

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ÇOK KANALLI YÜZEY DALGASI VERİLERİNİN
DÜŞEY ELEKTRİK SONDAJI VERİLERİ İLE BİRLEŞİK TERS ÇÖZÜMÜ**

DOKTORA TEZİ

Jeofizik Yük. Müh. Mustafa ŞENKAYA

**EKİM 2016
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ÇOK KANALLI YÜZEY DALGASI VERİLERİNİN DÜŞEY ELEKTRİK SONDAJI
VERİLERİ İLE BİRLEŞİK TERS ÇÖZÜMÜ**

Mustafa ŞENKAYA

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"DOKTOR (JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 01 / 11 / 2016

Tezin Savunma Tarihi : 17 / 11 / 2016

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hakan KARSLI

Trabzon 2016

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalında
Mustafa ŞENKAYA Tarafından Hazırlanan

ÇOK KANALLI YÜZEY DALGASI VERİLERİNİN DÜŞEY ELEKTRİK SONDAJİ
VERİLERİ İLE BİRLEŞİK TERS ÇÖZÜMÜ

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 01 /11/2016 gün ve 1674 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
DOKTORA TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri


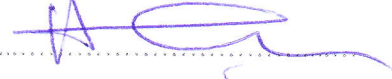


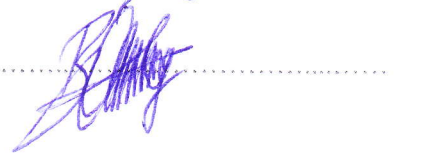
Başkan : Prof. Dr. Fikri BULUT

Üye : Prof. Dr. Hakan KARSLI

Üye : Prof. Dr. Kenan GELİŞLİ

Üye : Prof. Dr. Çoşkun SARI

Üye : Doç. Dr. Bülent ORUÇ

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında son yıllarda S-dalga hızının elde edilmesinde klasik yöntemlere göre daha fazla tercih edilen Çok Kanallı Yüzey Dalgası verilerinin, Düşey Elektrik Sondajı verileri ile birleşik ters çözümü gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan birleşik ters çözüm stratejisi ile Rayleigh dispersiyon eğrisinin tekil çözümünde, tabaka kalınlıklarına bağlı çok çözümlülük sorunu indirgenmeye çalışılmıştır. Yöntem, ilk önce karakteristik sentetik modeller üzerinde ve daha sonra gerçek saha verileri üzerinde test edilip başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir (Proje No:8902). Ayrıca, tez çalışmalarımın yurt dışında sürdürdüğüm bölümleri TÜBİTAK tarafından 2214-A Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma programı ile desteklenmiştir. Her iki kurumda katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Lisans dönemlerimden bu yana birlikte çalıştığım, bana hem ustalık hem de ağabeylik eden, alçak gönüllüğü ve güzel yürekliliği ile bizlere daima örnek olan değerli hocam Prof. Dr. Hakan Karslı' ya teşekkürü bir borç bilirim. Sahip oldukları imkanları düşünmeden benimle paylaşan, yurt dışı çalışmalarım sırasında danışmanlığımı kabul eden ve beni ileriye taşıyan kıymetli bilim insanları Doç. Dr. Valentina Socco ve Prof. Dr. Sebastiano Foti' ye (Politecnico di Torino, İtalya), faydalı yorum ve düşüncelerini benimle paylaşan arkadaşım Dr. George Kritikakis' e (Technical University of Crete, Yunanistan), yaptığı çalışmalarla bana rehber olan, ilk yurt dışı çalışmalarımı yönlendiren ve beni ağırlayan Prof. Dr. Michael Dobroka' ya (University of Miskolc, Macaristan), çalışmalarım sırasında sahip oldukları imkanları benimle paylaşan Doç. Dr. Beatriz Benjumea ve Prof. Dr. Juanjo Ledo Fernandez'e (Universitat de Barcelona, İspanya) teşekkürlerimi sunarım. Çalışma süresince yararlı katkılarından dolayı tez izleme jürisi Prof. Kenan Gelişli ve Prof. Dr. Fikri Bulut'a teşekkürler. Arazi çalışmaları süresince desteğini benden esirgemeyen çalışma arkadaşım Jeofizik Yük. Müh. Recep Güney' e, yine veri toplamada yardımcı olan KTÜ Jeofizik Müh. öğrencilerinden Gültekin Sever, Recep Barış Kaynak ve Tuncer Batuhan Yılmaz' a teşekkürler.

İyi insan olmayı ve beni ben yapan değerleri öğrettiği için aileme, sevgisini her koşulda benden esirgemeyen, bana benden fazla değer veren ve bunu hissettiren eşim Gülseda Vanlı Şenkaya' ya sonsuz teşekkürler.

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora tezi olarak sunduğum “Çok Kanallı Yüzey Dalgası Verilerinin Düşey Elektrik Sondajı Verileri ile Birleşik Ters Çözümü” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım olan Prof. Dr. Hakan KARSLI’ nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, ilgili kodları kendim yazdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 17/11/2016



Mustafa ŞENKAYA

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER DİZİNİ	XV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Birleşik Ters Çözüm Felsefesi.....	3
1.3. Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi (ÇKYDA) Yöntemi.....	6
1.4. Rayleigh Dalgası Dispersiyon (RD) Eğrisinin Modellenmesi.....	11
1.4.1. Yarı Sonsuz Homojen Ortamda Rayleigh Dalgası Hız Denklemi.....	11
1.4.2. Elastik Ortamda Rayleigh Dalgası Yer Değiştirme Denklemine (Özdeğer Fonksiyonunun) Oluşturulması	16
1.4.2.1. Rayleigh Özdeğer Probleminin Çözüm Teknikleri	21
1.4.3. Bir Yapay Tabaka Modeli İçin Rayleigh Dalgası Dispersiyon Eğrisinin Modelleme Aşamaları.....	22
1.5. Düşey Elektrik Sondajı (DES) Verilerinin Doğrusal Süzgeçler Yardımıyla Modellenmesi	27
1.5.1. Doğrusal Süzgeçler	28
1.5.2. Bir Yapay Tabaka Modeli İçin Görünür Özdirenç Eğrisinin Modelleme Aşamaları	31
1.6. ÇKYD ve DES Verilerinde Model Parametreleri Duyarlılığı.....	35
1.7. Ters Çözüm.....	40
1.7.1. Doğrusal Olmayan Problemlerin Ters Çözümü	41
1.8. Birleşik Ters Çözüm Akışının Oluşturulması.....	41
1.8.1. Algoritma	41
1.8.2. Kısmi Türev Matrisinin (Jacobian, G) Oluşturulması	43
1.8.3. Yaklaşım Hatası Kontrolü ve Çözüm Sonlandırıcı Mekanizmalar	45

2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	48
2.1.	Kuramsal Uygulamalar.....	48
2.2.	Saha Verisi Uygulamaları.....	68
2.2.1.	Çalışma Alanı ve Genel Jeolojisi.....	69
2.2.2.	Veri Toplama ve Veri Setlerinin Hazırlanması.....	71
2.2.3.	Saha Verilerinin Değerlendirilmesi ve Bulgular.....	77
3.	TARTIŞMA VE ÖNERİLER.....	127
4.	SONUÇLAR.....	133
5.	KAYNAKLAR.....	136
	ÖZGEÇMİŞ	



Doktora Tezi

ÖZET

ÇOK KANALLI YÜZEY DALGASI VERİLERİNİN DÜŞEY ELEKTRİK SONDAJİ VERİLERİ İLE BİRLEŞİK TERS ÇÖZÜMÜ

Mustafa ŞENKAYA

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Hakan KARSLI
2016, 146 Sayfa

Rayleigh dalgası dispersiyon eğrisi (RD) geleneksel tekil ters çözümünde, RD' nin modellenmesinde S-dalga hızından sonra ikinci önemli parametre olan tabaka kalınlığı doğru ve çözüm boyunca sabit tutulan bir giriş parametresi olarak kabul edilir. Tabaka kalınlığının kestirimi genellikle çok hassas yapılamadığından, bu bilginin çözüm boyunca sabit tutulması RD tekil çözümünü çok çözümlülük tuzağına düşürmektedir. Bu çalışmada, RD verilerinin Düşey Elektrik Sondajı (DES) verileri ile birleşik ters çözümü gerçekleştirilerek bu sorun önlenmeye çalışılmıştır. Önerilen birleşik ters çözüm akışı, iki yöntemi ortak parametre olan tabaka kalınlığı ile birbirine bağlamakta ve tek bir Jacobian matris içinde toplamaktadır. Geliştirilen birleşik ters çözüm algoritmasında doğrusal olmayan ağırlıklandırılmış-sönümlü en küçük kareler çözümü, değişken sönüm faktörü stratejisi ile beraber kullanılmıştır. Yöntemin ilk denemeleri 6 yapay yeraltı modeli üzerinde başarılı şekilde tamamlandıktan sonra, saha uygulamaları Trabzon ilinde 10 farklı profilde toplanan saha verileri ile yapılmıştır. Ayrıca saha verilerinin çözümü sırasında sismik ilk varışlar da ters çözüm sürecine dâhil edilmiştir. Yapılan çalışmalar, oluşturulan birleşik ters çözüm akışının, RD tekil çözümlerinde kalınlık bilgisine bağlı problemleri büyük oranda indirgediğini ve çözümün başlangıç modeline olan bağımlılığını önemli derecede azalttığını göstermiştir. Sonuç olarak oluşturulan birleşik çözüm yapısı karmaşık ve zorlu durumlarda, hedef yer altı modeline ait herhangi bir ön bilgi bulunmaması durumunda da güvenilir yaklaşımlar elde edilmesini sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Yüzey Dalgası, Birleşik Ters Çözüm, Düşey Elektrik Sondajı, Rayleigh Dispersiyon Eğrisi, S-Dalga Hızı

PhD. Thesis

SUMMARY

JOINT INVERSION OF MULTI-CHANNEL SURFACE WAVE DATA WITH VERTICAL ELECTRICAL SOUNDING DATA

Mustafa ŞENKAYA

Karadeniz Technical University
The graduate school of natural and applied sciences
Geophysical engineering department
Supervisor: Prof. Dr. Hakan KARSLI
2016, 146 Pages

In the traditional inversion of the Rayleigh Dispersion Curve (RDC), layer thickness, which is the second most sensitive parameter of RDC modeling after S-wave velocity, is assumed as correct and fixed initial parameter. Because the estimation of the layer thickness is typically not precise, keeping as fixed of this information during inversion may result in the traditional RDC inversions getting trapped in non-uniqueness. In this study, we try to avoid this issue by using a joint inversion of the RDC data with Vertical Electric Sounding (VES) data. The key idea of the proposed joint inversion scheme is to link both methods with layer thickness and to combine in a single Jacobian matrix. In the proposed joint inversion algorithm, the non-linear weighted-damped least square method is used with variant damping factor strategy. After successfully tested of the proposed joint method on 6 different and characteristic synthetic models, the field field applications were done on field data from 10 different profiles around Trabzon city center and around. Moreover, on the field data inversion, first breaks of seismic data are implicated in the joint scheme. As a result of studies, the joint inversion allows to reduce the ambiguities depended on layer thickness in RD separate inversion, in this way the dependence to initial model of inversion process is significantly reduced. Consequently, the proposed joint inversion scheme allows providing reliable approximations even in complex and challenging situations and without using any a priori information.

Keywords: Surface Wave, Joint Inversion, Vertical Electricity Sounding, Rayleigh Dispersion Curve, S-Wave Velocity

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. İki farklı Jeofizik verinin Birleşik Yorum aşamaları (Gallardo, 2004' ten değiştirilerek)	4
Şekil 1.2. İki farklı jeofizik verinin ardışık ters çözüm aşamaları (Gallardo, 2004).....	5
Şekil 1.3. İki farklı jeofizik verinin iş birliği ters çözüm aşamaları (Gallardo, 2004).....	6
Şekil 1.4. İki farklı jeofizik verinin eş zamanlı birleşik ters çözüm aşamaları (Gallardo, 2004)	6
Şekil 1.5. ÇKYDA yöntemi aşamaları. (a) veri toplama, (b) veri işlem, (c) ters çözüm (Strobbia, 2003' ten değiştirilerek).....	8
Şekil 1.6. Dalga yayılım yönü ve koordinat sistemi.....	11
Şekil 1.7. Her frekans için hesaplanan dalga sayısı değerlerinin frekans-dalga sayısı düzleminde gösterimi.....	26
Şekil 1.8. Her frekanstaki dalga sayıları yardımıyla elde edilen Rayleigh dalgası faz hız değerleri. Dispersiyon eğrisi, aynı mod için tanımlanan hız değerlerinin birleştirilmesi ile oluşturulabilir.....	26
Şekil 1.9. Yapay yer altı parametreleri için elde edilen görünür öz direnç eğrisi ve değerleri	35
Şekil 1.10. Basit 4 tabakalı sentetik model için hesaplanan duyarlılık değerleri, (a) RD eğrisi için, (b) DES eğrisi için.....	37
Şekil 1.11. Basit bir yer altı modelinden üretilen yapay veri için üç farklı başlangıç modeli ile yapılmış ters çözümlerden elde edilen kolon modeller ve model tepkileri....	38
Şekil 1.12. Normal dispersif karakterdeki bir dispersiyon eğrisinin dört farklı giriş modeli ile ters çözümüne ait Vs (i kolonu), h (j kolonu) duyarlılık değerleri ve model ayrımlılık matrisleri (k kolonu).....	39
Şekil 1.13. Çalışmada kullanılan birleşik ters çözüm akış şeması	47
Şekil 2.1. Model 1 gürültüsüz verisi BTÇ sonuçları. (a) RD ve (b) DES verileri, (c) Vs-derinlik ve (d) ρ -derinlik profilleri.....	50
Şekil 2.2. Model parametrelerine ait duyarlılık görüntüleri. (a) ve (b) Model 1 gerçek RD ve DES verileri için, (c) ve (d) Model 1 gürültüsüz BTÇ sonuç RD ve DES verileri için.	51
Şekil 2.3. Farklı sönüm parametresi stratejileri ile yapılan BTÇ'lerin karşılaştırılması. (a) ve (b), Vs ve ρ -derinlik profilleri, (c) değişken sönüm faktörü stratejisi ile yapılan çözümde her bir iterasyonda kullanılan sönüm değerleri.....	52
Şekil 2.4. Model 1 gürültülü verisi BTÇ sonuçları. (a) RD ve (b) DES verileri, (c) Vs-derinlik ve (d) ρ -derinlik profilleri.....	53
Şekil 2.5. (a) Model 1 gürültülü verisi için $\lambda/3$ varsayımına göre tekil ters çözümü, (b)Vs-derinlik profili	55
Şekil 2.6. (a) Model 1 gürültülü verisi 6 tabakalı giriş modeli tekil ters çözümü, (b) Vs-derinlik profili	56
Şekil 2.7. (a) Model 1 gürültülü verisi 6 tabakalı giriş modeli BTÇ sonuçları (a) RD ve (b) DES verileri, (c) Vs-derinlik ve (d) ρ -derinlik profilleri	57

Şekil 2.8. Model 2 gürültüsüz verisi BTÇ sonuçları. (a) RD ve (b) DES verileri, (c) Vs-derinlik ve (d) ρ -derinlik profilleri.....	58
Şekil 2.9. Model 2 gürültülü verisi BTÇ sonuçları. (a) RD ve (b) DES verileri, (c) Vs-derinlik ve (d) ρ -derinlik profilleri.....	59
Şekil 2.10. Model 3 gürültüsüz verisi BTÇ sonuçları. (a) RD ve (b) DES verileri, (c) Vs-derinlik ve (d) ρ -derinlik profilleri.....	60
Şekil 2.11. Model 3 gürültülü verisi BTÇ sonuçları. (a) RD ve (b) DES verileri, (c) Vs-derinlik ve (d) ρ -derinlik profilleri.....	61
Şekil 2.12. Model 4 gürültüsüz verisi BTÇ sonuçları. (a) RD ve (b) DES verileri, (c) Vs-derinlik ve (d) ρ -derinlik profilleri.....	63
Şekil 2.13. Model 4 gürültülü verisi BTÇ sonuçları. (a) RD ve (b) DES verileri, (c) Vs-derinlik ve (d) ρ -derinlik profilleri.....	64
Şekil 2.14. Model 5 gürültüsüz verisi BTÇ sonuçları. (a) RD ve (b) DES verileri, (c) Vs-derinlik ve (d) ρ -derinlik profilleri.....	65
Şekil 2.15. Model 5 gürültülü verisi BTÇ sonuçları. (a) RD ve (b) DES verileri, (c) Vs-derinlik ve (d) ρ -derinlik profilleri.....	66
Şekil 2.16. Model 6 gürültüsüz verisi BTÇ sonuçları. (a) RD ve (b) DES verileri, (c) Vs-derinlik ve (d) ρ -derinlik profilleri.....	67
Şekil 2.17. Model 6 gürültülü verisi BTÇ sonuçları. (a) RD ve (b) DES verileri, (c) Vs-derinlik ve (d) ρ -derinlik profilleri.....	68
Şekil 2.18. Çalışma alanı ve genel jeolojisi (Yılmaz vd., 2005' ten değiştirilerek).....	70
Şekil 2.19. Saha verisi ölçüm noktaları (Google Earth, 2016).....	72
Şekil 2.20. Düşey yığmanın sismik veriler üzerindeki etkisi. (a) tek atış görüntüsü, (b) 5 düşey yığma sonucunda elde edilen sismik veri görüntüsü.....	73
Şekil 2.21. Veri toplamada kullanılan ekipmanlar. (a) PASI 16S24-U, (b) Terrameter LS	73
Şekil 2.22. Saha çalışmalarından görüntüler.....	74
Şekil 2.23. Yalıncağ noktası sismik verilerine ait f-c görüntüleri. (a)' dan (e)' ye 1-5. Atışlar, (f) yığılmış veri.....	75
Şekil 2.24. (a) Yalıncağ noktası tüm verilerinden elde edilen RD verilerinin çizdirilmesi, (b) ölçüm noktası için elde edilen RD ve sapmalar (veriler kırmızı daireler, belirsizlikler mavi çizgilerle temsil edilmiştir).....	76
Şekil 2.25. (a)Yalıncağ noktası DES verisi, (b) yakınlştırılmış görünütü (veriler kırmızı daireler, belirsizlikler mavi çizgilerle temsil edilmiştir).....	77
Şekil 2.26. Giriş modellerinin daha pratik oluşturma adına oluşturulan ara yüz.....	80
Şekil 2.27. (a) Bostancı II noktası için elde edilen yüzey dalgası verisi, (b) veriye ait c-f görüntüsü.....	81
Şekil 2.28. (a) Bostancı II RD eğrisinin $\lambda_{\max}/2$ varsayımına göre tekil ters çözümü, (b) Vs-derinlik profili.....	82
Şekil 2.29. (a) Bostancı II RD eğrisinin $\lambda_{\max}/2.5$ varsayımına göre tekil ters çözümü, (b) Vs-derinlik profili.....	83
Şekil 2.30. (a) Bostancı II RD eğrisinin $\lambda_{\max}/3$ varsayımına göre tekil ters çözümü, (b) çözümün 20-70 Hz arasındaki yakınlştırılmış görünütüsü, (c) Vs-derinlik profili.....	84

Şekil 2.31. Bostancı II noktası 2BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) DES verisi, (c) Vs-derinlik profili, (d) ρ -derinlik profili, (e) RD verisinin 20-70 Hz için yakınlaştırılmış görüntüsü.....	85
Şekil 2.32. Bostancı II noktası 3BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) IVZ verisi, (c) DES verisi, (d) Vs-derinlik profili, (e) Vp-derinlik profili, (f) ρ -derinlik profili.....	86
Şekil 2.33. (a) Moloz noktası için elde edilen yüzey dalgası verisi, (b) veriye ait c-f görüntüsü.....	88
Şekil 2.34. (a) Moloz RD eğrisinin $\lambda_{max}/3$ varsayımına göre tekil ters çözümü, (b) Vs-derinlik profili	88
Şekil 2.35. Moloz noktası 2BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) DES verisi, (c) Vs-derinlik profili, (d) ρ -derinlik profili	89
Şekil 2.36. Moloz noktası 3BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) IVZ verisi, (c) DES verisi, (d) Vs-derinlik profili, (e) Vp-derinlik profili, (f) ρ -derinlik profili.....	90
Şekil 2.37. (a) Bahçecik noktası için elde edilen yüzey dalgası verisi, (b) veriye ait c-f görüntüsü.....	91
Şekil 2.38. Bahçecik noktası giriş 2BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) DES verisi, (c) Vs-derinlik profili, (d) ρ -derinlik profili.....	92
Şekil 2.39. Bahçecik noktası için daha sığ bir giriş modeli kullanılarak elde edilen 2BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) DES verisi, (c) Vs-derinlik profili, (d) ρ -derinlik profili.....	94
Şekil 2.40. Bahçecik noktası 3BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) IVZ verisi, (c) DES verisi, (d) Vs-derinlik profili, (e) Vp-derinlik profili, (f) ρ -derinlik profili.....	95
Şekil 2.41. (a) Yalıncağ noktası için elde edilen yüzey dalgası verisi, (b) veriye ait c-f görüntüsü.....	96
Şekil 2.42. (a) Yalıncağ RD eğrisinin tekil ters çözümü, (b) Vs-derinlik profili	97
Şekil 2.43. Yalıncağ noktası 2BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) DES verisi, (c) Vs-derinlik profili, (d) ρ -derinlik profili	98
Şekil 2.44. Yalıncağ noktası 3BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) IVZ verisi, (c) DES verisi, (d) Vs-derinlik profili, (e) Vp-derinlik profili, (f) ρ -derinlik profili.....	99
Şekil 2.45. (a) MAE noktası için elde edilen yüzey dalgası verisi, (b) veriye ait c-f görüntüsü.....	101
Şekil 2.46. (a) MAE noktası RD eğrisinin derinlikle tabaka kalınlığı artan giriş modeli ile tekil ters çözümü, (b) Vs-derinlik profili	101
Şekil 2.47. (a) MAE noktası RD eğrisinin sabit tabaka kalınlığına sahip giriş modeli ile tekil ters çözümü, (b) Vs-derinlik profili	102
Şekil 2.48. MAE noktası 2BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) DES verisi, (c) Vs-derinlik profili, (d) ρ -derinlik profili	103
Şekil 2.49. MAE noktası 3BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) IVZ verisi, (c) DES verisi, (d) Vs-derinlik profili, (e) Vp-derinlik profili, (f) ρ -derinlik profili.	104
Şekil 2.50. (a) Beşirli Sahil noktası için elde edilen yüzey dalgası verisi, (b) veriye ait c-f görüntüsü.....	106
Şekil 2.51. (a) Beşirli Sahil RD eğrisinin tekil ters çözümü, (b) Vs-derinlik profili.....	107
Şekil 2.52. Beşirli Sahil noktası 2BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) DES verisi, (c) Vs-derinlik profili, (d) ρ -derinlik profili	108

Şekil 2.53. Beşirli Sahil noktası 3BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) IVZ verisi, (c) DES verisi, (d) Vs-derinlik profili, (e) Vp-derinlik profili, (f) ρ -derinlik profili.....	109
Şekil 2.54. Beşirli Sahil noktası birleşik çözümleri düşük frekans bölgesi veri yaklaşımları, (a) 2BÇ, (b) 3BÇ.....	110
Şekil 2.55. (a) Boztepe noktası için elde edilen yüzey dalgası verisi, (b) veriye ait c-f görüntüsü.....	111
Şekil 2.56. (a) Boztepe RD eğrisinin tekil ters çözümü, (b) Vs-derinlik profili	111
Şekil 2.57. Boztepe noktası 2BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) DES verisi, (c) Vs-derinlik profili, (d) ρ -derinlik profili	112
Şekil 2.58. Boztepe noktası 3BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) IVZ verisi, (c) DES verisi, (d) Vs-derinlik profili, (e) Vp-derinlik profili, (f) ρ -derinlik profili.....	113
Şekil 2.59. Boztepe noktası için nispeten daha sığ bir giriş modeli ile yapılan 3BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) IVZ verisi, (c) DES verisi, (d) Vs-derinlik profili, (e) Vp-derinlik profili, (f) ρ -derinlik profili.	114
Şekil 2.60. (a) Konaklar noktası için elde edilen yüzey dalgası verisi, (b) veriye ait c-f görüntüsü.....	115
Şekil 2.61. Konaklar noktası 2BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) DES verisi, (c) Vs-derinlik profili, (d) ρ -derinlik profili	116
Şekil 2.62. Konaklar noktası 3BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) IVZ verisi, (c) DES verisi, (d) Vs-derinlik profili, (e) Vp-derinlik profili, (f) ρ -derinlik profili.....	117
Şekil 2.63. (a) Köşk noktası için elde edilen yüzey dalgası verisi, (b) veriye ait c-f görüntüsü.....	119
Şekil 2.64. (a) Köşk RD eğrisinin tekil ters çözümü, (b) Vs-derinlik profili	119
Şekil 2.65. Köşk noktası 2BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) DES verisi, (c) Vs-derinlik profili, (d) ρ -derinlik profili	120
Şekil 2.66. Köşk noktası 3BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) IVZ verisi, (c) DES verisi, (d) Vs-derinlik profili, (e) Vp-derinlik profili, (f) ρ -derinlik profili.	121
Şekil 2.67. (a) Bostancı I noktası için elde edilen yüzey dalgası verisi, (b) veriye ait c-f görüntüsü.....	122
Şekil 2.68. (a) Bostancı I RD eğrisinin tekil ters çözümü, (b) Vs-derinlik profili	123
Şekil 2.69. Bostancı I noktası 2BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) DES verisi, (c) Vs-derinlik profili, (d) ρ -derinlik profili	124
Şekil 2.70. Bostancı I noktası 3BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) IVZ verisi, (c) DES verisi, (d) Vs-derinlik profili, (e) Vp-derinlik profili, (f) ρ -derinlik profili.....	125
Şekil 3.1. Boztepe Vs-derinlik profilleri (a) 2BÇ, (b) 3BÇ, (c) 2BÇ ve 3BÇ' den elde edilen yarı-sonsuz tabaka Vs duyarlılık değerleri.....	128
Şekil 3.2. Babacan (2013)' teki Çukurçayır ve Pelitli ölçüm sahası ile bu tez çalışmasındaki Boztepe ve MAE ölçüm noktalarının konumları	129
Şekil 3.3. Boztepe 3BÇ çözümü ve yaklaşık tabaka sınırları.....	130
Şekil 3.4. MAE nokası (a) ve (b) 2BÇ ve (c)-(e) 3BÇ çözümleri ve yaklaşık tabaka sınırları	132

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1. ÇKYDA yönteminde etkin veri toplama parametre setleri (Park vd., 2002).....	9
Tablo 1.2. Her frekans için hesaplanan dalga sayısı değerleri	25
Tablo 1.3. Her frekans için hesaplanan dalga sayıları yardımıyla elde edilen Rayleigh faz hızı değerleri	25
Tablo 1.4. Farklı hesaplama türleri için duyarlılık değerlerinin anlamları.....	36
Tablo 1.5. Kullanılan başlangıç modelleri, ters çözüm sonuçları ve yaklaşım hataları	38
Tablo 1.6. Birleşik kısmi türevler matrisinden hesaplanması gereken kısmi türevler. Ortak parametre olan tabaka kalınlığına ait kısmi türevler kırmızı renk ile gösterilmiştir	44
Tablo 2.1. Yapay veri uygulamalarında kullanılan karakteristik yer altı modelleri.....	49
Tablo 2.2. Model 1 gürültüsüz (sol kolon) ve gürültülü (sağ kolon) verileri için yapılan BTÇ detayları.....	53
Tablo 2.3. Model 1 gürültülü verisi 6 tabakalı giriş modeli BTÇ detayları	57
Tablo 2.4. Model 2 gürültüsüz (sol kolon) ve gürültülü (sağ kolon) verileri için yapılan BTÇ detayları.....	60
Tablo 2.5. Model 3 gürültüsüz (sol kolon) ve gürültülü (sağ kolon) verileri için yapılan BTÇ detayları.....	61
Tablo 2.6. Model 4 gürültüsüz (sol kolon) ve gürültülü (sağ kolon) verileri için yapılan BTÇ detayları.....	64
Tablo 2.7. Model 5 gürültüsüz (sol kolon) ve gürültülü (sağ kolon) verileri için yapılan BTÇ detayları.....	66
Tablo 2.8. Model 6 gürültüsüz (sol kolon) ve gürültülü (sağ kolon) verileri için yapılan BTÇ detayları.....	67
Tablo 2.9. Çalışma alanında görülen hâkim formasyonlar (Keskin, 2007' den yararlanılarak oluşturulmuştur).....	71
Tablo 2.10. Bostancı II noktası 2BÇ sonucu detayları	86
Tablo 2.11. Bostancı II noktası 3BÇ sonucu detayları	87
Tablo 2.12. Moloz noktası 2BÇ sonucu detayları	90
Tablo 2.13. Moloz noktası 3BÇ sonucu detayları	91
Tablo 2.14. Bahçecik noktası 2BÇ sonucu detayları.....	93
Tablo 2.15. Bahçecik noktası için daha sığ bir giriş modeli kullanılarak elde edilen 2BÇ sonucu detayları	93
Tablo 2.16. Bahçecik noktası 3BÇ sonucu detayları.....	95
Tablo 2.17. Yalıncağ noktası 2BÇ sonucu detayları	98
Tablo 2.18. Yalıncağ noktası 3BÇ sonucu detayları	100
Tablo 2.19. MAE noktası 2BÇ sonucu detayları.....	104
Tablo 2.20. MAE noktası 3BÇ sonucu detayları.....	105
Tablo 2.21. Beşirli Sahil noktası 2BÇ sonucu detayları.....	108

Tablo 2.22. Beşirli Sahil noktası 3BÇ sonucu detayları.....	109
Tablo 2.23. Boztepe noktası 2BÇ sonucu detayları.....	112
Tablo 2.24. Boztepe noktası 3BÇ sonucu detayları.....	113
Tablo 2.25. Boztepe noktası için nispeten daha sığ bir giriş modeli ile yapılan 3BÇ detayları.....	114
Tablo 2.26. Konaklar noktası 2BÇ sonucu detayları.....	116
Tablo 2.27. Konaklar noktası 3BÇ sonucu detayları.....	118
Tablo 2.28. Köşk noktası 2BÇ sonucu detayları	121
Tablo 2.29. Köşk noktası 3BÇ sonucu detayları	122
Tablo 2.30. Bostancı I noktası 2BÇ sonucu detayları	125
Tablo 2.31. Bostancı I noktası 3BÇ sonucu detayları	126



SEMBOLLER DİZİNİ

V_p	: P-dalga hızı
V_s	: S-dalga hızı
V_R	: Rayleigh dalgası faz hızı
h	: Tabaka kalınlığı
ρ_d	: Tabaka yoğunluğu
f	: Frekans
c	: Faz hızı
k	: Dalga sayısı
λ	: Dalga boyu
σ_{ii}	: Normal gerilme
σ_{ij}	: Kayma gerilmesi
u	: Düzlem dalga için x yönündeki yer değiştirme
w	: Düzlem dalga için z yönündeki yer değiştirme
φ	: Düzlem dalga için x yönündeki yer değiştirme potansiyeli
ψ	: Düzlem dalga için z yönündeki yer değiştirme potansiyeli
$\bar{\varepsilon}$: Toplam deformasyon
$\bar{\omega}_y$: x-z yönündeki dönme vektörü
ε_i	: i yönünde deformasyon
μ	: Kayma modülü
λ_L	: Lamé sabiti
t	: Zaman
ω	: Açısal frekans
ρ	: Tabaka öz direnci
V	: Gerilim
I	: Akım
E	: Elektrik alan
τ	: Uzaklığın tersi (DES formülasyonunda)
$\theta(\tau)$: Stefanescu çekirdek fonksiyonu
J_i	: i . derece, birinci türden Bessel fonksiyonu

$K(\tau)$: Slichter çekirdek fonksiyonu
T	: Dönüşük öz direnç
ρ_a	: Görünür öz direnç
u	: Uzaklık eksenini
S	: Duyarlılık matrisi
d^{obs}	: Gözlemsel veri
d^{est}	: Kestirilen veri
d_0	: Başlangıç modeli tepkisi
m	: Model parametreleri
φ_d	: Hata fonksiyonu
φ_s	: Model norm
C_{obs}	: Gözlemsel veri belirsizliği
σ_{obs}	: gözlemsel standart sapma
Δm	: Model parametre düzeltme vektörü
G	: Jacobian, kısmi türevler matrisi
YDA	: Yüzey Dalgaları Analizi
ÇKYDA	: Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi
RD	: Rayleigh Dalgası Dispersiyon Eğrisi
DES	: Düşey Elektrik Sondajı
YDSA	: Yüzey dalgalarının spektral analizi
GU	: Göreceli Uzaklık
BTÇ	: Birleşik Ters Çözüm
2BÇ	: 2'li Birleşik Ters Çözüm
3BÇ	: 3'lü Birleşik Ters Çözüm

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Yapılaşmada önemli rol oynayan mühendislik parametrelerinin önemli bir kısmında P (boyuna) ve S (kesme) dalgası hız (sırasıyla V_p ve V_s) bilgisi kullanılır. Ancak S dalgasının P dalgasına göre üretilme zorluğu, kaynak yetersizliği ve yer altındaki süreksizliklere daha duyarlı olması, V_s ' nin hatalı elde edilmesini, kimi zamanda doğrudan elde edilemeyerek, V_p ' nin bulunması ve gelişi güzel bir Poisson oranı kullanılarak V_p ' den V_s ' ye geçiş ile elde edilmektedir. Ancak bu varsayımla elde edilen V_s , çalışma alanını yüksek hassasiyet ve doğrulukta temsil edemez. Bunun sonucunda elde edilen elastik parametreler, zeminin statik ve dinamik yükler altındaki davranışını tam yansıtmayacağı için bu parametreler temel alınarak yapılan yapıların zarar görmesi hatta yıkılması söz konusudur. Bu nedenle bu parametrelerin hesaplanmasında V_p ve V_s ' nin tutarlı ve güvenilir olarak bulunması mühendislik yapılarının güvenliği açısından önemlidir.

Arazi ortamında klasik sismik kırılma çalışmalarıyla V_s ' nin elde edilemediği durumlarda alternatif olarak sondajlar, laboratuvar ölçümleri veya kuyu logu çalışmaları yapılabilir. Ancak bu yöntemler geniş arazi ortamlarında hem zaman alıcı hem de proje maliyetini arttırıcı niteliktedir. Ayrıca zeminin doğal yükler altındaki davranışı ile laboratuvar ortamındaki davranışı farklı olacağından elde edilen parametreler güvenilirliklerini kaybedebilir. Bu aşamada Yüzey Dalgaları Analizi (YDA) yöntemleri V_s ' nin, zeminlerin doğal koşulları bozulmadan elde edilmesini sağlar.

YDA yöntemlerindeki genel prensip, pasif (çevre gürültüleri) veya aktif kaynaklar (düşey ya da yatay) yardımıyla kayıt edilen yüzey dalgalarının dispersif özelliğinden yararlanmaktır. Bilindiği gibi yüzey dalgalarını cisim dalgalarından ayıran en önemli özellikleri düşük frekanslı içeriğe ve yüksek genliğe sahip olmalarının yanında dispersif (faz hızının frekansla değişmesi) yapılarıdır. Yüzeyde veya yüzeye yakın bir derinlikte oluşturulan sismik enerjinin yaklaşık 2/3' ünü yüzey dalgaları taşır ve uygun açılımlı kayıtlarda yüzey dalgaları genlikleri, cisim dalgalarını ve gürültüleri bastırır niteliktedir (Park vd., 1999). Yüzey dalgalarının hızı, hareket ettikleri ortamın V_p , V_s , yoğunluğu (ρ_d) ve tabaka kalınlığına (h) bağlıdır. Burada V_s ve h hakim parametreler iken (Xia vd., 1999), V_p ve ρ_d parametrelerinin dispersiyon eğrisinin karakterine etkisi azdır (Song vd., 1989).

Bu nedenle, yüzey dalgalarının dispersif karakteri, dalganın hareket ettiği ortamın Vs karakterini yüksek derecede yansıtır.

Yüzey dalgası kayıtlarından 1 Boyutlu (1B) Vs-derinlik profiline geçiş, ters çözüm ile gerçekleşir. Ters çözümde kullanılan veri, kaydedilen yüzey dalgalarından farklı dönüşüm teknikleriyle (f-k, tau-p, faz öteleme gibi) elde edilen faz hızı-frekans (c-f) diğer bir adıyla dispersiyon eğrisidir. Vs' nin diğer parametrelere göre baskın olmasından dolayı ters çözüm sırasında sadece Vs bilinmeyen kabul edilirken diğer parametreler çözüm boyunca sabittirler. Sabit tutulan parametrelerin en önemlisi h' dir, çünkü dispersiyon eğrisinin modellenmesinde ikinci en önemli rolü üstlenir. Dolayısıyla, bilinen bir bilgi olarak ters çözüme verilen h' nin, gelişi güzel olarak belirlenmesi ters çözümü çok çözümlülük tuzağına düşürebilir. Roma (2001) hem Vs' nin hem de h' nin bilinmeyen olarak kabul edildiği ters çözümlerde, çözümlerin birden çok yerel (lokal) minimuma sahip olduğunu ve global minimumun bulunmasının zorlaştığını belirtmiştir. Dolayısıyla, h' nin değişken olarak kabul edildiği geleneksel ters çözümlerde elde edilen çözümün çok çözümlülüğün ürünü olma ihtimali yükselir (Xia vd., 2013).

Bir jeofizik modelin doğruluğunun artırılması için bazı tamamlayıcı, fazladan veri ve kısıtlamalar gereklidir. Ancak, bu ek bilgiler modelin jeolojik doğrulunu garanti etmez. Söz gelimi; bir jeofizik model, iki farklı materyalin, aynı fiziksel parametre altında ayrımını veremiyorsa (bir elektrik kesitinde öz direnci farklı iki materyalin ayırt edilebilmesi gibi), modelin matematiksel doğruluğunun bir önemi yoktur. Bu zorluğun üstesinden gelebilmek için çözüm sırasında farklı fiziksel parametreleri inceleyen değişik jeofizik yöntem verilerinin kullanılması, yani Birleşik Ters Çözüm yapılması gerekir. Birleşik ters çözüm birçok jeofizik yöntem verisini tek bir ters çözüm akışında toplayarak, kabul edilebilir model sayısını azaltır ve elde edilen sonuç modelini tüm verileri açıklayabilecek şekilde oluşturur (Vozoff ve Jupp, 1975).

Bu tez çalışmasında, dispersiyon eğrilerinin geleneksel ters çözümünde karşılaşılan mevcut sorunları en aza indirme ve güvenilir bir Vs-derinlik profili elde etmek için YDA yöntemlerinden en çok tercih edilen Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi (ÇKYDA) yönteminden elde edilen Rayleigh dalgası dispersiyon (RD) eğrisinin Düşey Elektrik Sondajı (DES) verileri ile birleşik ters çözümü gerçekleştirilmiştir. İlerleyen bölümlerde ilk olarak birleşik ters çözümün felsefesi aktarıldıktan sonra, çalışmada kullanılan yöntemlerin teorik alt yapısı detaylandırılacaktır. Çalışmada kullanılan ana yöntem ÇKYDA olması nedeniyle bu yöntem daha detaylı şekilde aktarılırken, DES yöntemi yardımcı yöntem

konumda olduğu için, yöntemin çalışmada kullanılan kısımlarına odaklanılmıştır. Son bölümde ise, oluşturulan birleşik ters çözüm akışının sentetik ve gerçek veri örnekleri üzerindeki sonuçları sunulmuş ve tartışılmıştır.

1.2. Birleşik Ters Çözüm Felsefesi

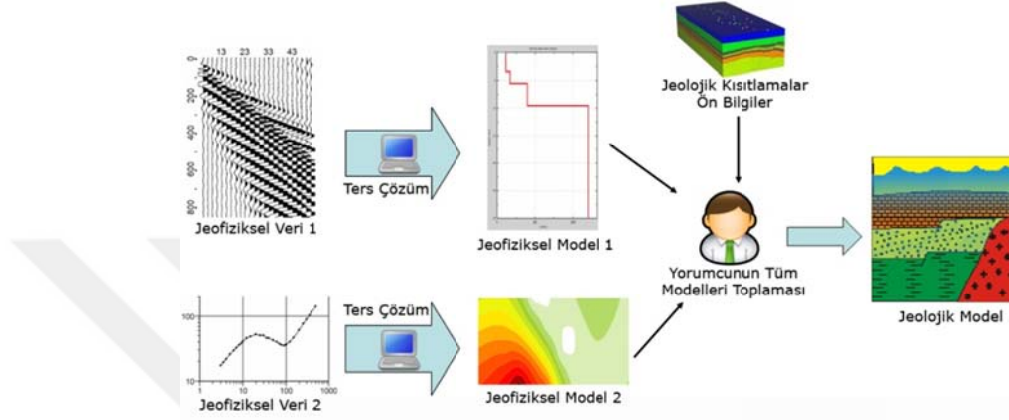
İyi bilinmektedir ki tüm jeofizik yöntemlerin ters çözümü "çok çözümlülük-tekilsizlik" problemi ile karşı karşıyadır (Menke, 1989), dolayısıyla değişik yer altı modellerinin tepkisi tek bir saha verisini açıklayabilir ve bu durum yorumlamada belirsizlikler yaratır (Tarantola, 2005). Değişik ölçümlerden elde edilen farklı verilerin birleşik ters çözümü, jeofizikte ters çözümdeki bu belirsizlikleri ortadan kaldırma amacıyla uygulanan bir prensiptir (Günther ve Rücker, 2006). Birçok veri tipinin birlikte ters çözülmesi, çeşitli fiziksel parametrelerin ve yer altındaki jeolojinin daha iyi anlaşılmasını sağlar ve çözümlerin ayrımlılığını artırır (Moorkamp vd., 2010).

Çözümdeki bu iyileştirmelerin yapılabilmesi mevcut çözüm akışına, aynı yada farklı fiziksel parametreleri açıklayan farklı verilerin eklenmesini gerektirir. Verilerin birleştirilmesinde değişik yaklaşımlar kullanılabilir. Örneğin;

- Farklı fiziksel parametreler arasındaki deneysel bağlantıları kullanarak doğrusal yolla veri türetilmesi ve çözüme eklenmesi (Heincke vd., 2006; Jegen vd., 2009).
- Mevcut çözümün sağladığı modellerdeki jeolojik yapılardan yola çıkarak, bu yapılara ait farklı fiziksel parametrelerin türetilmesi (Haber ve Oldenburg, 1997).
- Çözüme kısıtlayıcı parametrelerin eklenmesi (Colombo ve Stefano, 2007).

Eklenecek verinin niteliği birleşik ters çözümün temelini oluştururken, verinin hangi aşamada ekleneceği de diğer önemli bir unsurdur. Birleşik ters çözümde kullanılacak farklı veri grupları, çalışmanın amacına uygun şekilde farklı aşamalarda birleştirilebilir. En basit birleşik ters çözüm, farklı iki veri grubuna ayrı ayrı ters çözüm uygulanması ve elde edilen jeofiziksel modellerin yorumcu tarafından ön bilgiler ve jeolojik kısıtlamalar ışığında birleştirilerek sonuç jeolojik modelin elde edilmesi şeklindedir (Şekil 1.1). Aslında bu yaklaşım "Birleşik Yorum" olarak da isimlendirilebilir (Gallardo, 2004). Bu yaklaşımla elde edilen son jeolojik model yorumcuya bağlıdır dolayısıyla öznel (subjective). Ayrıca

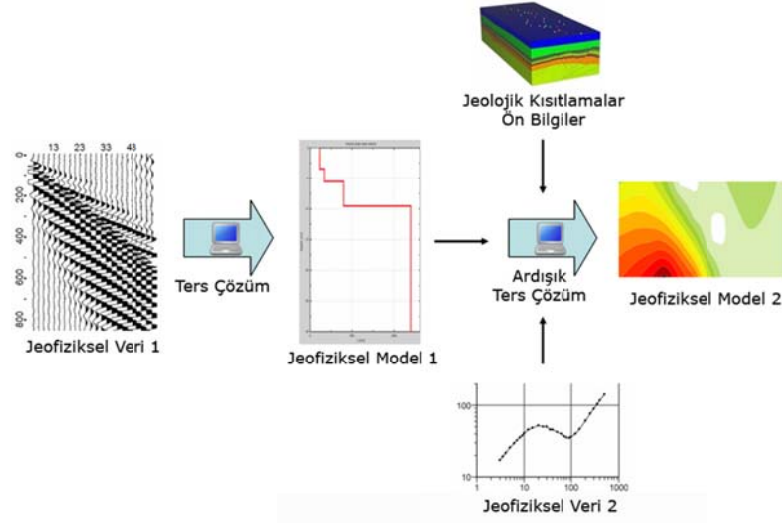
herbir yöntem verisinin ayrı ayrı ters çözümlenmesi, ters çözümün doğasında olan çok çözümlülük ve benzeri yanılgıların ortaya çıkma ihtimalini arttırmaktadır. Bu yaklaşım genellikle birbiri ile ilişkilendirilemeyen yada aralarında güvenilir bir ilişkinin bulunmadığı verilerin çözümünde kullanılmaktadır (Örneğin petrofiziksel parametreler ile sismik yansıma verilerinin birlikte çözülmesi gibi).



Şekil 1.1. İki farklı Jeofizik verinin Birleşik Yorum aşamaları (Gallardo, 2004' ten değiştirilerek)

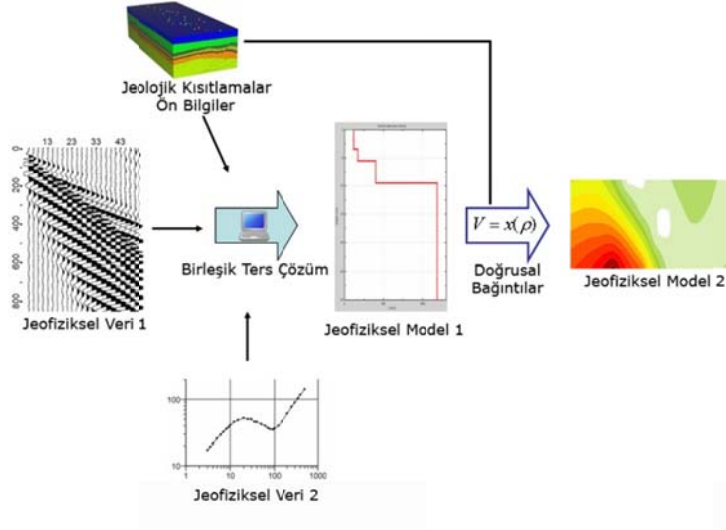
Birbiri ile ilişkilendirilebilen veri grupları için üç çeşit birleşik ters çözüm seçeneği vardır. Bunlar; ardışık ters çözüm (sequential inversion) (Gallardo, 2004), işbirlikçi ters çözüm (cooperative inversion) (Lines vd., 1988; Nath vd., 2000) ve eş zamanlı birleşik ters çözüm' dür (Haber ve Oldenburg, 1997).

Ardışık ters çözüm yönteminde, toplanan verilerin kaliteli ve ayrımlılığı yüksek olduğu kabul edilir. Çözüme herhangi bir verinin ters çözümü ile başlanır. Bu çözümden elde edilen jeofiziksel parametreler (kalınlık, hız, öz direnç v.b.) bir sonraki aşamada diğer verinin ters çözümü sırasında ön bilgi, başlangıç modeli veya kısıtlama parametresi olarak kullanılır (Şekil 1.2). Bu yaklaşım genellikle tektonik ve petrol çalışmalarında, sismik ve gravite verilerinin çözümünde (Anderson vd., 2004), ve elektrik verileri ile elektromanyetik verilerinin birleştirilmesinde (Scott vd., 2000) kullanılmaktadır. Bu yöntem ilk verinin düşük ayrımlılıklı olması durumunda veya hatalı parametre kestiriminde sonuç jeolojik modelin doğrudan hatalı olmasına neden olabilir. Ayrıca ilk veriden elde edilen bilgilerin ikinci aşamada nasıl kullanılacağı da bu yaklaşımı yorumcuya bağımlı kılar.

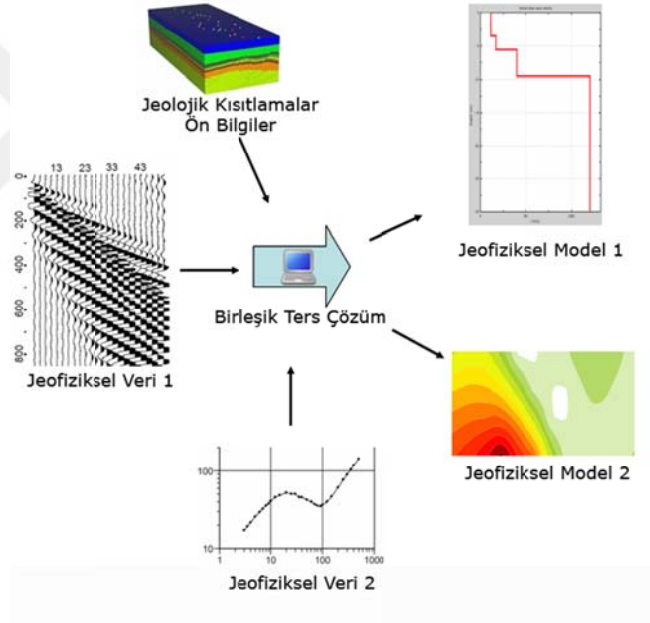


Şekil 1.2. İki farklı jeofizik verinin ardışık ters çözüm aşamaları (Gallardo, 2004)

İşbirlikçi ters çözüm ile eş zamanlı birleşik ters çözüm aynı mantığa dayanır ve tüm jeofizik veriler ile ön bilgiler aynı anda çözüme alınır. İşbirlikçi çözümde çözüm sonucunda, kullanılan jeofizik verilerin herhangi birine ait jeofiziksel model elde edilir (örneğin; sismik kırılma verisi ile özdirenç verisi birlikte çözümleniyorsa sonuç olarak ya bir yer altı hız kesiti ya da yeraltı özdirenç dağılım kesiti elde edilecektir). Eğer istenirse, çözüm sonucunda elde edilen jeofiziksel model, uygun bağıntılar ile diğer veri grubuna uygun bir modele dönüştürülebilir (Şekil 1.3). Bu yöntemde kullanıcı faktörü diğer yöntemlere göre çok daha azdır ancak veri kalitesinin önemi artmaktadır. Ayrıca, ikinci jeofiziksel modelin türetilmesi sırasında kullanılan bağıntıların doğruluğu da diğer önemli bir faktördür. Eş zamanlı birleşik ters çözümde ise aynı anda her iki yöntem içinde jeofiziksel model elde edilir (Şekil 1.4). Dolayısıyla kullanıcı faktörünün en aza indirildiği ancak kullanılan verinin güvenilirliğinin en fazla önem arz ettiği yöntem budur. Her iki yöntemde de kritik nokta, verilerin birbiri ile ilişkilendirilmesi sırasında kullanılacak “ortak parametrenin” kestirimi ve iki verinin aynı amaç fonksiyonuna aktarılmasıdır. Bu yöntemlerin örnekleri gravite, manyetik ve sismik yöntemlerinin birlikte çözümü (Afnimar vd., 2002; Ditmar, 2002; Gallardo vd., 2003; Gallardo, 2004), elektrik-elektromanyetik ve sismik uygulamalarda görülebilir (Hering vd., 1995; Manglik ve Verma, 1998; Comina vd., 2002; Kis, 2002).



Şekil 1.3. İki farklı jeofizik verinin iş birliği ters çözüm aşamaları (Gallardo, 2004)



Şekil 1.4. İki farklı jeofizik verinin eş zamanlı birleşik ters çözüm aşamaları (Gallardo, 2004)

1.3. Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi (ÇKYDA) Yöntemi

Yüzey dalgası analizi yöntemleri yerin kesme dalgası hızının, yüzey dalgalarının dispersif özellikleri yardımıyla belirlenmesine imkân sunar. Genel olarak YDA yöntemleri pasif ve aktif olarak iki gruba ayrılır. Pasif yöntemler Kırılma Mikrotremörü (Refraction Microtremor, Re-Mi) veya Mikrotremor gibi kaynak olarak çevre gürültüsünü kullanan ve

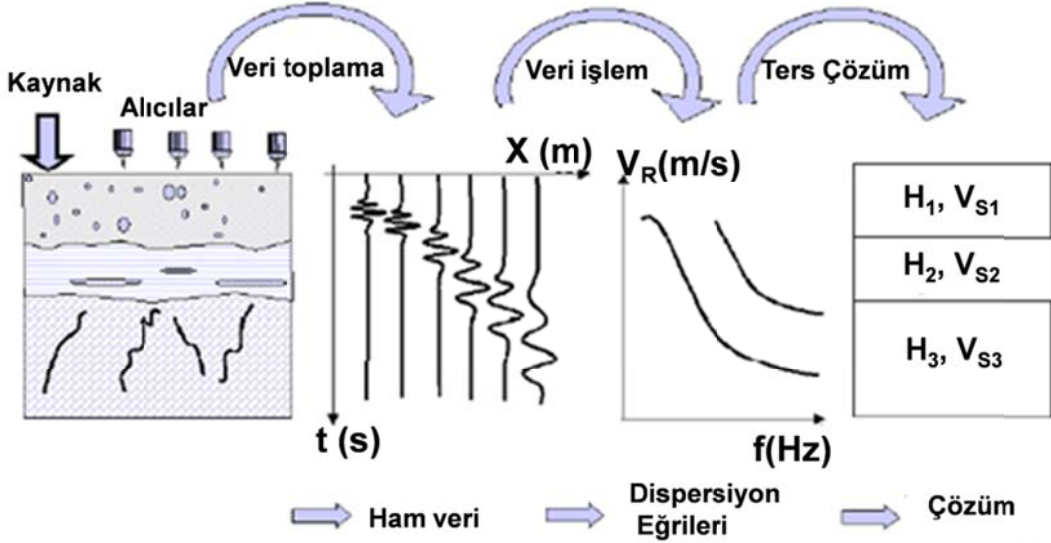
çeşitli alıcı dizilimlerine sahip (dairesel, üçgensel gibi) yöntemlerdir (Louie, 2001; Scott vd., 2004; Thelen vd., 2006; Richwalski vd., 2007). Aktif yöntemler ise Yüzey Dalgalarının Spektral Analizi (YDSA, Spectral Analysis of Surface Waves - SASW) (Nazarian vd., 1983; Stokoe II ve Nazarian, 1983) ve Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi (ÇKYDA, Multi-Channel Analysis of Surface Waves - MASW) (Park vd., 1996) olarak ikiye ayrılır. YDSA yönteminde bir balyoz ve benzeri kaynak yardımıyla oluşturulan Rayleigh dalgaları uygun uzaklıklardaki iki bileşenli düşey alıcı ile kayıt edilir ve daha sonra spektral analiz sonucu elde edilen dispersiyon eğrisinin ters çözümüyle 1B Vs-derinlik profili oluşturulur. Fakat bu yöntemde sadece iki alıcı kullanıldığından, bir çalışma sahasında arzu edilen araştırma derinliğine ulaşılması için kaynak ve alıcıların sürekli yerlerinin değiştirilmesi ve işlemin sürekli tekrarlanması çok zaman almaktadır (Park vd., 1997).

ÇKYDA yönteminde 12 veya daha fazla alıcı veya alıcı grupları kullanılabilir. Yöntem bu özelliği ile diğer yüzey dalgası yöntemlerine göre daha etkin ve hızlıdır. Veri toplama klasik sismik kırılma çalışmalarıyla aynıdır, tek fark veri toplama parametrelerinin seçimidir (Park vd., 1999). Bir sismik veri, uygun kaynak alıcı dizilimi ile toplandığında cisim dalgaları ve yüzey dalgalarının toplamından oluşur. Sismik verideki cisim dalgaları, kırılma veya yansıma amaçlı kullanılırken, yüzey dalgaları ÇKYDA amaçlı kullanılabilir. Böylelikle toplanan verinin tamamı kullanılmış olur (Park vd., 1997). Yöntemde hem patlayıcı veya darbe tabanlı (balyoz v.b) kaynaklar kullanıldığı gibi hem de harmonik titreşimli ve kontrollü (vibroseyisler gibi) kaynaklar da kullanılabilir. Balyoz ve benzeri kaynaklar kullanıldığında ÇKYDA yöntemi daha ucuz, kolay ve hızlı olmaktadır. Ancak üretilen yüzey dalgalarının spektral içeriği-band aralığı, vibroseis gibi kontrollü kaynaklar tarafından üretilen yüzey dalgalarından daha dar olduğundan maksimum araştırma derinliği ve ayrımlılık faktörleri tam olarak kullanıcı tarafından kontrol edilemez ve bu faktörler kısıtlanır (Rix ve Leipski, 1991).

ÇKYDA yöntemi üç aşamada gerçekleşir; veri toplama, dispersiyon eğrisinin oluşturulması (veri işlem) ve ters çözüm (Şekil 1.5). Her aşama, sonuçta oluşturulacak 1B Vs profilini doğrudan etkiler. Eğer etkin veri toplanmazsa mühendislik parametreleri için önemli olan yer altının ilk 30 m. si ayrıntılı olarak görüntülenemez. Etkin veri topladığı halde dispersiyon eğrisinin veriyi temsil edecek şekilde oluşturulamaması hız-derinlik bilgisinin doğruluğunu etkileyecektir. Çünkü ters çözümde kullanılan tek veri dispersiyon

eğrisidir. Ters çözüm aşaması tüm çalışmanın sonucunun ortaya koyulduğu aşamadır ve kararlı olmalıdır.

Veri toplama klasik sismik kırılma ile hemen hemen aynı olmasıyla beraber, yüzey dalgasının oluşumuna ve yüksek genlikte kayıt edilmesine imkân verecek kaynak-alıcı dizilim aralıkları kullanılmasına dikkat edilir. Çünkü, alıcı aralıkları, ilk alıcı ofseti ve kullanılan alıcı sayısı kayıt edilen yüzey dalgasının ve dispersiyon eğrisinin karakterini doğrudan etkiler (Roma vd., 2002). Aslında veri toplama parametreleri çalışma alanının genişliği ve çalışma sırasında kullanılacak ekipman parkı imkanına bağlıdır. Bu parametreler belirlenirken; maksimum araştırma derinliği, kullanılabilir alıcı sayısı, maksimum serim boyu, çalışmadan beklenen çözünürlük gibi faktörler göz önünde bulundurulmalıdır. Park vd. (2002) yaptıkları çalışmada birçok faktörü göz önünde bulundurarak ÇKYDA yöntemi için bir veri toplama parametre tablosu oluşturmuşlardır. Bu tablo birçok farklı faktöre göre çalışmacılara kaynak-alıcı dizilimlerinin yanı sıra zaman ve kaynak parametreleri de tavsiye etmektedir (Tablo 1.1).



Şekil 1.5. ÇKYDA yöntemi aşamaları. (a) veri toplama, (b) veri işlem, (c) ters çözüm (Strobbia, 2003' ten değiştirilerek)

Tablo 1.1. ÇKYDA yönteminde etkin veri toplama parametre setleri (Park vd., 2002)

Derinlik (Z _{max}) (m)	Kaynak(S) (lb)	Alıcı (R) (Hz)	Serim Parametreleri (m)				Öteleme Parametreleri			Kayıt Parametreleri				
			Serim Boyut (D)	Kaynak ofseti (X ₁)	Alıcı aralıkları (dx)		Yanal ayrımlılık			dt (ms)	T (s)	Düşey yığıma		
					24 Kanal	48 Kanal	Yüksek	Orta	Düşük			S	G	ÇG
≤1.0	≤1 (1)	4.5-100 (40)	1-3 (2.0)	0.2-3.0 (0.4)	0.05-0.1 (0.1)	0.02-0.05 (0.05)	1-2 (1)	2-4 (2)	4-12 (4)	0.5-1.0 (0.5)	0.5-1.0 (0.5)	1-3 (3)	3-5 (5)	5-10 (10)
1-5	1-5 (5)	4.5-40 (10)	1-15 (10)	0.2-15 (2)	0.05-0.6 (0.5)	0.02-0.3 (0.25)	1-2 (1)	2-4 (2)	4-12 (4)	0.5-1.0 (0.5)	0.5-1.0 (0.5)	1-3 (3)	3-5 (5)	5-10 (10)
5-10	5-10 (10)	≤10 (4.5)	5-30 (20)	1-30 (4)	0.2-1.2 (1.0)	0.1-0.6 (0.5)	1-2 (1)	2-4 (2)	4-12 (4)	0.5-1.0 (0.5)	0.5-1.0 (1.0)	1-3 (3)	3-5 (5)	5-10 (10)
10-20	≥10 (20)	≤10 (4.5)	10-60 (30)	2-60 (10)	0.4-2.5 (1.5)	0.2-1.2 (1.0)	1-2 (1)	2-4 (2)	4-12 (4)	0.5-1.0 (0.5)	1.0-2.0 (1.0)	1-3 (3)	3-5 (5)	5-10 (10)
20-30	≥10 (20)	≤4.5 (4.5)	20-90 (50)	4-90 (10)	0.8-3.8 (2.0)	0.4-1.9 (1.5)	1-2 (1)	2-4 (2)	4-12 (4)	0.5-1.0 (1.0)	1.0-2.0 (1.0)	1-3 (3)	3-5 (5)	5-10 (10)
30-50	≥10 (20) (pasif kaynak)	≤4.5 (4.5)	30-150 (70)	6-150 (15)	1.2-6.0 (3.0)	0.6-3.0 (2.0)	1-2 (1)	2-4 (2)	4-12 (4)	0.5-1.0 (1.0)	1.0-3.0 (1.0)	1-3 (3)	3-5 (5)	5-10 (10)
>50	≥10 (20) (pasif kaynak)	≤4.5 (4.5)	>50 (150)	>10 (30)	>2.0 (6.0)	>1.0 (4.0)	1-2 (1)	2-4 (2)	4-12 (4)	0.5-1.0 (1.0)	≥1.0 (2.0)	1-3 (3)	3-5 (5)	5-10 (10)

Literatürde farklı sahalarda yapılmış çalışmalar (Xia vd., 2000, 2006; Seshunarayana ve Sundararajan, 2004; Jin vd., 2006) incelendiğinde bir çok araştırma alanına uyabilecek bir parametre seti çıkarılabilir; 24 alıcı, alıcı aralığı 1-3 m., ilk ofset aralığı alıcı aralığının 2-5 katı veya toplam serim uzunluğunun 0.2-1 katı, zaman örnekleme aralığı 0.5-1 ms., toplam kayıt uzunluğu 1-3 s. Her ne kadar farklı araştırmacılar farklı parametre setleri önerse de, bir parametre setinin çalışma amacımıza ve alanımıza uygunluğu bir kaç test atışı ile test edilmelidir.

ÇKYDA' nın ikinci aşaması dispersiyon eğrisinin yani faz hızına (c) karşılık frekans (f) değerlerinin elde edilmesidir. Dispersiyon eğrisinin doğru bir şekilde elde edilmesi için cisim dalgaları ile yüzey dalgaları dalga formalarının ayrılabilir kadar birbirinden uzak olmaları gerekir. Gürültü genliği de başka bir önemli faktördür. Veri toplamada kullanılan parametreler dispersiyon eğrisinin karakterini doğrudan etkiler. Uzun açılımlarla toplanan verilerin frekans aralığı (kayıt edilen en büyük frekans ile en küçük frekans aralığına düşen frekans sayısı, dizisi) daha geniştir, kısa açılımlarda ise frekans aralığı daralır ve yüksek frekanslara doğru kayar. Geniş bir frekans aralığı daha derin ve ayrımlılığı yüksek çözümler sunarken, daha dar frekans bantları sığ ve düşük ayrımlı çözümler sunar. Yüzey dalgası sinyali içeren bir sismik veriden dispersiyon eğrisinin elde edilmesi için literatürde farklı yöntemler mevcuttur. Bunlardan en fazla kullanılanları; frekans-dalga sayısı dönüşümü (f-k) yöntemi (Park vd., 1998), eğimli yığıma (τ -p yöntemi) (McMechan ve Yedlin, 1981), çapraz güç spektrumu yöntemi (Nazarian vd., 1995) ve faz kayması yöntemidir (Dal Moro vd., 2003; Ryden vd., 2004).

Dispersiyon eğrisinin karakterini ÇKYDA' nın yapıma amacı belirler. Eğer sert beton yol, asfalt gibi kaplamaların dinamik karakteristikleriyle ilgilenilmiyorsa, 2-80 Hz

arasındaki frekanslar kullanılabilir. 80-100 Hz aralığından sonraki frekanslar çok sık bir derinlik için yüksek ayrımlılığın ihtiyaç duyulduğu asfalt, beton ve benzeri yapılarda çatlak, kırık ve boşluk araştırmalarında kullanılır (Ryden vd., 2004).

Dispersiyon eğrileri süreksizlikler veya düzensizlikler içerebilir. Bu, toplanan veri kalitesi, belirsiz veya kültürel gürültüler, diğer dalga türleri veya aşırı düzensiz hız dağılımı gibi birçok sebepten kaynaklanabilir. Eğrideki süreksizlikler veya boşluklar eğrinin yönelimine göre ara değer belirleme ile doldurulabilir.

ÇKYDA' nın son aşaması ters çözümdür ve bu aşamada genellikle doğrusal olmayan ters çözüm algoritmaları kullanılır. Doğrusal olmayan problemlerin çözümünde kullanılan yöntemler global ve lokal arama yöntemleri olarak ikiye ayrılabilir. Global yöntemler tüm çözüm uzayında çalışırken, lokal yöntemler global yöntemlerle elde edilebilecek çözümlerin bazı kısıtlamalar ve varsayımlar ile elde edilecek çeşitleridir.

Lokal arama yöntemleri yinelemeli (iteratif) yöntemlerdir ve çözüme yakın olduğu varsayılan tahmini bir model gereksinimi duyar. Lokal yöntemlerde çözüm, tahmini giriş modelinin sonuca yeterli derecede yakın olmasına bağlıdır. Global yöntemler ise tüm çözüm uzayında çalıştığı için daha zaman alıcı yöntemlerdir. Ancak elde edilen çözümler daha güvenilir ve gerçekçidir (Lai ve Rix, 1998). Dolayısıyla araştırmacıların seçebileceği iki farklı yol bulunmaktadır: i) iyi bir giriş modeli ve kararlı bir lokal yöntemle kısa zamanda yapılabilecek çözüm, ii) daha fazla zaman ve makine gücü ile global bir çözüm.

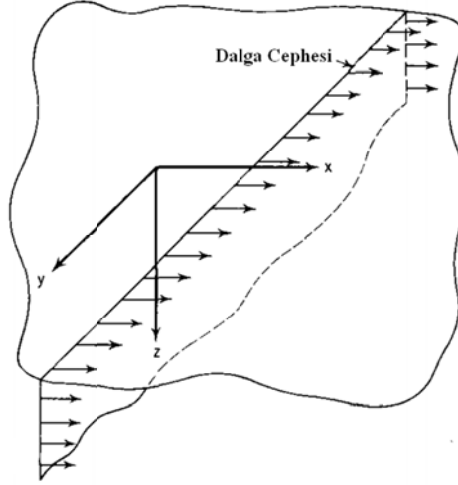
ÇKYDA yöntemlerinin ters çözümü aşamasında araştırmacılar amaçlarına uygun birçok yöntemi test etmişlerdir. Lokal yöntemlerden en küçük kareler ve çeşitleri en fazla kullanılan yöntemler olurken (Horike, 1985; Gabriels vd., 1987; Herrman, 1991; Herrman ve Al-Eqab, 1991; Lai ve Rix, 1998; Tselentis ve Delis, 1998; Shtivelman, 1999; Xia vd., 1999; Foti, 2000), global yöntemlerden Monte-Carlo (Press, 1968; Socco ve Boiero, 2008; Maraschini ve Foti, 2010), en yakın komşu (neighbourhood) algoritması (Wathelet vd., 2004), genetik (Hunaidi, 1998) ve nöral uygulamalar, benzetimli güçlendirme (simulated annealing) yöntemleri (Martínez vd., 2000) kullanılan yöntemler arasındadır.

1.4. Rayleigh Dalgası Dispersiyon (RD) Eğrisinin Modellenmesi

1.4.1. Yarı Sonsuz Homojen Ortamda Rayleigh Dalgası Hız Denklemi

Rayleigh dalgaları ilk olarak Lord Rayleigh (1885) tarafından çalışılmış ve daha sonra Lamb (1904) tarafından detaylandırılmıştır. Bir RD eğrisinin modellenmesi için hem Rayleigh dalgası hız denklemine hem de Rayleigh dalgasının frekansa ve derinliğe bağlı yer değiştirme denklemlerine ihtiyaç duyulur. Bu denklemler Richart vd. (1970), Aki ve Richards (1980), Lai ve Rix (1998), Kumar vd. (2006) ve Kritikakis ve Vafidis (2011) yardımıyla elde edilebilir.

Rayleigh dalgalarının tabaka ara yüzeyleri boyunca düzlem dalga olarak hareket ettiği bilinmektedir. Şekil 1.6' daki koordinat sistemi baz alındığında z - y ara yüzeyi boyunca x doğrultusunda hareket eden bir düzlem dalganın hareketi, y doğrultusundan bağımsız olacaktır. Dolayısıyla Rayleigh dalga denklemlerinin elde edilmesindeki tüm aşamalarda y yönündeki tüm parametrelerin sıfır olduğu kabul edilir.



Şekil 1.6. Dalga yayılım yönü ve koordinat sistemi

Richart vd. (1970) elastik bir ortamda x ve z yönünde hareket eden dalgaların genel denklemini Newton' un 2. yasasından yararlanarak ve y yönündeki değişimlerin sıfır olduğunu kabul edilerek;

$$\rho_d \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial(\sigma_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(\sigma_{xz})}{\partial z} \quad (1)$$

$$\rho_d \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{\partial(\sigma_{zz})}{\partial z} + \frac{\partial(\sigma_{zx})}{\partial x} \quad (2)$$

şeklinde vermiştir. Burada ρ_d ; yoğunluk, σ_{ii} ; normal gerilmeleri temsil ederken, σ_{ij} ; kesme ya da kayma gerilmelerini ve t ; zamanı göstermektedir. Düzlem dalganın x ve z yönündeki yer değiştirmeleri, sırasıyla u ve w , yer değiştirme potansiyelleri yardımıyla;

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial \psi}{\partial z} \text{ ve } w = \frac{\partial \phi}{\partial z} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (3)$$

şeklinde yazılabilir. Denklem (3)' de ϕ ve ψ ; sırasıyla x ve z yönünde hareket eden dalgaların yer değiştirme potansiyelleri olarak tanımlanırlar. Buradaki potansiyel ifadeleri dalganın hareket ettiği ortamın elastik parametreleri cinsinden yazılabilir. ϕ ve ψ sırasıyla, toplam deformasyon ($\bar{\varepsilon}$) ve x - z düzlemindeki dönme vektörleri ($\bar{\omega}_y$) cinsinden

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon} &= \varepsilon_x + \varepsilon_z = \nabla^2 \phi \\ 2\bar{\omega}_y &= \nabla^2 \psi \end{aligned} \quad (4)$$

şeklinde yazılabilir. Denklem (4)' de ε_x ve ε_z ; x ve z yönündeki deformasyonlar olarak tanımlanır.

Denklem (1) ve (2)' nin diğer bir gösterimi ise elastik parametreler ve toplam deformasyon cinsinden sırasıyla,

$$\rho_d \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda_L + \mu) \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \quad (5)$$

$$\rho_d \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = (\lambda_L + \mu) \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial z} + \mu \nabla^2 w \quad (6)$$

verilebilir. Burada, μ ; kesme veya kayma modülü, λ_L ; Lamé sabiti olarak verilmektedir. Denklem (5) ve (6)' da eşitliklerin sol tarafındaki u ve w yerine, bu değişkenlerin Denklem (3)' te tanımlanan ifadeleri yazıldığında

$$\rho_d \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \rho_d \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left[\frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial \psi}{\partial z} \right] = \rho_d \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \right] + \rho_d \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \right] \quad (7)$$

$$\rho_d \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \rho_d \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left[\frac{\partial \phi}{\partial z} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \right] = \rho_d \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \right] - \rho_d \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \right] \quad (8)$$

elde edilir. Aynı şekilde Denklem (5)' in sağ tarafı için

$$\begin{aligned}
(\lambda_L + \mu) \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial x} + \mu \nabla^2 u &= (\lambda_L + \mu) \frac{\partial \nabla^2 \phi}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \\
&= (\lambda_L + \mu) \frac{\partial \nabla^2 \phi}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \right] \\
&= (\lambda_L + \mu) \frac{\partial \nabla^2 \phi}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right) \right] \\
&= (\lambda_L + \mu) \frac{\partial \nabla^2 \phi}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial \nabla^2 \phi}{\partial x} + \frac{\partial \nabla^2 \psi}{\partial z} \right] \\
&= (\lambda_L + 2\mu) \frac{\partial \nabla^2 \phi}{\partial x} + \mu \frac{\partial \nabla^2 \psi}{\partial z} \tag{9}
\end{aligned}$$

elde edilirken, Denklem (6) için benzer dönüşümlerle

$$(\lambda_L + \mu) \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial z} + \mu \nabla^2 w = (\lambda_L + 2\mu) \frac{\partial \nabla^2 \phi}{\partial z} - \mu \frac{\partial \nabla^2 \psi}{\partial x} \tag{10}$$

elde edilebilir. Denklem (7), (8), (9) ve (10), Denklem (5) ve (6)' da yerlerine yazılırsa,

$$\rho_d \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \right] + \rho_d \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \right] = (\lambda_L + 2\mu) \frac{\partial \nabla^2 \phi}{\partial x} + \mu \frac{\partial \nabla^2 \psi}{\partial z} \tag{11}$$

$$\rho_d \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \right] - \rho_d \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \right] = (\lambda_L + 2\mu) \frac{\partial \nabla^2 \phi}{\partial z} - \mu \frac{\partial \nabla^2 \psi}{\partial x} \tag{12}$$

eşitlikleri sağlanır. Denklem (11) veya (12)' de $\partial/\partial x$ ve $\partial/\partial z$ terimlerinin katsayıları birbirine eşitlendiğinde;

$$\begin{aligned}
\rho_d \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \right) &= (\lambda_L + 2\mu) \cdot \nabla^2 \phi \\
\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} &= \left(\frac{\lambda_L + 2\mu}{\rho_d} \right) \cdot \nabla^2 \phi \Rightarrow \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = V_p^2 \cdot \nabla^2 \phi
\end{aligned} \tag{13}$$

ve

$$\begin{aligned}
\rho_d \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \right) &= \mu \cdot \nabla^2 \psi \\
\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} &= \left(\frac{\mu}{\rho_d} \right) \cdot \nabla^2 \psi \Rightarrow \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = V_s^2 \cdot \nabla^2 \psi
\end{aligned} \tag{14}$$

diferansiyel denklemleri elde edilir. Denklem (13) ve (14)' de, P ve S-dalga hızına bağlı bu diferansiyel denklemlerin çözümü, x yönünde hareket eden sinüzoidal dalga denklemleri yardımıyla yazılırsa;

$$\phi = F(z) \cdot e^{i(\omega t - kz)} \quad (15)$$

$$\psi = H(z) \cdot e^{i(\omega t - kz)} \quad (16)$$

elde edilir. Burada z ; derinlik, $F(z)$ ve $H(z)$; sinüzoidal dalgaların derinliğe bağlı genlik değişimini, k ; dalga sayısını ve ω ; açısal frekansı göstermektedir. Denklem (15) ve (16) gerekli türevlerle, Denklem (13) ve (14)' te yerlerine yazıldığında;

$$-\frac{\omega^2}{V_p^2} F(z) = -k^2 F(z) + F''(z) \Rightarrow F''(z) + F(z) \left(k^2 - \frac{\omega^2}{V_p^2} \right) = 0 \quad (17)$$

$$-\frac{\omega^2}{V_s^2} H(z) = -k^2 H(z) + H''(z) \Rightarrow H''(z) + H(z) \left(k^2 - \frac{\omega^2}{V_s^2} \right) = 0 \quad (18)$$

denklemleri elde edilir. Bu denklemlerde

$$\left(k^2 - \frac{\omega^2}{V_p^2} \right) = q^2 \quad (19)$$

$$\left(k^2 - \frac{\omega^2}{V_s^2} \right) = s^2 \quad (20)$$

dönüşümleri yapıldığında

$$F''(z) - q^2 F(z) = 0 \quad (21)$$

$$H''(z) - s^2 H(z) = 0$$

elde edilir. Bu denklemlerin çözümleri

$$F(z) = A_1 e^{-qz} + B_1 e^{qz} \quad (22)$$

$$H(z) = A_2 e^{-sz} + B_2 e^{sz} \quad (23)$$

fonksiyonları ile tanımlanabilir. Bu aşamada yarı sonsuz elastik bir ortamda dalga yayılım için yapılan varsayımların hatırlanması yararlı olacaktır. Bu varsayımlar;

1. Sonsuz derinlikte ($z \rightarrow \infty$) yer değiştirme hareketinin sıfır olması
2. Yüzeyde ($z = 0$) tüm gerilmelerin sıfır olması' dır.

Bu varsayımlara göre sonsuz derinlikte bir yer değiştirme hareketi olmayacağından, Denklem (22) ve (23)' teki B_1 ve B_2 genlikleri sıfır olacaktır. Dolayısıyla bu denklemler

$$F(z) = A_1 e^{(-qz)} \quad (24)$$

$$H(z) = A_2 e^{(-sz)} \quad (25)$$

halini alır. Denklem (24) ve (25), Denklem (15) ve (16)' da yerine yazıldığında;

$$\phi = A_1 e^{[-qz + i(\omega t - kz)]} \quad (26)$$

$$\psi = A_2 e^{[-sz+i(\omega t-kx)]} \quad (27)$$

elde edilir. Yüzeydeki tüm gerilmelerin sıfır kabul edilmesi ile z yönündeki normal gerilme ve z - x düzlemindeki kesme gerilmesi tanımları kullanılarak;

$$\sigma_z = \lambda \bar{\varepsilon} + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (28)$$

$$\tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) = 0 \quad (29)$$

yazılabilir. Denklem (3)' teki u ve w tanımları ve Denklem (26) ve (27)' deki ϕ ve ψ tanımları, yüzey şartları yani $z=0$ için Denklem (28) ve (29)' da yerlerine yazılırsa;

$$\sigma_z = A_1 [(\lambda_L + 2\mu)q^2 - \lambda_L k^2] - 2iA_2 \mu ks = 0 \quad (30)$$

$$\tau_{zx} = 2iA_1 kq + A_2 (s^2 + k^2) = 0 \quad (31)$$

buradan,

$$\frac{A_1 (\lambda_L + 2\mu)q^2 - \lambda_L k^2}{A_2 2i\mu ks} - 1 = 0 \quad (32)$$

$$\frac{A_1 2iqk}{A_2 (s^2 + k^2)} + 1 = 0 \quad (33)$$

elde edilir. Denklem (32) ve (33) toplanıp yeniden sıfıra eşitlendiğinde

$$\begin{aligned} \frac{A_1 (\lambda_L + 2\mu)q^2 - \lambda_L k^2}{A_2 2i\mu ks} &= -\frac{A_1 2iqk}{A_2 (s^2 + k^2)} \\ \frac{(\lambda_L + 2\mu)q^2 - \lambda_L k^2}{2i\mu ks} &= -\frac{2iqk}{(s^2 + k^2)} \\ -4i^2 q \mu s k^2 &= (s^2 + k^2) [(\lambda_L + 2\mu)q^2 - \lambda_L k^2] \\ 4q \mu s k^2 &= (s^2 + k^2) [(\lambda_L + 2\mu)q^2 - \lambda_L k^2] \end{aligned} \quad (34)$$

eşitliği yazılabilir. Denklem (19) ve (20)' deki q^2 ve s^2 tanımları Denklem (34)' te yerine yazılırsa

$$16k^2 \mu^2 \left(k^2 - \frac{\omega^2}{V_p^2} \right) \left(k^2 - \frac{\omega^2}{V_s^2} \right) = \left[\left(k^2 - \frac{\omega^2}{V_s^2} \right) + k^2 \right]^2 \cdot \left[(\lambda_L + 2\mu) \left(k^2 - \frac{\omega^2}{V_p^2} \right) - \lambda_L k^2 \right]^2 \quad (35)$$

elde edilir. Bu eşitliğin iki tarafı da $\mu^2 k^2$, e bölündüğünde

$$16 \left(1 - \frac{\omega^2}{V_p^2 k^2} \right) \left(1 - \frac{\omega^2}{V_s^2 k^2} \right) = \left[2 - \left(\frac{\lambda_L + 2\mu}{\mu} \right) \left(\frac{\omega^2}{V_p^2 k^2} \right) \right]^2 \left(2 - \frac{\omega^2}{V_s^2 k^2} \right)^2 \quad (36)$$

eşitliği elde edilir. Denklem (36)'daki değişkenler

$$\alpha = \frac{V_s}{V_p}; \quad \alpha^2 = \frac{\mu/\rho_d}{(\lambda_L + 2\mu)/\rho_d} = \frac{\mu}{\lambda_L + 2\mu}; \quad V_R = \frac{\omega}{k} \rightarrow V_R = \text{Rayleigh Dalga hızı}$$

dönüşümleri yardımıyla;

$$\frac{\omega^2}{V_s^2 k^2} = \frac{V_R^2}{V_s^2} = K^2 \quad (37)$$

$$\frac{\omega^2}{V_p^2 k^2} = \frac{V_R^2}{V_p^2} = \alpha^2 K^2 \quad (38)$$

$$\frac{\lambda_L + 2\mu}{\mu} = \frac{1}{\alpha^2} = \frac{2 - 2\nu}{1 - 2\nu} \quad (39)$$

şeklinde yazılabilir. Buradaki ν ; Poisson oranı ve K ; yüzey dalgası hızı ile S dalga hızı oranını temsil eder. Bu dönüşümlerle Denklem (36)

$$16(1 - \alpha^2 K^2)(1 - K^2) = \left(2 - \frac{1}{\alpha^2} \alpha^2 K^2 \right)^2 (2 - K^2)^2$$

$$K^6 - 8K^4 + (24 - 16\alpha^2)K^2 + 16(\alpha^2 - 1) = 0 \quad (40)$$

halini alır ve bu denklemin gerçel çözümleri, bilinen bir ν veya α değeri için bulunabilir. Denklem (40)'dan açıkça görülmektedir ki; yarı sonsuz bir ortamda yayılan Rayleigh dalgası için elde edilen hız denkleminde herhangi bir frekans değişkeni bulunmamaktadır dolayısıyla Rayleigh dalgası hız bileşeninin frekanstan bağımsız olduğu ve dispersif yapıda olmadığı söylenebilir (Richart vd., 1970, s.85).

1.4.2. Elastik Ortamda Rayleigh Dalgası Yer Değiştirme Denkleminin (Özdeğer Fonksiyonunun) Oluşturulması

Rayleigh dalga hareketini oluşturan x ve z yönündeki dalgaların genel hareket denklemleri olan Denklem (1) ve (2) tekrar hatırlandığında, bu denklemlerin genel bir çözümü;

$$u = r_1(k, z, \omega) \cdot e^{i(kx - \omega t)} \quad (41)$$

$$w = ir_2(k, z, \omega) \cdot e^{i(kx - \omega t)} \quad (42)$$

şeklinde verilebilir. Burada r_j ; k , z ve ω ya bağlı genlik fonksiyonu olarak tanımlanır (ilerleyen bölümlerde $r_1(k, z, \omega) = r_1$, $r_2(k, z, \omega) = r_2$ olarak gösterilecektir). Bu genel çözümlerin, Denklem (26) ve (27)' de verilen genel çözümlere benzediği açıktır. Denklem (42)' de karmaşık bileşen "i" nin w ' da katsayı olarak gözükmemesinin nedeni, u ve w nın hareketlerinin birbirine dik-ortogonal olmasından kaynaklanan 90° faz farkıdır.

Rayleigh yer değiştirme denkleminin oluşturulması ve çözülmesi sırasında, hız denkleminin çözümünde kullanılan varsayımlar göz önünde bulundurulmalıdır. Bu varsayımların kullanılması için Denklem (1) ve (2)' deki gerilme ifadeleri de tanımlanmalıdır. Denklem (1) ve (2)' deki normal ve kesme gerilmeleri, sırasıyla σ_{xx} , $\sigma_{xz} = \sigma_{zx}$, σ_{zz} aşağıdaki şekilde verilebilir.

$$\sigma_{xx} = \lambda_L \bar{\varepsilon} + 2\mu \varepsilon_x \quad (43)$$

$$\begin{aligned} &= \lambda_L (\varepsilon_x + \varepsilon_z) + 2\mu \varepsilon_x \\ &= (\lambda_L + 2\mu) \varepsilon_x + \lambda_L \varepsilon_z \\ &= (\lambda_L + 2\mu) \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda_L \frac{\partial w}{\partial z} \\ &= (\lambda_L + 2\mu) \frac{\partial [r_1 e^{i(kx - \omega t)}]}{\partial x} + i \lambda_L \frac{\partial [r_2 e^{i(kx - \omega t)}]}{\partial z} \\ &= ik (\lambda_L + 2\mu) r_1 e^{i(kx - \omega t)} + i \lambda_L \frac{\partial r_2}{\partial z} e^{i(kx - \omega t)} \\ &= i \left[k (\lambda_L + 2\mu) r_1 + \lambda_L \frac{\partial r_2}{\partial z} \right] e^{i(kx - \omega t)} \end{aligned} \quad (44)$$

$$\sigma_{xz} = \sigma_{zx} = \mu \varepsilon_{xz} \quad (45)$$

$$\begin{aligned} &= \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ &= \mu \left(\frac{\partial [r_1 e^{i(kx - \omega t)}]}{\partial z} + i \frac{\partial [r_2 e^{i(kx - \omega t)}]}{\partial x} \right) \\ &= \mu \left(\frac{\partial r_1}{\partial z} e^{i(kx - \omega t)} + i^2 k e^{i(kx - \omega t)} r_2 \right) \\ &= \mu \left(\frac{\partial r_1}{\partial z} - k r_2 \right) e^{i(kx - \omega t)} = r_3(k, z, \omega) e^{i(kx - \omega t)} \end{aligned} \quad (46)$$

$$\sigma_{zz} = \lambda_L \bar{\varepsilon} + 2\mu \varepsilon_z \quad (47)$$

$$\begin{aligned} &= \lambda_L (\varepsilon_x + \varepsilon_z) + 2\mu \varepsilon_z \\ &= \lambda_L \varepsilon_x + (\lambda_L + 2\mu) \varepsilon_z \\ &= \lambda_L \frac{\partial u}{\partial x} + (\lambda_L + 2\mu) \frac{\partial w}{\partial z} \\ &= \lambda_L \frac{\partial [r_1 e^{i(kx-\omega t)}]}{\partial x} + i(\lambda_L + 2\mu) \frac{\partial [r_2 e^{i(kx-\omega t)}]}{\partial z} \\ &= ik\lambda_L r_1 e^{i(kx-\omega t)} + i(\lambda_L + 2\mu) \frac{\partial r_2}{\partial z} e^{i(kx-\omega t)} \\ &= i \left[k\lambda_L r_1 + (\lambda_L + 2\mu) \frac{\partial r_2}{\partial z} \right] e^{i(kx-\omega t)} = ir_4(k, z, \omega) e^{i(kx-\omega t)} \end{aligned} \quad (48)$$

Denklem (46) ve (48)' de ifade edilen σ_{xz} ve σ_{zz} tanımları, Rayleigh dalga yayılımı için yapılan varsayımlarla doğrudan çözülebilir durumdadırlar. Denklem (41), (42), (46) ve (48)' de tanımlanan r_j ($j=1,2,3,4$) ifadelerinin çözümü, Denklem (1) ve (2)' de tanımlanan hareket denklemlerinin sayısal olarak elde edilmesini sağlayacaktır. Rayleigh dalgasının her bir tabakadaki hareket denkleminin çözümü, yine her tabaka için tanımlanacak r_j ($j=1,2,3,4$) ile mümkündür. Burada her tabaka için tanımlanan 4 bilinmeyen çözüm için 4 denklem gerekmektedir. Denklem (46) ve (48)' deki $\partial r_1 / \partial z$ ve $\partial r_2 / \partial z$ ifadelerinden yararlanarak

$$r_3 = \mu \left(\frac{\partial r_1}{\partial z} - kr_2 \right) = \mu \frac{\partial r_1}{\partial z} - \mu kr_2 \Rightarrow \mu \frac{\partial r_1}{\partial z} = r_3 + \mu kr_2 \quad (49)$$

$$\frac{\partial r_1}{\partial z} = \frac{1}{\mu} r_3 + kr_2 \quad (50)$$

ve

$$r_4 = \left[k\lambda_L r_1 + (\lambda_L + 2\mu) \frac{\partial r_2}{\partial z} \right] \Rightarrow r_4 - k\lambda_L r_1 = (\lambda_L + 2\mu) \frac{\partial r_2}{\partial z} \quad (51)$$

$$\frac{\partial r_2}{\partial z} = \frac{1}{(\lambda_L + 2\mu)} r_4 - \frac{k\lambda_L}{(\lambda_L + 2\mu)} r_1 \quad (52)$$

eşitlikleri elde edilebilir. Bu eşitlikler, Denklem (41) ve (42)' de tanımlanan r_1 ve r_2 nin derinlikle değişim ifadesidir. Denklem (50) ve (52) ihtiyaç duyulan 4 denklemin 2 sini temsil eder, diğer 2 denklem ise r_3 ve r_4 ün derinliğe göre değişimi ifadesi yardımıyla elde

edilecektir. İlk önce $\partial r_3/\partial z$ nin elde edilmesi için; Denklem (41), (44) ve (46), Denklem (1) de yerlerine yazılıp uygun türevler alınırsa,

$$r_1 \cdot e^{i(kx-\omega t)} (-\omega^2) \rho_d = -k \left(k(\lambda_L + 2\mu)r_1 + \lambda_L \frac{\partial r_2}{\partial z} \right) e^{i(kx-\omega t)} + \frac{\partial r_3}{\partial z} e^{i(kx-\omega t)} \quad (53)$$

$$r_1 (-\omega^2) \rho_d = -k \left(k(\lambda_L + 2\mu)r_1 + \lambda_L \frac{\partial r_2}{\partial z} \right) + \frac{\partial r_3}{\partial z}$$

$$\frac{\partial r_3}{\partial z} = k \left(k(\lambda_L + 2\mu)r_1 + \lambda_L \frac{\partial r_2}{\partial z} \right) - r_1 \omega^2 \rho_d \quad (54)$$

eşitliği elde edilir. Bu denklemde, $\partial r_2/\partial z$ yerine Denklem (52)' de elde edilen ifade yazılırsa,

$$\frac{\partial r_3}{\partial z} = k \left(k(\lambda_L + 2\mu)r_1 + \lambda_L \left[\frac{1}{(\lambda_L + 2\mu)} r_4 - \frac{k\lambda_L}{(\lambda_L + 2\mu)} r_1 \right] \right) - r_1 \omega^2 \rho_d \quad (55)$$

$$\frac{\partial r_3}{\partial z} = k \left(k(\lambda_L + 2\mu)r_1 + \frac{\lambda_L}{(\lambda_L + 2\mu)} r_4 - \frac{k\lambda_L^2}{(\lambda_L + 2\mu)} r_1 \right) - r_1 \omega^2 \rho_d$$

$$= k \left(r_1 \left[k(\lambda_L + 2\mu) - \frac{k\lambda_L^2}{(\lambda_L + 2\mu)} \right] + \frac{\lambda_L}{(\lambda_L + 2\mu)} r_4 \right) - r_1 \omega^2 \rho_d$$

$$= r_1 k^2 \left((\lambda_L + 2\mu) - \frac{\lambda_L^2}{(\lambda_L + 2\mu)} \right) + r_4 \frac{k\lambda_L}{(\lambda_L + 2\mu)} - r_1 \omega^2 \rho_d$$

$$= r_1 k^2 \left(\frac{(\lambda_L + 2\mu)^2 - \lambda_L^2}{(\lambda_L + 2\mu)} \right) + r_4 \frac{k\lambda_L}{(\lambda_L + 2\mu)} - r_1 \omega^2 \rho_d$$

$$= r_1 k^2 \left(\frac{\lambda_L^2 + 4\mu\lambda_L + 4\mu^2 - \lambda_L^2}{(\lambda_L + 2\mu)} \right) + r_4 \frac{k\lambda_L}{(\lambda_L + 2\mu)} - r_1 \omega^2 \rho_d$$

$$= r_1 k^2 \left(4\mu \frac{(\lambda_L + \mu)}{(\lambda_L + 2\mu)} \right) + r_4 \frac{k\lambda_L}{(\lambda_L + 2\mu)} - r_1 \omega^2 \rho_d$$

$$= r_1 \left(k^2 \left[4\mu \frac{(\lambda_L + \mu)}{(\lambda_L + 2\mu)} \right] - \omega^2 \rho_d \right) + r_4 \frac{k\lambda_L}{(\lambda_L + 2\mu)} \quad (56)$$

elde edilir. $\partial r_4/\partial z$ denkleminin elde edilmesi için ise Denklem (42), (46) ve (48), Denklem (2)' de yerine yazılıp gerekli türevler alınırsa

$$i(-\omega^2) r_2 e^{i(kx-\omega t)} \rho_d = i \frac{\partial r_4}{\partial z} e^{i(kx-\omega t)} + ikr_3 e^{i(kx-\omega t)} \quad (57)$$

$$\frac{\partial r_4}{\partial z} = -\omega^2 \rho_d r_2 - r_3 k \quad (58)$$

eşitliği elde edilir. Böylelikle her tabaka için tanımlanan r_j ($j=1,2,3,4$) katsayılarının çözümünde gerekli olan denklemler elde edilmiş olur. Sırasıyla, Denklem (50), (52), (56) ve (58) alt alta yeniden yazılırsa,

$$\begin{aligned} \frac{\partial r_1}{\partial z} &= \frac{1}{\mu} r_3 + k r_2 \\ \frac{\partial r_2}{\partial z} &= \frac{1}{(\lambda_L + 2\mu)} r_4 - \frac{k \lambda_L}{(\lambda_L + 2\mu)} r_1 \\ \frac{\partial r_3}{\partial z} &= r_1 (k^2 \gamma - \omega^2 \rho_d) + r_4 \frac{k \lambda_L}{(\lambda_L + 2\mu)} \Rightarrow \gamma = \left(4\mu \frac{(\lambda_L + \mu)}{(\lambda_L + 2\mu)} \right) \\ \frac{\partial r_4}{\partial z} &= -\omega^2 \rho_d r_2 - r_3 k \end{aligned}$$

tüm katsayıların ya da bu katsayıların temsil ettiği yer değiştirme (r_1, r_2) ve gerilme ifadelerinin (r_3, r_4) düşey yöndeki türevler cinsinden yazılabileceği görülür. Tüm r_j ($j=1,2,3,4$) parametrelerinde ω ve k frekans bağımlı iken, diğer tüm parametreler derinliğe bağlı olarak değişir. Burada ayrıca Rayleigh dalgası yer değiştirme ifadesindeki frekans bağımlı değişkenler Rayleigh dalgasının dispersif özelliğini ifade ederler.

r_j ($j=1,2,3,4$) parametrelerinin düşey yöndeki türevleriyle oluşturulan birinci dereceden diferansiyel denklemler bir katsayı matrisi yardımıyla,

$$\frac{\partial}{\partial z} \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & k & \mu^{-1} & 0 \\ -k \lambda_L \cdot (\lambda_L + 2\mu)^{-1} & 0 & 0 & (\lambda_L + 2\mu)^{-1} \\ k^2 \gamma - \omega^2 \rho_d & 0 & 0 & k \lambda_L \cdot (\lambda_L + 2\mu)^{-1} \\ 0 & -\omega^2 \rho_d & -k & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \end{bmatrix} \quad (59)$$

formunda yazılabilir. Bu tip diferansiyel denklem çözümleri $\partial f / \partial z = A \cdot f$ şeklinde aranabilir (Coddington ve Levinson, 1955; Gantmacher, 1959). Denklem (59) bu formda yazıldığında

$$f = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \end{bmatrix} \text{ ve } A = \begin{bmatrix} 0 & k & \mu^{-1} & 0 \\ -k \lambda_L \cdot (\lambda_L + 2\mu)^{-1} & 0 & 0 & (\lambda_L + 2\mu)^{-1} \\ k^2 \gamma - \omega^2 \rho_d & 0 & 0 & k \lambda_L \cdot (\lambda_L + 2\mu)^{-1} \\ 0 & -\omega^2 \rho_d & -k & 0 \end{bmatrix} \quad (60)$$

halini alır. Denklem (60)' ta f Rayleigh özdeğer fonksiyonu, bu fonksiyonun köklerini temsil eden $r_j(k, z, \omega)$ parametreleri ise özdeğerler olarak isimlendirilirler.

1.4.2.1. Rayleigh Özdeğer Probleminin Çözüm Teknikleri

Doğrusal özdeğer probleminin çözümü için sayısal integral, sonlu farklar, sonlu elemanlar, sınır elemanlar ve spektral elemanlar yöntemleri gibi birçok yöntem kullanılabilir. Bununla beraber, sıkça kullanılan yöntemlerin büyük bir kısmı yayıcı (propagator) matris yöntemleri olarak bilinen sınıfa aittir (Kennett, 2011). Thomson-Haskell algoritması, diğer bir adı “transfer matrisi yöntemi” (Thomson, 1950; Haskell, 1953) bu sınıfta en fazla kullanılan yöntemdir. Bunun nedeni yöntemin basitliği ve bilgisayar ortamındaki hesaplamalara rahatça entegre edilmesidir. Bununla birlikte bu yöntem sadece, yarı sonsuz homojen ortamın üzerinde tabakalanmış homojen ortamlardan oluşan, düşey heterojen yer altı modellerinde uygulanabilir.

Thomson-Haskell yönteminde, doğrusal özdeğer probleminin non-trivial çözümü, Rayleigh dispersiyon denkleminin köklerinden oluşmaktadır. Rayleigh dispersiyon denkleminin kökleri ise Rayleigh dalga yayılımında, her bir frekanstaki dalga yayılım modlarına karşılık gelen dalga sayısı değerleridir. Dispersiyon denkleminin kökleri bulunduğu, her bir moddaki özdeğer fonksiyonu basit sayısal işlemler ile hesaplanır. Rayleigh özdeğer fonksiyonları gerilimin ve gerilimden doğan deformasyonun derinliğe bağlı değişimini verir. Bu yöntem Thomson (1950) tarafından geliştirildikten sonra, Haskell (1953) tarafından kısa ve uzun dalga boyları için ilk halinden daha kararlı hale getirilmiştir. Yöntem ilerleyen yıllarda birçok araştırmacı tarafından amaçlarına uygun şekilde geliştirilmeye devam etmiştir (Schwab ve Knopoff, 1970; Abo-Zena, 1979; Harvey, 1981).

Kausel ve Roësset (1981), Thomson-Haskell algoritmasını kullanarak “dinamik sıklık matris yöntemi” adı verdikleri bir sonlu elemanlar formülasyonu geliştirmişlerdir. Bu yöntemin ana özelliği, Thomson-Haskell yöntemindeki dönüşüm matrisinin yerini, yapısal analizlerde kullanılan klasik sıklık matrisinin almasıdır. Yöntemin avantajı, özdeğer probleminin çözümünü homojen olmayan veya dinamik yükler altındaki zeminler için de çözmesidir (Kausel, 1981). Bu yöntemde kullanılan sonlu elemanlar yönteminin jeofizikte ilk kullanımları sismolojide ve deprem mühendisliği alanlarında dalga yayılım

denklemlerinin çözümünde Lysmer ve Waas (1972) ve Lysmer ve Drake (1972) tarafından olmuştur.

Yüzey dalgalarının özdeğer probleminin çözümü için kullanılan diğer önemli bir algoritma Kennett ve ekibi tarafından geliştirilen (Kennett, 1974, 2011; Kennett ve Kerry, 1979) “yansıma ve kırılma katsayıları” algoritmasıdır. Bu yöntem daha sonra birçok araştırmacı tarafından değiştirilmiş ve geliştirilmiştir (Luco ve Apsel, 1983; Chen, 1993; Hisada, 1994, 1995; Lai ve Rix, 1998). Bu yöntem sadece tabakalı ortamlar için kullanılmaktadır. Temeli, tabakalı bir ortam için yansıma ve kırılma katsayıları matrisleri oluşturmaya dayanır. Yöntem Rayleigh dispersiyon denkleminin iteratif çözümü için oldukça kullanışlıdır.

Yukarıda bahsedilen yöntemlerin dışında doğrusal özdeğer probleminin çözümünde bazı sayısal yöntemlerde kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları; sonlu farklar yöntemi (Boore, 1972), sayısal integral yöntemi (Takeuchi ve Saito, 1972), sınır elemanlar yöntemi (Manolis ve Beskos, 1988) ve spektral elemanlar yöntemi (Faccioli vd., 1996; Komatitsch ve Vilotte, 1998) olarak verilebilir. Bu yöntemler yayıcı (propagator) matris yönteminden daha az kullanılsa da birçok avantajları vardır. Sayısal integral ve spektral elemanlar yöntemi ortam parametrelerinin derinlikle sürekli değiştiği, düşey heterojen ortamlarda propagator yöntemden daha kullanışlıdır.

1.4.3. Bir Yapay Tabaka Modeli İçin Rayleigh Dalgası Dispersiyon Eğrisinin Modelleme Aşamaları

Yapay bir yer altı modeli için frekansa bağlı Rayleigh dalgası faz hızı yani dispersiyon eğrisi modellemesinde Denklem (40) ve (60)' a bakıldığında gerekli olan parametreler;

- S dalga hızları
- P dalga hızı ya da Poisson oranı
- Kalınlık ve yoğunluk bilgileri
- Çalışmak istenen frekans ekseni

olarak sıralanabilir.

Modelleme işlemi her bir frekans değeri için, aynı anda tüm tabakalar göz önüne alınarak yapılır. Modelleme adımları şu şekilde gerçekleşir;

- Yapay tabaka modelindeki en büyük ve en küçük, S ve P dalga hızları belirlenir ($V_{s,\min}$; $V_{s,\max}$; $V_{p,\min}$; $V_{p,\max}$). Bu hızlar, Denklem (40)' ta yani yarı sonsuz ortamda Rayleigh dalga hızı denkleminde yerlerine konularak ve uygun kökler bulunarak modelleme sırasında hesaplanabilecek en büyük ve en küçük Rayleigh dalgası faz hızları hesaplanır ($V_{R,\min}$; $V_{R,\max}$). Örneğin iki tabakalı bir durum için;

$$\begin{aligned} V_s &= [250 \ 750] \text{ m/s} \\ V_p &= [430 \ 1300] \text{ m/s} \\ \rho_d &= [1.7 \ 2.0] \text{ gr/cm}^3 \Rightarrow \begin{aligned} V_{R,\min} &= 225.25 \text{ m/s} \\ V_{R,\max} &= 750.00 \text{ m/s} \end{aligned} \\ h &= [5] \text{ m} \\ f &= 5 \xrightarrow{df=5 \text{ Hz}} 80 \text{ Hz} \end{aligned}$$

Denklem (40)' a göre $V_{s,\max}$ ' tan elde edilecek gerçek $V_{R,\max}$ 690 m/s' dir ancak bu değerin $V_{s,\max}$ ' a eşit alınma nedeni sonraki aşamalarda açıklanacaktır.

- Daha sonra frekans eksenindeki ilk değerden başlamak üzere;
 - Frekans değerine (f_i) karşılık gelen açısız frekans (ω_i) hesaplanır.

$$\omega_i = 2\pi f_i \quad (61)$$

$$\begin{aligned} i=1 \text{ için } \Rightarrow \omega_1 &= 2\pi f_1 \\ &= 2\pi 5 = 31.42 \text{ (rad/s)} \end{aligned}$$

- Hesaplanan ω_i kullanılarak daha önceden hesaplanan $V_{R,\min}$ ve $V_{R,\max}$ yardımıyla, f_i değeri için en büyük ve en küçük dalga sayısı (k_{\min} , k_{\max}) hesaplanır.

$$k_i = \omega_i / V_{R_i} \text{ rad/m} \quad (62)$$

$$k_{\max} = \omega_i / V_{R,\min} \Rightarrow k_{\max} = 31.41 / 225.25 = 0.1394 \text{ rad/m}$$

$$k_{\min} = \omega_i / V_{R,\max} \Rightarrow k_{\min} = 31.41 / 750 = 0.0419 \text{ rad/m}$$

Burada k_{\min} değerinin olabildiğince küçük elde edilebilmesi için $V_{R,\max}$, $V_{s,\max}$ ' a eşit alınmıştır. Böylelikle daha küçük dalga sayıları ve düşük frekanslarla temsil edilen derin bölgelerin modellenmesinde hassasiyet artırılmış olur.

- o Daha sonra k_{\max} ve k_{\min} arasındaki dalga sayısı örnekleme aralığı hesaplanır.

$$dk = \frac{k_{\max} - k_{\min}}{N_{adm}} \quad (63)$$

$$dk = \frac{0.1394 - 0.0419}{200} = 4.875 \times 10^{-4} \text{ rad/m}$$

Buradaki adım sayısı (N_{adm}), $V_{R,\min}$ ile $V_{R,\max}$ arasında hesaplamak istediğimiz hız adetini temsil eder. Adım sayısı ne kadar fazla olursa hesaplama aralığı da o kadar sıkı olur.

k_{\max} dan başlamak üzere, k_{\max} ile k_{\min} aralığında dk adımlarıyla, her bir k değerinin özdeğer fonksiyonunun kökü olup olmadığı hesaplanır. Herhangi bir k değeri özdeğer fonksiyonunu sağlıyorsa bu k değeri, f_i ' ye ait $k_{i,j}$ ' inci kök olarak isimlendirilir.

Burada j , f_i değeri için özdeğer fonksiyonunu sağlayan kök sayısıdır. Bir f_i değeri için özdeğer fonksiyonunu sağlayan bir ya da birden fazla k değeri bulunabilir. Buradaki örnekte $f_1 = 5 \text{ Hz}$ için tek bir kök yani k değeri bulunmuştur ve $k_{1,1} = 0.0478$ olarak verilmektedir. Aynı şekilde $f_4 = 20 \text{ Hz}$ için iki adet kök bulunmuştur ve kökler sırasıyla $k_{4,1} = 0.3151$ ve $k_{4,2} = 0.2434$ şeklinde verilir. Frekans eksenini yüksek frekanslara kaydıkça birden fazla kök bulma ihtimali artar ve elde edilen kökler daha büyük dalga boylarına doğru kayar. Yukarıda verilen yapay yer altı modeli parametreleri için hesaplanan tüm kökler

- o Tablo 1.2 de verilmiştir. Hesaplanan $k_{i,j}$ değerlerinin f - k ortamındaki görüntüsü ise Şekil 1.7' de gösterilmiştir.
- o Son olarak özdeğer fonksiyonunu sağlayan $k_{i,j}$ değerleri yardımıyla, f_i değerlerine karşılık gelen $V_{R,i,j}$ değeri hesaplanır. Eğer f_i değeri için özdeğer fonksiyonunu sağlayan bir tek k değeri varsa buradan hesaplanan Rayleigh faz hızı temel moda aittir. Eğer birden fazla kök durumu varsa; f_i değeri için hesaplanan özdeğerlerin en büyüğü

olan $k_{i,j_{\max}}$ temel mod hızına denk gelen dalga sayısı iken, dalga sayısı değeri küçüldükçe hesaplanan hızlar, yüksek mod hızlarını temsil eder. Yapay yer altı modeli için hesaplanan Rayleigh faz hızı değerleri Tablo 1.3 ve Şekil 1.8' de gösterilmiştir.

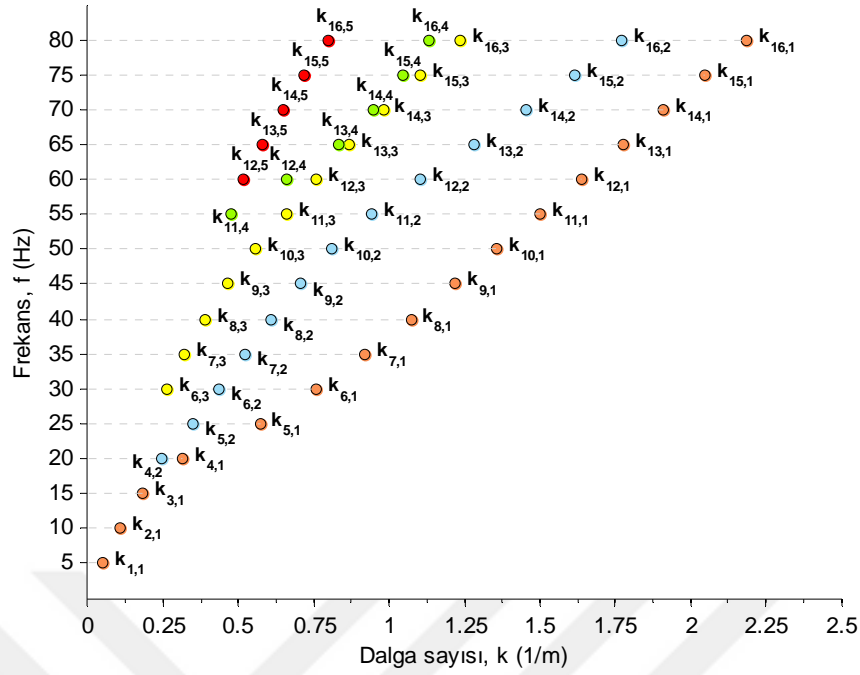
$$V_{R,i,j} = \omega_i / k_{i,j} \quad (64)$$

Tablo 1.2. Her frekans için hesaplanan dalga sayısı değerleri

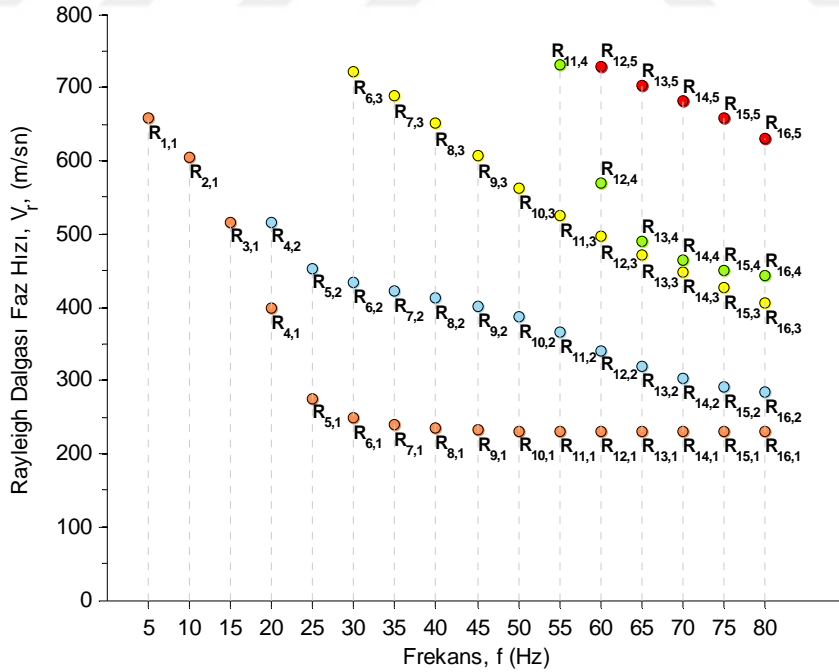
f (Hz)	ω (Hz)	i	k				
			j=1	j=2	j=3	j=4	j=5
5	31.42	i=1	0.0478				
10	62.83	i=2	0.1040				
15	94.25	i=3	0.1823				
20	125.66	i=4	0.3151	0.2434			
25	157.08	i=5	0.5703	0.3463			
30	188.50	i=6	0.7585	0.4342	0.2614		
35	219.91	i=7	0.9206	0.5212	0.3197		
40	251.33	i=8	1.0714	0.6101	0.3864		
45	282.74	i=9	1.2165	0.7046	0.4662		
50	314.16	i=10	1.3583	0.8114	0.5583		
55	345.58	i=11	1.4981	0.9429	0.6572	0.4732	
60	376.99	i=12	1.6368	1.1058	0.7599	0.6620	0.5167
65	408.41	i=13	1.7747	1.2814	0.8664	0.8335	0.5810
70	439.82	i=14	1.9122	1.4528	0.9794	0.9479	0.6459
75	471.24	i=15	2.0494	1.6162	1.1009	1.0443	0.7165
80	502.65	i=16	2.1864	1.7726	1.2351	1.1339	0.7963

Tablo 1.3. Her frekans için hesaplanan dalga sayıları yardımıyla elde edilen Rayleigh faz hızı değerleri

f (Hz)	ω (Hz)	i	V_R				
			j=1	j=2	j=3	j=4	j=5
5	31.42	i=1	657.72				
10	62.83	i=2	604.03				
15	94.25	i=3	516.88				
20	125.66	i=4	398.79	516.33			
25	157.08	i=5	275.42	453.53			
30	188.50	i=6	248.50	434.10	721.24		
35	219.91	i=7	238.87	421.96	687.93		
40	251.33	i=8	234.57	411.94	650.40		
45	282.74	i=9	232.43	401.30	606.45		
50	314.16	i=10	231.29	387.21	562.74		
55	345.58	i=11	230.67	366.50	525.83	730.33	
60	376.99	i=12	230.32	340.94	496.10	569.45	729.68
65	408.41	i=13	230.12	318.72	471.37	490.01	702.99
70	439.82	i=14	230.01	302.75	449.07	464.01	680.97
75	471.24	i=15	229.94	291.57	428.04	451.25	657.66
80	502.65	i=16	229.90	283.57	406.97	443.29	631.22



Şekil 1.7. Her frekans için hesaplanan dalga sayısı değerlerinin frekans-dalga sayısı düzleminde gösterimi



Şekil 1.8. Her frekanstaki dalga sayısı yardımıyla elde edilen Rayleigh dalgası faz hızı değerleri. Dispersiyon eğrisi, aynı mod için tanımlanan hız değerlerinin birleştirilmesi ile oluşturulabilir.

1.5. Düşey Elektrik Sondajı (DES) Verilerinin Doğrusal Süzgeçler Yardımıyla Modellenmesi

Bir DES verisinin doğrusal süzgeçler yardımıyla modellenmesi iki aşamada gerçekleşir;

1. Dönüşük öz direnç değerlerinin hesaplanması (Koefoed, 1970, 1980; Başokur, 2004),
2. Doğrusal süzgeçler yardımıyla, dönüşük öz direnç değerlerinin görünür öz direnç değerlerine çevrilmesi (Ghosh, 1970, 1971; Das ve Ghosh, 1973; Johansen, 1975; Başokur, 2004).

İzotrop n tabakalı bir ortamın herhangi bir tabakasında, yeryüzündeki nokta akım kaynağından dolayı oluşan gerilim (V) Stefanescu vd. (1930) tarafından

$$V_i = \frac{\rho_i I}{2\pi} \int_0^{\infty} (e^{-\tau z} + \theta_i(\tau) \cdot e^{-\tau z} + X_i(\tau) \cdot e^{\tau z}) \cdot J_0(\tau s) d\tau \quad (65)$$

olarak verilmiştir. Burada i ; tabaka numarası olmak üzere, ρ_i ; tabaka öz direnci, I ; akım, $\theta_i(\tau)$; Stefanescu çekirdek fonksiyonu, J_0 ; sıfırıncı dereceden, birinci cins Bessel fonksiyonu, $X_i(\tau)$; sınır şartlarından çözülebilir fonksiyon; τ ; uzaklığın tersi boyutundaki değişken ve s ; akım kaynağından geçen düşey eksen ile ölçüm noktası arasındaki uzaklık olarak gösterilmiştir. Bu denklemin çözümü için yatay tabakalı bir ortamda aşağıdaki sınır koşullarının göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

- Her tabaka ara yüzeyindeki gerilim süreklidir.
- Tüm ara yüzeylerde akım yoğunluğunun düşey bileşeni süreklidir.
- Yeryüzünde akım yoğunluğu sıfırdır.
- Kaynaktan sonsuza giderken, gerilim sıfıra yaklaşmalıdır.

Bu sınır şartları altında, yeryüzü için yani $z=0$ ' da tüm s değerleri için $\theta(\tau) = X(\tau)$ olmalıdır. Bu bilgiler ışığında Denklem (65) tekrar düzenlenirse

$$V = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^{\infty} (1 + 2\theta_1(\tau)) \cdot J_0(\tau s) d\tau \quad (66)$$

elde edilir. Burada $K_1(\tau) = 1 + 2\theta_1(\tau)$, Slichter çekirdek fonksiyonu dönüşümü yapıldığında

$$V = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^{\infty} K_1(\tau) J_0(\tau s) d\tau \quad (67)$$

yazılabilir. Bu integralin sayısal çözümü, Pekeris (1940) yineleme bağıntısı ile yapılabilir. Koefoed (1980) Slichter çekirdek fonksiyonunun yinelemeli çözümünü, tabaka kalınlığı ve öz direnci yardımıyla

$$K_i = \frac{K_{i+1} + \frac{\rho_i}{\rho_{i+1}} \tanh(\tau h_i)}{\frac{\rho_i}{\rho_{i+1}} + K_{i+1} \cdot \tanh(\tau h_i)} \quad (68)$$

şeklinde tanımlamıştır. Burada hesaplama yarı-sonsuz tabaka ile başlar ve yüzeye kadar devam eder. Sınır şartları gereği $K_n(\tau) = 1$ alınır. Slichter çekirdek fonksiyonu yardımıyla Denklem (67),

$$V = \frac{I}{2\pi} \int_0^{\infty} T(\tau) J_0(\tau s) d\tau \quad (69)$$

halini alır. Burada $T_i = K_i \cdot \rho_i$ olarak tanımlanır ve T_i ; dönüşük öz direnç adı verilir. Bu integraldeki dönüşük öz direnç değerleri yine Pekeris (1940) yardımıyla

$$T_i = \frac{T_{i+1} + \rho_i \cdot \tanh(\tau h_i)}{1 + \left(\frac{T_{i+1}}{\rho_i}\right) \cdot \tanh(\tau h_i)} \quad (70)$$

şeklinde çözülebilir. Bu yinelemeli çözüme de yarı-sonsuz ortamdan başlanır ve sınır koşulları gereği yarı-sonsuz ortam için $T_n = \rho_n$ alınır.

Her bir s uzaklığı yani, ölçüm noktası için dönüşük öz direnç değerleri bu şekilde hesaplanabilir. Denklem (70)' ten görüleceği gibi dönüşük öz direnç değerleri, kullanılan elektrot diziliminden bağımsızdır. Bu değerler doğrusal süzgeçler yardımıyla görünür öz direnç model eğrilerine çevrilir. Bu aşamada ise kullanılan doğrusal süzgeç katsayılarının hangi dizilim için hesaplandığı önem kazanmaktadır.

1.5.1. Doğrusal Süzgeçler

Düşey elektrik sondajı görünür öz direnç eğrisi verilerinin modellenmesinde doğrusal süzgeçler, belirli örnekleme aralığı kullanılarak elde edilmiş süzgeç

katsayılarından oluşur ve dönüşük öz direnç değerleri ile görünür öz direnç değerleri arasındaki dönüşümü sağlamakta kullanılırlar. Ghosh (1970) de ilk uygulamaları yapılan bu teknik aslında Slichter (1933) ve Pekeris (1940) tarafından matematiksel olarak gerçekleştirilebilecek olduğu söylenmiştir. Ancak o dönemlerde çekirdek fonksiyonun hesaplanmasında pratik işlemlerin olmaması bunu mümkün kılmamıştır.

Görünür ve dönüşük öz dirençler arasındaki doğrusal ilişki Ghosh (1971) ve Başokur (2004) yardımıyla açıklanabilir. Schlumberger dizilimi için bir ölçüm noktasındaki görünür öz direnç değeri;

$$\rho_a(s) = 2\pi s^2 \cdot \frac{E}{I} \quad (71)$$

ile gösterilebilir. Burada E : Elektrik alanı göstermektedir. Elektrik alan ile gerilim arasında

$$E = -\frac{\partial V}{\partial s} \quad (72)$$

ilişkisi olduğundan Denklem (71)

$$\rho_a(s) = -\frac{2\pi s^2}{I} \left(\frac{\partial V}{\partial s} \right) \quad (73)$$

şeklinde yazılabilir. Denklem (69)' daki gerilim bağıntısı uzaklığa göre türevlendiğinde

$$\frac{\partial V}{\partial s} = -\frac{I}{2\pi} \int_0^{\infty} T(\tau) J_1(\tau s) \tau d\tau \quad (74)$$

elde edilir. Denklem (74)' teki $-J_1(\tau s)\tau$ ifadesi

$$\frac{d(J_0(\tau s))}{ds} = -J_1(\tau s)\tau \quad (75)$$

şeklinde tanımlanır. Burada J_1 ; birinci cins, birinci dereceden Bessel fonksiyonunu temsil eder. Denklem (74), Denklem (73)' te yerine koyulursa

$$\rho_a(s) = s^2 \int_0^{\infty} T(\tau) J_1(\tau s) \tau d\tau \quad (76)$$

elde edilir. Denklem (76) Hankel transformu sayesinde

$$T(\tau) = \int_0^{\infty} \frac{\rho_a(s) J_1(s)}{s} ds \quad (77)$$

yazılabilir. Denklem (76) ve (77)' ten açıkça görülmektedir ki; görünür ve dönüşük öz direnç fonksiyonları Bessel fonksiyonu ve Hankel dönüşümü yardımıyla birbirleri

cinsinden yazılabilir. Herhangi bir fonksiyonun Hankel dönüşümü (diğer adıyla Fourier-Bessel Dönüşümü), o fonksiyonun sonlu sayıdaki Bessel fonksiyonu katsayılarının ağırlıklandırılmış toplamı ile ifade edilmesini sağlar. Denklem (76) ve (77)' ye bakıldığında, özdirenç değerlerinin birbiri cinsinden yazımı sırasında kullanılan doğrusal süzgeç katsayılarının aslında, çeşitli araştırmacıların (Ghosh, 1970; Nyman ve Landisman, 1977) farklı örnekleme aralıkları değerleri kullanarak hesapladıkları Bessel fonksiyonu katsayıları ya da değerleri olduğu söylenebilir.

Doğrusal süzgeçlerin uygulanmasında belirlenmesi gereken iki parametre vardır. Bunlar;

- Örnekleme aralığı ($\Delta s = (\log^{10}) / m$) ya da örnekleme oranı (m)
- Arzu edilen çıkışın yani görünür özdirenç eğrisinin, hangi elektrot diziliminde istendiği

Doğrusal süzgeçlerde kullanılan örnekleme aralığı, süzgeç katsayı adetini etkiler. Örnekleme aralığı Δs küçüldükçe, kullanılan katsayı adeti artar ve daha hassas bir modelleme elde edilir. Diğer taraftan, fazla sayıda katsayı kullanılması işlem yükünü arttırır. Aslında, bilgisayar işlemcileri hızlarının günümüzde ulaştığı nokta düşünüldüğünde Ghosh (1971) ve izleyen çalışmalarda vurgulanan işlem hızı probleminin ortadan kalktığı söylenebilir. Bu nedenle, hassasiyetin nispeten fazla olması için nokta sayısı fazla olan diziler kullanılabilir. Dönüşük özdirenç değerlerini, Schlumberger dizilimi ile toplanmış DES görünür özdirenç eğrisine çeviren doğrusal süzgeçlerin bazıları aşağıda belirtilmiştir.

- Ghosh (1970), 9 noktalı
- O'Neill (1975), 20 noktalı
- Nyman ve Landisman (1977), 13 ve 31 noktalı
- Koefoed (1980), 15 noktalı
- Guptasarma (1982), 11 noktalı

Bilindiği gibi elektrik yöntemlerde birden fazla elektrotun kullanıldığı birçok elektrot dizilimi bulunmaktadır. Her bir elektrot diziliminden elde edilecek görünür özdirenç değerlerinin matematiksel ifadeleri farklı olacaktır. Çünkü, farklı dizilimlerin sahip olduğu farklı elektrot aralıkları, gerilim farkının hesaplanmasında yani gerilimin uzaklığa göre türevlenmesinde değişimler yaratacaktır. Dolayısıyla, doğrusal sisteme giren giriş verisinin türü, çıkış verisiyle aynı olması gerektiğinden, kullanılacak doğrusal süzgeç

katsayılarının, dizilim türüne uygun olması gerekir. Örneğin; Wenner dizilimi için gerilim bağıntısı

$$\rho_a(a) = 2a \left(\int_0^{\infty} T(\tau) \cdot (J_0(\tau a) - J_0(\tau 2a)) d\tau \right) \quad (78)$$

şeklinde yazılırken (a : elektrotlar arası eşit uzaklık), Schlumberger dizilimi için Denklem (76)' ta gösterildiği gibidir. Her iki denklemde de giriş verisi $T(\tau)$, çıkış $\rho_a(a)$ olduğu düşünülürse, hesaplanacak Bessel fonksiyonlarının yani süzgeç katsayılarının farklı olduğu ortadır. Dolayısıyla kullanılacak süzgeç katsayılarının, arzu edilen dizilime uygun seçilmesi gerekir.

Dönüşük ve görünür özdirenç arasındaki doğrusal sistem, uzaklık ortamında;

$$\rho_a(x) = H(x) * T(x) \quad (79)$$

şeklinde ya da uzaklık ortamındaki konvolüsyon işleminin işlem yükünün azaltılması için frekans ortamında

$$\rho_a(f) = H(f) \cdot T(f) \quad (80)$$

şeklinde tanımlanabilir. Her iki denklemde de; ρ_a : görünür özdirenci, H : doğrusal sistemi ve T : dönüşük özdirenci göstermektedir. Frekans ortamında doğrusal sistem Denklem (80) yardımıyla

$$H(f) = \rho_a(f) / T(f) \quad (81)$$

şeklinde yazılabilir. Denklem (81) doğrusal sistemi dolayısıyla süzgeç fonksiyonunu temsil etmektedir. Süzgeç fonksiyonunun frekans ortamında, *Sinc* fonksiyonunun frekans ortamındaki eşdeğeri olan dikdörtgen bir fonksiyon ile çarpılması sonucu süzgeç katsayıları frekans ortamında elde edilmiş olur. Son olarak Ters Fourier dönüşümü ile süzgeç katsayılarının zaman ortamındaki değerleri elde edilir.

1.5.2. Bir Yapay Tabaka Modeli İçin Görünür Özdirenç Eğrisinin Modelleme Aşamaları

Görünür özdirenç eğrisinin modellenmesi, uzaklık eksenindeki her bir değer için ilk önce dönüşük özdirenç değerinin hesaplanması ve bu değerlerin doğrusal süzgeç katsayıları yardımıyla görünür özdirenç değerlerine dönüştürülmesi şeklindedir.

Yapay bir yer altı modeli için görünür özdirenç değerlerinin hesaplanmasında Denklem (70)' e bakıldığında gerekli olan parametreler;

- Yapay modelin kalınlık ve özdirenç bilgileri
- Görünür özdirenç değerlerinin hesaplanacağı uzaklık eksen değeri
- Veri örnekleme aralığı ve bu aralığa uygun doğrusal süzgeç katsayıları

olarak sıralanabilir.

Görünür özdirenç eğrilerinin modellenmesinde gözden kaçırılmaması gereken en önemli noktalardan biri; hesaplamada kullanılacak uzaklık eksenlerinin her zaman doğrusal süzgeç katsayılarının hesaplanmasında kullanılan örnekleme aralığına uymama problemidir. Yani, Bölüm 0' de değinildiği gibi doğrusal süzgeç katsayılarının hesaplandığı örnekleme aralığı (Δs) ile uzaklık eksen örnekleme aralığının birbirine eşit olması gerekliliğidir. Bu durum modellemede kullanıcıyı kısıtlayan bir mecburiyettir ancak aşılması mümkündür ve bu konuya modelleme aşamalarının anlatıldığı bölümde çözüm getirilecektir.

Modelleme adımları, uzaklık ekseninin (s) ilk değerinden başlamak üzere her bir s_i değeri için şu şekilde gerçekleşir;

- Yapay yer altı tabaka modeli parametreleri kullanıcı tarafından belirlenir. Örneğin iki tabakalı bir durum için

$$h = 5$$

$$\rho = [20 \ 100]$$

$$s = 10^{0.3} \xrightarrow{20.Adet} 10^2$$

$$b_j = \left\{ \begin{array}{cccccccccccccc} b_{10} & b_9 & b_8 & b_7 & b_6 & b_5 & b_4 & b_3 & b_2 & b_1 & b_0 & b_{-1} & b_{-2} \\ 0.0105 & -0.0262 & 0.0416 & -0.0746 & 0.1605 & -0.4390 & 1.3396 & -2.7841 & 1.6448 & 0.8183 & 0.2525 & 0.0336 & 0.0225 \end{array} \right\}$$

parametreleri verilsin. Burada b , modellemede kullanılacak doğrusal süzgeç katsayılarını (13 noktalı; Nyman ve Landisman, 1977) gösterirken, s eksenini 2 den 100 e logaritmik artımlarla 20 adet sayıdan oluşturulmuştur ve uzaklık eksenini temsil etmektedir.

- Yukarıda bahsedilen örnekleme aralığı probleminin ortadan kalkması için görünür özdirenç değerinin hesaplanacağı uzaklık eksen değeri s_i kullanılarak, Δs örnekleme aralığı ile yeni bir uzaklık eksen (u veya $1/\tau$ eksen olarak isimlendirilir) oluşturulur. Oluşturulan u ekseninin eleman sayısı (N_u), kullanılacak doğrusal süzgecin nokta sayısına eşit olmalıdır ($N_u = 13$). Yeni eksen oluşturulurken, görünür özdirenç değerinin

hesaplanacağı uzaklık eksenini değeri (bu aşamada $s_1 = 2 \text{ m}$), doğrusal süzgeç katsayılarının b_0 (merkez değeri) değerine (yani süzgeç katsayılarının 11. elemanına) denk gelecek şekilde konumlandırılır. Bu nedenle Δs örnekleme aralığı ile s_i değerinin sol tarafına, kullanılan süzgeç katsayılarının pozitif indis ($+j$) sayısı kadar, sağ tarafına negatif indis ($-j$) sayısı kadar değer eklenir. Burada kullanılan 13 noktalı süzgecin pozitif indis değeri (N_p) 10, negatif indis değeri (N_N) 2' dir.

$$u = \underbrace{0.0111; 0.0187; 0.0314; \dots; 1.1876}_{j' \text{ nin pozitif adeti} = N_p = 10} \quad \mathbf{2} \quad \underbrace{3.3522; 5.6319}_{j' \text{ nin negatif adeti} = N_N = 2}$$

$$u_k = \left\{ \begin{array}{cccccccccccccc} u_1 & u_2 & u_3 & u_4 & u_5 & u_6 & u_7 & u_8 & u_9 & u_{10} & u_{11} & u_{12} & u_{13} \\ 0.0111 & 0.0187 & 0.0314 & 0.0528 & 0.0887 & 0.1491 & 0.2504 & 0.4207 & 0.7069 & 1.1876 & \mathbf{2.0000} & 3.3522 & 5.6319 \end{array} \right\}$$

- Daha sonra, oluşturulan u ekseninin her elemanı için dönüşük öz direnç değerleri hesaplanır. Bunun için uzaklığın tersi boyutunda yani τ için elde edilen Denklem (70)' in $\tau = 1/u$ için düzenlenmiş hali kullanılır. n tabaka sayısı olmak üzere

$$T_k = \sum_{i=n-1}^1 \frac{T_{i+1} + \rho_i \cdot \tanh(h_i/u_k)}{1 + \left(\frac{T_{i+1}}{\rho_i}\right) \cdot \tanh(h_i/u_k)} \quad k = 1, 2, \dots, N_u$$

denklemini hesaplanır. Dolayısıyla hesaplama yarı sonsuz tabakanın üstünden başlar ve yüzeye doğru yinelemeli olarak devam eder. Bölüm 0' de belirtildiği gibi sınır koşulları gereği yarı sonsuz ortamın için $T_n = \rho_{a,n}$ alınır. Burada kullanılan 2 tabakalı durum için;

$$u = u(1) = 0.0111$$

$$n = 2$$

$$T_2 = \rho_2 = 100$$

$$\rho_1 = 20$$

$$t_{n-1} = t_1 = 5$$

$$T_1 = \frac{T_2 + \rho_1 \cdot \tanh(t_1/u_1)}{1 + \left(\frac{T_2}{\rho_1}\right) \cdot \tanh(t_1/u_1)} = \frac{100 + 20 \cdot \tanh(5/0.0111)}{1 + \left(\frac{100}{20}\right) \cdot \tanh(5/0.0111)} = 20$$

$s = 2m$ ' de tüm u değerleri için ($k = 1, 2, \dots, 13$) bu hesaplama yapıldığında;

	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6	u_7	u_8	u_9	u_{10}	u_{11}	u_{12}	u_{13}
T_k	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.01	20.18	21.40	25.09

elde edilir.

- Son aşama; elde edilen dönüşük öz direnç T değerleri ve doğrusal süzgeç katsayıları yardımıyla $s = 2m$ için ρ_a değerinin elde edilmesidir. Bu işlem doğrusal süzgeçteki pozitif indisli katsayı adeti N_p yardımıyla ve $m = N_p + 1$ olmak üzere

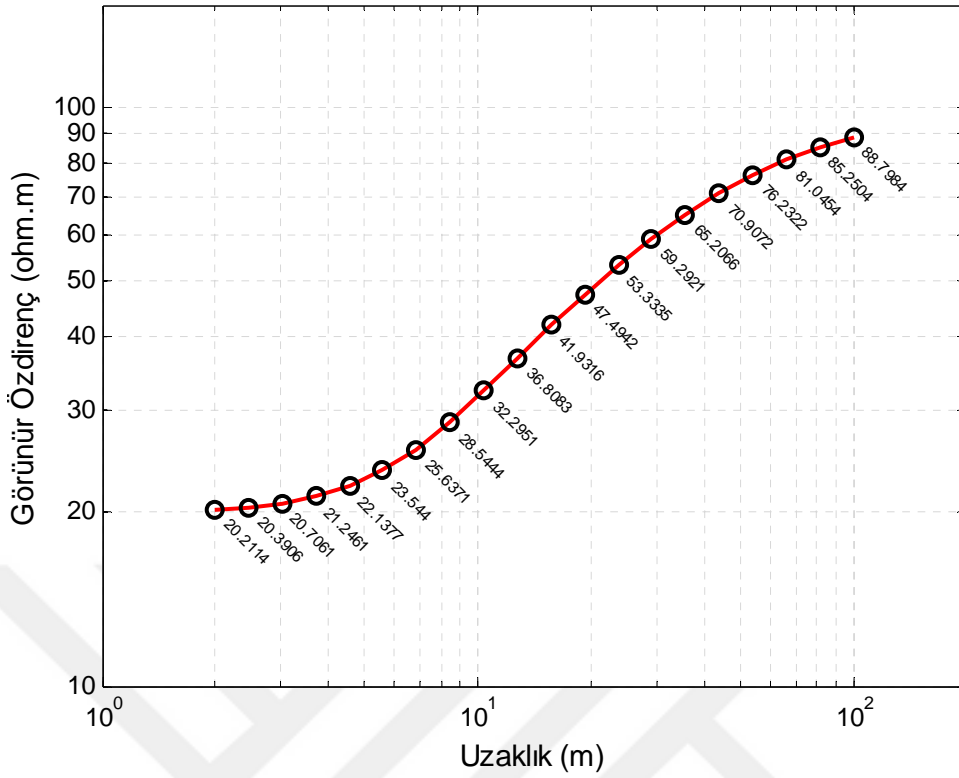
$$\rho_{a,s} = \sum_{j=-2}^{N_p} T_{m-j} \cdot b_j$$

şeklinde tanımlanabilir. Kullanılan yer altı modelinde $s = 2m$ için

$$\rho_{a,2} = \sum_{j=-2}^{10} T_{11-j} \cdot b_j = 20.21 \text{ ohm} \cdot m$$

olarak hesaplanır.

- Uzaklık ekseninin ilk değeri için yapılan bu işlemler, tüm eksen için tekrarlandığında; yer altı modeline ait tüm yapay görünür öz direnç değerleri hesaplanmış olur. Tüm uzaklık değerleri için hesaplanan yapay görünür öz direnç değerleri Şekil 1.9' da gösterilmiştir.



Şekil 1.9. Yapay yer altı parametreleri için elde edilen görünür öz direnç eğrisi ve değerleri

1.6. ÇKYD ve DES Verilerinde Model Parametreleri Duyarlılığı

ÇKYD verileri gibi birçok parametreye bağlı ve doğrusal olmayan karakteri yüksek bir veri grubu ile, DES verileri gibi eşdeğerlilik ve bastırma sorunları olan (Parasnis, 2012) iki verinin modellenmesi ve ters çözümü sırasında, verilerin hangi model parametrelerine ne kadar ve nerede duyarlı olduğunun bilinmesi önemlidir.

Gerçek yeraltı koşullarında, bir model parametresinin veriden kestirilme olasılığı, o parametrenin veride bir anomali yaratması ile orantılıdır (Strobbia, 2003). Model parametresinin veride anomali meydana getirme gücü ise duyarlılık değerleri ile ortaya koyulabilir. Bir model parametresinin veri üzerinde düşük duyarlılığa sahip olması, düşük güvenilirliğinin işareti iken, yüksek duyarlılık değerleri model parametrelerinin güvenilir olduğunu gösterir. Dolayısıyla, duyarlılık değerleri verinin ne kadar iyi çözümlenebileceğinin ölçüsünü gösterir (Tarantola, 2005).

Duyarlılık değerlerinin hesaplanması çalışmanın amacına ve ilgilenilen bilgiye göre farklılık gösterebilir (Gyulai, 1989; Liang vd., 2008), ancak ana fikir gözlenen ya da

hesaplanan fiziksel niteliğin model parametrelerine göre kısmi türevlerinin elde edilmesidir. Yani model parametre değişimlerinin veri üzerinde meydana getirdiği değişimlerin hesaplanmasıdır. Bu işlem “Frechet türevi” olarak ta isimlendirilir (Spitzer ve Kümpel, 1997). Çoğu çalışmada duyarlılık değerleri çekirdek matrisin oluşturulmasında da kullanılmaktadır (Park ve Van, 1991; Sasaki, 1994; Farquharson ve Oldenburg, 1996; Loke ve Barker, 1996) ve;

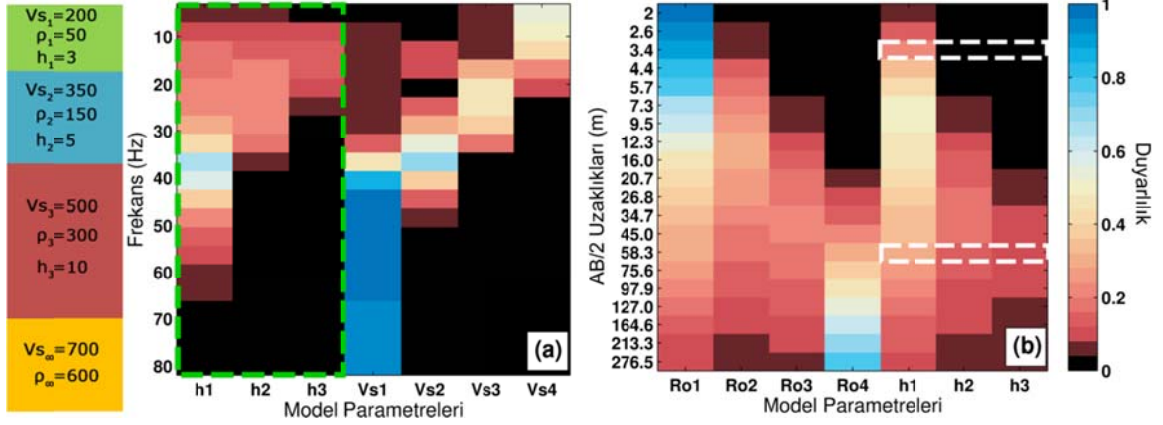
$$S = \frac{\partial F / \partial m}{\partial F / \partial d} \quad (82)$$

ile tanımlanır. Burada F karakteristik fonksiyonu, d kestirilen yada gözlemsel veriyi, m analiz edilen model parametresini, S ise duyarlılık matrisi göstermektedir. Temel olarak nümerik bir kısmi türev işleminin gerçekleştirilmesi 3 yolla olabileceğinden (merkezi, ileri ve geri yönlü) hesaplanan duyarlılık değerlerinin anlamları da farklılık gösterir (Tablo 1.4).

Tablo 1.4. Farklı hesaplama türleri için duyarlılık değerlerinin anlamları

Yöntem	Formül	Duyarlılık Yönü	Anlamı
İleri yönlü farklar	$\frac{d_i(m+\delta m) - d_i(m)}{\delta m}$	Pozitif	m artarken d_i artar
		Negatif	m artarken d_i azalır
Geri yönlü farklar	$\frac{d_i(m) - d_i(m-\delta m)}{\delta m}$	Pozitif	m azalırken d_i azalır
		Negatif	m azalırken d_i artar
Merkezi farklar	$\frac{d_i(m+\delta m) - d_i(m-\delta m)}{2\delta m}$	Pozitif	$m \pm \delta m$ kadar değiştiğinde d_i artar
		Negatif	$m \pm \delta m$ kadar değiştiğinde d_i azalır

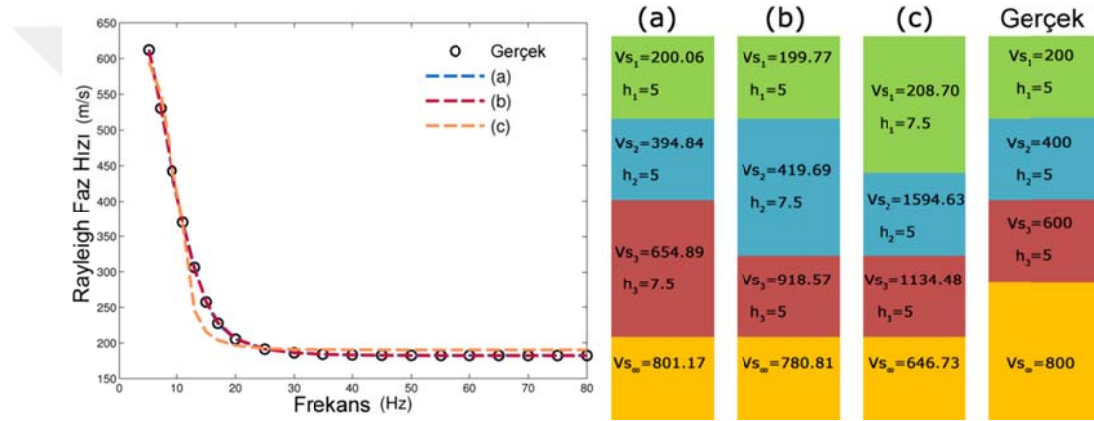
Duyarlılık değerlerinin pratikte hangi tür bilgiler sunacağını göstermek adına Vs ve ρ' nun derinlikle arttığı basit 4 tabakalı bir model üzerinden RD ve DES eğrileri için ileri yönlü sonlu farklar yardımıyla hesaplanmış ve normalleştirilmiş duyarlılık değerleri Şekil 1.10' da gösterilmiştir.



Şekil 1.10. Basit 4 tabakalı sentetik model için hesaplanan duyarlılık değerleri, (a) RD eğrisi için, (b) DES eğrisi için

Şekil 1.10’ da her bir parametrenin veriye yaptığı katkıyı ve bu katkının miktarı görülebilmektedir. Örneğin, Şekil 1.10a’ da Vs_1 ’ in dispersiyon eğrisine yaptığı katkı geniş bir frekans bandında olmasının yanında yaklaşık 40 Hz’ den itibaren maksimum olurken, Vs_4 ’ ün dispersiyon eğrisi verisine katkısı sadece 25 Hz’ lik frekans bandı ile sınırlı olup, bilgi yoğunluğu nispeten düşüktür. Şekil 1.10b’ de AB/2 nin 3.4 değeri için hesaplanan görünür özdirenç değeri, tabaka kalınlıkları bakımından sadece ilk tabakanın etkisi altında iken, 58.3 m. deki görünür özdirenç değeri tüm tabakaların etkisi altındadır (beyaz parçalı çizgiler), bu durum özdirenç çalışmalarında sıklıkla karşılaşılan ve yöntemin zayıf yanlarından biri kabul edilen eşdeğerlilik prensibinin göstergesidir. Diğer taraftan, tabaka kalınlıklarının RD eğrisine olan katkıları nispeten az olmasının yanında, her bir tabaka kalınlığının etkin olduğu frekans bantları daha belirgin şekilde ayrılmıştır (Şekil 1.10a). Ayrıca, veriye en fazla katkı birinci tabakadan gelirken, bu katkının derinlikle azaldığı görülmektedir. Buradan şu sonuç çıkarılabilir, birinci tabaka kalınlığında yapılacak bir değişimin veriye olan etkisi, üçüncü tabakada yapılan bir değişiminin veriye olan etkisinden büyüktür. Önceki paragraflardan “bir model parametresinin veriden kestirebilmesi olasılığı, o parametrenin veride bir anomali yaratması ile orantılıdır (Strobbia, 2003)” yargısı hatırlanacak olursa, olası bir ters çözüm sonucunda birinci tabaka kalınlığının güvenilir şekilde kestirilme olasılığı, üçüncü tabakaninkinden yüksektir. Bu oranın üçüncü tabaka için düşük oluşu, aynı zamanda elde edilecek çözümün, üçüncü tabakanın farklı değerleri için bir “çok çözümlülük ürünü” olma ihtimalini de arttırmaktadır.

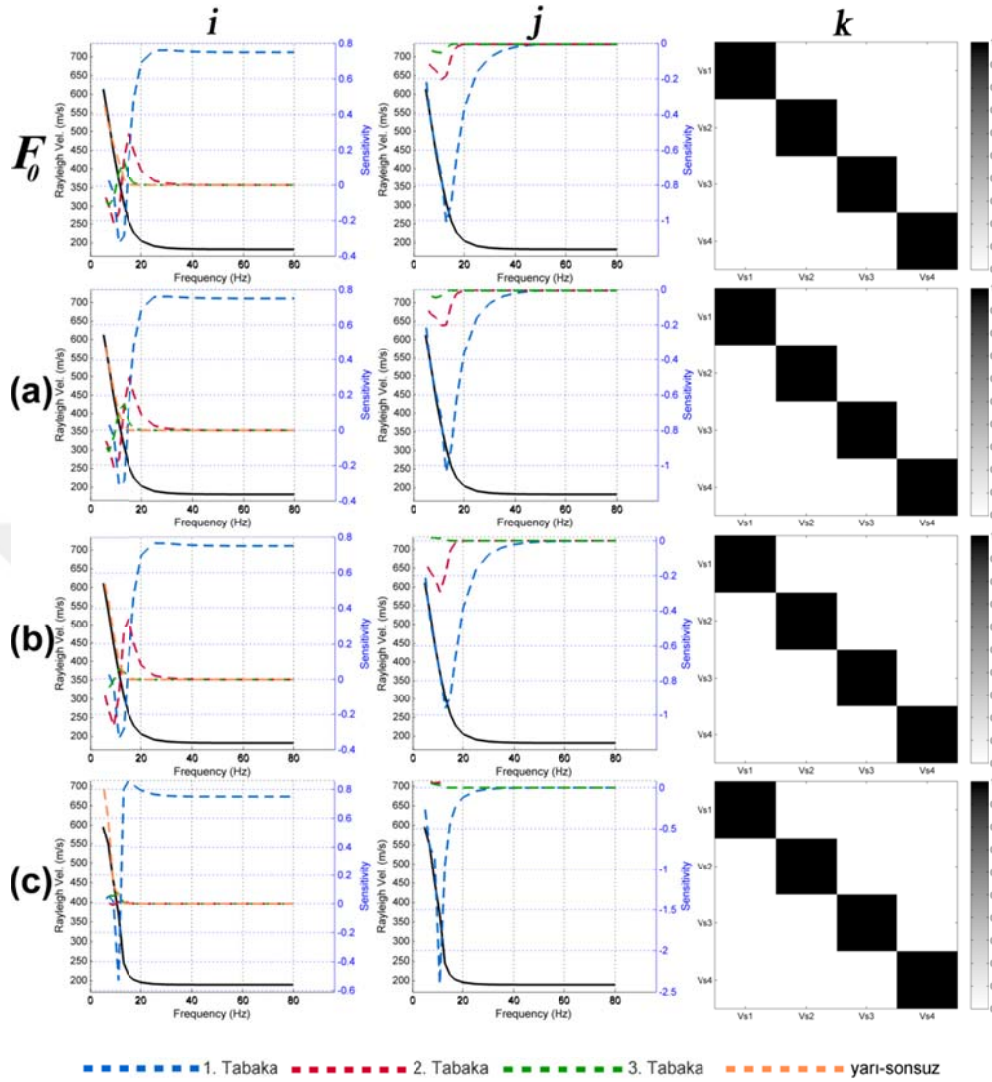
Ters çözüm sonucunda elde edilen model parametrelerinin duyarlılık analizleri de modellemede olduğu gibi birçok yararlı bilgiler verir ve bu bilgiler çok çözümlülüğün bir göstergesi olarak kullanılabilir (Senkaya ve Karsli, 2015). Bunu göstermek adına, eşit tabaka kalınlıklarına sahip, V_s ve ρ' nun derinlikle arttığı, 4 tabakalı basit bir model için türetilen yapay RD verisinin, 4 farklı giriş modeli ile ters çözümü yapılmıştır (Şekil 1.11 ve Tablo 1.5). İlk giriş modelinde (F_0) kullanılan tabaka kalınlıkları, gerçek değerler olup, diğer üç modeldeki (a, b, c) tabaka kalınlıkları her bir tabaka kalınlığının %50 arttırılması ile elde edilmiştir (Tablo 1.5). Son olarak, her bir çözüme ait duyarlılık değerleri ve model ayrımlılık matrisi hesaplanmıştır (Şekil 1.12).



Şekil 1.11. Basit bir yer altı modelinden üretilen yapay veri için üç farklı başlangıç modeli ile yapılmış ters çözümlerden elde edilen kolon modeller ve model tepkileri.

Tablo 1.5. Kullanılan başlangıç modelleri, ters çözüm sonuçları ve yaklaşım hataları

	Model	I_0	F_0	I_1	(a)	I_2	(b)	I_3	(c)
V_{s1}	200	300	199,98	300	200,06	300	199,77	300	208,70
V_{s2}	400	300	400,05	300	394,84	300	419,69	300	1594,63
V_{s3}	600	300	594,24	300	654,89	300	918,57	300	1134,48
V_{s4}	800	300	802,78	300	801,17	300	780,81	300	646,73
h_1	5	5		5		5		7,5	
h_2	5	5		5		7,5		5	
h_3	5	5		7,5		5		5	
İterasyon No			14		20		20		20
RMS (%)			43,70	43,70	0,11	43,70	0,30	43,60	7,07



Şekil 1.12. Normal dispersif karakterdeki bir dispersiyon eğrisinin dört farklı giriş modeli ile ters çözümüne ait Vs (i kolonu), h (j kolonu) duyarlılık değerleri ve model ayrırlılık matrisleri (k kolonu).

Şekil 1.12’ de ilk dikkat edilmesi gereken noktalardan biri tüm çözümlerin model ayrırlılık matrislerinin birim matris olmasıdır. Bilindiği gibi model ayrırlılık matrisleri model parametrelerinin nasıl çözümlenebileceğinin öğrenilmesi için pratik bir yoldur (Xia vd., 2008) ve birim matrise yaklaştıkça model parametrelerinin güvenilir şekilde elde edildiği kabul edilir (Menke, 1989). Bu tanıma göre tüm senaryolarda model parametreleri iyi çözümlenmiştir. Ancak, duyarlılık değerlerine göre b ve c çözümlerinde parametre duyarlılık değerlerinin büyük kısmı sıfır ya da sıfıra yakındır, dolayısıyla bu çözümlerdeki parametrelerin, sonuç yer altı modelleri için fiziksel bir anlamı yoktur ve bu çözümler iyi birer matematiksel yaklaşımdan ibarettir, yani çok çözümlülük ürünüdür.

1.7. Ters Çözüm

Doğadaki birçok olayı fiziksel ve matematiksel olarak tanımlayabilmek için denklem sistemleri kullanılır. Herhangi bir olayı ya da veriyi matematiksel olarak tanımlarken kullanılan denklemler sadece bilinmeyenlerin sıfırcı yada birinci dereceden türlerini içeriyorsa doğrusal, yüksek dereceden üstler, kökler yada trigonometrik ifadeler içeriyorsa doğrusal olmayan sistemler olarak adlandırılırlar ve çok iyi bilinmektedir ki yer bilimlerdeki birçok olay doğrusal olmayan denklemlerle temsil edilmektedir. Veriye neden olan parametreler ile veri arasındaki ilişki doğrusal olmadığından, veriye neden olan parametreleri doğrudan bir düzey çarpımı ile elde etmek mümkün değildir. Bu ilişkinin kurulabilmesi için akla gelen en basit yöntem “deneme-yanılma” olabilir. Buna göre sisteme ait ön bilgiler dâhilinde veriye uygun bir “başlangıç parametre” topluluğu belirlenir ve bu parametrelerden elde edilecek yapay verinin, ölçülen veri ile olan farkına bakılır. Eğer fark, kabul edilebilir sınırlar içindeyse kullanılan başlangıç parametreleri, elde edilmeye çalışılan gerçek parametreler olarak kabul edilir ve sonuç olarak adlandırılır. Aksine, iki veri arasındaki fark istenilen hata payının üzerindeyse, kullanılan başlangıç modeli değiştirilir ve işlem tekrar edilir. Bu süreç iki veri arasındaki farkın kabul edilebilir sınırlara gelinceye kadar devam eder. Ancak bu süreçte dikkat edilmesi gereken nokta ortada her zaman bir “hata” değerinin olmasıdır. Buda “deneme-yanılma” sürecinde kullanılan parametrelerin gerçek parametreler olmadığını, belirli bir “hata” değeri içinde birer yaklaşım ortaya koyduğunu gösterir. Diğer dikkat edilmesi gereken nokta, gerçek parametreler ile veri arasındaki ilişki doğrusal olmadığından, veriyi belirli “hata” lar dâhilinde elde edebileceğimiz birden fazla parametre topluluğunun olabileceği ihtimalidir. Görüldüğü gibi doğrusal olmayan bir problemin teorik ve basit bir çözümü bile birçok dikkat edilmesi gereken husus içermektedir.

Bilindiği gibi jeofizik mühendisliği alanında kullanılan verilerin birçoğu teorik olarak doğrusal olmayan sistemlerle temsil edilir. Bununla birlikte jeofizik verilerin büyük çoğunluğu gürültü içerir ve dolayısıyla yukarıda bahsedilen basit bir deneme-yanılma yöntemi sonuca ulaşmayı zorlaştırır. Bu nedenle yukarıda basitçe anlatılan çözüm sürecinin geliştirilmesi gerekecektir.

1.7.1. Doğrusal Olmayan Problemlerin Ters Çözümü

Uzaklık eksenini boyunca, m ; yer altı model parametreleriyle tanımlanan bir $d(x_i, m)$ fonksiyonumuz olsun. Burada; $i = 1, 2, 3, \dots, n$; ölçüm noktası sayısını yani veri sayısını, x ; ölçüm noktası koordinatlarını göstermektedir. Bu fonksiyona m_0 ; başlangıç model parametreleri olmak üzere $d(x_i, m_0)$ gibi bir başlangıç modeli ile yaklaşılmaya çalışılırsa, Taylor serisi yardımıyla

$$d(x_i, m) = d(x_i, m_0) + \sum_{j=1}^k \frac{\partial d(x_i, m_0)}{\partial m_{0,j}} (m_j - m_{0,j}) + \dots \quad (83)$$

yazılabilir. Burada, yüksek dereceden türevli terimler işlem kolaylığı açısından ihmal edilir. Denklem (83)' te gösterim kolaylığı açısından $d(x_i, m)$ yerine d , $d(x_i, m_0)$ yerine d_0 , ön kestirim parametreleriyle elde edilen kuramsal verinin ön kestirim parametrelerine göre kısmi türevlerini içeren $\partial d_{0,i} / \partial m_{0,j}$ dizeyi yerine G (Çekirdek ya da Jacobian matris) ve $m_j - m_{0,j} = \Delta m$ yazılırsa;

$$d = d_0 + G \cdot \Delta m \quad (84)$$

yada

$$d - d_0 = G \cdot \Delta m \quad (85)$$

elde edilir. Denklem (84) veya (85) tüm doğrusal olmayan problemlerin ters çözümünün temelini oluşturur. Bu denklemin çözümü, problemin türüne yada elde edilmek istenen yaklaşım türüne göre farklılıklar gösterebilir ki, bu farklı ters çözüm tekniklerinin geliştirilmesini sağlar. Bu çalışmada ağırlıklandırılmış sönümlü en küçük kareler yöntemi kullanılacaktır.

1.8. Birleşik Ters Çözüm Akışının Oluşturulması

1.8.1. Algoritma

Çalışmada en küçüklenmeye çalışılacak amaç fonksiyonu

$$\varphi = \varphi_d + \varepsilon * \varphi_s \quad (86)$$

şeklinde oluşturulmuştur. Denklem (86)' ta φ_d ve φ_s sırasıyla hata fonksiyonu ve model normunu temsil ederken, ε ise sönüm faktörüdür. Hata fonksiyonu

$$\varphi_d = (d^{obs} - d^{est})^T C_{obs}^{-1} (d^{obs} - d^{est}) \quad (87)$$

ile tanımlanırken N_d veri sayısı olmak üzere $d^{obs} = (d_1^{obs}, \dots, d_{N_d}^{obs})^T$ ve $d^{est} = (d_1^{est}, \dots, d_{N_d}^{est})^T$ vektörleri sırasıyla gözlenen ve kestirilen veriyi temsil eder. Denklem (87)' de C_{obs} gözlemsel verideki belirsizlikleri çözüme dahil eder ve veri kovaryans matrisi olarak isimlendirilir ve gözlemsel verinin her bir ölçüm noktasındaki standart sapmalar yardımıyla

$$C_{obs} = diag(\sigma_{obs}^2) \quad (88)$$

şeklinde elde edilir. Çalışmada her bir ölçüm noktasındaki sapmalar aynı noktada birden fazla veri toplanması ve standart sapmalarının hesaplanması şeklinde elde edilmiştir.

Denklem (86)' ta φ_s model norm

$$\varphi_s = m^T m \quad (89)$$

ile temsil edilir. Burada, N_m model parametre sayısı olmak üzere $m = (m_1, \dots, m_{N_m})^T$ model parametre vektörü olarak isimlendirilir.

Denklem (87) ve (89), Denklem (86)' ta yerlerine yazıldığında amaç fonksiyonu

$$\varphi = (d^{obs} - d^{est})^T C_{obs}^{-1} (d^{obs} - d^{est}) + \varepsilon(m^T m) \quad (90)$$

halini alır ve bu fonksiyon m parametre vektörüne göre türevi alınıp sıfıra eşitlendiğinde

$$\Delta m = (G^T C_{obs}^{-1} G + \varepsilon I)^{-1} \times G^T C_{obs}^{-1} (d^{obs} - d^{est}) \quad (91)$$

elde edilir. Burada I birim matristir. $i+1$.ci iteratiftteki model parametreleri m_{i+1} ise

$$m_{i+1} = m_i + \Delta m_{i+1} \quad (92)$$

şeklinde elde edilmiş olur.

Denklem (91)'deki sönüm faktörü ε , çözüm sırasında tekillik problemi (singularity) nedeniyle oluşabilecek kararsızlıkları (instability) indirgeme işlevi görür. Ayrıca, çözümün hızını ve doğrultusunu da kontrol eder (Marquardt, 1963). Bu nedenle, her bir iterasyonda uygun sönüm değerinin kullanılması önem taşır. Bir ters çözüm akışında ε dört farklı şekilde belirlenebilir ya da kullanılabilir;

- I. Tüm ters çözüm süreci boyunca sabit bir sönüm faktörü
- II. Bir başlangıç sönüm değeri belirleme ve ardı sıra iterasyonlarda bu değeri kullanarak yeni sönüm değeri hesaplama (Rodriguez, 1978)
- III. Ampirik bir formül kullanarak her iterasyonda yeni bir sönüm değeri kestirme (Meju, 1992)
- IV. İterasyon içerisinde birden fazla sönüm değeri test etme (Lai ve Rix, 1998)

Bu çalışmada her bir iterasyonda birden fazla sönüm değeri test etme seçeneği kullanılmıştır. Bunun nedeni, doğrusal olmayan karakteri çok yüksek olan bir veri grubunun ters çözümünde, sönüm değerinin doğrusal bir süreçle belirlenmesinin nispeten verimli olmayacağına öngörülmesidir. Bununla beraber, mevcut iterasyon içerisinde birden fazla sönüm değeri kullanılması, aynı giriş modeli kullanarak aynı iterasyon içinde birden fazla model kestirme ve içlerinden en iyi yaklaşımı belirleme şansı tanımaktadır.

1.8.2. Kısmi Türev Matrisinin (Jacobian, G) Oluşturulması

Birleşik ters çözüm yapılarında farklı veri gruplarını birbiri ile ilişkilendirmek ya da bağlamak için her iki veri modellemesinde de etkin olan, ortak model parametreleri kullanılır ve farklı veri gruplarının tekil ters çözümünde kullanılan kısmi türevlerin yanında, bu ortak parametreye göre olan kısmi türevler de hesaplanarak birleşik kısmi türevler matrisi oluşturulur. Bu çalışmada ortak parametre tabaka kalınlığıdır. DES verilerinin tekil ters çözümünde iki bilinmeyen mevcuttur; tabaka özdirenci ve kalınlığı. Bunun anlamı birleşik kısmi türevler matrisine DES verisinden iki tip kısmi türevin geleceğidir. RD eğrisinin geleneksel tekil çözümünde ise sadece S-dalga hızına ait kısmi türevler bulunmaktadır. Ancak, tabaka kalınlığı ortak parametre olması nedeniyle RD

eğrisi için hem S-dalga hızı hem de tabaka kalınlığına göre kısmi türevlerin hesaplanması gerekmektedir. Dolayısıyla, birleşik kısmi türevler matrisi için iki farklı veri grubunun (RD ve DES), üç farklı model parametresine göre (tabaka kalınlığı, özdirenci ve S-dalga hızı) kısmi türevleri hesaplanmalıdır. S-dalga hızının DES verileri üzerinde, tabaka özdirencinin de RD verisi üzerinde şu an için bilinen bir fiziksel etkisi olmadığından bu kısmi türevler doğrudan sıfır kabul edilecektir (Tablo 1.6).

Tablo 1.6. Birleşik kısmi türevler matrisinden hesaplanması gereken kısmi türevler. Ortak parametre olan tabaka kalınlığına ait kısmi türevler kırmızı renk ile gösterilmiştir

	$(\partial\rho_i)^{-1}$	$(\partial h_i)^{-1}$	$(\partial V_{S_i})^{-1}$
$\partial\rho_a$	hesaplanabilir	hesaplanabilir	0
∂V_R	0	hesaplanabilir	hesaplanabilir

Tablo 1.6' da tekrar hatırlatmak gerekirse ρ_i , h_i , V_{S_i} terimleri i . ci tabakaya ait özdirenc, kalınlık ve S-dalga hızlarını, ρ_a ve V_R ise sırasıyla görünür özdirenc ve Rayleigh dalgası hızı verilerini göstermektedir. Birleşik ters çözüm akışı boyunca ρ_a verileri dönüşük özdirenc (Koefoed, 1970; Johansen, 1975) ve doğrusal süzgeç katsayıları yöntemiyle (Ghosh, 1971; Başokur, 1984) elde edilirken, V_R değerleri Lai ve Rix (1998) tarafından kullanılan genelleştirilmiş iletim katsayıları (R/T) yöntemi ile elde edilmiştir. Çalışmada, Johansen (1977) tarafından tavsiye edilen doğal logaritmik yaklaşımı benimsenmiştir. Bu yaklaşımla çözüme pozitivizm eklenmesinin yanında, farklı veri gruplarının sahip olduğu birim-boyut farklılıkları en aza indirilmiştir. Dolayısıyla, veri ve model vektörleri $d = (\ln \rho_a, \ln V_R)^T$ ve $m = (\ln \rho, \ln V_S, \ln h)^T$ halini almışlardır. Kısmi türevler ise ileri yönlü sonlu farklar tekniği ile

$$\frac{\partial \ln d(m)}{\partial \ln m} = \frac{m}{d(m)} \frac{\partial d(m)}{\partial m} = \frac{m}{d(m)} \left(\frac{d(m + \delta m) - d(m)}{\delta m} \right) \quad (93)$$

şeklinde hesaplanmıştır. Denklem (93)' te δm ileri yöndeki parametre artımını göstermekte ve her bir model parametresi m_i için

$$\delta m_i = 0.1 * m_i \quad (94)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Tablo 1.6' da belirtilen kısmi türevler, Denklem (93) yardımıyla hesaplandığında G matrisi

$$G = \begin{pmatrix} \frac{\partial \ln \rho_a}{\partial \ln \rho} & \frac{\partial \ln \rho_a}{\partial \ln h} & 0 \\ 0 & \frac{\partial \ln V_R}{\partial \ln h} & \frac{\partial \ln V_R}{\partial \ln V_S} \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} \frac{\partial \ln \rho_{a,1}}{\partial \ln \rho_1} & \dots & \frac{\partial \ln \rho_{a,1}}{\partial \ln \rho_N} & \frac{\partial \ln \rho_{a,1}}{\partial \ln h_1} & \dots & \frac{\partial \ln \rho_{a,1}}{\partial \ln h_{N-1}} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \ln \rho_{a,M}}{\partial \ln \rho_1} & \dots & \frac{\partial \ln \rho_{a,M}}{\partial \ln \rho_N} & \frac{\partial \ln \rho_{a,M}}{\partial \ln h_1} & \dots & \frac{\partial \ln \rho_{a,M}}{\partial \ln h_{N-1}} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \frac{\partial \ln V_{R,I}}{\partial \ln h_1} & \dots & \frac{\partial \ln V_{R,I}}{\partial \ln h_{N-1}} & \frac{\partial \ln V_{R,I}}{\partial \ln V_{S_1}} & \dots & \frac{\partial \ln V_{R,I}}{\partial \ln V_{S_N}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \frac{\partial \ln V_{R,K}}{\partial \ln h_1} & \dots & \frac{\partial \ln V_{R,K}}{\partial \ln h_{N-1}} & \frac{\partial \ln V_{R,K}}{\partial \ln V_{S_1}} & \dots & \frac{\partial \ln V_{R,K}}{\partial \ln V_{S_N}} \end{pmatrix} \quad (95)$$

halini alır. Denklem (95)' te N tabaka sayısı, M ve K sırasıyla DES ve RD veri sayısıdır. N adet ρ ve V_S mevcut iken $N-1$ adet h bulunmaktadır. Dolayısıyla G matrisinin boyutu $(M+K) \times (3N-1)$ dir.

1.8.3. Yaklaşım Hatası Kontrolü ve Çözüm Sonlandırıcı Mekanizmalar

Bilindiği gibi RD ve DES verilerinin birimsel boyutları farklı olduğu gibi ölçüm boyunca gösterdikleri değişimler de farklılık gösterir. Görünür özdirenç değerleri logaritmik bir eksenle değişim gösterirken, Rayleigh dalgası faz hızları doğrusal bir eksenle değişirler. Bu nedenle, elde edilen çözümün veriye yaklaşımı Göreceli Uzaklık, GU, (Relative Distance) değeri ile kontrol edilmiştir (Hering vd., 1995). Bu yaklaşım

boyutsuz bir değer olduğundan farklı veri gruplarının kullanıldığı birleşik ters çözüm çalışmalarında sıkça tercih edilmektedir. Göreceli uzaklık

$$\begin{aligned}
 GU &= \sqrt{\frac{1}{M+K} \sum_{i=1}^{M+K} \left(\frac{d_i^{est} - d_i^{obs}}{d_i^{est}} \right)^2} \\
 &= \sqrt{\frac{1}{M+K} \left[\sum_{i=1}^M \left(\frac{\rho_{a,i}^{est} - \rho_{a,i}^{obs}}{\rho_{a,i}^{obs}} \right)^2 + \sum_{i=1}^K \left(\frac{V_{R,i}^{est} - V_{R,i}^{obs}}{V_{R,i}^{obs}} \right)^2 \right]}
 \end{aligned} \tag{96}$$

ile hesaplanabilir.

Tüm ters çözüm işlemlerinde gözlenen veriye yapılan yaklaşımın ilerleyen iterasyonlarla iyileşmesi beklenir. Ancak bu, tüm durumlarda mümkün olmaz ve bazı durumlarda çözüm belli bir yaklaşım değerine sıkışır. Bu tip durumlarda çözümü sonlandırıcı ek sonlandırıcılara ihtiyaç duyulur. Bu amaçla çalışmada ek olarak 3 sonlandırıcı kullanılmıştır;

- Ardı sıra hesaplanan model parametrelerinin GU değeri

$$\sqrt{\frac{1}{3N-1} \sum_{i=1}^{3N-1} \left(\frac{m_{i+1}^{inv} - m_i^{inv}}{m_i^{inv}} \right)^2} < \textit{Tolerans değeri} \tag{97}$$

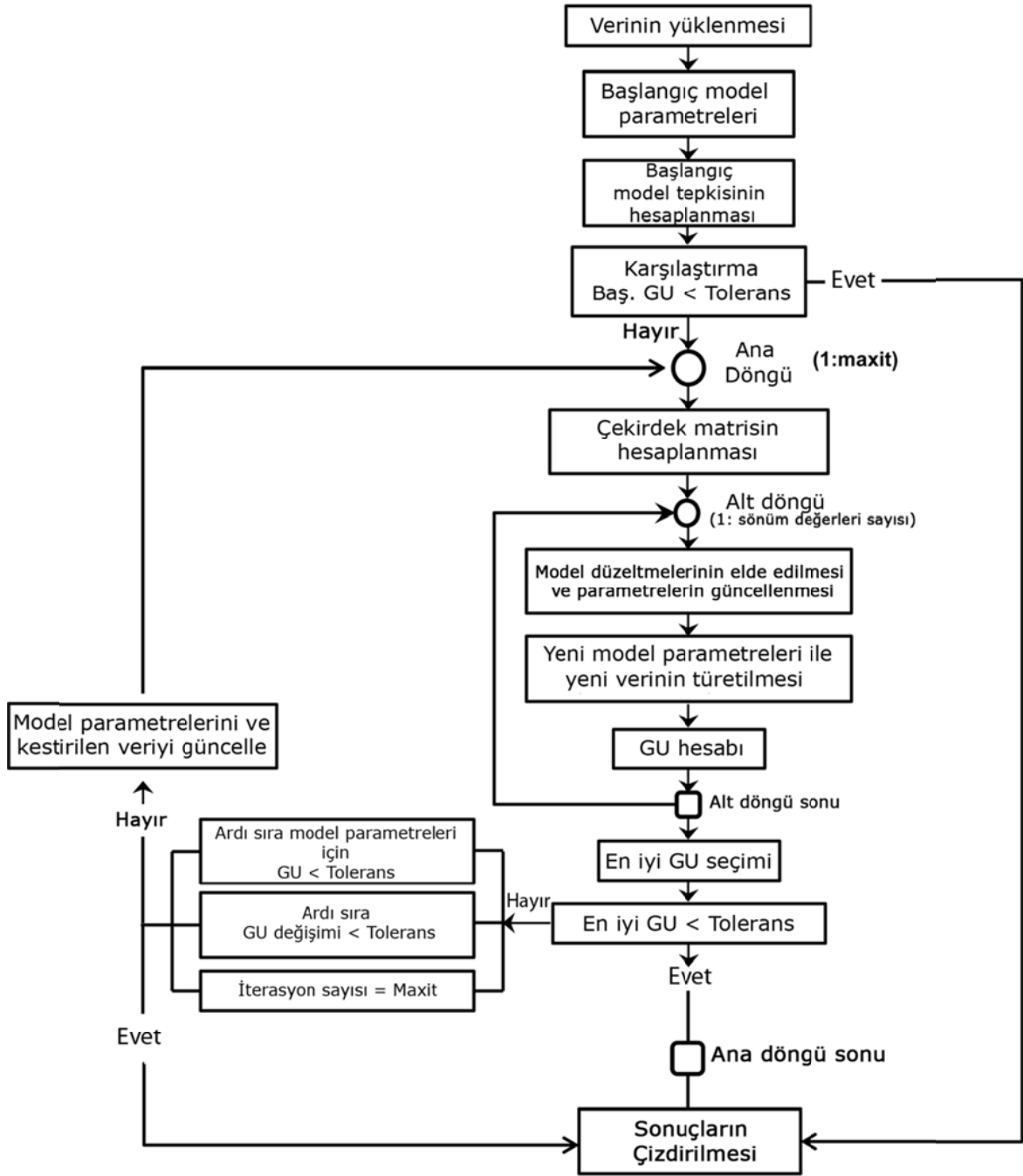
- Ardı sıra hesaplanan GU değerlerinin mutlak değişimi

$$|GU_{i+1} - GU_i| < \textit{Tolerans değeri} \tag{98}$$

- İterasyon sayısının, belirlenen en yüksek değere ulaşması

Tolerans değerleri genellikle veriden veriye değişmesinin yanında, bu çalışmada gürültüsüz verilerde %3-5, gürültülü ve arazi verilerinde %3-8 lik toleranslarda iyi yaklaşımlar elde edildiği görülmüştür. Bunun yanında, özellikle yapay veri uygulamalarında algoritmanın yapay model parametrelerine olabildiğince tam yaklaşımını sağlamak için tolerans değerleri %0.01 seviyelerine kadar indirgenmiştir.

Yukarıdaki her bir aşamanın birleştirilmesi ile oluşturulan birleşik ters çözüm algoritmasına ait akış şeması Şekil 1.13' te gösterilmiştir.



Şekil 1.13. Çalışmada kullanılan birleşik ters çözüm akış şeması

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, oluşturulan birleşik ters çözüm (BTÇ) algoritmasının karakteristik yapay modeller üzerindeki denemeleri ve gerçek saha verileri üzerindeki performansı sunulacaktır.

2.1. Kuramsal Uygulamalar

Oluşturulan algoritmanın ilk denemeleri 6 farklı yapay model üzerinde gerçekleştirilmiştir. Tüm modeller 4 tabakalı olup, her biri RD verilerinin tekil ters çözümünde zorlu problemleri ve/veya sıkça karşılaşılabilecek karakteristik yer altı koşullarına göre üretilmiştir (Tablo 2.1). Model 1’ de tabakaların S-dalga hızları derinlikle artarken, Model 2 yumuşak yarı-sonsuz tabaka problemini temsil etmektedir. Model 3 kalın sert tabaka probleminin bir örneği iken, Model 4 ince- yumuşak tabaka problemini göstermektedir. İlk dört modelde, tabaka özdirençleri ile S-dalga hızlarının değişimleri aynı yönde yani birbiri ile pozitif ilişkili olacak şekilde biçimlendirilmiştir. Tabaka dalga hızları ile özdirençleri arasında genelleştirilmiş bir fiziksel bağlantı olmamasına rağmen (Werthmüller vd., 2013), (Meju vd., 2003) sıkı-konsolide kayalar için P-dalga hızı ile tabaka özdirençleri arasında pozitif bir ilişki varken, konsolide olmayan zayıf ve akışkan içeren kayalar için bu ilişkinin negatif yönde olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, yapılacak yapay denemelerin daha gerçekçi olmasına adına Model 3 ve 4 ten, S-dalga hızları değişimi ile tabaka özdirenç değişimlerinin ters yönde olduğu Model 5 ve 6 türetilmiştir.

Tüm modeller için yapay veriler, BTÇ algoritmasında kullanılan modelleme algoritmaları ile türetilmiştir. RD eğrileri 5-80 Hz lik bir band aralığı için hesaplanırken, DES verileri Schlumberger dizilimi için 2 ile 276.46m. aralığında eşit logaritmik aralığa sahip 20 ölçüm noktası için hesaplanmıştır. Yapay veriler üzerindeki testler her bir model için hem gürültüsüz hem de gürültülü veriler üzerinde yapılmış olup, normal dağılıma sahip Gaussian gürültü kullanılmıştır (sinyal/gürültü oranı %5).

Tablo 2.1. Yapay veri uygulamalarında kullanılan karakteristik yer altı modelleri

Model n°	Tabaka n°	h (m)	V _s (m/s)	v	ρ (ohm.m)	ρ _d (gr/cm ³)	Model n°	Tabaka n°	h (m)	V _s (m/s)	v	ρ (ohm.m)	ρ _d (gr/cm ³)
1	1	3	200	0.30	50	1.7	5	1	3	200	0.35	150	1.7
	2	5	350	0.25	150	1.8		2	10	400	0.25	50	1.8
	3	10	500	0.25	300	1.8		3	5	200	0.35	150	1.7
	4	∞	700	0.20	600	1.9		4	∞	700	0.20	600	1.9
2	1	3	200	0.35	50	1.7	6	1	5	400	0.25	50	1.8
	2	5	350	0.25	150	1.8		2	3	250	0.35	150	1.7
	3	10	500	0.25	450	1.8		3	10	400	0.25	50	1.8
	4	∞	400	0.25	200	1.8		4	∞	700	0.20	600	1.9
3	2	3	200	0.35	50	1.7	4	1	5	400	0.25	150	1.8
	3	10	400	0.25	150	1.8		2	3	250	0.35	50	1.7
	4	5	200	0.35	50	1.7		3	10	400	0.25	150	1.8
	4	∞	700	0.20	600	1.9		4	∞	700	0.20	600	1.9

Yapay veri denemeleri boyunca $C_{obs} = I$ kabul edilmiştir. Dolayısıyla Denklem (91) bilinen sönümlü en küçük kareler ifadesi olan

$$\Delta m = (G^T G + \varepsilon I)^{-1} \times G^T (d^{obs} - d^{est}) \quad (99)$$

halini almıştır. Bununla birlikte, kullanılan değişken sönüm faktörü nedeniyle her bir alt iterasyonda, genelleştirilmiş ters ifadesinin işlenmesi için daha hızlı ve kararlı bir yöntem olan Tekil Değer Ayrışımı (SVD, Singular Value Decomposition) yöntemi kullanılmıştır. Böylelikle, farklı sönüm değerlerinin denendiği her bir alt iterasyondaki tersleme işlemi, diagonal bir matrisin tersinin alınmasına indirgenmiştir. Dolayısıyla $G = U \Lambda V^T$ olmak üzere, her bir alt iterasyonda Δm ;

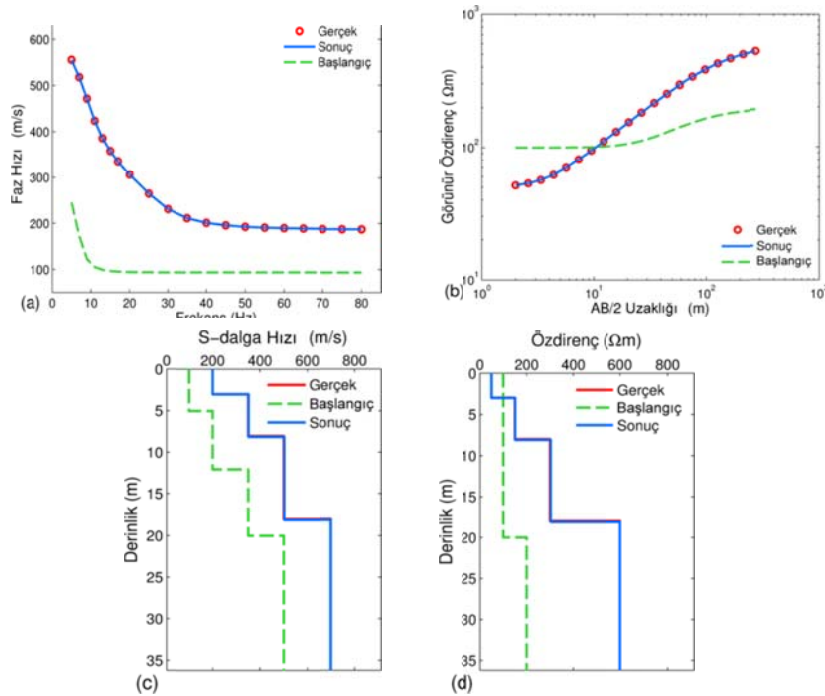
$$\begin{aligned} \Delta m &= (V \Lambda U^T U \Lambda V^T + \varepsilon I)^{-1} \times V \Lambda U^T (d^{obs} - d^{est}) \\ &= (V \Lambda^2 V^T + \varepsilon I)^{-1} \times V \Lambda U^T (d^{obs} - d^{est}) \\ &= V \text{diag}(\Lambda^2 + \varepsilon I)^{-1} V^T V \text{diag}(\Lambda) U^T (d^{obs} - d^{est}) \\ \Delta m &= V \text{diag}\left(\frac{\Lambda}{\Lambda^2 + \varepsilon I}\right)^{-1} U^T (d^{obs} - d^{est}) \end{aligned} \quad (100)$$

olarak elde edilir. Burada V ve U , sırasıyla Jacobian matris G 'nin sağ ve sol tekil vektörleri, Λ ise tekil değerleridir. p sıfırdan farklı tekil değerlerin sayısı olmak üzere Denklem (100)

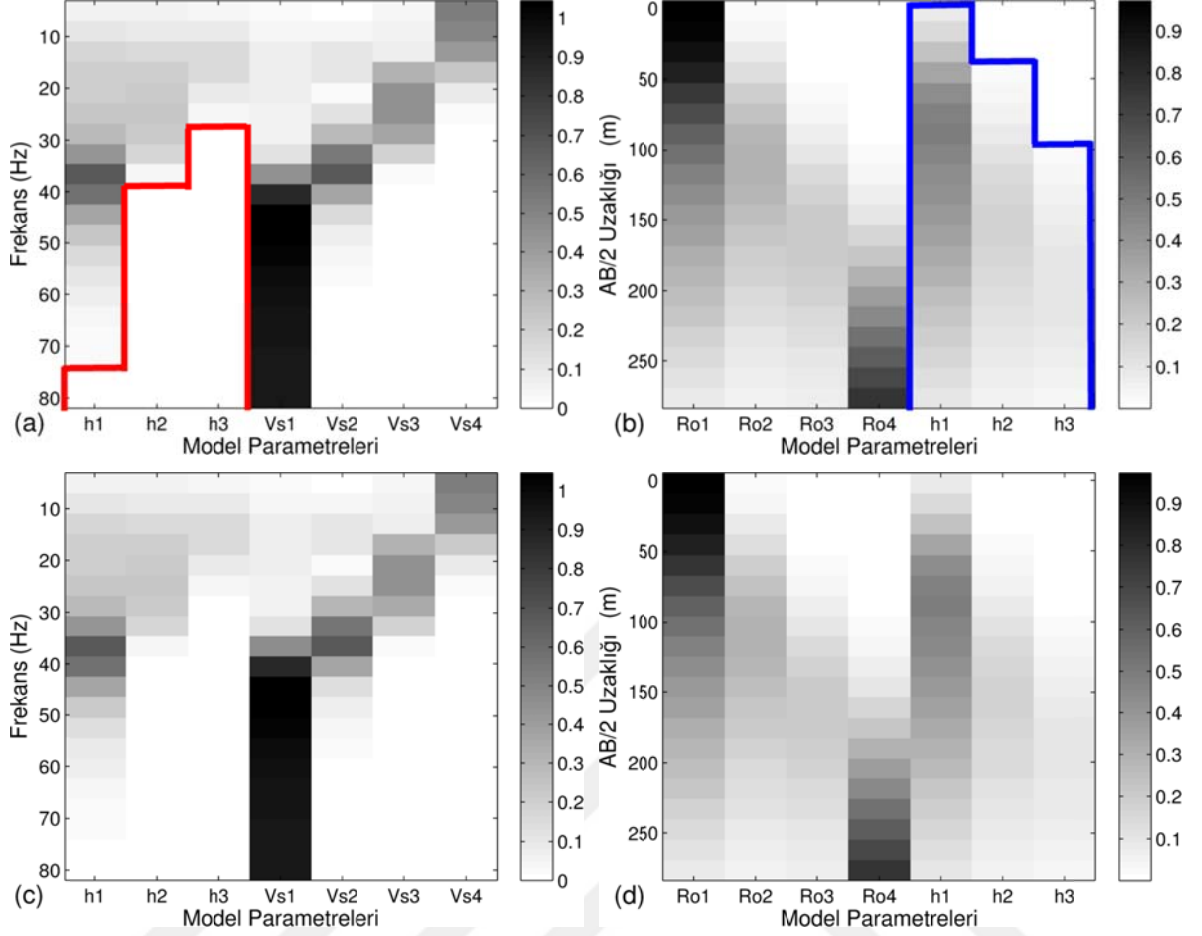
$$\Delta m = V_p \text{diag}\left(\frac{\Lambda_p}{\Lambda_p^2 + \varepsilon I}\right)^{-1} U_p^T (d^{obs} - d^{est}) \quad (101)$$

olarak yazılır.

Şekil 2.1’ de Model 1 gürültüsüz verisi için elde edilen BTC sonuçları gösterilmiştir. Sonuç model parametreleri, gerçek parametreleri ile yüksek bir uyum içinde iken, ilgili GU değeri de oldukça küçük seviyededir. Şekil 2.2’ de BTC’ den elde edilen model parametrelerine ait duyarlılık analizleri ile Model 1’ e ait gerçek model parametreleri için hesaplanan duyarlılık değerleri karşılaştırılmıştır. Gerçek model parametreleri ile kestirilen parametrelere ait duyarlılık görüntüleri hem RD hem de DES verileri için eşleşmektedir. Bu eşleşme önemlidir çünkü, farklı model parametre vektörleri benzer veriler üretebilir (Şekil 1.12) ancak bu durumda duyarlılık değerleri farklılık gösterir (Şekil 1.13). Bununla beraber, eğer iki verinin duyarlılık analizi değerleri aynı ya da yüksek oranda benzer ise, model parametre vektörleri de aynı ya da benzer olmak zorundadır (Senkaya ve Karşlı, 2016). Bununla birlikte Şekil 2.2 birleşik ters çözümü kullanmaktaki ana amacı açıklamaktadır. Şekil 2.2a’ da kırmızı poligon altında kalan beyaz bölge, tabaka kalınlıkları ile ilgili çok küçük bir bilgi yoğunluğu olan alanı göstermektedir. Bu RD verilerinin tekil ters çözümünün tabaka kalınlığı parametresini çözebilme kapasitesinin çok düşük olduğunu gösterir. Birleşik ters çözüm sayesinde ise, RD verisinin tabaka kalınlığı için sahip olduğu bu bilgi, DES verisinin tabaka kalınlığı için sahip olduğu bilgiler ile (Şekil 2.2b’ de mavi poligon altında kalan bölge) birleşir ve bu parametrenin kestirim güvenilirliği artırılmış olur.



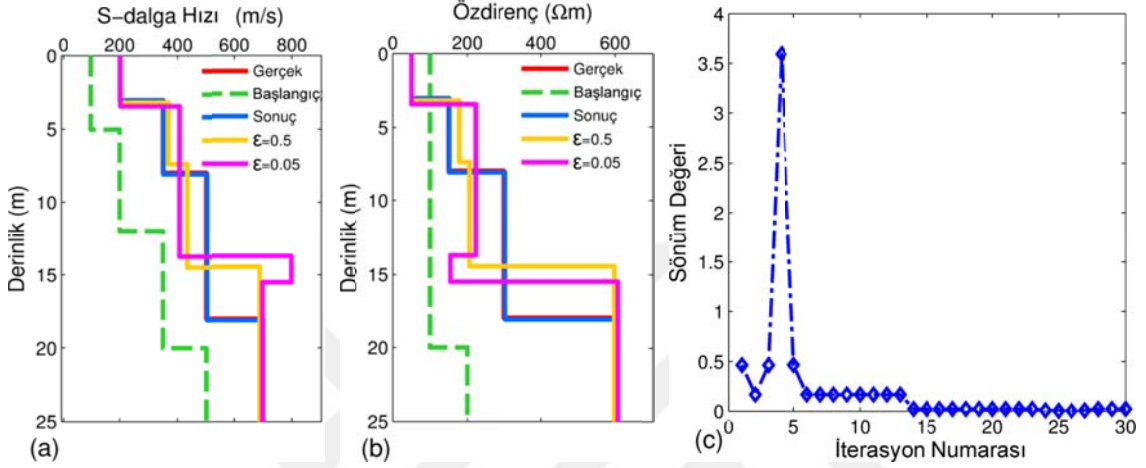
Şekil 2.1. Model 1 gürültüsüz verisi BTC sonuçları. (a) RD ve (b) DES verileri, (c) Vs-derinlik ve (d) ρ-derinlik profilleri



Şekil 2.2. Model parametrelerine ait duyarlılık görüntüleri. (a) ve (b) Model 1 gerçek RD ve DES verileri için, (c) ve (d) Model 1 gürültüsüz BTC sonuç RD ve DES verileri için.

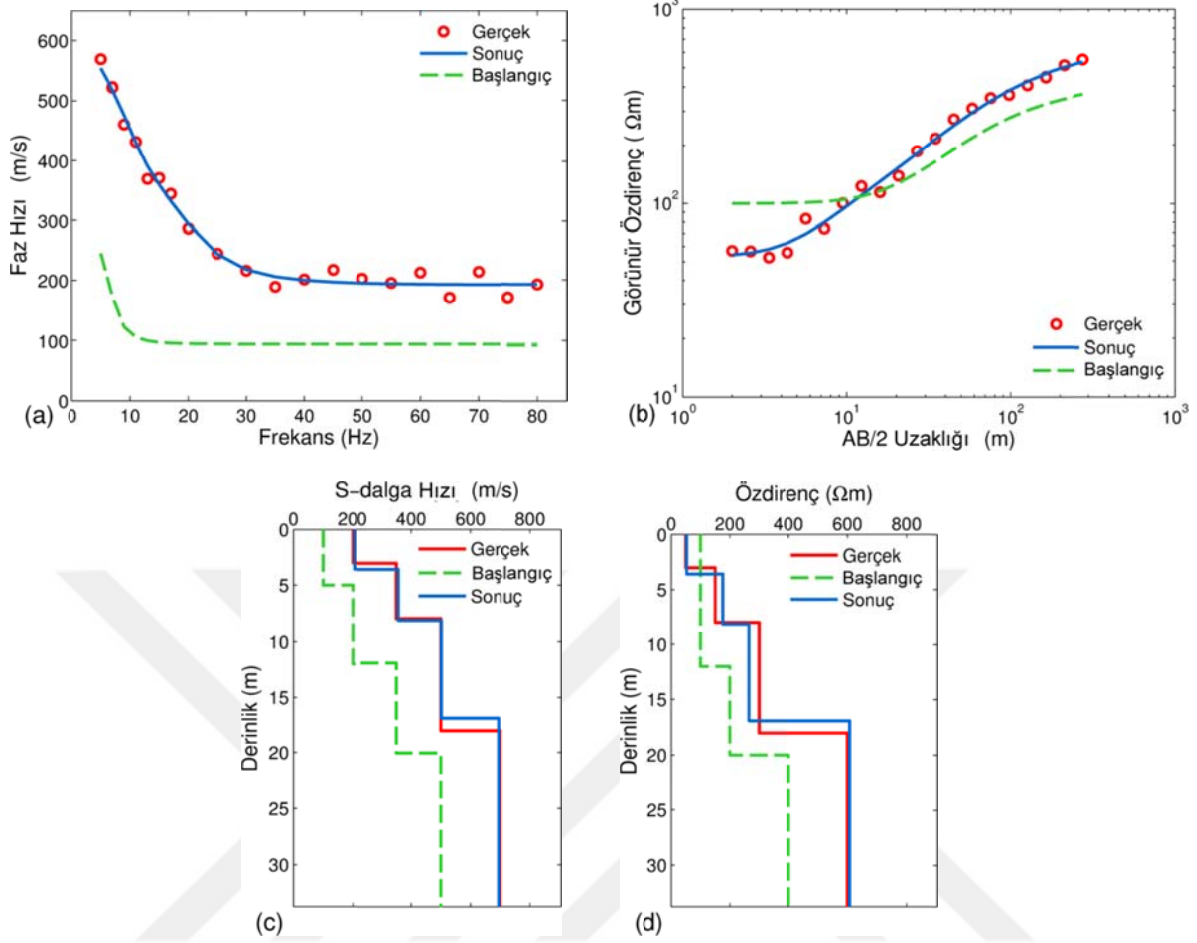
Oluşturulan BTC algoritmasında kullanılan sönüm değeri stratejisinin verimliliğini göstermek adına, Model 1 gürültüsüz veri için yapılan BTC, $\varepsilon = 0.5$ ve 0.05 sabit değerleri için aynı giriş modelleri kullanılarak tekrarlanmıştır. Şekil 2.3' te sabit ve değişken sönüm faktörü stratejileri için elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. $\varepsilon = 0.5$ için elde edilen çözümlerde (Şekil 2.3a ve b' de sarı çizgi), yaklaşım GU' ları 50 iterasyon sonunda 0.0052 şeklinde elde edilmesine rağmen görülmüştür ki, ikinci ve üçüncü tabaka S-dalga hızları ve üçüncü tabaka özdirenci parametrelerinin daha uygun elde edilmesi için daha fazla iterasyona ihtiyaç vardır. 10 iterasyon sonucunda GU değeri 0.0145 olan bir yaklaşım elde edilen $\varepsilon = 0.05$ senaryosunda ise (Şekil 2.3a ve b' de magenta çizgi), üçüncü tabaka S-dalga hızının gerçek değerinden çok uzak olmasının yanında, ikinci ve üçüncü tabaka özdirençleri gerçek model parametrelerinden farklılıklar göstermektedir. Bununla beraber, her iki sabit sönüm faktörü durumunda da ilk ve yarı-sonsuz tabaka için elde edilen model parametreleri tatmin edicidir. Şekil 2.3c' de, değişken sönüm faktörü

stratejisi ile Model1 gürültüsüz verisi için yapılan BTC boyunca kullanılan sönüm değerleri görülmektedir. Sönüm değerleri, ilk beş iterasyonda farklı değerler olarak salınımlar gösterirken, sonrasında süreç daha kararlı hale gelmekte ve sönüm değerlerinin dereceli olarak küçüldüğü ve sonuca ulaşılabilir en iyi (optimum) sönüm değerinin kullanıldığı görülmektedir.



Şekil 2.3. Farklı sönüm parametresi stratejileri ile yapılan BTC'lerin karşılaştırılması. (a) ve (b), Vs ve ρ -derinlik profilleri, (c) değişken sönüm faktörü stratejisi ile yapılan çözümde her bir iterasyonda kullanılan sönüm değerleri

Model 1 gürültülü verisi için yapılan birleşik ters çözümde gürültülü veriler için normal sayılabilecek bazı farklılıklar olmasının yanı sıra gerçek modele iyi bir yaklaşım elde edildiği görülmektedir (Şekil 2.4). Model 1 gürültüsüz ve gürültü verileri için yapılan birleşik çözümlerin detayları Tablo 2.2 de verilmiştir.



Şekil 2.4. Model 1 gürültülü verisi BTÇ sonuçları. (a) RD ve (b) DES verileri, (c) V_s -derinlik ve (d) ρ -derinlik profilleri

Tablo 2.2. Model 1 gürültüsüz (sol kolon) ve gürültülü (sağ kolon) verileri için yapılan BTÇ detayları

	Ger.	Baş.	İterasyon Numarası			
			1	6	15	30
ρ_1	50	100	61.54	49.47	50.02	50.01
ρ_2	150	100	172.16	161.59	170.55	151.06
ρ	300	100	140.09	167.63	217.70	303.04
ρ_4	600	200	33.06	602.05	597.67	600.09
h_1	3	5	2.83	2.92	3.12	3.01
h_2	5	7	5.41	3.74	4.38	5.09
h_3	10	8	6.67	6.38	7.30	10.00
V_{s1}	200	100	248.60	199.16	200.86	200.04
V_{s2}	350	200	213.52	337.84	361.76	351.24
V_{s3}	500	350	363.64	469.16	445.49	502.20
V_{s4}	700	500	514.36	651.12	692.44	699.94
GU		0.5773	0.1981	0.0190	0.0045	0.0001

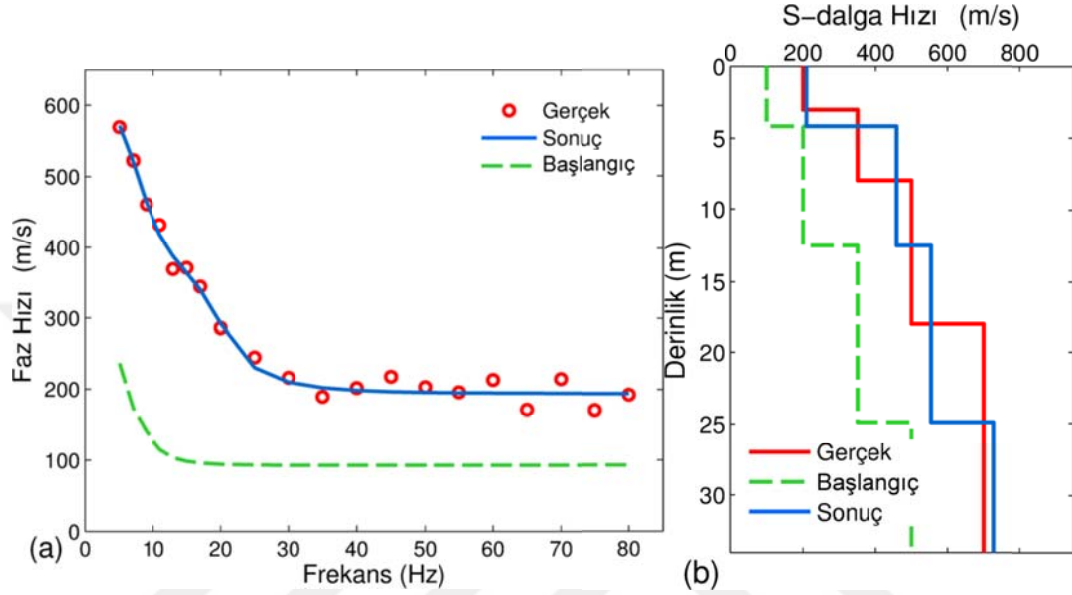
	Ger.	Baş.	İterasyon Numarası			
			1	5	18	32
ρ_1	50	100	60.85	48.50	52.43	52.93
ρ_2	150	100	136.26	94.12	131.65	176.11
ρ_3	300	200	217.13	189.9	237.26	264.83
ρ_4	600	400	570.31	604.18	603.84	607.64
h_1	3	5	2.70	2.00	3.08	3.57
h_2	5	7	5.29	3.46	4.19	4.59
h_3	10	8	7.48	8.20	7.56	8.72
V_{s1}	200	100	249.60	197.89	203.79	205.77
V_{s2}	350	200	201.60	232.24	309.42	356.81
V_{s3}	500	350	369.27	655.34	550.95	501.37
V_{s4}	700	500	522.09	611.62	653.68	694.70
GU		0.5247	0.1973	0.0807	0.0735	0.0715

Ger.=Gerçek Model, Baş.=Başlangıç Model Değerleri

Bu aşamada Model 1 gürültülü verisini bir saha verisi olarak kabul edip ve tekil çözümünü gerçekleştirmek, birleşik çözümün etkinliğini görmek adına olumlu olacaktır. Model 1 gürültülü verisinin tekil çözümünde kullanılacak olan başlangıç modeli, dalga boyu/derinlik (λ /derinlik) oranının genel kabul gördüğü 1.5-3 oranlarına (Boiero, 2009) göre yapılacaktır. Örneğin, Model 1 gürültülü verisindeki son iki frekans değeri [5, 7] Hz, bu frekanslara karşılık gelen faz hızı değerleri [568.83 522.09] m/s için dalga boyları (V/f) [113.76 74,58] m olarak hesaplanır. Dolayısıyla, $\lambda/3$ varsayımına göre bu değerler için maksimum araştırma derinliği $113.76/3=37.92$ m dir. Ancak, bu değer maksimum araştırma derinliği olduğundan (yani yarı-sonsuz tabakanın görülebilecek en derin kısmı) yarı-sonsuz tabakanın başlangıcı en düşük ikinci frekansdan hesaplanacak dalga boyu kullanılarak $74,58/3=24,86$ m olarak belirlenir (Geometrics, 2005; Savvaiddis vd., 2014) ve uygun sayıda tabakaya bölünerek giriş modeli oluşturulur. Ancak, bu giriş modeli ile yapılan bir tekil ters çözüm, Model 1 gürültülü verisine uyumlu bir sonuç verisi üretse de (Şekil 2.5a), elde edilecek V_s -derinlik profili gerçek modelden uzak olacaktır (Şekil 2.5b). Çünkü tekil çözüm girdi olarak verilen kalınlık parametresini sabit tutar ve sadece V_s parametresi üzerinden çözüm üretir. Bu senaryonun, yaygın olarak kullanılan diğer dalga boyu/derinlik oranları $\lambda/2$ ve $\lambda/2.5$ için de benzer olacağı açıktır.

Araştırmacılar kalınlık parametresinin sabit tutulmasından kaynaklanacak bir kısım sorunların indirgenmesi sağlamak için, tahmini toplam derinliği doğru kestirdiklerini kabul ederek genellikle giriş modelindeki tabaka sayısını arttırarak ters çözümün sonucunda daha hassas yaklaşımlar oluşturmaya çalışırlar (Xia vd., 1999). Ancak bu durumda da “aşırı parametreleme (over parametrization)” problemi ortaya çıkar. Bu sorun, fazla tabaka sayısı ile yapılan ters çözümlerde, çözümün matematiksel anlamda daha iyi yaklaşımlar yakalama adına bazı parametreleri gereğinden fazla arttırıp azaltmasına (Constable vd., 1987) ya da sonuç yer altı modellerinin sahip olduğu gerçek kontrastlarının kaybolmasına yol açar (Sen ve Stoffa, 2013). Doğrusal olmayan karakteri yüksek olan RD verisinde bu durumla karşılaşma oranı diğer yöntemlere göre nispeten daha yüksektir, çünkü özellikle tabaka kalınlığında yapılan küçük değişimler bile RD verisinin karakteri üzerinde büyük değişimler oluşturabilir. Şekil 2.6’ da yapılan tekil ters çözümde kullanılan giriş modeli, Model 1 gerçek tabaka değerlerinin 2. ve 3. tabaka için ikiye bölünmesi ile elde edilen 6 tabakalı ve toplam derinliği gerçek derinlik ile aynı olan bir modeldir. Ancak görülmektedir ki, tekil çözüm ile ilk ve yarı-sonsuz tabakalar dışında gerçek V_s hızlarına iyi yaklaşımlar elde edilememiştir. Buna karşılık birleşik ters çözüm ile toplam derinliği

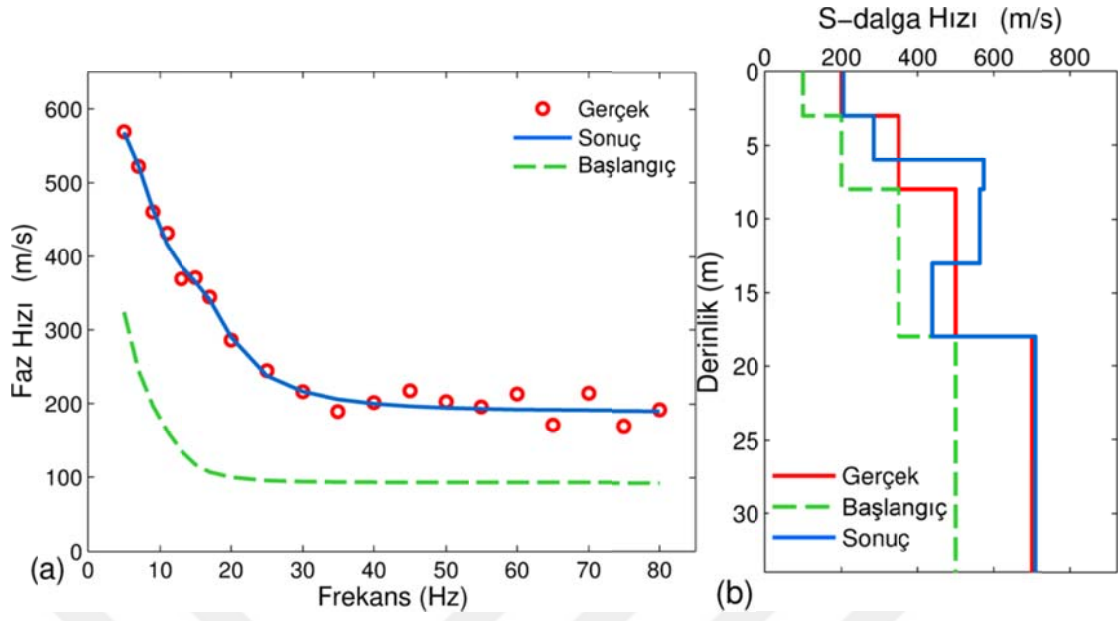
gerçek modelden 4m fazla olan ve 6 tabakalı bir giriş modeli kullanılarak tekil çözüme göre daha iyi bir yaklaşım elde edilmiştir (Şekil 2.7). Giriş modeli parametrelerindeki değişimler Tablo 2.3' te başlangıç ve sonuç parametreleri üzerinde açık şekilde görülmektedir.



Tabaka No	h (m)	Vs (m/s)		
		Gerçek	Başlangıç	Sonuç
1	4,2	200	100	209
2	8,3	350	200	459
3	12,4	500	350	554
4	∞	700	500	727

İterasyon	9
Hata	0,06

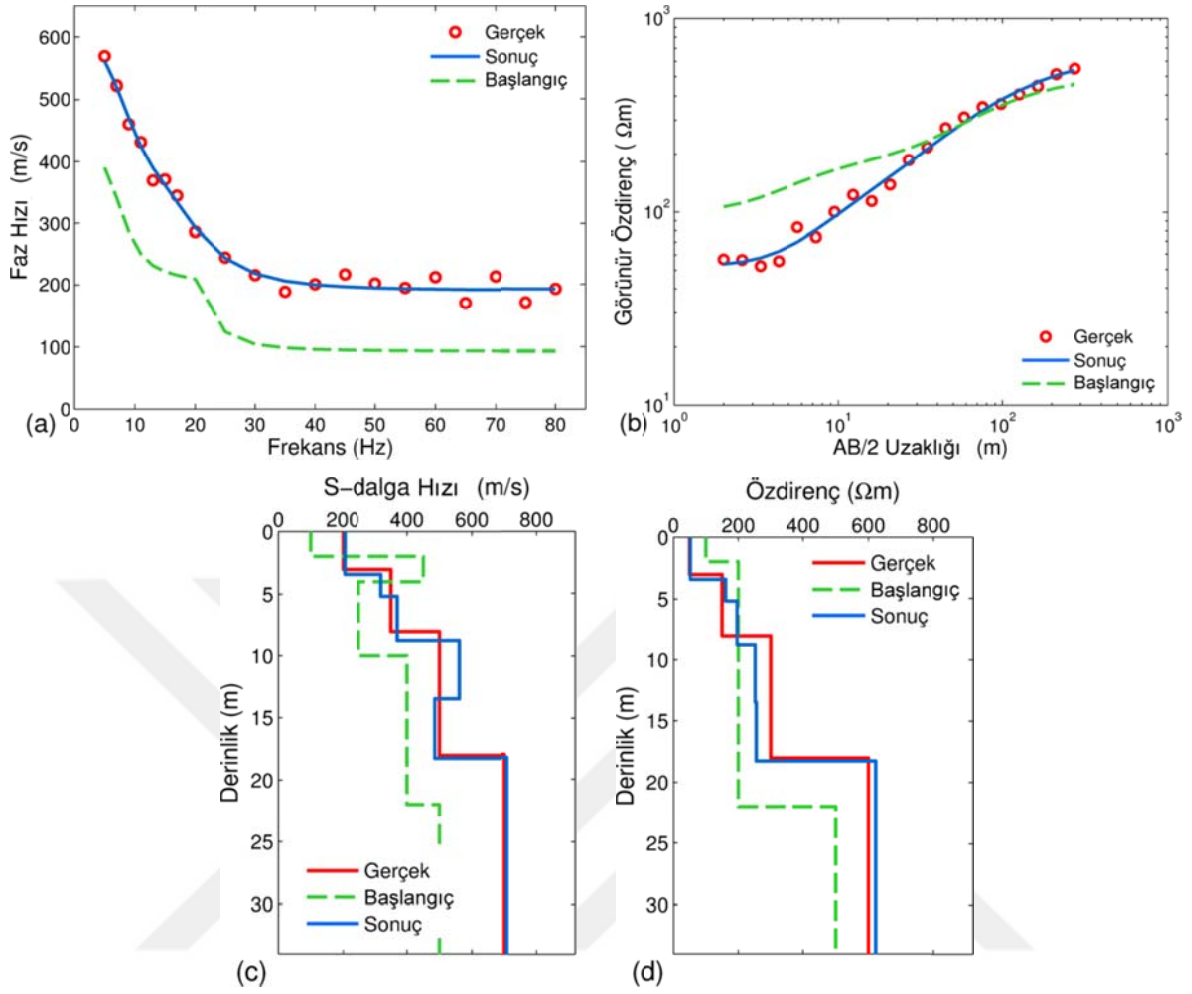
Şekil 2.5. (a) Model 1 gürültülü verisi için $\lambda/3$ varsayımına göre tekil ters çözümü, (b) Vs-derinlik profili



Tabaka No	h (m)	Vs (m/s)		
		Gerçek	Başlangıç	Sonuç
1	3,0	200	100	205
2	3,0	350	200	284
3	2,0		200	573
4	5,0	500	350	563
5	5,0		350	439
6	∞	700	500	708

İterasyon	13
Hata	0,06

Şekil 2.6. (a) Model 1 gürültülü verisi 6 tabakalı giriş modeli tekil ters çözümü, (b) Vs-derinlik profili



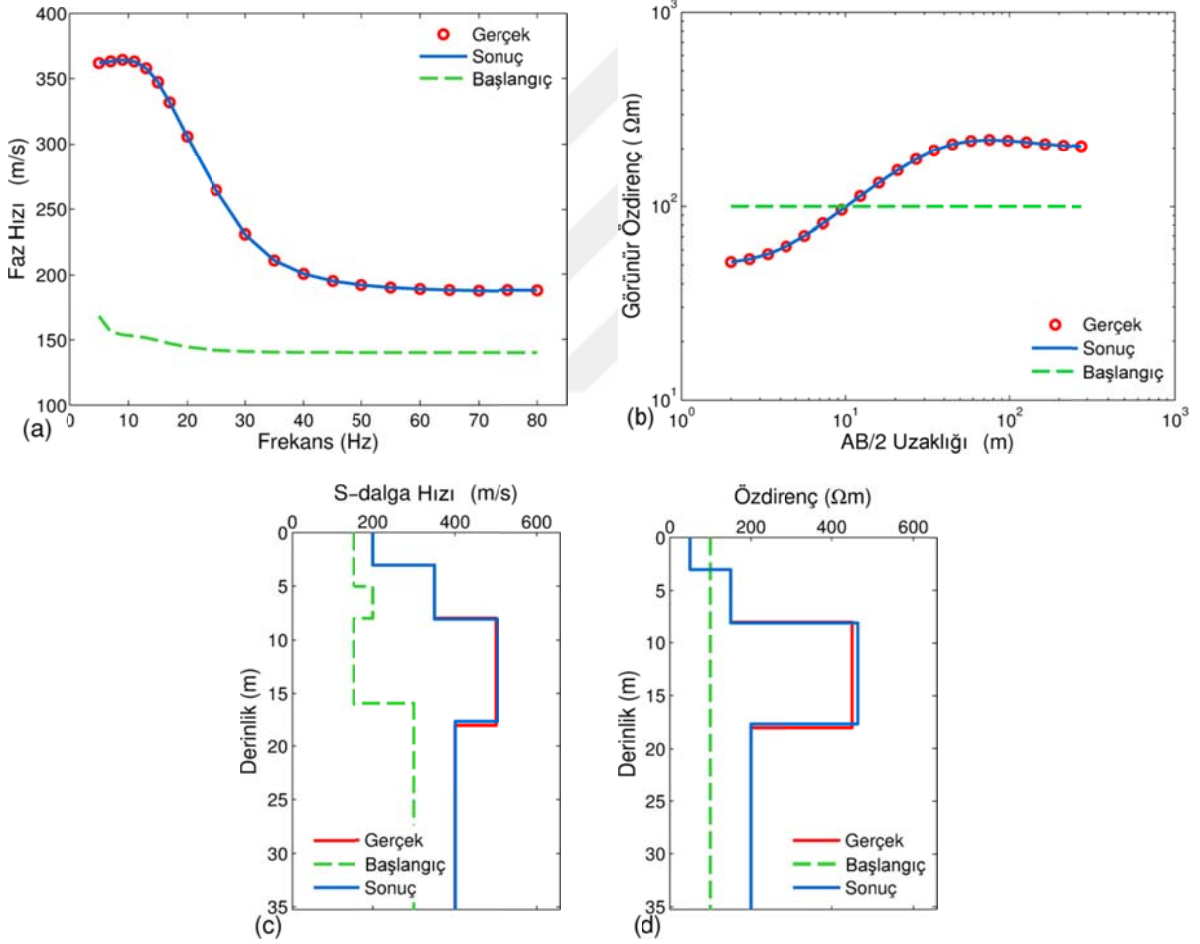
Şekil 2.7. (a) Model 1 gürültülü verisi 6 tabakalı giriş modeli BTÇ sonuçları (a) RD ve (b) DES verileri, (c) Vs-derinlik ve (d) ρ -derinlik profilleri

Tablo 2.3. Model 1 gürültülü verisi 6 tabakalı giriş modeli BTÇ detayları

Tabaka No	h (m)			Vs (m/s)			ρ (ohm*m)		
	Gerçek	Başlangıç	Sonuç	Gerçek	Başlangıç	Sonuç	Gerçek	Başlangıç	Sonuç
1	3,0	2,0	3,4	200	100	205	50	100	52
2	5,0	2,0	1,8	350	450	320	150	200	161
3	10,0	6,0	3,6		250	370		200	196
4		6,0	4,8	500	400	561	300	200	252
5		6,0	4,8		400	485		200	255
6	∞	∞	∞	700	500	707	600	500	623

İterasyon	15
Hata	0,07

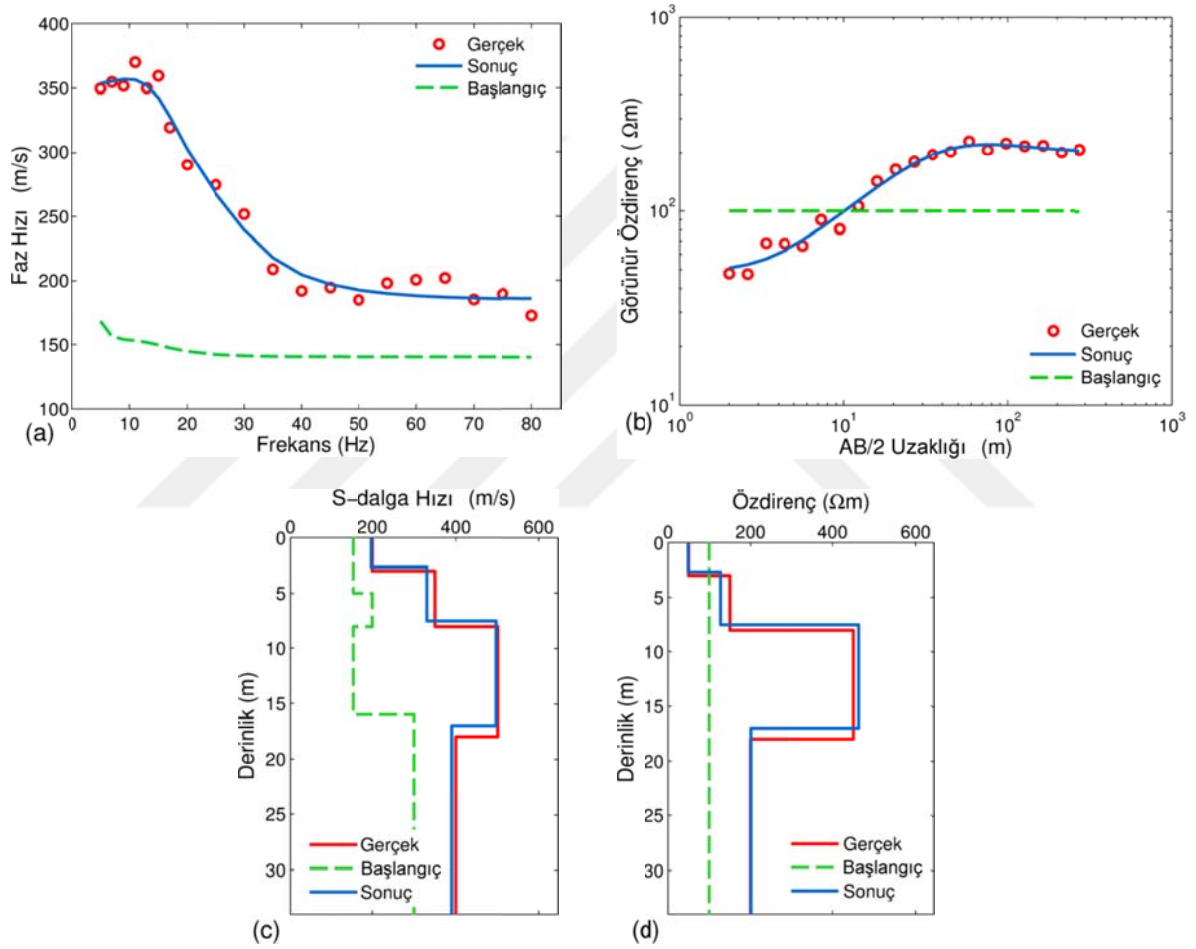
Model 2, hızın derinlikle arttığı ancak yarı-sonsuz tabaka S-dalga hızının diğer tabakalardan düşük olduğu yumuşak yarı-sonsuz tabaka problemini temsil etmektedir. Model 2 gürültüsüz verisinin birleşik ters çözümünde, çözüme oldukça basit ve gerçek model parametrelerinden uzak bir giriş modeli ile başlanmasına rağmen, algoritma 17 iterasyon sonunda kabul edilebilir bir yaklaşıma, 40 iterasyon sonunda da 0.0002 gibi küçük bir GU ile çözüme ulaşmıştır (Şekil 2.8). Bununla beraber, birleşik ters algoritması benzer şekilde Model 2 gürültülü verisi için de gerçek model parametrelerine iyi bir yaklaşım sunmuştur (Şekil 2.9). Model 2 veri setleri için gerçekleştirilen çözümlerin detayları Tablo 2.4 de gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Model 2 gürültüsüz verisi BTC sonuçları. (a) RD ve (b) DES verileri, (c) Vs-derinlik ve (d) ρ -derinlik profilleri

Model 3, RD verilerinin tekil çözümünde “zorlu” bir problem olarak nitelendirilen sıkı ara tabaka problemini temsil etmektedir (Calderón-Macías ve Luke, 2007). Bunun yanında, mevcut problemin daha zorlu hale getirilmesi için sıkı tabakanın kalınlığı

arttırılmıştır. Şekil 1.10' dan hatırlanacağı gibi derinliğin artmasıyla hem tabaka kalınlığı hem de S-dalga hızı duyarlılık değerleri ve bu parametrelerin çözülebilirliği azalmaktadır. Ancak, oluşturulan algoritma Model 3 gürültüsüz ve gürültülü verileri ile tanımlanan sıkı ara tabaka probleminin üstesinden gelmiş ve gerçek model parametrelerine çok iyi bir yaklaşım sağlamıştır (Şekil 2.10 ve Şekil 2.11). İlgili birleşik ters çözümlerde kullanılan giriş modelleri, bazı seçilmiş iterasyonlara ait model parametreleri ve GU değerleri Tablo 2.5' te görülebilir.



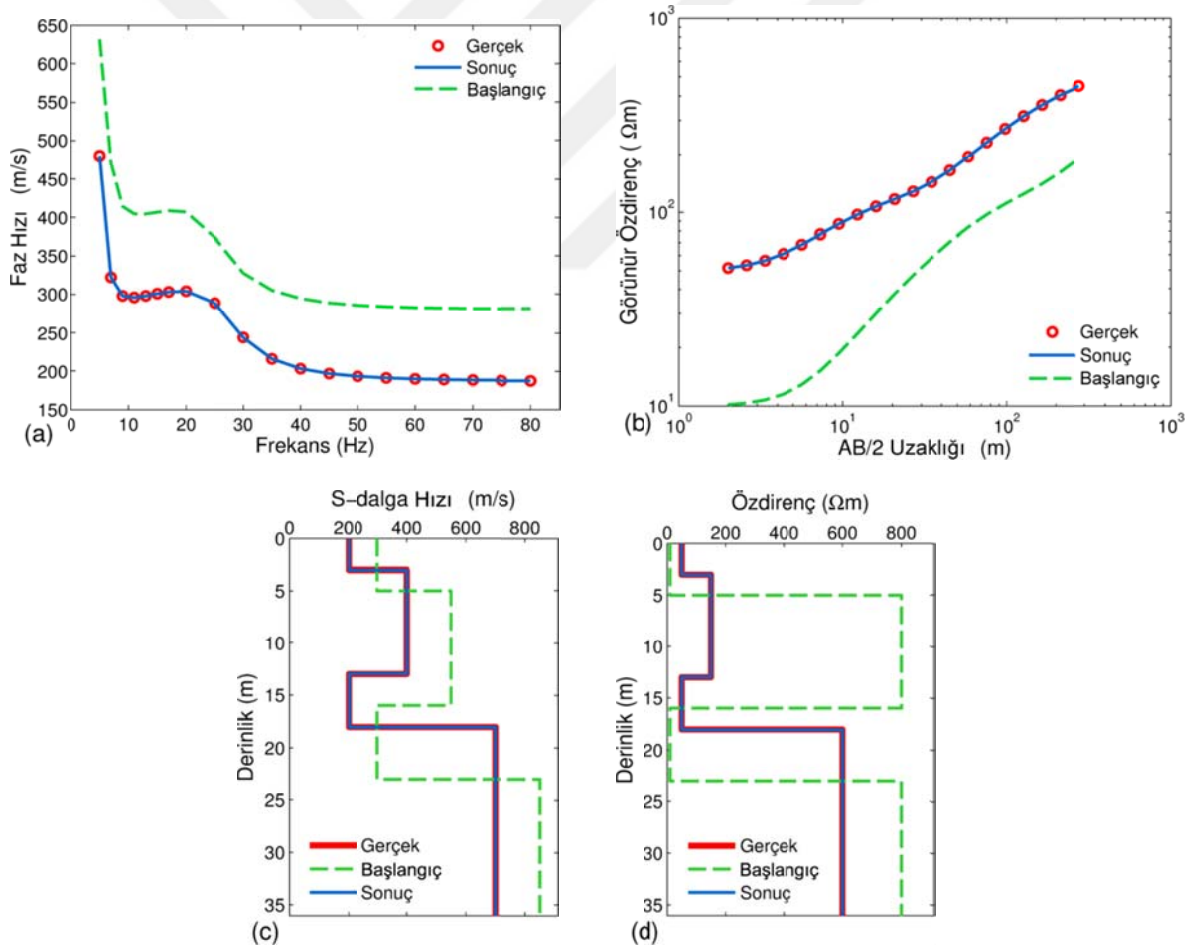
Şekil 2.9. Model 2 gürültülü verisi BTC sonuçları. (a) RD ve (b) DES verileri, (c) V_s -derinlik ve (d) ρ -derinlik profilleri

Tablo 2.4. Model 2 gürültüsüz (sol kolon) ve gürültülü (sağ kolon) verileri için yapılan BTÇ detayları

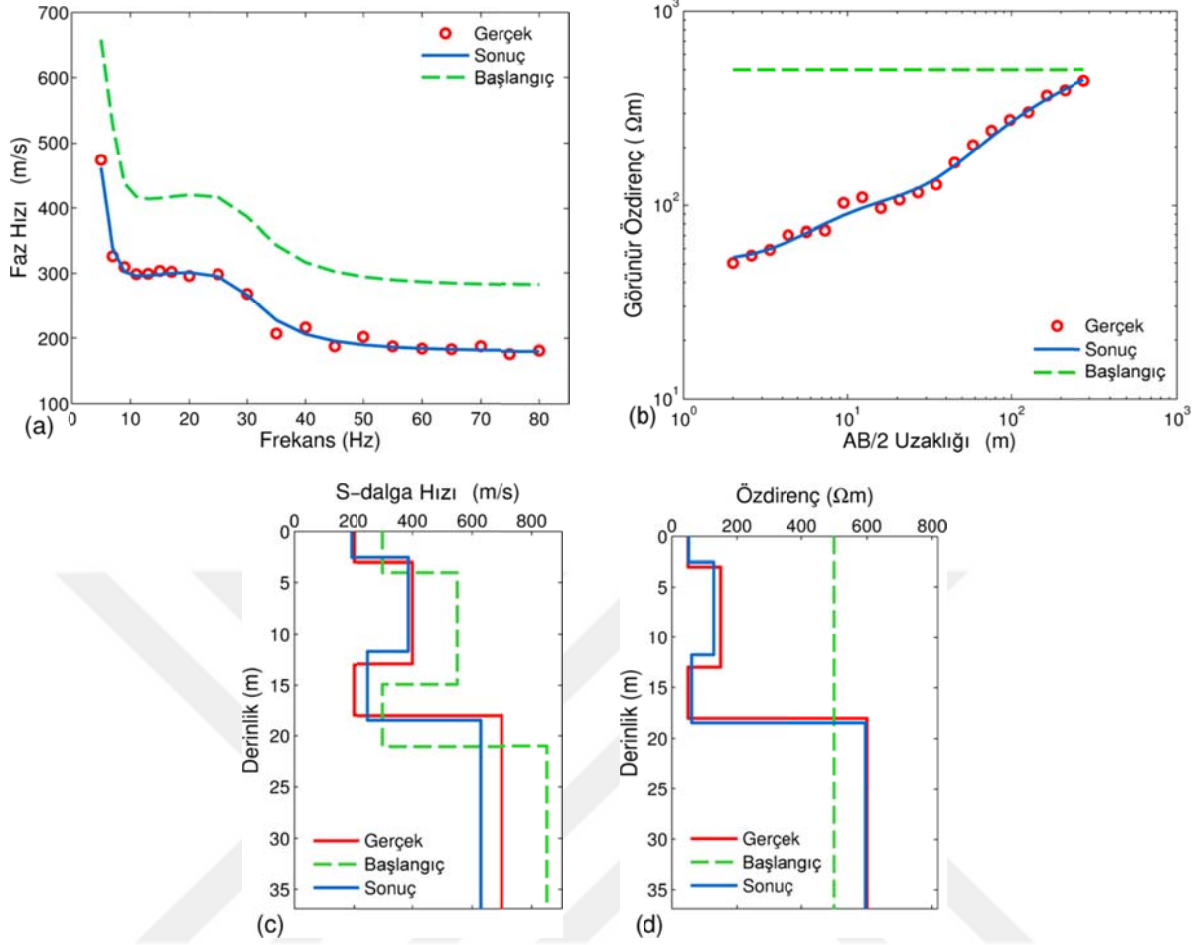
	Ger.	Baş.	İterasyon Numarası			
			1	9	17	40
ρ_1	50	100	62.75	50.06	50.03	50.00
ρ_2	150	100	148.46	136.99	144.18	150.14
ρ_3	450	100	191.61	478.71	470.83	463.85
ρ_4	200	100	216.92	200.57	200.30	200.08
h_1	3	5	3.32	2.93	2.97	3.00
h_2	5	3	3.45	4.67	4.89	5.08
h_3	10	8	7.27	9.13	9.35	9.55
V_{s1}	200	150	23.20	199.58	199.81	199.99
V_{s2}	350	200	416.38	340.59	346.05	350.38
V_{s3}	500	150	326.17	505.40	504.91	504.36
V_{s4}	400	300	308.67	404.08	402.28	400.71
GU		0.4822	0.1582	0.0019	0.0009	0.0002

	Ger.	Baş.	İterasyon Numarası			
			1	2	4	12
ρ_1	50	100	63.96	51.8	48.87	48.85
ρ_2	150	100	139.41	165.34	162.18	127.30
ρ_3	450	100	179.27	278.17	3.455	462.77
ρ_4	200	100	214.68	219.78	210.93	200.92
h_1	3	5	3.58	3.13	3.03	2.67
h_2	5	3	3.37	3.17	3.37	4.83
h_3	10	8	7.28	6.76	7.61	9.49
V_{s1}	200	150	240.13	197.34	200.79	197.71
V_{s2}	350	200	369.25	363.56	360.51	330.65
V_{s3}	500	150	300.49	445.90	432.68	496.31
V_{s4}	400	300	309.34	405.74	414.34	390.32
GU		0.4929	0.1771	0.0765	0.0681	0.0636

Ger.=Gerçek Model, Baş.=Başlangıç Model Değerleri



Şekil 2.10. Model 3 gürültüsüz verisi BTÇ sonuçları. (a) RD ve (b) DES verileri, (c) V_s -derinlik ve (d) ρ -derinlik profilleri



Şekil 2.11. Model 3 gürültülü verisi BTÇ sonuçları. (a) RD ve (b) DES verileri, (c) V_s -derinlik ve (d) ρ -derinlik profilleri

Tablo 2.5. Model 3 gürültüsüz (sol kolon) ve gürültülü (sağ kolon) verileri için yapılan BTÇ detayları

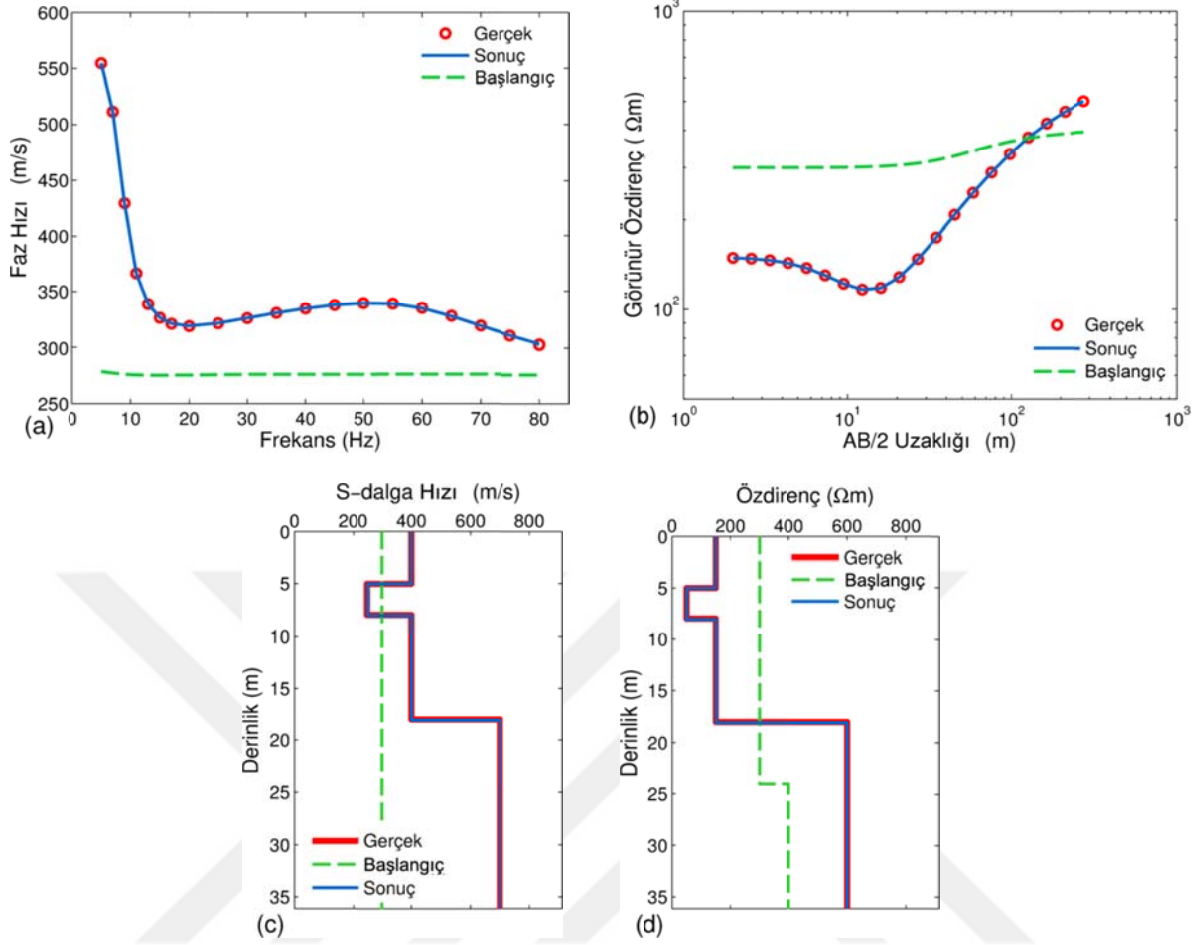
	Ger.	Baş.	İterasyon Numarası			
			1	5	19	29
ρ_1	50	10	51.51	50.93	50.03	50.00
ρ_2	150	800	695.2	248.41	152.26	150.01
ρ_3	50	10	24.71	33.91	49.40	50.28
ρ_4	600	800	948.24	605.68	599.88	600.00
h_1	3	5	6.50	3.60	3.02	3.00
h_2	10	11	6.97	5.03	9.65	9.99
h_3	5	7	4.45	4.62	5.0	5.03
V_s	200	300	211.42	204.87	200.23	200.00
V_{s2}	400	550	568.98	578.96	403.26	00.00
V_{s3}	200	300	129.54	167.69	200.30	200.67
V_{s4}	700	850	507.08	620.51	692.65	699.79
GU		0.5739	0.1250	0.0179	0.0011	0.00002

	Ger.	Baş.	İterasyon Numarası				
			1	2	10	17	
ρ_1	50	500	63.99	57.34	51.60	51.63	
ρ_2	150	500	100.71	103.96	117.02	128.83	
ρ_3	5	500	249.03	223.16	156.90	61.09	
ρ_4	600	500	364.92	486.86	597.51	595.45	
h_1	3	4	3.72	2.70	2.38	2.55	
h_2	10	11	10.63	12.64	17.53	9.24	
h_3	5	6	7.36	6.39	5.53	6.65	
V_{s1}	200	300	1	7.12	203.24	190.23	191.78
V_{s2}	400	550	366.25	347.73	359.56	386.49	
V_{s3}	200	300	227.95	276.82	255.03	249.86	
V_{s4}	700	850	589.27	681.66	941.26	628.86	
GU		3.1451	0.1311	0.0728	0.0547	0.0518	

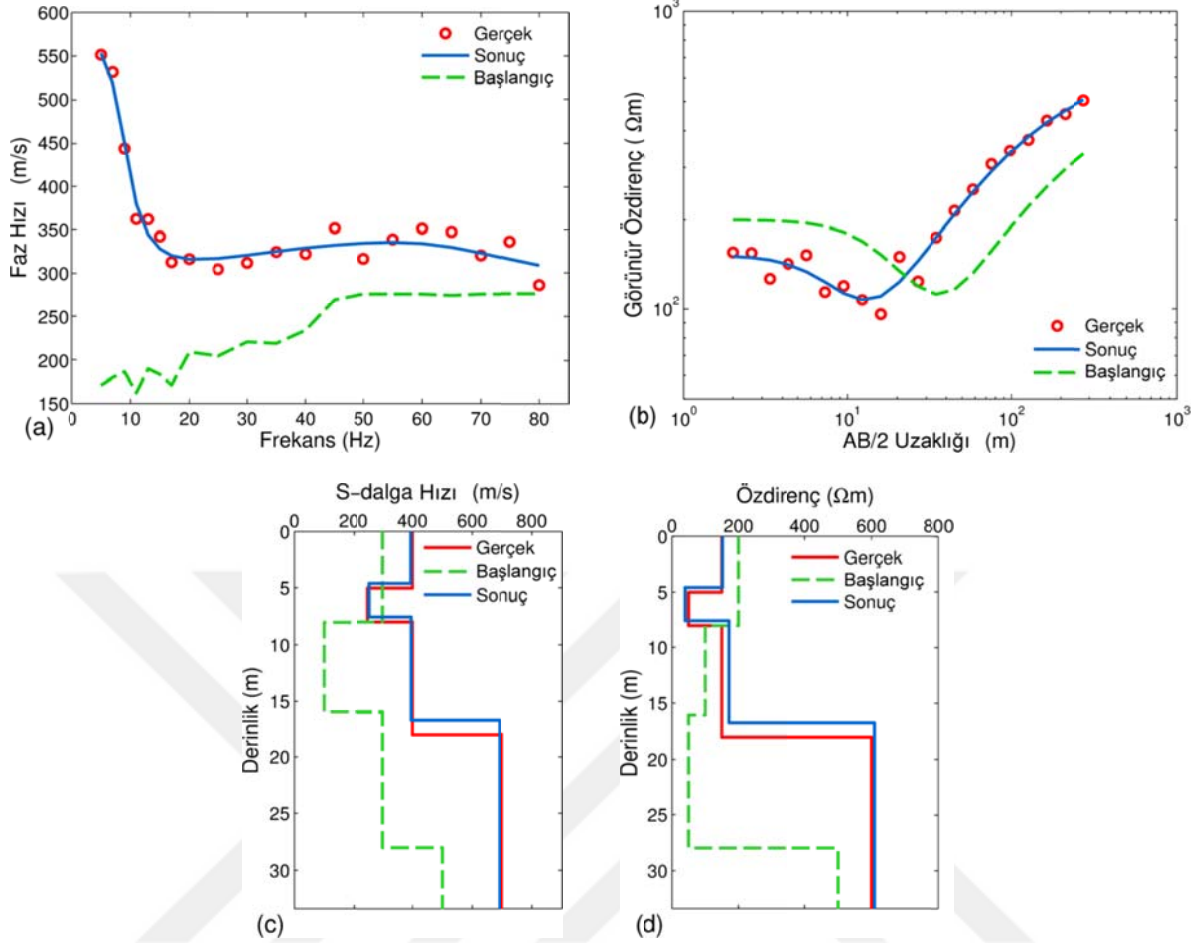
Ger.=Gerçek Model, Baş.=Başlangıç Model Değerleri

Model 4 ince bir düşük hızlı tabaka içermektedir. Bilindiği gibi sismik yöntemlerde bir tabakanın tanımlanabilmesi için, sismik dalgaların hedef tabaka içerisinde bir dalga boyunun en az dörtte biri ya da yarısı kadar hareket etmesi beklenir. Ancak, sismik dalgalar kimi zaman ince tabakalar içerisinde yeteri kadar seyahat edemezler ya da veri toplama parametreleri (özellikle alıcı aralığı) küçük dalga boylarını oluşturabilecek ya da kayıt edebilecek niteliğe sahip olamayabilir ve bunun sonucunda kayıt edilen sismik veri bu tabakalara ait çok az bilgi içerir. Birleşik ters çözüm akışı Model 4 gürültüsüz verisi için 12 iterasyonda kabul edilebilir model parametrelerine ulaşmasının yanında, sentetik veriler için kullanılan hedef GU ya ulaşmak için 33. İterasyona kadar devam etmiş ve GU değerini 0.0004 elde ederek sona ermiştir. Sonuç model parametreleri ve verileri Şekil 2.12’ de görülmektedir. Algoritmanın benzer başarılı sonuçlara Model 4 gürültülü verisi içinde ulaşmasının yanında (Şekil 2.13), üçüncü tabaka kalınlığında gürültülü bir veri için kabul edilebilir olduğu düşünülen sapma göze çarpmaktadır.

Bununla birlikte, Model 4 gürültülü verisi için yapılan çözümün 19. ve 31. iterasyonlarında vurgulanmak istenen önemli bir nokta bulunmaktadır (Tablo 2.6 de sağ kolon). Açıkça görülmektedir ki bu iki iterasyon için GU değerleri birbirine oldukça yakındır, fakat 2. ve 3. tabaka kalınlıkları 31. iterasyona doğru yavaş düzeltmelerle ilerlemekte ve gerçek değerlere yaklaşmaktadır. Bu verinin yapay bir veri değil de, saha verisi olduğu düşünülürse (yani gerçek model parametrelerinin bilinmediği varsayılırsa) ve en iyi yaklaşım GU değerine bağlı olarak seçilirse, her iki iterasyonda sonuç olarak kabul edilebilir GU’ lara sahiptir ve saha verisi çözümlerinde en az iterasyonda optimum çözüm amaç edinildiğinden, 19 iterasyon bu verinin çözümü için muhtemelen yeterli görülecektir. Ancak, burada gerçek model parametreleri bilindiğinden, 31. iterasyonda gerçeğe daha yakın bir yaklaşım olduğu göz önüne alınarak bu iterasyonda elde edilen model parametreleri sonuç olarak kabul edilir. Buradan söylenebilir ki, ters çözüm sonuçları sadece yaklaşım hataları üzerinden değil, sahip olunan ön bilgiler ve duyarlılık analizleri de göz önünde bulundurulmalıdır. Unutulmamalıdır ki, yaklaşım hataları ters çözüme ait ortalama bir kalite ve doğruluk sunar.



Şekil 2.12. Model 4 gürültüsüz verisi BTC sonuçları. (a) RD ve (b) DES verileri, (c) V_s -derinlik ve (d) ρ -derinlik profilleri



Şekil 2.13. Model 4 gürültülü verisi BTÇ sonuçları. (a) RD ve (b) DES verileri, (c) V_s -derinlik ve (d) ρ -derinlik profilleri

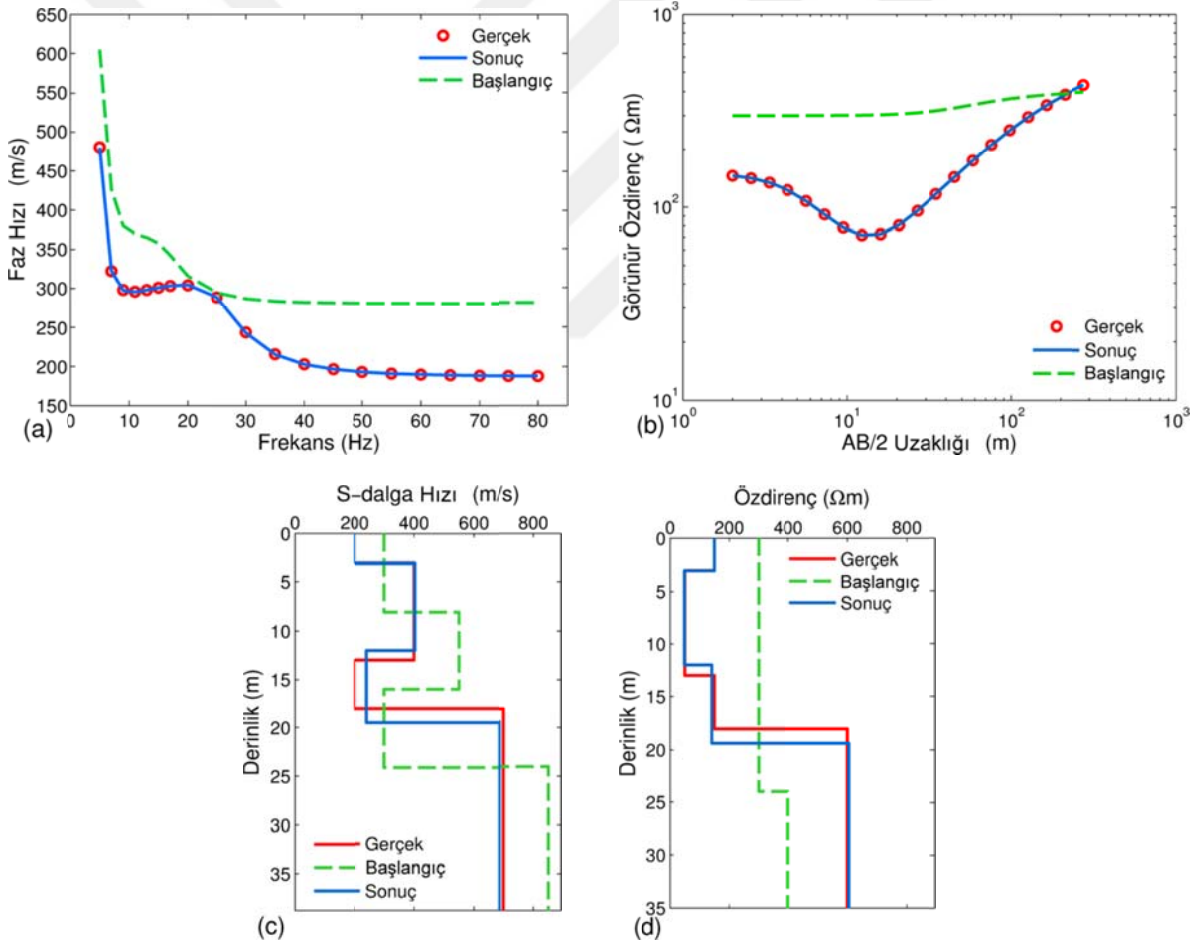
Tablo 2.6. Model 4 gürültüsüz (sol kolon) ve gürültülü (sağ kolon) verileri için yapılan BTÇ detayları

	Ger.	Baş.	İterasyon Numarası			
			1	12	20	33
ρ_1	150	300	135.73	49.87	149.96	150.01
ρ_2	50	300	106.78	48.93	49.76	50.47
ρ_3	150	30	213.56	173.9	159.56	151.78
ρ_4	600	400	497.93	599.57	599.80	599.93
h_1	5	8	8.21	5.09	5.03	4.99
h_2	3	8	8.43	3.33	3.16	3.07
h_3	10	8	8.45	10.26	10.0	10.00
V_{s1}	400	300	365.75	396.20	398.28	99.62
V_{s2}	250	300	450.28	259.22	254.82	252.46
V_{s3}	400	300	539.57	408.96	403.56	400.51
V_{s4}	700	300	633.28	703.34	701.69	700.35
GU		0.7080	0.0943	0.0019	0.0010	0.00039

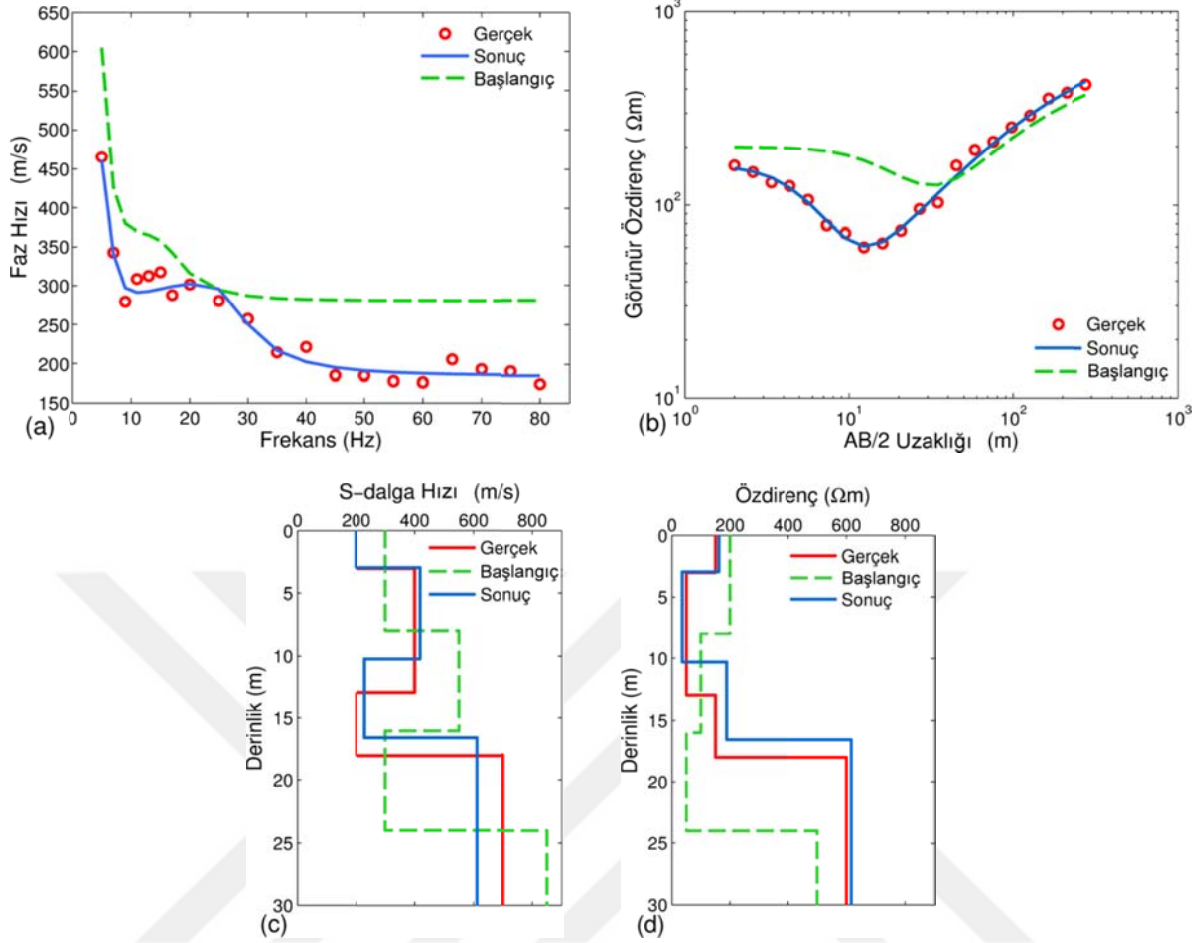
	Ger.	Baş.	İterasyon Numarası			
			2	8	19	31
ρ_1	150	200	130.82	130.14	151.31	152.1
ρ_2	50	100	84.89	60.96	53.56	39.62
ρ_3	150	50	122.71	141.52	163.93	171.23
ρ	600	500	676.18	642.78	601.76	608.56
h_1	5	8	11.20	10.45	4.53	4.57
h_2	3	8	5.23	4.36	5.03	3.00
h	10	12	4.72	3.11	5.03	9.14
V_{s1}	400	300	438.51	350.16	383.80	394.34
V_{s2}	250	100	38.98	362.51	297.90	255.38
V_{s3}	400	300	306.92	457.51	372.18	395.84
V_{s4}	700	500	407.70	671.62	668.80	691.98
GU		0.4068	0.1899	0.0979	0.0670	0.0656

Ger.=Gerçek Model, Baş.=Başlangıç Model Değerleri

Model 5 ve 6 S-dalga hızları değişimleri ve tabaka özdirençleri değişimlerinin ters yönlerde olduğu durumları örneklemektedir. Bu modellerde S-dalga hızı karakteri Model 3 ve 4 ile aynı, ancak tabaka özdirenç değişimleri yarı-sonsuz tabaka üzerindeki tüm tabakalar için ters yöndedir. Model 5' e ait her iki veri seti içinde elde edilen çözümlerde özellikle 2. ve 3. Tabaka kalınlıklarında küçük farklılıklar görülmesine karşın genel olarak iyi bir yaklaşım sağlanmıştır (Şekil 2.14 ve Şekil 2.15). Model 5' e ait çözüm ayrıntıları Tablo 2.7' de görülebilir. Model 6 için elde edilen sonuç parametreleri gerçek parametrelere oldukça yakındır (Şekil 2.16 ve Şekil 2.17). Özellikle Model 6 gürültülü verisi çözümünde başlangıç modeli GU' su yüksek olmasına rağmen, algoritma gerçek model parametrelerine iyi bir yaklaşım sağlamıştır (Tablo 2.8).



Şekil 2.14. Model 5 gürültüsüz verisi BTC sonuçları. (a) RD ve (b) DES verileri, (c) V_s -derinlik ve (d) ρ -derinlik profilleri



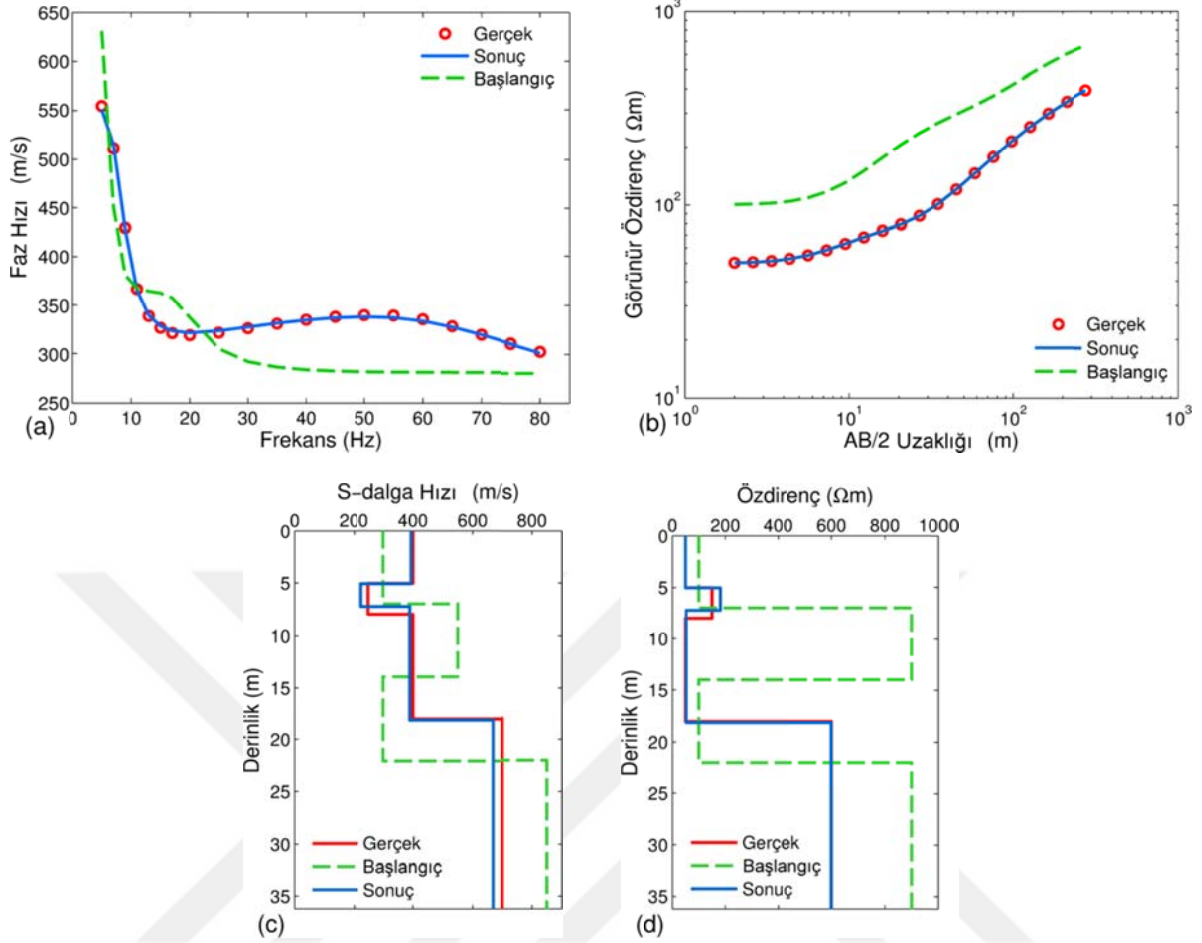
Şekil 2.15. Model 5 gürültülü verisi BTÇ sonuçları. (a) RD ve (b) DES verileri, (c) V_s -derinlik ve (d) ρ -derinlik profilleri

Tablo 2.7. Model 5 gürültüsüz (sol kolon) ve gürültülü (sağ kolon) verileri için yapılan BTÇ detayları

	Ger.	Baş.	İterasyon Numarası			
			1	3	20	47
ρ_1	150	3	110.5	146.33	150.09	150.03
ρ_2	50	300	47.26	42.68	48.42	48.93
ρ_3	150	300	164.6	166.54	142.30	141.35
ρ_4	600	400	415.0	590.38	606.98	604.98
h_1	3	8	5.90	3.16	3.03	3.02
h_2	10	8	8.06	7.49	8.68	8.99
h_3	5	8	10.28	9.72	8.20	7.37
V_{s1}	200	300	215.7	205.13	2	0.30
V_{s2}	400	550	479.1	410.43	403.65	402.93
V_{s3}	200	300	235.7	272.51	253.07	241.92
V_{s4}	700	850	677.8	648.41	685.02	685.80
GU		1.26	0.147	0.0169	0.0020	0.0014

	Ger.	Baş.	İterasyon Numarası			
			2	3	4	5
ρ_1	150	200	139.70	161.48	161.53	161.76
ρ_2	50	100	46.35	38.51	36.12	35.57
ρ_3	150	50	68.93	89.02	124.30	188.36
ρ_4	600	500	585.67	628.47	623.03	616.53
h_1	3	8	2.82	2.89	2.92	2.92
h_2	10	8	6.76	6.66	6.88	7.39
h_3	5	12	6.92	6.44	6.35	6.24
V_{s1}	200	300	200.76	195.96	197.18	197.49
V_{s2}	400	550	407.5	423.34	431.66	418.43
V_{s3}	200	300	260.45	241.58	232.31	229.51
V_{s4}	700	850	562.50	568.25	597.04	611.32
GU		0.6174	0.0752	0.0555	0.0538	0.0530

Ger. = Gerçek Model, Baş. = Başlangıç Model Değerleri



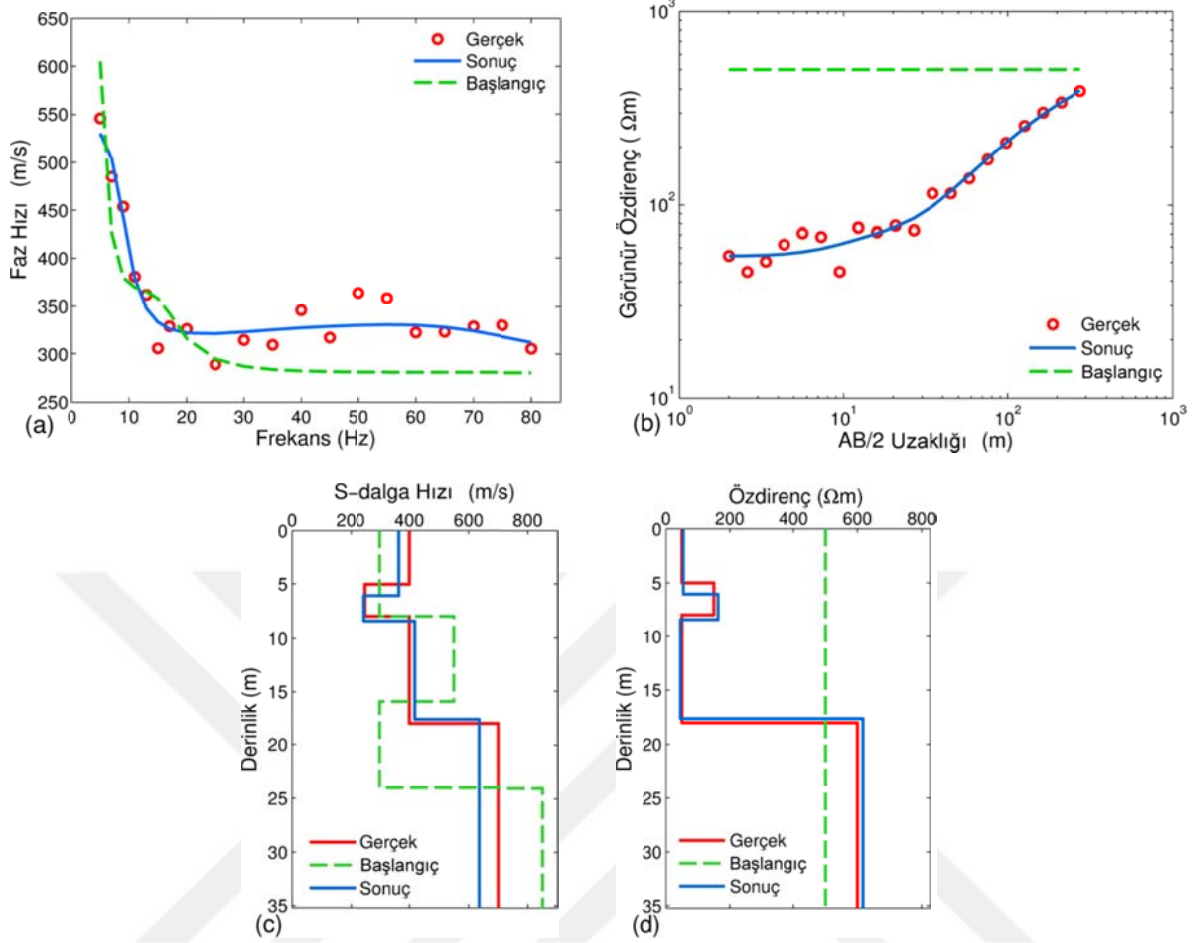
Şekil 2.16. Model 6 gürültüsüz verisi BTC sonuçları. (a) RD ve (b) DES verileri, (c) V_s -derinlik ve (d) ρ -derinlik profilleri

Tablo 2.8. Model 6 gürültüsüz (sol kolon) ve gürültülü (sağ kolon) verileri için yapılan BTC detayları

	Ger	Baş.	İterasyon Numarası			
			1	5	10	16
ρ_1	50	100	52,72	50,80	49,91	49,92
ρ_2	150	900	462,95	192,56	179,80	179,86
ρ_3	50	100	61,71	43,58	52,53	52,55
ρ_4	600	900	598,5	610,31	598,47	598,37
h_1	5	7	9,88	5,94	5,00	5,01
h_2	3	7	3,63	2,93	2,20	2,20
h_3	10	8	9,76	8,45	10,87	10,87
V_{s1}	400	300	353,31	377,81	393,59	394,15
V_{s2}	250	550	532,81	259,71	225,69	225,56
V_{s3}	400	300	421,44	386,20	388,62	388,82
V_s	700	850	720,48	665,66	668,86	669,07
GU		0,822	0,0611	0,009	0,0034	0,0033

	Ger	Baş.	İterasyon Numarası			
			1	9	20	30
ρ_1	50	500	57,90	55,73	55,35	54,34
ρ_2	150	500	123,8	187,96	183,3	163,15
ρ_3	50	500	222,7	63,83	57,79	45,07
ρ_4	600	500	295,7	653,1	644,12	617,19
h_1	5	8	9,74	9,27	8,11	6,06
h_2	3	8	7,90	3,75	2,84	2,40
h_3	10	8	7,54	10,18	10,36	9,15
V_{s1}	400	300	344,3	348,74	351,8	364,39
V_{s2}	250	550	522,8	280,16	250,4	246,48
V_{s3}	400	300	343,2	662,63	583,1	418,40
V_{s4}	700	850	811,1	615,60	613,3	635,91
GU		3,99	0,144	0,0996	0,098	0,0983

Ger. = Gerçek Model, Baş. = Başlangıç Model Değerleri



Şekil 2.17. Model 6 gürültülü verisi BTÇ sonuçları. (a) RD ve (b) DES verileri, (c) V_s -derinlik ve (d) ρ -derinlik profilleri

2.2. Saha Verisi Uygulamaları

Yapay verilerle test edilen birleşik çözüm algoritmasının gerçek veriler üzerindeki performansını ortaya koymak adına Trabzon ilinin merkezi etrafında, yerleşim alanlarının yoğunlaştığı bölgelerde toplam 10 noktada sismik- elektrik ölçümler yapılmış ve bu veriler değerlendirilmiştir. İlerleyen bölümlerde çalışma alanı hakkında bilgiler verilmesinin ardından veri toplama aşamasının detayları ve veri setlerinin hazırlanması aşamaları aktarılacaktır. Son olarak saha verilerinin değerlendirilmesi ve elde edilen bulgular paylaşılacaktır.

2.2.1. Çalışma Alanı ve Genel Jeolojisi

Saha verileri Trabzon ilinin en yoğun yerleşim alanlarını içeren Trabzon-merkez ve çevresindeki mahallelerde toplanmıştır.

Trabzon ili coğrafik konum olarak Karadeniz bölgesinin, Doğu Karadeniz bölümünün yaklaşık merkezinde yer almaktadır. İl aynı zamanda Doğu Pontidler olarak bilinen tektonik kuşağın kuzeyindedir. Bölgenin karakteristik yapısı olan denize paralel yüksek dağlar, Trabzon’ da deniz kıyısına çok yakın bir mesafede başlarlar. Sahip oldukları yüksek eğim nedeniyle de veri toplamaya müsait ve düz alan oldukça kısıtlıdır.

Yerleşim alanları genellikle arazi eğiminin düşük olduğu kıyı şeridinde yoğunlaşmaktadır. Yapılaşma iç bölgelerde ise vadi kenarları, yamaçlar ve tepe kesimlerde dağınık şekildedir. Önemli yerleşim alanları; şehir merkezi, Beşirli, Yenicuma, Fatih, Erdoğan, Boztepe, Bahçecik, Çukurçayır, Pelitli, Değirmendere, Yalınca, Akyazı, Çamlık, Yıldızlı, Söğütlü, İnönü ve Kalkınma mahalleleridir.

Çalışma alanında mühendislik çalışmaları ve yapılarının inşası sırasında 7 farklı formasyonla karşılaşmaktadır. Bu formasyonlar; Alüvyon, Killer, Beşirli formasyonu, Kaymaklı formasyonu, Kabaköy formasyonu, Çağlayan formasyonu ve taraçalardır (Keskin, 2007).

Alüvyon malzemeler, derelerin denize döküldüğü bölgelerde yoğunlaşırken, kentin sahil kesiminin doğusunda genellikle Kabaköy formasyonu hakimdir. Beşirli-Toklu sınırından daha batı bölgelerde ise Beşirli formasyonuna ait birimler görülmektedir. Çalışma alanının daha yüksek Güney bölgelerinde ise Çağlayan formasyonu görülmektedir. Denizel taraçalar ise değişik jeolojik zamanlardaki yükselimler şeklinde kentin kuzeyinden güneyine doğru farklı yüksekliklerde ana formasyonlarla uyumlu veya uyumsuz geçişler göstermektedir (Şekil 2.18). çalışma alanında gözlenebilecek formasyonlar, muhtemel gözlemsel konumları ve genel özellikleri Tablo 2.9’ da verilmiştir.

Tablo 2.9. Çalışma alanında görülen hâkim formasyonlar (Keskin, 2007' den yararlanılarak oluşturulmuştur)

Formasyon adı	Genel özellikleri	Gözlemsel konumları
Çağlayan	Koyu gri, siyah bazalt ve andezitler içerir	Yeşilova, Karlık Tepe, Gürbulak
Kabaköy	Volkanik kayalar hâkim	Konaklar, Kalkınma, Bostancı, Konaklar, Değirmendere, Boztepe
Kaymaklı	Sarımsı-gri renkli kumlu killi silttaşı, açık gri-yeşik marn	Bostancı, Kaymaklı, Kalkınma
Beşirli	Bazaltik ve andezit aglomera, tüf, iri taneli kumtaşı, gevşek çimentolu breş	Beşirli, Akyazı, Yıldızlı, Boztepe, Bahçecik
Kırmızı killer	Volkanik kayaların ayrışması sonucu kırmızı kil ve volkanik kayalara geçişler gözlenir	Bostancı, Bengisu, Pelitli
Taraçalar	Fosilli yapı ve uyumsuz geçişler sergilerler, geniş yelpazede malzeme içerirler	Yenicuma, Faroz, Değirmendere, Fatih, Ayasofya, Boztepe, Atapark

2.2.2. Veri Toplama ve Veri Setlerinin Hazırlanması

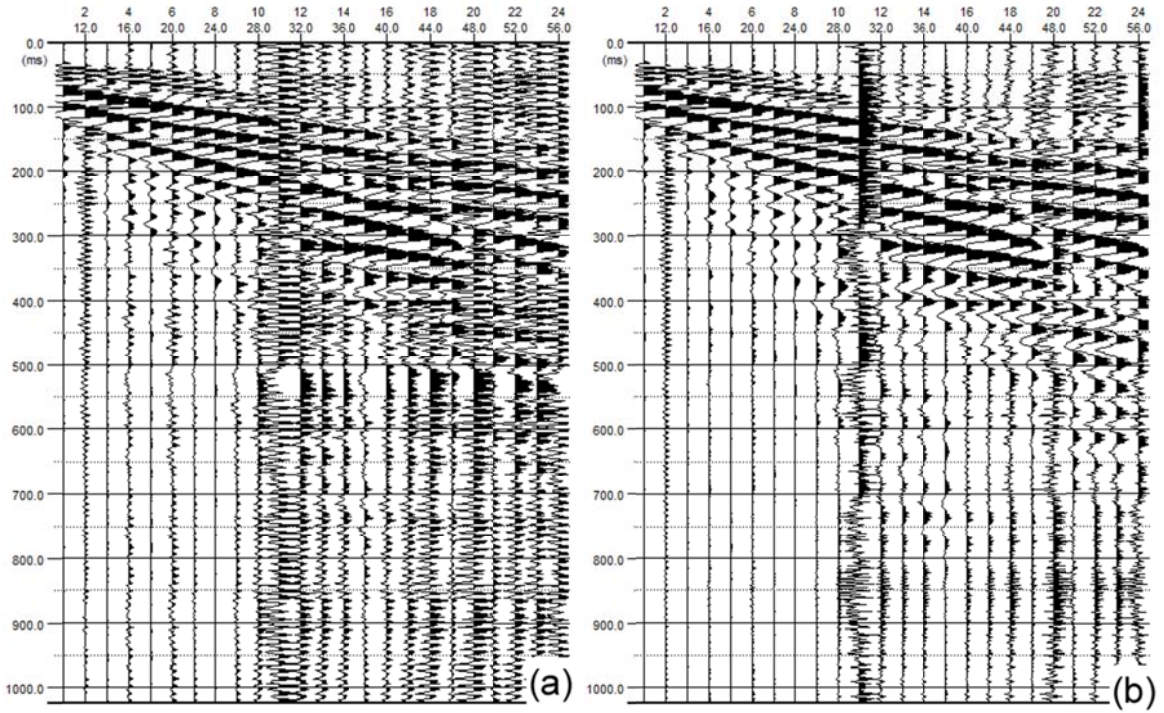
Kentte özellikle son 10 yıl içinde yapı stoğunun hızla artmasının yanında kentin bulunduğu coğrafik bölgenin karakteri olan yüksek eğim nedeniyle veri toplama sırasında hem ÇKYDA hem de DES yöntemi için gerekli açılımların yapılabileceği alanların bulunması zor olmuştur. Saha çalışmalarında kenti Doğu-Batı hattında tarayacak şekilde 10 farklı alanda sismik ve elektrik veri toplanmıştır. Ölçüm profilleri buldukları mahalle isimleriyle temsil edilmiştir (Şekil 2.19). Mümkün olan en fazla veri senaryosunu oluşturmak adına, veriler farklı jeolojik yapıya sahip noktalarda toplanmaya gayret edilmiştir. Örneğin Moloz ve Beşirli Sahil noktaları birer dolgu alan iken, Boztepe taraça birimlerine sahiptir. Diğer ölçüm noktaları ise genellikle ana kaya üzerinde kil ve alüvyon birimler içermektedir (Şekil 2.18).

Kentin tarıma elverişli topraklarında her ne kadar günümüzde geçmişe göre daha az tarımsal faaliyetler görülse de, çalışmalar sırasında sıkça fındıklık türü sığ ve sağlam köklü bitki örtüsünün yanında, yaşça büyük ve kökleri gözle görülür şekilde yüzeylenebilen ağaçlara da sıkça rastlanmıştır. Bölgede su, sığ derinliklerde genelde “çatlak suyu” niteliğinde olduğundan herhangi bir su tablası ya da suya doymun birim olduğu düşünülmemektedir.



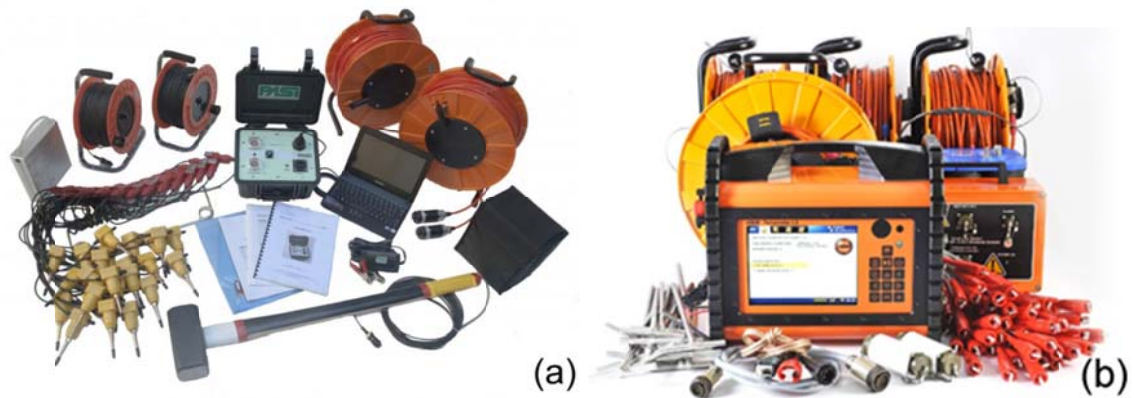
Şekil 2.19. Saha verisi ölçüm noktaları (Google Earth, 2016)

Sismik veriler 24 kanallı İtalyan yapımı PASI marka 16S24-U model cihaz ile (Şekil 2.21a), 4.5 Hz lik düşey alıcılarla ve filtresiz şekilde toplanmıştır. Alıcı aralığı 2m. iken ofset aralığı deneme atışlarındaki Sinyal/Gürültü oranına (S/N) bağlı olarak 8 ve 10m. olarak seçilmiştir. Ayrıca optimum S/N oranının elde edilmesi için 5 düşey yığma yapılmıştır. Kaynak olarak ise 10kg lık balyoz kullanılmıştır. İnşaat faaliyetlerinin sıklıkla devam ettiği bölgelerde özellikle ağır iş makinaları ve trafiğin yarattığı yüksek frekanslı gürültülerin bastırılması açısından düşey yığma büyük fayda sağlamıştır (Şekil 2.20).



Şekil 2.20. Düşey yağmanın sismik veriler üzerindeki etkisi. (a) tek atış görüntüsü, (b) 5 düşey yağma sonucunda elde edilen sismik veri görüntüsü

Elektrik öz direnç verileri İsveç yapımı ABEM markas çok kanallı Terrameter-LS model cihaz (Şekil 2.21b) ile toplanmıştır. Veriler DES yöntemi üzerinden toplanacağı için cihaz 4 elektrotlu dizilim formunda kullanılmış olup, her ölçüm noktasında 3 yağma yapılmıştır. Ölçümler sırasında Schlumberger dizilimi kullanılmış olup $AB/2$ uzaklığı olarak maksimum 60m.' ye ulaşılabilmektedir. Şekil 2.22' de arazi çalışmalarından fotoğraflar görülmektedir.



Şekil 2.21. Veri toplamada kullanılan ekipmanlar. (a) PASI 16S24-U, (b) Terrameter LS

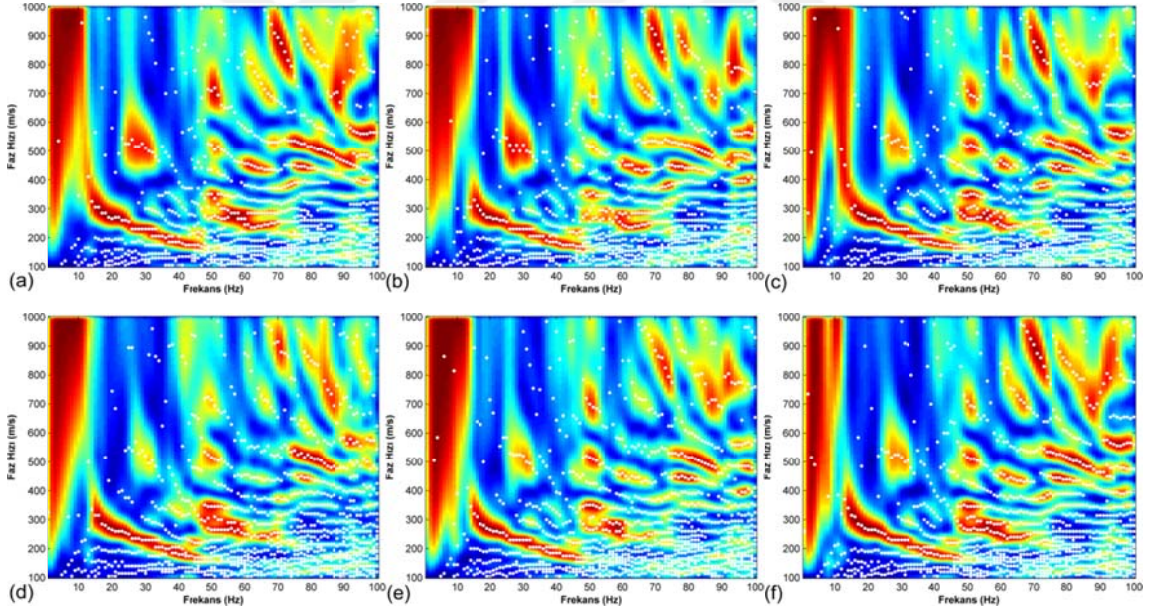


Şekil 2.22. Saha çalışmalarından görüntüler

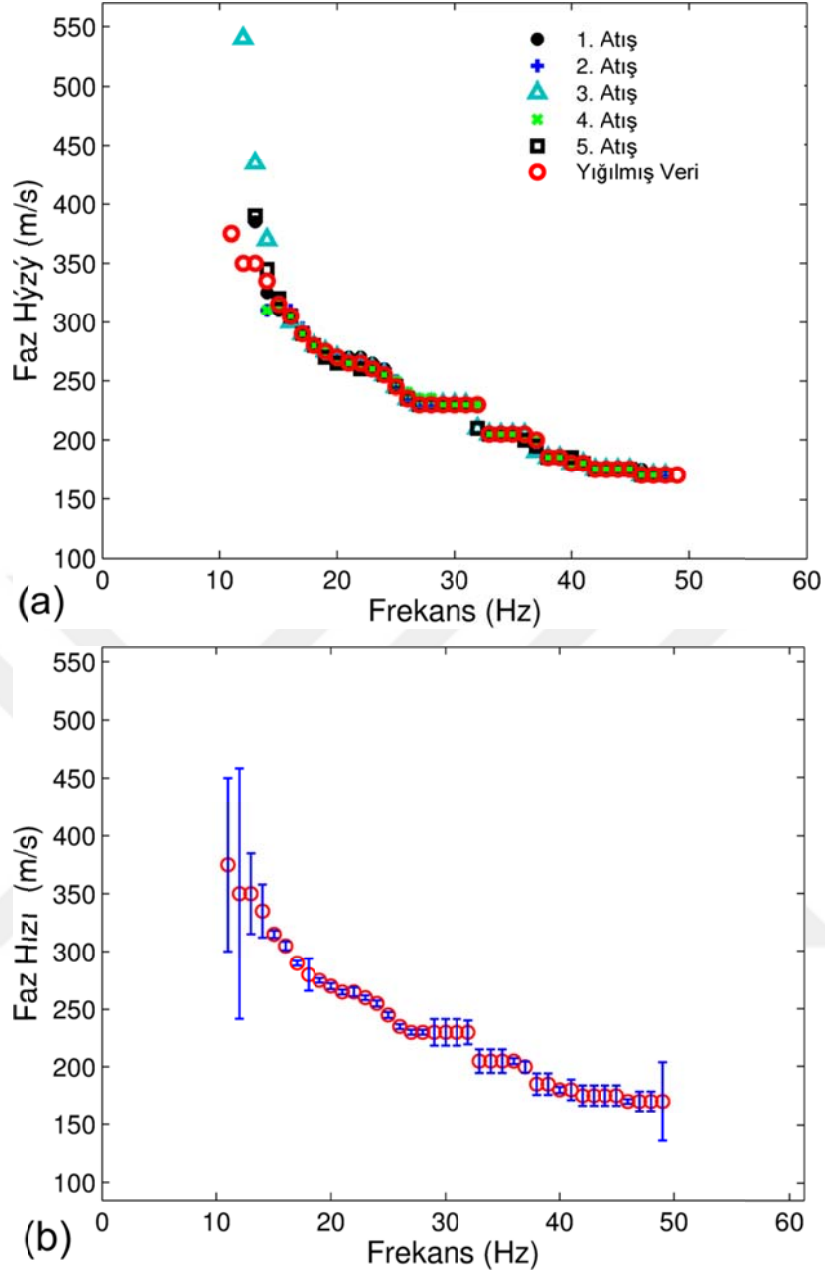
Sismik verilerden RD verilerinin elde edilmesi için eğimli yığma (slant stack) (Yılmaz, 2001) dönüşüm tekniği kullanılmıştır. Ölçüm noktaları için RD verisi oluştururken, Socco vd. (2009) yardımıyla aşağıdaki işleyiş oluşturulmuştur;

1. Her bir tekil atış (kaynak noktasındaki her bir vuruş) ve yığılmış veri frekans-faz hızı (f-c) ortamına aktarılır (Şekil 2.23) ve RD eğrisi elde edilir. Yığılmış verinin, her bir tekil atışa göre daha yüksek S/N oranına sahip olması nedeniyle birleşik ters çözüm sırasında kullanılacak olan RD verisi bu aşamada elde edilen RD değerleri olacaktır.
2. Elde edilen tüm RD eğrileri üst üste çizdirilir (Şekil 2.24a) ve her bir frekans değeri için faz hızındaki standart sapmalar hesaplanır (Şekil 2.24b). Bu hesaplama sırasında her bir frekans değeri için oluşabilecek farklı senaryolar için aşağıdaki yollar izlenmiştir:
 - I. Eğer bir frekans değerinde sadece tek bir faz hızı tanımlanmışsa, bu hıza ait standart sapma hızın %20 si kadar tanımlanmıştır

- II. Eğer frekans değeri için birçok faz hızı değeri tanımlanmışsa ancak tanımlanan değerlerde yığılmış veriden katkı yoksa
 - i. $\sigma = 0$ ise %5 lik gözlemsel sapma tanımlanmıştır
 - ii. $\sigma \neq 0$ ise, hesaplanan sapma kullanılmıştır
 - III. Eğer frekans değeri için yığılmış verininde içinde bulunduğu birçok faz hızı değeri tanımlanmışsa
 - i. $\sigma = 0$ ise %5 lik gözlemsel sapma tanımlanmıştır
 - ii. $\sigma \neq 0$ ise, hesaplanan sapma kullanılmıştır
3. Birleşik ters çözümde kullanılacak RD veri dosyası 3 sütunlu olacak şekilde hazırlanır. Burada, 1. sütun frekans (f), 2. sütun her bir frekansa karşılık gelen faz hızı (V_R), 3. sütun ise her bir frekansa karşılık gelen standart sapma şeklindedir ($\sigma_{obs}^{V_R}$).



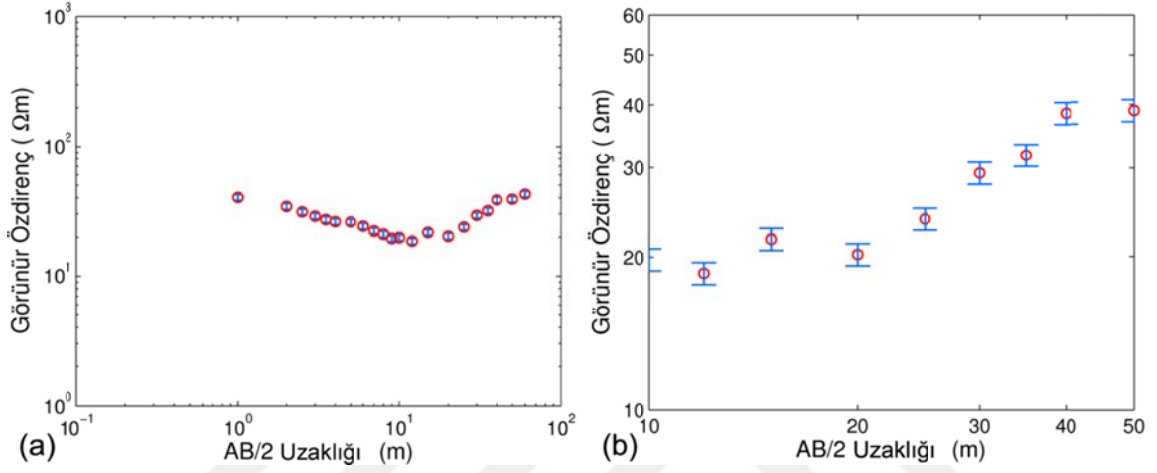
Şekil 2.23. Yalınca noktası sismik verilerine ait f-c görüntüleri. (a)' dan (e)' ye 1-5. Atışlar, (f) yığılmış veri



Şekil 2.24. (a) Yalnızca noktası tüm verilerinden elde edilen RD verilerinin çizdirilmesi, (b) ölçüm noktası için elde edilen RD ve sapmalar (veriler kırmızı daireler, belirsizlikler mavi çizgilerle temsil edilmiştir)

Elektrik özdirenç veri dosyalarının hazırlanması nispeten daha pratiktir. Çünkü ölçümler sırasında hem görünür özdirenç değerleri hem de ölçüme ait standart sapma değerleri veri dosyası şeklinde saklanmaktadır. Ancak, çalışma boyunca ölçülen neredeyse tüm görünür özdirenç verilerine ait standart sapma %0.1-0.3 gibi çok düşük değerler olduğu için, veri toplama sırasında yapılan uzaklık hataları, kuplaj sorunları vb. etkenler

göz önünde bulundurularak görünür öz direnç verilerinin varsayılan standart sapması %5 olarak belirlenmiştir. %5'ten büyük sapmaya sahip verilerin belirsizlikleri ise sahip oldukları değerler olarak atanmıştır (Şekil 2.25). Birleşik öz direnç çözümünde kullanılacak olan DES verisi, 1. sütun AB/2 değerleri (x), 2. sütun her bir AB/2 de ölçülen görünür öz direnç değerleri (ρ_a) ve 3. sütun ölçüme ait standart sapma $\sigma_{obs}^{\rho_a}$ olacak şekilde oluşturulmuştur.



Şekil 2.25. (a)Yalınca noktası DES verisi, (b) yakınlaştırılmış görünütü (veriler kırmızı daireler, belirsizlikler mavi çizgilerle temsil edilmiştir)

Her iki veri seti hazırlandıktan sonra Denklem (91)' deki d_{obs} ve C_{obs}

$$d_{obs} = \begin{bmatrix} d_{obs}^{\rho_a} \\ d_{obs}^{V_R} \end{bmatrix} \text{ ve } C_{obs} = \begin{bmatrix} \text{diag}(\sigma_{obs}^{\rho_a 2}) & 0 \\ 0 & \text{diag}(\sigma_{obs}^{V_R 2}) \end{bmatrix} \quad (102)$$

şeklinde düzenlenmiştir.

2.2.3. Saha Verilerinin Değerlendirilmesi ve Bulgular

Bu aşamada, hazırlanan algoritma ile yapılan birleşik ters çözümlerin yanında her bir ölçüm noktası için RD verilerinin tekil ters çözümü de gerçekleştirilmiştir. Böylece tekil çözümde karşılaşılabilecek sorunlarda, birleşik çözümün hangi faydaları sağladığı açıkça gösterilmiştir. Tekil ters çözümler, ağırlıklandırılmış-sönümlü en küçük kareler yöntemi ve yine değişken sönüm faktörü stratejisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Birleşik

çözümler boyunca yoğunluk ve Poisson oranı tüm tabakalar için sırasıyla 1.8 gr/cm³ ve 0.35 alınmıştır.

Bununla beraber, tekil ve RD-DES verilerinin birleşik ters çözümü dışında, her bir ölçüm noktası için toplanan sismik verinin verimli kullanımı ve sürece eklenen yeni birbilginin çözüme yapacağı katkısı görmek adına sismik ilk varış zamanlarının (IVZ) da sürece eklendiği ikinci bir birleşik ters çözüm akışı oluşturulmuştur. Böylelikle hem çözüm sürecine ek bir bilgi dâhil edilmiş, hem de çözüm boyunca sabit bir bilgi olarak kullanılan P-dalga hızları sürece bilinmeyen olarak eklenmiştir. Bu eklemeye, saha verilerinin tekil ve iki farklı birleşik ters çözüm sonuçlarının karşılaştırılması mümkün olacaktır. İlk varışların çözüme dâhil edilmesi amacıyla 1B lu ışın yolu ve kırılma dalgası seyahat zamanı mantığına dayalı, hız terslenmelerini de modelleyebilen bir modelleme algoritması oluşturulmuştur. Dalga seyahat zamanları her bir alıcı lokasyonu x için

$$T_{T,i} = \frac{x}{Vp_i} + 2 \left(\sum_{k=1}^{i-1} \frac{h_k \sqrt{Vp_i^2 - Vp_k^2}}{Vp_i Vp_k} \right) \quad i=1:n \quad (103)$$

ile hesaplanmıştır. Burada, n toplam tabaka sayısı, i seyahat zamanı hesaplaması yapılan tabakayı temsil etmektedir. Denklem (103), yer altı modellerindeki her bir tabaka için uygulanır.

Her ölçüm noktasına ait ilk varış veri seti, RD veri setlerinin hazırlanmasında izlenen akış takip edilerek oluşturulmuştur. İlk varışların akışa dâhil edilmesi ile oluşturulan birleşik ters çözümde Denklem (95)

$$G = \begin{pmatrix} \frac{\partial \ln \rho_a}{\partial \ln \rho} & \frac{\partial \ln \rho_a}{\partial \ln h} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial \ln V_R}{\partial \ln h} & \frac{\partial \ln V_R}{\partial \ln V_S} & \frac{\partial \ln V_R}{\partial \ln V_P} \\ 0 & \frac{\partial \ln T_T}{\partial \ln h} & 0 & \frac{\partial \ln T_T}{\partial \ln V_P} \end{pmatrix} \quad (104)$$

halini alırken, Denklem (102)

$$d_{obs} = \begin{bmatrix} d_{obs}^{\rho_a} \\ d_{obs}^{V_R} \\ d_{obs}^{T_T} \end{bmatrix} \text{ ve } C_{obs} = \begin{bmatrix} \text{diag}(\sigma_{obs}^{\rho_a^2}) & 0 & 0 \\ 0 & \text{diag}(\sigma_{obs}^{V_R^2}) & 0 \\ 0 & 0 & \text{diag}(\sigma_{obs}^{T_T^2}) \end{bmatrix} \quad (105)$$

şeklinde yeniden düzenlenmiştir.

Saha verilerinden kestirilen model parametrelerinin belirsizliği-güvenirliliği model kovaryans matrisi, C_m , yardımıyla elde edilen model parametre sınırları, σ_m ile temsil edilmiştir. C_m ;

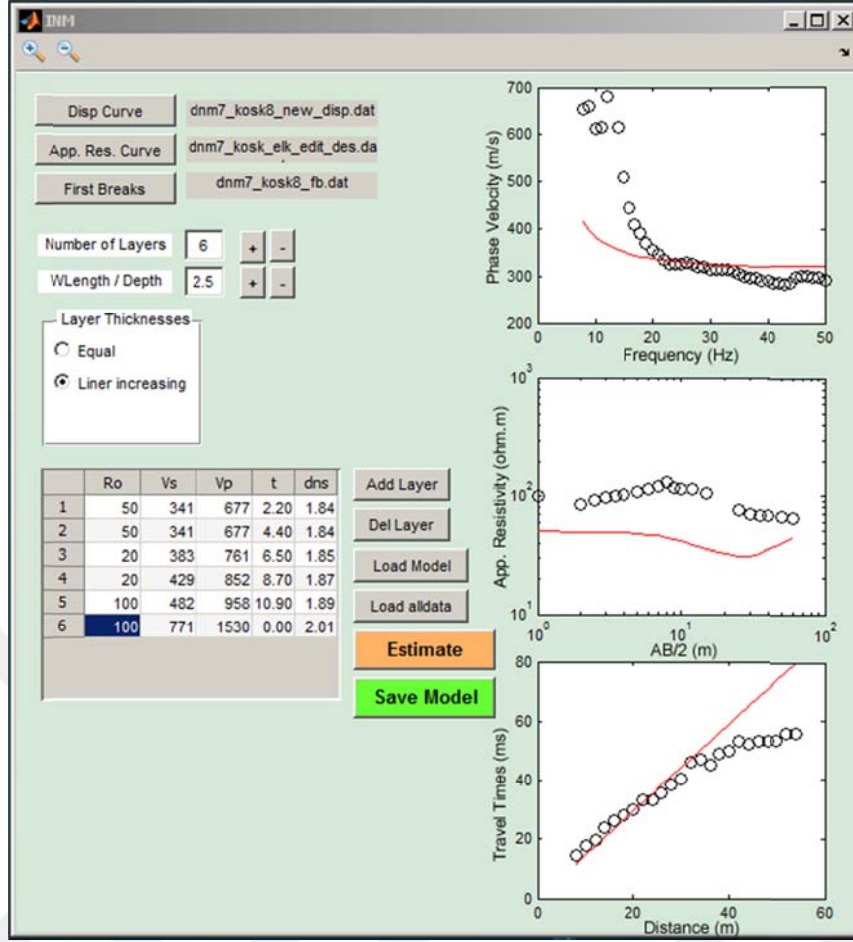
$$C_m = (G_f^T C_d^{-1} G_f)^{-1} \quad (106)$$

ile tanımlanır (Menke, 2014). Burada G_f ; sonuç model parametreleri ile hesaplanan kısmi türevler matrisini temsil eder. Model parametrelerine ait belirsizlik sınırları ise

$$\sigma_m = \sqrt{\text{diag}(C_m)} \quad (107)$$

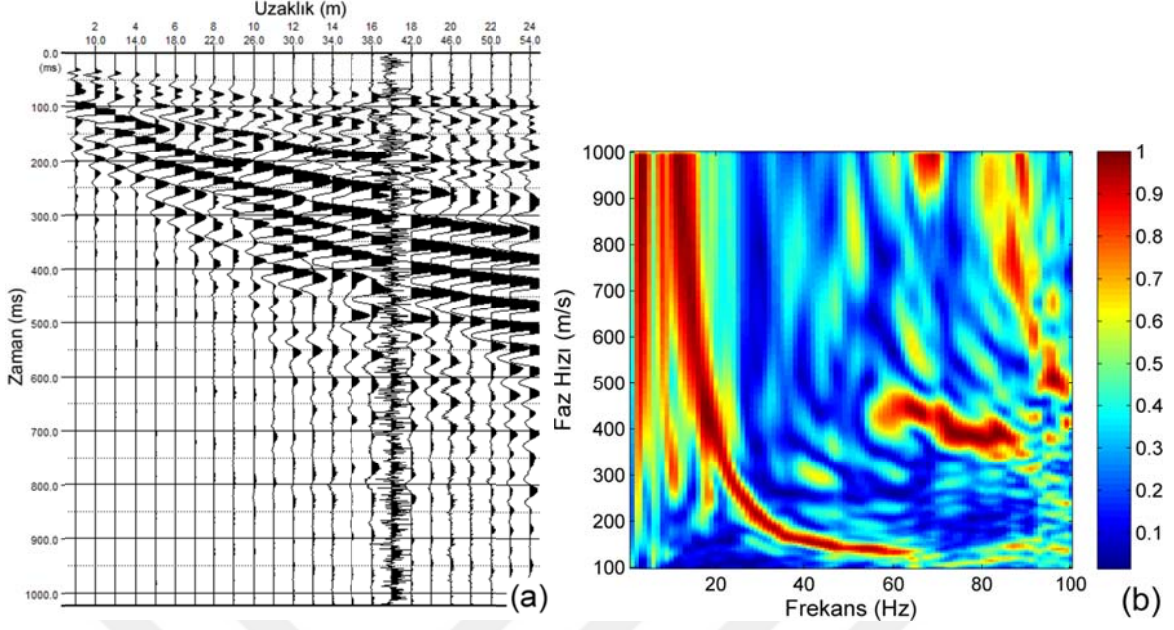
ile elde edilir. Denklem (107)' da σ_m ; sonuç model parametrelerine ait standart sapmaları içeren vektördür. Denklem (106)' ten görüleceği gibi sonuç model parametrelerinin belirsizliği verinin bir fonksiyonu değildir dolayısıyla veriden bağımsızdır (Strobbia, 2003).

Giriş modeline ihtiyaç duyan birleşik çözüm algoritmalarında önemli sorunlardan biri oluşturulan giriş modelinin tüm veri setlerine uygun olması problemidir. Bu problem birleşik çözümdeki farklı veri seti sayısı arttıkça daha da önemli bir hal alır. Bu nedenle, pratik giriş modelleri oluşturma adına Matlab yazılımının GUI modülü kullanılarak bir kullanıcı ara yüzü geliştirilmiştir (Şekil 2.26). Bu ara yüz sayesinde, oluşturulan giriş modelinin her üç yöntem için tepkisi hesaplanmakta ve görüntülenmektedir. Giriş modeli oluşturulması sırasında tabakalara ait h , V_s değerleri dispersiyon eğrisine ait λ -c eğrisi üzerinden kestirilirken, ρ_d ve V_p değerleri deneysel bağıntılardan türetilmektedir (Kritikakis ve Vafidis, 2011). Tabaka özdirençleri ise doğrudan kullanıcı tarafından girilmelidir. Ancak, türetilen deneysel değerler kimi zaman saha verileri ile eşleşemediği için oluşturulan ara yüzde giriş modeline ait her bir parametreyi değiştirme imkânı verilmiştir. Buna ek olarak tabaka sayılarını değiştirme, giriş modelini kaydetme ya da önceden kaydedilen bir modeli yükleme gibi seçenekler mevcuttur.



Şekil 2.26. Giriş modellerinin daha pratik oluşturma adına oluşturulan ara yüz

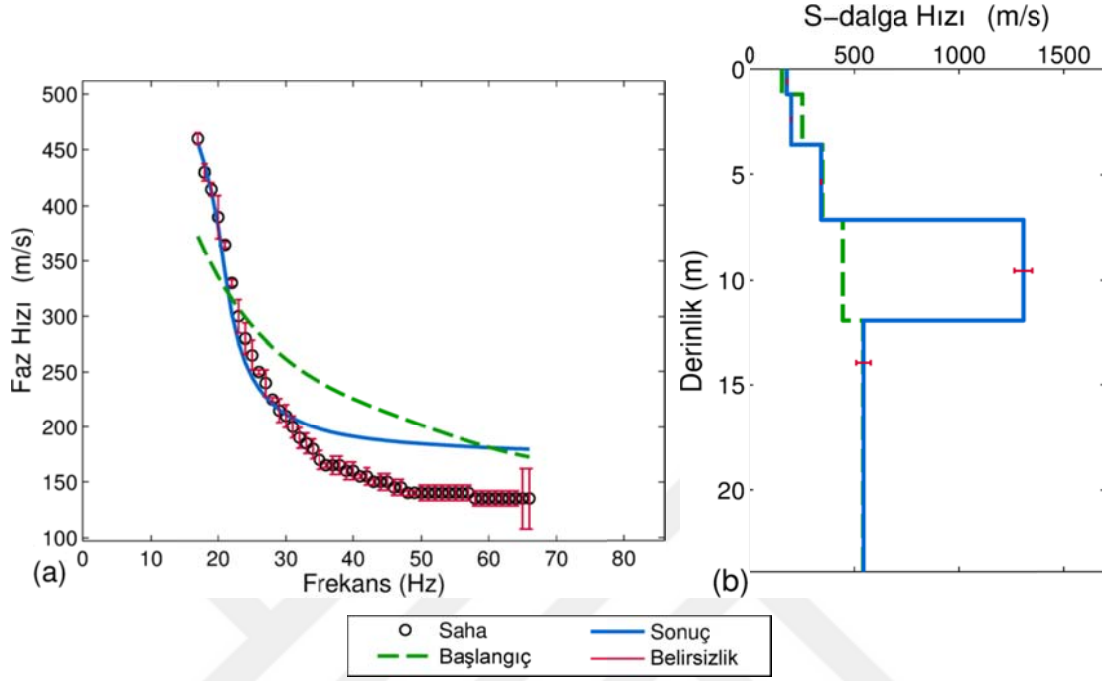
RD verilerinin geleneksel tekil çözümünde karşılaşılan en önemli problem, tabaka kalınlığının çözüm boyunca sabit tutulması ve sabit tutulan bu parametrenin RD verisinden güvenilir şekilde kestirilememesidir. Bunun en büyük nedeni, RD verilerinde toplam araştırma derinliğinin, dolayısıyla tabaka kalınlıklarının, maksimum dalga boyunun (λ_{\max}) $\lambda_{\max}/2$, $\lambda_{\max}/2.5$ ve $\lambda_{\max}/3$ değerlerine göre kestirilmesidir. Burada kullanılan λ değeri $\lambda = c/f$ bağıntısıyla elde edilir, ancak yüzey dalgalarının karakteristik özelliği olan dispersif yapısı, yüzey dalgalarının aynı frekansta birden çok faz hızı ile hareket etmesini sağladığı için farklı c/f kombinasyonları aynı λ' na karşılık gelebilmektedir. Dolayısıyla toplam araştırma derinliğinin ve tabaka kalınlıklarının λ' ya bağlı kestirimi her zaman güvenilir modeller üretmez. Bostancı II noktasında toplanan yüzey dalgası verisi (Şekil 2.27) üzerinden bu sorun daha açık bir şekilde vurgulanabilir ve birleşik ters çözüm ile bu sorunun nasıl indirgenildiğini görülebilir.



Şekil 2.27. (a) Bostancı II noktası için elde edilen yüzey dalgası verisi, (b) veriye ait c-f görüntüsü

Bostancı II noktası için elde edilen RD verisinin sırasıyla $\lambda_{\max}/2$, $\lambda_{\max}/2.5$ ve $\lambda_{\max}/3$ varsayımları ile yapılan tekil çözümleri ve çözüm detayları Şekil 2.28-Şekil 2.30 arasında gösterilmiştir. Görülmektedir ki $\lambda_{\max}/2$ ve $\lambda_{\max}/2.5$ varsayımı ile yapılan çözümler “iyi yaklaşımlar” göstermezken, $\lambda_{\max}/3$ ’ e ait çözüm nispeten daha iyi bir yaklaşım göstermektedir. Ancak $\lambda_{\max}/3$ varsayımlı çözüm, giriş modelinde ilk 2.5m’ lik derinliğin, 0.8 ve 1.6m kalınlığa sahip iki ince tabaka ile temsil edilmesine rağmen (yani çözümün yüksek frekans bölgesinde hareket etmesine yeterli imkan olmasına rağmen), 29 iterasyon sonucunda dahi bu tabakaların temsil ettiği yüksek frekans bölgesinde sorunlara sahiptir (Şekil 2.30). Bununla beraber, RD ve DES verilerinin birleşik ters çözümünde (2BÇ) (Şekil 2.31) daha az tabaka kullanılmasına rağmen, her iki veri seti için düşük belirsizlik değerleri ile güvenilir yaklaşımlar elde edilmiş ve yüksek frekans bölgesinde daha iyi bir uyum sağlanmıştır (Şekil 2.31e). Dikkat çekilmesi gereken önemli noktalardan biri, birleşik çözümde kullanılan giriş modeline ait h değerlerinin çözüm boyunca, sürecin ihtiyacı yönünde gösterdiği değişimdir (Tablo 2.10). Bu değişim, çözümün giriş modeline olan bağlılığının, birleşik ters çözüm sürecinde indirgenliğini göstermektedir. Bostancı II noktası için çözüm sürecine ilk varış verilerinin dâhil edilmesinin (3’lü birleşik ters çözüm, 3BÇ) bu aşamada 2BÇ’ ye belirgin ek bir katkı sağlamadığı ve bir önceki birleşik çözümle uyumlu sonuçlar ortaya koyduğu görülmektedir (Şekil 2.32 ve Tablo 2.11). Bununla

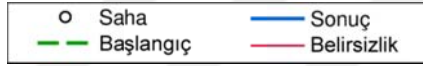
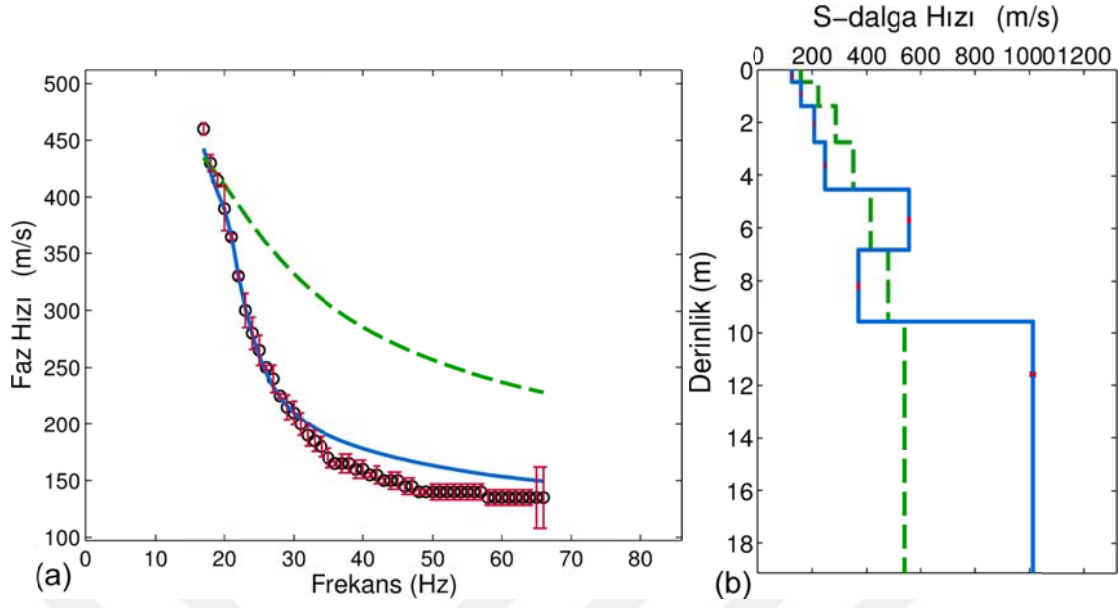
beraber, ilk varış verileri göz önüne alınarak çalışma alanında kalın bir zemin tabakasının varlığı görülmekte ve çözüm bu bilgiyi kullanarak toplam kalınlığını yaklaşık 1.5m artırarak yaklaşım sağlamaktadır.



Tabaka No	h (m)	Vs (m/s)		
		Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	1,2	159	182	0,06
2	2,4	254	203	0,06
3	3,6	350	344	0,01
4	4,8	446	1306	42,65
5	∞	541	544	34,33

İterasyon	11
Hata (%)	23

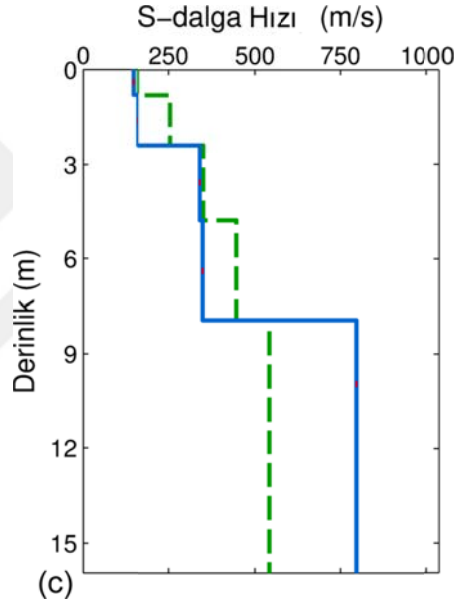
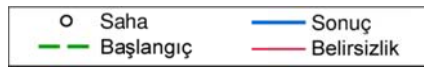
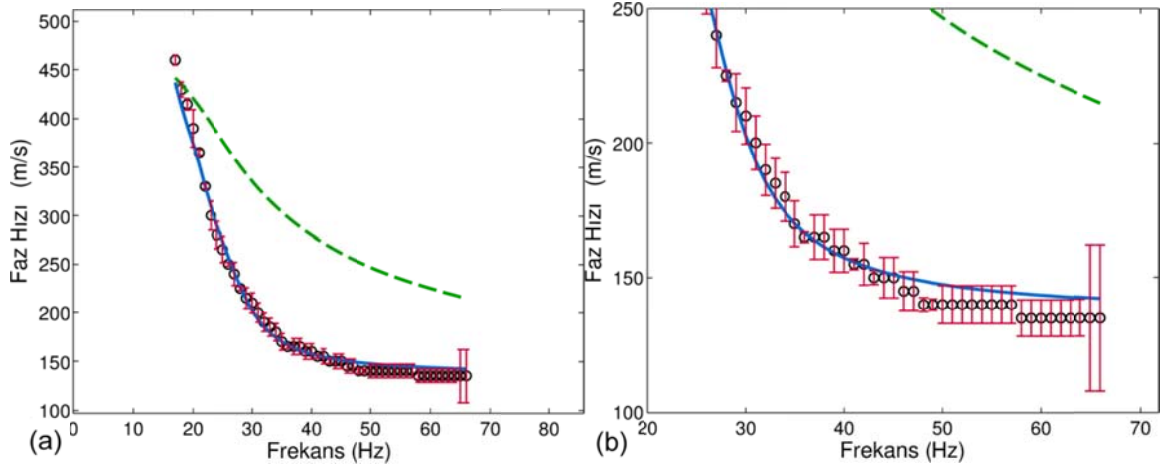
Şekil 2.28. (a) Bostancı II RD eğrisinin $\lambda_{\max}/2$ varsayımına göre tekil ters çözümü, (b) Vs-derinlik profili



Tabaka No	h (m)	Vs (m/s)		
		Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	0,5	159	126	0,002
2	0,9	223	159	0,001
3	1,4	286	207	0,001
4	1,8	350	247	0,03
5	2,3	414	557	3,74
6	2,7	478	369	3,70
7	∞	541	1013	8,45

İterasyon	11
Hata (%)	11

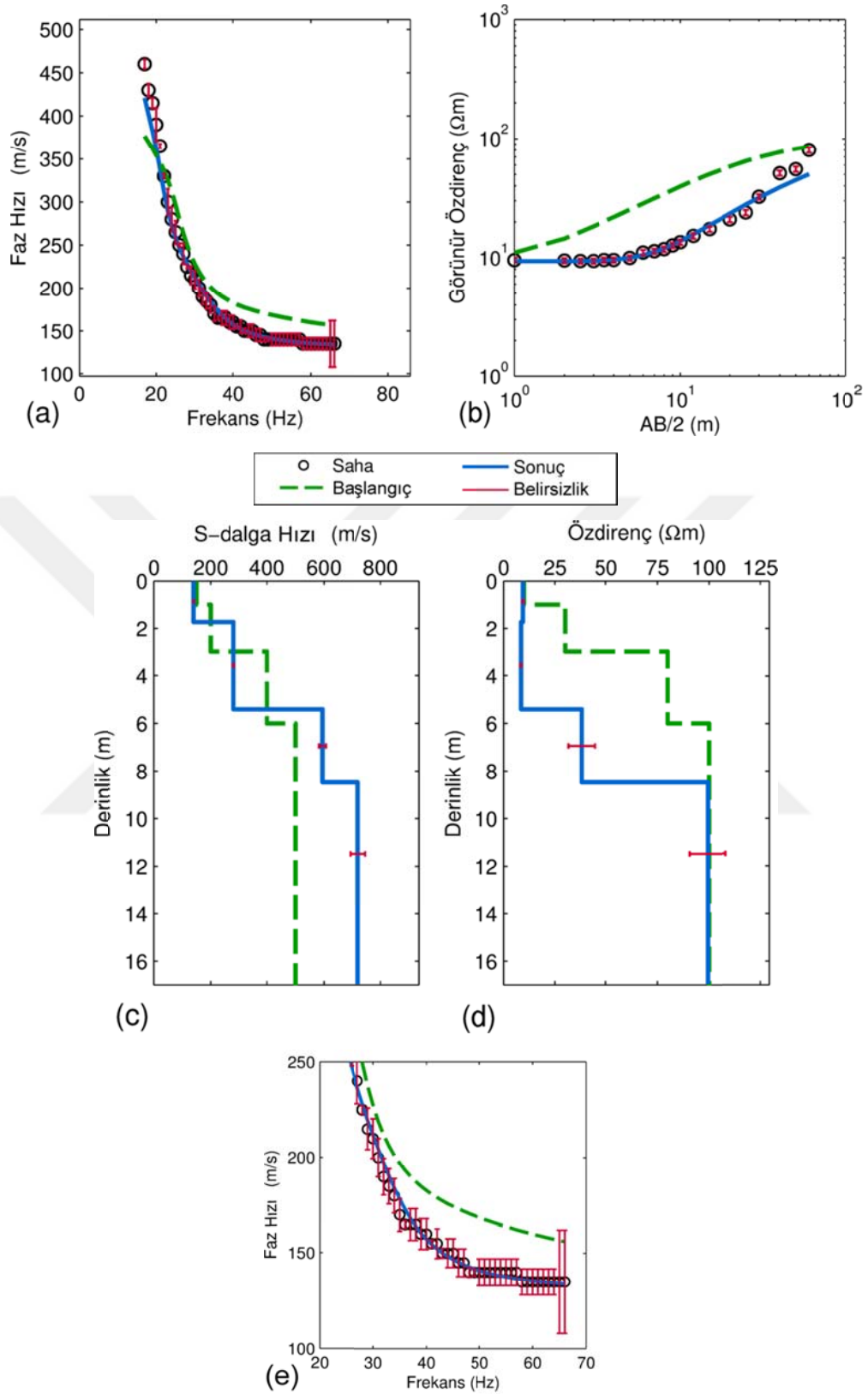
Şekil 2.29. (a) Bostancı II RD eğrisinin $\lambda_{\max}/2.5$ varsayımına göre tekil ters çözümü, (b) Vs-derinlik profili



Tabaka No	h (m)	Vs (m/s)		
		Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	0,8	159	143	0,001
2	1,6	254	157	0,001
3	2,4	350	340	0,001
4	3,2	446	348	0,001
5	∞	541	796	0,001

İterasyon	29
Hata (%)	3,9

Şekil 2.30. (a) Bostancı II RD eğrisinin $\lambda_{\max}/3$ varsayımına göre tekil ters çözümü, (b) çözümün 20-70 Hz arasındaki yaklaşıtırlmış görüntüsü, (c) Vs-derinlik profili

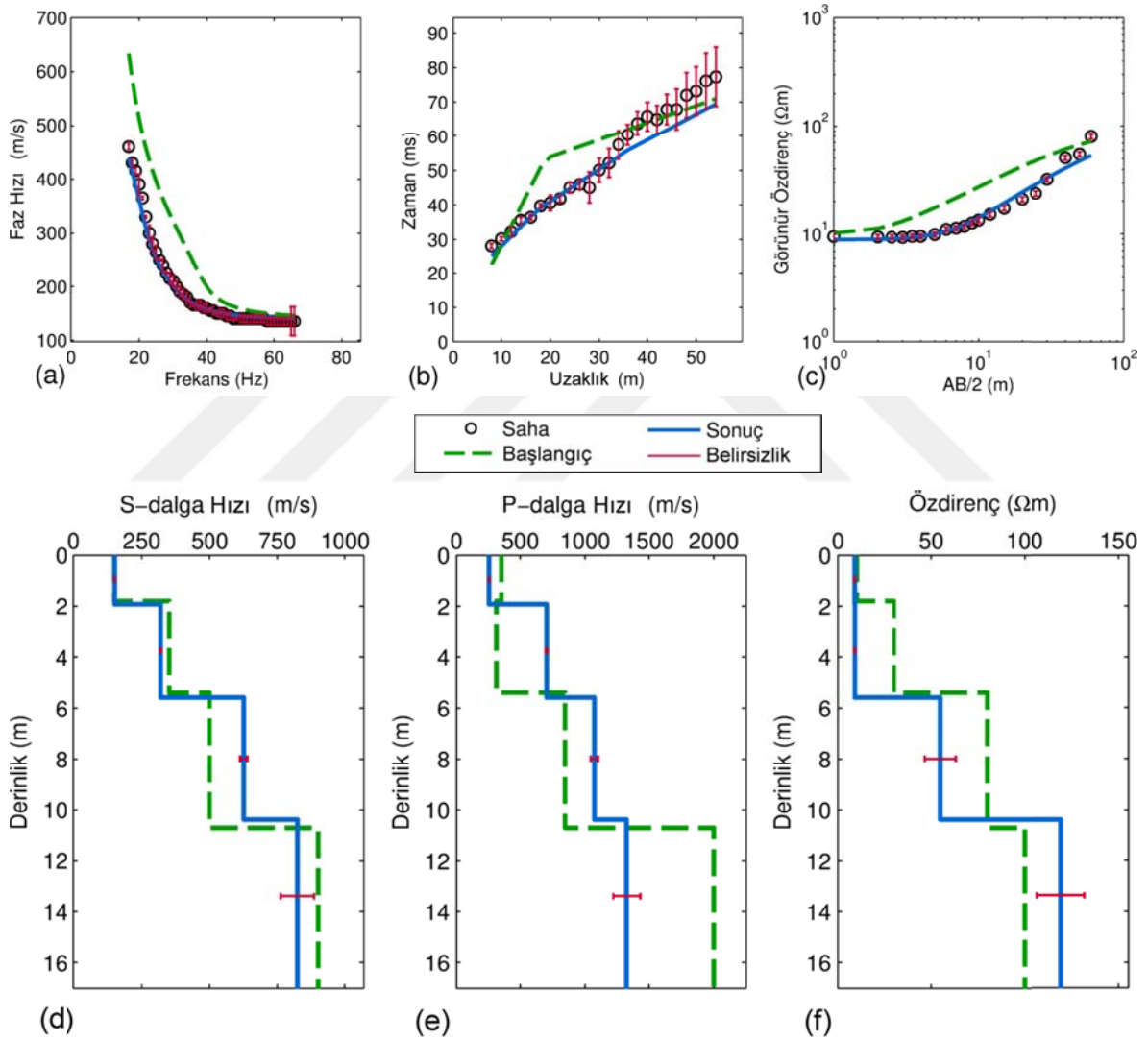


Şekil 2.31. Bostancı II noktası 2BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) DES verisi, (c) V_s -derinlik profili, (d) ρ -derinlik profili, (e) RD verisinin 20-70 Hz için yakınlaştırılmış görüntüsü

Tablo 2.10. Bostancı II noktası 2BÇ sonucu detayları

Tabaka No	h (m)			Vs (m/s)			ρ (ohm*m)		
	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	1,0	1,7	0,01	150	140	0,65	10	9	0,23
2	2,0	3,7	0,02	200	283	1,40	30	9	0,21
3	3,0	3,1	0,40	400	594	12,25	80	38	6,47
4	∞	∞		500	719	27,03	100	99	8,77

İterasyon	9
Hata (%)	7

Şekil 2.32. Bostancı II noktası 3BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) IVZ verisi, (c) DES verisi, (d) Vs-derinlik profili, (e) Vp-derinlik profili, (f) ρ -derinlik profili.

Tablo 2.11. Bostancı II noktası 3BÇ sonucu detayları

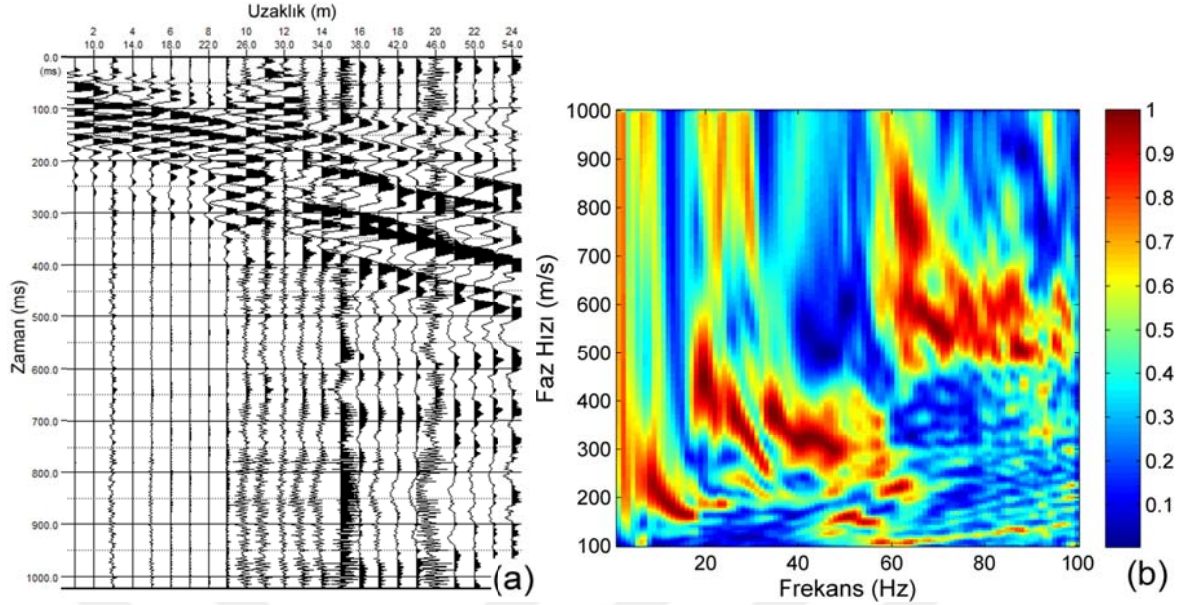
Tabaka No	h (m)			ρ (ohm*m)		
	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	1,8	1,9	0,01	10	9	0,20
2	3,6	3,7	0,03	30	9	0,24
3	5,3	4,8	0,53	80	55	8,28
4	∞	∞	-	100	119	12,58

Tabaka No	Vs (m/s)			Vp (m/s)		
	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	150	151	0,90	354	258	0,99
2	350	319	2,27	315	704	6,82
3	500	626	13,53	845	1072	29,62
4	900	823	61,42	2000	1327	108,32

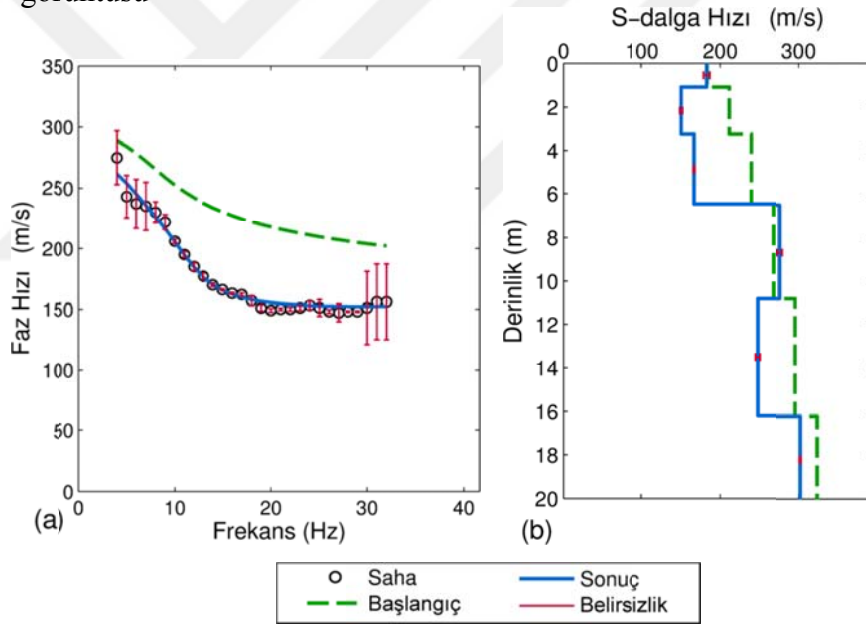
İterasyon	4
Hata (%)	7

Giriş modeline olan bağımlılığın indirgenmesinin ve λ -derinlik ilişkisinin geleneksel çözümlerde yarattığı problemlerin tesadüfi olmadığı ve sık görülen bir sorun olduğu Moloz mevki için toplanan verilerin ters çözümünden elde edilen sonuçlarda görülebilir. Moloz noktası için elde edilen RD verisinin (Şekil 2.33) $\lambda_{\max}/3$ varsayımına tekil çözümü Şekil 2.34’ te verilmiştir. Bu çözümde toplam derinlik 16.2m olup, hem veri uyumu hem de düşük belirsizlik değerleri nedeni ile güvenilir olduğu kabul görür. Ancak, 2BÇ’ de (Şekil 2.35, Tablo 2.12) giriş modelinde toplam derinlik tekil çözüme benzer verilmesine rağmen, çözüm daha sığ modellere ihtiyaç duymuş ve çözümü bu yönde ilerleterek belirsizliğin azaldığı, daha sığ bir yer altı modeli ortaya koymuştur. 3BÇ’ de (Şekil 2.36, Tablo 2.13) ise giriş modeli toplam derinliği benzer, ancak daha az tabaka sayısı içeren başka bir model seçilmiş olmasına rağmen, çözüm 2BÇ’ de olduğu gibi tekil çözümden daha sığ bir sonuç üretmiştir. 3BÇ’ de son iki tabakaya ait Vp değerlerine ait yüksek belirsizliklerin nedeni, ilk varış verilerinde uzak ofsetlere ait ilk varışlardaki yüksek belirsizliğin, daha iyi bir veri yaklaşımını etkilemiş olmasıdır.

2BÇ ve 3BÇ’ lerin düşük belirsizliği, veriye olan yaklaşımları ve model parametrelerinin uyumu, tekil çözümün bir “çok çözümlülük ürünü” olduğunu destekler niteliktedir.



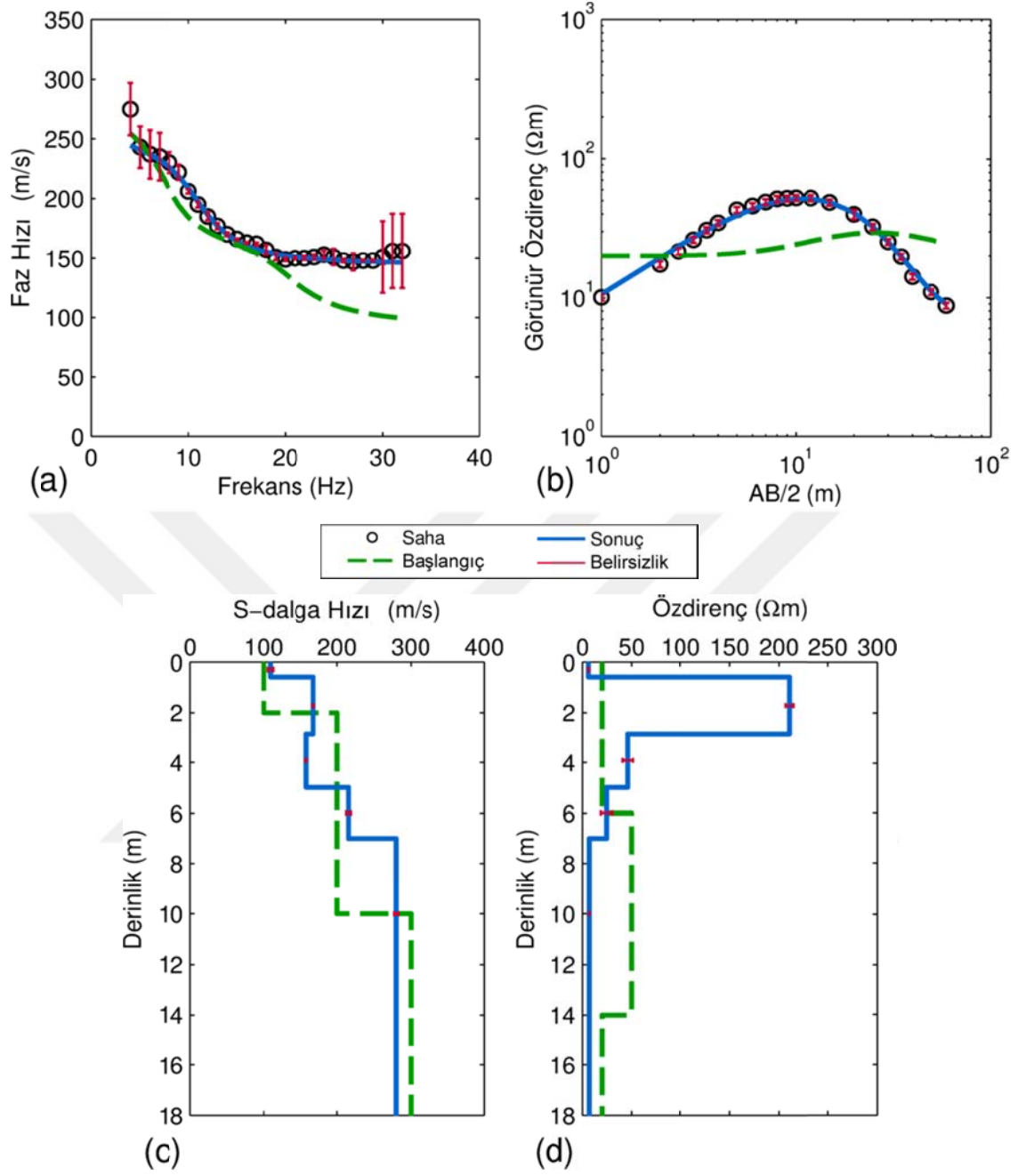
Şekil 2.33. (a) Moloz noktası için elde edilen yüzey dalgası verisi, (b) veriye ait c-f görüntüsü



Tabaka No	h (m)	Vs (m/s)		
		Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	1,1	184	183	4,10
2	2,2	212	151	1,81
3	3,2	240	167	1,12
4	4,3	268	276	3,46
5	5,4	296	248	2,86
6	∞	324	302	1,16

İterasyon	4
Hata (%)	2,4

Şekil 2.34. (a) Moloz RD eğrisinin $\lambda_{\max}/3$ varsayımına göre tekil ters çözümü, (b) Vs-derinlik profili

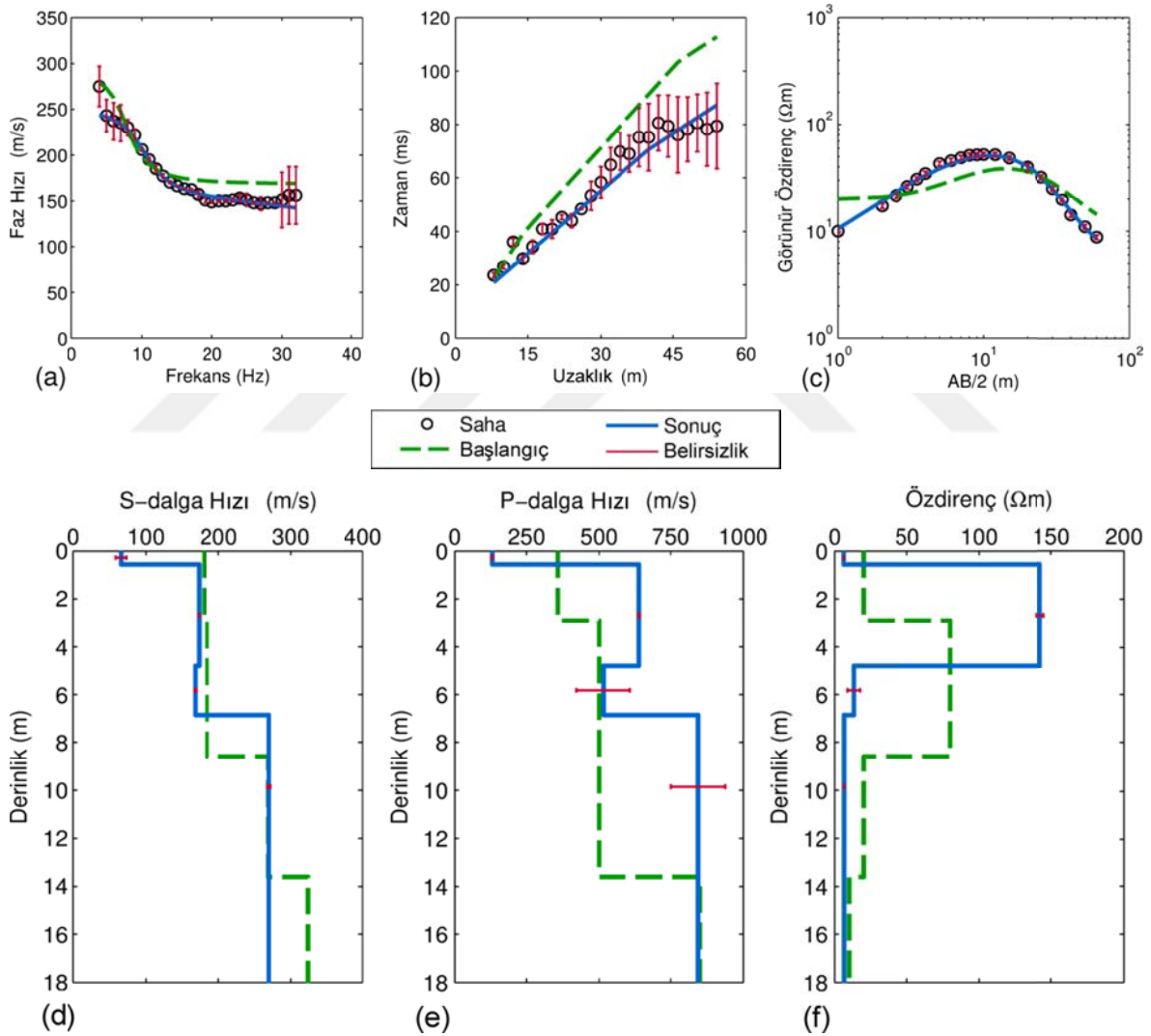


Şekil 2.35. Moloz noktası 2BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) DES verisi, (c) V_s -derinlik profili, (d) ρ -derinlik profili

Tablo 2.12. Moloz noktası 2BÇ sonucu detayları

Tabaka No	h (m)			Vs (m/s)			ρ (ohm*m)		
	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	2,0	0,6	0,01	100	109	3,60	20	6	0,12
2	4,0	2,3	0,04	200	168	0,68	20	211	4,02
3	4,0	2,1	0,04	200	158	0,70	50	46	5,25
4	4,0	2,0	0,15	300	216	3,05	50	24	5,87
5	∞	∞		300	280	2,73	20	7	0,25

İterasyon	7
Hata (%)	4

Şekil 2.36. Moloz noktası 3BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) IVZ verisi, (c) DES verisi, (d) Vs-derinlik profili, (e) Vp-derinlik profili, (f) ρ -derinlik profili.

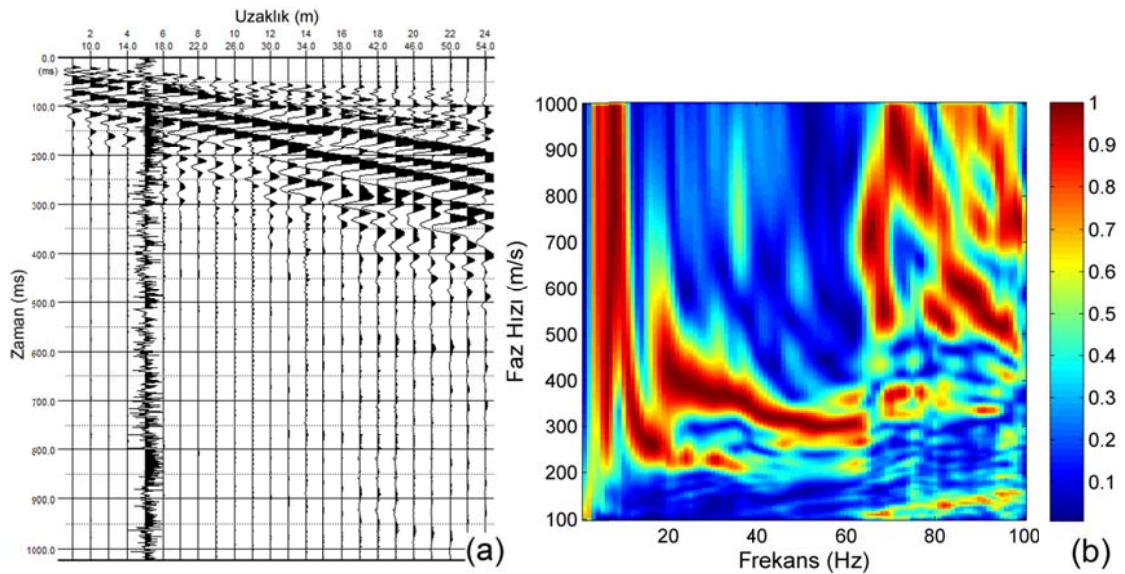
Tablo 2.13. Moloz noktası 3BÇ sonucu detayları

Tabaka No	h (m)			ρ (ohm*m)		
	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	2,9	0,6	0,01	20	6	0,11
2	5,7	4,24	0,05	80	142	2,63
3	5,0	2,1	0,05	20	13	4,36
4	∞	∞		10	6	0,26

Tabaka No	Vs (m/s)			Vp (m/s)		
	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	180	66	7,38	358	132	2,05
2	184	173	0,36	500	640	3,68
3	269	168	1,17	500	515	93,41
4	324	270	2,21	850	844	93,68

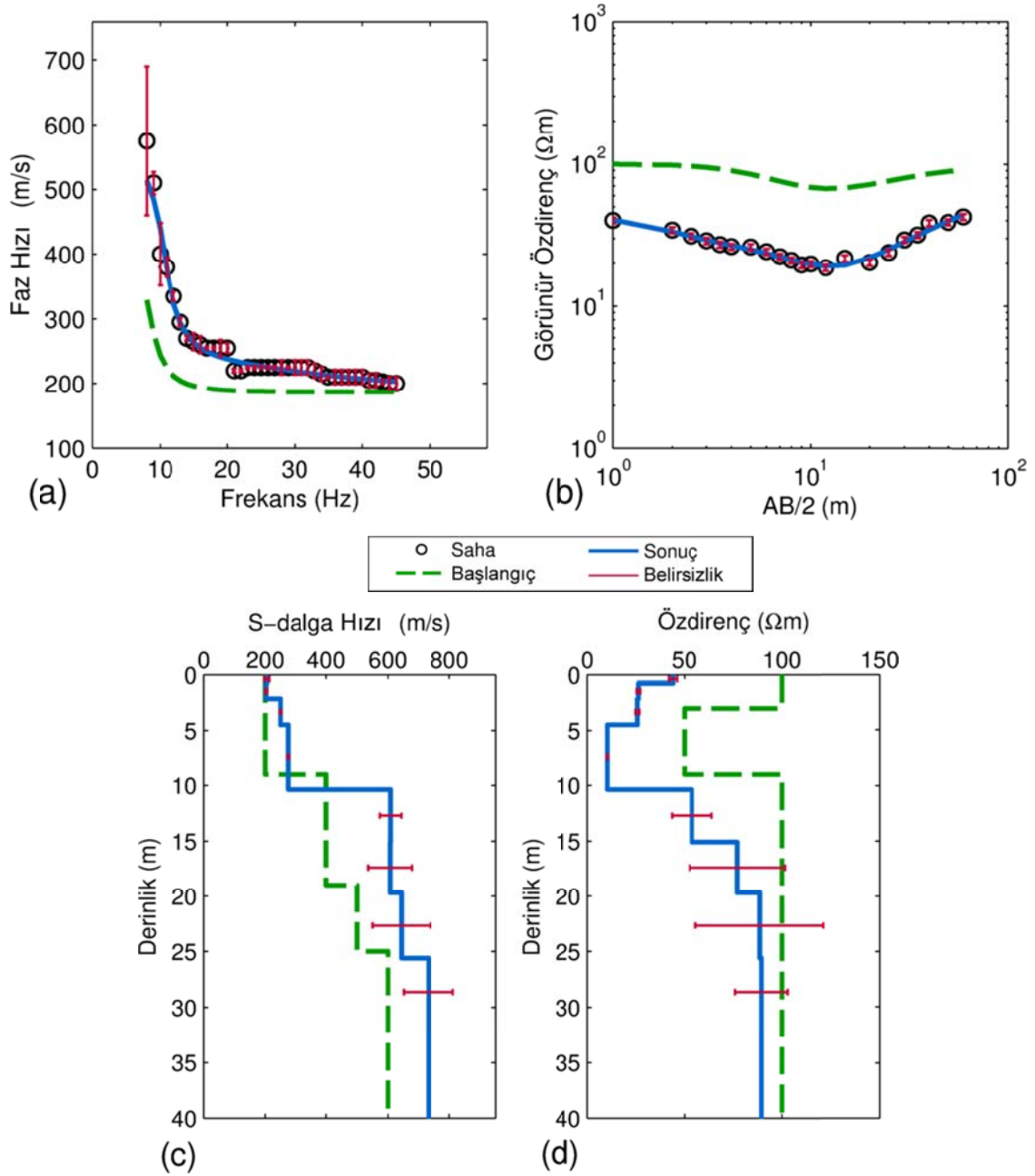
İterasyon	12
Hata (%)	6

Her ne kadar Bostancı II ve Moloz noktası için yapılan birleşik çözümlerde giriş modeline olan bağımlılığın indirgendiği görülse de bu çalışmada kullanılan ters çözüm yaklaşımı lokal minimum aramaya odaklı bir algoritmadır ve bu yaklaşımın en temel dezavantajı giriş modeline olan bağımlılığıdır. Bu bağımlılık kimi durumlarda çözümü çok çözümlülük tuzağına sürükler. Birleşik çözüm yaklaşımı bu sorunu tamamen ortadan kaldıramayabilir. Ancak, bu tuzağına düştüğünün belirtilerini tekil çözümlerden daha net ortaya koyma imkânı sunar. Bu yargıyı Bahçecik noktası için elde edilen çözümlerden doğrulamak mümkündür.



Şekil 2.37. (a) Bahçecik noktası için elde edilen yüzey dalgası verisi, (b) veriye ait c-f görüntüsü

Bahçecik noktası için elde edilen 2BÇ sonuçları Şekil 2.38 ve Tablo 2.14' te gösterilmiştir. Şekil 2.38' de derinlik-öz direnç kesitindeki bazı yüksek belirsizlik değerleri dışında, ki logaritmik değişimler gösteren bir yöntem için kabul edilebilir aralıktadır, çözüm kabul edilebilir bir yaklaşım sağlamıştır. Ancak, Tablo 2.14' teki tabaka kalınlıklarına ait belirsizlik değerlerine bakıldığında yarı sonsuz ortam üzerindeki son üç tabakaya ait kalınlık değerlerinin yüksek belirsizliğe sahip olduğu görülmektedir. Dolayısıyla bu tabakalara ait parametrelerin duyarlılık değerleri düşüktür ve fiziksel anlamlarından çok matematiksel anlam taşımaktadırlar.



Şekil 2.38. Bahçecik noktası giriş 2BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) DES verisi, (c) V_s -derinlik profili, (d) ρ -derinlik profili

Birleşik ters çözümünün bize sağladığı bu uyarı ışığında daha sık bir giriş modeli ile çözüm tekrarlandığında tabaka kalınlığı belirsizliklerinin daha güvenilir değerlere indiği ve diğer parametrelerdeki belirsizliklerin de düştüğü görülmektedir (Şekil 2.39 ve Tablo 2.15). Sürece ilk varış verilerinin dâhil edilmesi ise yine tabaka kalınlığı bilgisinde küçük düzeltmeler meydana getirmiş, bu düzeltmeler sayesinde de tüm parametrelerdeki belirsizliklerin (özellikle daha derin tabakalarda) düştüğü görülmüştür (Şekil 2.40 ve Tablo 2.16).

Tablo 2.14. Bahçecik noktası 2BÇ sonucu detayları

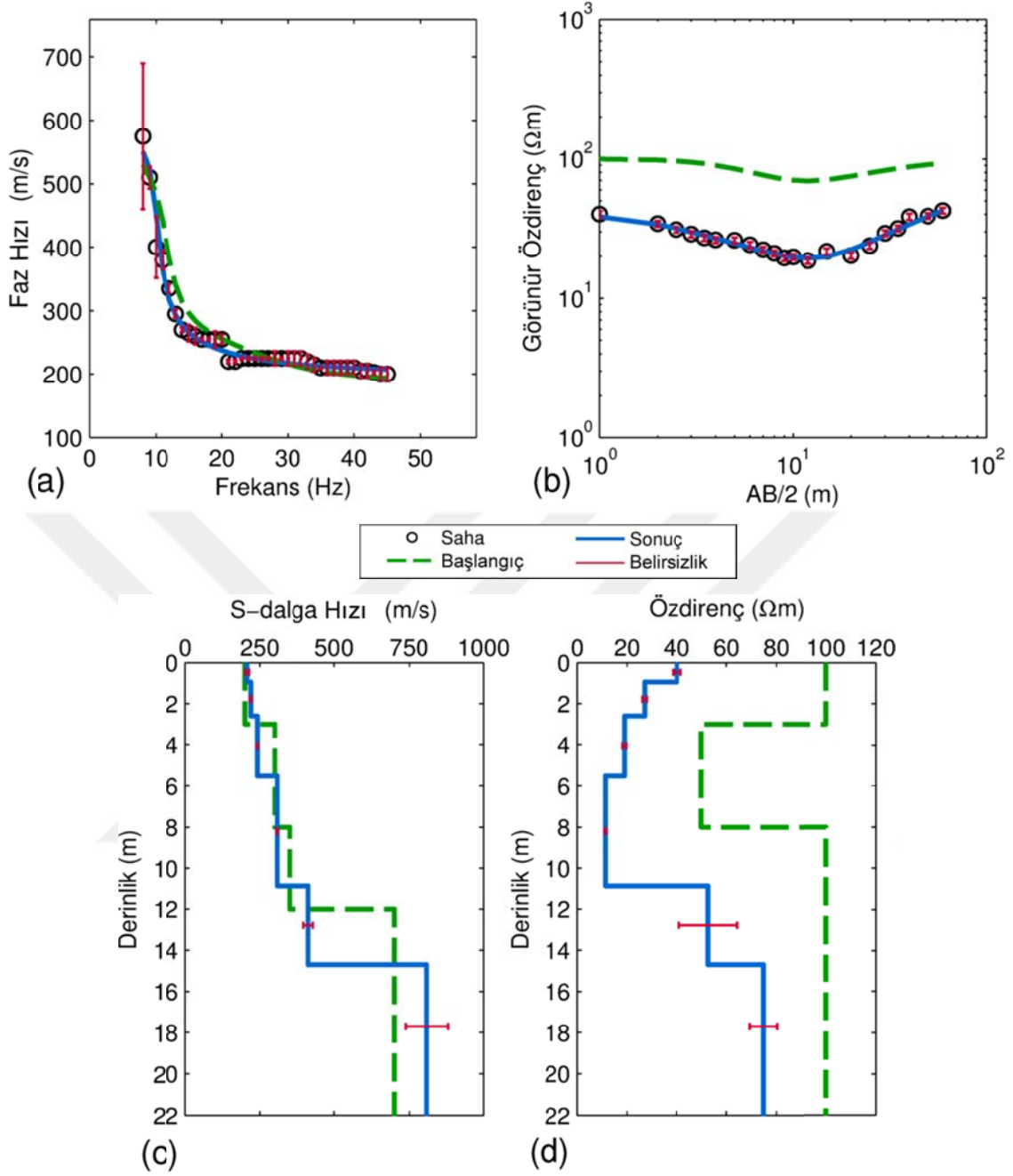
Tabaka No	h (m)			Vs (m/s)			ρ (ohm*m)		
	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	1	0,8	0,03	200	205	8,55	100	44	2,10
2	2	1,4	0,04	200	203	2,76	100	26	0,95
3	2	2,3	0,07	200	250	1,79	50	26	1,02
4	4	5,9	0,10	200	275	1,45	50	10	0,31
5	5	4,7	2,15	400	608	34,91	100	54	10,26
6	5	4,6	4,02	400	607	70,71	100	77	24,36
7	6	5,9	7,44	500	644	93,99	100	89	32,77
8	∞	∞		600	732	80,06	100	89	13,39

İterasyon	12
Hata (%)	4

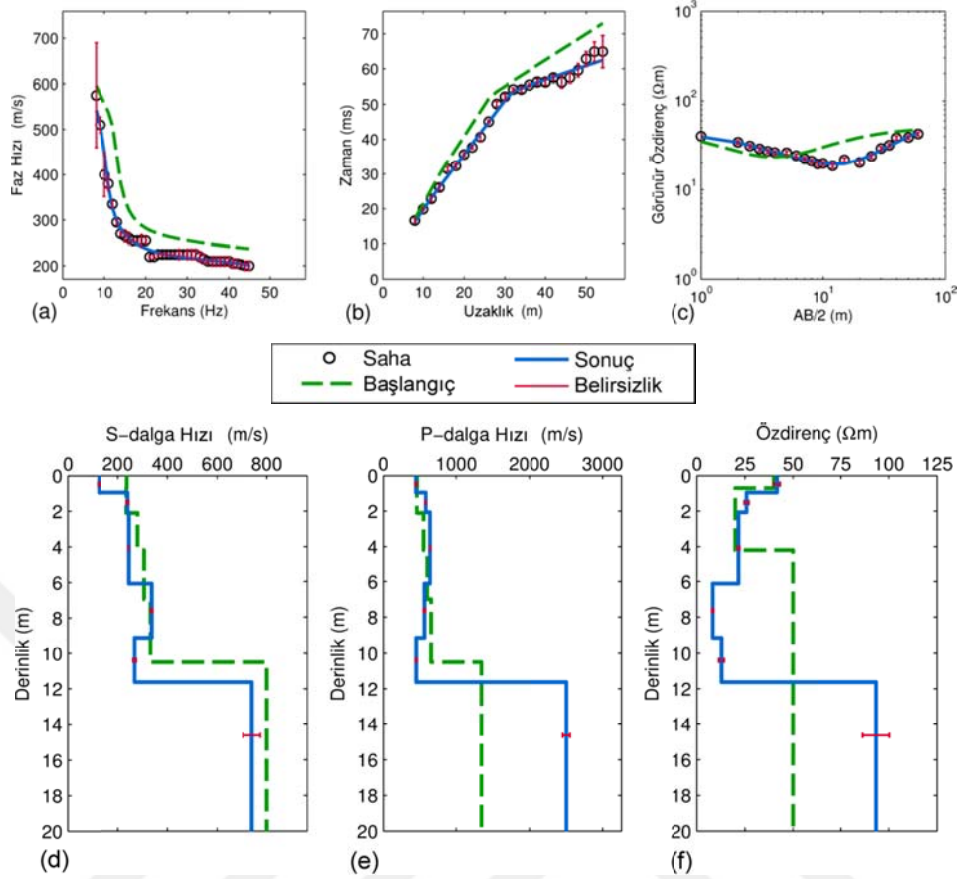
Tablo 2.15. Bahçecik noktası için daha sık bir giriş modeli kullanılarak elde edilen 2BÇ sonucu detayları

Tabaka No	h (m)			Vs (m/s)			ρ (ohm*m)		
	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	1,0	0,9	0,04	200	208	6,73	100	40	1,61
2	2,0	1,7	0,05	200	220	2,32	100	27	0,93
3	2,0	2,9	0,07	300	242	1,40	50	19	0,80
4	3,0	5,4	0,15	300	308	2,45	50	11	0,43
5	4,0	3,8	0,46	350	414	16,12	100	53	11,62
6	∞	∞		700	810	72,36	100	75	5,47

İterasyon	7
Hata (%)	4



Şekil 2.39. Bahçecik noktası için daha sık bir giriş modeli kullanılarak elde edilen 2BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) DES verisi, (c) Vs-derinlik profili, (d) ρ -derinlik profili



Şekil 2.40. Bahçecik noktası 3BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) IVZ verisi, (c) DES verisi, (d) Vs-derinlik profili, (e) Vp-derinlik profili, (f) ρ -derinlik profili.

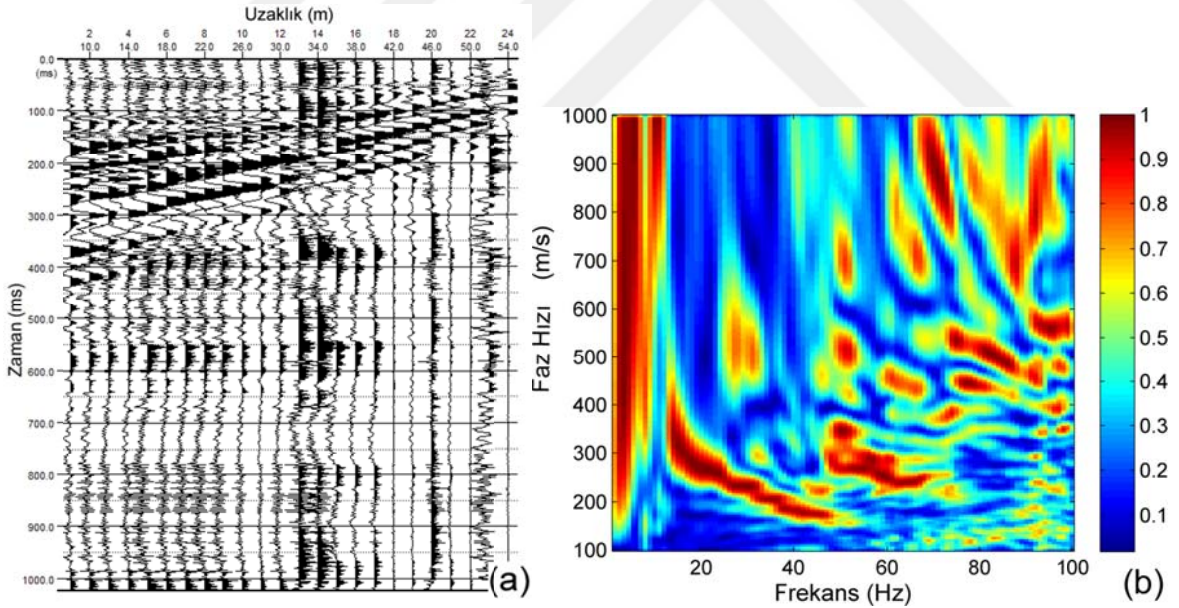
Tablo 2.16. Bahçecik noktası 3BÇ sonucu detayları

Tabaka No	h (m)			ρ (ohm*m)		
	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	0,7	1,0	0,02	40	42	1,63
2	1,4	1,1	0,04	20	26	1,20
3	2,1	4,0	0,05	20	22	0,63
4	2,8	3,0	0,07	50	8	0,43
5	3,5	2,5	0,05	50	13	1,42
6	∞	∞		50	93	6,94

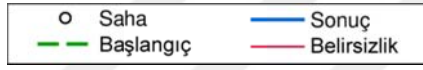
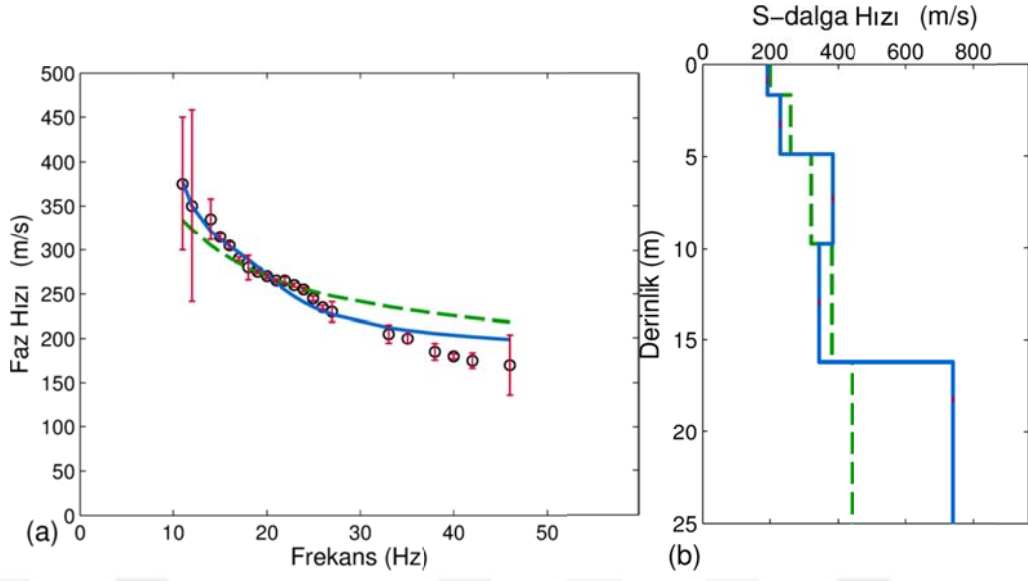
Tabaka No	Vs (m/s)			Vp (m/s)		
	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	236	125	4,46	469	454	11,63
2	235	239	4,98	467	588	6,17
3	280	245	0,94	557	645	4,32
4	306	337	3,94	607	571	13,01
5	332	268	6,10	660	459	9,69
6	800	740	34,87	1343	2505	50,37

İterasyon	13
Hata (%)	4

Yukarıda verilen örneklerde, tekil çözümlerde dalga boyu-derinlik ilişkisinin doğru kestirilmesinin önemi görülmektedir. Ancak, bu ilişkinin doğru kestirimi de her zaman iyi bir yaklaşım elde edilebileceğinin garantisini vermez. Çünkü burada çözümü bulunmaya çalışılan problem, yani Rayleigh yüzey dalgası hızı ve yer değiştirmesi olayı, yüksek derecede doğrusal olmayan karakterdedir dolayısıyla çözümün başarısı da bu kapsamda düşünülmelidir. Yalncak ölçüm noktası için yapılan çözümlerin karşılaştırılması bahsedilen probleme iyi bir örnek olacaktır. Yalncak noktası için yapılan çözümlerde model derinlikleri tekil ve 2BÇ için 16m iken 3BÇ için 15.5m' dir, yani giriş modelleri toplam derinlikleri açısından önemli bir fark yoktur ve tabaka kalınlık değişimleri benzerdir. Ancak, tekil çözümde 29 iterasyona rağmen güvenilir bir yaklaşım elde edilemezken (Şekil 2.42), 2BÇ' de 16 iterasyonda (Şekil 2.43 ve Tablo 2.17), 3BÇ' de ise 7 iterasyonda (Şekil 2.44 ve Tablo 2.18) daha iyi yaklaşımlar elde edilmiştir. Bununla beraber, 2BÇ' deki yarı-sonsuz tabakaya ait belirsizlik 3BÇ' de daha kabul edilebilir bir noktaya çekilmiştir.



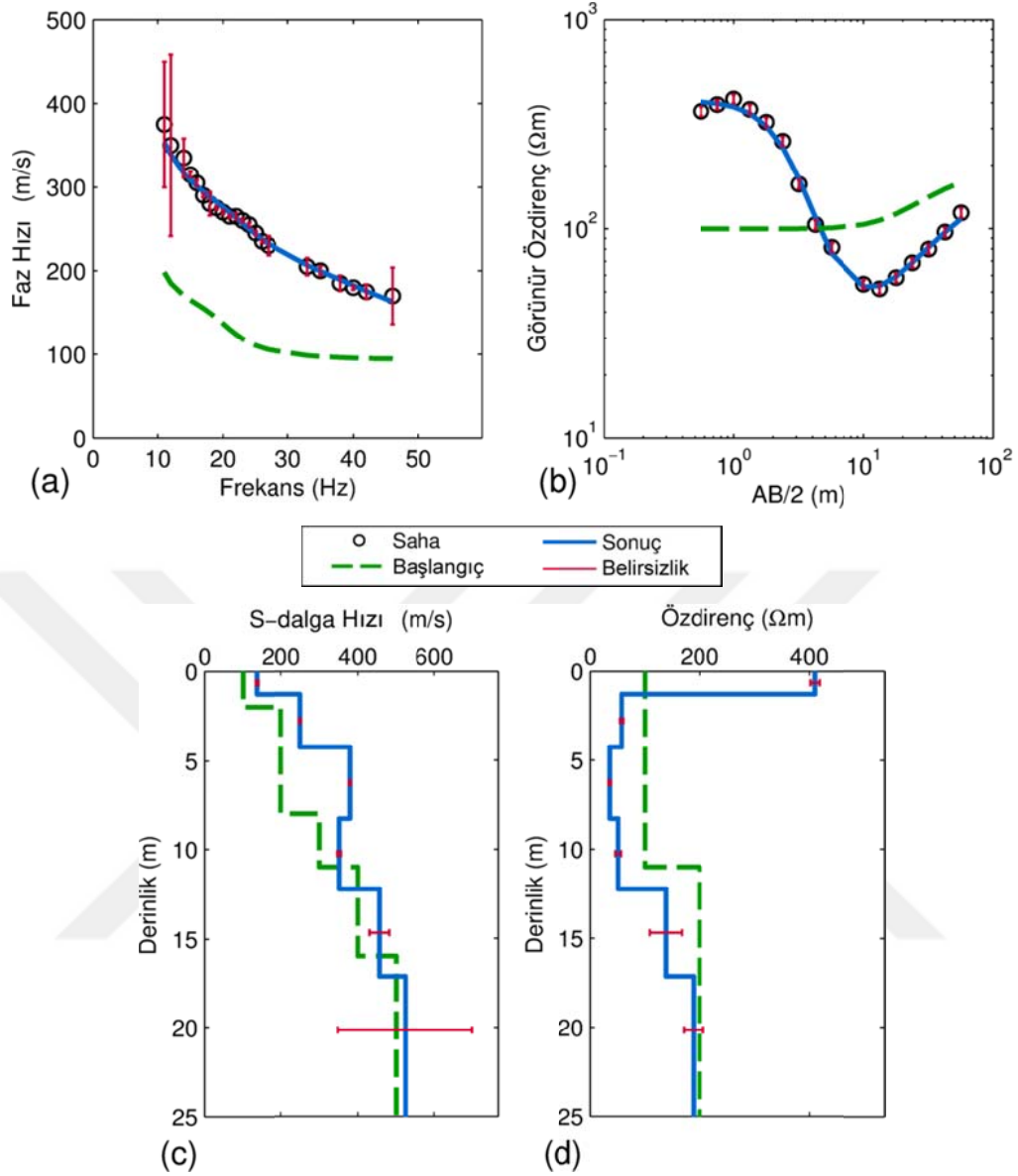
Şekil 2.41. (a) Yalncak noktası için elde edilen yüzey dalgası verisi, (b) veriye ait c-f görüntüsü



Tabaka No	h (m)	Vs (m/s)		
		Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	1,6	200	193	0,001
2	3,2	260	230	0,001
3	4,9	321	383	0,001
4	6,5	381	344	0,001
5	∞	441	740	0,001

İterasyon	29
Hata (%)	6,7

Şekil 2.42. (a) Yalıncağ RD eğrisinin tekil ters çözümü, (b) Vs-derinlik profili

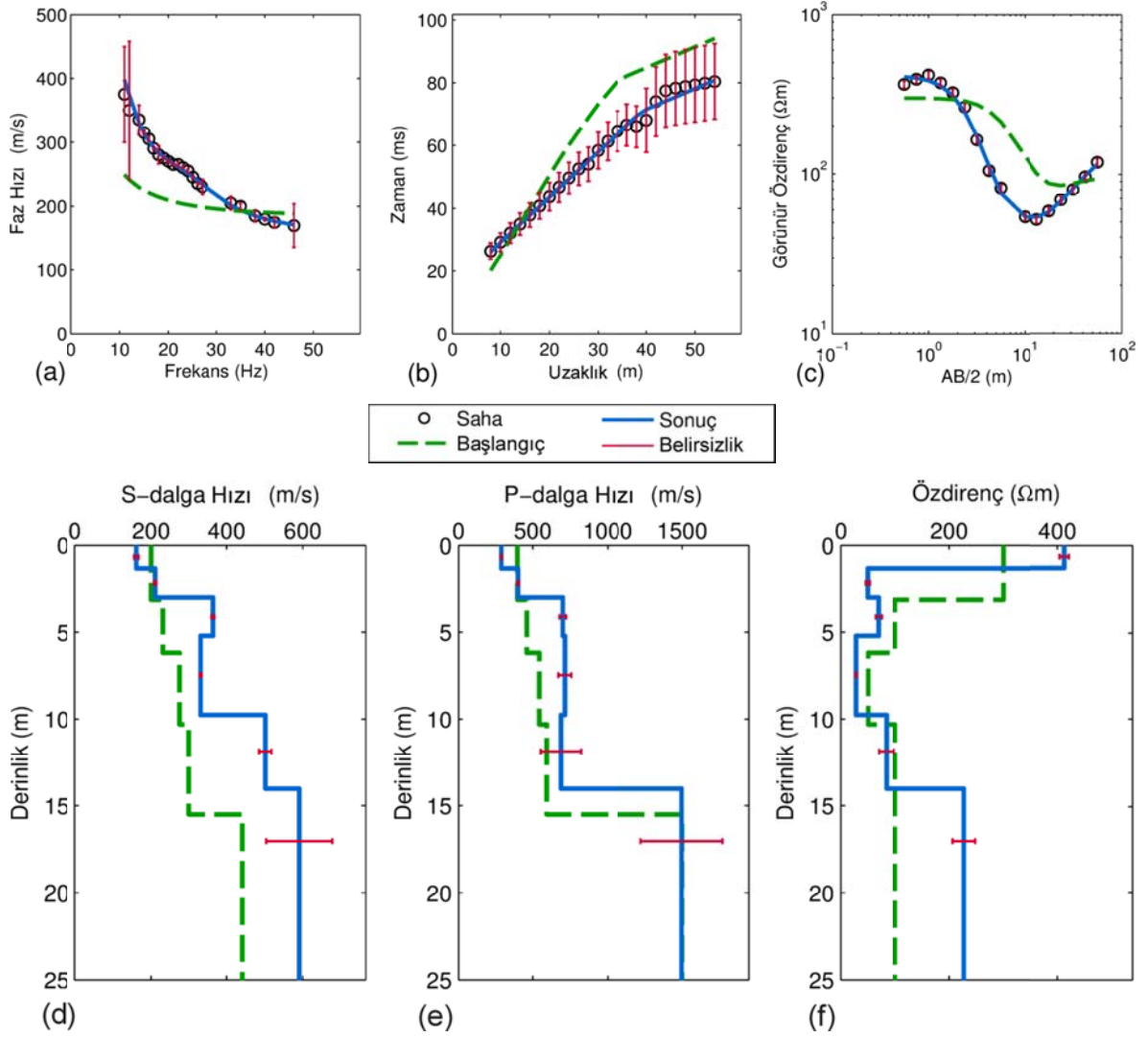


Şekil 2.43. Yalıncaık noktası 2BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) DES verisi, (c) V_s -derinlik profili, (d) ρ -derinlik profili

Tablo 2.17. Yalıncaık noktası 2BÇ sonucu detayları

Tabaka No	h (m)			V_s (m/s)			ρ (ohm*m)		
	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	2,0	1,3	0,01	100	136	3,64	100	410	8,37
2	3,0	3,0	0,03	200	250	1,72	100	58	2,81
3	3,0	4,0	0,32	200	379	2,44	100	36	1,92
4	3,0	4,0	0,33	300	352	4,73	100	51	5,27
5	5,0	4,9	3,39	400	456	25,75	200	138	29,30
6	∞	∞		500	524	175,49	200	189	17,88

İterasyon	16
Hata (%)	4



Şekil 2.44. Yalıncağ noktası 3BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) IVZ verisi, (c) DES verisi, (d) V_s -derinlik profili, (e) V_p -derinlik profili, (f) ρ -derinlik profili.

Tablo 2.18. Yalıncağ noktası 3BÇ sonucu detayları

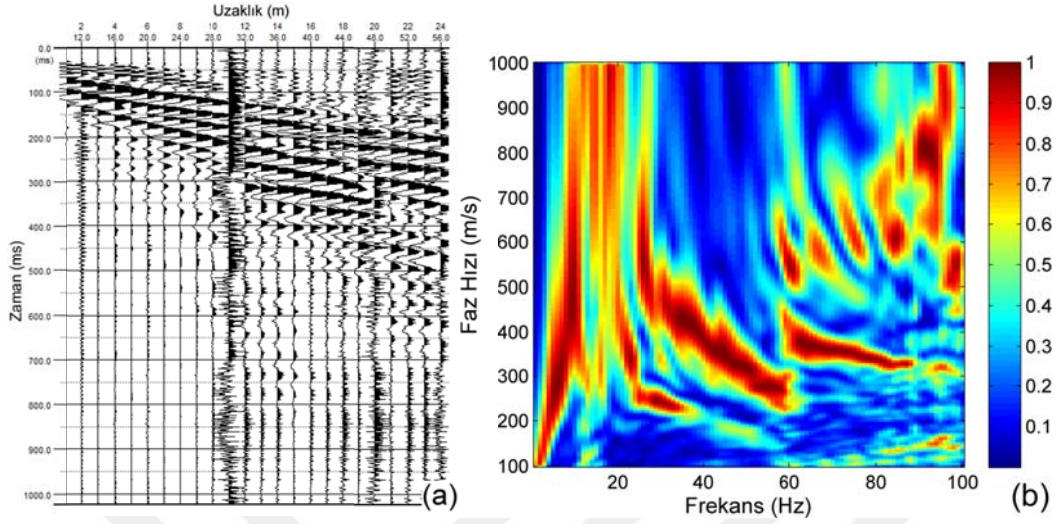
Tabaka No	h (m)			ρ (ohm*m)		
	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	1	1.3	0.01	300	413	8.29
2	2.1	1.7	0.02	300	49	3.71
3	3.1	2.2	0.16	100	69	5.56
4	4.1	4.5	0.11	50	28	1.29
5	5.2	4.3	0.78	100	84	14.07
6	∞	∞		100	227	20.75

Tabaka No	Vs (m/s)			Vp (m/s)		
	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	200	161	6.08	397	290	4.00
2	200	210	3.11	397	401	4.63
3	231	364	4.18	459	699	21.65
4	274	329	1.90	543	713	43.20
5	298	502	16.29	592	687	134.75
6	441	590	86.82	1500	1495	272.33

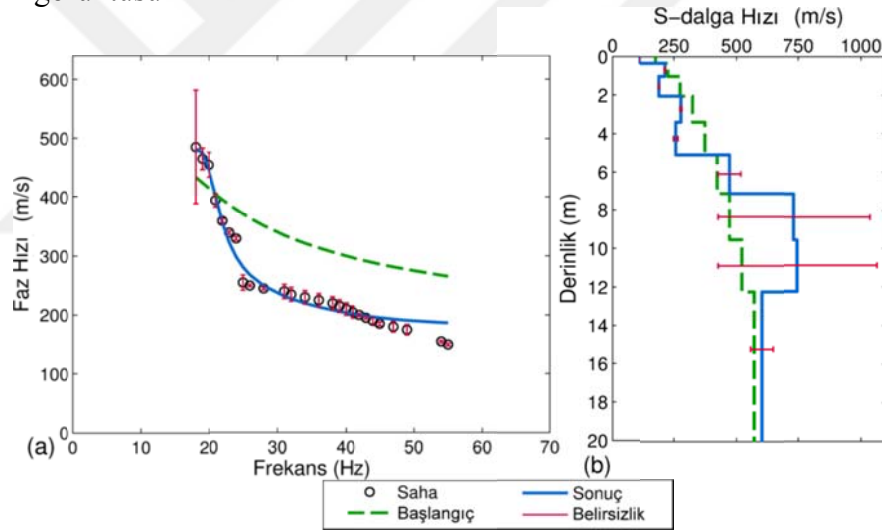
İterasyon	7
Hata (%)	3

RD verilerinin geleneksel ters çözümünde tabaka kalınlıkları genellikle derinlikle artacak şekilde ya da eşit kalınlıklarla temsil edilir. Ancak iyi bilinmektedir ki gerçek yer altı koşulları, özellikle sığ çalışmalar açısından, her zaman böyle değildir. Sentetik denemelerde bahsedilen yüksek ve düşük hızlı ara tabaka problemleri gerçek koşullarda sıklıkla görülmektedir. Mehmet Akif Ersoy (MAE) ölçüm noktası yüzey dalgası verilerinden (Şekil 2.45) elde edilen RD verisi ters çözümleri bunu desteklemektedir. MAE noktası için yapılan tüm çözümlerde toplam araştırma derinliği yaklaşık olarak aynıdır. Artan ve sabit tabaka kalınlığı ile yapılan 2 farklı tekil çözümde 29 iterasyona rağmen elde edilen yaklaşımlar yeterli değildir (Şekil 2.46 ve Şekil 2.47). 2BÇ' de ise 18 iterasyonda %3 lük bir hata payı ile RD verisine iyi bir yaklaşım elde edilirken (Şekil 2.48), son üç tabakaya ait model parametrelerindeki belirsizlik değerlerinin yüksekliği dikkat çekmektedir (Tablo 2.19). Ancak, çözüme ilk varış verilerinin dâhil edilmesi bu belirsizlikleri azaltmıştır (Şekil 2.49 ve Tablo 2.20), özellikle son üç tabakaya ait öz direnç ve yarı-sonsuz tabaka üzerindeki kalınlık değerleri belirsizliklerinde azalma görülmektedir. Hem 2BÇ hem de 3BÇ' de dikkat çekmek istenilen nokta, tabaka kalınlıklarının belirli bir düzen içerisinde değil, verinin ihtiyacı yönünde, kimi zaman daha ince kimi zaman daha kalın yapı göstermesidir (Tablo 2.19 ve Tablo 2.20' deki tabaka kalınlığı sütunları).

Böylece, birleşik ters çözümün bize sunduğu bu avantaj gerçek yer altı koşullarında var olan düzensiz süreksizliklerinin ortaya çıkarılmasını daha mümkün kılar.



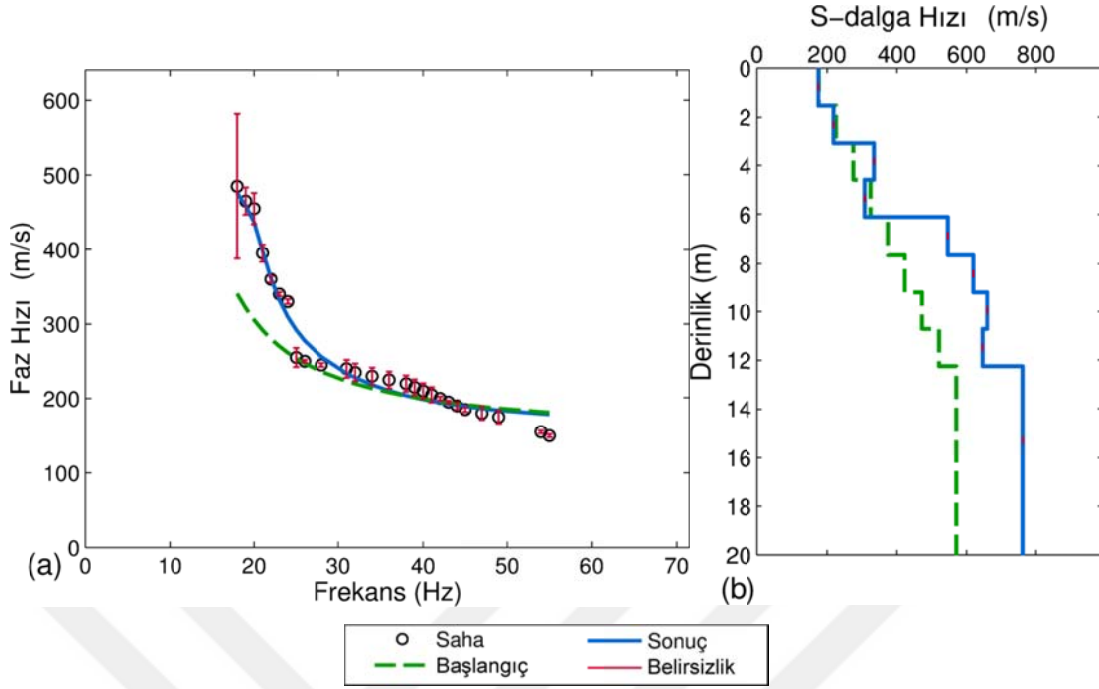
Şekil 2.45. (a) MAE noktası için elde edilen yüzey dalgası verisi, (b) veriye ait c-f görüntüsü



Tabaka No	h (m)	Vs (m/s)		
		Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	0,3	177	112	0,17
2	0,7	226	214	2,48
3	1,0	275	190	1,17
4	1,4	324	278	4,07
5	1,7	374	258	8,82
6	2,0	423	472	45,23
7	2,4	472	731	304,90
8	2,7	521	745	318,65
9	∞	571	602	45,19

İterasyon	29
Hata (%)	7,9

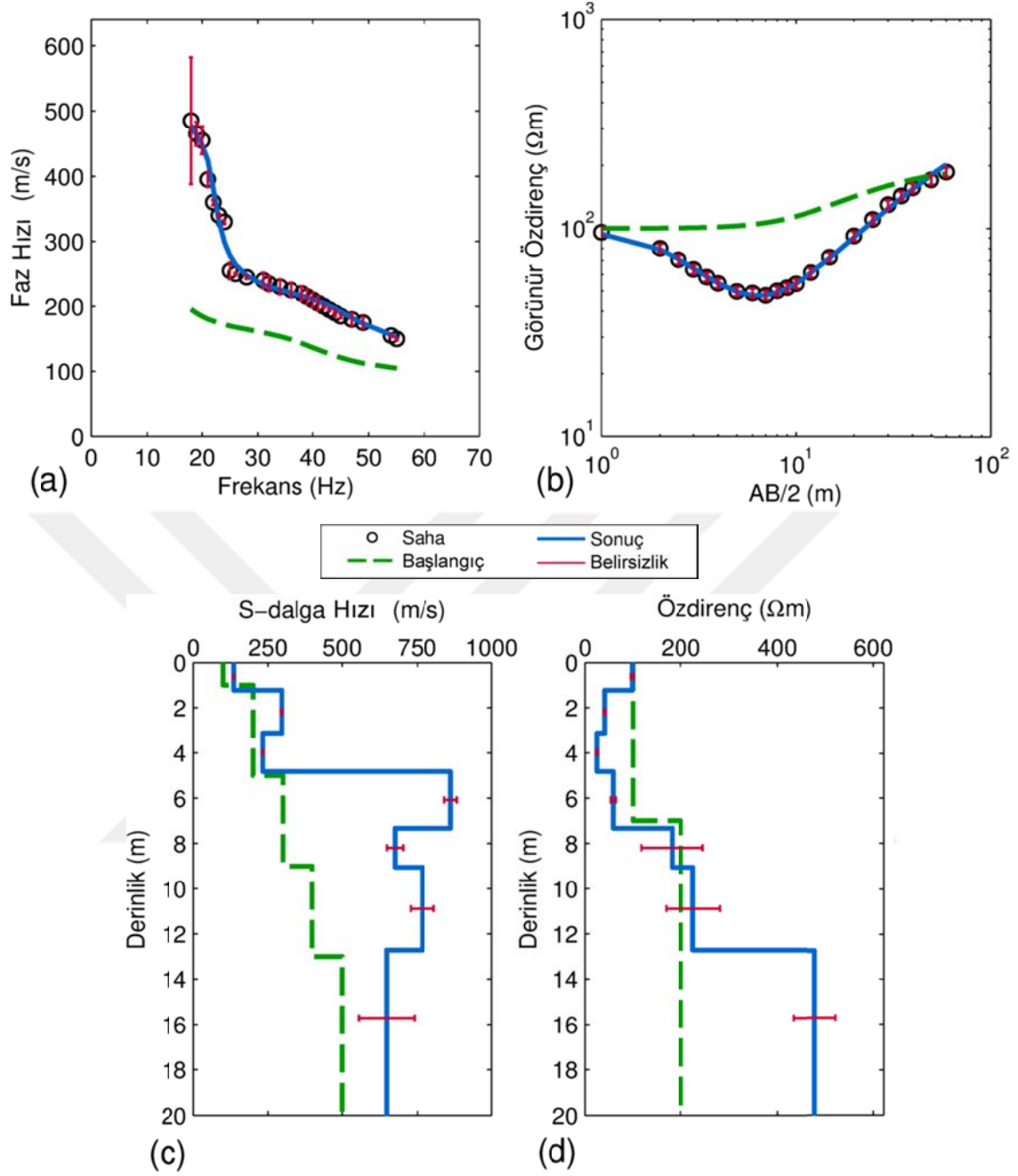
Şekil 2.46. (a) MAE noktası RD eğrisinin derinlikle tabaka kalınlığı artan giriş modeli ile tekil ters çözümü, (b) Vs-derinlik profili



Tabaka No	h (m)	Vs (m/s)		
		Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	1,5	177	175	0,001
2	1,5	226	219	0,001
3	1,5	275	334	0,001
4	1,5	324	307	0,001
5	1,5	374	546	0,001
6	1,5	423	619	0,001
7	1,5	472	659	0,001
8	1,5	521	646	0,001
9	∞	571	761	0,001

İterasyon	29
Hata (%)	7,1

Şekil 2.47. (a) MAE noktası RD eğrisinin sabit tabaka kalınlığına sahip giriş modeli ile tekil ters çözümü, (b) Vs-derinlik profili

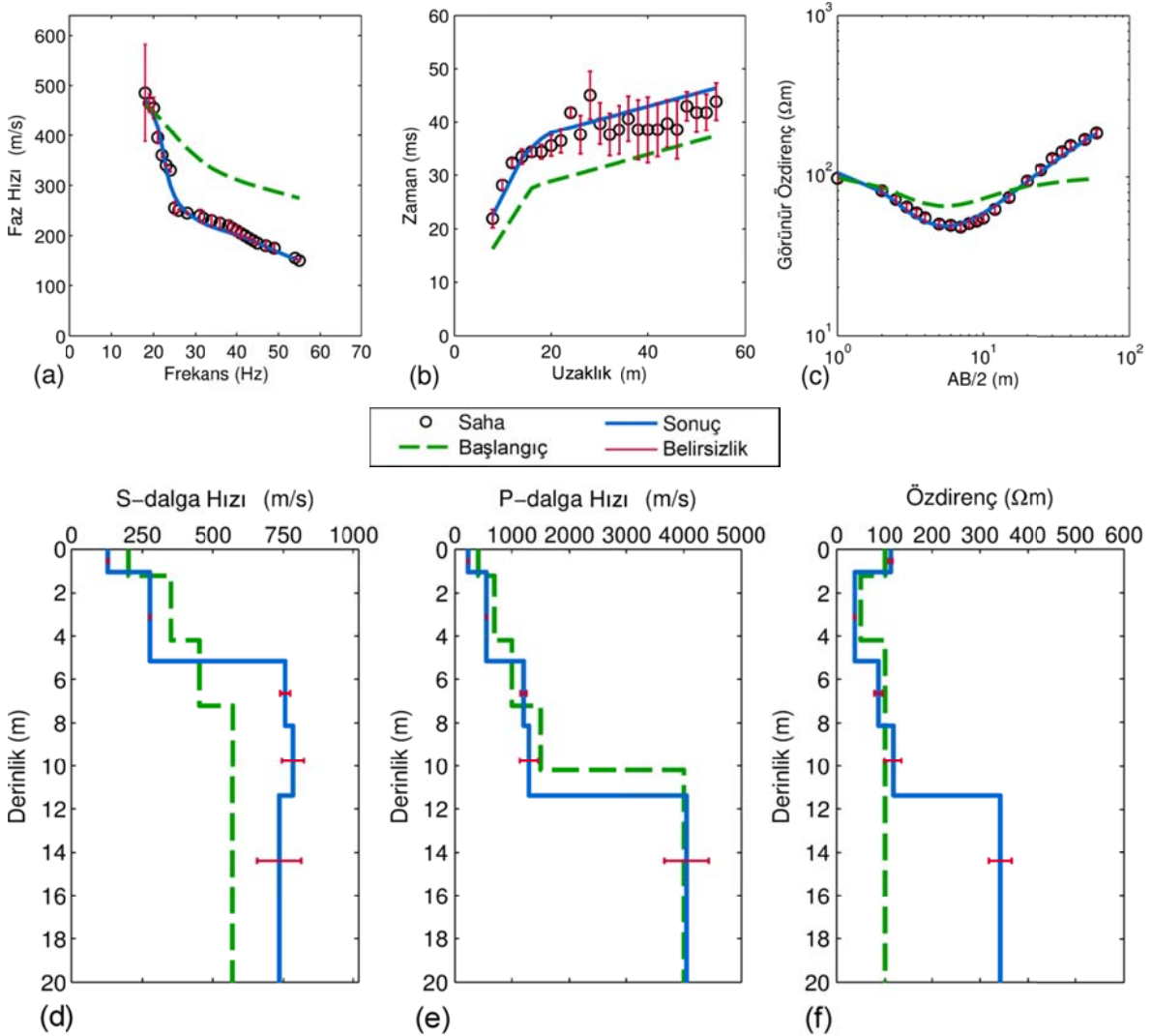


Şekil 2.48. MAE noktası 2BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) DES verisi, (c) Vs-derinlik profili, (d) ρ -derinlik profili

Tablo 2.19. MAE noktası 2BÇ sonucu detayları

Tabaka No	h (m)			Vs (m/s)			ρ (ohm*m)		
	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	1,0	1,2	0,01	100	136	0,88	100	98	3,19
2	2,0	1,9	0,01	200	296	2,34	100	41	1,45
3	2,0	1,7	0,01	200	233	1,07	100	25	1,13
4	2,0	2,5	0,18	300	863	21,17	100	59	4,82
5	2,0	1,7	0,73	300	676	27,14	200	181	64,04
6	4,0	3,7	1,29	400	768	39,19	200	225	56,24
7	∞	∞		500	648	92,48	200	478	43,90

İterasyon	18
Hata (%)	3

Şekil 2.49. MAE noktası 3BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) IVZ verisi, (c) DES verisi, (d) Vs-derinlik profili, (e) Vp-derinlik profili, (f) ρ -derinlik profili.

Tablo 2.20. MAE noktası 3BÇ sonucu detayları

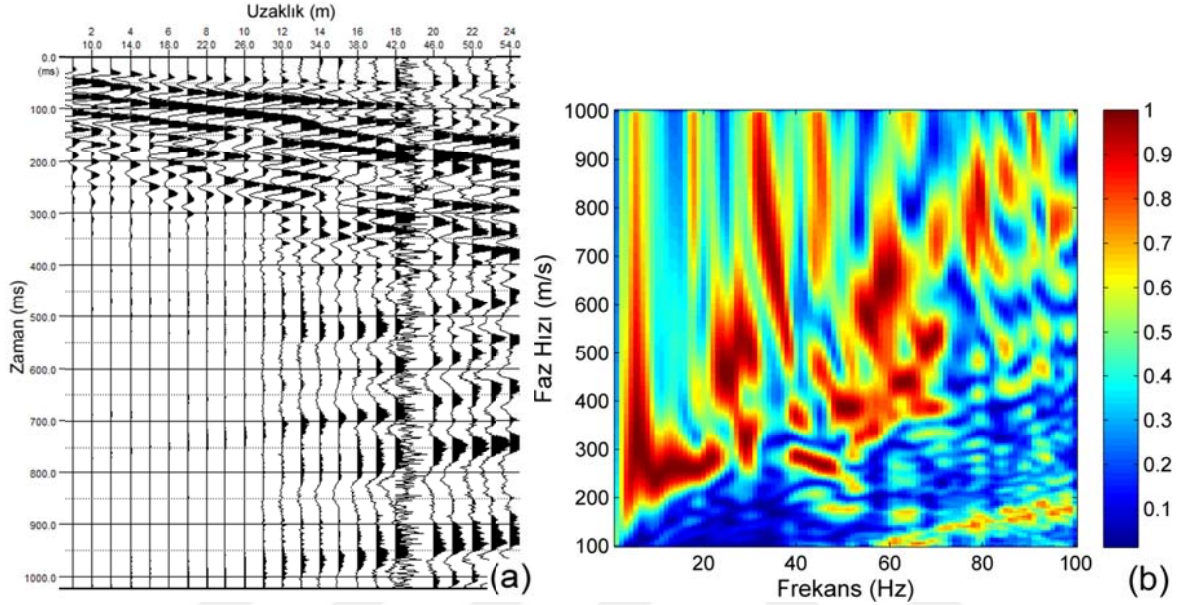
Tabaka No	h (m)			ρ (ohm*m)		
	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	1,2	1,0	0,00	100	112	3,88
2	3	4,1	0,02	50	38	0,73
3	3	3,0	0,29	100	87	8,25
4	3	3,3	0,36	100	117	18,39
5	∞	∞		100	342	23,77

Tabaka No	Vs (m/s)			Vp (m/s)		
	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	200	128	1,50	403	228	1,51
2	350	276	1,11	700	562	2,24
3	450	757	17,75	1000	1204	54,64
4	571	784	38,64	1500	1298	157,93
5	570	735	78,12	4000	4048	385,49

İterasyon	8
Hata (%)	6

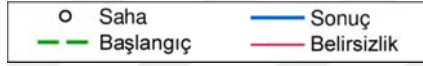
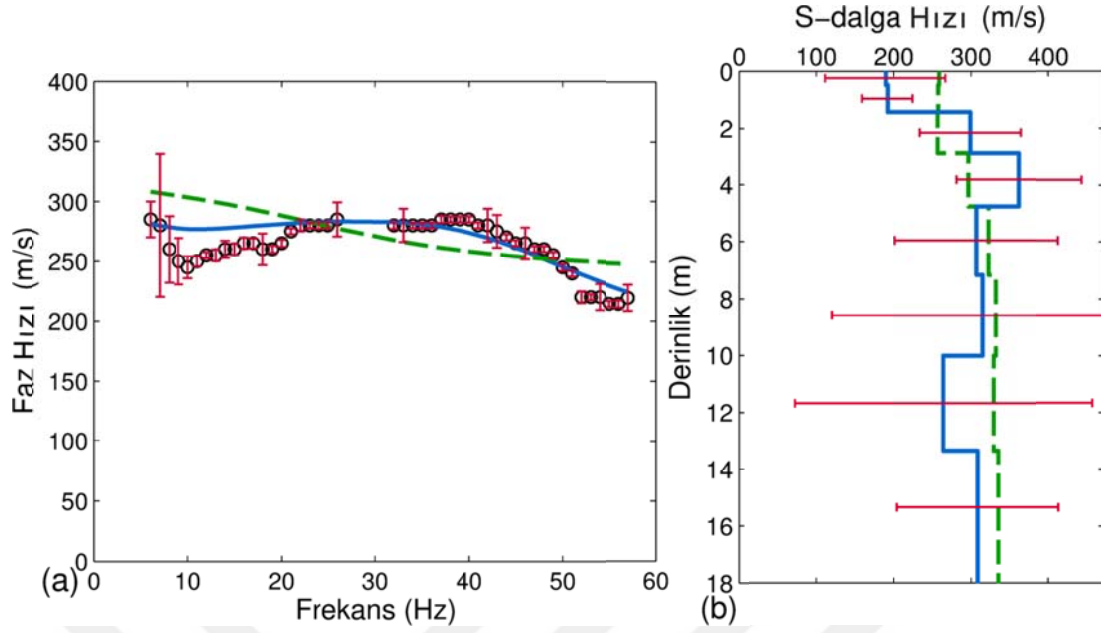
Beşirli Sahil noktası yakın geçmişe kadar kumsal olduğu bilinen ve çok güncel bir zamanda Karadeniz Sahil Yolu projesi kapsamında doldurulmuş bir alandır. Bölgede yapılan dolgular genelde çevreden alınan büyük boyutlu kayalar/kayaların sığ denize dökülmesi ve daha sonra yine çevreden toplanan toprak zeminle kapatılması şeklindedir. Doldurma süreci sırasında genelde sabırlı davranılmaması nedeniyle deniz suyunun zamanla dolgu alanına nüfuz ettiği ve yol üzerinde yer yer oturmalar-çökmelere neden olduğu bilinmektedir. Ölçüm noktası yolun yaklaşık 2m dışında, trafiğe çok yakın bir noktadır. Toplanan yüzey dalgası verilerinden elde edilen RD eğrisi, beklenildiği gibi derin bölgeleri temsil eden düşük frekans bölgesinde hız düşmesi gösterirken, ters dispersif yapıdadır (Şekil 2.50), görünür özdirenç eğrisi ise nemli ortamları temsil eder bir karakter göstermiştir. Bu tip RD eğrileri, tekil çözümler bakımından çözülmesi en zor problem olarak tanımlanmaktadır. Çünkü RD verilerinin modellenmesi sırasında çözülmeye çalışılan Denklem (60)' ın kökleri bu tip durumlarda karmaşık sayılara doğru yönelir ve bu köklerin gerçel c-f ekseninde gösterimi yoktur. Dolayısıyla, kimi zaman tekil çözümler bu tip durumlara kabul edilebilir yaklaşımlar elde edemeyebilir. Nitekim, bu noktaya ait RD verisinin tekil çözümü de 8 tabakadan az giriş modelleri için elde edilememiş, 8 tabakalı tabakalı giriş modeli için elde edilen yaklaşım ise Şekil 2.51' de gösterilmiştir. Ancak yapay veri denemelerinde de belirtildiği gibi fazla tabakalı giriş

modelleri genelde aşırı parametreleme problemi oluştururlar. Bu durumda, daha iyi bir matematiksel yaklaşım elde etmek adına ters çözüm akışı her model parametresini gereğinden fazla arttırıp-azaltabilir ve model parametrelerinin belirsizliğinin yüksek olma ihtimalini ortaya çıkartır. Beşirli Sahil verisinin tekil çözümünde de bu sorunla karşılaşmıştır.



Şekil 2.50. (a) Beşirli Sahil noktası için elde edilen yüzey dalgası verisi, (b) veriye ait c-f görüntüsü

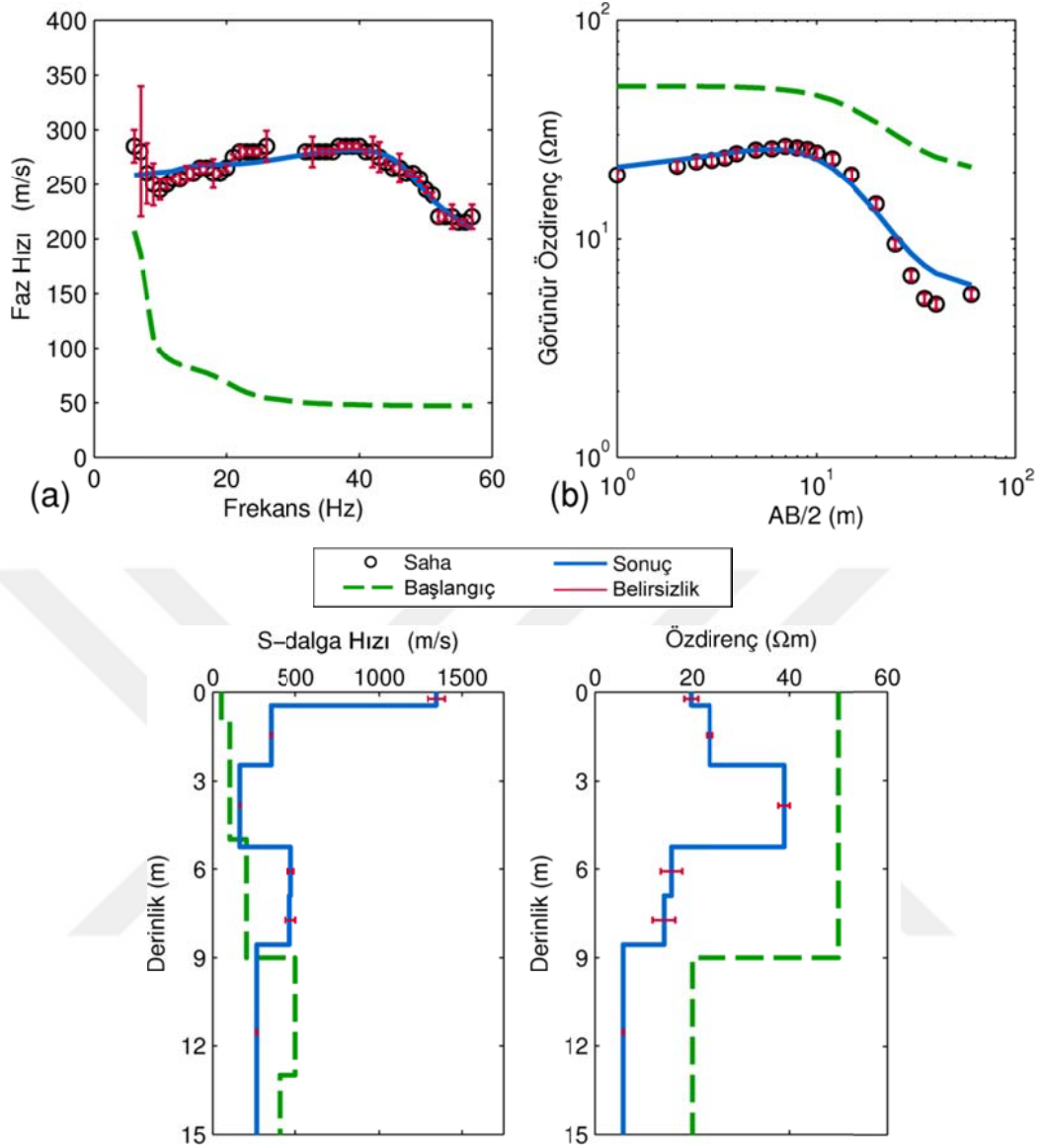
2BÇ ile daha az tabaka sayısı ile elde edilen 1B lu derinlik profillerine bakıldığında ise, ilk tabakaya ait V_s değeri dışında, bilinen jeolojik koşullar dâhilinde iyi yaklaşımlar elde edildiği görülmektedir (Şekil 2.52, Tablo 2.21). Çalışma noktasına ait jeolojik ön bilgiler ışığında, ilk tabakaya ait V_s değerinin, veriye uygun bir yaklaşım elde edilmesi için çözüm tarafından türetilen “matematiksel” bir değer olduğu ve fiziksel bir anlamı olmadığı açıktır. Ancak bu anlamsızlık, ölçüm noktasına ait ek bir bilgi olan ilk varışların sürece eklenmesi gerçekleştirilen 3BÇ ile giderilmiş ve ilk tabakaya ait V_s değeri bilinen ön bilgilere daha uygun hale gelmiştir (Şekil 2.53, Tablo 2.22). 2BÇ ile 3BÇ karşılaştırıldığında göze çarpan bir başka nokta ise çözümlerin 5-25 Hz bandındaki davranışdır. 3BÇ’ de toplam derinlik yaklaşık 3m artmış ve bu artış RD verisi üzerinde düşük frekans bandında daha iyi bir yaklaşım elde edilmesini sağlamıştır (Şekil 2.54).



Tabaka No	h (m)	Vs (m/s)		
		Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	0,5	259	189	77,81
2	1,0	258	192	32,95
3	1,4	257	299	65,25
4	1,9	297	362	80,45
5	2,4	323	307	105,26
6	2,9	332	315	194,91
7	3,3	329	264	191,46
8	∞	335	308	104,31

İterasyon	5
Hata (%)	5,2

Şekil 2.51. (a) Beşirli Sahil RD eğrisinin tekil ters çözümü, (b) Vs-derinlik profili

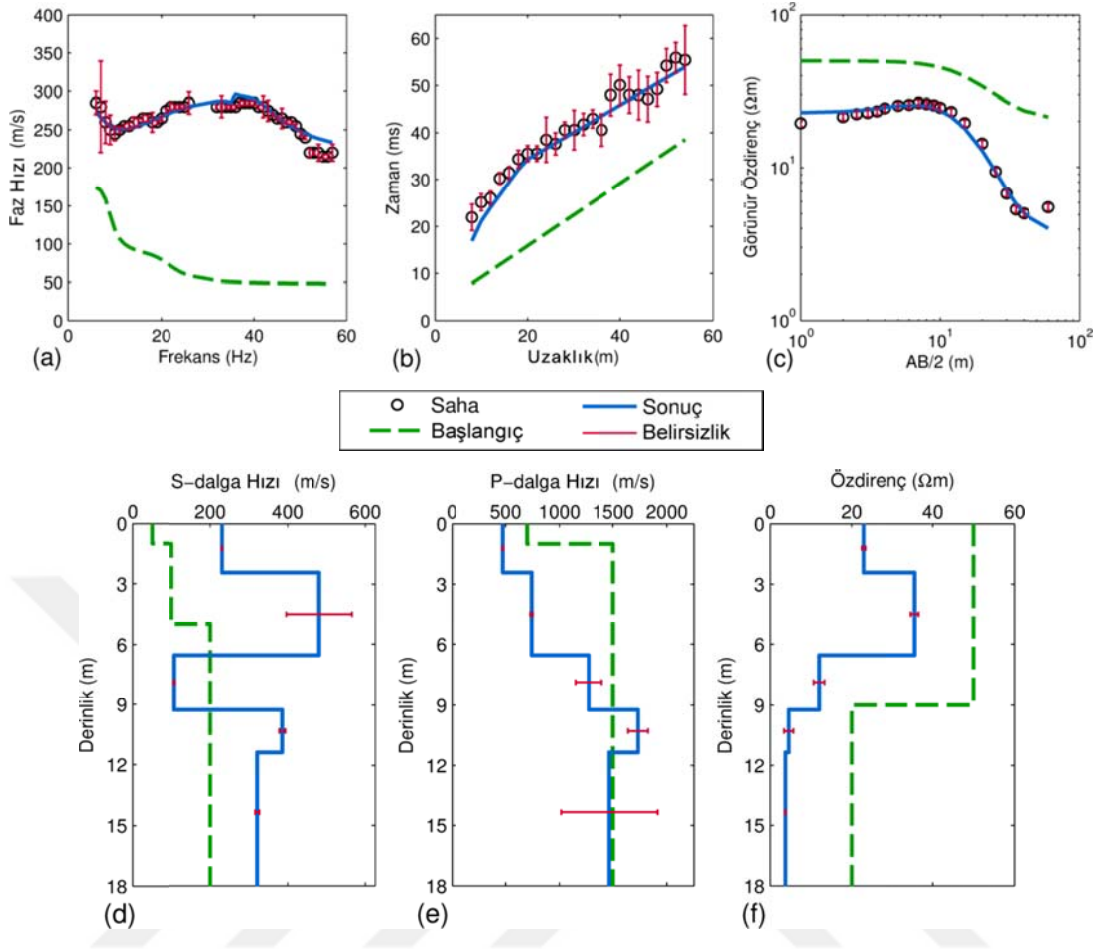


Şekil 2.52. Beşirli Sahil noktası 2BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) DES verisi, (c) Vs-derinlik profili, (d) ρ -derinlik profili

Tablo 2.21. Beşirli Sahil noktası 2BÇ sonucu detayları

Tabaka No	h (m)			Vs (m/s)			ρ ($\text{ohm} \cdot \text{m}$)		
	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	1,0	0,5	0,01	50	1344	52,10	50	20	1,44
2	4,0	2,0	0,05	100	348	1,64	50	24	0,62
3	4,0	2,8	0,01	200	160	0,44	50	39	1,14
4	2,0	1,6	0,14	500	473	17,71	20	16	2,21
5	2,0	1,6	0,15	500	467	34,48	20	14	2,32
6	∞	∞	-	400	261	3,64	20	6	0,14

İterasyon	6
Hata (%)	9



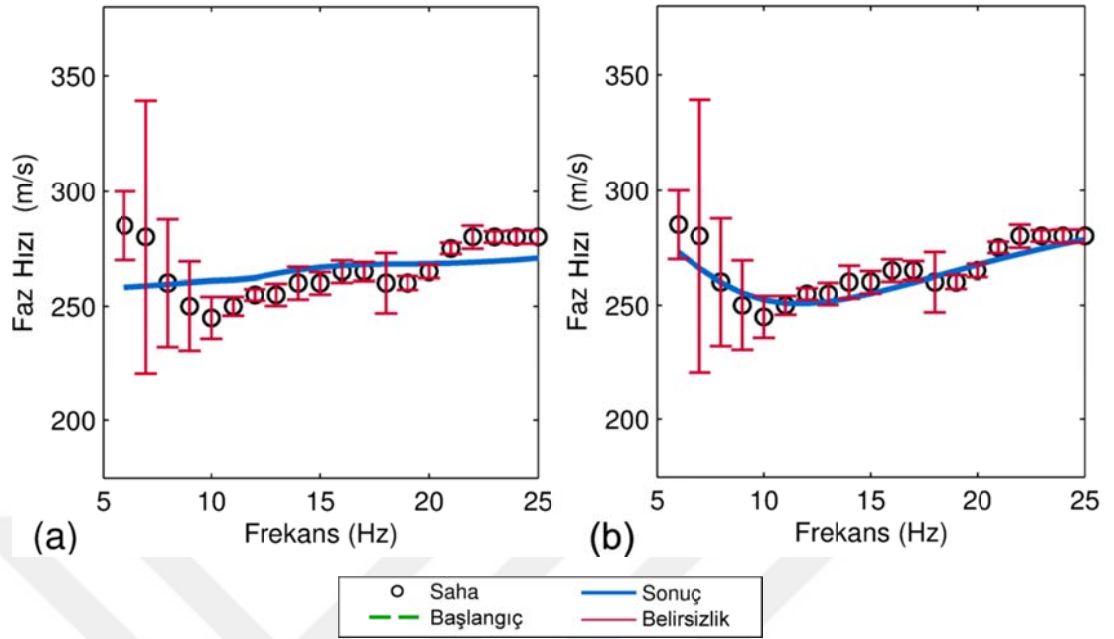
Şekil 2.53. Beşirli Sahil noktası 3BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) IVZ verisi, (c) DES verisi, (d) Vs-derinlik profili, (e) Vp-derinlik profili, (f) ρ -derinlik profili.

Tablo 2.22. Beşirli Sahil noktası 3BÇ sonucu detayları

Tabaka No	h (m)			ρ (ohm*m)		
	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	1,0	2,4	0,01	50	23	0,44
2	4,0	4,14	0,05	50	36	0,95
3	4,0	2,7	0,04	50	12	1,33
4	4,0	2,1	0,15	20	5	1,13
5	∞	∞		20	4	0,13

Tabaka No	Vs (m/s)			Vp (m/s)		
	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	50	230	0,66	700	473	5,95
2	100	481	84,65	1500	742	12,19
3	200	107	1,56	1500	1272	121,45
4	200	386	7,89	1500	1733	93,31
5	200	321	5,39	1500	1465	450,00

İterasyon	8
Hata (%)	6

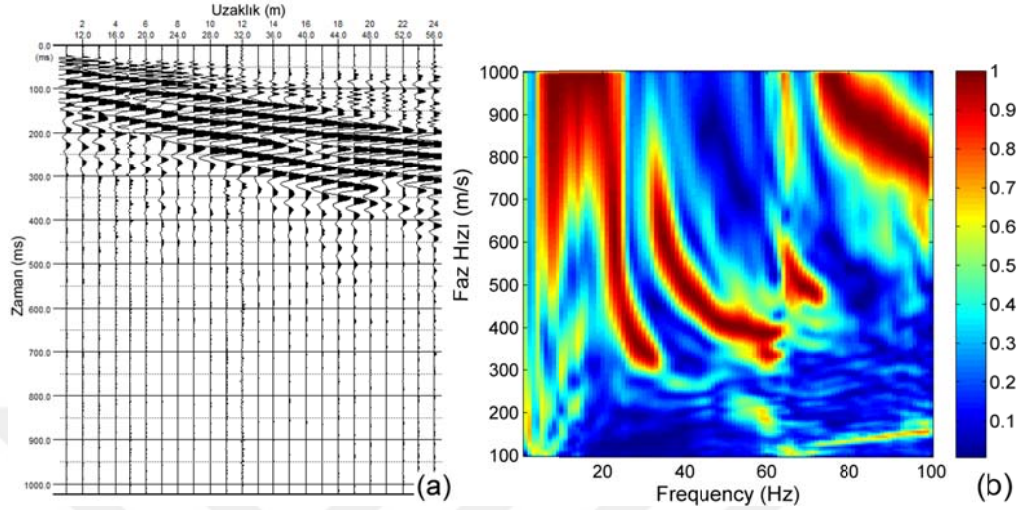


Şekil 2.54. Beşirli Sahil noktası birleşik çözümleri düşük frekans bölgesi veri yaklaşımları, (a) 2BÇ, (b) 3BÇ

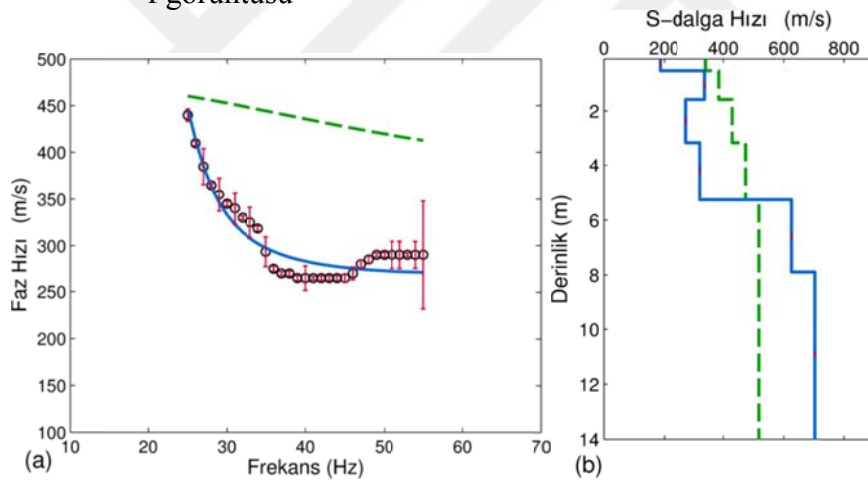
Boztepe ve Konaklar noktaları için toplanan verilerin ters çözümünde, tekil ve birleşik çözümlerin karşılaştırılmasının yanında birleşik ters çözümlerde karşılaşılabilecek önemli bir problem olan “farklı yöntemlerin farklı derinlik hassasiyetleri” irdelenmiştir.

Boztepe noktası için yapılan tekil çözüm, düşük belirsizlikli yeterli bir yaklaşım sunarken, yüksek frekans bölgesindeki hız düşmesini tanımlayamamıştır (Şekil 2.56). 2BÇ ise, hız düşmesi problemini tanımlamış ve daha az tabaka sayısı ve iterasyonla daha iyi bir yaklaşım ortaya koymuştur (Şekil 2.57, Tablo 2.23). 3BÇ’ de, ise ilk varışların sürece eklenmesi ile toplam derinlikte 2.5m artmış ve yarı-sonsuz tabaka V_s ’ si haricinde düşük belirsizliğe sahip bir sonuç modeli elde edilmiştir (Şekil 2.58). Bununla beraber, 3BÇ’ de yarı-sonsuz tabakaya ait V_p değerinin bölgede bilinen kaya hızından çok yüksek olduğu görülmektedir. Yarı-sonsuz tabakadaki bu belirsizliğin nedeni derinliğin 2.5m artması ancak RD verisi üzerinde bu artışa karşılık gelecek bir frekans bandı bulunmamasıdır. Dolayısıyla diğer yöntemler için araştırma derinliği içinde bulunan derinlik değeri, V_s -derinlik profilinde anlamını kaybetmektedir. Toplam derinliği 2BÇ ile benzer daha sığ bir başlangıç modeli ile tekrarlanan 3BÇ’ de ise yarı-sonsuz tabaka V_s ’ sine ait belirsizliğin nispeten düştüğü ancak bu tabakaya ait V_p değerinin de anlamlı değerlere gerilediği görülmüştür (Şekil 2.59). Her iki 3BÇ’ de de belirsizliklerin düşük olması (Tablo 2.24 ve

Tablo 2.25), yöntemlerin sahip oldukları farklı derinlik hassasiyetlerinin çözümler sırasında ne kadar zorlayıcı olabileceğini ve karar verme aşamasında sahaya ait jeolojik ön bilgi gerekliliğini ortaya koymaktadır.



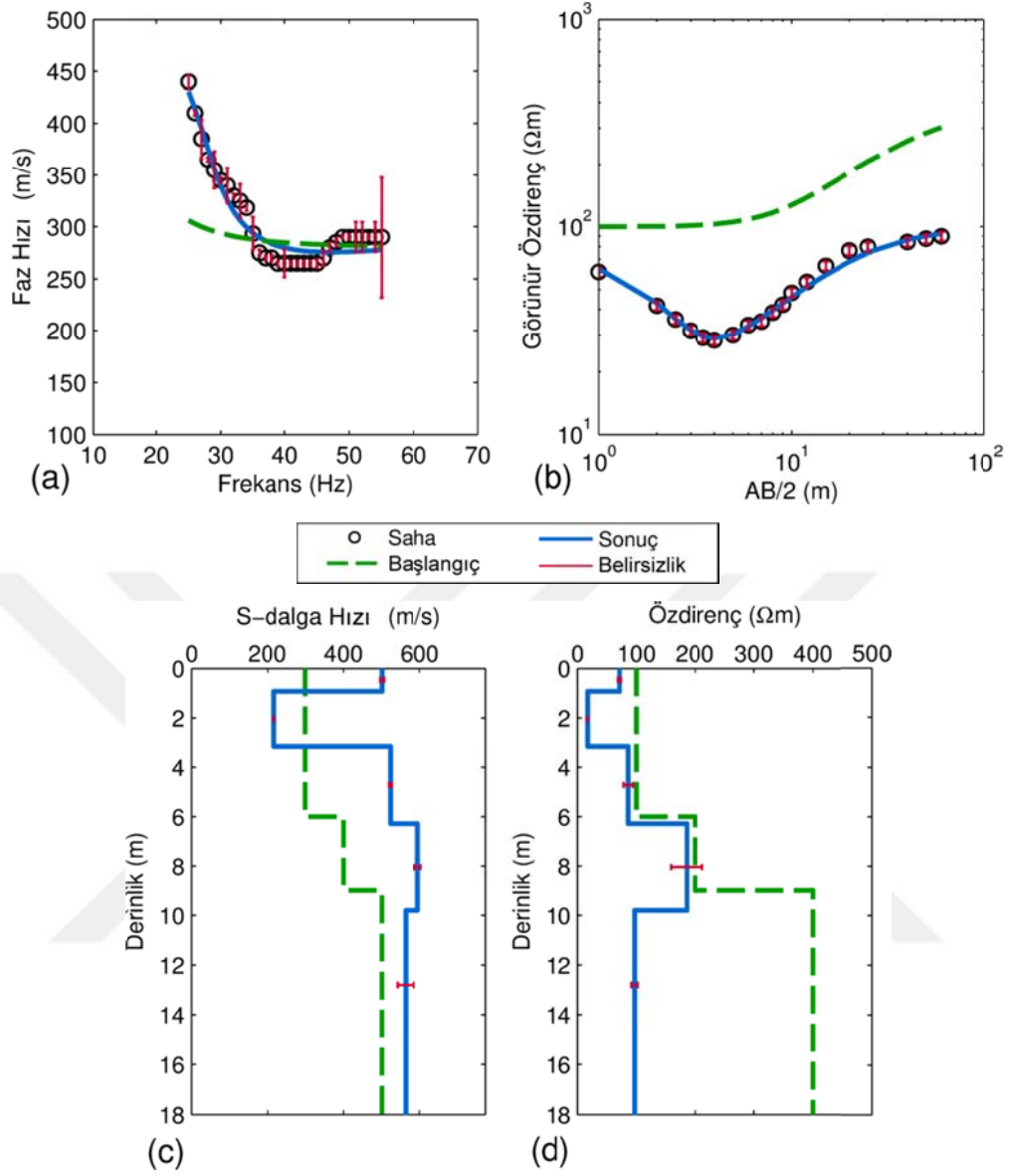
Şekil 2.55. (a) Boztepe noktası için elde edilen yüzey dalgası verisi, (b) veriye ait c-f görüntüsü



Tabaka No	h (m)	Vs (m/s)		
		Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	0,5	341	186	0,01
2	1,1	385	338	0,01
3	1,6	429	276	0,01
4	2,1	474	323	0,01
5	2,6	518	625	0,01
6	∞	518	702	0,01

İterasyon	9
Hata (%)	5,1

Şekil 2.56. (a) Boztepe RD eğrisinin tekil ters çözümü, (b) Vs-derinlik profili

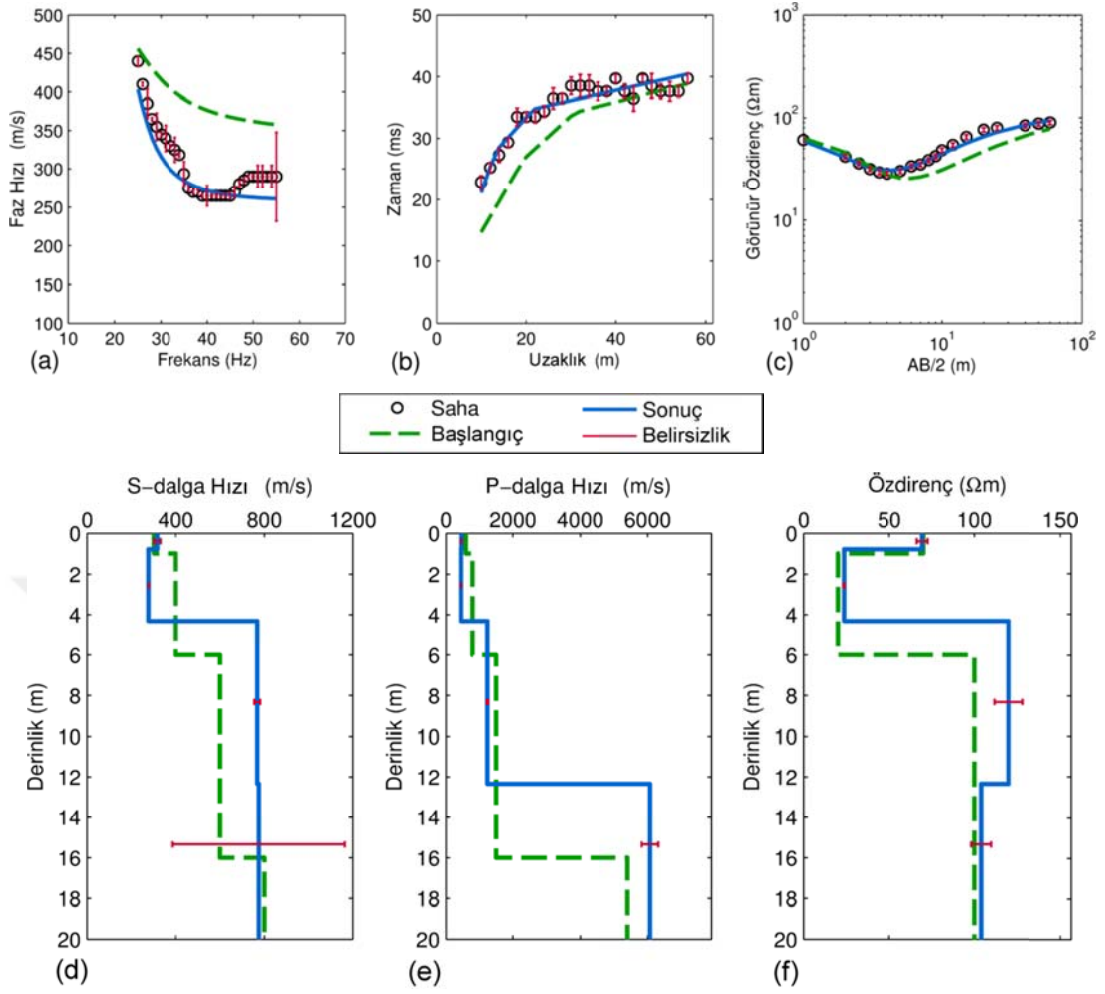


Şekil 2.57. Boztepe noktası 2BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) DES verisi, (c) V_s -derinlik profili, (d) ρ -derinlik profili

Tablo 2.23. Boztepe noktası 2BÇ sonucu detayları

Tabaka No	h (m)			V_s (m/s)			ρ (ohm*m)		
	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	1	0,9	0,01	300	501	5,18	100	71	2,41
2	2	2,2	0,01	300	218	0,48	100	17	0,40
3	3	3,1	0,24	300	523	3,39	100	86	7,98
4	3	3,5	0,89	400	595	8,23	200	186	26,95
5	∞	∞		500	563	21,61	400	97	5,38

İterasyon	7
Hata (%)	4



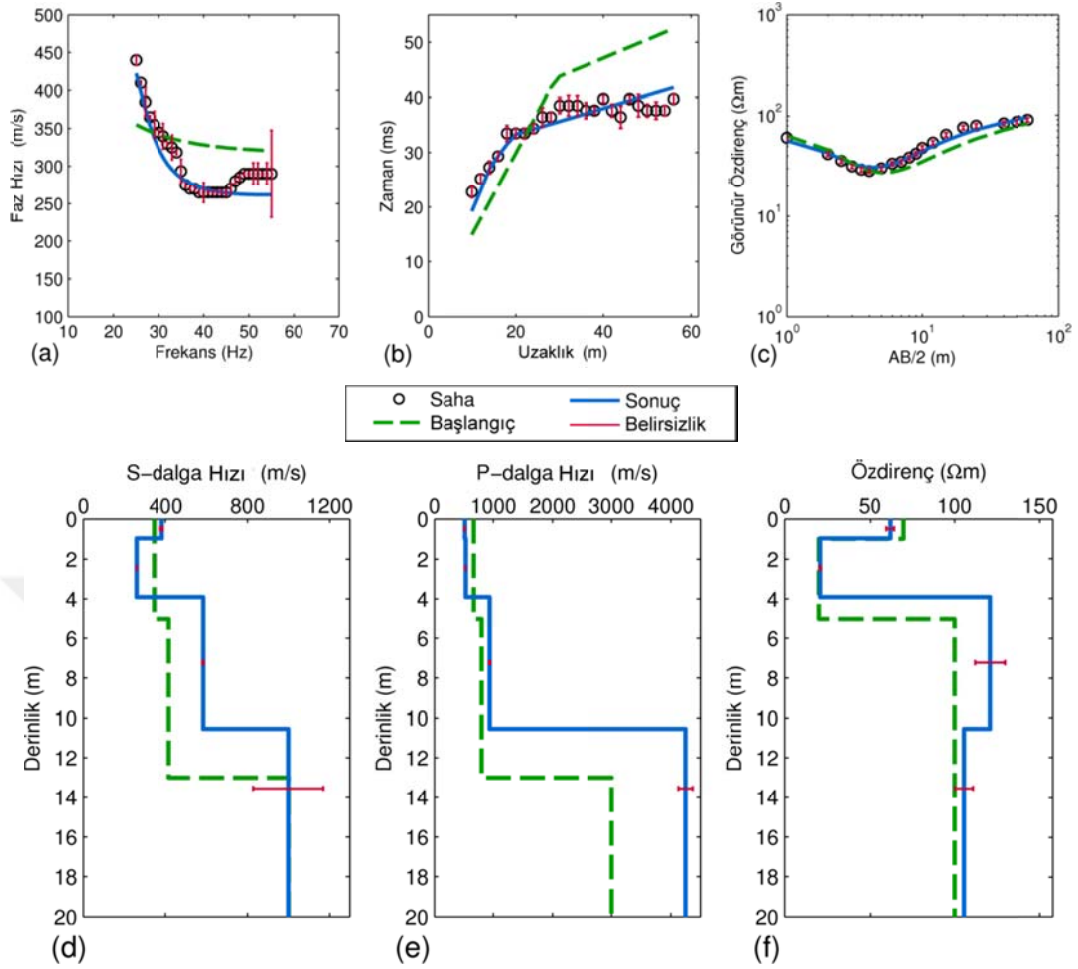
Şekil 2.58. Boztepe noktası 3BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) IVZ verisi, (c) DES verisi, (d) Vs-derinlik profili, (e) Vp-derinlik profili, (f) ρ -derinlik profili.

Tablo 2.24. Boztepe noktası 3BÇ sonucu detayları

Tabaka No	h (m)			ρ (ohm*m)		
	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	1	0,8	1,1E-02	70	69	3,15
2	5	3,5	1,3E-02	20	24	0,43
3	10	8,0	1,5E-01	100	120	8,18
4	∞	∞		100	104	5,86

Tabaka No	Vs (m/s)			Vp (m/s)		
	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	300	316	14,58	600	474	4,51
2	400	276	0,74	800	462	1,68
3	600	768	13,50	1500	1240	21,27
4	800	775	389,05	5400	6067	244,90

İterasyon	5
Hata (%)	6



Şekil 2.59. Boztepe noktası için nispeten daha sığ bir giriş modeli ile yapılan 3BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) IVZ verisi, (c) DES verisi, (d) Vs-derinlik profili, (e) Vp-derinlik profili, (f) ρ -derinlik profili.

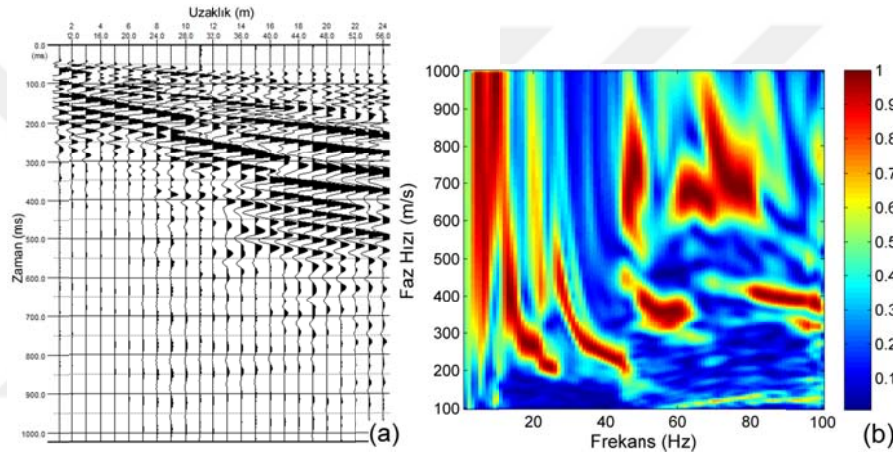
Tablo 2.25. Boztepe noktası için nispeten daha sığ bir giriş modeli ile yapılan 3BÇ detayları

Tabaka No	h (m)			ρ (ohm*m)		
	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	1,0	1,0	0,01	70	62	2,30
2	4,0	2,93	0,01	20	21	0,42
3	8,0	6,6	0,11	100	121	8,78
4	∞	∞		100	106	5,36

Tabaka No	Vs (m/s)			Vp (m/s)		
	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	340	382	6,17	670	520	4,48
2	340	256	0,56	670	530	3,83
3	416	584	3,71	800	934	8,36
4	1000	998	171,15	3000	4248	121,83

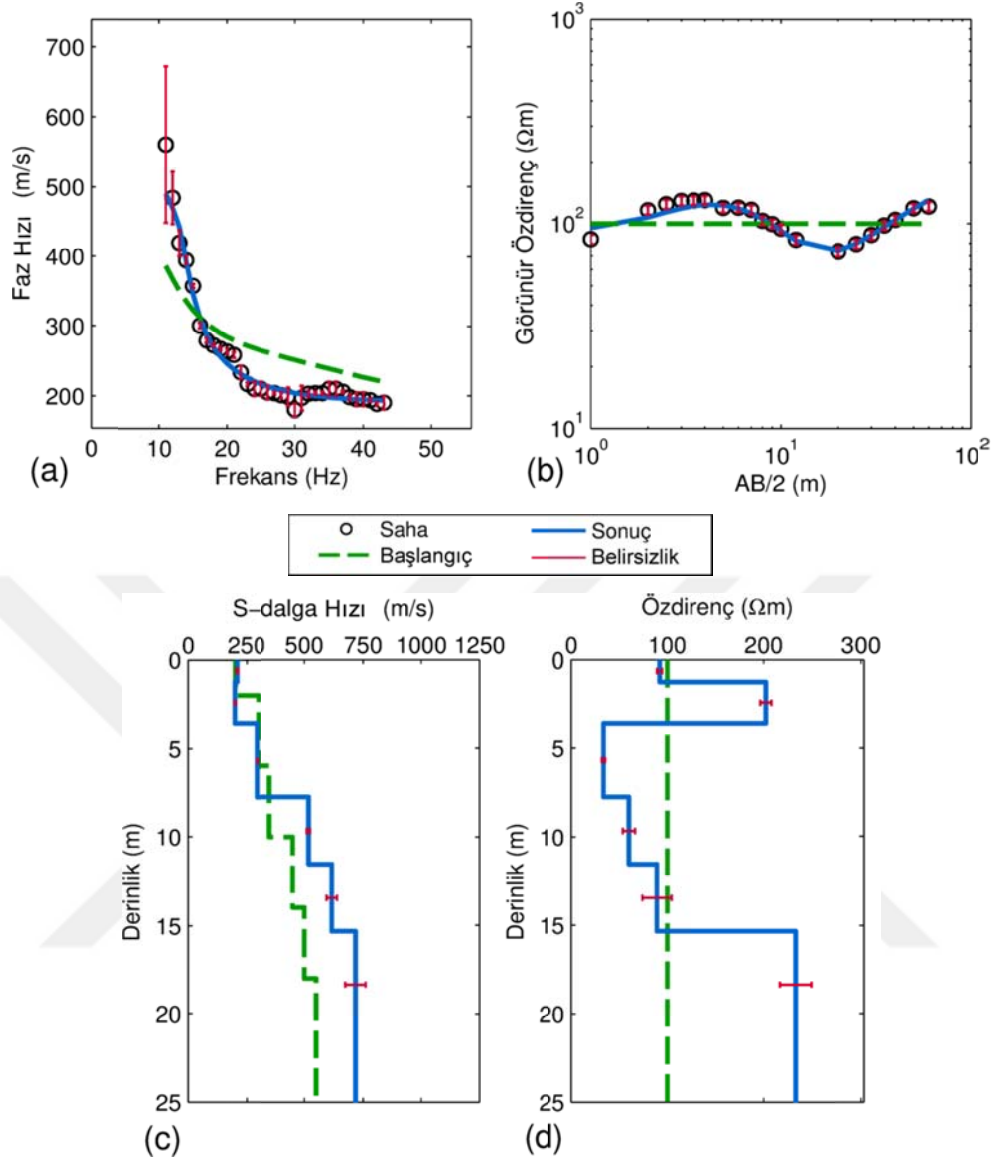
İterasyon	5
Hata (%)	6

Farklı araştırma derinliği problemine ek olarak, birleşik çözümlerde dikkat edilmesi gereken bir diğer husus tabakaların fiziksel özellik değişimlerinin her zaman aynı yönde olmamasıdır. Yani, sismik hızlar açısından tek bir tabaka olarak tanımlanan bir tabaka özdirenç değişimi yönünden 2 ayrı tabaka olarak tanımlanabilir. Dolayısıyla, birleşik çözümünün güvenilir bir sonuç modeline ulaşabilmesi için giriş modelinin bu değişimler göz önüne alınarak oluşturulması gerekir. Konaklar ölçüm noktası için yapılan 2BÇ' de V_s değerleri açısından tek bir tabaka olarak temsil edilebilecek olan ilk üç tabaka, sahip oldukları ρ değişimi nedeniyle özdirenç profilinde üç tabaka olarak temsil edilmektedir (Şekil 2.61, Tablo 2.26).



Şekil 2.60. (a) Konaklar noktası için elde edilen yüzey dalgası verisi, (b) veriye ait c-f görüntüsü

Bununla birlikte, 2BÇ ile 3BÇ sonuçları karşılaştırıldığında bu duruma ek olarak yarı-sonsuz tabakaya kadar tüm tabakalar V_s ve V_p açısından toplamda iki tabaka olarak kabul edilebilirken, bu durumun özdirenç profili açısından 3 veya 4 tabaka olduğu görülmektedir (Şekil 2.62, Tablo 2.27). Konaklar noktası için göze çarpan bir başka durum yarı-sonsuz tabakaya ait V_s değeri belirsizliğinin 3lü çözümde 2li çözüme göre artmasıdır. Bu artışın Boztepe için belirtilen problemde kaynaklandığı düşünülmele beraber, 3BÇ' deki yarı-sonsuz tabakaya ait belirsizlik değeri sınırlarının, 2BÇ' de daha düşük bir belirsizlikle elde edilen ve daha güvenilir olduğu düşünülen değere yaklaştığı dikkat çekicidir.

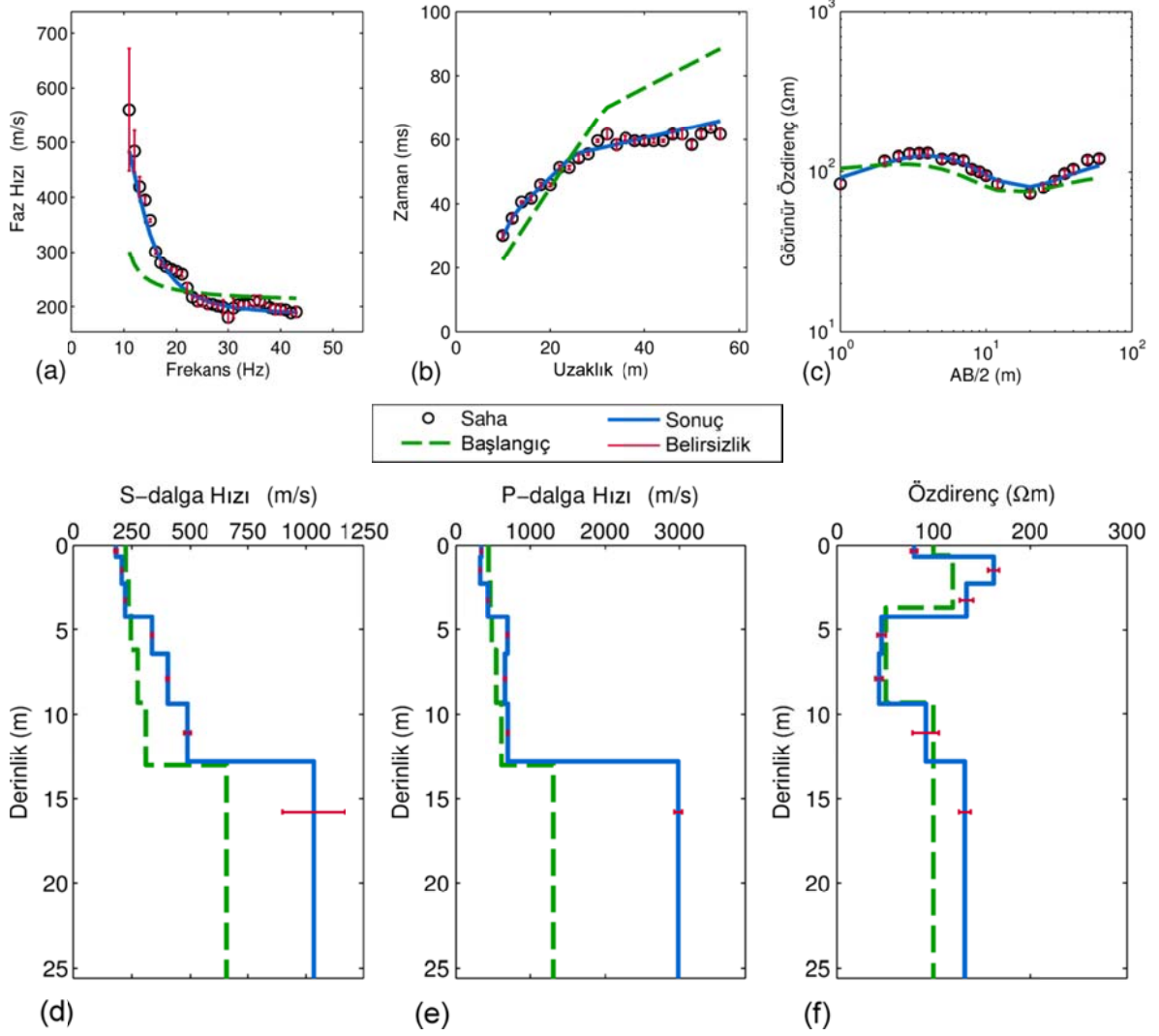


Şekil 2.61. Konaklar noktası 2BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) DES verisi, (c) Vs-derinlik profili, (d) ρ -derinlik profili

Tablo 2.26. Konaklar noktası 2BÇ sonucu detayları

Tabaka No	h (m)			Vs (m/s)			ρ (ohm*m)		
	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	2,0	1,2	0,02	200	208	3,70	100	92	2,63
2	4,0	2,3	0,02	300	199	1,07	100	202	5,70
3	4,0	4,2	0,04	350	294	1,33	100	34	1,57
4	4,0	3,8	0,29	450	518	7,39	100	60	6,25
5	4,0	3,8	0,77	500	617	22,23	100	89	15,15
6	∞	∞		550	718	43,10	100	233	16,31

İterasyon	15
Hata (%)	5



Şekil 2.62. Konaklar noktası 3BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) IVZ verisi, (c) DES verisi, (d) V_s -derinlik profili, (e) V_p -derinlik profili, (f) ρ -derinlik profili.

Tablo 2.27. Konaklar noktası 3BÇ sonucu detayları

Tabaka No	h (m)			ρ (ohm*m)		
	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	0,6	0,7	0,01	100	80	3,27
2	1,2	1,6	0,01	120	162	5,79
3	1,9	2,0	0,02	120	134	7,00
4	2,5	2,2	0,05	50	46	4,30
5	3,1	2,9	0,05	50	43	3,83
6	3,7	3,4	0,06	100	92	13,53
7	∞	∞		100	132	6,04

Tabaka No	Vs (m/s)			Vp (m/s)		
	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	224	182	6,95	444	336	4,39
2	224	207	2,42	444	320	2,83
3	235	221	2,15	467	437	4,40
4	246	336	4,81	489	696	8,02
5	275	403	5,63	547	663	12,69
6	310	487	14,56	616	702	13,28
7	659	1033	134,89	1308	2983	52,69

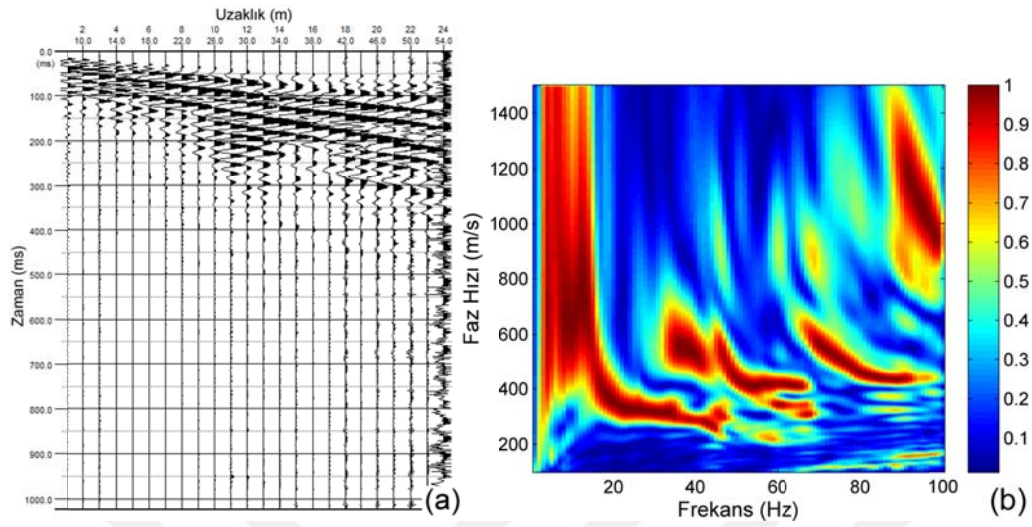
İterasyon	4
Hata (%)	5

Köşk ve Bostancı I noktaları için elde edilen tekil ve birleşik ters çözüm sonuçları birbirini ile tutarlı olmasının yanında birleşik çözümlerin, sonuç yer altı modellerinde iyileştirmeler yaptığı görülmüştür.

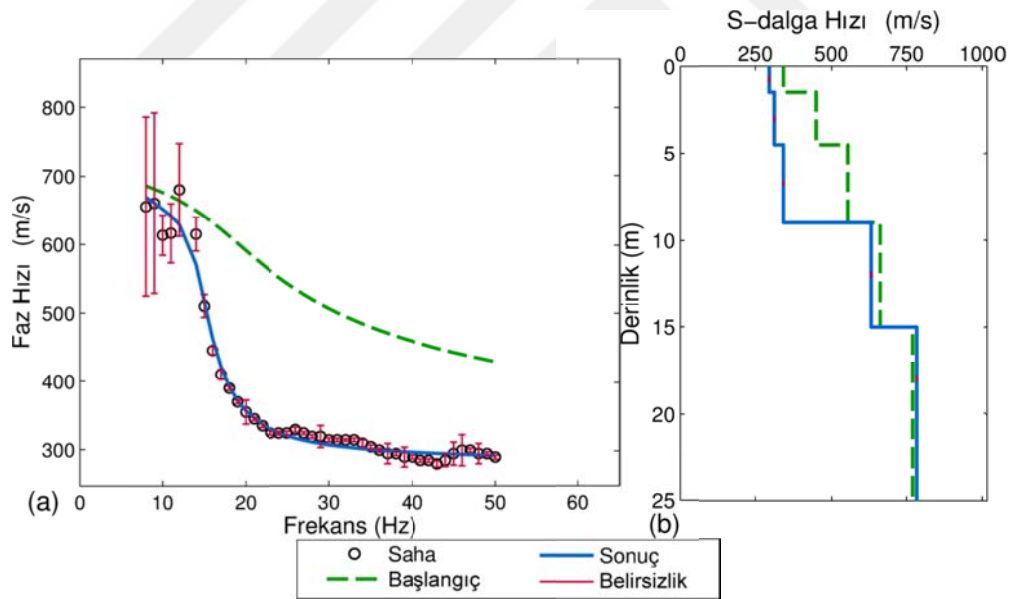
Köşk ölçüm noktası için toplanan yüzey dalgası verilerinden (Şekil 2.63) elde edilen dispersiyon eğrisinin sentetik çalışmalarda karşılaşılan, üstündeki tabakalara göre göreceli olarak düşük hızlı yarı sonsuz tabaka problemi, Model 2, ile uyum gösterdiği görülmektedir. Ancak, burada yumuşak yarı-sonsuz tabakayı tanımlayabilecek veri sayısının azlığı (8-10 Hz arası) ve bu verilere ait belirsizliklerin yüksek oluşu problemin tanımlanmasını zorlaştırmaktadır. Nitekim hem tekil (Şekil 2.64) hem de 2BÇ' de (Şekil 2.65) iyi yaklaşımlar sağlanmasına rağmen yarı-sonsuz tabaka için herhangi bir hız düşmesi tanımlanmamıştır. Ancak çözüme ilk varış bilgilerinin eklenmesi ile 2li çözümde kullanılan giriş modeli kullanılarak yapılan 3BÇ' de (Şekil 2.66), 2BÇ' de inilen maksimum derinlik yaklaşık 1.5m artmış ve düşük hız tabakası daha az iterasyon ile %1 lik bir iyileştirme ile tanımlanmıştır (Tablo 2.28 ve Tablo 2.29).

Bostancı I noktasında elde edilen RD verisi hızın derinlikle arttığı, klasik ve diğer problemlere göre tanımlanması nispeten kolay bir veridir (Şekil 2.67). Tekil çözüm (Şekil 2.68) ile 2BÇ' nin (Şekil 2.69) uyumlu olduğu, tekil çözümde ilk iki tabakaya ait

belirsizliklerin düştüğü, 3BÇ' de ise daha az tabaka ve iterasyonla belirsizliği düşük sonuçlar elde edildiği görülmektedir (Şekil 2.70).



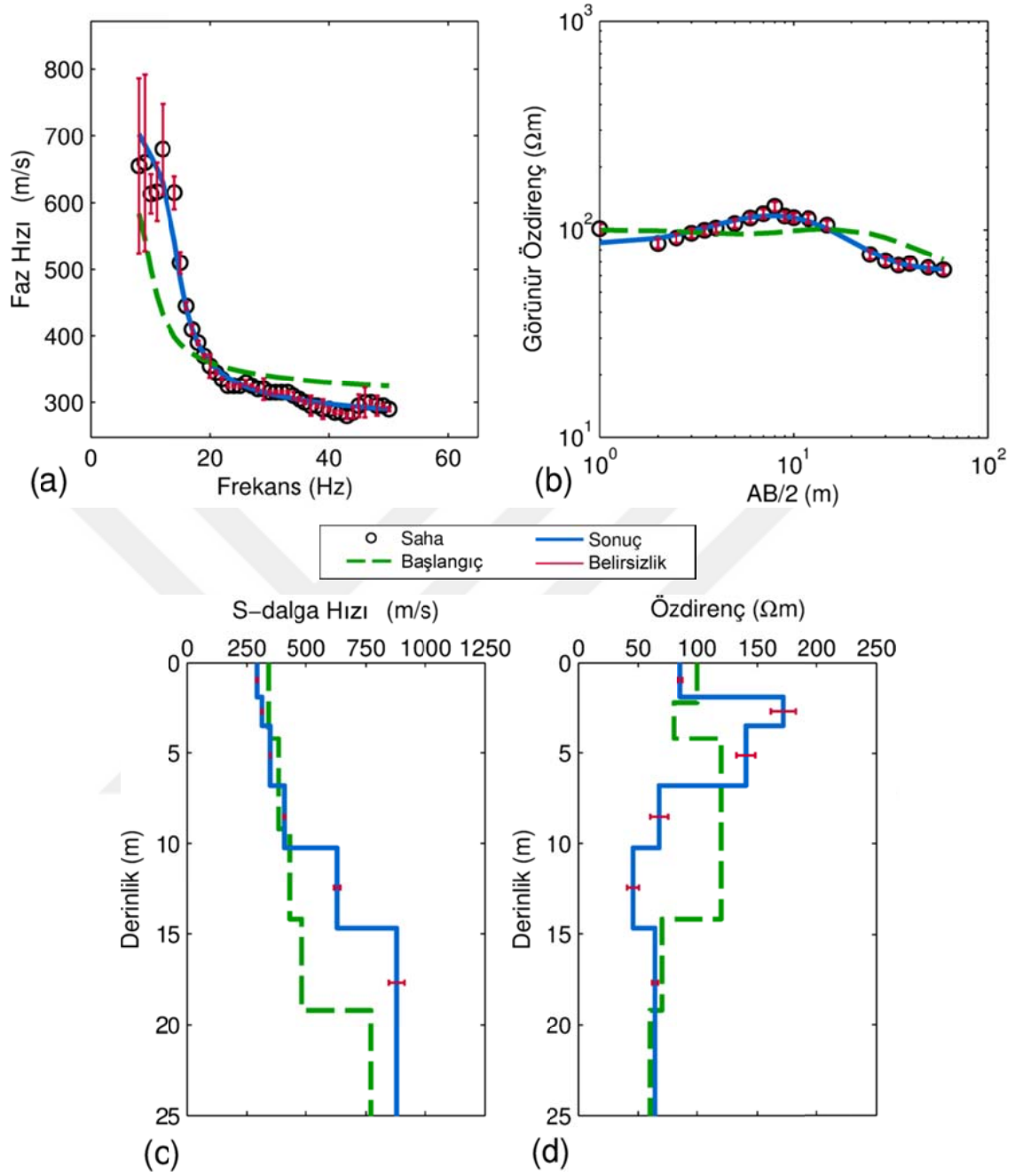
Şekil 2.63. (a) Köşk noktası için elde edilen yüzey dalgası verisi, (b) veriye ait c-f görüntüsü



Tabaka No	h (m)	Vs (m/s)		
		Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	1,5	342	296	0,80
2	3,0	449	312	0,38
3	4,5	556	342	0,28
4	6,0	664	634	0,68
5	∞	771	784	0,39

İterasyon	8
Hata (%)	3

Şekil 2.64. (a) Köşk RD eğrisinin tekil ters çözümü, (b) Vs-derinlik profili

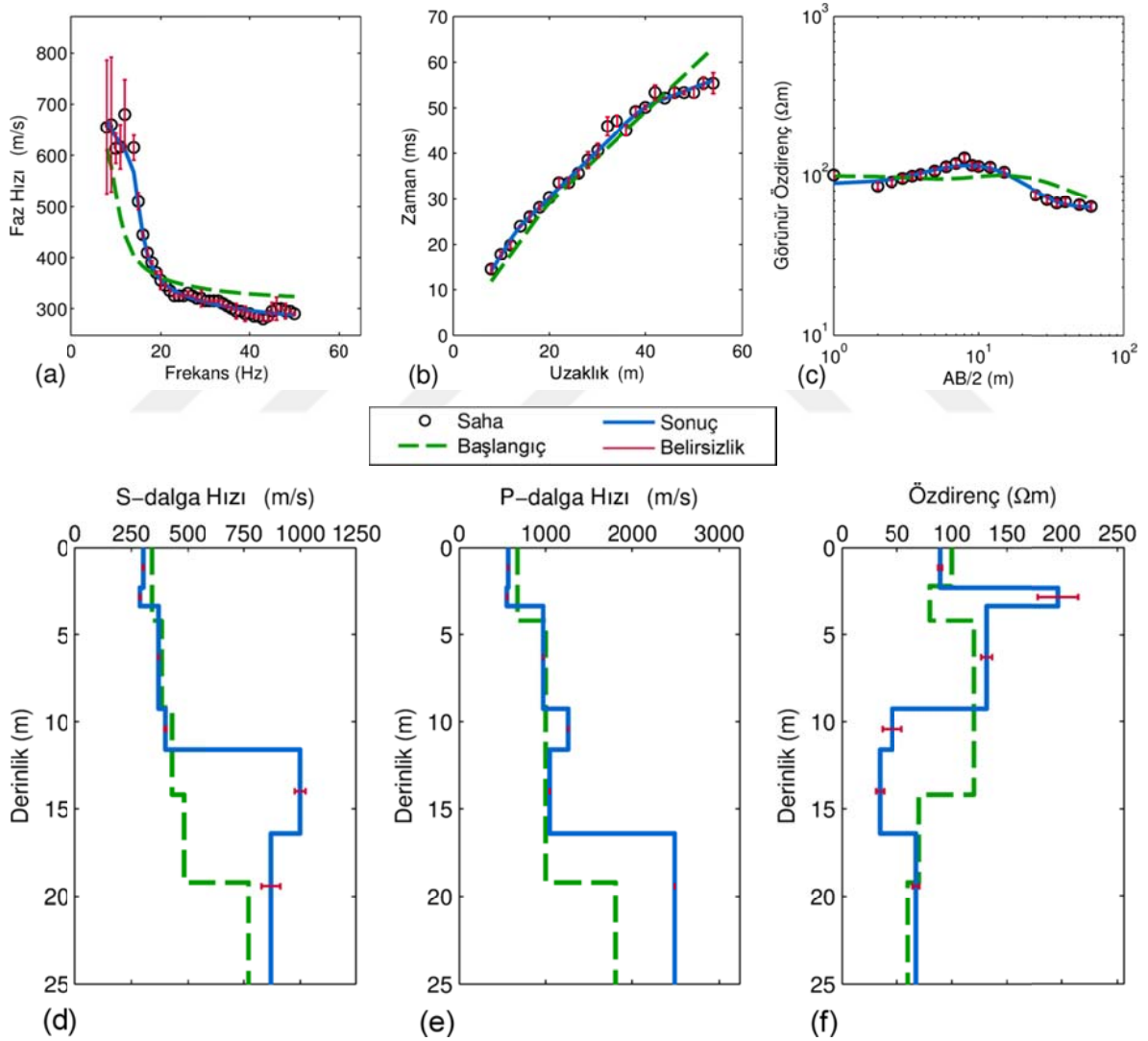


Şekil 2.65. Köşk noktası 2BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) DES verisi, (c) V_s -derinlik profili, (d) ρ -derinlik profili

Tablo 2.28. Köşk noktası 2BÇ sonucu detayları

Tabaka No	h (m)			Vs (m/s)			ρ (ohm*m)		
	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	2,2	1,9	0,03	341	293	2,48	100	86	1,90
2	2,0	1,6	0,03	341	313	1,93	80	172	10,44
3	5,0	3,3	0,05	383	347	1,24	120	141	7,89
4	5,0	3,4	0,08	429	407	2,67	120	68	7,52
5	5,0	4,4	0,53	482	630	13,22	70	46	4,99
6	∞	∞		770	878	32,43	60	64	2,43

İterasyon	9
Hata (%)	4

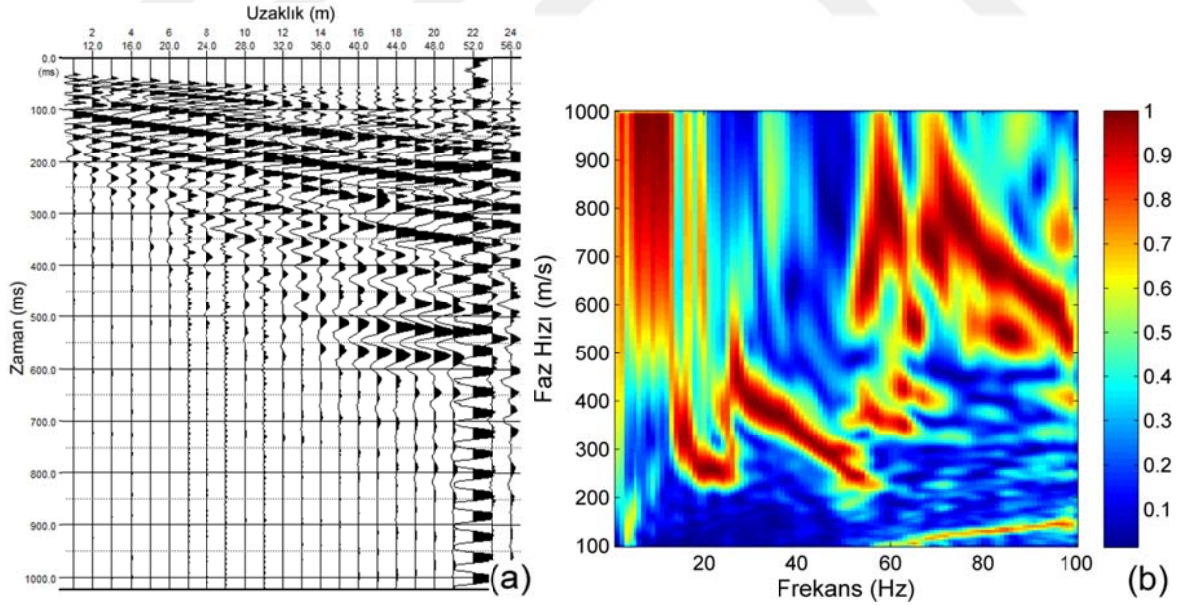
Şekil 2.66. Köşk noktası 3BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) IVZ verisi, (c) DES verisi, (d) Vs-derinlik profili, (e) Vp-derinlik profili, (f) ρ -derinlik profili.

Tablo 2.29. Köşk noktası 3BÇ sonucu detayları

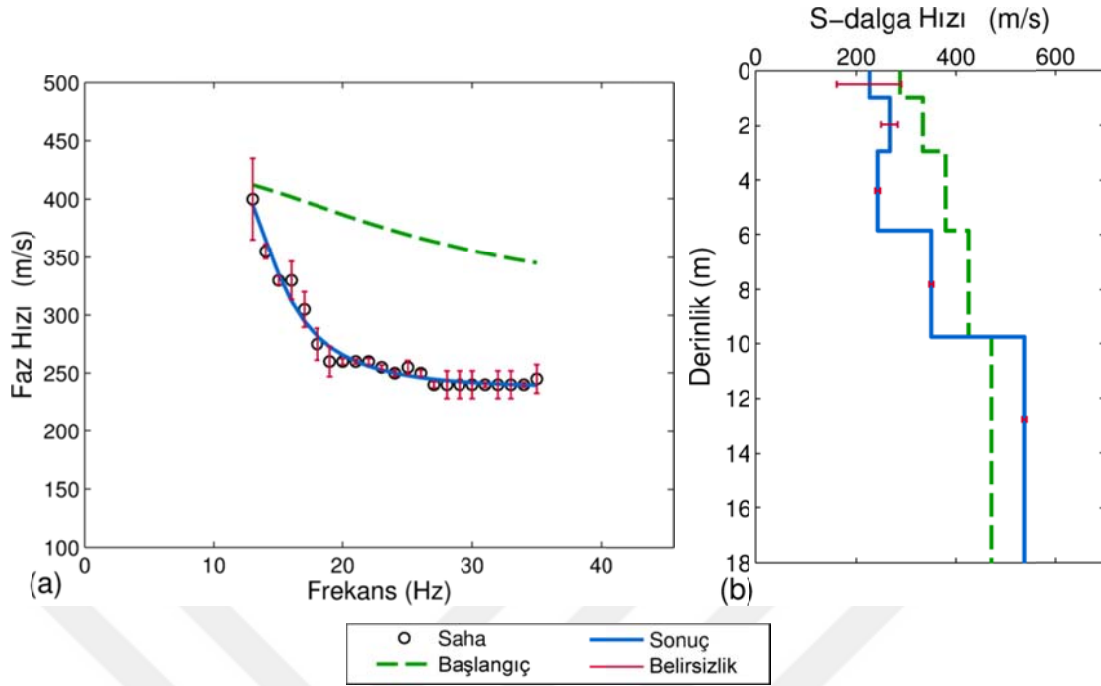
Tabaka No	h (m)			ρ (ohm*m)		
	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	2,2	2,3	0,0001	100	89	1,83
2	2,0	1,1	0,0001	80	197	18,07
3	5,0	5,9	0,0001	120	132	5,01
4	5,0	2,3	0,0001	120	45	8,85
5	5,0	4,8	0,0001	70	34	3,62
6	∞	∞		60	67	3,06

Tabaka No	Vs (m/s)			Vp (m/s)		
	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	341	302	2,02	677	570	0,001
2	341	288	2,47	677	556	0,001
3	383	370	0,94	1000	971	0,001
4	429	400	4,96	1000	1256	0,002
5	482	999	23,88	1000	1045	0,001
6	771	870	41,43	1800	2488	0,002

İterasyon	6
Hata (%)	3



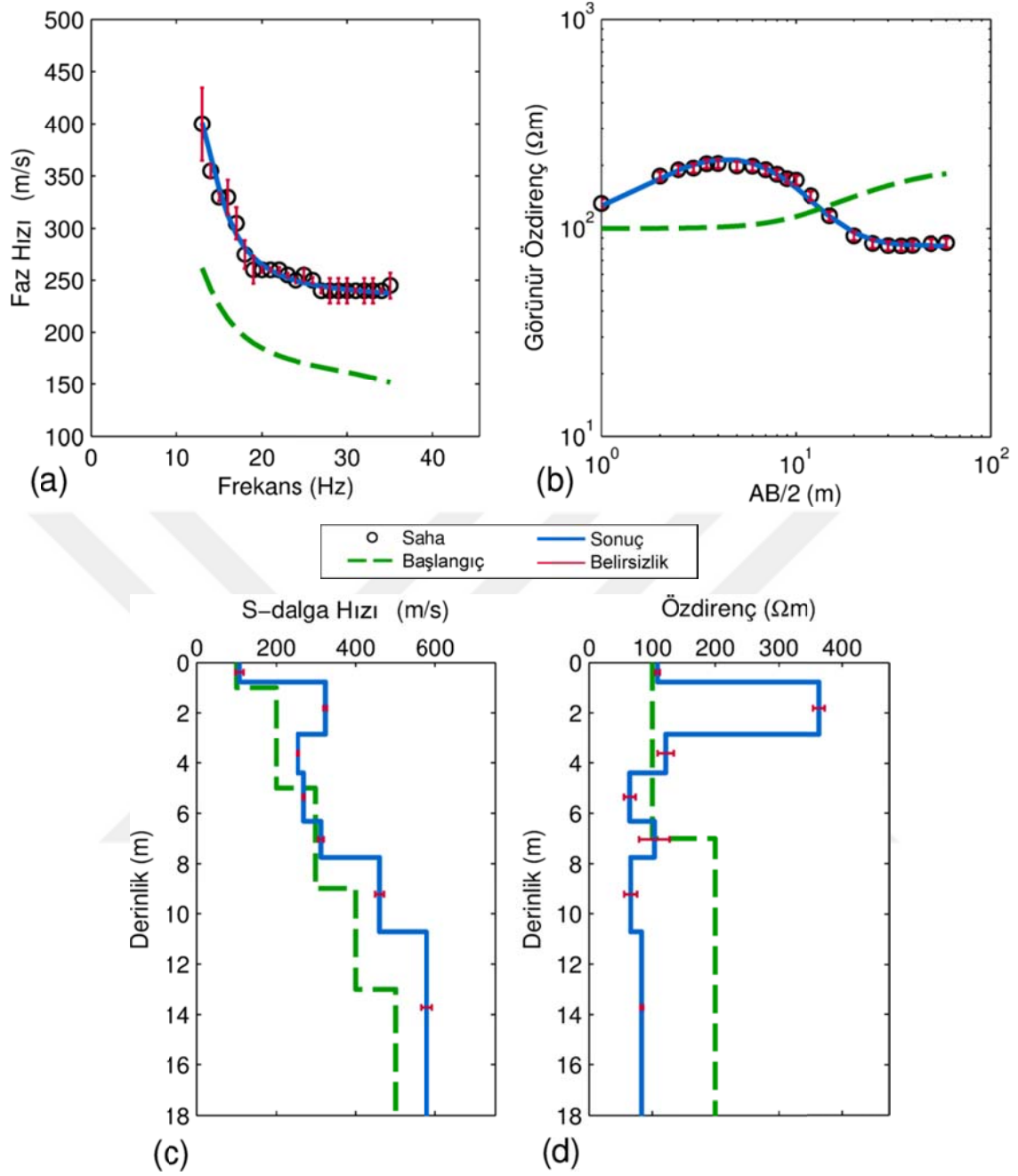
Şekil 2.67. (a) Bostancı I noktası için elde edilen yüzey dalgası verisi, (b) veriye ait c-f görüntüsü



Tabaka No	h (m)	Vs (m/s)		
		Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	1,0	288	226	65,13
2	2,0	334	266	17,52
3	2,9	379	242	4,80
4	3,9	425	351	4,30
5	∞	471	536	4,56

İterasyon	6
Hata (%)	2,2

Şekil 2.68. (a) Bostancı I RD eğrisinin tekil ters çözümü, (b) Vs-derinlik profili

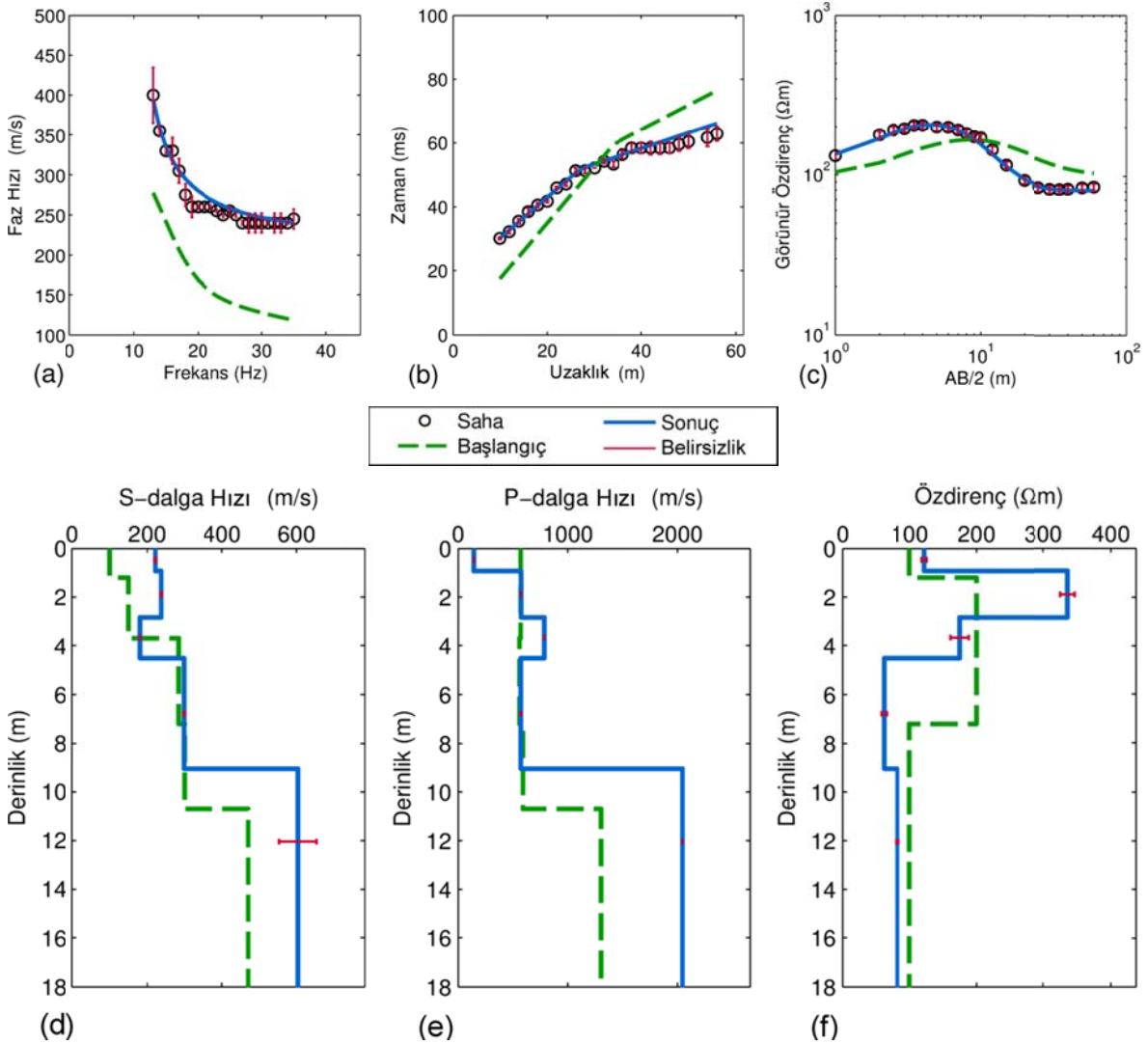


Şekil 2.69. Bostancı I noktası 2BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) DES verisi, (c) Vs-derinlik profili, (d) ρ -derinlik profili

Tablo 2.30. Bostancı I noktası 2BÇ sonucu detayları

Tabaka No	h (m)			Vs (m/s)			ρ (ohm*m)		
	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	1	0,8	0,01	100	107	10,41	100	108	3,76
2	2	2,1	0,04	200	325	4,29	100	363	9,11
3	2	1,6	0,05	200	255	2,35	100	121	12,87
4	2	1,9	0,05	300	270	2,68	100	64	9,26
5	2	1,4	0,09	300	313	7,00	200	103	24,19
6	4	3,0	0,42	400	460	10,88	200	66	10,21
7	∞	∞		500	578	14,17	200	83	2,21

İterasyon	10
Hata (%)	3

Şekil 2.70. Bostancı I noktası 3BÇ sonucu. (a) RD verisi, (b) IVZ verisi, (c) DES verisi, (d) Vs-derinlik profili, (e) Vp-derinlik profili, (f) ρ -derinlik profili.

Tablo 2.31. Bostancı I noktası 3BÇ sonucu detayları

Tabaka No	h (m)			ρ (ohm*m)		
	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	1,2	0,9	7,0E-06	100	122	3,86
2	2,5	1,9	3,0E-05	200	336	10,64
3	3,5	1,7	4,3E-05	200	175	13,72
4	3,5	4,5	3,0E-05	100	61	3,90
5	∞	∞		100	81	2,15

Tabaka No	Vs (m/s)			Vp (m/s)		
	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik	Başlangıç	Sonuç	Belirsizlik
1	100	222	2,39	572	140	0,00
2	150	237	1,00	572	576	0,01
3	283	181	1,21	562	787	0,01
4	299	297	2,40	593	574	0,00
5	471	603	50,20	1300	2044	0,02

İterasyon	5
Hata (%)	4

3. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Sentetik ve saha verileri üzerinde yapılan çalışmalar göstermiştir ki RD ve DES verilerinin birleşik ters çözümü Vs-derinlik profilinin elde edilmesinde tabaka kalınlığına bağlı problemlerin (λ /derinlik oranı uyumsuzluğu, aşırı parametreleme, tabaka kalınlığı değişimlerine bağlı problemler vb) indirgenmesini sağlamıştır. Bununla beraber, birleşik çözüm sürecine IVZ verilerinin dahil edilmesinin sonuç model parametrelerinde hassas değişimler meydana getirdiği ve bu değişimlerin belirsizlikleri düşürdüğü görülmüştür. Aynı zamanda, 3BÇ çözümleri genel olarak daha az sayıda tabaka ve iterasyon kullanılmasını sağlamıştır ki, bu ters çözüm süreçlerine eklenecek her bir bilginin çözüme olan pozitif katkısını ve önemini vurgulamaktadır. Buna karşılık, yöntemlerin sahip olduğu farklı araştırma derinliklerinin, bu yöntemlerin birleştirilmesiyle elde edilecek çözümlerde bazı model parametrelerinde yüksek belirsizlikler oluşturabileceği gözlenmiştir.

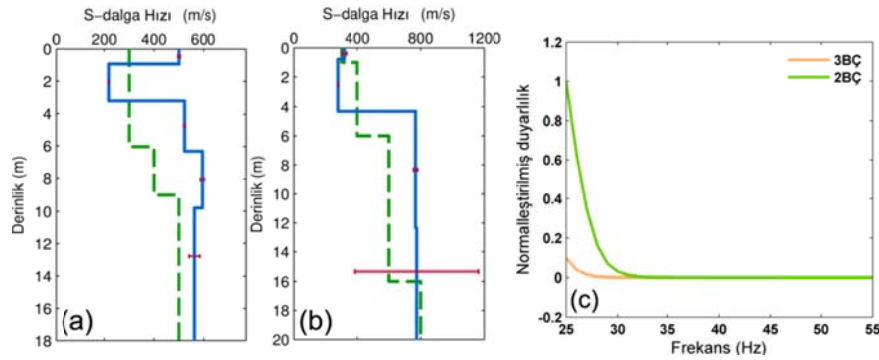
RD verilerinin geleneksel ters çözümünde tercih edilen yöntemler genelde yerel minimum aramaya odaklı oldukları için, elde edilecek sonuçlar büyük oranda başlangıç modeli parametrelerinin etkisi altındadır. Her ne kadar bu çalışmada kullanılan ters çözüm yöntemi de bir yerel minimum arama yöntemi olsada, tabaka kalınlığının ters çözüm sürecine değişken olarak eklenmesinin, başlangıç modeline olan bağımlılığı azalttığı ve aşırı parametrizasyon durumunda dahi iyi yaklaşımlar elde edilebileceği yapılan sentetik çalışmalar ile açık şekilde ortaya konmuştur.

Başlangıç modeline olan bağımlılığı indirgeyen bir başka neden de kullanılan değişken sönüm stratejisidir. Bu strateji her bir alt iterasyonda birden fazla model parametre düzeltme vektörünün hesaplanmasını ve bunlar arasından en iyi yaklaşımın seçilmesine olanak vermektedir. Dolayısıyla hem yaklaşım hızı hem de yaklaşımın güvenilirliği artmaktadır. Sönüm değerleri yapay veri çözümlerinde 10^1 ile 10^{-3} arasında 10 eşit logaritmik aralıklı bir sayı dizisi içinden kullanılırken, saha verilerinde bu dizi 10^2 - 10^{-1} aralığındadır. Sönüm değerlerinin maksimum ve minimum aralığı çekirdek matrisin “koşul sayısı (condition number)” bağlı olmasının yanında, buna bağlı olarak, kullanılan veri ve model parametre sayısı ile ilgilidir.

Çalışmada kullanılan sönüm parametresi seçiminde her bir iterasyonda Jacobian matrisin, 10 farklı sönüm değeri için tersinin hesaplanması gerekmektedir. Bununla birlikte, Jacobian matrisinin kötü durumlu (ill-posed) olduğu da göz önünde

bulundurulur, hem ters alma işleminin basit bir sayısal işleme dönüştürülmesinin hem de sayısal doğruluğun sağlanması amacıyla SVD yöntemi kullanılmıştır.

Duyarlılık analizleri model parametrelerinin düşük duyarlılık değerlerinde veri üzerinde herhangi bir fiziksel etkisinin olmadığını ve bu durumda elde edilen çözümün çok çözümlülük ürünü olma ihtimalini daha da arttırdığını göstermiştir. Bununla beraber, Model 1 gürültüsüz verisi üzerinde yapılan duyarlılık analizlerinde birleşik çözüm ile elde edilen model parametreleri duyarlılık görüntüsünün, aynı verinin gerçek model parametrelerine ait duyarlılık görüntüleri ile eşleştiği görülmektedir. Duyarlılık analizlerinin saha verilerinin ters çözümündeki karşılığı model kovaryans matrisidir. Çünkü C_m 'nin hesaplanmasında kullanılan Denklem (106)' deki G_f , sonuç model parametrelerinin kısmi türevlerini içerir ki, bu Bölüm 1.6' ve Denklem (82) tanımlanan duyarlılık tanımı ile aynıdır. Denklem (106)' e bakıldığında C_m ile duyarlılık değerleri arasında ters bir ilişkinin olduğu açıktır. Yani, düşük belirsizliğe sahip model parametrelerinin duyarlılık değerleri yüksek iken (bu, o parametrenin kestirilme olasılığı yüksek ve güvenilir olduğunu anlamına gelir), belirsizliği yüksek model parametrelerinin ise duyarlılık değerleri düşüktür. Bu durum Şekil 3.1' de Boztepe noktası için 2BÇ ve 3BÇ sonuçları ile gösterilmiştir. Buna göre, 3BÇ' deki yarı-sonsuz tabakaya ait Vs parametresi yüksek belirsizliğe sahipken, aynı tabaka için 2BÇ' de ise düşük belirsizlikli ve daha güvenilir değer elde edilmiştir. Her iki çözüm için yarı-sonsuz tabaka Vs parametresinin duyarlılık değerleri karşılaştırıldığında, 2BÇ' deki Vs parametresinin duyarlılık değerinin 3BÇ' ye göre yaklaşık 10 kat büyük olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, sonuç yer altı modelleri için hesaplanan model parametre belirsizliklerinin aynı zamanda duyarlılıklarını da temsil ettiği açıkça görülmüştür.



Şekil 3.1. Boztepe Vs-derinlik profilleri (a) 2BÇ, (b) 3BÇ, (c) 2BÇ ve 3BÇ' den elde edilen yarı-sonsuz tabaka Vs duyarlılık değerleri

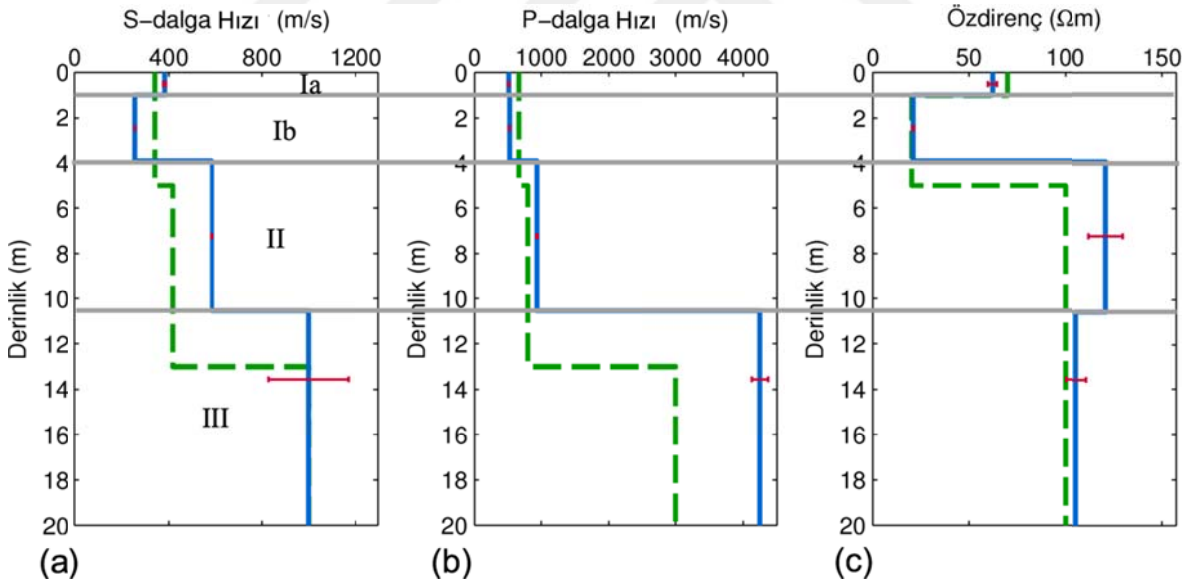
Bu tez çalışması her ne kadar yöntemsel bir araştırma olsada, saha verileri üzerinden elde edilen model parametrelerinin gerek genel jeoloji gerekse bu noktalarda yapılmış önceki çalışmalardan elde edilen parametrelerle olan tutarlılığı, bu çalışmada oluşturulan birleşik ters çözüm algoritmalarının güvenilirliği açısından önemli olacaktır. Bölgede detaylı jeofizik ve sondaj araştırmaların yapıldığı en güncel ve güvenilir çalışmalardan biri Babacan (2013)' ün Kabaköy formasyonuna ait mühendislik parametrelerini incelediği doktora tezi çalışmasıdır. Çalışmada bulunan Çukurçayır ve Pelitli ölçüm sahası, bu tez çalışmasındaki Boztepe ve MAE ölçüm noktalarına konumsal olarak yakınlık gösteren noktalardır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Babacan (2013)' teki Çukurçayır ve Pelitli ölçüm sahası ile bu tez çalışmasındaki Boztepe ve MAE ölçüm noktalarının konumları

Babacan (2013)' te Çukurçayır sahasında 10 profilde sismik ölçümler yapılırken, 6 adet sondaj çalışması mevcuttur. Yapılan 6 adet sondaj çalışmasından 5' inde karot alınabilirken, sahada bulunan hâkim zeminin ardından kesilen Aglomera-Bazalt seviyeleri 4-7 m aralığında değişim göstermektedir. Bazalt birimlerin ise sondaj çalışmalarında yer yer ince-ara bantlar olarak gözlemlendiği ve sadece bir noktada yaklaşık 14 m' de kesildiği görülmektedir. Sismik ölçümlerde, ilk 5m' yi oluşturan zemin için V_p yaklaşık 450-1000 m/s, V_s ise 150-500 m/s aralığında değişmekte iken, Aglomera-Bazalt birimler için V_p 1300-2200 m/s, V_s 400-1100 m/s gibi geniş bir aralık göstermektedir. Bununla beraber, Bazalt birimler ise V_p 2600-3550 m/s ve V_s 750-1600 m/s ile temsil edilmektedir. Sondaj ve sismik profillerin uzaklıkları ve parametre değişim aralıkları göz önüne alındığında bölge jeolojisinin kısa mesafelerde büyük değişimler gösterdiği ve karakteristik bir yapısı olmadığı anlaşılmaktadır.

Bu tez çalışmasının ölçüm noktalarından biri olan Boztepe noktası, Babacan (2013)' taki Çukurçayır noktası ile aynı yükselti üzerinde ancak ters yamaçta bulunmaktadır. İki nokta arasındaki mesafe yaklaşık 900m' dir. Babacan (2013)' te zemin olarak nitelendirilen litojinin, bu çalışmada toplam kalınlığı yaklaşık 3.1m' ye ulaşan ve ilk metreleri (~0.9m) sağlam ağaç kökleri nedeniyle göreceli olarak daha yüksek Vs hızına sahip olduğu düşünülen 2 birim ile temsil ettiği görülmektedir. Bu birimlere ait Vs değerleri 382 ve 256 m/s iken Vp değerleri sırasıyla 520 ve 530 m/s' dir (burada ilk ofset değerinin 10m olması nedeniyle çok sık ve göreceli sıkı tabaka etkilerinin ilk varış zamanlarında görülemediği düşünülmektedir). Babacan (2013)' ün Aglomera-Bazalt olarak tespit ettiği birimler, bu çalışmadaki 3BÇ ile yaklaşık 4-11m' ler aralığında tanımlanmış olup Vs 584 m/s, Vp 934 m/s şeklinde belirlenmiştir (Şekil 3.3.). Bununla birlikte, 3BÇ' de yaklaşık 11 m' den sonra Vp 4248 m/s ile tanımlanan birimin, Babacan (2013)' te yalnızca bir sondajda kesilen ve bölgede hâkim ana kaya olarak bilinen Bazalt birimini tanımladığı düşünülmektedir.

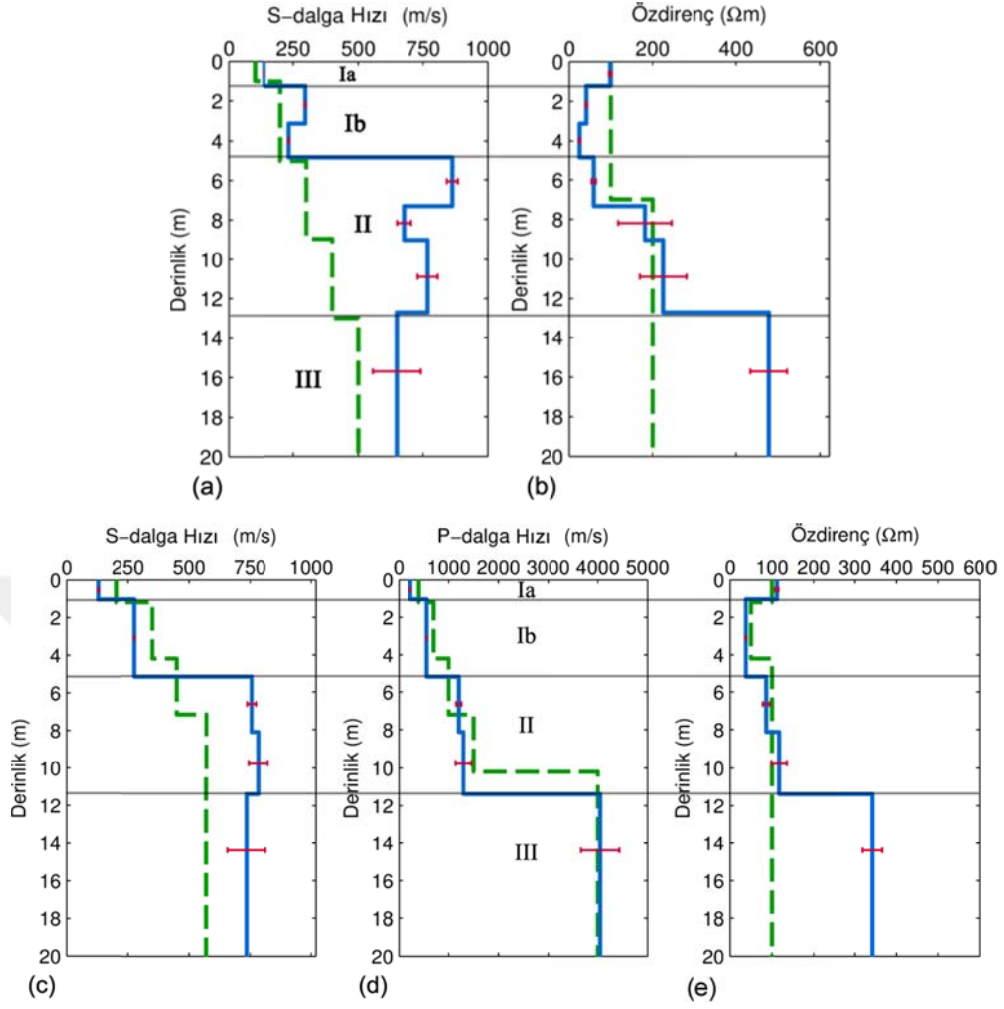


Şekil 3.3. Boztepe 3BÇ çözümü ve yaklaşık tabaka sınırları

Babacan (2013)' te Pelitli sahasında ise 10 profilde sismik ölçümler yapılırken, 18m aralıklı, toplam derinliği 10m olan 4 adet sondaj çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu sahanın MAE noktasına olan uzaklığı yaklaşık 400 m' dir. Sondaj çalışmalarından zemin kalınlığının Kuzey' den Güney'e doğru kalınlaştığı ve en az 0.5m, en fazla 3.5m kalınlıklarında olduğu belirlenmiştir. Vp tomografi ve Vs kesitlerinde ise yaklaşık kalınlığı

4m olan zeminin, ilk 1.5m si daha düşük hızlı iken, sonraki 2.5m' si daha yüksek hızlı olarak tespit edilmiştir. Sondaj çalışmaları sırasında, kesilen zeminin ardından Aglomera-Bazalt birimi kesilmiş olup bu birimlerin sondaj toplam derinliği olan 10m' ye kadar devam ettiği görülmüştür. Bu birime ait V_p aralığı yaklaşık 1500-3600 m/s, V_s 750-1150 m/s aralığındadır. Dolayısıyla hedef sahada bulunan Aglomera-Bazalt birimlerinin kendi içinde değişken sıklık ve/veya çatlaklık durumları içerdiği söylenebilir. V_p tomografi kesitlerinde 12m' ye kadar inilmiş olup Bazalt birimler görülmezken, bazı V_s -derinlik profillerinde Bazalt birimlere ait olabilecek hız yükselimleri dikkat çekmektedir. Bu tez çalışmasında MAE noktası için yapılan 2BÇ ve 3BÇ sonuçlarında (sırasıyla Şekil 3.4a-b ve Şekil 3.4c-d); referans çalışmayı doğrular şekilde yaklaşık ilk 5m' lik zemin iki farklı hız karakteri ile temsil edilirken, 5m sonrasında Aglomera-Bazalt birimleri temsil ettiği düşünülen hız artımları elde edilmiştir. Bununla beraber, 3BÇ' den elde edilen V_p -derinlik profilinde 12m sonrasında görülen yaklaşık 4000 m/s' lik birimlerin bölgede hâkim ana kaya olduğu bilinen Bazalt' lara ait olduğu düşünülmektedir. Babacan (2013)' teki sonuçlar ve bu çalışmadaki 3BÇ' den elde edilen öz direnç-derinlik profilindeki tabaka öz direnci artışı bu yargıyı destekler niteliktedir. Ancak, hem 2BÇ hem de 3BÇ deki V_s -derinlik kesitinde belirgin bir V_s artışı görülmemesi, bu birimin kırıklı/çatlaklı olduğu kanısını da yaratmaktadır.

Bu tez çalışmasında sunulan birleşik ters çözüm algoritması temel mod RD verilerine odaklanmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışma ışığında devam ettirilecek sonraki çalışmalarla RD' nin yüksek modlarının da çözüme dâhil edilmesiyle özellikle hız terslenmelerinin bulunduğu karmaşık yer altı problemlerine ve derin birimlere ait parametrelerin elde edilmesinde daha ayrımlı çözümler üretilebilir. Bununla beraber, her biri 1B' lu birden fazla veriyi uzaklık eksenini boyunca birbirine bağlayabilecek 2B' lu algoritmalar geliştirilmesinin, 2B' lu karmaşık problemlerin çözümüne önemli katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Ancak bu tür çalışmalarda, daha karmaşık bir hedefe ulaşma yolunda daha fazla parametre ve veri ile ilgilenileceğinden ön bilgilerin (parametreler arası fiziksel ilişkiler, sondaj logları, vb.) kullanılmasının önemi artacaktır. Dolayısıyla, oluşturulacak amaç fonksiyonunun model norm bölümüne referans model (m_{prior}) parametresinin eklenmesi ve model normunun ağırlıklandırılması (C_p) önerilmektedir.



Şekil 3.4. MAE nokası (a) ve (b) 2BÇ ve (c)-(e) 3BÇ çözümleri ve yaklaşık tabaka sınırları

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada Rayleigh dalgası dispersiyon eğrilerinin (RD), 1B' lu düşey elektrik sondajı (DES) verileri ile birleşik ters çözümü gerçekleştirilmiştir. Bu birleşik çözüm, Rayleigh dalgası dispersiyon eğrilerinin ters çözümünde, tabaka kalınlıklarına ait herhangi bir bilgi bulunmadığında çok kanallı yüzey dalgası analizlerinin güvenilirliğini arttırmak amacıyla tasarlanmıştır. Tabaka kalınlıkları Rayleigh dalgası yayılımında S-dalga hızıyla beraber önemli parametrelerden biri olmasına rağmen, dispersiyon eğrilerinin geleneksel tekil çözümünde bilinen bir ön bilgi olarak kabul edilir ve çözüm boyunca sabit tutulur. Bu varsayım, tekil çözümlerin hatalı tabaka kalınlıklarına dayalı çözümlerinde çok çözümlülük tuzağına düşülmesine neden olur. Bu çalışmada ise tabaka kalınlıkları ters çözüm sürecine bilinmeyen olarak dâhil edilerek bu olasılık indirgenmek istenmiştir.

Birleşik ters çözüm algoritması ağırlıklandırılmış sönümlü en küçük kareler çözümü ve değişken sönüm faktörü stratejisi üzerinde kurulmuştur. Değişken sönüm faktörü stratejisi, çözüm sırasında aynı giriş modeline ait farklı çözümlerin hesaplanmasına ve giriş modeli ile elde edilebilecek en iyi yaklaşımın seçilmesine olanak sağlarken, yaklaşım hızının da artmasını olanak sağlamaktadır. Bu aşamada SVD tekniğinin kullanılması, hem her bir alt iterasyondaki tersleme işlemi basit aritmetik bir işleme çevirmiş hem de geleneksel ters alma işleminde karşılaşılabilecek tekillik problemini indirgemıştır.

Hazırlanan birleşik çözüm algoritması ilk olarak karakteristik sentetik modeller üzerinden elde edilen gürültüsüz ve gürültülü veriler ile denenmiştir. Sentetik denemeler sırasında algoritmanın yaklaşım sınırlarını görmek adına giriş modelleri olabildiğince gerçek modellerden uzak ve bağımsız olarak oluşturulmuştur. Algoritma, hem gürültülü hem de gürültüsüz verilerde sentetik modellere ve verilere yüksek doğrulukta yaklaşım sağlamıştır. Tüm gürültüsüz verilerde yaklaşık 15-20 iterasyonda %1 lik bir yaklaşım hatası elde edilirken, gürültülü verilerde kabul edilebilir yaklaşımlara ortalama 21 iterasyonda ulaşılmıştır.

Sentetik çalışmalarla elde edilen tecrübeler ışığında yöntem saha verilerinde de test edilmiştir. Saha verileri Trabzon ilinin merkezi ve etrafındaki 10 mevkiide toplanmıştır. Saha verilerinin çözümü sırasında Rayleigh dispersiyon ve düşey elektrik sondajı verilerinin yanında, yüzey dalgası verilerini elde etmek için toplanan sismik verilerin ilk

varış zamanı bilgileri de çözüm sürecine eklenmiş ve yeni bir birleşik çözüm akışı da elde edilmiştir. Böylece hem çözüm akışına kalınlık bilgisinin güvenilirliğini artıracak yeni bir bilgi eklenmiş hem de P-dalga hızı sabit bir parametre olmaktan çıkarılıp çözüm sürecine bilinmeyen olarak dâhil edilmiştir. Sonuçta, her bir ölçüm noktası için tekil çözüm ve 2 farklı birleşik çözüm sonuçlarının karşılaştırması imkânı doğmuştur. Saha verileri üzerinde yapılan çalışmalar ışığında şu sonuçlara elde edilmiştir;

- Saha verilerinin RD ve DES birleşik çözümlerinde (2BÇ) tabaka kalınlıklarının bilinmeyen olarak sürece dâhil edilmesi, çözümün tekil çözümlerin çok çözümlülük tuzağına düşmesindeki en büyük etkenler olan; modelin toplam derinliğine ve tabaka kalınlıklarına olan bağımlılığını büyük oranda azaltmıştır (Bostancı II ve Moloz).
- Bunun yanında, doğru bir model derinliği tahmin edilse dahi, tekil çözümlerin RD eğrisine özellikle yüksek frekans bölgesinde iyi yaklaşımlar elde edemediği durumlarda, 2BÇ nin daha az iterasyon ve tabaka sayısı ile daha iyi yaklaşım hatalarına ulaştığı görülmüştür (Yalınca).
- Tekil çözümlerin tanımlamada zorlandığı yada çözüm bulamadığı ara tabaka problemleri (yumuşak yarı-sonsuz tabaka (Köşk), düşük hızlı ara tabaka (Boztepe), ters dispersif yapılar (Beşirli Sahil)) birleşik çözümler ile tanımlanabilmiştir.
- 3BÇ lerin sahip olduğu ilk varış bilgisi ve sismik kırılma yönteminin tabaka kalınlıklarını tanımlamadaki gücü nedeniyle, genel olarak 2BÇ de elde edilen kalınlık değerlerine küçük düzeltmeler yaptığı görülmüştür. Bu düzeltmeler, DES sonuç modellerindeki tabaka öz dirençlerine ait belirsizlikleri düşürmesinin yanında, yüksek belirsizlikli Vs değerlerini daha güvenilir bir hale getirdiği görülmüştür.
- Birleşik ters çözümün getirdiği olumlu sonuçlar yanında, aynı ters çözüm akışında çözülen veri sayısı arttıkça; farklı yöntemlerin farklı derinlik duyarlılığı (Boztepe) ve her tabakada model parametre değişimlerinin aynı yönde olmaması ya da değişmemesi (Konaklar) gibi nedenlerle tüm verilere uygun bir giriş modeli oluşturmanın zorlaştığı söylenebilir. Aynı sebepler, birleşik çözümlerin bazı parametrelerde nispeten yüksek belirsizlik göstermesine de neden olabilmektedir.

Sonuç olarak, oluşturulan Birleşik Ters Çözüm algoritmalarının V_s -derinlik profillerinin elde edilmesinde daha güvenilir bir yaklaşım ortaya koyduğu görülmektedir. Buna bağlı olarak, hedef yer altı yapıları S-dalga hızlarının daha güvenilir temsil edilmesinin, hem aktif yapılaşma bölgelerinde yapı tasarımında önemli roller oynayan elastik-dinamik parametrelerin ve V_{s30} ' un hesaplanmasını hem de yapılaşmaya açılacak yeni alanlarda yapılacak zemin sınıflamalarını daha güvenilir yapacağı açıktır.



5. KAYNAKLAR

- Abo-Zena, A., 1979. Dispersion function computations for unlimited frequency values, Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 58, 1, 91–105, doi:10.1111/j.1365-246X.1979.tb01011.x.
- Afnimar, Koketsu, K. ve Nakagawa, K., 2002. Joint inversion of refraction and gravity data for the three-dimensional topography of a sediment–basement interface, Geophysical Journal International, 151, 1, 243–254, doi:10.1046/j.1365-246X.2002.01772.x.
- Aki, K. ve Richards, P. G., 1980. Quantitative Seismology: Theory and Methods. W. H. Freeman Press.
- Anderson, M., Matti, J. ve Jachens, R., 2004. Structural model of the San Bernardino basin, California, from analysis of gravity, aeromagnetic, and seismicity data, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 109, B4, doi:10.1029/2003JB002544.
- Babacan, A. E., 2013. Kabaköy formasyonuna ait volkanik kayaların (Trabzon) mühendislik özelliklerinin sismik tomografi yöntemi ile belirlenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Başokur, A. T., 1984. A Numerical Direct Interpretation Method of Resistivity Soundings Using the Pekeris Model, Geophysical Prospecting, 32, 6, 1131–1146, doi:10.1111/j.1365-2478.1984.tb00759.x
- Başokur, A. T., 2004. Düşey Elektrik Sonsajı Verilerinin Yorumu, Ankara Üniversitesi.
- Boiero, D., 2009. Surface wave analysis for building shear wave velocity models, Doktora Tezi, Politecnico di Torino, Italy.
- Boore, D. M., 1972. Finite Difference Methods for Seismic Wave Propagation in Heterogeneous Materials. Methods of Computational Physics, Seismology: Surface Waves and Earth Oscillations, 11, 1–36, New York: Academic Press.
- Calderón-Macías, C. ve Luke, B., 2007. Improved parameterization to invert Rayleigh-wave data for shallow profiles containing stiff inclusions, Geophysics, 72, 1, U1–U10, doi:10.1190/1.2374854.
- Chen, X., 1993. A systematic and efficient method of computing normal modes for multilayered half-space, Geophysical Journal International, 115, 2, 391–409, doi:10.1111/j.1365-246X.1993.tb01194.x.
- Coddington, E. A. ve Levinson, N., 1955. Theory of Differential Equations, New York: McGraw-Hill Pub.

- Colombo, D. ve Stefano, M. D., 2007. Geophysical modeling via simultaneous joint inversion of seismic, gravity, and electromagnetic data Application to prestack depth imaging, The Leading Edge, 26, 3, 326–331, doi:10.1190/1.2715057
- Comina, C., Foti, S., Sambuelli, L., Socco, L. ve Strobbia, C., 2002. Joint Inversion of VES and Surface Wave Data, Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, USA.
- Constable, S. C., Parker, R. L. ve Constable, C. G., 1987. Occam's inversion; a practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data, Geophysics, 52, 3, 289–300, doi:10.1190/1.1442303.
- Dal Moro, G., Pipan, M., Forte, E. ve Finetti, I., 2003. Determination of Rayleigh wave dispersion curves for near surface applications in unconsolidated sediments, SEG International Exposition and Seventy-Third Annual Meeting.
- Das, B. U. C. ve Ghosh, D. P., 1973. A Study on the Direct Interpretation of Dipole Sounding Resistivity Measurements Over Layered Earth, Geophysical Prospecting, 21, 2, 379–400, doi:10.1111/j.1365-2478.1973.tb00034.x.
- Ditmar, P., 2002. Finding the shape of a local heterogeneity by means of a structural inversion with constraints, Geophysical Prospecting, 50, 2, 209–223, doi:10.1046/j.1365-2478.2002.00308.x.
- Faccioli, E., Maggio, F., Quarteroni, A. ve Tagliani, A., 1996. Spectral-domain decomposition methods for the solution of acoustic and elastic wave equations, Geophysics, 61, 4, 1160–1174, doi:10.1190/1.1444036.
- Farquharson, C. G. ve Oldenburg, D. W., 1996. Approximate sensitivities for the electromagnetic inverse problem, Geophysical Journal International, 126, 1, 235–252, doi:10.1111/j.1365-246X.1996.tb05282.x.
- Foti, S., 2000. Multistation Methods for Geotechnical Characterization using Surface Waves. PhD Thesis, Politecnico di Torino, Italy.
- Gabriels, P., Snieder, R. ve Nolet, G., 1987. In Situ Measurements of Shear-Wave Velocity in Sediments with Higher-Mode Rayleigh Waves, Geophysical Prospecting, 35, 2, 187–196, doi:10.1111/j.1365-2478.1987.tb00812.x.
- Gallardo, L. A., 2004. Joint two-dimensional inversion of geoelectromagnetic and seismic refraction data with cross-gradients constraint, PhD thesis, University of Lancaster.
- Gallardo, L. A., Pérez-Flores, M. A. ve Gómez-Treviño, E., 2003. A versatile algorithm for joint 3D inversion of gravity and magnetic data, Geophysics, 68, 3, 949–959, doi:10.1190/1.1581067.
- Gantmacher, F. R., 1959. The theory of matrices, Taylor & Francis Press.

- Geometrics., SeisImager/SWTM Manual, <http://www.geometrics.com/geometrics-products/seismographs/download-seismograph-software/>, 25 Mayıs 2005
- Ghosh, D. P., 1970, The application of linear filter theory to the direct interpretation of geoelectrical resistivity measurements, PhD Thesis, Delft University of Technology.
- Ghosh, D. P., 1971. Inverse Filter Coefficients for the Computation of Apparent Resistivity Standard Curves for a Horizontally Stratified Earth, Geophysical Prospecting, 19, 4, 769–775, doi:10.1111/j.1365-2478.1971.tb00915.x.
- Google Earth, 2016. Google Company, Kaliforniya, ABD.
- Guptasarma, D., 1982. Optimization of Short Digital Linear Filters for Increased Accuracy, Geophysical Prospecting, 30, 4, 501–514, doi:10.1111/j.1365-2478.1982.tb01320.x
- Günther, T. ve Rücker, C., 2006. A New Joint Inversion Approach Applied to The Combined Tomography of DC Resistivity and Seismic Refraction Data, 19th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems.
- Gyulai, Á., 1989. Parameter Sensitivity of Underground DC Measurements, Geophysical Transactions, 35, 209–225.
- Haber, E. ve Oldenburg, D., 1997. Joint inversion: a structural approach, Inverse Problems, 13, 1, 63, doi:10.1088/0266-5611/13/1/006
- Harvey, D. J., 1981. Seismogram synthesis using normal mode superposition: the locked mode approximation, Geophysical Journal International, 66, 1, 37–69, doi:10.1111/j.1365-246X.1981.tb05947.x
- Haskell, N. A., 1953. The dispersion of surface waves on multilayered media, Bulletin of the Seismological Society of America, 43, 1, 17–34,
- Heincke, B., Jegen, M. ve Hobbs, R., 2006. Joint inversion of MT, gravity and seismic data applied to sub-basalt imaging, SEG Annual Meeting-2006, Society of Exploration Geophysicists, doi:10.1190/1.2370374
- Hering, A., Misiek, R., Gyulai, A., Ormos, T., Dobroka, M. ve Dresen, L., 1995. A joint inversion algorithm to process geoelectric and surface wave seismic data. Part I: basic ideas, Geophysical Prospecting, 43, 2, 135–156, doi:10.1111/j.1365-2478.1995.tb00128.x
- Herrman, R. B., 1991. SURF: Surface Wave Inversion Program, Saint Louis University,
- Herrman, R. B. ve Al-Eqab, G. I., 1991. Surface wave inversion for shear velocity, Shear waves in marine sediments, Kluwer Academic Publisher,

- Hisada, Y., 1994. An efficient method for computing Green's functions for a layered half-space with sources and receivers at close depths, Bulletin of the Seismological Society of America, 84, 5, 1456–1472,
- Hisada, Y., 1995. An efficient method for computing Green's functions for a layered half-space with sources and receivers at close depths (part 2), Bulletin of the Seismological Society of America, 85, 4, 1080–1093,
- Horike, M., 1985. Inversion of Phase Velocity of Long-Period Microtremors to the S-Wave-Velocity Structure down to the Basement in Urbanized Areas, Journal of Physics of the Earth, 33, 2, 59–96, doi:10.4294/jpe1952.33.59
- Hunaidi, O., 1998. Evolution-based genetic algorithms for analysis of non-destructive surface wave tests on pavements, NDT & E International, 31, 4, 273–280, doi:10.1016/S0963-8695(98)00007-3
- Jegen, M. D., Hobbs, R. W., Tarits, P. ve Chave, A., 2009. Joint inversion of marine magnetotelluric and gravity data incorporating seismic constraints: Preliminary results of sub-basalt imaging off the Faroe Shelf, Earth and Planetary Science Letters, 282, 1–4, 47–55, doi:10.1016/j.epsl.2009.02.018
- Jin, X., Luke, B. ve Louie, J., 2006. Comparison of Rayleigh wave dispersion relations from three surface wave measurements in a complex-layered system, Proc. GeoCongress 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age.
- Johansen, H. K., 1975. An Interactive Computer/Graphic-Display-Terminal System for Interpretation of Resistivity Soundings, Geophysical Prospecting, 23, 3, 449–458, doi:10.1111/j.1365-2478.1975.tb01541.x
- Johansen, H. K., 1977. A Man/Computer Interpretation System for Resistivity Soundings Over a Horizontally Stratified Earth, Geophysical Prospecting, 25, 4, 667–691, doi:10.1111/j.1365-2478.1977.tb01196.x
- Kausel, E., 1981. An explicit solution for the green functions for dynamic loads in layered media, , Massachusetts Institute of Technology Press.
- Kausel, E. ve Roësset, J. M., 1981. Stiffness matrices for layered soils, Bulletin of the Seismological Society of America, 71, 6, 1743–1761,
- Kennett, B. L. N., 1974. Reflections, rays, and reverberations, Bulletin of the Seismological Society of America, 64, 6, 1685–1696,
- Kennett, B. L. N., 2011. Seismic Wave Propagation in Stratified Media, Acton, A.C.T.: ANU E Press,
- Kennett, B. L. N. ve Kerry, N. J., 1979. Seismic waves in a stratified half space, Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 57, 3, 557–583, doi:10.1111/j.1365-246X.1979.tb06779.x

- Keskin, S., 2007. Güneydoğu (GD) Karadeniz sahil kesiminin (Trabzon yöresi) denizel taraçaları ve aktif tektoniği, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Kis, M., 2002. Generalised Series Expansion (GSE) used in DC geoelectric–seismic joint inversion, Journal of Applied Geophysics, 50, 4, 401–416, doi:10.1016/S0926-9851(02)00167-2
- Koefoed, O., 1970. A Fast Method for Determining the Layer Distribution from the Raised Kernel Function in Geoelectrical Sounding, Geophysical Prospecting, 18, 4, 564–570, doi:10.1111/j.1365-2478.1970.tb02129.x
- Koefoed, O., 1980. Geosounding Principles: Resistivity Sounding Measurements, Amsterdam ; New York : New York: Elsevier Science Ltd,
- Komatitsch, D. ve Vilotte, J.-P., 1998. The spectral element method: An efficient tool to simulate the seismic response of 2D and 3D geological structures, Bulletin of the Seismological Society of America, 88, 2, 368–392,
- Kritikakis, G. S. ve Vafidis, A., 2011. Different Alternatives of Surface Waves Data Inversion. Applications on Environmental and Geotechnical Case Studies, 6th Congress of Balkan Geophysical Society, Budapest.
- Kumar, B. S., Anbazhagan, P. ve Sitharam, T. G., 2006. Development of Theoretical Dispersion Curves and Comparison with Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW), 13th Symposium on Earthquake Engineering, Roorke, December 18-20.
- Lai, C. G. ve Rix, G. J., 1998. Simultaneous Inversion of Rayleigh Phase Velocity and Attenuation for Near-Surface Site Characterization, PhD Thesis, Georgia Institute of Technology-School of Civil and Environmental Engineering, U.S.,
- Lamb, H., 1904. On the Propagation of Tremors over the Surface of an Elastic Solid, Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 203, 359-371, 1–42, doi:10.1098/rsta.1904.0013
- Liang, Q., Chen, C., Zeng, C., Luo, Y. ve Xu, Y., 2008. Inversion stability analysis of multimode Rayleigh-wave dispersion curves using low-velocity-layer models, Near Surface Geophysics, 6, 28, doi:10.3997/1873-0604.2007040
- Lines, L. R., Schultz, A. K. ve Treitel, S., 1988. Cooperative inversion of geophysical data, Geophysics, 53, 1, 8–20, doi:10.1190/1.1442403
- Loke, M. H. ve Barker, R. D., 1996. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion, Geophysical Prospecting, 44, 3, 499–523, doi:10.1111/j.1365-2478.1996.tb00162.x

- Louie, J. N., 2001. Faster, Better: Shear-Wave Velocity to 100 Meters Depth from Refraction Microtremor Arrays, Bulletin of the Seismological Society of America, 91, 2, 347–364, doi:10.1785/0120000098
- Luco, J. E. ve Apsel, R. J., 1983. On the Green's functions for a layered half-space. Part I, Bulletin of the Seismological Society of America, 73, 4, 909–929,
- Lysmer, J. ve Drake, L. A., 1972. A Finite Element Method for Seismology, Methods of Computational Physics: Seismology: Surface Waves and Earth Oscillations, 11, 181–215, New York: Academic press.
- Lysmer, J. ve Waas, G., 1972. Shear Waves in Plane Infinite Structures, Journal of the Engineering Mechanics Division, 98, 1, 85–105.
- Manglik, A. ve Verma, S. K., 1998. Delineation of sediments below flood basalts by joint inversion of seismic and magnetotelluric data, Geophysical Research Letters, 25, 21, 4015–4018, doi:10.1029/1998GL900063
- Manolis, G. D. ve Beskos, D. E., 1988. Boundary Element Methods in Elastodynamics, Unwin Hyman Press.
- Maraschini, M. ve Foti, S., 2010. A Monte Carlo multimodal inversion of surface waves, Geophysical Journal International, 182, 3, 1557–1566, doi:10.1111/j.1365-246X.2010.04703.x
- Marquardt, D. W., 1963. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters, Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, 11, 2, 431–441,
- Martínez, M. D., Lana, X., Olarte, J., Badal, J. ve Canas, J. A., 2000. Inversion of Rayleigh wave phase and group velocities by simulated annealing, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 122, 1–2, 3–17, doi:10.1016/S0031-9201(00)00183-7
- McMechan, G. A. ve Yedlin, M. J., 1981. Analysis of dispersive by wave field transformation, Geophysics, 46, 6, 869–874, doi:10.1190/1.1441225
- Meju, M. A., 1992. An effective ridge regression procedure for resistivity data inversion, Computers & Geosciences, 18, 2–3, 99–118, doi:10.1016/0098-3004(92)90079-7
- Meju, M. A., Gallardo, L. A. ve Mohamed, A. K., 2003. Evidence for correlation of electrical resistivity and seismic velocity in heterogeneous near-surface materials, Geophysical Research Letters, 30, 7, 1373, doi:10.1029/2002GL016048
- Menke, W., 1989. Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory, Academic Press,
- Menke, W., 2014. Review of the Generalized Least Squares Method, Surveys in Geophysics, 36, 1, 1–25, doi:10.1007/s10712-014-9303-1

- Moorkamp, M., Jones, A. G. ve Fishwick, S., 2010. Joint inversion of receiver functions, surface wave dispersion, and magnetotelluric data, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 115, B4, doi:10.1029/2009JB006369
- Nath, S. K., Shahid, S. ve Dewangan, P., 2000. SEISRES — a Visual C++ program for the sequential inversion of seismic refraction and geoelectric data, Computers & Geosciences, 26, 2, 177–200, doi:10.1016/S0098-3004(99)00086-2
- Nazarian, S., Stokoe II, K. H., Kenneth, H. ve Hudson, W. R., 1983. Use of Spectral Analysis of Surface Waves Method for Determination of Moduli and Thicknesses of Pavement Systems, Transportation Research Record.
- Nazarian, S., Yuan, D. ve Baker, M. R., 1995. Rapid Determination of Pavement Moduli with Spectral-Analysis-of-Surface-Waves Method (No: 1243-1), University of Texas at El Paso (UTEP)- Center for Highway Materials Research,
- Nyman, D. C. ve Landisman, M., 1977. VES dipole-dipole filter coefficients, Geophysics, 42, 5, 1037–1044, doi:10.1190/1.1440763
- O'Neill, D. J., 1975. Improved linear filter coefficients for application in apparent resistivity computations, Exploration Geophysics, 6, 4, 104–109,
- Parasnis, D. S., 2012. Principles of Applied Geophysics, Springer Science & Business Media,
- Park, C. B., Miller, R. D. ve Miura, H., 2002. Optimum field parameters of an MASW survey, SEG-J-Tokyo, 22-23.
- Park, C. B., Miller, R. D. ve Xia, J., 1996. Multi-channel Analysis of Surface Waves Using Vibroseis (MASWV), 66th SEG Annual Meeting, Society of Exploration Geophysicists.
- Park, C. B., Miller, R. D. ve Xia, J., 1997. Multi-channel analysis of surface waves (MASW) (No: 97-10), Kansas Geological Survey,
- Park, C. B., Miller, R. D. ve Xia, J., 1999. Multichannel analysis of surface waves, Geophysics, 64, 3, 800–808, doi:10.1190/1.1444590
- Park, C., Miller, R. D. ve Xia, J., 1998. Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record, SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1377–1380.
- Park, S. K. ve Van, G. P., 1991. Inversion of pole-pole data for 3-D resistivity structure beneath arrays of electrodes, Geophysics, 56, 7, 951–960, doi:10.1190/1.1443128
- Pekeris, C. L., 1940. Direct method of interpretation in resistivity prospecting, Geophysics, 5, 1, 31–42, doi:10.1190/1.1441791
- Press, F., 1968. Earth models obtained by Monte Carlo Inversion, Journal of Geophysical Research, 73, 16, 5223–5234, doi:10.1029/JB073i016p05223

- Rayleigh, L., 1885. On Waves Propagated along the Plane Surface of an Elastic Solid, Proceedings of the London Mathematical Society, 1, 4–11, doi:10.1112/plms/s1-17.1.4
- Richart, J. F. E., Hall, J. J. R. ve Woods, R. D., 1970. Vibrations of Soils and Foundations, Englewood Cliffs, N.J: Prentice Hall,
- Richwalski, S. M., Picozzi, M., Parolai, S., Milkereit, C., Baliva, F., Albarello, D., ve Zschau, J., 2007. Rayleigh wave dispersion curves from seismological and engineering-geotechnical methods: a comparison at the Bornheim test site (Germany), Journal of Geophysics and Engineering, 4, 4, 349, doi:10.1088/1742-2132/4/4/001
- Rix, G. J. ve Leipski, E. A., 1991. Accuracy and Resolution of Surface Wave Inversion, Recent Advances in Instrumentation, Data Acquisition and Testing in Soil Dynamics, 17-32.
- Rodriguez, J. C., 1978. Inversion of TDEM (near-zone) sounding curves with catalog interpolation, Quarterly Colorado School of Mines, 73, 57–69.
- Roma, V., 2001. Soil Properties and Site Characterization by means of Rayleigh Waves, PhD thesis, Politecnico di Torino, Italy.
- Roma, V., Hebel, G., Rix, G. ve Lai, C. G., 2002. Geotechnical soil characterization using fundamental and higher Rayleigh modes propagation in layered media, XII European Conference on Earthquake Engineering, London, 9–13.
- Ryden, N., Park, C. B., Ulriksen, P. ve Miller, R. D., 2004. Multimodal Approach to Seismic Pavement Testing, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130, 6, 636–645, doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:6(636)
- Sasaki, Y., 1994. 3-D resistivity inversion using the finite-element method, Geophysics, 59, 12, 1839–1848, doi:10.1190/1.1443571
- Savvaïdis, A., Kritikakis, G., Papadopoulos, I., Papadopoulos, N., Dikmen, U., Mangriotis, M. D. ve Vafidis, A., 2014. Different Processing and Inversion Methods for Resolving Vs Profiles in Engineering Geophysics Using Surface Wave Data, Near Surface Geoscience-20th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Athens.
- Schwab, F. ve Knopoff, L., 1970. Surface-wave dispersion computations, Bulletin of the Seismological Society of America, 60, 2, 321–344,
- Scott, J. B., Barker, R. D. ve Peacock, S., 2000. Combined seismic refraction and electrical imaging, 6th EAGE/EEGS Meeting, doi:10.3997/2214-4609.201406176

- Scott, J. B., Clark, M., Rennie, T., Pancha, A., Park, H. ve Louie, J. N., 2004. A shallow shear-wave velocity transect across the Reno, Nevada, area basin, Bulletin of the Seismological Society of America, 94, 6, 2222–2228,
- Senkaya, M. ve Karşlı, H., 2016. Joint inversion of Rayleigh-wave dispersion data and vertical electric sounding data: synthetic tests on characteristic sub-surface models, Geophysical Prospecting, 64, 1, 228–246, doi:10.1111/1365-2478.12289
- Senkaya, M. ve Karşlı, H., 2015. The Sensitivity Analysis as a Non-uniqueness Indicator in the Inversion of Rayleigh-wave Dispersion Curve, Near Surface Geoscience 2015 - 21st European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Eylül, Torino, ITALYA, 21, 1, doi:10.3997/2214-4609.201413743
- Sen, M. K. ve Stoffa, P. L., 2013. Global Optimization Methods in Geophysical Inversion, Cambridge University Press,
- Seshunarayana, T. ve Sundararajan, N., 2004. Multichannel analysis of surface waves (MASW) for mapping shallow subsurface layers—a case study, Jabalpur, India. 5th International Conference on Petroleum Geophysics, Hyderabad, India, 642-646
- Shtivelman, V., 1999. Using surface waves for estimating shear wave velocities in the shallow subsurface onshore and offshore Israel, 5th EEGS-ES.
- Slichter, L. B., 1933. The interpretation of the resistivity prospecting-method for horizontal structures, Transactions American Geophysical Union, 14, 1, 129–129, doi:10.1029/TR014i001p00129-1
- Socco, L. V. ve Boiero, D., 2008. Improved Monte Carlo inversion of surface wave data, Geophysical Prospecting, 56, 3, 357–371, doi:10.1111/j.1365-2478.2007.00678.x
- Socco, L. V., Boiero, D., Foti, S. ve Wisén, R., 2009. Laterally constrained inversion of ground roll from seismic reflection records, Geophysics, 74, 6, G35–G45, doi:10.1190/1.3223636
- Song, Y., Castagna, J., Black, R. ve Knapp, R., 1989. Sensitivity of near-surface shear-wave velocity determination from rayleigh and love waves, SEG Technical Program Expanded Abstracts-1989, 509–512.
- Spitzer, K. ve Kümpel, H.-J., 1997. 3D FD resistivity modelling and sensitivity analyses applied to a highly resistive phonolitic body, Geophysical Prospecting, 45, 6, 963–982, doi:10.1046/j.1365-2478.1997.710306.x
- Stefanescu, S., Schlumberger, C. ve Schlumberger, M., 1930. Sur la distribution électrique potentielle autour d'une prise de terre ponctuelle dans un terrain à couches horizontales, homogènes et isotropes, Journal de Physique et le Radium, 1, 4, 132–140, doi:10.1051/jphysrad:0193000104013200

- Stokoe II, K. H. ve Nazarian, S., 1983. Effectiveness of ground improvement from spectral analysis of surface waves, 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 81-95.
- Strobbia, C., 2003. Surface wave methods: acquisition, processing and inversion, PhD Thesis, Politecnico di Torino, Italy,
- Takeuchi, H. ve Saito, M., 1972. Seismic surface waves: Methods in computational physics-Seismology: Surface Waves and Earth Oscillations, 217–295, Academic Press.
- Tarantola, A., 2005. Inverse Problem Theory and Methods for Model Parameter Estimation. Other Titles in Applied Mathematics, Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Thelen, W. A., Clark, M., Lopez, C. T., Loughner, C., Park, H., Scott, J. B., ve Louie, J. N., 2006. A Transect of 200 Shallow Shear-Velocity Profiles across the Los Angeles Basin, Bulletin of the Seismological Society of America, 96, 3, 1055–1067, doi:10.1785/0120040093
- Thomson, W. T., 1950. Transmission of Elastic Waves through a Stratified Solid Medium, Journal of Applied Physics, 21, 2, 89–93, doi:10.1063/1.1699629
- Tselentis, G. A. ve Delis, G., 1998. Rapid assessment of S-wave profiles from the inversion of multichannel, Annals of Geophysics, 41, 1, doi:10.4401/ag-3788
- Vozoff, K. ve Jupp, D. L. B., 1975. Joint Inversion of Geophysical Data, Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 42, 3, 977–991, doi:10.1111/j.1365-246X.1975.tb06462.x
- Wathelet, M., Jongmans, D. ve Ohrnberger, M., 2004. Surface-wave inversion using a direct search algorithm and its application to ambient vibration measurements, Near surface geophysics, 2, 4, 211–221,
- Werthmüller, D., Ziolkowski, A. ve Wright, D., 2013. Background resistivity model from seismic velocities, Geophysics, 78, 4, E213–E223, doi:10.1190/geo2012-0445.1
- Xia, J., Miller, R. D. ve Park, C. B., 1999. Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves, Geophysics, 64, 3, 691–700, doi:10.1190/1.1444578
- Xia, J., Miller, R. D., Park, C. B. ve Ivanov, J., 2000. Construction of 2-D vertical shear-wave velocity field by the multichannel analysis of surface wave technique, Proceedings of the symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems, 20-24.
- Xia, J., Miller, R. D. ve Xu, Y., 2008. Data-resolution Matrix and Model-resolution Matrix for Rayleigh-wave Inversion Using a Damped Least-squares Method, Pure and Applied Geophysics, 165, 7, 1227–1248, doi:10.1007/s00024-008-0364-2

- Xia, J., Shen, C. ve Xu, Y., 2013. Near-surface shear-wave velocities and quality factors derived from high-frequency surface waves, The Leading Edge, 32, 6, 612–618, doi:10.1190/tle32060612.1
- Xia, J., Xu, Y., Miller, R. D. ve Chen, C., 2006. Estimation of Elastic Moduli in a Compressible Gibson Half-space by Inverting Rayleigh-wave Phase Velocity, Surveys in Geophysics, 27, 1, 1–17, doi:10.1007/s10712-005-7261-3
- Yılmaz, C., Ben, C., Bener, B., Kandemir, R., Karşlı, O. ve Bak, T. K., 2005. Trabzon Kıyı Bölgesinin Pliyo-Kuvaterner Stratigrafisi, Türkiye Kuvaterner Sempozyumu, Haziran, İstanbul, Bildiriler Kitabı 111-117.
- Yılmaz, Ö., 2001. Seismic Data Analysis, Investigations in Geophysics Series, SEG



ÖZGEÇMİŞ

Mustafa Şenkaya 1985 Gaziantep’ de doğdu. İlköğretim ve lise eğitimini İstanbul’da tamamladı. 2007 yılında KTÜ Jeofizik Mühendisliği bölümünden bölüm birinciliği ve onur belgesi ile mezun oldu. 2009 yılında aynı bölümde Araştırma Görevlisi olarak çalışmalarına başladı ve 2010 yılında evlendi, aynı sene KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsün’ deki Yüksek Lisans çalışmalarını yüksek onur belgesi ile tamamladı. 2010 yılından itibaren sürdürdüğü Doktora çalışmaları kapsamında Dünya’nın sayılı üniversitelerinden olan Politecnico di Torino (İtalya)’ da misafir araştırmacı olarak bulundu. Yanı sıra, ERASMUS programı dâhilinde University of Miskolc (Macaristan), Universitat de Barcelona (İspanya) da çalışmalar yaptı. Dünyanın yer bilimleri dalında sayılı meslek birliklerinden SEG ve EAGE’ nin birçok kongresine katılmış, çalışmalar sunmuş ve saha çalışmalarına kabul edilmiştir. Bilginin paylaştıkça arttığına inanan Mustafa Şenkaya, öğrenmeye ve paylaşmaya devam etmektedir. Seçili bazı yayınları aşağıda verilmiştir.

Senkaya, M. ve Karsli, H., 2016, The Joint Inversion of Rayleigh-Wave Dispersion Curve with Vertical Electric Sounding Data: Synthetic Applications on Characteristic Sub-Surface Models, *Geophysical Prospecting*, 64, 1, 228-246, DOI: 10.1111/1365-2478.12289

Vanlı Senkaya, G., Karslı, H., **Senkaya, M.** ve Güney R., 2015, Imaging of Landslide Deposits around Uzungöl Lake (Trabzon- Turkey) by Refraction Tomography and MASW (EG08), SEG - 3rd International Conference on Engineering Geophysics (ICEG 2015), “**Best Student Paper**”

Senkaya, M. ve Karsli, H., 2015, The Sensitivity Analysis as a Non-uniqueness Indicator in the Inversion of Rayleigh-wave Dispersion Curve, Near Surface Geoscience 2015 - 21st European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, DOI: 10.3997/2214-4609.201413743

Senkaya, M. ve Karsli, H., 2014, An Approach to Pick First Arrival Time by Semi-Automatically: Cross Correlation Technique (CCT), *Earth Sciences Research Journal*, 18, 2, 107-113.

Senkaya, M. ve Karsli, H., 2014, 1D Joint inversion of Rayleigh Fundamental Mode and Electric Sounding Curves-Synthetic Tests, 20th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Athens-Greece, presentation code: Tu Verg 08.

Karsli, H., Güney, R. ve **Senkaya, M.**, 2012, High Resolution Deconvolution by Combining Fx Filtering and Cauchy Regularization, Saint Petersburg 2012, Russia

Karsli, H., **Senkaya, M.** ve Güney, R., 2013, Contribution of Simplified Surface Waveform Calculation to Separate Dispersion Curves in MASW, 7th Congress of the Balkan Geophysical Society.

Senkaya, M. ve Karsli, H., 2012, First Arrival Picking in Seismic Refraction Data by Using Cross-Correlation Technique, *The Chamber of Geophysical Engineers of Turkey Journal*, 16, 31-41, in Turkish.