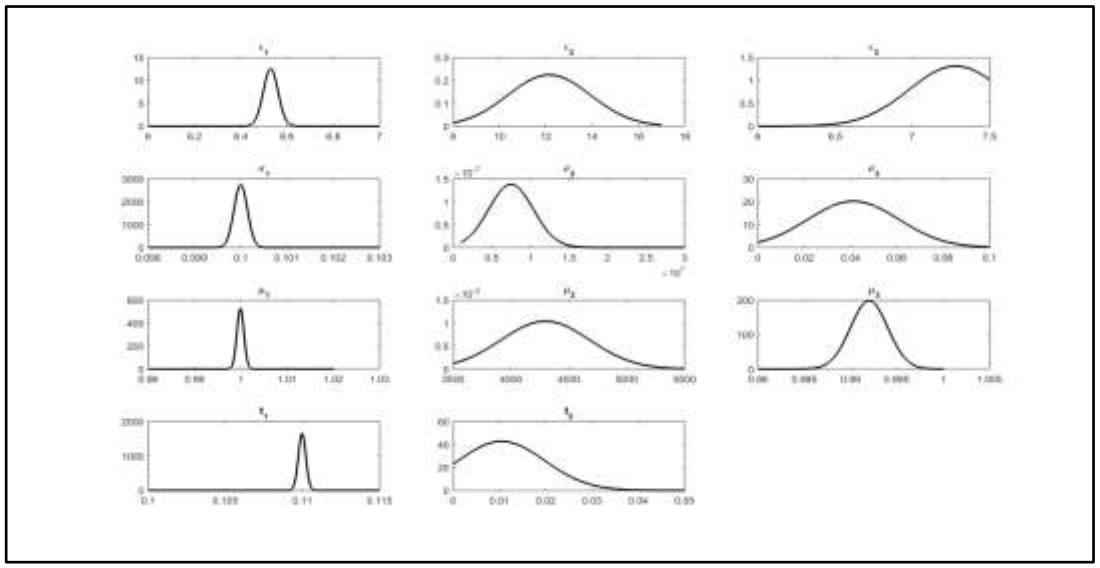


Şekil 6.36. Beton blok üzerinde alınan ölçünün yer altı modeli a) VFSA ile elde edilen yer altı modeli, b) bir boyutlu GPR izi ve ilk gelen dalga kullanılarak hesaplanan GPR izi

Ölçülen kaynak ve Morlet dalgacığı kullanılarak ters çözüm işlemi sonucunda tahmin edilen parametrelerin birbirlerine yakın olduğu görülmüştür. Buna karşın, RMS hatada ilk gelen dalga ile çözüldüğünde artış olduğu belirlenmiştir. Tahmin edilen parametrelerin frekans dağılımları ve olasılık yoğunluk fonksiyonları Şekil 6.37 ve Şekil 6.38'de verilmiştir.



Şekil 6.37. Beton blok üzerinde alınan yer radarı ölçüsünün VFSA yöntemi ile tahmin edilen parametrelerin frekans dağılımları



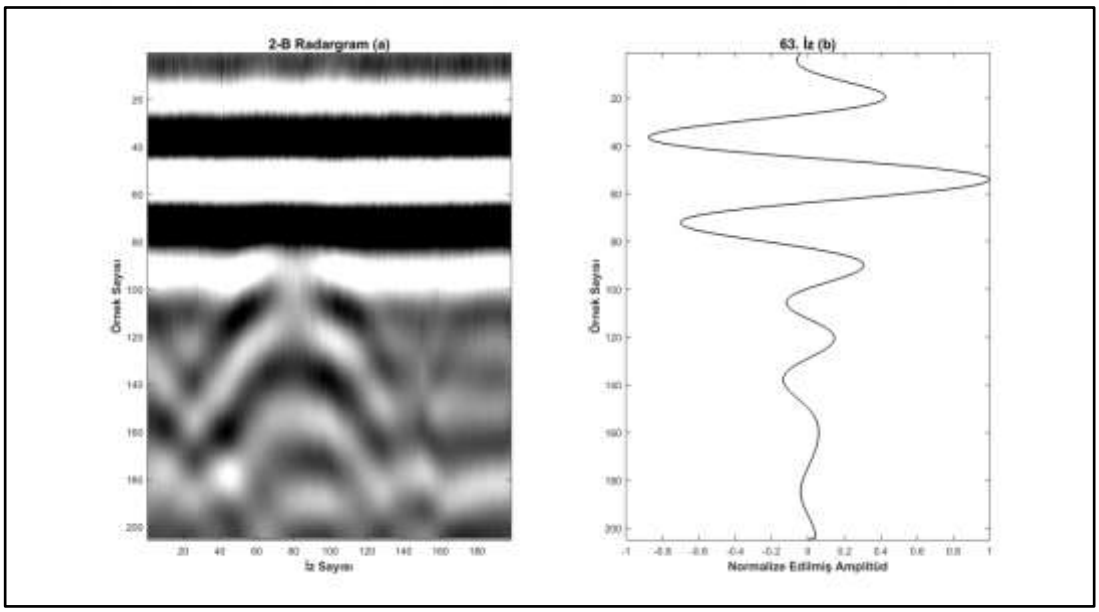
Şekil 6.38. Beton blok üzerinde alınan yer radarı ölçüsünün VFSA yöntemi ile tahmin edilen parametrenin olasılık yoğunluk fonksiyonu

6.4.2. Kum havuzu üzerinde alınan yer radarı ölçüsünün ters çözümü

Kum havuzunda, yüzeyden 16,5 cm altında 4,7 cm yarı çaplı hayvan kemiği bulunmaktadır (Şekil 6.39). Yer radarı ölçüsü kemiği dik kesecek şekilde 11 profil ölçü alınmıştır. Ters çözüm için altıncı profil seçilmiştir. Seçilen yer radarı ölçüsü 197 adet izden oluşmakta ve her bir iz 205 adet örnekten oluşmaktadır, ters çözüm için altmış üçüncü iz kullanılmıştır. (Şekil 6.40).

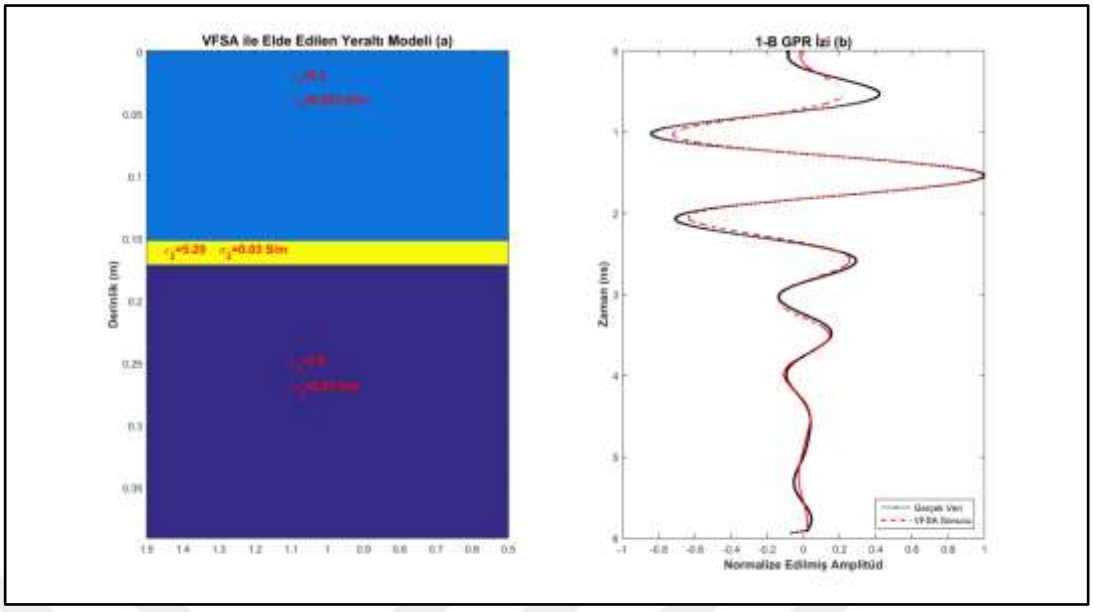


Şekil 6.39. Kum havuzunda alınan yer radarının ölçü düzeneği



Şekil 6.40. a) Kum üzerinde alınan yer radarı ölçüsü b) ölçünün altmış üçüncü izi

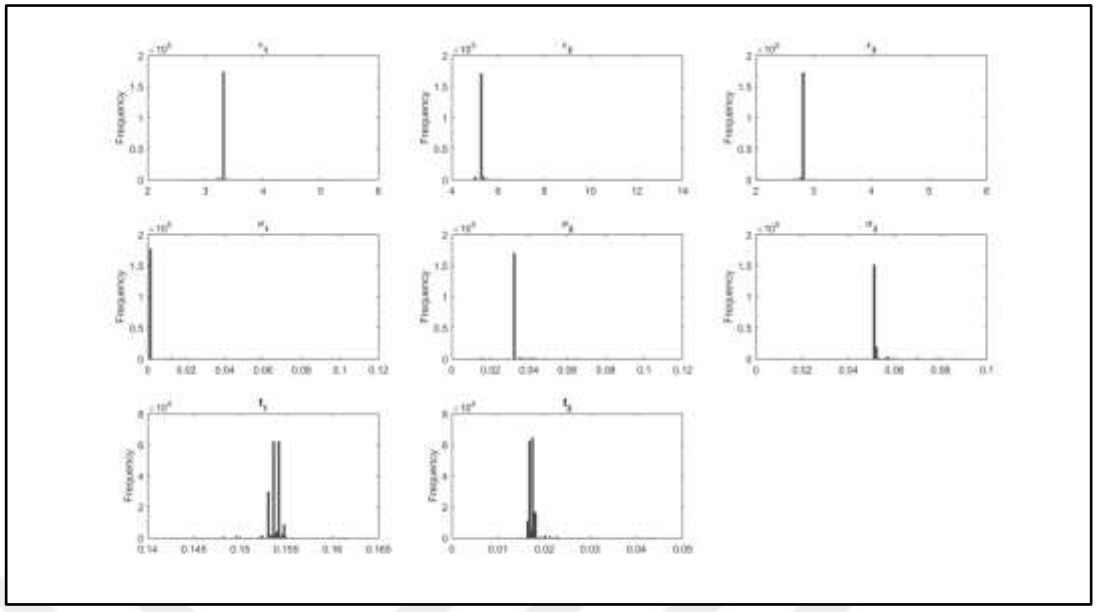
Yer radarı ölçüsünde bağıl dielektrik katsayısı ε = 2,6 olarak belirlenmiş olup baskın frekans 830 MHz olarak belirlenmiştir. Ortam kum, kemik, kum olarak üç tabakalı olarak değerlendirilmiştir.



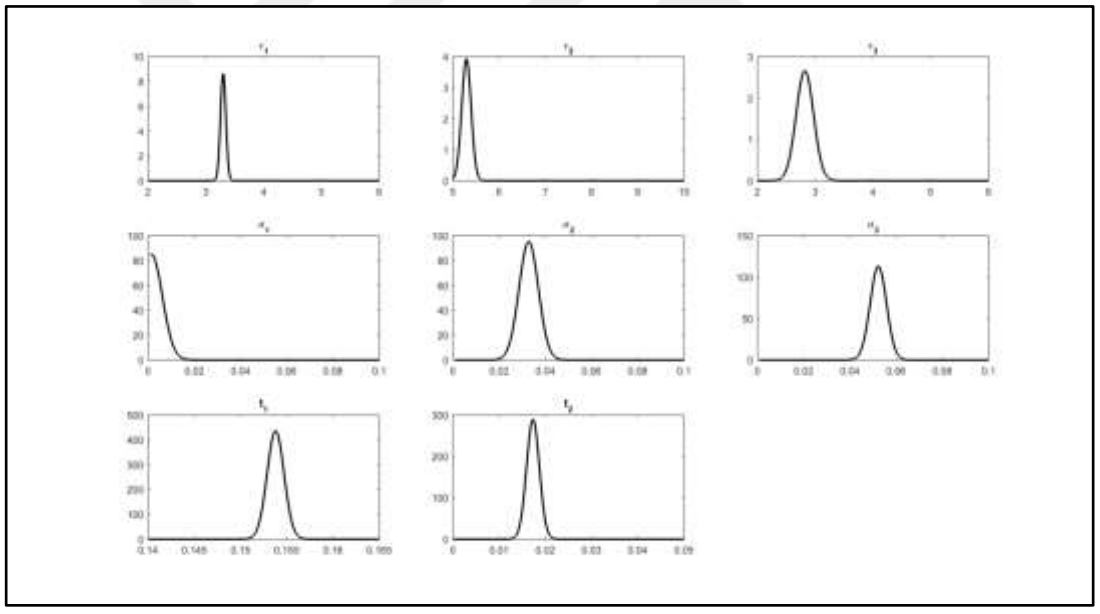
Şekil 6.41. Kum havuzu üzerinde alınan ölçünün yer altı modeli a) VFSA ile elde edilen yer altı modeli, b) bir boyutlu GPR izi ve Morlet dalgacığı ile hesaplanan GPR izi

VFSA ile tahmin edilen parametreler; birinci tabakanın parametreleri, $\varepsilon_1 = 3{,}3$, $\sigma_1 = 0{,}002$ S/m, ikinci tabakanın parametreleri, $\varepsilon_2 = 5{,}29$, $\sigma_2 = 0{,}3$ S/m, üçüncü tabakanın parametreleri ise $\varepsilon_3 = 2{,}8$, $\sigma_3 = 0{,}05$ S/m, olarak belirlenmiştir. Birinci tabakanın kalınlığı 15,6 cm ikinci tabakanın kalınlığı ise 1,9 cm olarak tahmin edilmiştir. RMS hata % 5,4 olarak hesaplanmıştır. Ortam kum olduğundan ortamın manyetik geçirgenliği bütün tabakalar için 1 olarak alınmıştır.

VFSA yöntemi ile tahmin edilen parametreler (yerin elektriksel özelliği ve tabaka kalınlıkları) ve ölçü düzeneği karşılaştırıldığında birbirleri ile örtüştüğü görülmektedir. Tahmin edilen parametrelerin frekans dağılımları ve olasılık dağılım fonksiyonları sırasıyla Şekil 6.42 ve Şekil 6.43'de verilmiştir.

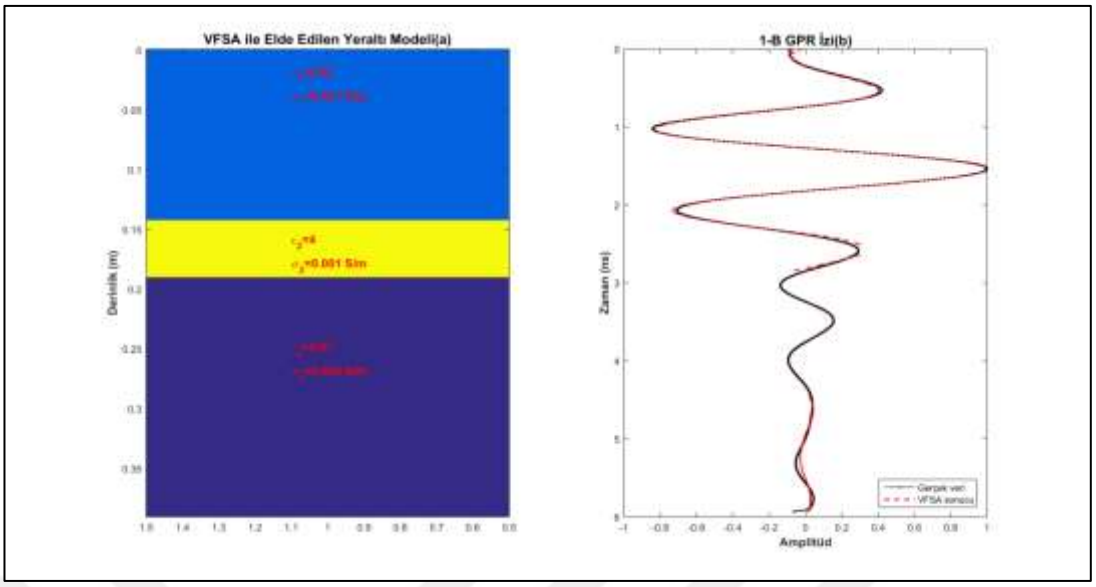


Şekil 6.42. Kum havuzu üzerinde alınan yer radarı ölçüsünün VFSA yöntemi ile tahmin edilen parametrelerin frekans dağılımları



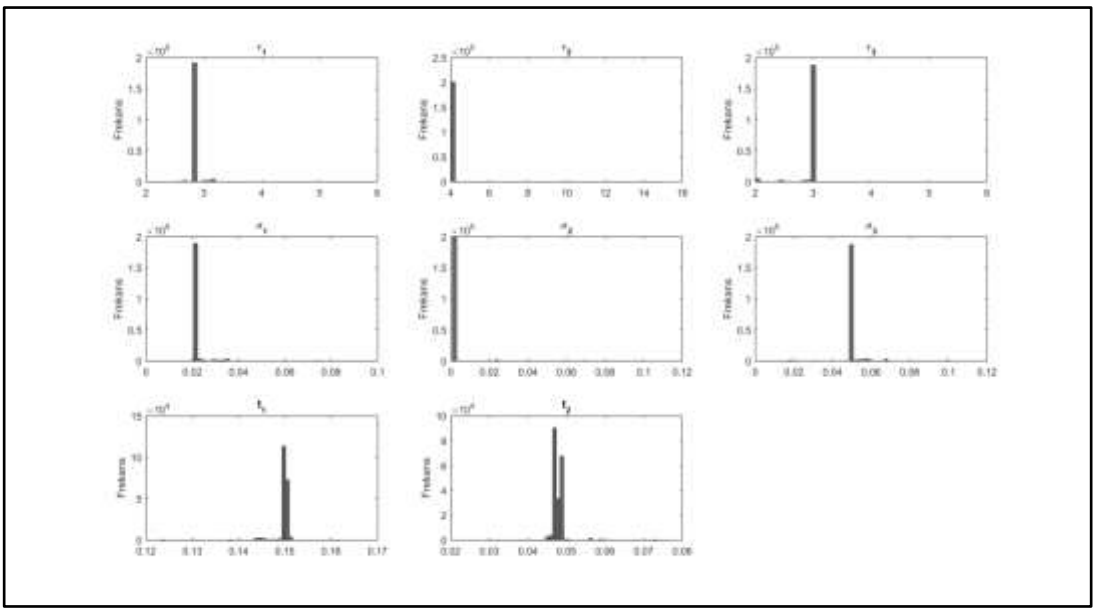
Şekil 6.43. Kum havuzu üzerinde alınan yer radarı ölçüsünün VFSA yöntemi ile tahmin edilen parametrenin olasılık yoğunluk fonksiyonu

Kemik üzerinde alınan yer radarı ölçüsü ilk gelen dalga, kaynak dalgacığı olarak kullanılıp VFSA ile tekrar çözüldüğünde kemiğin kalınlığında ve RMS hatada iyileşme olduğu görülmüştür (Şekil 6.44).

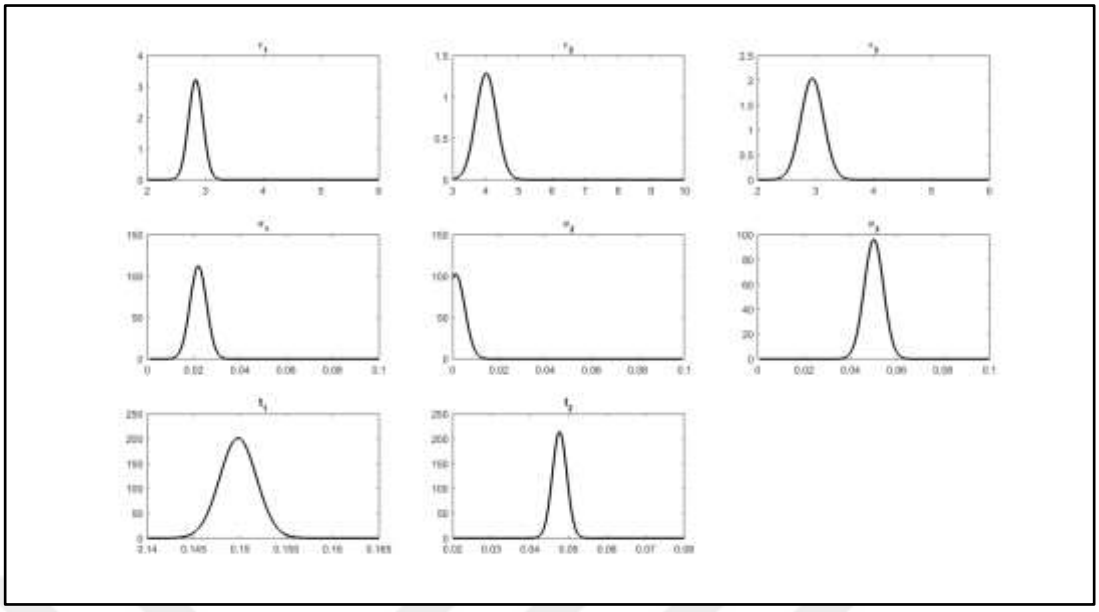


Şekil 6.44. Kum havuzu üzerinde alınan ölçünün yer altı modeli a) VFSA ile elde edilen yer altı modeli, b) bir boyutlu GPR izi ve ilk gelen dalga kullanılarak hesaplanan GPR izi

VFSA ile tahmin edilen parametreler; birinci tabakanın parametreleri, $\varepsilon_1 = 2{,}82$, $\sigma_1 = 0{,}021$ S/m, ikinci tabakanın parametreleri, $\varepsilon_2 = 4$, $\sigma_2 = 0{,}001$ S/m, üçüncü tabakanın parametreleri ise $\varepsilon_3 = 2{,}97$, $\sigma_3 = 0{,}049$ S/m, olarak belirlenmiştir. Birinci tabakanın kalınlığı 14,6 cm ikinci tabakanın kalınlığı ise 4,6 cm olarak tahmin edilmiştir. RMS hata % 2,2 olarak hesaplanmıştır. Tahmin edilen parametrelerin frekans dağılımları ve olasılık dağılım fonksiyonları sırasıyla Şekil 6.45 ve Şekil 6.46'de verilmiştir.



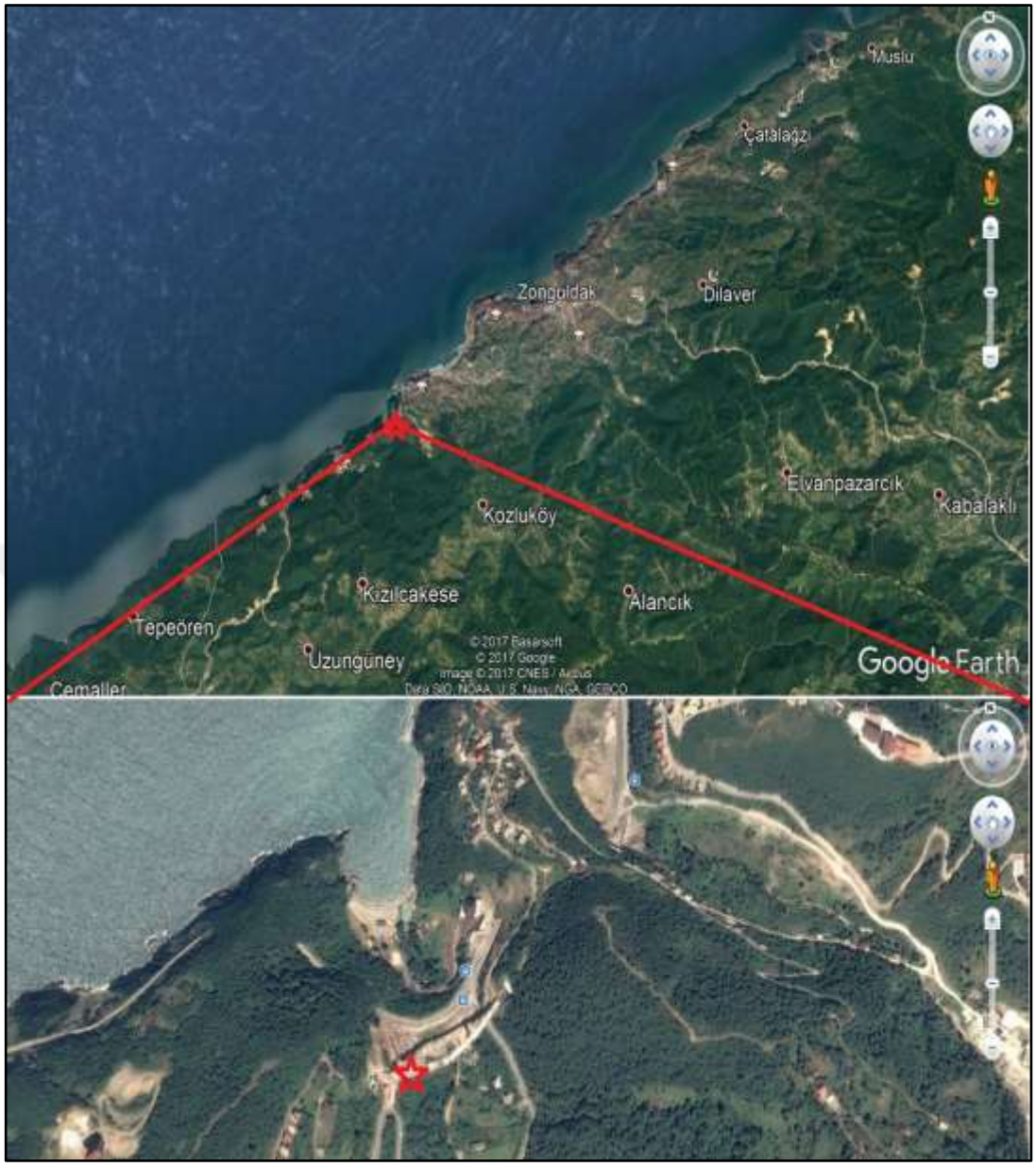
Şekil 6.45. Kum havuzu üzerinde alınan yer radarı ölçüsünün VFSA yöntemi ile tahmin edilen parametrelerin frekans dağılımları



Şekil 6.46. Kum havuzu üzerinde alınan yer radarı ölçüsünün VFSA yöntemi ile tahmin edilen parametrenin olasılık yoğunluk fonksiyonu

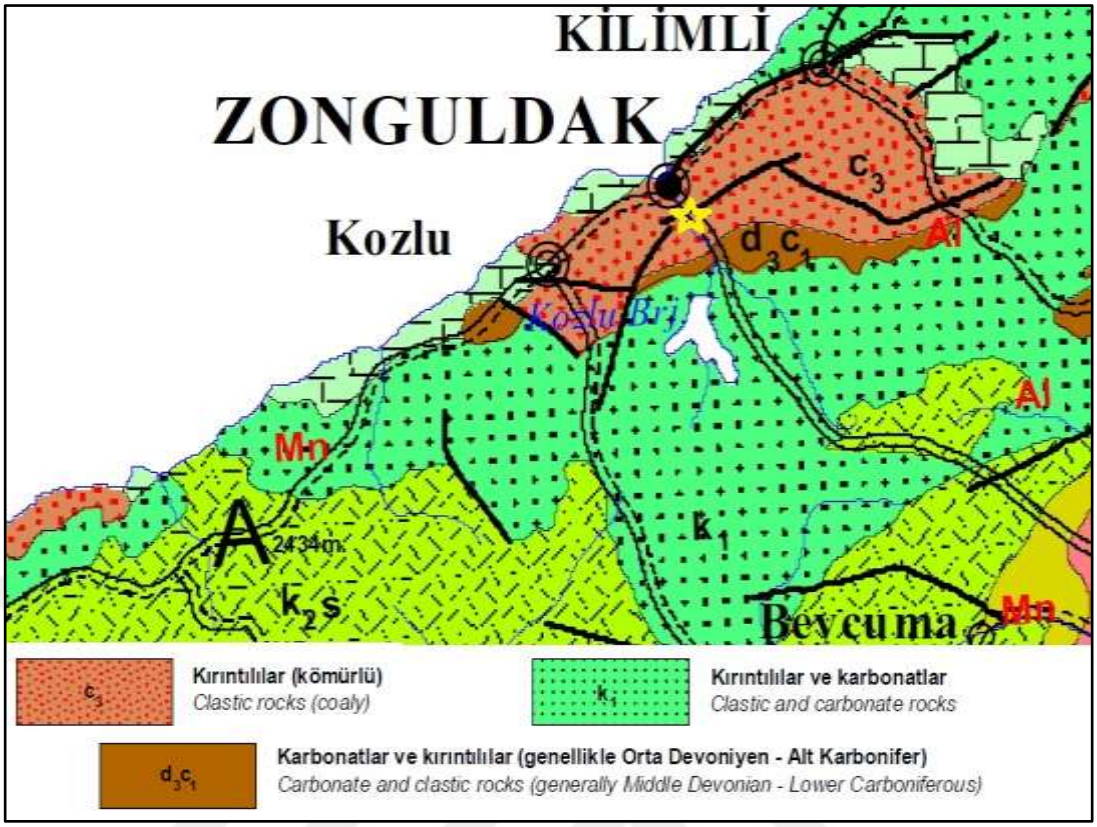
6.4.3. Zonguldak'ta alınan yer radarı ölçüsünün ters çözümü

Zonguldak İli Ereğli İlçesi yolu üzerinde 20'şer metreden oluşan 14 profil yer radarı ölçüsü alınmıştır. Yer radarı ölçüsünde, 300 MHz kapalı anten kullanılmıştır. Yer radarı ölçüsünün alındığı bölge, kireçtaşlarından oluşmakta ve bölgenin çevresinde ise kırıntılı (kömürlü) birimler bulunmaktadır. Araştırma bölgesinin jeoloji haritası verilmiştir. (Şekil 6.48). Bölgede yapılan araştırma sondajlarında ise kireçtaşları, yer yer kömür damarları ve kumtaşları kesilmiştir (Şekil 6.52).

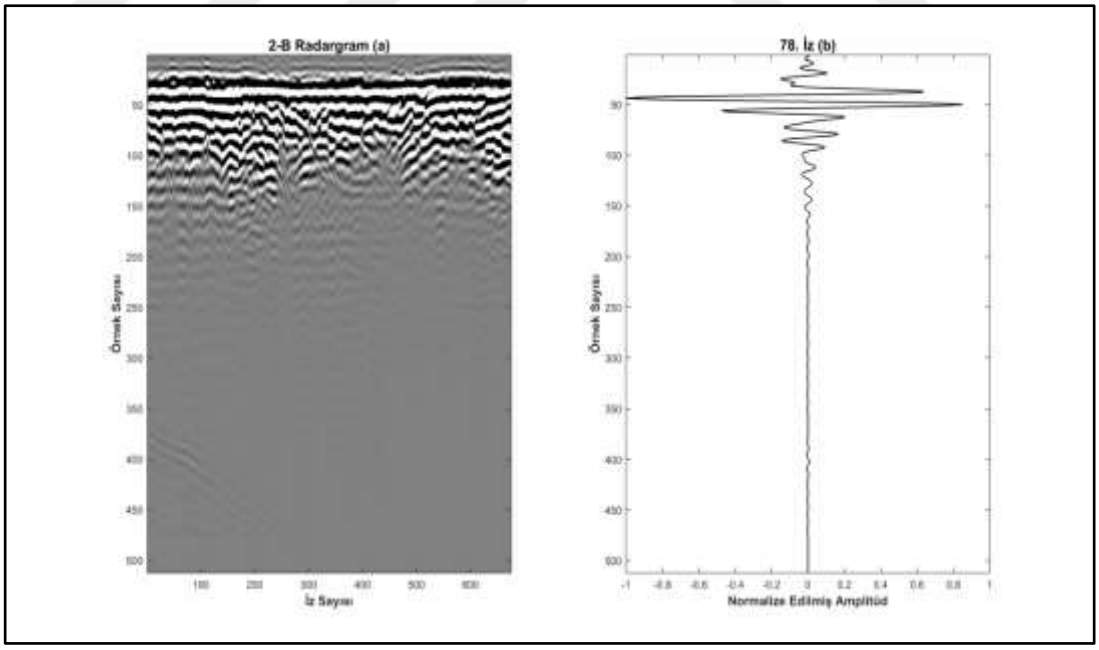


Şekil 6.47. İnceleme alanı

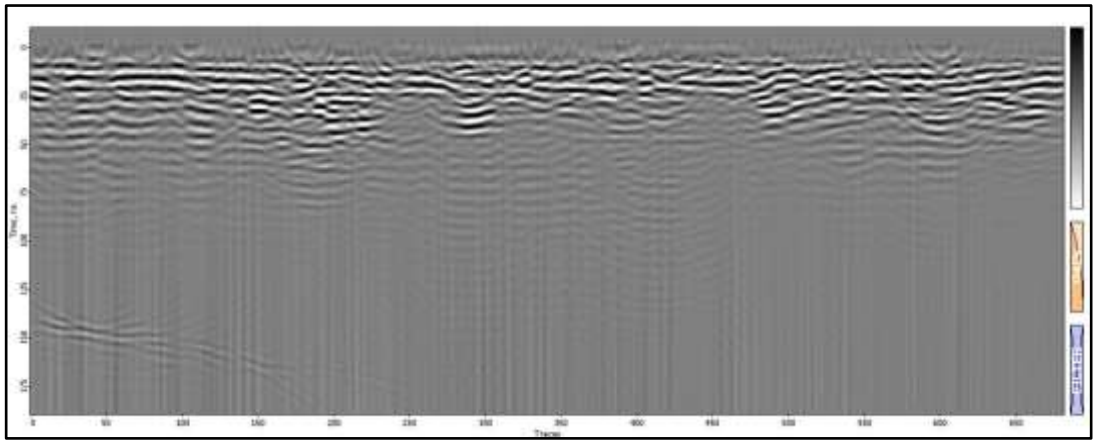
Onuncu profil bir boyutlu ters çözüm için seçilmiştir ve profil 674 izden ve her bir iz 512 örnekten oluşmaktadır. Ters çözüm için 78. iz kullanılmıştır (Şekil 6.49).



Şekil 6.48. Araştırma alanı jeoloji haritası (MTA, 2002)

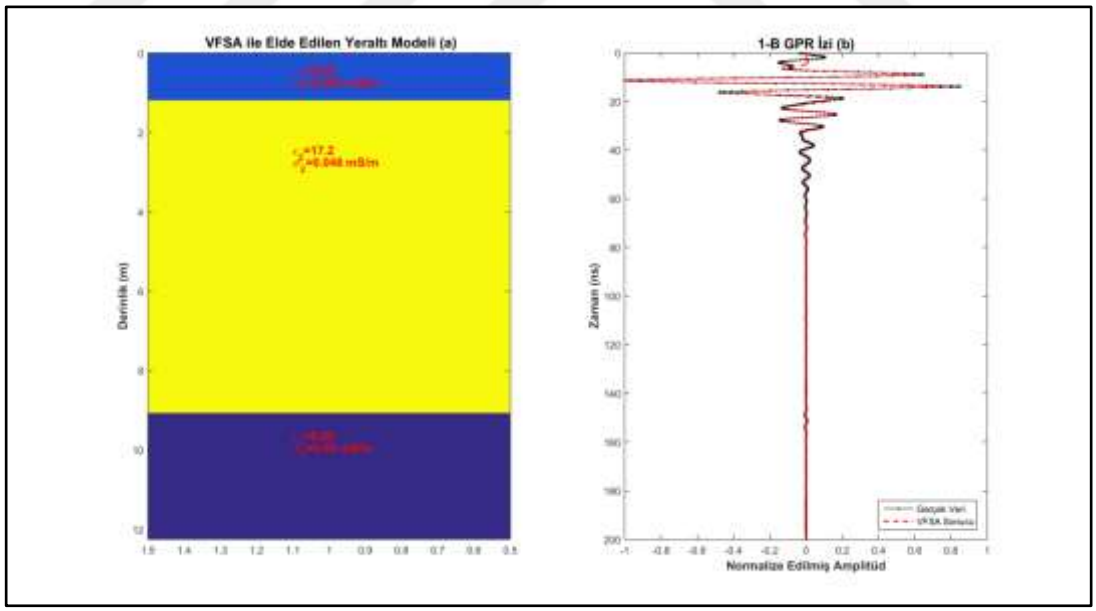


Şekil 6.49. a) Zonguldak bölgesinde alınan yer radarı ölçüsü, b) GPR ölçüsüne ait 78. iz



Şekil 6.50. Onuncu profilin veri işlem uygulanmış hali

Zonguldak İli'nde alınan yer radarı ölçüsü, üç tababakalı olarak değerlendirilmiştir ve ters çözüm ham iz ile yapılmıştır. VFSA optimizasyonu ile elde edilen parametreler; birinci tabakanın parametreleri, ε_1=8,98, σ_1=0,002 S/m, ikinci tabakanın parametreleri, ε_2=17,2, σ_2=0,046 S/m, üçüncü tabakanın parametreleri ise ε_3=8,00, σ_3=0,05 S/m olarak tahmin edilmiştir. Birinci tabakanın kalınlığı 1,22 m ikinci tabakanın kalınlığı ise 7,86 m hesaplanmıştır (Şekil 6.51).



Şekil 6.51. Zonguldak'ta alınan ölçünün yer altı modeli a) VFSA ile elde edilen yer altı modeli, b) bir boyutlu GPR izi ve hesaplanan GPR izi

VFSA ile tahmin edilen yerin elektriksel özellikleri ve tabaka kalınlıkları, iki nolu araştırma sondajına yakın olduğundan sondajda kesilen birimlerle karşılaştırılmıştır.

İki nolu sondaj kuyusuna ait sandık fotoğrafı Şekil 6.52'de verilmiştir. 2 nolu kuyuda kesilen birimler Tablo 6.1'de verilmiştir.

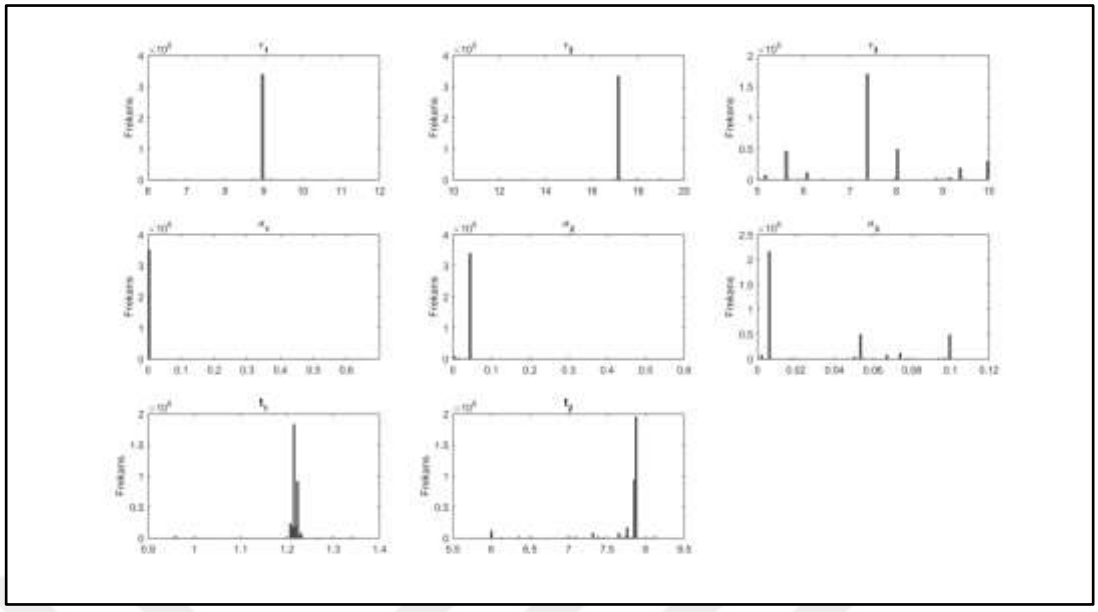
Tablo 6.1. İki nolu kuyuda kesilen birimler

Derinlik (m)	**Kesilen birimler**
0.00-1,50 m	Açık gri renkli, sarımsı blok halinde kireç taşı
1,50-9,00 m	Kömür bantlı kum taşı
9,00-13,50 m	Açık gri renkli pürüzlü, kırıklı çatlaklı orta derece ayrışmış kireç taşı

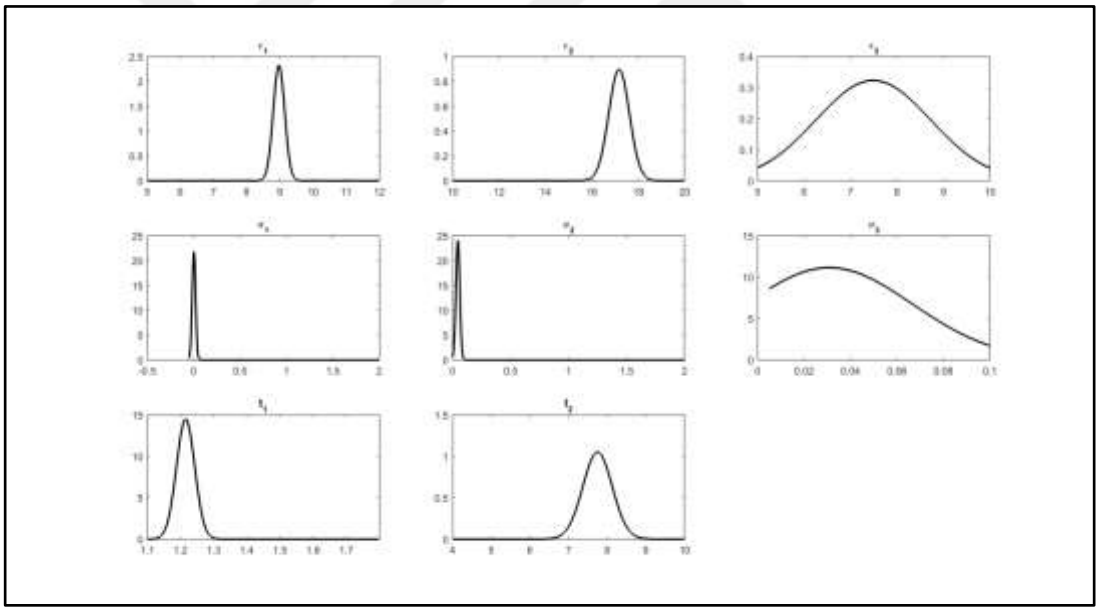


Şekil 6.52. İki nolu sondaj kuyusunun sandık fotoğrafı

VFSA yöntemi ile tahmin edilen tabaka kalınlıklarının ve parametrelerin araştırma sondajında kesilen birimler ile örtüştüğü görülmüştür. Optimizasyon ile edilen parametrelerin frekans dağılımları ve olasılık yoğunluk fonksiyonları verilmiştir (Şekil 6.53, Şekil 5.64).



Şekil 6.53. Zonguldak'ta alınan yer radarı ölçüsünün VFSA yöntemi ile tahmin edilen parametrelerin frekans dağılımları



Şekil 6.54. Zonguldak'ta alınan yer radarı ölçüsünün VFSA yöntemi ile tahmin edilen parametrenin olasılık yoğunluk fonksiyonu

SONUÇLAR

Matlab programlama dili kullanılarak sonlu farklar yöntemi ile 1B ve 2B yer radarı düz çözüm programı geliştirilmiştir ve sentetik radargramlar elde edilmiştir. Yer içerisinde farklı geometrik ve fiziksel parametrelere sahip yapıların bir boyutlu ve iki boyutlu ortamda radargramlara etkileri incelenmiştir. Yer altında olası yapıların fiziksel parametreleri (dielektrik sabiti, manyetik geçirgenlik, iletkenlik) ve geometrik parametreleri (derinlik, şekil vb.) girilerek bir boyutlu ve iki boyutlu modeller oluşturulmuştur. Ayrıca bir boyutlu ve iki boyutlu yer radarı düz çözüm programı aynı ortamlar için hazırlanıp birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

Bir boyutlu ortamda hazırlanan sentetik radargramlar çok hızlı benzetimli tavlama (VFSA) yöntemi ile yer içerisindeki yapıların fiziksel ve geometrik parametreleri hesaplanmıştır. İki tabakalı ve üç tabakalı ortamlar için hazırlanan radargramların ters çözüm işlemi sonucunda hesaplanan parametrelerin sentetik radargramların parametrelerine çok yakın olduğu görülmüştür.

Bir boyutlu ortamda ters çözüm işlemi sentetik veriler dışında gerçek verilere de uygulanmıştır. Beton blok üzerinde, kum havuzu ve Zonguldak İli Ereğli İlçesi'nde alınan yer radarı ölçüsünde, yer içerisindeki yapıların, VFSA yöntemi ile parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Üç adet gerçek veri çok düşük RMS hata ile parametreleri hesaplanmıştır. Zonguldak İli'nde alınan yer radarı ölçüsünün model sonuçları, arazide yapılan araştırma sondajı ile karşılaştırılmıştır. Model sonuçlarının, sondajda elde eldilen verilere oldukça yakın olduğu görülmüştür.

Yer radarı yönteminde iki boyutlu ters çözümler çok uzun süreceğinden, VFSA ile ters çözüm bu çalışmada bir boyutlu ortamla sınırlandırılmıştır. Bir boyutlu ortamda VFSA yöntemi ile yerin parametrelerinin bir saat gibi kısa bir sürede hesaplanması radargramların yorumlanmasına büyük katkı sağlayacaktır. Sonuç olarak elde eldilen parametreler gerçek yer altının dielektrik, iletkenlik ve manyetik geçirgenlik değeri

olduğu için radargramların yorumlanması açısından oldukça önemli bilgiler içermektedir.

KAYNAKLAR

Annan A. P., *Ground Penetrating Radar Principles, Procedures & Applications*, Sensors and Softwares Inc., 1st ed., Canada, 2004.

Balanis C. A., *Advanced Engineering Electromagnetics*, 1st ed., John Willey&Sons, Canada, 1989.

Berenger J., A Perfectly Matched Layer for the Absorption of Electromagnetic Waves, *Journal Of Computational Physics*, 1994, **114**, 185-200.

Cook J. C., Status of ground-probing radar and some recent experience, *Proc. Conf. Subsurface Exploration for Underground Excavation and Heavy Construction. Am. Soc. Civ. Eng*., 213-232, 1974.

Cook J. C., Radar transparencies of mine and tunnel rocks, *Geophysics*, 1975, **40**, 865-885.

Elsherbeni A. Z., Demir V., *Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics with MATLAB Simulations*, 1st ed., Scitech Publishing, Danvers, 2009.

Georgakopoulos S. V., Birtcher C. R., Balanis C. A., Renault R.A., Higherorder finite-difference schemes for electromagnetic radiation, scattering and penetration, Part 1: theory, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2002, **44**, 134 - 142.

Irving J.D., Knight, R., Numerical modeling of ground-penetrating radar in 2-D using MATLAB, *Computers & Geosciences*, 2005, **32**, 1247-1258.

Irving J., Improving tomographic estimates of subsurface electromagnetic wave velocity obtained from ground-penetrating radar data, Doctor of Philosophy, Stanford University, San Francisco, 2006.

Kaplanvural İ., Yer Radarı Verilerinin Modellenmesi ve Yorumlanması, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2011, 301629.

Knödel E., Krummel M., Lanke J., *Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten*, Bd.3, Geophysik Springer-Verlag, Berlin- Heidelberg, 1997.

Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Jeoloji Etütleri Dairesi, *1/500.000 Ölçekli Jeoloji Haritası*, Ankara, 2002.

Mala Geoscience, Basic Radar Theory, *Fundamentals of Ground Penetrating Radar (CD)*, Sweden, 2003.

Özkap K., Arkeojeofizik Çalışmalarda GPR Verilerine Güncel Veri-İşlem Yöntemlerinin Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2008, 233158.

Öztürk K., *Elektrik ve Elektromanyetik Prospeksiyon Yöntemleri*, İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İstanbul, 1995.

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

Rosen B., Ingber L., Genetic Algorithms and Very Fast Simulated Reannealing a Comparison, *Mathematical and Computer Modeling*, 1992, **16,** 87-100.

Sadiku M.N.O., *Numerical Techniques in Electromagnetics*, 2nd Ed., CRC Press, Florida, 2001.

Sen M. K., Stoffa P. L., *Global Optimization Methods in Geophysical Inversion*, 2nd Ed., Cambridge University Press, Newyork, 2013.

Stern W., Principles methods and results of electrodynamic thickness measurements of glacier ice, *Zeitschrift für Gletscherkunde*, 1930, **18**, 18-24.

URL-1: http://www.radsys.lv, (Ziyaret tarihi: 13 Kasım 2017).

Yang W. Y., Cao W., Chung T., Morris J., *Applied Numerical Methods Using Matlab*, 1st ed., A John Wiley & Sons, New Jersey, 2005.

Yang X., *Engineering Optimization An Introduction with Metaheuristic Applications*, 1st ed., A John Wiley & Sons, New Jersey, 2010.

Yee K.S., Numerical solution of initial boundary problems involving Maxwell's equations in isotropic media, *IEEE Trans. Ant. Prop*., 1966, **14**(3), 302 - 307.

EKLER

Ek-A

Denklem (1.1) ve (1.2) bünye denklemleri yerine yazıldığında;

$$\vec{\nabla}\times\vec{H}=\varepsilon\frac{\partial\vec{E}}{\partial t}+\sigma^{e}\vec{E}+\vec{J}_{i} \tag{A.1}$$

$$\vec{\nabla}\times\vec{E}=-\mu\frac{\partial\vec{H}}{\partial t}-\sigma^{m}\vec{H}-\vec{M}_{i} \tag{A.2}$$

Denklem (A.1) ve (A.2) elde edilir. Denklem (A.1) ve (A.2)'de $\vec{J}=\vec{J}_{e}+\vec{J}_{i}=\sigma^{e}\vec{E}+\vec{J}_{i}$ ve $\vec{M}=\vec{M}_{e}+\vec{M}_{i}=\sigma^{m}\vec{H}+\vec{M}_{i}$ ifade eder. Bu iki adet vektör denklemi kartezyen koordinat sisteminde üç boyutlu ortam için altı adet skaler,

$$\frac{\partial H_{x}}{\partial t}=\frac{1}{\mu_{x}}\left(\frac{\partial E_{z}}{\partial y}-\frac{\partial E_{y}}{\partial z}-\sigma_{x}^{m}H_{x}-M_{ix}\right) \tag{A.3}$$

$$\frac{\partial H_{y}}{\partial t}=\frac{1}{\mu_{y}}\left(\frac{\partial E_{z}}{\partial x}-\frac{\partial E_{x}}{\partial z}-\sigma_{y}^{m}H_{y}-M_{iy}\right) \tag{A.4}$$

$$\frac{\partial H_{z}}{\partial t}=\frac{1}{\mu_{z}}\left(\frac{\partial E_{x}}{\partial y}-\frac{\partial E_{y}}{\partial x}-\sigma_{z}^{m}H_{z}-M_{ix}\right) \tag{A.5}$$

$$\frac{\partial E_{x}}{\partial t}=\frac{1}{\varepsilon_{x}}\left(\frac{\partial H_{z}}{\partial y}-\frac{\partial H_{y}}{\partial z}-\sigma_{x}^{e}E_{x}-J_{ix}\right) \tag{A.6}$$

$$\frac{\partial E_{y}}{\partial t}=\frac{1}{\varepsilon_{y}}\left(\frac{\partial H_{x}}{\partial z}-\frac{\partial H_{z}}{\partial x}-\sigma_{y}^{e}E_{y}-J_{iy}\right) \tag{A.7}$$

$$\frac{\partial E_{z}}{\partial t}=\frac{1}{\varepsilon_{z}}\left(\frac{\partial H_{y}}{\partial x}-\frac{\partial H_{x}}{\partial y}-\sigma_{z}^{e}E_{z}-J_{iz}\right) \tag{A.8}$$

denklem halinde yazılabilir (Elsherbeni ve Demir, 2009).

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Kara K. B., Zonguldak/Ereğli Yolu Üzerinde Kömür ve Kömür Damarlarının Yer Radarı İle Belirlenmesi, *6. Yer Elektrik Çalıştayı*, Kocaeli, 23-25 Mayıs 2016.

Kara K. B., Pekşen E., 1D Fullwaveform Optimization Using Simulated Annealing Method on GPR Data, *9. Congress of the Balkan Geophysical Society*, Antalya, 5-9 November 2017.

Kara K. B., Sonlu Farklar Yöntemi ile 1-B ve 2-B Yer Radarı Modellemesi, *Uygulamalı Yer Bilimleri Dergisi*, 2017, **16**(2), 13-28.

ÖZGEÇMİŞ

1990 yılında Ağrı'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Hatay'ın Dörtyol İlçesinde tamamladı. 2010 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği bölümünden 2014 yılda mezun oldu. 2015-2016 eğitim öğretim yılı bahar döneminde Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda, Yüksek Lisans Öğrenimine başladı.