

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇOK-KANALLI YÜZEY DALGASI VERİSİNİN**  
**TERS-ÇÖZÜM TEKNİKLERİ İLE ÇOK SIĞ**  
**YAPILARIN ARAŞTIRILMASI**

**Çağrı ÇAYLAK**

**Temmuz, 2009**  
**İZMİR**

**ÇOK-KANALLI YÜZEY DALGASI VERİSİNİN  
TERS-ÇÖZÜM TEKNİKLERİ İLE ÇOK SIĞ  
YAPILARIN ARAŞTIRILMASI**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Doktora Tezi**

**Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Jeofizik Anabilim Dalı**

**Çağrı ÇAYLAK**

**Temmuz, 2009**

**İZMİR**

## DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

**ÇAĞRI ÇAYLAK**, tarafından **PROF. DR. COŞKUN SARI** yönetiminde hazırlanan “**ÇOK-KANALLI YÜZEY DALGASI VERİSİNİN TERS-ÇÖZÜM TEKNİKLERİ İLE ÇOK SIĞ YAPILARIN ARAŞTIRILMASI**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Coşkun SARI

Yönetici

Prof. Dr. Günay ÇİFÇİ

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Doç. Dr. Emine KURPINAR (MISIRLI)

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Prof. Dr. Erdeniz ÖZEL

Jüri Üyesi

Doç. Dr. Hakan KARSLI

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Cahit HELVACI

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

## TEŞEKKÜR

Akademik çalışma hayatına girmem için beni yüreklendiren ve yönlendiren, çalışmamın her aşamasında bana yardımcı olan, bilgi ve desteğini benden esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Coşkun Sarı 'ya teşekkürlerimi sunarım.

Yard. Doç. Dr. Gökhan Göktürkler çalışmamın başından itibaren her aşamasında tecrübesiyle ve fikirleriyle tezime katkı sağlayan ve eleştirilerine başvurduğum çok değerli bir insandır, en sıkıntılı dönemlerimde hiçbir zaman desteğini esirgememiştir, kendisine teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme komitemde bulunan Prof. Dr. Günay Çifçi ve Doç. Dr. Emine Kurpınar (Mısırlı) alçak gönüllü olmaları ve bilgileriyle örnek bir bilim insanlarıdır, olumlu eleştiri ve değerli katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Tezimin düzenlenmesi sırasında değerli zamanlarını ayırarak bilimsel konularda fikir veren ve yol gösteren hocalarım Doç. Dr. Hakan Karşlı, Prof. Dr. Mustafa Ergün ve Prof. Dr. Erdeniz Özel 'e teşekkürlerimi sunarım.

Arazi çalışmaları sırasında yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen Aslıhan Çelik, Arda İşçi, Eren Günüç, Yaşar Eser, Mehmet Karakoz, Yılmaz Kahyaoğlu, Okan Karakoz, Mehmet Baş, Ümit Baş 'a ve gerek tez çalışması gerekse günlük yaşamın getirdiği hüznü ve sevinci yaşadığımız tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Eğitimim süresince bana verdikleri maddi ve manevi destekleri ile her zaman yanımda olarak başarıya ulaşmamı sağlayan AİLEM 'e, ayrıca çalışmalarım süresince gösterdikleri sabır ve desteklerinden dolayı oğlum Berke'ye ve eşim Sultan Çaylak 'a şükranlarımı sunarım.

Çağrı ÇAYLAK

# ÇOK-KANALLI YÜZEY DALGASI VERİSİNİN TERS-ÇÖZÜM TEKNİKLERİ İLE ÇOK SIĞ YAPILARIN ARAŞTIRILMASI

## ÖZ

Bu tez kapsamında aktif kaynaklı çok-kanallı yüzey dalgası analizinin (Multichannel Analysis of Surface Wave, MASW) yüzeye-yakın yeraltı yapılarına uygulanabilirliği irdelenmiştir. S-dalgası hız profillerinin elde edilmesinde Rayleigh tipi yüzey dalgalarının dispersif özelliklerinden yararlanılmıştır. MASW yöntemi ile S-dalgası hız profillerinin elde edilmesi işlemi, çok-kanallı yüzey dalgası verilerinin toplanması, dispersiyon eğrisinin çıkarılması ve ters-çözüm işlemi olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, MASW sonuçlarının doğruluğu, veri toplanmasında kullanılan sismik kaynak, yakın açılım, jeofon aralığı ve jeofon frekansı gibi uygun parametre seçimine bağlıdır. Bu amaç için parametre seçimi, Magnesia antik kentinde yapılan arazi çalışmalarıyla irdelenmiştir. Deneme sonuçları; siğ yeraltı yapılarının araştırılmasında yakın açılım uzaklığının jeofon aralığının yaklaşık üç katı olmasının uygun olacağını ve farklı yakın açılım uzaklıkları için elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında 14 Hz 'lik jeofon kullanımının sismik kaynak ve jeofon aralığı dikkate alındığında 4,5 Hz 'e göre daha başarılı olduğunu göstermiştir. İkinci aşamada, zaman-uzaklık ortamında kaydedilen yüzey dalgası verisinden dispersiyon eğrisinin çıkarılmasında MASW hesaplama yöntemi kullanılmıştır. Üçüncü aşamada, dispersiyon eğrisinden S-dalgası hız profillerinin elde edilmesinde yerel (Levenberg-Marquardt) ve global (Genetik Algoritma) optimizasyon yöntemleri kullanılmıştır. Ayrıca çalışmada, yerel ve global algoritmaların çözümünde karşılaşılan sorunları gidermek amacıyla her iki algoritmanın belli başlı özellikleri kullanılarak birleştirildiği Melez optimizasyon algoritması geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, Melez ters-çözüm yönteminin klasik yerel ve global optimizasyon yaklaşımından hesaplama olarak daha hızlı ve verimli olduğunu göstermiştir.

**Anahtar sözcükler:** Çok-kanallı yüzey dalgası analizi, Levenberg-Marquardt, Genetik Algoritma, Melez, Optimizasyon, Dispersiyon, S-dalgası hız profili.

# INVESTIGATION OF VERY SHALLOW STRUCTURES WITH THE INVERSION TECHNIQUES OF MULTICHANNEL SURFACE WAVE DATA

## ABSTRACT

In this thesis study, the applicability of the multichannel active surface wave analysis (MASW) to the near surface structures was investigated. Dispersive properties of the Rayleigh type surface waves were exploited to obtain S-wave velocity profiles. The process of obtaining the S-wave velocity profiles with the MASW was achieved in three stages as collection of data of multichannel surface waves, determination of dispersion curve and inversion. Firstly, the accurateness of MASW results depends on the appropriate selections of parameters including seismic source used in the data collection, near offset spread, geophone separation and geophone frequency. Parameter selection for this purpose was investigated with the experimental measurements in the antique town of Magnesia. The experimental results indicated that offset distance which was three times as the geophone offset was appropriate for shallow underground structures, and the results with different near offset distances indicated that use of 14 Hz geophone was more successful than 4.5 Hz geophone when seismic source and geophone separation were considered. Secondly, MASW calculation method was used to obtain the dispersion curves from the surface wave data recorded in the time-distance domain. Thirdly, the local (Levenberg-Marquardt) and global (Genetic Algorithm) optimization methods were used to obtain S-wave velocity profiles. Also, a Hybrid optimization method has been developed in this study to eliminate the problems which have been encountered in the solutions of the local and global algorithms. The results show that the Hybrid inversion method is more successful in calculations than the classical local and global optimization approaches.

**Keywords:** Multi-channel surface wave analysis, Levenberg-Marquardt, Genetic Algorithm, Hybrid, Optimization, Dispersion, S-wave velocity profile.

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ .....	iv
ABSTRACT.....	v
<b>BÖLÜM BİR – GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Çalışmanın Amacı .....	1
1.2 Çalışmanın İçeriği .....	4
<b>BÖLÜM İKİ – YÜZEY DALGALARI.....</b>	<b>6</b>
2.1 Yüzey Dalgalarının Oluşumu .....	6
2.2 Cisim ve Yüzey Dalgalarının Özellikleri .....	6
2.3 Dispersiyon – Grup Hızı – Faz Hızı.....	9
2.4 Homojen Sonsuz Elastik Bir Ortamda Cisim Dalgaları.....	11
2.4.1 Hareket Denklemleri.....	11
2.4.2 Dalga Denklemleri.....	14
2.5 Homojen Yarı-Sonsuz Bir Ortamda Rayleigh Dalgaları.....	16
2.5.1 Dalga Denklemleri.....	16
<b>BÖLÜM ÜÇ – DÜZ MODELLEME.....</b>	<b>25</b>
3.1 Dinamik Sıkılık Matrisi.....	25
3.2 En-Küçük Mutlak Özdeğer ve Tekillik.....	28
3.3 Rayleigh Dalgası Modlarının Hesabı .....	31

## **BÖLÜM DÖRT – YÜZEY DALGASI ANALİZ YÖNTEMLERİ..... 32**

4.1 YüzeY Dalgası Spektral Analiz (SASW) Yöntemi.....	32
4.2 Çok-Kanallı YüzeY Dalgası Analiz (MASW) Yöntemi.....	33
4.3 Dispersiyon Eğrisinin (Frekans - Faz Hızı Değişimi) Elde Edilmesi .....	35
4.4 Veri Toplama Sistemi .....	38

## **BÖLÜM BEŞ – TERS-ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ VE OPTİMİZASYON..... 41**

5.1 Genetik Algoritma Yöntemi.....	44
5.1.1 Genetik Algoritma Tekniği.....	46
5.1.2 Genetik Algoritma Operatörleri.....	49
5.1.2.1 Çözümlerin Kodlanması .....	49
5.1.2.2 İlk Topluluğun Oluşumu.....	50
5.1.2.3 Uygunluk Değeri.....	50
5.1.2.4 Çoğalma İşlemi .....	51
5.1.2.5 Çaprazlama İşlemi .....	53
5.1.2.6 Mutasyon İşlemi.....	55
5.1.2.7 Elitizm İşlemi.....	56
5.1.2.8 Yeni Kuşanın Oluşması ve Döngünün Durdurulması .....	56
5.1.3 Genetik Algoritmalarda Parametre Seçimi.....	56
5.2 Doğrusal Olmayan En-Küçük Kareler Problemi.....	58
5.2.1 İniş Yöntemleri .....	61
5.2.2 Sönüm Yöntemi .....	66
5.2.3 En-Dik İniş (Steepest Descent) Yöntemi.....	68
5.2.4 Gauss-Newton Yöntemi .....	69
5.2.5 Levenberg-Marquardt Yöntemi .....	71
5.3. Melez (Hybrid) Yöntem .....	74
5.4 Başlangıç Modelinin Oluşturulması .....	76



<b>BÖLÜM ALTI – UYGULAMALAR .....</b>	<b>77</b>
6.1 Kuramsal Çalışmalar .....	77
6.1.1 Kuramsal Modellerin Oluşturulması .....	78
6.1.2 Modellerin (Gürültüsüz) Çözüm İşlemleri .....	80
6.1.3 Veriye Gürültü Eklenmesi .....	88
6.1.4 Modellerin (Gürültülü) Çözüm İşlemleri .....	89
6.2 Arazi Çalışmaları.....	97
6.2.1 Çalışma Alanlarının Tanıtımı .....	97
6.2.1.1 Coğrafik Konumu .....	97
6.2.1.2 Genel Jeolojik Yapısı.....	98
6.2.1.3 Magnesia Antik Kenti .....	99
6.2.2 Test Modellerinin Oluşturulması ve Doğalgaz Boru Hattı.....	99
6.2.3 Kullanılan Aletler ve Veri Toplama Düzeneği.....	102
6.2.4 Alan-1 (Magnesia Antik Kenti).....	102
6.2.5 Alan-2 (Aydın-İzmir Doğalgaz Boru Hattı) .....	113
6.2.6 Alan-2 (Test Alanları) .....	119
6.2.7 Melez yöntemin Zhang ve diğer., (2003) tarafından yapılan arazi çalışma sonuçları ile karşılaştırılması .....	130
<b>BÖLÜM YEDİ – SONUÇLAR .....</b>	<b>133</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>135</b>

## BÖLÜM BİR

### GİRİŞ

#### 1.1 Tezin Amacı

Yüzeye-yakın malzemelerin elastik özellikleri ve bu özelliklerin sismik dalgaların yayılma hızlarına etkileri; yeraltı suyu araştırmaları ile mühendislik ve çevresel uygulamalarda ilgilenilen temel konulardandır. Geleneksel olarak, yüzeye-yakın yeraltı tabakalarının görüntülenmesi için tasarlanan çok-kanallı sismik cisim (P ve S) dalgalarının incelenmesinde yüzey dalgaları gürültü olarak hesaba katılmaktadır (Steeple ve Miller, 1990). Buna karşın, yüzey dalgaları frekans-bağımlı özellikleri nedeniyle yüzeye-yakın malzemelerin elastik özelliklerini belirlemek için kullanılmaktadır (Jones, 1958; Richart ve diğer., 1970; Nazarian ve diğer., 1983, 1984; Malagnini ve diğer., 1993; Stokoe ve diğer., 1994; Tokimatsu, 1995; Park ve diğer., 1998; Bergstrom, 1999; Park ve diğer., 1999; Miller ve diğer., 1999; Xia ve diğer., 2000; Liu ve diğer., 2000; Satoh ve diğer., 2001; Xia ve diğer., 2002; Kudo ve diğer., 2002; Okada, 2003). Yüzey dalgalarının dispersif özelliklerinden yararlanılarak yeraltındaki tabakalara ait S-dalgası hız profilleri elde edilir.

Sismik dalgalar, yerkürenin yüzeyinde veya yüzeye-yakın olduğu zaman, hem cisim (P ve S) dalgaları hem de yüzey (Rayleigh ve Love) dalgaları meydana gelir. Rayleigh dalgaları, P ve  $S_V$  dalgalarının etkileşiminin bir sonucudur ve P- tipi dalga kaynağı kullanıldığında oluşan toplam sismik enerjinin üçte ikisinden daha fazlasına sahip olmaktadır (Heisey ve diğer., 1982). Stokoe ve Nazarian (1983) ve Nazarian ve diğer. (1983) yüzeye-yakın S-dalgası hız profillerini oluşturmak için Rayleigh tipi yüzey dalgalarının dispersiyon (frekans-bağımlı faz hızı) eğrilerini analiz eden ve yüzey dalgalarının spektral analizi (Spectral Analysis of Surface Waves, SASW) adı verilen bir yüzey dalgası yöntemini tanıtmışlardır. Bu yöntem, bir alıcı çifti ile kaydedilen ve darbeli bir kaynak ile oluşturulan Rayleigh dalgasının spektral analizini kullanmaktadır. Alıcı çifti, veri kayıt süresince elde edilen dalga boyu hesaplarına dayandırılarak tekrar tekrar yapılandırılır. Veri, dispersiyon eğrilerini oluşturmak için frekans ortamında analiz edilir. SASW yöntemi geniş çapta bir çok

mühendislik projelerinde uygulanmıştır (Sanchez-Salinerro ve diğer., 1987; Sheu ve diğer., 1988; Stokoe ve diğer., 1989; Gucunski ve Woods, 1991; Stokoe ve diğer., 1994). SASW 'a alternatif olarak geliştirilen ve bir defada birden fazla alıcı ile kayıt alma avantajını sağlayan yüzey dalgaların çok-kanallı analizi (Multichannel Analysis of Surface Waves, MASW), yüzey dalgalarının spektral analizinde karşılaşılan problemleri gideren hızlı ve güvenilir bir yöntem olarak karşımıza çıkmıştır. Yüzey dalgalarının çok-kanallı analizinde, temel mod Rayleigh dalgalarının cisim dalgalarından ve diğer yüksek modlu yüzey dalgalarından ayrılmasını sağlayan çok-kanallı bir dizilim kullanılmaktadır (Park ve diğer., 1999).

S-dalgası hız profillerinin belirlenmesi amacıyla yapılan arazi uygulamalarında, sismik yansıma / kırılma ve sondaj teknikleri yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir. Sismik yöntemler daha çok yatay ve yataya yakın katmanlarda başarılı sonuçlar vermekle birlikte; petrol aramaları, yer kabuğunun derin kısımlarının modellenmesi ve mühendislik jeofiziği uygulamalarında da kullanılmaktadır. Yerleşim alanlarında uygulanan sismik kırılma / yansıma yöntemleri için kullanılan sinyal kaynaklarının sınırlı olması, yani düşük sinyal/gürültü oranı, bu yöntemlerin kullanımını olumsuz olarak etkilemektedir. Geleneksel sismik kırılma yönteminde karşılaşılan ve hız terslenmesi olarak tanımlanan yüksek hızlı bir katmanın altında düşük hızlı katmanın bulunması, hedeflenen derinliğe ulaşamaması ve sondaj tekniklerinde maliyetin fazla olması nedeniyle çok-kanallı yüzey dalgası analiz yöntemi S-dalgası hız profillerinin belirlenmesinde sıkça kullanılmaktadır.

Yüzey dalgası yöntemleri, aktif ve pasif kaynaklı olmak üzere iki türlü uygulanabilir. Aktif kaynaklı yöntemler iyi sonuçlar üretmelerine rağmen iyi ve güçlü bir kaynağa ihtiyaç duyarlar. Bu yöntemlerin araştırma derinlikleri pasif kaynaklı yöntemlere göre daha azdır. Buna karşın, yerin doğal titreşim kaydını yapan pasif kaynaklı yöntemlerle daha derin yapılar araştırılabilir. Aktif ve pasif kaynaklı yüzey dalgası yöntemlerinin tümünde amaçlanan, incelenen alana ait dispersiyon eğrisini ve bundan yararlanarak ortama ait bir boyutlu (1B) tabaka kalınlıkları ve S-dalgası hız profillerini elde etmektir.

Bu çalışmada, aktif çok-kanallı yüzey dalgası analizinin (MASW) çok-sığ derinliklerdeki yapılara uygulanabilirliği ve çözüm gücü araştırılacaktır. Yöntemin günümüze değin bu derece çok-sığ derinliklere (0-4m) uygulanmamış olması, uygulanabilirliği açısından eksiklik olarak nitelendirilebilir. Yüzey dalgası analiz yönteminin uygulanabilirliği ve sonucun doğruluğu sismik kaynak, yakın açılım, jeofon aralığı ve jeofon frekansı gibi parametrelere bağlıdır.

S-dalgası hızlarını tahmin etmek için kullanılan dispersiyon eğrilerinin ters-çözüm işlemi, iki temel algorithmada gerçekleştirilir. İlk algorithmada (düz çözüm), varsayılan model parametreleri kullanılarak, teorik dispersiyon verisi türetilir. İkinci algoritma (optimizasyon), ölçülen veriye uyumlu kuramsal model parametrelerini aramak için yinelemeli sayısal bir işlemdir. Geçmişten günümüze kadar karşılaşılan birçok jeofiziksel problemin çözülmesi amacıyla, değişik optimizasyon (en iyileme) teknikleri geliştirilip uygulanmıştır. Optimizasyon teknikleri uygulanış biçimine göre Yerel (deterministik) ve Global (stokastik, istatistiksel) olmak üzere iki ana grupta toplanabilir (Haataja, 1999). Bu çalışmada, Yerel optimizasyon yöntemlerinden Levenberg-Marquardt algoritması, Global yöntemlerden Genetik Algoritma incelenmiştir.

Jeofizik verilerinin değerlendirilmesinde geleneksel (türeve-dayalı) ters-çözüm yöntemleri (Gauss-Newton, Endik iniş (Steepest Descent), Levenberg-Marquardt, vb.) en çok kullanılan yöntemlerdir. Bu yöntemlerde, jeolojik ön bilgilere dayanarak ters-çözüm işlemine kullanıcı tarafından sunulan başlangıç model parametreleri üzerinde iyileştirme yapmakla yetinilir. Geleneksel ters-çözüm işlemlerinin başarısı işleme sokulan başlangıç parametreleri için doğru değerlerin seçilmesine ve verilerin içerdiği gürültü oranlarına oldukça bağlıdır. Geleneksel yöntemlerin ters-çözüm hesaplamalarında yerel en-küçük yapan değerlerde kalma olasılığı global en-küçük yapan değerlerin bulunmasında daha etkin yöntemlerin araştırılmasına yol açmış ve global optimizasyon yöntemlerinin kullanılmasına başlanmıştır. Genetik algoritmalar, geleneksel ters-çözüm yöntemlerinden daha etkili ve çözüm yaklaşımında yapılacak küçük değişikliklerle çözülebildiklerinden dolayı da daha esnektirler. Genetik algoritmalar arama ve optimizasyon için stokastik (istatistiksel) bir yöntemdir. Olasılık kurallarına göre çalışan genetik algoritmalar, amaç fonksiyonunun

türevlerini ve bir takım ek bilgileri değil, doğrudan amaç fonksiyonunun kendisini kullanırlar. Genetik algoritma da deterministik değil, rastlantısal geçiş kuralları kullanılır. Klasik optimizasyon yöntemlerinde bir tek çözüm elde edilmesine rağmen, Genetik algoritma çözümlerinde birkaç alternatif çözüm aynı anda elde edilebilmektedir. Diğer bir önemli üstünlükleri ise çözümlerden oluşan optimizasyon eş zamanlı incelemeleri ve böylelikle yerel optimum çözümlere takılmamalarıdır. Genetik algoritma yönteminde en iyi çözüme doğru ilerleme aşamasında çok geniş bir çözüm uzayının tanımlanarak taranması gerekmektedir. Bu işlem, yüksek sayıda yineleme ile hesaplama işlemlerini arttırır. Yerel ve global optimizasyon yöntemleri jeofizik problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılmakta ve yeraltı yapıların haritalanmasında başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Yerel ve global algoritmalar ile ilişkili temel sakınca, iyi bir başlangıç model parametreleri seçimi ve hesapsal işlemlerin fazlalılığıdır.

Bu çalışmada, iki algoritmanın birleştirildiği hem global hem de yerel optimizasyon yöntemlerinin eksikliklerini gidermek için Melez (hybrid) optimizasyon algoritması geliştirilmiştir. Jeofizik ters-çözüm işleminde Yerel ve global optimizasyon tasarımının birleştirilmesinde çeşitli araştırmacılar tarafından başarılı denemeler yapılmıştır (Cary ve Chapman, 1998; Porsani ve diğer., 1993; Stork ve Kusuma, 1992; Liu ve diğer., 1995). Önerilen hemen hemen bütün Melez algoritmaların hepsi, klasik global optimizasyon yaklaşımından hesapsal olarak daha hızlı ve verimli olduğu bulunmuştur. Böylece, Melez ters-çözüm yönteminin başarılı uygulamalarıyla jeolojik yapıların ve litolojinin daha iyi çözülmesi, iyi bir başlangıç modeli zorunluluğunun giderilmesi, ters-çözüm işleminin hesap maliyetini azaltması ve iyi bir model veya modeller elde edilmesi beklenir. Bunların hepsi, yeraltı malzeme özellikleri ve yapıları daha iyi tanımlamada çözüm gücümüzü geliştirir.

## 1.2 Tezin İçeriği

Çalışma, yüzeye-yakın yeraltı yapılarının haritalanmasında çok-kanallı yüzey dalgası analizi ile S-dalgası hız profillerinin çıkarıldığı, teori ve uygulama çalışmalarından oluşan 6 bölümden oluşmaktadır.

Bölüm 1, giriş bölümü olup, çalışmanın literatürdeki yerine değinilerek çalışmanın amacı ve içeriği ortaya konulmuştur.

Bölüm 2, Cisim (P ve S) ve yüzey (Rayleigh ve Love) dalgalarının özellikleri, Rayleigh dalgalarının oluşumu ve düşey yönde heterojen bir ortamda Rayleigh ve Cisim dalgalarıyla ilişkili dalga yayılım teorisinin anlatıldığı bölümdür. Cisim ve Yüzey dalgalarının hareket ve dalga denklemleri ifade edilmektedir.

Bölüm 3, Rayleigh dalgası modlarının çıkarılmasında, düz modelleme algoritması olarak En-küçük Mutlak Özdeğeri ve kuramsal model olarak Dinamik Sıklık Matrisinin anlatıldığı bölümdür. Ayrıca, tekillik sorununun çözümünü içermektedir.

Bölüm 4, yüzey dalgası analiz yöntemlerinin literatürdeki yerine değinilmiş, en sık kullanılan yüzey dalgası yöntemlerinden spektral analizi ve çok-kanallı yüzey dalgası analizi yöntemlerinin kullanım amaçları açıklanmıştır. Ayrıca dispersiyon (frekans-bağımlı faz hızı) eğrisinin elde edilmesi ve veri toplama sisteminden bahsedilmiştir.

Bölüm 5, S-dalgası hız profillerinin elde edilmesinde kullanılan optimizasyon yöntemlerini içermektedir. Yerel (Levenberg-Marquardt), Global (Genetik Algoritma) ve Melez (Levenberg-Marquardt - Genetik Algoritma birleşimi) yöntemlerinin teorik içeriği anlatılmıştır. Yöntemlerin sakıncalarından ve üstünlüklerinden bahsedilmiş, literatür bilgisi verilmiştir.

Bölüm 6, yüzeye-yakın yeraltı yapılarının haritalanmasında kullanılan ters-çözüm yöntemlerinin özelliklerinin ortaya çıkarılması amacıyla oluşturulan kuramsal ve arazi verileri uygulama sonuçlarını içermektedir. Ek olarak çalışma alanının konumu ve genel jeolojik yapısı kısaca açıklanmış, yüzeye-yakın yeraltı yapı modellerine benzer test modellerinin (gömülü prizma ve varil) oluşturulması anlatılmıştır.

## BÖLÜM İKİ YÜZEY DALGALARI

### 2.1 Yüzey Dalgalarının Oluşumu

Yüzey dalgaları ilk olarak 1885 yılında elastik yarı-sonsuz serbest bir yüzey boyunca yayılan dalgaların denklem çözümü olarak Lord Rayleigh tarafından ortaya atılmıştır (Rayleigh, 1885). Jeoteknik mühendisliğinde yüzey dalgaları son 50 yıldır yüzeye-yakın zeminlerin dinamik özelliklerini hesaplamak için kullanılmaktadır (Jones, 1958; Richart ve diğer., 1970; Nazarian, 1984; Stokoe ve diğer., 1994; Tokimatsu, 1995; Rix ve diğer., 2001; Okada, 2003). Yüzey dalgası yöntemleri yer yüzeyindeki farklı konumlarda Rayleigh dalgalarının düşey yönde ölçülen tanecik hareketlerine dayanır. Ölçülen hareketler dalgaların frekansına, ortamın özelliklerine ve kaynağın uzaklığına bağlıdır. Zeminlerin tanımlanmasında yüzey dalgası yöntemleri diğer yerinde (in-situ) sismik yöntemlerinden (yansıma ve kırılma) daha karmaşık bir veri işlem ve yorum gerektirdiğinden dolayı çok sağlıklı (robust) yöntemlerin geliştirilmesi önemlidir (Yoon, 2005). Yüzey dalgası yöntemlerinin ters-çözüm işlemlerinde Homojen, yön-bağımlı (izotropik) ve elastik tabakalardan oluşan tabakalı bir ortam, düşey yönde heterojen olan zemin profilleri için uygun bir model olarak kullanılır (Yoon, 2005).

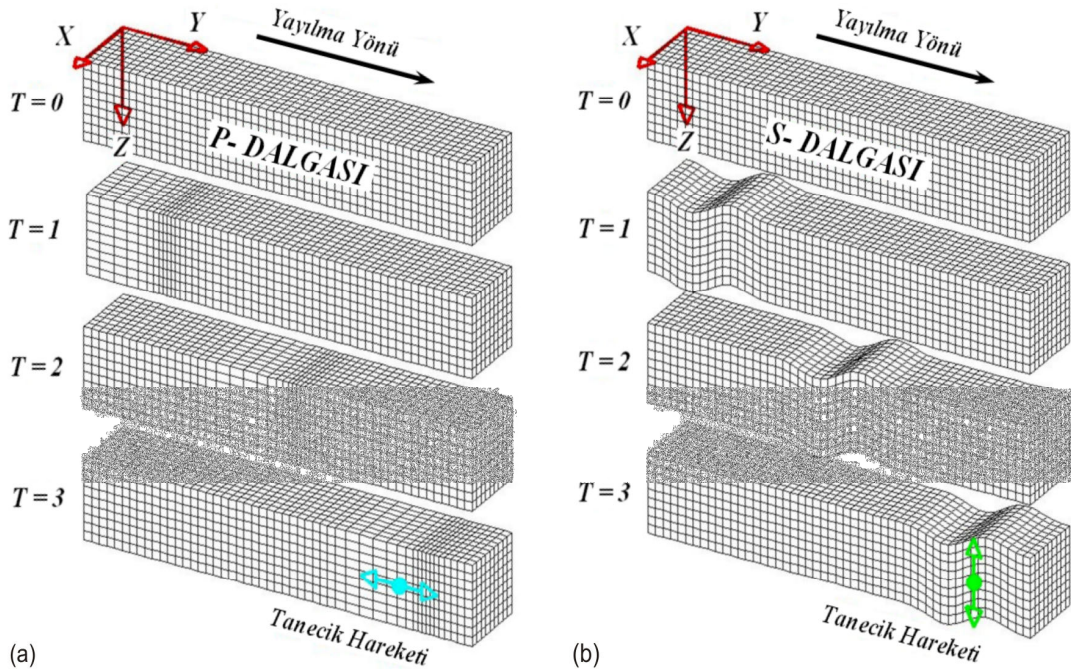
### 2.2 Cisim ve Yüzey Dalgalarının Özellikleri

Serbest bir yüzey ile sınırlanan ortamda yayılan sismik dalgalar, dalga yayılım karakteristiğine göre Cisim dalgaları (S-dalgası ve P-dalgası) ve Yüzey dalgaları (Rayleigh dalgası ve Love dalgası) olarak sınıflandırılır. Cisim dalgaları, sismik çalışmalarda en çok kullanılan dalgalardır, Sıkışma ve Makaslama dalgaları olarak iki çeşittir. Sıkışma dalgaları veya birincil dalgaların (P-dalgaları) tanecik hareketi dalga yayılım yönüne paraleldir (Şekil 2.1a). İkincil, makaslama veya kesme dalgalarının (S-dalgaları) tanecik hareketi dalga yayılım yönüne dik olan bir düzlem içerisindedir (Şekil 2.1b). S-dalgaları, tanecik hareketinin düzlemine uygun olarak, düşey yönde kutuplaşan makaslama ( $S_V$ ) ve yatay yönde kutuplaşan

makaslama ( $S_H$ ) dalgaları olarak ikiye ayrılır.  $S_H$ -dalgalarının tanecik hareketi yatay ve  $S_V$ -dalgalarının ki ise düşey düzlemde olur.

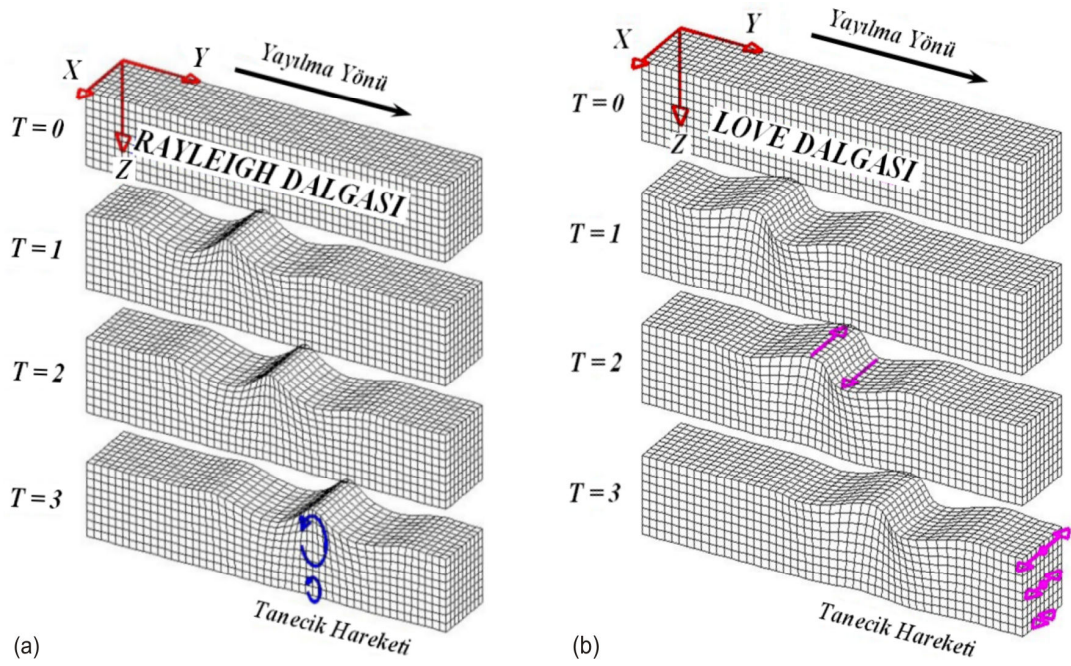
Yüzey dalgaları, cisim dalgalarından farklı olarak yerin serbest yüzeyi boyunca ve ara yüzeylerde P- ve S-dalgaları arasındaki etkileşim ile meydana gelir. Bir yüzey dalgasındaki tanecik hareketinin genliği derinlikle üstel olarak azalır, yani dalganın sahip olduğu enerjinin büyük kısmı bir dalga boyu içerisinde yer almaktadır. Yüzey dalgalarının enerjileri oldukça yüksektir (kaynak enerjisinin %60-70'i kadar) ve geleneksel sismik ölçümlerdeki bozucu etkileri (ground roll) veya deprem esnasında yıkıcı potansiyelleri ile bilinir.

Tekdüze yön-bağımlı ve yarı sonsuz bir ortamda bütün yüzey dalgaları aynı hızda seyahat etmektedir. Bununla birlikte, gerçek zemin koşullarında (çok tabakalı zeminlerde veya zeminin özelliklerinin derinlikle değiştiği durumlarda) yüzey dalgasının hızı dalga boyuna (veya frekansa) bağlıdır. Dalgaların göstermiş olduğu bu olaya dispersiyon ve bu dalgalara da dispersif dalgalar adı verilir. Bu temel özellik derinlik-hız profillerinin çıkarılmasında kullanılır.



Şekil 2.1 Cisim dalgalarının yayılması esnasındaki tanecik hareketleri. a) P-dalgası, b) S-dalgası (Braile, 2006).



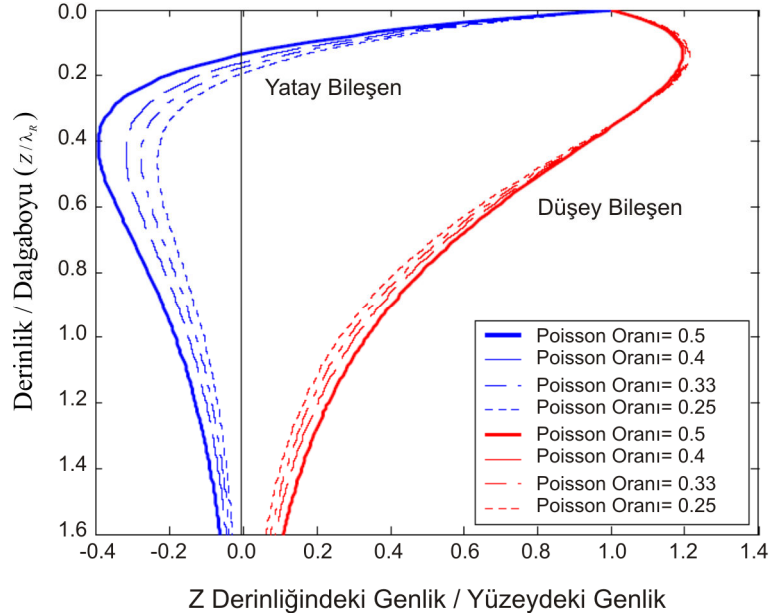


Şekil 2.2 Yüzeysel dalgaların yayılması esnasındaki tanecik hareketleri. a) Rayleigh dalgası, b) Love dalgası (Braile, 2006).

Yüzeysel dalgaları Love dalgaları ve Rayleigh dalgaları olmak üzere iki çeşittir. Love dalgaları, yatay yönde polarize olmuş  $S_H$  türü dalgaların kabuk içerisindeki tekrarlı yansımaların yapıcı girişiminden oluşur (Şekil 2.2b). Bu nedenle homojen ortamda oluşmazlar ve dispersif özellik gösterirler. Love dalgaları, P- ve  $S_H$ -dalgalarının etkileşiminden meydana gelir, tanecik hareketi Şekil 2.2b 'de gösterildiği gibi dalga yayılma yönüne dik, yüzeye paraleldir, yani yatay bileşene sahiptir. Love dalgaları, Rayleigh dalgalarından daha hızlıdır ve bu yüzden sismogramlarda daha önce görünür.

P- ve  $S_V$ -düzlem dalgalarının serbest yüzey üzerinde etkileşmesi ile oluşan, "Ground-roll" olarak da bilinen, Rayleigh dalgaları, Şekil 2.2a 'da gösterildiği gibi, hem düşey hem de yatay yönde yeryüzüne paralel olarak ilerleyen ve aksi yönde hareket eden elips şeklinde tanecik hareketine sahiptir (Puech ve diğer., 2004). Rayleigh dalgalarının hızı homojen ortamda S-dalgası hızından küçüktür. Derinlikle birlikte elastik özelliklerdeki değişimler dispersiyona neden olur. Jeoteknik mühendisliğinde kullanılan birçok yüzeysel dalgası yöntemi Rayleigh dalgalarının

soğurulmasına ve hızına dayanmaktadır. Homojen yarı-sonsuz bir ortamda Rayleigh dalgalarının derinliğe bağlı genlik değişimi Şekil 2.3 'de gösterilmektedir.



Şekil 2.3 Homojen yarı-sonsuz bir ortam boyunca yayılan Rayleigh dalgalarının derinliğe bağlı genlik değişimi (Richart ve diğer., 1970; Puech ve diğer., 2004).

### 2.3 Dispersiyon – Grup Hızı – Faz Hızı

Yüzey dalgaları yeraltında yayılırken, elastik hız ve yoğunluk süreksizliklerinin bulunduğu ortamlarda dalga boyu ve hızın sürekli değiştiği gözlenir (Dobrin, 1951). Bu özellik yüzey dalgalarında dispersiyon olarak bilinir ve dalga hızı, periyoda yani frekansa bağlı olarak değişim gösterir. Hızın derinlikle arttığı tabakalı ortamlarda uzun periyotlu dalgalar daha derine nüfus eder ve kısa periyotlu dalgalardan önce kaydedilir, bu olaya normal dispersiyon denir. Hızın derinlikle azalması durumunda kısa periyotlu dalgaların, uzun periyotlu dalgalardan önce kaydedilmesi işlemine ise ters dispersiyon denir. Hız derinlikle ne kadar çabuk artarsa, farklı periyotlar için yayılım hızı farkı da o kadar büyük olur. Yüzey dalgalarında dispersiyona bağlı faz hızı ve grup hızı olmak üzere iki tür hız bilgisi mevcuttur. Farklı fazlarda ilerleyen farklı frekanstaki dalgalar birbiri üzerine binerek dalga trenlerini oluştururlar. Tüm dalga treninin ilerleme hızına grup hızı ( $u$ ), bu dalga treni üzerinde yer alan herhangi

bir fazdaki noktanın ilerleme hızına ise faz hızı ( $c$ ) veya dalga hızı denir. Dispersiyonun olabilmesi için yarı-sonsuz bir ortamın üzerinde en az bir katmanın olması gerekir. Böyle bir ortamdaki faz hızı  $c(\omega)$  ve grup hızı  $u(\omega)$ ,

$$c(\omega) = \frac{\omega}{k(\omega)} \quad (2.1)$$

$$u(\omega) = \frac{\partial \omega}{\partial k(\omega)} \quad (2.2)$$

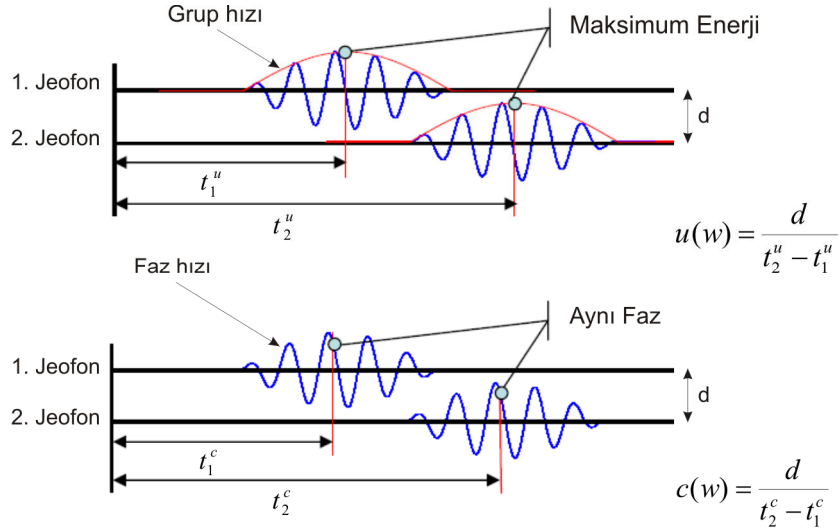
ile verilir,  $\omega = 2\pi f$  açısal frekansa ve dalga sayısına  $k$  bağlıdır. Dispersif bir dalganın yayılımında değişik frekanslarda farklı grup hızları olacaktır. Grup hızı ve faz hızı arasındaki ilişki,

$$u(\omega) = c(\omega) + k \frac{\partial c(\omega)}{\partial k} \quad (2.3)$$

bağıntısı ile verilen kısmi türev ile tanımlanır. Bu denklem dalga boyu ( $\lambda$ ) hesaba katılarak yazılırsa,

$$u(\omega) = c(\omega) - \lambda \frac{\partial c(\omega)}{\partial \lambda} \quad (2.4)$$

bağıntısı elde edilir. Faz hızının  $\lambda$  'ya göre türevi her zaman pozitifdir ve dolayısıyla grup hızı faz hızından küçüktür.



Şekil 2.4 Her bir frekans bileşeni için Grup hızı ve Faz hızı hesabı (Park ve diğer., 2007)

## 2.4 Homojen Sonsuz Elastik Bir Ortamda Cisim Dalgaları

### 2.4.1 Hareket Denklemleri

Homojen sonsuz elastik bir ortamda üç boyutlu (3B) hareket denklemi, Şekil 2.5 'de gösterildiği gibi sonsuz küçüklükteki bir elemanın dengesinin hesaba katılmasıyla elde edilir. Her bir elemanın şeklindeki ortalama gerilmenin şeklin merkezindeki gerilme ile gösterildiği varsayılarak x, y ve z yönlerinde meydana gelen kuvvetler elde edilebilir. Dengeyi korumak için meydana gelen kuvvetler, x yönündeki denge hesaba katılarak, Newton 'un ikinci kanununa göre atalet kuvvetleri ile aşağıdaki şekilde dengelenir.

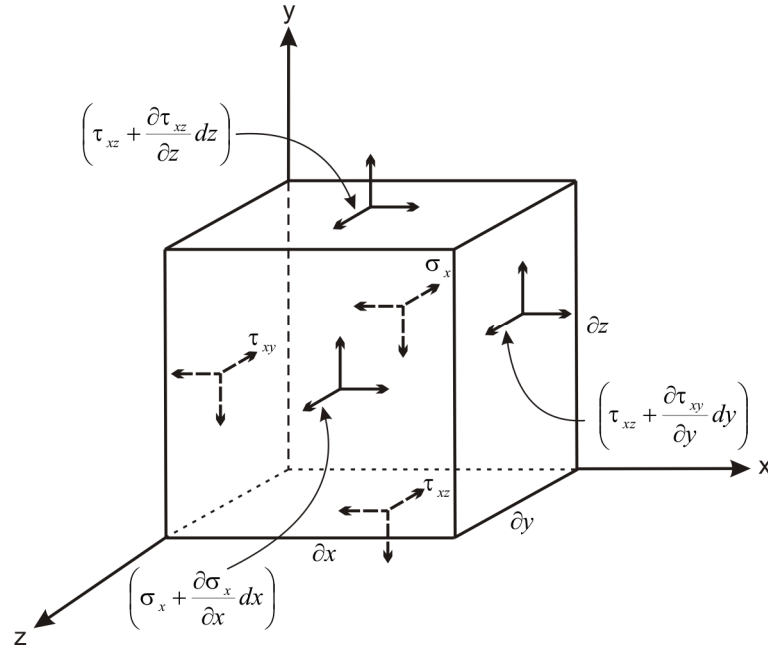
$$\begin{aligned}
 & (\sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx) dy dz - \sigma_x dy dz + (\tau_{xy} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} dy) dx dz - \tau_{xy} dx dz \\
 & + (\tau_{xz} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} dz) dx dy - \tau_{xz} dx dy = \rho dx dy dz \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

y ve z yönlerine göre aynı yöntemin tekrarlanmasıyla ve denklemlerin basitleştirilmesiyle, homojen elastik ortama uygun 3B hareket denklemi gerilmeler açısından aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \quad (2.6a)$$

$$\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \quad (2.6b)$$

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \quad (2.6c)$$



Şekil 2.5 Homojen elastik bir ortamda çok küçük sonsuz bir elamandaki gerilmeler (Supranata, 2006).

burada  $u$ ,  $v$  ve  $w$ ,  $x$ ,  $y$  ve  $z$  yönlerindeki yer değişimleridir. Yer değişim açısından 3B hareket denklemlerini elde etmek için gerilme ve deformasyon (2.7 nolu denklem) arasındaki ilişki ve deformasyon ve yer değişim (2.8 nolu denklem) arasındaki ilişki gereklidir:

$$\begin{aligned}
\sigma_x &= \lambda \bar{\varepsilon} + 2G\varepsilon_x & \tau_{xy} &= \tau_{yx} = G\gamma_{xy} \\
\sigma_y &= \lambda \bar{\varepsilon} + 2G\varepsilon_y & \tau_{yz} &= \tau_{zy} = G\gamma_{yz} \\
\sigma_z &= \lambda \bar{\varepsilon} + 2G\varepsilon_z & \tau_{zx} &= \tau_{xz} = G\gamma_{zx} \\
G &= \frac{E}{2(1+\nu)} & \lambda &= \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}
\end{aligned} \tag{2.7}$$

burada  $\bar{\varepsilon} = (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z)$ , hacimsel deformasyondur  $\lambda$  ve  $G$ , Lamé sabitidir ( $G$ , aynı zamanda makaslama modülü olarak bilinir)  $E$ , elastik modülüdür  $\nu$ , poisson oranıdır ve  $\bar{\omega}$ , her bir eksen etrafındaki rotasyondur.

$$\begin{aligned}
\varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} & \gamma_{xy} &= \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} & \bar{\omega}_x &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\
\varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial x} & \gamma_{yz} &= \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} & \bar{\omega}_y &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\
\varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial x} & \gamma_{zx} &= \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} & \bar{\omega}_z &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)
\end{aligned} \tag{2.8}$$

(2.6) denklemlerinin içerisine (2.7) ve (2.8) 'den uygun denklemlerin yerleştirilmesiyle yer değişim açısından 3B hareket denklemleri elde edilir.

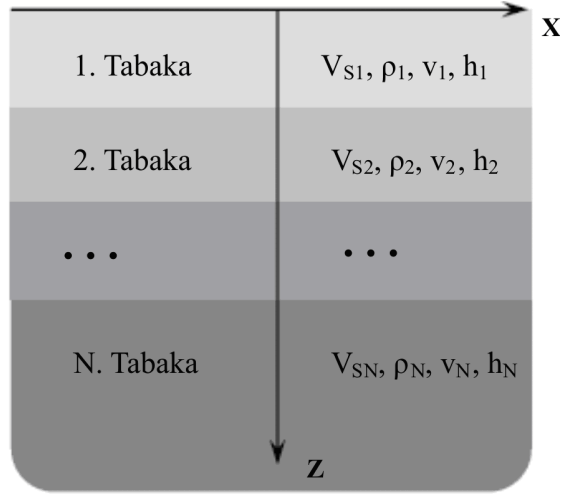
$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + G) \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial x} + G \nabla^2 u \tag{2.9a}$$

$$\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = (\lambda + G) \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial y} + G \nabla^2 v \tag{2.9b}$$

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = (\lambda + G) \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial z} + G \nabla^2 w \tag{2.9c}$$

burada  $\nabla^2$ , laplasyen işlecidir ve  $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$  bağıntısıyla tanımlanır.

### 2.4.2 Dalga denklemleri



Şekil 2.6 Homojen elastik tabakalı bir ortam modeli

Homojen elastik ortamdaki 3B hareket denklemleri, cisim dalgaları (P- dalgası ve S-dalgası) için dalga denklemlerinin türetilmesinde kullanılabilir. P- dalgaları için dalga denklemi  $x$ ,  $y$  ve  $z$  ile ilişkili olarak denklem (2.9) 'daki her bir denklemin ayrılmasıyla ve bütün sonuçların birlikte toplanmasıyla elde edilir. Bu yöntem aşağıdaki dalga denklemini sağlar.

$$\frac{\partial^2 \bar{\varepsilon}}{\partial t^2} = \frac{(\lambda + 2G)}{\rho} \nabla^2 \bar{\varepsilon} \quad (2.10)$$

$$\text{veya } \frac{\partial^2 \bar{\varepsilon}}{\partial t^2} = V_p \nabla^2 \bar{\varepsilon} \quad (2.11)$$

$$\text{burada } V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} \quad (2.12)$$

bağıntısı ile bulunur. Çünkü  $\bar{\varepsilon}$ , makaslama deformasyon ve rotasyonunu içermez. Bu dalga denklemi,  $V_p$  hızında ortam içerisinde seyahat eden bir genişleme veya sıkışma dalgası (P- dalgası) denklemini tanımlar. S- dalgaları için dalga denklemi,  $y$

ile ilişkili (2.9b) ve z ile ilişkili (2.9c) denklemlerin ayrılmasıyla ve  $\bar{\varepsilon}$  'yi yok etmek için bu iki denklemin çıkarılmasıyla elde edilir.

$$\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) = G \nabla^2 \left( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2.13)$$

(2.8) denkleminde rotasyon tanımı kullanılarak (2.13) denklemini yeniden düzenlenirse,

$$\frac{\partial^2 \bar{\omega}_x}{\partial t^2} = \frac{G}{\rho} \nabla^2 \bar{\omega}_x \quad (2.14)$$

$$\text{veya } \frac{\partial^2 \bar{\omega}_x}{\partial t^2} = V_S \nabla^2 \bar{\omega}_x \quad (2.15)$$

$$\text{elde edilir. Burada, } V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.16)$$

ile ifade edilir.  $\bar{\omega}_y$  ve  $\bar{\omega}_z$  açısından benzer denklemler, aşağıdaki aynı yöntemle türetilir. (2.10) denklemini,  $V_S$  'e eşit bir hızda ortam içerisinde seyahat eden S-dalgasını gösterir.  $V_P$  ve  $V_S$  arasındaki oran (2.12) ve (2.16) denklemlerinin karşılaştırılması ile elde edilir.

$$\frac{V_P}{V_S} = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{G}} = \sqrt{\frac{2 - 2\nu}{1 - 2\nu}} \quad (2.17)$$



## 2.5 Homojen Elastik Bir Yarı-uzayda Rayleigh Dalgaları

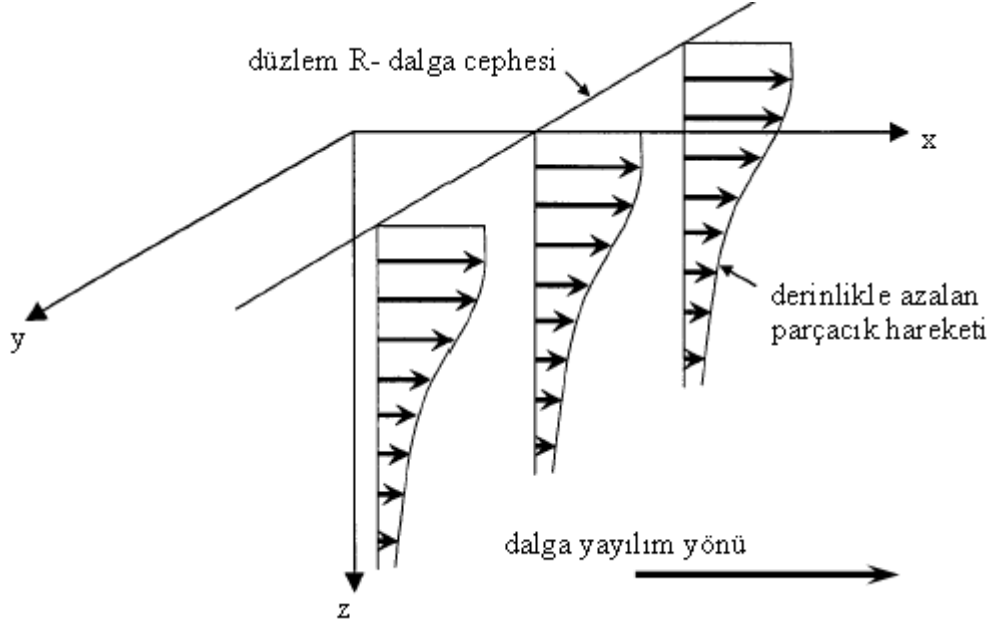
### 2.5.1 Dalga Denklemleri

Cisim dalgaları (P-dalgası ve S-dalgası) için iki çözüm, sonsuz homojen elastik bir ortamda 3B dalgalar için hareket denklemlerinden türetilmiştir. Rayleigh dalgası (R- dalgası) için çözüm, homojen elastik bir yarı uzayda düzlem dalgası için hareket denklemlerine karşı serbest bir yüzeyin sınır koşullarını etkilemesiyle türetilir. Rayleigh dalgalarının yayılımı, bir ortamın serbest yüzeyine yakın sınırlanır ve bu dalgaların yer değişimi derinlikle hızlı bir şekilde azalır. Potansiyel fonksiyonlar ( $\Phi$  ve  $\psi$ ), x ve z yönündeki (u ve w) parçacık yer değişimi tanımlanır.

$$\begin{aligned} u &= \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \frac{\partial \psi}{\partial z} \\ w &= \frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \end{aligned} \quad (2.18)$$

yukarıdaki tanımlamalar kullanılarak bir düzlem dalgası için hacimsel deformasyon ve rotasyon, potansiyel fonksiyonlar açısından ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon} &= \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = \nabla^2 \Phi \\ 2\bar{\omega}_y &= \left( \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = \nabla^2 \psi \end{aligned} \quad (2.19)$$



Şekil 2.7 Homojen elastik yarı-uzayda düzlem Rayleigh dalgaları (Supranata, 2006).

Potansiyel fonksiyonlar, genişleme ve rotasyon etkilerini ayırır (örneğin  $\Phi$ , genişleme ile ilişkili ve  $\psi$ , rotasyon ile ilişkilidir). (2.18) denklemi (2.9a) ve (2.9c) denklemlerinde yerine konulmasıyla,

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \right) + \rho \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \right) &= (\lambda + 2G) \frac{\partial}{\partial x} (\nabla^2 \Phi) + G \frac{\partial}{\partial z} (\nabla^2 \psi) \\ \rho \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \right) - \rho \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \right) &= (\lambda + 2G) \frac{\partial}{\partial z} (\nabla^2 \Phi) - G \frac{\partial}{\partial x} (\nabla^2 \psi) \end{aligned} \quad (2.20)$$

elde edilir.  $\left( \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \right)$  ve  $\left( \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \right)$  için (2.20) denklemin çözümü,

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = \frac{\lambda + 2G}{\rho} \nabla^2 \Phi = V_p^2 \nabla^2 \Phi \quad (2.21a)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = \frac{G}{\rho} \nabla^2 \psi = V_s^2 \nabla^2 \psi \quad (2.21b)$$

denklemlerini verir. (2.18) ve (2.21) denklemleri, R- dalgasının P- ve S<sub>v</sub>- dalgalarının birleşimi olduğunu gösterir (çünkü yer değişim x-z düzleminde meydana gelir). Dalga sayısı k, açılal frekans  $\omega$  ile x yönündeki harmonik bir Rayleigh dalgası yayılımı için potansiyel fonksiyonlar,

$$\Phi = F(z)e^{i(\omega t - kz)} \quad (2.22a)$$

$$\psi = G(z)e^{i(\omega t - kz)} \quad (2.22b)$$

ile ifade edilebilir. Dalga sayısı k,

$$k = \frac{2\pi}{\lambda_R} \quad (2.23)$$

ile tanımlanır.  $\lambda_R$ , dalga boyudur. (2.22) denklemi, (2.21) denkleminde yerine konursa,

$$-\frac{\omega^2}{V_P^2}F(z) = -k^2F(z) + \frac{\partial^2 F(z)}{\partial z^2} \quad (2.24a)$$

$$-\frac{\omega^2}{V_S^2}G(z) = -k^2G(z) + \frac{\partial^2 G(z)}{\partial z^2} \quad (2.24b)$$

denklemleri elde edilir. Bu denklemler düzenlenirse ikinci mertebe kısmi diferansiyel denklemler elde edilir.

$$\frac{\partial^2 F(z)}{\partial z^2} - \left(k^2 - \frac{\omega^2}{V_P^2}\right)F(z) = 0 \quad (2.25a)$$

$$\frac{\partial^2 G(z)}{\partial z^2} - \left(k^2 - \frac{\omega^2}{V_P^2}\right)G(z) = 0 \quad (2.25b)$$

Bu denklemlerin genel çözümü,

$$F(z) = A_1 e^{-qz} + B_1 e^{qz} \quad (2.26a)$$

$$G(z) = A_1 e^{-sz} + B_1 e^{sz} \quad (2.26b)$$

$$q^2 = k^2 - \frac{\omega^2}{V_P^2} \quad (2.27a)$$

$$s^2 = k^2 - \frac{\omega^2}{V_S^2} \quad (2.27b)$$

şeklinde verilir. Çünkü R- dalgası parçacık yer değişimi derinlikle hızlı bir şekilde azalır,  $B_1 = B_2 = 0$  ve potansiyel denklemler aşağıdaki gibi olur.

$$\Phi = A_1 e^{-qz+i(\omega t-kx)} \quad (2.28a)$$

$$\psi = A_2 e^{-sz+i(\omega t-kx)} \quad (2.28b)$$

Serbest yüzeyde hiçbir gerilme olmaması nedeniyle serbest yüzeydeki sınır koşulları,

$$\left[ \sigma_z = \lambda \bar{\varepsilon} + 2G \varepsilon_z = \lambda \bar{\varepsilon} + 2G \frac{\partial w}{\partial z} \right] \Bigg|_{z=0} = 0 \quad (2.29a)$$

$$\left[ \tau_{zx} = G \gamma_{zx} = G \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] \Bigg|_{z=0} = 0 \quad (2.29b)$$

ile verilir. (2.18) ve (2.28) denklemleri kullanılarak yukarıdaki denklemler,

$$(A_1 \{ (\lambda + 2G)q^2 - \lambda k^2 \} - 2iA_2 Gks) e^{i(\omega t-kx)} = 0 \quad (2.30a)$$

$$\{2iA_1kq + A_2(s^2 + k^2)\}e^{i(\omega t - kx)} = 0 \quad (2.30b)$$

ile ifade edilir. Çözüm için,

$$A_1\{(\lambda + 2G)q^2 - \lambda k^2\} - 2iA_2Gks = 0 \quad (2.31a)$$

$$2iA_1kq + A_2(s^2 + k^2) = 0 \quad (2.31b)$$

denklemleri kullanılır ve (2.30) denklemleri aşağıdaki şekilde yeniden düzenlenebilir.

$$\frac{A_1}{A_2} \frac{(\lambda + 2G)q^2 - \lambda k^2}{2iGks} - 1 = 0 \quad (2.32a)$$

$$\frac{A_1}{A_2} \frac{2ikq}{(s^2 + k^2)} + 1 = 0 \quad (2.32b)$$

(2.32a) ve (2.32b) denklemleri birleştirilirse,

$$\frac{(\lambda + 2G)q^2 - \lambda k^2}{2iGks} = -\frac{2ikq}{(s^2 + k^2)} \quad (2.33)$$

bu denklemin çarpılmasıyla,

$$4Gk^2qs = (s^2 + k^2)\{(\lambda + 2G)q^2 - \lambda k^2\} \quad (2.34)$$

sonucuna ulaşılır. (2.34) denkleminin her iki tarafının karesi alınır ve (2.27) denklemleri yeniden düzenlenirse,

$$16G^2k^4 \left( k^2 - \frac{\omega^2}{V_P^2} \right) \left( k^2 - \frac{\omega^2}{V_S^2} \right) = \left\{ \left( k^2 - \frac{\omega^2}{V_S^2} \right) + k^2 \right\} \left\{ (\lambda + 2G) \left( k^2 - \frac{\omega^2}{V_P^2} \right) - \lambda k^2 \right\} \quad (2.35)$$

eşitliği elde edilir. (2.35) eşitliğin her iki tarafı  $G^2k^8$  'ya bölünürse

$$16 \left( 1 - \frac{\omega^2}{V_P^2 k^2} \right) \left( 1 - \frac{\omega^2}{V_S^2 k^2} \right) = \left( 2 - \frac{\lambda + 2G}{G} \frac{\omega^2}{V_P^2 k^2} \right)^2 \left( 2 - \frac{\omega^2}{V_S^2 k^2} \right)^2 \quad (2.36)$$

$$\text{veya } 16(1 - \alpha^2 K^2)(1 - K^2) = \left( 2 - \frac{1}{\alpha^2} \alpha^2 K^2 \right)^2 (2 - K^2)^2 \quad (2.37)$$

$$K = \frac{V_R}{V_S} = \frac{\omega}{V_S k} \quad (2.38a)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{G}{(\lambda + 2G)}} = \sqrt{\frac{1 - 2\nu}{2 - 2\nu}} \quad (2.38b)$$

$$\alpha K = \frac{V_R}{V_P} = \frac{\omega}{V_P k} = \frac{\omega}{\sqrt{\frac{\lambda + 2G}{G}} V_S k} \quad (2.38c)$$

sonucuna ulaşılır. (2.37) denkleminin genişlemesi ve yeniden düzenlenmesi ile aşağıdaki denklem elde edilir.

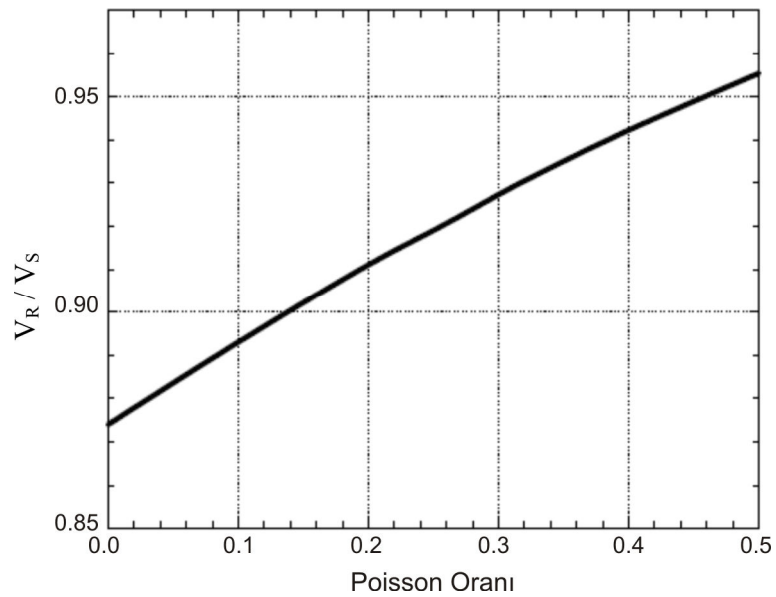
$$K^6 - 8K^4 + (24 - 16\alpha^2)K^2 + 16(\alpha^2 - 1) = 0 \quad (2.39)$$

(2.39) denklemi, Rayleigh dalgasının karakteristik denklemi veya basit bir şekilde Rayleigh dalgası denklemi olarak adlandırılır ve elastik yarı-sonsuz bir ortamda Rayleigh dalgaları ve Makaslama dalgaları yayılımı arasındaki teorik ilişkiyi ifade eder (Richard ve diğer., 1970). Bu denklemden homojen bir yarı-uzayda Rayleigh dalgası faz hızı  $V_R$ , P- ve S-dalgası hızlarının sadece bir fonksiyonu olduğu görülür

ve frekanstan bağımsızdır. (2.39) denkleminde ek olarak  $V_S$ ,  $\nu$  ve  $V_R$  arasındaki ilişki,

$$K = \frac{V_R}{V_S} = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} \quad (2.40)$$

ile verilir.  $V_R$  ve  $V_S$  arasındaki ilişki, Poisson oranına ( $\nu$ ) bağlı olarak Şekil 2.8 'de çizdirilmiştir.



Şekil 2.8 Poisson oranı ile  $V_S$  'e göre  $V_R$  'nin değişimi (Lin, 2007).

Şekil 2.8 'de görüldüğü gibi  $V_R/V_S$  oranı,  $0 < \text{Poisson oranı } (\nu) < 0.5$  için 0.875 – 0.955 arasında değişim gösterir.

R- dalgasının yayılımına göre parçacık yer değişimleri ( $u$  ve  $w$ ), (2.18) denkleminde  $u$  ve  $w$  'nin tanımı içerisinde (2.28) denkleminde potansiyel fonksiyonları için çözümün yerine konmasıyla hesaplanabilir.

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \frac{\partial \Psi}{\partial z} = -A_1 i k e^{-qz+i(\omega t-kx)} - A_2 s e^{-sz+i(\omega t-kx)} \quad (2.41a)$$

$$w = \frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{\partial \psi}{\partial x} = -A_1 q e^{-qz+(wt-kx)} - A_2 i k e^{-sz+i(wt-kx)} \quad (2.41b)$$

(2.32b) denkleminde,

$$A_2 = -\frac{2iqk}{s^2 + k^2} A_1 \quad (2.42)$$

elde edebilir. Bu denklemi (2.41) denkleminde yerine konulursa,

$$u = A_1 \left[ -i k e^{-qz} + \frac{2iqsk}{s^2 + k^2} e^{-sz} \right] e^{i(wt-kx)} \quad (2.43a)$$

$$w = A_1 \left[ -q e^{-qz} + \frac{2qk^2}{s^2 + k^2} e^{-sz} \right] e^{i(wt-kx)} \quad (2.43b)$$

sonucuna ulaşılır. (2.43a) ve (2.43b) denklemleri yeniden yazılırsa,

$$u = A_1 i k \left[ -e^{\frac{q}{k}kz} + \frac{2 \frac{q}{k} \frac{s}{k}}{\left(\frac{s}{k}\right)^2 + 1} \right] e^{i(wt-kx)} \quad (2.44a)$$

$$w = A_1 k \left[ -\frac{q}{k} e^{\frac{q}{k}kz} + \frac{2 \frac{q}{k}}{\left(\frac{s}{k}\right)^2 + 1} e^{\frac{s}{k}kz} \right] e^{i(wt-kx)} \quad (2.44b)$$

elde edilir. (2.44) denklemlerinden derinlikle  $u$  ve  $w$  'nin değişimi,



$$u(z) = -e^{-\frac{q}{k}kz} + \frac{2\frac{q}{k}\frac{s}{k}}{\left(\frac{s}{k}\right)^2 + 1} e^{-\frac{s}{k}kz} \quad (2.45a)$$

$$w(z) = -\frac{q}{k} e^{-\frac{q}{k}kz} + \frac{2\frac{q}{k}}{\left(\frac{s}{k}\right)^2 + 1} e^{-\frac{s}{k}kz} \quad (2.45b)$$

olarak bulunur. (2.27) denklemleri,

$$\frac{q^2}{k^2} = 1 - \frac{\omega^2}{k^2 V_P^2} \quad (2.46a)$$

$$\frac{s^2}{k^2} = 1 - \frac{\omega^2}{k^2 V_S^2} \quad (2.46b)$$

şeklinde tekrar yazılabilir ve (2.38a) ve (2.38c) denklemleri kullanılarak,

$$\frac{q}{k} = \sqrt{1 - (\alpha K)^2} \quad (2.47a)$$

$$\frac{s}{k} = \sqrt{1 - K^2} \quad (2.47b)$$

bağıntıları elde edilir. (2.23) denklemindeki dalga boyunun tanımlanmasıyla  $u(z)$  ve  $w(z)$  değerleri belirli bir Poisson oranı için (2.38b), (2.40) ve (2.47) denklemleri kullanılarak  $z/\lambda_R$  'nin fonksiyonu gibi hesaplanabilir.

## BÖLÜM ÜÇ

### DÜZ MODELLEME

Bu çalışma da Rayleigh dalgası modları, düz modelleme algoritması olarak en-küçük mutlak özdeğeri ve teorik model olarak dinamik sıklık matrisi kullanılarak oluşturulmuştur.

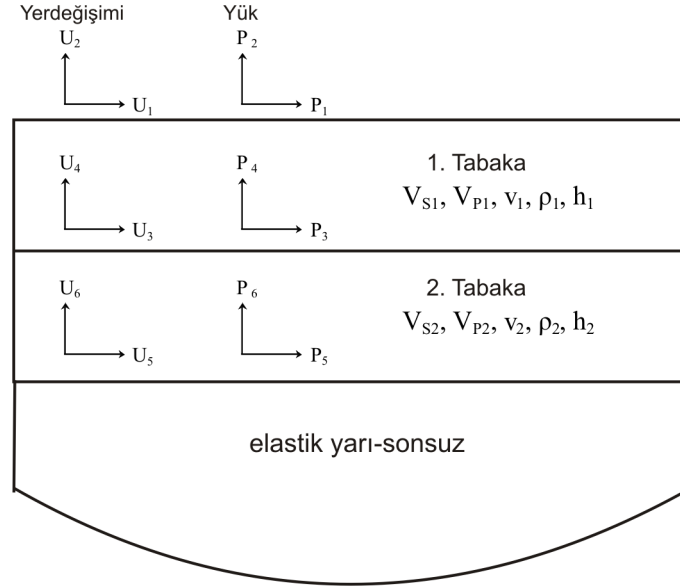
#### 3.1 Dinamik Sıklık Matrisi

Teorik model olarak kullanılan dinamik sıklık matris yöntemi, Rayleigh dalgaları ve düşey yönde heterojen tabakalı bir ortamın materyal özellikleri arasındaki ilişkiyi sağlar. Dinamik sıklık matris yöntemi, Thomson (1950), tarafından geliştirilmiş ve Haskell (1953), tarafından değiştirilen Transfer matris yönteminin yeniden düzenlenerek Kausel ve Roesset (1981) tarafından türetilmiştir.

Dinamik sıklık yönteminde, tabaka özellikleri (tabaka kalınlığı ( $h$ ), kütle yoğunluğu ( $\rho$ ), poisson oranı ( $\sigma$ ), P- dalgası hızı ( $V_s$ ) ve S-dalgası hızı) ve dalga özellikleri (frekans ( $f$ ) ve dalga hızı ( $v$ )),  $2 \times 2$  alt-matrisler  $K_{ij}^k$  içerisinde bir araya toplanır ve  $k$ . tabaka için tabaka sıklık matrislerini  $K^k$  oluşturur. Tabaka sıklık matrisleri, daha sonra global sıklık matrisi  $K_{glob}$  olarak adlandırılan daha büyük matris içerisinde birleştirilir.

Global sıklık matrisi,  $2n+2$  'ye eşit matris boyutuyla, kare ve simetriktir. Burada  $n$ , tabakaların sayısıdır. Global sıklık matrisi, aşağıdaki gibi tabakalı sistemlerin ara yüzeylerine (kesişim noktalarına) etkiyen yük vektörü  $p$  ile yer değişim vektörü  $u$  arasında bağlantı kurar.

$$K_g u = p \quad (3.1)$$



Şekil 3.1 İki tabakalı elastik yarı-sonsuz bir ortam (Supranata, 2006)

Şekil 3.1 'de gösterildiği gibi iki tabakalı bir sistem için, yük vektörü ( $p$ ) ve yer değişim vektörü ( $u$ ), her biri ayrı ayrı olarak  $2n+2$  elemandan oluşur.

$$p = [p_1 \ p_2 \ u_3 \ p_4 \ p_5 \ p_6]^T \quad (3.2)$$

$$u = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4 \ u_5 \ u_6]^T \quad (3.3)$$

birinci ve ikinci tabaka için tabaka sıklık matrisleri,

$$K^1 = 2k G_1 \begin{bmatrix} K_{11}^1 & K_{12}^1 \\ K_{21}^1 & K_{22}^1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$K^2 = 2k G_2 \begin{bmatrix} K_{11}^2 & K_{12}^2 \\ K_{21}^2 & K_{22}^2 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

olarak yazılabilir. Burada  $i$ . tabakanın alt-matrisleri,

$$K_{11}^i = \frac{1-s^2}{2D} \begin{bmatrix} \frac{1}{s}(C^r S^s - r s C^s S^r) & -(1-C^r S^s + r s S^r S^s) \\ -(1-C^r S^s + r s S^r S^s) & \frac{1}{r}(C^s S^r - r s C^r S^s) \end{bmatrix} - \frac{1+s^2}{2} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$K_{12}^i = \frac{1-s^2}{2D} \begin{bmatrix} \frac{1}{s}(r s S^r - S^s) & -(C^r - C^s) \\ (C^r - C^s) & \frac{1}{r}(r s S^s - S^r) \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$K_{21}^i = \frac{1-s^2}{2D} \begin{bmatrix} \frac{1}{s}(r s S^r - S^s) & (C^r - C^s) \\ -(C^r - C^s) & \frac{1}{r}(r s S^s - S^r) \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$K_{22}^i = \frac{1-s^2}{2D} \begin{bmatrix} \frac{1}{s}(C^r S^s - r s C^s S^r) & (1-C^r S^s + r s S^r S^s) \\ (1-C^r S^s + r s S^r S^s) & \frac{1}{r}(C^s S^r - r s C^r S^s) \end{bmatrix} + \frac{1+s^2}{2} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

bağıntıları ile tanımlanır ve elastik yarı-uzay için sıkılık matrisi aşağıdaki bağıntı ile tanımlanır.

$$K_{hs} = 2kG \left( \frac{1-s^2}{2(1-rs)} \begin{bmatrix} r & 1 \\ 1 & s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \right) \quad (3.10)$$

Tabakalı ortam için global sıkılık matrisleri, her bir tabaka ve elastik yarı-uzayın alt-matrislerinin birleştirilmesiyle oluşturulur.

$$K_{GLOB} = \begin{bmatrix} K_{11}^1 & K_{12}^1 & & \\ K_{21}^1 & K_{22}^1 + K_{11}^2 & & \\ & K_{21}^2 & & \\ & & K_{22}^2 + K_{hs} & \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

(3.8)  $\approx$  (3.10) denklemlerindeki parametreler, aşağıdaki bağıntılar ile tanımlanır.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{v} \quad (k > 0) \quad (3.12)$$

$$D = 2(1 - C^r C^s) + \left( \frac{1}{rs} + rs \right) S^r S^s \quad (3.13)$$

$$r = \sqrt{1 - \left( \frac{\omega}{k v_p} \right)^2} \quad (3.14)$$

$$s = \sqrt{1 - \left( \frac{\omega}{k v_s} \right)^2} \quad (3.15)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (\omega > 0) \quad (3.16)$$

$$C^r = \cos h(k r h) \quad (3.17)$$

$$C^s = \cos h(k s h) \quad (3.18)$$

$$S^r = \sin h(k r h) \quad (3.19)$$

$$S^s = \sin h(k s h) \quad (3.20)$$

Bu bağıntılarda  $\omega$ ; açısal frekans,  $f$ ; frekans,  $\lambda$ ; dalga boyu,  $v$ ; dalga hızı ve  $h$ ; tabaka kalınlığını simgeler.

### 3.2 En-küçük Mutlak Özdeğeri ve Tekillik

Global sıklık matris hesabında, çoğunlukla gerçek (true) matristen ( $K_{glob}$ ) daha çok bozulan (perturbed) matristen ( $K_{glob} + \delta K_{glob}$ ) bahsedilir. Çünkü çoğu hesap

makinelerindeki sınırlı hassaslıktan (duyarlılıktan) dolayı hesaplama boyunca yuvarlama hataları meydana gelir. Burada  $\delta K_{glob}$ , hata matrisidir.

Ölçüm hatası, hatanın diğer bir kaynağıdır. Bu bölümde bozulan bir matrisin tekilliğini ölçmek için bir parametre olarak en-küçük mutlak özdeğerin türevi matris teorisine dayanılarak tartışılır. Genelde  $A$  tekil bir matris ise  $A + \delta A$ , tekil olmayan bozulan bir matris olarak tanımlanabilir. Ayrıca,  $A + \delta A$  'dan tekil matrisler  $B$  kümesine 2-normlu minimum uzaklık  $\|\delta A\|_2$  ile gösterilir.

$$\min_{B \text{ is singular}} \|(A + \delta A) - B\|_2 \leq \|(A + \delta A) - A\|_2 = \|\delta A\|_2 \quad (3.21)$$

Bu nedenle eldeki tekil olmayan matrisler için bu uzaklık, bozulan tekil bir matrisin hesaplanmasında kullanılabilir. Matris kuramından  $A + \delta A$  'nın 2-normu ile ilgili olarak minimum uzaklığı, koşul sayısının  $\kappa(A + \delta A)$  tersidir (Demmel, 1997).

$$\frac{\min \|(A + \delta A) - B\|_2}{\|A + \delta A\|_2} = \frac{1}{\kappa(A + \delta A)} \quad (3.22)$$

Bu uzaklığın bağıl (görelî) ölçümüdür. Burada, koşul sayısı  $\kappa(A + \delta A)$ ,

$$\kappa(A + \delta A) = \|A + \delta A\|_2 \|(A + \delta A)^{-1}\|_2 \quad (3.23)$$

bağıntısı ile tanımlanır. Mutlak ölçüm daha sonra aşağıdaki bağıntı ile verilir.

$$\min \|(A + \delta A) - B\|_2 = \frac{1}{\|(A + \delta A)^{-1}\|_2} \quad (3.24)$$

Mutlak ölçüm  $\min \|(A + \delta A) - B\|_2$ , amacımıza uygun tekilliği test etmek için yeterlidir. Bir kare ve tekil olmayan matris için aşağıdaki bağıntı kullanılabilir (Demmel, 1997).

$$\|(A + \delta A)^{-1}\|_2^{-1} = \sigma_n \quad (3.25)$$

burada  $\sigma_n$ , matrisin Tekil Değer Ayrışımı (Singular Value Decomposition, SVD) ile elde edilebilen en-küçük tekil değer olarak gösterilir.  $A + \delta A$  simetrik ise

$$\sigma_n = |\mu_n| \quad (3.26)$$

bağıntısı elde edilir. Burada  $|\mu_n|$ , matrisin öz-ayrışımı ile elde edilen matrisin en-küçük mutlak özdeğeridir.

$$A + \delta A = X D X^T \quad (X^T = X^{-1}) \quad (3.27)$$

(3.27) nolu denklemde D,  $A + \delta A$  matrisinin özdeğerleri olan  $|\mu_1| \geq |\mu_2| \geq \dots \geq |\mu_n|$ 'nin bir köşegen matrisidir ve X, ortogonal matristir. (3.24), (3.25) ve (3.26) denklemlerinin birleşimiyle

$$\min \|(A + \delta A) - B\|_2 = \sigma_n = |\mu_n| \quad (3.28)$$

bağıntısı elde edilir. Bu nedenle bozulmuş tekil-olmayan matrisin minimum uzaklığı, matrisin kare ve simetrik olması şartıyla, en-küçük tekil değeri veya en-küçük mutlak özdeğeri kullanılarak hesaplanabilir. Bu araştırmada en-küçük mutlak özdeğeri uyarlanmıştır. Çünkü en-küçük mutlak özdeğeri, en-küçük tekil değerinden hesaplanmasından daha az zaman alır.  $x_n$ ,  $\mu_n$  karşılık gelen birim öz-vektör ise, daha sonra

$$(A + \delta A)x_n = \mu_n x_n \approx 0 \quad (3.29)$$

eşitliği ile verilir. Bu nedenle  $x_n$ , mod sayısının hesaplanması için modal şeklini göstermek için kullanılabilir. (3.28) denklemi aynı zamanda, onun en-küçük mutlak öz-değerinin sıfıra eşit olması durumunda matrisin tamamen tekil olduğunu gösterir.

A matrisi,  $A = f(t)$  for  $t_1 \leq t \leq t_2$ ) örneğinde olduğu gibi  $t$  'nin bir fonksiyonu ise  $A(t) \mid \mu_n \{A(t)\} = \min \mid \mu_n \{A(t)\} \mid$  durumunda tekilliğe en-yakın matristir. Burada  $t$ ,  $t_1 \leq t \leq t_2$  dir.

### 3.3 Rayleigh Dalgası Modlarının Hesabı

Rayleigh dalgası modu, dalga yayılımının doğal bir modu gibi nitelendirilebilir. Burada, yer değişim için, elastik yarı-uzaydan gelen dalga ve yük gereklidir (Wolf, 1985). Rayleigh dalgası modu, aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir:

$$K_{glob} u = 0 \text{ burada } u \neq 0 \quad (3.30)$$

$u$  'ya göre bir çözümün elde edilmesi için  $K_{glob}$  tekil olmalıdır. Bir matrisin tekilliği kuramsal olarak, matrisin determinantı ile değerlendirilir. Determinant sıfır ise matris tekildir. Ayrıca determinant, matrisin tekilliğinin iyi bir ölçüsü olamaz ve determinant değerinin, çok küçük veya çok büyük olma eğiliminden dolayı tam olarak hesaplanması zor olabilir. Determinantın hesaplanmasında kullanılan standart algoritma, kısmi pivotlama (partial pivoting) ile LU ayrışımıdır ve genellikle tersine durağandır. Bununla birlikte, determinantın mutlak değeri çok küçük olduğu zaman bile onun işareti yanlış hesaplanabilir. Tekillik, matrisin en-küçük mutlak özdeğeri ile daha iyi hesaplanabilir. Bu yüzden, tabaka sisteminin materyal özellikleri verilmiş ve sabit bir frekans altında farklı hızlar için  $K_{glob}$  'un en-küçük mutlak özdeğeri ve determinant hesaplanmış ise Rayleigh dalgası modları, determinantın işaretini değiştiren (Yuan ve Nazarian, 1992) ve en-küçük mutlak özdeğeri  $|\mu_n|$  yerel minimum yapan hızlar ile hesaplanabilir.



## **BÖLÜM DÖRT**

### **YÜZEY DALGASI ANALİZ YÖNTEMLERİ**

Mühendislik ve çevresel uygulamalarda yapılan çalışmalarda yüzey dalgası yöntemleri, aktif ve pasif kaynaklı olmak üzere iki türlü uygulanabilir. Aktif kaynaklı yöntemler iyi sonuçlar üretmelerine rağmen iyi ve güçlü bir kaynağa ihtiyaç duyarlar. Bu yöntemlerin araştırma derinlikleri pasif kaynaklı yöntemlere göre daha azdır. Buna karşın yerin doğal titreşim kaydını yapan pasif kaynaklı yöntemlerle daha derinler araştırılabilir. Yapay kaynaklarla enerji üretimi, ağırlık düşürme ya da titreştirme yoluyla veya balyoz kullanarak yapılır. Yapay kaynaklı çalışmalarda, kaynakla aynı doğrultu üzerinde yerleştirilmiş alıcılardan oluşan doğrusal dizilimler tercih edilmektedir. Aktif ve pasif kaynaklı yüzey dalgası yöntemlerinin tümünde amaçlanan, incelenen alana ait dispersiyon eğrisini ve bundan yararlanarak ortama ait bir boyutlu (1B) yer modelinin tabaka kalınlıklarını ve S-dalgası hız profillerini elde etmektir.

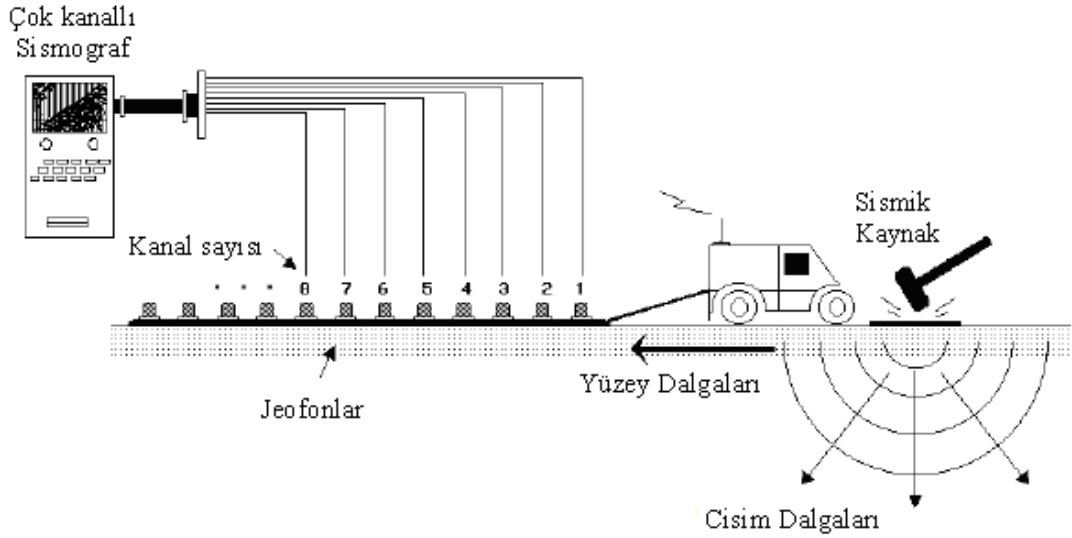
Yüze-yakın jeolojik yapıların belirlenmesinde kullanılan birçok yüzey dalgası inceleme yöntemi vardır. Bunlar arasında yapay kaynaklı yöntemlerden SASW (Yüzey dalgalarının spektral analizi) ve MASW (çok-kanallı yüzey dalgalarının analizi) yöntemleri en çok kullanılanlardır (Kanlı ve diğer., 2006).

#### **4.1 Yüzey Dalgalarının Spektral Analiz (SASW) Yöntemi**

SASW yönteminde, yayılan yüzey dalgalarının en az iki alıcıda kaydedilmesi esasına dayanır. (Dobrin ve Savit, 1988) ve genellikle, balyoz gibi vuruş (impact) bir kaynak tarafından üretilir. Kaynak tarafından üretilen sinyaller bir dinamik sinyal analizcisi tarafından sayısallaştırılarak kaydedilmektedir (Stokoe ve diğer., 1994). Ayrıca denemenin, farklı araştırma derinliklerini kat etmek için birçok farklı alan düzenekleri (faklı kaynak ve alıcı aralığı) ile tekrarlanması gerekir. Sonuç olarak yöntem, fazla zaman alır ve ağır işçilik gerektirir. Ayrıca, cisim dalgalarının (doğrudan gelen kırılan ve yansıyan P- dalgaları) ve yüzey dalgalarının yüksek

modlarının (Bath, 1973) varlığından dolayı kaydedilen verinin olası kirlenmesi fark edilemez ve uygun şekilde kullanılamaz.

#### 4.2 Yüzey Dalgalarının Çok-kanallı Analiz (MASW) Yöntemi



Şekil 4.1 Çok-kanallı yüzey dalgası veri toplama düzeneği (Park ve diğer., 1998).

Yüzey dalgalarının çok-kanallı analizi (Multichannel Analysis of Surface Waves, MASW), balyoz ya da ağırlık düşürme gibi çeşitli yapay kaynakların kullanıldığı bir yüzey dalgası analiz yöntemidir. MASW, sığ mühendislik çalışmalarında kullanılan yöntemlerden biri olan SASW 'ın (Spectral Analysis of Surface Waves) yetersizliğinin giderilmesi için geliştirilmiştir. MASW yöntemi, tabakalı yerküre modeli için Rayleigh dalgasında baskın bir etkisi olan S-dalgası hızı gerçeğine dayanır, ve faz hızları ile S-dalgası hız profilleri elde edilir (derinliğe bağlı bir boyutlu S-dalgası hız ( $V_S$ ) fonksiyonu).

Makaslama dalgası hız ( $V_S$ ) profilinde tam bir veri işlemin akışı, yüzey dalgalarının toplanması, dispersiyon (frekansa-bağımlı faz hızı) eğrisinin elde edilmesi ve S-dalgası hız profili için ters-çözüm işleminden oluşur. Burada dikkat edilmesi gereken nokta,  $V_S$  derinlik profilini güvenilir ve doğru saptayabilmek için yüzey dalgalarının minimum gürültüyle kaydedilmesidir.

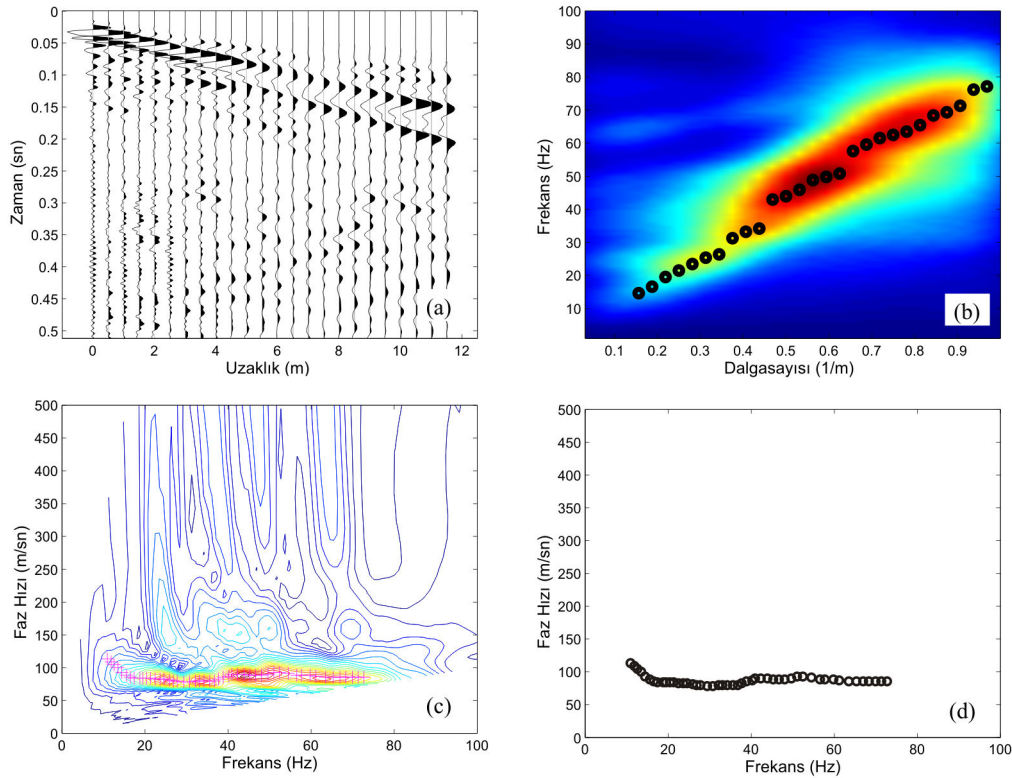
İlk olarak, kaynakla aynı doğrultu üzerinde yerleştirilmiş alıcılardan oluşan doğrusal dizilimler kullanılarak çok-kanallı kayıt toplanmalıdır. Yüzeiden etkiyen darbe türü kaynaklar ve normalde 8 Hz 'den küçük, alçak tepki frekanslı alıcılar, yüzey dalgası verilerini elde etmek için seçilmelidir. Kaynak, alıcı, ofset, alıcı aralığı gibi veri kazanç parametreleri, Ground roll sinyallerini güçlendirmek için ayarlanmalıdır (Park ve diğer., 1999). Veri toplanması yapılır yapılmaz, her bir atış topluluğunun Ground roll dalgası faz hızları hesaplanmalıdır. Başlangıç doğrusu boyunca Ground roll dalgasının frekans ve faz hızı dizisi verinin analizi ile hesaplanmalıdır. Bu iki dizi, bir atış topluluğundan dispersiyon eğrilerini tam olarak çıkarmak için çok önemlidir.

S-dalgası hızları ile Rayleigh dalgası dispersiyon eğrisi arasında bir ilişki kurmanın en kritik yolu, Rayleigh dispersiyon verisinin yerin özelliklerine göre duyarlılığını tanımlamaktır. MASW yaklaşımının özelliği olarak, Rayleigh dalgaları faz hızı ile yerin özellikleri arasındaki ilişki, birinci kısmi türevler matrisinin analizinden bulunabilir. Yüksek frekanslı Rayleigh dalgası dispersiyon verisi için tabakalı bir yer modeli; P-dalgası hızı, S-dalgası hızı, kalınlık ve yoğunluk ile tanımlanır. P-dalgası hızı ve yoğunluk değerlerinin, seçilen bu değerler için bağıl hatanın %25 veya daha az olması halinde, her tabakaya bilinen sabit bir değer olarak atanabileceği, ampirik olarak gösterilmiştir. Temel mod 'da S-dalgası hızı baskın bir özellik gösterdiği için, bu hız değerleri Rayleigh dalgası dispersiyon verisinden kolaylıkla elde edilebilmektedir (Xia ve diğer., 1999; Xia ve diğer., 2002).

Ters-çözüm işlemi, derinlik profiline eş bir S-dalgası hızının oluşturulması için her bir dispersiyon eğrisine uygulanmalıdır (Xia ve diğer., 1999). Dönüşen S-dalgası hız profili, alıcı aralığının ortasına yerleştirilmelidir (Miller ve diğer., 1999).

### 4.3 Dispersiyon (frekans-bağımlı faz hızı) Eğrisinin Elde Edilmesi

Rayleigh dalgalarının uygulamasında önemli bir işlem, dispersiyon eğrisinin çıkarılmasıdır (Şekil 4.2). Dispersiyon eğrisini elde etmek için çeşitli teknikler geliştirilmektedir. Bu teknikler içerisinde en-basit yöntem farklı konumlarda kaydedilen iki izi çapraz ilişkisi ile hesaplanır (Guo ve Liu, 1999).



Şekil 4.2 Dispersiyon eğrisinin çıkarılması, (a) atış kaydı, (b) frekans-dalgasayısı (f-k) dönüşümü, (c) Faz düzeltmesi ile hız spektrumu ve piklenmiş veri, (d) temel mod dispersiyon eğrisi.

Birbirine uzaklığı  $\Delta x$  olan iki alıcıdan elde edilen  $f(t)$  ve  $g(t)$  gibi iki iz, Fourier dönüşümü (4.1 denklemini) ile frekans ortamına dönüştürülür ve açısal frekans  $w$  kullanılarak  $F(w)$  ve  $G(w)$  şeklinde yazılır.

$$F(w) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \exp^{-iwt} dt$$

$$G(w) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} g(t) \exp^{-iwt} dt$$
(4.1)

iki izin çapraz ilişkisi ( $CC_{fg}(w)$ ),

$$CC_{fg}(w) = F(w) \cdot \overline{G(w)} = A_f(w) A_g(w) \cdot \exp^{i\Delta\phi(w)} \quad (4.2)$$

bağıntısı ile frekans ortamında tanımlanabilir. Burada  $A_f(w)$  ve  $A_g(w)$ ,  $F(w)$  ve  $G(w)$  'nin genliğidir.  $\overline{G(w)}$ ,  $G(w)$  'nin karmaşık eşleniğidir (conjugate).  $\Delta\phi(w)$ , çapraz ilişkinin ( $CC_{fg}(w)$ ) faz-spektrumudur ve iki izin faz-farkına eşittir.  $\Delta\phi(w)$ , aşağıdaki gibi çapraz ilişkiden ( $CC_{fg}(w)$ ) basit bir şekilde hesaplanabilir.

$$\Delta\phi(w) = \arctan\left(\frac{\text{Re}(CC_{fg}(w))}{\text{Im}(CC_{fg}(w))}\right) \quad (4.3)$$

Faz-hızı  $c(w)$ , faz-farkı  $\Delta\phi(w)$  ile doğrudan ilişkilidir.

$$c(w) = \frac{w \Delta x}{\Delta\phi(w)} \quad (4.4)$$

Bu yöntem, ciddi kısıtlamalara sahiptir. Örneğin, faz sınırlarını (wraparound) önlemek için alıcı aralığının dikkatli bir şekilde seçilmesi gereklidir. Yöntem, dispersiyon eğrisinin temel modunu cisim dalgaları veya diğer modlardan ayıramaz ve yöntem üç izden daha fazlasına uygulanamaz. McMechan ve Yedlin (1981),  $\tau - p$  dönüşümü ve Fourier dönüşümünü kullanarak çok-kanallı ortak atış topluluğundan doğrudan faz-hızını hesaplanabilen bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntem, çapraz ilişkiden daha iyidir. Çünkü temel modu, cisim dalgaları ve daha yüksek modlu faz-hızı eğrilerinden ayırabilir. Faz hızı, çok-kanallı (üç izden daha fazla) dalga-biçim (waveform) verisinden hesaplanabilir. Ayrıca Park ve diğer., (1999) çok-kanallı yüzey dalga analizi (MASW) adında bir dalga-biçim dönüşümü önermiştir. Bu yöntem, McMechan yöntemine benzeyen çok-kanallı ortak atış topluluğundan doğrudan faz-hızını hesaplayabilir. McMechan ve Yedlin (1981) ilk olarak görünür

yavaşlığı ( $p$ ) hesaplamış ve daha sonra onu frekans ortamına dönüştürmüştür. Diğer yandan Park ve diğer., (1999) önce atış topluluğunu frekans ortamına dönüştürmüşler daha sonra da faz düzeltmesi kullanarak faz hızını hesaplamışlardır (Şekil 4.2). Ayrıca, iz sayısındaki sınırlamaya rağmen faz hızı eğrisini ortaya koymuşlardır.

Bu çalışmada Park ve diğer., (1999) tarafından önerilen çok-kanallı yüzey dalgası analizi hesaplama yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde tek bir atış topluluğunun kaydedilen dalga alanlarından doğrudan dispersiyon eğrileri elde edilir. Farklı modlu dispersiyon eğrileri, atış topluluğu sınırlı ofset dizisi boyunca toplanan küçük sayıda izlerden oluşmuş olsa bile yüksek çözünürlükle ayrılabilir. Bu, basit bir üç adımlı dönüşüm yöntemidir. Zaman-uzaklık ortamında kaydedilen sinyallere uygulanan basit bir dalga alanı dönüşümü ile dispersiyon eğrisini elde etmek olasıdır. Bu yöntem aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Bir atış topluluğunun zaman-uzaklık ( $x-t$ ) ortamı gösterimi  $u(x,t)$  'e göre Fourier dönüşümü,  $U(x,w)$  'yi elde etmek için  $u(x,t)$  zaman eksenine uygulanabilir:

$$U(x,w) = \int u(x,t)e^{iwt} dt \quad (4.5)$$

$U(x,w)$ , ayrıca iki ayrı terimin çarpımı ile ifade edilebilir:

$$U(x,w) = P(x,w)A(x,w) \quad (4.6)$$

burada frekans ortamına aktarılan  $P(x,w)$  ve  $A(x,w)$  sinyalleri, faz ve genlik spektrumudur.  $U(x,w)$  'deki her bir frekans bileşeni tam olarak diğer frekanslardan ayrılır ve varış zaman bilgisi, faz spektrumunda  $P(x,w)$  gösterilmiştir. Faz spektrumuna göre dalga alanı, alıcılara belirli bir zaman farkı ile ulaşacaktır. Ayrıca  $A(x,w)$ , soğurulma ve geometrik yayılma gibi diğer bütün özellikler hakkında bilgiler içerirken  $P(x,w)$ , dispersiyon özellikleri ile ilgili tüm bilgileri içerir. Bu yüzden  $U(x,w)$ , aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$U(x, w) = e^{-i\phi x} A(x, w) \quad (4.7)$$

burada  $\phi$ ; faz kayması,  $w$ ; radyan cinsinden frekans ve  $c_w$ ; frekansa ( $w$ ) göre faz hızıdır. Dalgasayısı,  $k = w / c_w$  olarak tanımlanırsa (4.3) denkleminde  $U(x, w)$  'ye aşağıdaki integral dönüşümünün uygulanması ile  $V(w, \phi)$  elde edilir:

$$\begin{aligned} V(w, k) &= \int e^{ikx} [U(x, w) / |U(x, w)|] dx \\ &= \int e^{-e(\phi-k)x} [A(x, w) / |A(x, w)|] dx \end{aligned} \quad (4.8)$$

(4.8) denklemindeki integral dönüşümünde, (4.7) nolu denklemdeki dalga alanlarına göre bir faz hızı  $c_w (= w / \phi)$  varsayılır. Faz hızına göre hesaplanan ofset 'e bağımlı faz düzeltmesi uygulandıktan sonra bir frekansın dalga alanları ofset boyunca toplanır. Her bir alıcıdaki dalga alanından soğurulmanın ve geometrik yayılmanın etkilerini gidermek amacıyla,  $U(x, w) / |U(x, w)|$  şeklinde, bir düzeltme işlemi uygulanır. Bu işlemle, genliğin etkisi giderilerek faz-hızı baskın olarak elde edilir. Her frekans ( $w$ ) için belirli bir aralıkta değişen hızlar kullanılarak elde edilen dalga sayısı, faz kaymasına eşit olduğunda,

$$k = \phi = w / c_w \quad (4.9)$$

elde edilir. (4.5) denkleminin sağlanması durumunda,  $A(x, w)$  hem gerçek hem de pozitif olduğundan  $V(w, k)$ , bir maksimuma sahip olacaktır.  $V(w, k)$  'nin tepe noktasında, yani dalga sayısının faz kaymasına eşit olduğu durumda, faz hızı  $c_w$  hesaplanabilir.

#### 4.4 Veri Toplama Sistemi

Yüzey dalgası analizinin yapı ve ortam kestirimindeki başarısı, yönteminin uygulanabilirliği ve sonucunun doğruluğu, sismik kaynak, yakın açılım, jeofon aralığı ve jeofon frekansı gibi uygun parametre seçimine bağlıdır. Yüzey dalgaları,

diğer tüm sismik dalga türleri arasında en güçlü enerjiye ve en yüksek sinyal/gürültü oranına sahiptir. Bu nedenle yüzey dalgaları uygulamalarında, cisim dalgaları ile yapılan çalışmalara göre, uygun arazi parametreleri seçmek daha kolaydır.

Alan düzeneklerinde, jeofon aralığı ( $dx$ ),  $V_s$  profilinde çözünürlükle ilişkilendirilir. Jeofon aralığının daha küçük olması çözünürlüğün daha yüksek olmasını sağlar ve maksimum araştırma derinliğinin ( $Z_{max}$ ) onda birinden daha küçük olması önerilir.

$$dx \leq 0,1 * Z_{max} \quad (4.10)$$

Yakın-alan (near-field) etkilerinden kaçınmak için kaynak ve birinci jeofon arasındaki ilk ofset mesafesi ( $dx_1$ ) için aşağıdaki koşulun sağlanması gerekir (Stokoe ve diğer., 1994).

$$dx_1 = 0,5 * Z_{max} \quad (4.11)$$

Alıcıların toplam yayılım uzunluğunun (birinci ve sonuncu jeofon arasındaki uzaklık) ( $X$ ), aşağıdaki koşula dayanarak hesaplanması gerekir (Nazarian ve diğer., 1983).

$$X \geq Z_{max} \quad (4.12)$$

istenilen araştırma derinliği için, sismograf kanallarının toplam sayısı ( $N$ ), en az  $X / dx$  olmalıdır.

$$N \geq X / dx \quad (4.13)$$

Yüzey dalgalarının yüksek frekanslı bileşenleri cisim dalgalarına göre daha hızlı soğurulmaktadır. Uzaklıkla ters orantılı olarak, yüksek frekanslarda yüzey dalgalarının temel modu azalmakta, yüksek modlar ve cisim dalgaları tarafından gözlenmesi engellenmektedir. Düşük frekansların çözünürlüğü, seçilen alıcı aralığına



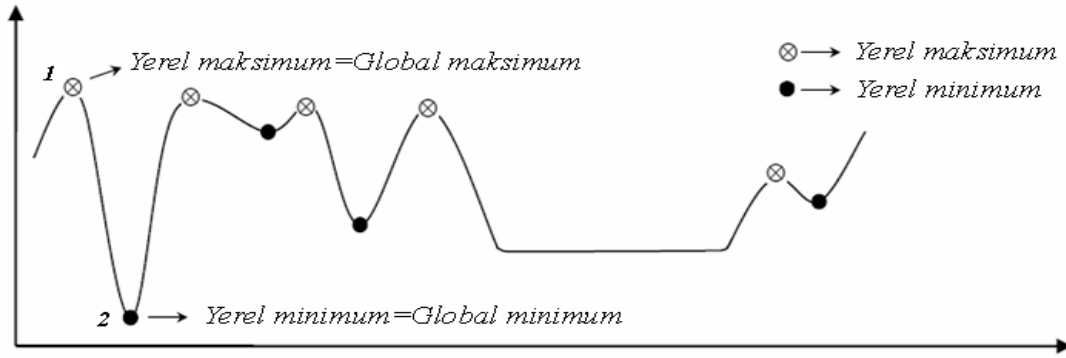
(dizilim uzunluğuna) bağlıdır. Dalga sayısı katlanmasını önlemek için alıcı aralıkları, gözlenmek istenen en küçük dalga boyunun yarısından az olmamalıdır (Park ve diğer., 1999). En yakın kaynak-jeofon arası ofset mesafesi, normalde araştırma derinliğinin yarısı kadar seçilir (Park ve diğer., 1999).

## BÖLÜM BEŞ

### TERS-ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ VE OPTİMİZASYON

Günümüzün karmaşık ve zor şartları, problemlerin amacına uygun, sonuca hızlı ve kolay ulaşmayı sağlayan yeni çözüm yöntemleri arayışına sebep olmuştur. Bu çözümler içerisinde en iyiyi bulmak ve buna en kısa zamanda ulaşmak problem tasarımı için önemli olmaktadır. Bunlardan biri olan optimizasyon (en iyileme) yöntemi, mühendislik alanında kullanılan yaygın konulardan birini oluşturmaktadır (Rao, 1996). Doğrusal olmayan problemlerin çözümünde, klasik yöntemler deneysel formülleri kullanarak sadece yapılabilirliğini esas alan çözümler içerirken, optimizasyon yöntemleri gerçeğine uygun fiziksel modelleri esas alarak en-iyi (optimum) sonuçları araştırır. Mühendislik tasarımında kullanılan optimizasyon yöntemleri çok sayıda işlem yapmayı gerektirir. Çünkü karmaşık amaç fonksiyonun (objective function) birçok kez farklı potansiyel çözümler için irdelenmesi gerekmektedir. Bilindiği üzere optimizasyon yönteminde temel amaç en-iyi bir noktaya ulaşabilmek, daha doğrusu mümkün oldukça yaklaşımdır. Bunu gerçekleştirmek için bilinen pek çok klasik yöntem vardır. Bu yöntemlerin başarısı en iyi noktaya ulaşamadıkları veya ne kadar ulaşabildikleri ile ölçülür.

Optimizasyon bir şeyin daha iyisini gerçekleştirme sürecidir. Bir mühendis veya bilim adamı yeni bir fikir ortaya koyar. Optimizasyon bu fikrin geliştirilmesine yardımcı olur. Optimizasyon; fikirleri geliştirmek için ortaya atılan bilgileri kullanarak, başlangıç parametrelerini değiştirmektir. Eğer fikri etkileyen parametreler elektronik formata dönüştürülürse bilgisayar mükemmel bir optimizasyon aracı olur. Bir takım bilgiler bilgisayara girilir ve bir çözüm elde edilir. Elde edilen bu çözümün değerlendirilmesi optimizasyon aracılığıyla gerçekleştirilir. Bir problemin birden fazla çözümü varsa, en-iyi çözümü bulmak gerekir. Aslında “en iyi” kavramı izafi bir kavramdır. En-iyi çözüm, problemi formülize eden kişiye bağlıdır. Eğitim, fikirler, ideolojiler ve sosyal durumlar “en iyi” tanımlamasında etkili olan faktörlerdir.



Şekil 5.1 Yerel-Global ayırımı

Bazı problemlerin tam cevabı bulunurken, diğer bazılarının en iyi noktalar ve ekstremler olarak bilinen değişik minimum ve maksimum noktalarına sahiptir (Şekil 5.1). İşte burada “en iyi” zafî olabilir (Haupt, 1998). Çoğu optimizasyon yöntemini kök veya sıfır araştırma işlemini kullanır. Matematiksel yaklaşımda, kök bulmak için fonksiyonun sıfır olduğu yerler araştırılırken, optimizasyon da türevin sıfır olduğu yerleri araştırmak gerekmektedir. Teknik problemlerin birçoğu, köklerini bulmak üzere formülize edilebilir. Fakat bir kısım optimizasyon yöntemleri bu kökleri bulmada yetersiz kalmaktadır (Haupt, 1998). Optimizasyonda diğer bir zorluk; elde edilen bir sonucun, global veya yerel bir çözüm olup olmadığını belirlemektir. Doğrusal olmayan bir fonksiyonun en küçük yapan (minimization) değerini bulmak oldukça zordur. Bu tip problemler ya doğrusal (lineer) bir yaklaşımla veya optimizasyon bölgesini küçük bir bölge ile sınırlamakla çözülebilir.

Geçmişten günümüze kadar karşılaşılan birçok problemin çözülmesi amacıyla, değişik optimizasyon teknikleri geliştirilip uygulanmıştır. Optimizasyon teknikleri uygulanış biçimine göre Yerel (deterministik) ve Global (stokastik, istatistiksel) olmak üzere iki ana grupta toplanabilir (Haataja, 1999). Yerel optimizasyon yöntemleri sınırlı en küçük yapan değere veya en büyük yapan değere yakınsayan algoritmalarıdır. Türevsel hesaplamalar veya türevsel yaklaşımlar Yerel ters-çözüm yöntemlerine örnek olarak verilebilir. Rastgele araştırma algoritmaları gibi istatistiksel yöntemler ise global en küçük değeri veya en büyük değeri, bazı stratejileri ve rastgele sayıları kullanırlar (Palko, 1996). Son yıllarda PC 'lerin hızlarındaki artış bu algoritmaların uygulama sahasına girmesine neden olmuştur

(Wurtz, 1997). Bu çalışmada Yerel optimizasyon yöntemlerinden Levenberg-Marquardt algoritması, Global yöntemlerden Genetik Algoritma incelenmiştir.

Jeofizik verilerinin değerlendirilmesinde geleneksel (türeve-dayalı) ters-çözüm yöntemleri (Gauss-Newton, Endik iniş (Steepest Descent), Levenberg-Marquardt, vb.) en çok kullanılan yöntemlerdir. Bu yöntemlerin en büyük dezavantajı, ortaya çıkış mantıkları gereği, parametre yanlgı enerjisi hesaplamalarında yerel en küçük yapan değerlerle global en büyük yapan değerleri birbirinden ayıramamasıdır. Bu yöntemler tüm parametre değişim uzayında çözüm aramazlar. Jeolojik ön bilgilere dayanarak ters-çözüm işlemine kullanıcı tarafından sunulan başlangıç model parametreleri üzerinde iyileştirme yapmakla yetinirler. Geleneksel ters-çözüm işlemlerinin başarısı işleme sokulan başlangıç parametreleri için doğru değerlerin seçilmesine ve verilerin içerdiği gürültü oranlarına oldukça bağlıdır. Dolayısıyla kullanılan başlangıç parametreleri gerçek parametre değerlerinden uzak olması durumunda yanlış sonuçlar elde edilebilir. Veriler, yüksek sinyal/gürültü oranına sahip ise, başlangıç parametreleri doğruya yakın seçilmesi durumunda, geleneksel ters-çözüm yöntemleri, gürültülü verilerin yönlendirmesiyle, global en küçük yapan değerleri bulmak yerine, yerel en küçük yapan değerler civarında çözümler üretebilmektedir. Geleneksel yöntemlerin parametre yanlgı enerjisi hesaplamalarında yerel en küçük yapan değerlerde kalma olasılığı global en küçük yapan değerlerin bulunmasında daha etkin yöntemlerin araştırılmasına yol açmış ve Global optimizasyon yöntemlerinin kullanılmasına başlanmıştır.

Genetik algoritmalar, geleneksel ters-çözüm yöntemlerinden daha etkili ve çözüm yaklaşımında yapılacak küçük değişikliklerle halledilebildiklerinden dolayı da daha esneklerdir. Bu sebeple, Genetik algoritma araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Genetik algoritmalar arama ve optimizasyon için stokastik (istatistiksel) bir yöntemdir. Geleneksel optimizasyon yöntemlerine göre farklılıkları olan genetik algoritmalar, parametre kümesini değil kodlanmış biçimlerini kullanırlar. Olasılık kurallarına göre çalışan genetik algoritmalar, amaç fonksiyonunun türevlerini ve bir takım ek bilgileri değil, doğrudan amaç fonksiyonunun kendisini kullanırlar. Genetik algoritma da

deterministik değil rastlantısal geçiş kuralları kullanılır. Geleneksel optimizasyon yöntemlerinde çözüm tek noktalı bir yaklaşım olmasına karşın, genetik algoritma çözüm uzayını rastgele oluşturulmuş noktalarla taramaktadır. Her yeni nesil oluşumunda birkaç kötü sonucu topluluğun dışına atarak, onların yerine aynı sayıda iyi sonuçlardan kopyalayarak problemin çözümüne doğru dengeli bir şekilde ilerlemektedir. Klasik optimizasyon yöntemlerinde bir tek çözüm elde edilmesine rağmen, Genetik algoritma çözümlerinde birkaç alternatif çözüm aynı anda elde edilebilmektedir. Diğer bir önemli üstünlükleri ise çözümlerden oluşan optimizasyon eş zamanlı incelemeleri ve böylelikle yerel en-iyi çözümlere takılmamalarıdır. Genetik algoritma yönteminde en-iyi çözüme doğru ilerleme aşamasında çok geniş bir çözüm uzayının tanımlanarak taranması gerekmektedir. Bu işlem, yüksek sayıda yineleme ile hesaplama işlemlerini arttırır.

Yerel ve Global optimizasyon yöntemleri jeofizik ters-çözüm problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çeşit algoritmalar, problem çözümlerinde karşılaştıkları kendilerine özgü bir takım avantajlara ve yetersizliklere sahiptir. Bu çalışmada, yöntemlerin belli başlı özellikleri kullanılarak, yetersizlikler giderilmiştir. Özellikle jeofizik problemlerin çözümü için Global bir genetik algoritma yaklaşımı ile Yerel bir Levenberg-Marquardt yöntemi birleştirilmiştir.

## 5.1 Genetik Algoritma Yöntemi

Genetik algoritma, temelleri biyolojik evrim sürecinden alınarak geliştirilmiş istatistiksel (stokastic) ve yinelemeli (iteration) bir süreçtir. Genetik Algoritma (GA) üzerine ilk çalışmalar Michigan Üniversitesinde Psikoloji ve Bilgisayar Bilimi Uzmanı olan John Holland tarafından yapılmıştır. Mekanik öğrenme (machine learning) konusunda çalışan Holland, Darwin'in evrim kuramında etkilenecek canlılarda yaşanan genetik süreci bilgisayar ortamında gerçekleştirmeyi düşünmüştür. Tek bir mekanik yapının öğrenme yeteneğini geliştirmek yerine böyle yapılarda oluşan bir topluluğun çoğalma, çiftleşme, mutasyon, vb. genetik süreçlerden geçerek başarılı (öğrenebilen) yeni bireyler oluşturabildiğini görmüştür. Araştırmalarını, arama ve en iyiyi (optimum) bulma için, doğal seçme ve genetik

evrimden yola çıkarak yapmıştır. 1975 yılında John Holland 'ın "Doğal ve Yapay Sistemlerin Uyumu" isimli kitabıyla ortaya çıkan Genetik Algoritma; rastgele arama temelli bir zekâ tekniğidir. Genetik algoritmanın gelişimi, John Holland 'ın doktora öğrencisi olan David Goldberg 'in 1985 yılında hazırlamış olduğu "Gaz Boru Hatlarının Genetik Algoritma ile Denetlenmesi" konusundaki tezi ile sağlanmıştır. Bu ilk uygulamadan sonra Goldberg 'in "Makine Öğrenmesi, Arama ve Optimizasyonu için Genetik Algoritma" adlı kitabı Genetik algoritmaya yeni bir boyut kazandırmıştır (Goldberg, 1989).

Genetik algoritmada amaç, doğal sistemlerde bireylerin çevrelerine uyum sağlama özelliğini dikkate alarak yapay sistemleri tasarlamaktır. Genetik algoritma rasgele arama yöntemini kullanarak en uygun çözümü bulmaya çalışan, parametre kodlama esasına dayalı optimizasyon yöntemidir (Goldberg, 1989). Genetik algoritmalar çözüme en uygun veya en yakın potansiyel çözümler içeren topluluklar (population) üzerinde çalışırlar. Her nesilde daha güçlü ve amaçlara daha uygun bireyler üretilerek sonuca gidilir. Doğada güçlü olan bireylerin hayatta kalma ve üreme şansları daha yüksektir. Bu prensipten yola çıkan genetik algoritma da bu prensibi takip ederek, yani daha iyi çözümler üreten bireyleri sonraki topluluklara taşıyarak en-iyi çözümü bulmayı amaçlar.

Genetik algoritmalar yapay zekânın gittikçe genişleyen bir kolu olan evrimsel hesaplama tekniğidir. Zekâ, insanın düşünme, akıl yürütme, nesnel gerçekleri algılama, kavrama, yargılama, sonuç çıkarma, soyutlama, öğrenme yeteneklerinin tümüdür. Yapay zekâ ise, bu özelliklere sahip organik olmayan sistemlerdeki zekâdır, kabaca; bir bilgisayarın ya da bilgisayar denetimli bir makinenin, genellikle insana özgü nitelikler olduğu varsayılan akıl yürütme, anlam çıkartma, genelleme ve geçmiş deneyimlerden öğrenme gibi yüksek zihinsel süreçlere ilişkin görevleri yerine getirme yeteneği olarak tanımlanmaktadır (Nabiyev, 2003). Genetik Algoritmalar evrimsel hesaplamanın bir parçasıdır. Genetik Algoritma, son yıllarda artan bir yoğunlukta geleneksel yöntemlerle çözümü zor veya imkânsız olan mühendislik problemlerin çözümünde optimizasyon amaçlı olarak kullanılmaya başlanmıştır (Rao, 1996). Mühendislikte, çözüm uzayı geniş olan problemlerin muhtemel

çözümlerinin taranarak en iyinin bulunmasının çok zaman alıcı olduğu durumlarda, çoğu zaman kazandırıcı bir yöntem olarak karşımıza çıkar. Genetik Algoritmalar problemin yapısına bakmaksızın çok karmaşık optimizasyon problemleri için bile çözüm bulabilirler. Problemin karmaşıklığı Genetik algoritmalar için hiç önemli değildir. Genetik algoritmaların ihtiyaç duyduğu şey problemin karar değişkenlerinin uygun bir yöntemle kodlanması ve neyin iyi olduğunu Genetik Algoritmaya belirtmek üzere tasarlanan bir uygunluk (amaç, fitness) fonksiyonudur. Genetik Algoritmalar çözüm uzayını taramaya bir topluluk ile başladıkları için genel en-iyi çözüme yaklaşmak diğer yöntemlere göre daha kolay olmaktadır. Genel olarak en-iyi çözümü bulmayı garanti etmezlerse de buna yakın bir sonucu bulduğu birçok araştırmayla ispatlanmıştır. Genetik Algoritmalar bir topluluk (başlangıçta bu topluluk genelde rastgele oluşturulur) ile başlar ve bu topluluk üzerinde çaprazlama, seçme ve mutasyon gibi yöntemlerin uygulanmasıyla problemin her aşamasında en iyiye doğru bir gidiş sağlanır.

### ***5.1.1 Genetik Algoritma Tekniği***

Algoritma, topluluk adı verilen ve kromozomlarla temsil edilen bir çözüm kümesi ile başlamaktadır. Bir topluluktaki çözümler yeni toplulukların üretilmesinde kullanılmaktadır. Bu işlem, yeni toplulukların oluşturulmasında eskilerine nazaran daha iyi olacağı umuduyla yapılmaktadır. Yeni çözümler (yavru döller, offsprings) üretmek için alınan çözümler, uygunluk derecelerine göre seçilmektedir. Ne kadar uygun olurlarsa o kadar iyi döller verme olasılığı vardır. Bu süreç belli bir durum (belli sayıda topluluk veya en-iyi çözümün gelişmesi) karşılanana kadar tekrar edilmektedir. Genetik Algoritmanın aşamaları (Şekil 5.2) kısaca aşağıda verilmiştir:

— Başlangıç: İlk önce rastgele bireyler (sayı toplulukları) oluşturulur. Bu bizim başlangıç topluluğumuzdur (problemin olası çözümleri). Oluşturulacak birey sayısı, programın işleyişi bakımından çok önemlidir. Genellikle her programda 50 'den fazla birey oluşturulur. Ama yapılan işlem karmaşıkta 150 birey bile yetmeyebilir.

— Uygunluk: Genetik Algoritmada, probleme özel tek kısım uygunluk (fitness) fonksiyonudur. Uygunluk fonksiyonunun amacı bireylerin yalnızca o anki toplum içindeki uygunluklarını bulmaktır. Her birey teker teker uygunluk fonksiyonuna sokulur ve bireydeki kromozomlara göre o bireyin hayatta kalma şansı hesaplanır. Bütün bireyler doğal seleksiyona sokulur. Bu eleme işlemi sayesinde topluluk büyüklüğü sabit tutulur ve güçsüz bireyler elenmiş olur.

— Sonlandırma: Topluluktaki en iyi bireyin temsil ettiği değer istenilen sonucu veriyorsa algoritmanın sona erdirilmesi (sonuç tatmin ediyorsa) ve son topluluğun en uygun kromozomu çözüm olarak sunulması, değilse yeni topluluk için aşağıdaki adımların tekrar edilmesi,

#### Yeni topluluk için:

— Seçim: İki bireyin uygunluk değerlerine göre turnuva, rulet tekerleği gibi seçme operatörlerinden problemin yapısına uygun olanının seçilmesi işlemi (daha iyi uyum seçilme şansını artırır),

— Çaprazlama: Yeni bir birey oluşturmak için ebeveynlerin bir çaprazlama olasılığına göre çaprazlanması. Eğer çaprazlama yapılmazsa yeni birey, anne ve babanın kopyası olacaktır. Eşleştirilen bireyler sırasıyla ikişerli olarak çaprazlanırlar. Çaprazlama yaparken hangi çaprazlama yönteminin kullanılacağı probleme göre değişir. Çaprazlama, iyi özelliklerin bir araya gelip sonuca daha çabuk ulaşmayı sağlar.

— Mutasyon: Çaprazlamadan çıkan bireylerden, mutasyon oranına uygun gelecek şekilde, bazılarında mutasyon işlemi yapılır. Mutasyon oranı genelde düşük tutulur. Örneğin 0.01 uygun bir değer olabilir. Mutasyon oranının 0.01 olması gen havuzundaki her 100 genden 1 tanesinin değiştirileceğini gösterir.

— Elitizm: Mevcut topluluktaki uygunluk değeri en-iyi olan bireyin olduğu gibi yeni topluluk havuzuna aktarılması.

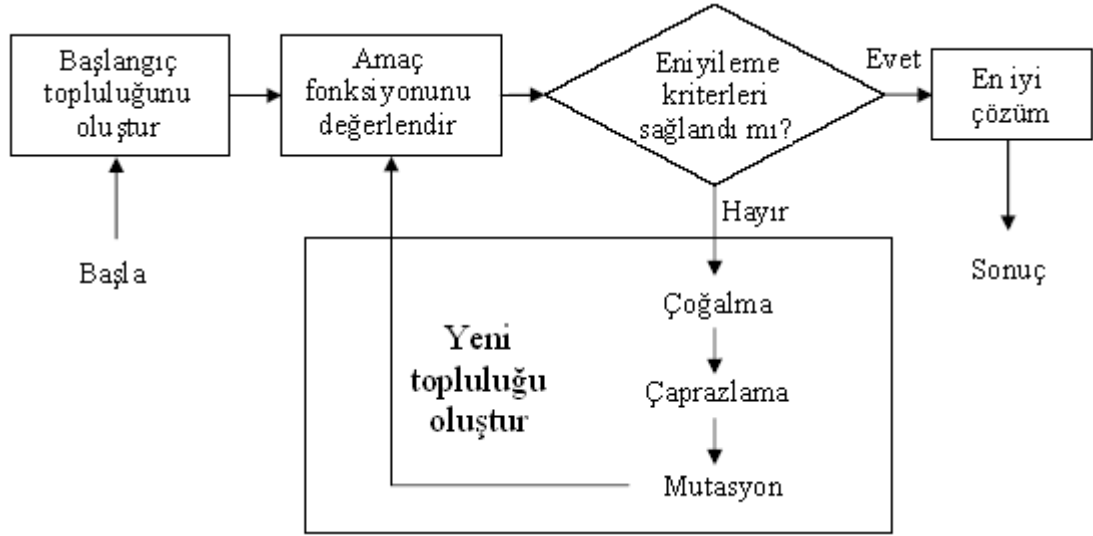


— Yeni topluluk havuzu: Yeni oluşan bireylerin bir havuza alınması, eski bireylerin (ebeveynler) öldürülerek havuzdan atılması.

— Değişirme: Yeni topluluğun kullanılacak şekilde düzenlenmesi,

— Döngü: 2. adıma geri dönülerek yeni nesile başlanması.

Görüldüğü üzere genetik algoritmanın yapısı oldukça basittir ve herhangi bir probleme kolaylıkla uygulanabilir. Genetik algoritmalar bir çözüm uzayındaki her noktayı, kromozom adı verilen ikili bit dizisi ile kodlar. Topluluktaki bireyler kromozomların birleşmesiyle oluşur. Birey çözümü ifade eder ve sürekli iyiye doğru giden topluluklar arasındaki en-iyi birey sonuç olarak alınır. Kromozomlar ikili kodlama, reel sayı kodlama, tam sayı kodlama vb, çeşitlerinden uygun birisi kullanılarak kodlanır. Her noktanın bir uygunluk değeri vardır. Tek bir nokta yerine, genetik algoritmalar bir topluluk olarak noktalar kümesini muhafaza eder. Her nesilde Genetik Algoritma, çaprazlama ve mutasyon gibi genetik operatörleri kullanarak yeni bir topluluk oluşturur. Birkaç nesil sonunda, topluluk daha iyi uygunluk değerine sahip üyeleri içerir. Bu, Darwin 'in rastlantısal mutasyona ve doğal seçime dayanan evrim modellerine benzemektedir. Genetik algoritmalar, çözümlerin kodlanmasını, uygunlukların hesaplanmasını, çoğalma, çaprazlama ve mutasyon operatörlerinin (işleçlerinin) uygulanmasını içerir (Jang, 1997).



Şekil 5.2 Genetik algoritmanın akış şeması (Varlı, 2007).

### 5.1.2 Genetik Algoritma Operatörleri

Genetik algoritma kullanılarak bir optimizasyon probleminin çözümünde ilk önce yapılacak işlem, problemin değişkenlerinin alacağı değerlerin sonlu ve ayrık bir çözüm kümesini belirlemektir. Çözüm kümesinin sonlu ve ayrık olması zorunluluğu, kromozom uzunluğunun sonlu olması gerekliliğinin bir sonucudur. Dolayısıyla, kromozom uzunlukları doğrudan çözüm kümesinin eleman sayısına bağlı olmaktadır.

#### 5.1.2.1 Çözümlerin Kodlanması

Bir problemin çözümü için genetik algoritma geliştirmenin ilk adımı, tüm çözümlerin aynı boyutlara kodlanmasıdır. Genetik bilgi, kodlanmış olarak DNA sayesinde sonraki nesillere aktarılır. Genetik algoritmada, parametreleri temsil etmek amacıyla çeşitli kodlama yöntemleri kullanılmaktadır. Genetik algoritmalar için ikili kodlama, gray kodlama, tam sayı kodlama, reel sayı kodlama, vektör kodlama ve ağaç kodlama gibi çeşitli kodlama yöntemleri mevcuttur. Bu kodlama yöntemleri arasında en kolay ve en çok kullanılanı, her bir parametrenin ikili (binary) sistemde kodlanmasıdır. İkili kodlama, bilgisayar mantığına yakınlığı, Genetik Algoritma işlemlerine uyumlu olması ve kolayca değiştirilebilmesi gibi nedenler ile tercih edilen bir kodlama sistemidir. Basit ikili kodlamada, kromozom 0 ya da 1 değerini alabilen

genlerin birleşiminden oluşur. Kromozomların uzunluğu, her bir parametre için tanımlanan çözüm aralığı ve parametrelerin bu aralıklarda alabileceği olası değer sayısına bağlıdır. Bir modeli temsil eden birey, her bir parametrenin ayrı ayrı kodlanıp bunların ardı ardına eklenmesi ile oluşturulur. Parametreler için tanımlanan çözüm uzayları farklı olabileceğinden her bir parametrenin ayrı ayrı kodlanması gereklidir.

#### 5.1.2.2 İlk Topluluğun Oluşumu

Olası çözümlerin kodlandığı bir çözüm grubu oluşturulur. Çözüm grubu topluluk, çözümlerin kodları da kromozom olarak adlandırılır. İkili alfabenin kullanıldığı kromozomların gösteriminde, ilk topluluğun oluşturulması için rastsal sayı üreticileri kullanılabilir. Rastsal sayı üreticisi çağrılır ve değer 0.5 'den küçükse konum 0 'a değilse 1 değerine ayarlanır (Yeo ve Agyel, 1998). Birey sayısının ve kromozom uzunluğunun az olduğu problemlerde yazı-tura ile de konum değerleri belirlenebilmektedir. Genetik algoritmalarda ikili kodlama yöntemi dışında, çözümü aranan probleme bağlı olarak farklı kodlama yöntemleri de kullanılmaktadır (Goldberg, 1989).

#### 5.1.2.3 Uygunluk Değeri

Bir nesil oluşturulduktan sonraki ilk adım, topluluktaki her üyenin uygunluk değerini hesaplama adımıdır. Örneğin, bir en-büyükleme (maximization) problemi için  $i$ . üyenin uygunluk değeri  $f(i)$ , genellikle o noktadaki amaç fonksiyonunun değeridir (Jang, 1997). Çözümü aranan her problem için bir uygunluk fonksiyonu mevcuttur. Verilen belirli bir kromozom için uygunluk fonksiyonu, o kromozomun temsil ettiği çözümün kullanımıyla veya yeteneğiyle orantılı olan sayısal bir uygunluk değeri verir. Bu bilgi, her nesilde daha uygun çözümlerin seçiminde yol göstermektedir. Bir çözümün uygunluk değeri ne kadar yüksekse, yaşama ve çoğalma şansı o kadar fazladır ve bir sonraki nesilde temsil edilme oranı da o kadar yüksektir (Yeniay, 2001).

#### 5.1.2.4 Çoğalma İşlemi

Çoğalma operatöründe diziler, amaç fonksiyonuna göre kopyalanır ve iyi kalıtsal özellikleri gelecek nesile daha iyi aktaracak bireyler seçilir. Üreme operatörü yapay bir seçimdir. Dizileri uygunluk değerlerine göre kopyalama, daha yüksek uygunluk değerine sahip dizilerin, bir sonraki nesildeki bir veya daha fazla yavruya daha yüksek bir olasılıkla katkıda bulunması anlamına gelmektedir. Çoğalma, bireyleri seçme işleminden, seçilmiş bireyleri bir eşleme havuzuna kopyalama işleminden ve havuzda bireyleri çiftler halinde gruplara ayırma işleminden oluşur (Fıçlalı, 2002). Uygunluk değerinin hesaplanması adımından sonra mevcut nesilden yeni bir topluluk yaratılmalıdır. Seçim işlemi, uygunluk değerini temel alarak, topluluktan uygunluk değeri düşük olan bireylerin elenmesi ve yerlerine uygunluk değerleri yüksek bireylerin kopyalarının konmasıdır. Bir dizinin uygunluk değeri; hangi bireyin sonraki topluluğa taşınacağını belirler ve problemin amaç fonksiyonu değerine eşittir. Bir dizinin gücü uygunluk değerine bağlı olup iyi bir dizi, problemin yapısına göre maksimizasyon problemi ise yüksek, minimizasyon problemi ise düşük uygunluk değerine sahiptir. Seçim aşamasının önemi, topluluğun boyutu ile ilişkilidir. Seçimde küçük topluluk boyutu ile çalışılması durumunda topluluk çeşitlendirmesinin olası iyi alternatiflerin oluşması için yetersiz kalması sorunu yaşanabilir. Bu sebeple seçimde, topluluktaki bireylerin çeşitlendirmesini daraltan bir yöntemin uygulanması iyi sonuç vermeyebilir (Back ve diğer., 2000). Seçim için değişik yöntemler kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları, çakışmayla (uygunluk) orantılı seçim, sıralanmış seçim ve yarışma seçilimidir. Çakışmayla orantılı seçimde, 'i' numaralı modelin seçilme olasılığı, modelin çakışmasının topluluktaki tüm bireylerin çakışmalarının toplamına oranı olarak ifade edilir ve izleyen denklem ile verilir:

$$P_s(m_i) = \frac{F(m_i)}{\sum_{j=1}^n F(m_j)} \quad (5.1)$$

burada,  $P_s(m_i)$ ,  $i$  modelinin seçilme olasılığını,  $F(m_i)$ ,  $i$  modelinin çakışmasını,  $m$  ise topluluktaki birey sayısını göstermektedir. Başlangıç topluluğundaki bireyler  $P_s(m_i)$  olasılığı ile orantılı sayıda kopyalanarak bir ara topluluk oluşturulur. Bu kopyalama işlemi çakışması iyi olan bireylerin seçilme şansını artırıcı yönde rol oynar. Bu ara topluluğun bireyleri çakışmalarına göre seçilerek eşleştirilir. Sıralanmış seçim yönteminde (Baker, 1987; Whitley, 1989), tüm modeller çakışmalarına bağlı olarak sıralanır. En iyi çakışmayı veren 0, en kötü çakışmayı veren model ( $m$ ), bir ile numaralandırılır. Modeller sıralamadaki yerlerine bağlı olarak önceden belirlenen bir sayı kadar kopyalanarak sonraki topluluk oluşturulur. Seçimde kullanılan bir başka yöntem olan yarışma seçilimin de (Goldberg ve Deb, 1991) ise, doğada çiftleşme hakkını elde etmek için yapılan mücadeleye benzer şekilde rastgele seçilen iki bireyden daha iyi çakışma üreten yarışmayı kazanarak seçilir. Bu işlem, topluluktaki birey sayısının yarısı kadar çift elde edilinceye kadar tekrarlanır. Buna göre bireyin çiftleşme hakkını kazanma şansını çakışmazlığı belirler.

$$x = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d(i) - f(i))^2 \right]^{1/2} \quad (5.2)$$

Bu denklemde, uygunluk değeri  $x$ , veri sayısı  $n$ , ölçülen veri  $d$ , kuramsal veri ise  $f$  ile gösterilir. Bir dizinin kopyalanma şansı, uygunluk fonksiyonuyla hesaplanan dizinin uygunluk değerine bağlıdır (Jang, 1997). Seçim yöntemlerine rulet tekerleği seçimi, turnuva seçimi ve sıralama seçimi gibi seçim yöntemleri örnek verilebilir.

— Rulet tekeri: Rulet seçiminde kromozomlar uyumluluk fonksiyonuna göre bir rulet etrafına gruplanır. Uygunluk fonksiyonu herhangi bir kritere uyan bireylerin seçilmesi için kullanılır. Bu rulet üzerinden rastgele bir birey seçilir. Daha büyük alana sahip bireyin seçilme şansı daha fazla olacaktır. Bu yöntem yardımıyla kromozomlar istatistiksel yöntemler kullanılarak uygunluk fonksiyonu değerlerinin toplam uygunluk fonksiyonuna oranları ölçüsünde seçilirler.

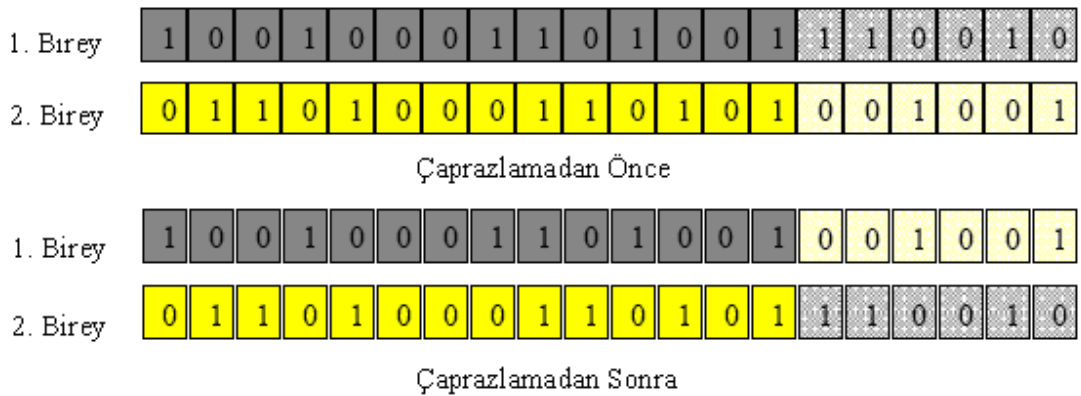
— Turnuva seçimleri: Kural dahilinde iki kromozom toplum içerisinden seçilerek uygunluk fonksiyonu büyük olan kromozom eşleşme havuzuna gönderilir, diğeri ise

havuzun içine tekrar bırakılır. Bu işleme yeni toplum büyüklüğü dolduruluncaya kadar devam edilir. Bu yöntemin avantajı herhangi bir kromozomun süreç sırasında kaybedilme olasılığının rulet tekeri seçim tekniğine göre daha az olmasıdır.

#### 5.1.2.5 Çaprazlama (Recombination) İşlemi

Mevcut gen havuzunun potansiyelini araştırmak üzere, bir önceki nesilden daha iyi nitelikler içeren yeni kromozomlar yaratmak amacıyla çaprazlama operatörü kullanılmaktadır. Çaprazlama genellikle, verilen bir çaprazlama oranına eşit bir olasılıkla seçilen aile çeşitlerine uygulanmaktadır (Jang, 1997). Genetik algoritmanın performansını etkileyen önemli parametrelerden biri olan çaprazlama operatörü doğal topluluklardaki çaprazlamaya karşılık gelmektedir. Çoğalma işlemi sonucunda elde edilen yeni topluluklardan rastlantısal olarak iki kromozom seçilmekte ve karşılıklı çaprazlama işlemine tabi tutulmaktadır. Aşağıda bazı çaprazlama örnekleri açıklanmıştır.

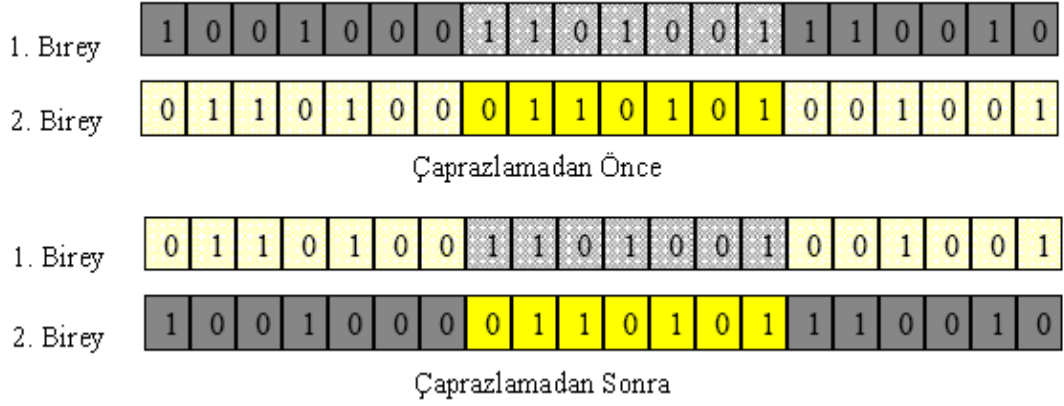
— Tek noktalı: En basit çaprazlama yöntemi tek noktalı çaprazlama yöntemidir. Tek noktalı çaprazlama yapılabilmesi için her iki kromozomun da aynı gen uzunluğunda olması gerekir. Seçilen iki birey kromozom katarı arasından rastgele bir noktadan kesilerek iki bireyin sağ tarafta kalan genleri yer değiştirilir (Şekil 5.3).



Şekil 5.3 Bireylerin tek noktadan çaprazlanması (Kahraman ve Özdağlar, 2004).

— İki noktalı: İki noktalı çaprazlamada ise seçilen iki bireyin kromozom katarları rastgele iki noktadan kesilerek 1. kesim noktasının solunda kalan genler ile 2. kesim

noktasının sağında kalan genler, 1. Birey ile 2. Birey arasında yer değiştirilir (Fıçlalı, 2002) (Şekil 5.4).



Şekil 5.4 Bireylerin iki noktadan çaprazlanması (Kahraman ve Özdağlar, 2004).

— Tek düze: Seçilen iki bireyin rastgele birer geninin yer değiştirmesidir (Şekil 5.5). Düzenli çaprazlamada her genin değiştirilme olasılığı %50 dir.



Şekil 5.5 Bireylerin tekdüze rastgele çaprazlanması (Kahraman ve Özdağlar, 2004).

Genetik Algoritma tekniğinin çaprazlama olasılığı çaprazlamanın hangi sıklıkta yapılacağını belirtir. Eğer hiç çaprazlama yapılmaz ise (çaprazlama olasılığı %0) yeni bireyler eski bireylerin aynısı olur. Ancak bu yeni kuşağın eskisiyle aynı olduğu anlamına gelmez. Eğer bu oran %100 olursa yeni bireyler tamamıyla çaprazlama ile elde edilir. Çaprazlama eski bireylerden iyi taraflar alınarak elde edilen yeni bireylerin daha iyi olması umuduyla yapılır. Eğer çaprazlama yapılmayacaksa seçilen iki kromozom aynen gelecek nesil için kopyalanır. Eğer çaprazlama uygulanacaksa,

seçilen iki kromozom gelişi güzel bir noktadan kesilip iki kromozomun kesilen noktalarından itibaren genler yer değiştirir.

#### 5.1.2.6 Mutasyon İşlemi

Çaprazlama mevcut gen potansiyellerini araştırmak üzere kullanılır. Fakat topluluk gerekli tüm kodlanmış bilgiyi içermez ise, çaprazlama tatmin edici bir çözüm üretmez. Bundan dolayı, mevcut kromozomlardan yeni kromozomlar üretme yeteneğine sahip bir operatör gerekmektedir. Bu görevi mutasyon gerçekleştirir. Yapay genetik sistemlerde mutasyon operatörü, bir daha elde edilemeyebilir iyi bir çözümün kaybına karşı koruma sağlamaktadır (Goldberg, 1989). Mutasyon olma olasılığına bağlı olarak seçilen bir bireyin kromozomlarındaki genlerin bir tanesinin, ikili kodlamada 0 ya da 1 olma durumuna göre, 0 ise 1, 1 ise 0 olarak değişikliğe uğramasıdır (Şekil 5.6). Mutasyon algoritmanın yerel en-iyi noktalarda tıkanıdığı durumlarda bir başka en-iyi çözüme sıçrayabilmesini sağlar. Mutasyon değerinin küçük seçilmesi en-iyi sonuca ulaşılmasını önleyebilir, büyük mutasyon değerleri de süreci rastgeleliğe dönüştürebilir. İkili kodlama sisteminin kullanılmadığı problemlerde ise daha farklı mutasyon yöntemleri kullanılmaktadır. Hangi yöntem kullanılırsa kullanılsın, mutasyonun genel amacı, genetik çeşitliliği sağlamak veya korumaktır (Braysy, 2001).



Şekil 5.6 Bireylerin mutasyona uğraması (Kahraman ve Özdağlar, 2004).

Mutasyon olasılığı ise mutasyonun hangi sıklıkta yapılacağını belirtir. Mutasyon olmaz ise yeni birey çaprazlama veya kopyalama sonrasında olduğu gibi kalır. Eğer mutasyon olur ise yeni bireyin bir kısmı değiştirilmiş olur. Eğer bu oran %100 olursa kuşak içindeki bireyler tamamen değişir, %0 olursa hiç değişmeden kalır.



### *5.1.2.7 Elitizm işlemi*

Topluluktaki uygunluk fonksiyonu en iyi olan bireyin çaprazlama ve mutasyon gibi operatörlerle kaybolabilme ihtimali vardır. Bunun önlenmesi için topluluktaki uygunluk fonksiyonu en-iyi olan birey hiçbir işleme tabi tutulmadan bir sonraki nesile aktarılır. Böylece bir sonraki nesildeki en iyi bireyin bir önceki nesildeki en iyi bireyden kötü olma ihtimali ortadan kaldırılmış olur.

### *5.1.2.8 Yeni Kuşağın Oluşması ve Döngünün Durdurulması*

Yeni kuşak çoğalma, çaprazlama ve mutasyon işlemlerinden sonra tanımlanmakta ve bir sonraki kuşağın ebeveynleri olmaktadır. Süreç yeni kuşakla çoğalma için belirlenen uygunluk ile devam eder. Bu süreç, önceden belirlenen kuşak sayısı kadar veya bir hedefe ulaşıncaya kadar ya da başka bir durdurma ölçütü sağlanana kadar devam eder (Yeo ve Agyel, 1998). İstenen hassasiyet derecesine göre de maksimum yineleme sayısı belirlenebilmekte ve yineleme bu sayıya ulaştığında döngü durdurulabilmektedir. Durdurma ölçütü yineleme sayısı olabileceği gibi hedeflenen uygunluk değeri de olabilmektedir (Fung, Tang ve Wang, 2001).

### *5.1.3 Genetik Algoritmalarda Parametre Seçimi*

Parametreler, genetik algoritma performansı üzerinde önemli etkiye sahiptir. En iyi kontrol parametrelerini bulmak için birçok çalışma yapılmış olmasına karşın tüm problemler için genel olarak kullanılacak parametreler bulunamamıştır (Altıparmak ve diğer., 2000). Bu parametreler, kontrol parametreleri olarak adlandırılmaktadır. Kontrol parametreleri topluluk büyüklüğü, nesil sayısı, çaprazlama olasılığı, mutasyon olasılığı, nesil aralığı, seçim stratejisi ve fonksiyon ölçeklemesi olarak sayılabilir. Bu parametreler aşağıda açıklanmıştır (Yeniay, 2001; Sinreich and Samakh, 1999).

— Topluluk Büyüklüğü: Genetik algoritma kullanıcısı tarafından verilen en önemli kararlardan birisidir. Bu değer çok küçük olduğunda, genetik algoritma yerel bir eniyeye takılabilmektedir. Topluluğun çok büyük olması ise çözüme ulaşma zamanını arttırmaktadır. Bu konuda Goldberg (1989), yalnızca kromozom uzunluğuna bağlı bir topluluk büyüklüğü hesaplama yöntemi önermiştir. Ayrıca Schaffer ve diğer., (1989) çok sayıda test fonksiyonları üzerinde yaptıkları araştırmalar sonucunda, 20–30 arası bir topluluk büyüklüğünün iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

— Nesil Sayısı: Genetik algoritmada, nesiller ilerledikçe belirli karakterlerdeki modeller toplulukta çoğalmaya başlar. Ele alınan problemin doğası ve algoritmaya girilen diğer parametrelere (topluluk büyüklüğü, çaprazlama ve mutasyon olasılıkları) bağlı olarak bir nesil sayısından sonra tüm modeller hata enerjisi haritasında global minimum civarında toplanacak ve topluluk tekdüze hale gelecektir. Bu noktadan sonra çözüm uzayında aramaya devam edilmesi modellerde fiziksel olarak anlamlı bir değişikliğe neden olmayacaktır. Topluluğun hangi nesilden sonra tekdüze hale geleceği başka etkenlere de bağlı olduğundan algoritma önceden belirlenen bir nesil sayısına ulaşıldığında ya da başka bir ölçüt sağlandığında durdurulabilir.

— Çaprazlama Olasılığı: Çaprazlamanın amacı, mevcut iyi kromozomların özelliklerini birleştirerek daha uygun kromozomlar yaratmaktır. Kromozom çiftleri  $P(c)$  olasılığı ile çaprazlamaya uğramak üzere seçilirler. Çaprazlamanın artması, yapı bloklarının artmasına neden olmakta fakat aynı zamanda bazı iyi kromozomların da bozulma olasılığını arttırmaktadır.

— Mutasyon Olasılığı: Mutasyonun amacı topluluklardaki genetik çeşitliliği korumaktır. Mutasyon  $P(m)$  olasılığı ile bir kromozomdaki her bitte meydana gelebilir. Eğer mutasyon olasılığı artarsa, genetik arama rastlantısal bir aramaya dönüşür. Fakat bu aynı zamanda kayıp genetik malzemeyi tekrar bulmada yardımcı olmaktadır.

— Nesil Aralığı: Her nesildeki yeni kromozom oranına nesil aralığı denmektedir. Genetik operatörler için kaç tane kromozomun seçildiğini gösterir. Yüksek bir değer birçok kromozomun yer değiştirdiği anlamına gelmektedir.

— Seçim Stratejisi: Eski nesili yenilemenin çeşitli yöntemleri mevcuttur. Nesilsel stratejide, mevcut topluluktaki kromozomlar tamamen yavrular ile yer değiştirir. Topluluğun en iyi kromozomu da yenilediğinden dolayı bir sonraki nesile aktarılamaz ve bu yüzden bu strateji en uygun stratejisiyle beraber kullanılmaktadır. En uygun stratejisinde, topluluktaki en-iyi kromozomlar hiçbir zaman yenilenmemektedir, bundan dolayı çoğalma için en-iyi çözüm her zaman elverişlidir. Denge durumu stratejisinde ise, her nesilde yalnızca birkaç kromozom yenilenmektedir. Genellikle, yeni kromozomlar topluluğa katıldığında en kötü kromozomlar yenilenir.

— Fonksiyon Ölçeklemesi: Doğrusal ölçekleme, üstsel ölçekleme gibi yöntemler mevcuttur. Probleme göre en uygun ölçekleme yönteminin seçilmesi genetik algoritmanın etkin işlemesi açısından önem taşımaktadır.

## 5.2 Doğrusal Olmayan En-küçük Kareler Problemi

Jeofizik biliminde yerin kendisi bir fiziksel sistem, bu sistem içerisindeki değişkenler ise yer içindeki bilinmeyenleri temsil eder. Ters-çözüm işlemi, sistemin bir yanıtı olarak ölçülmüş olan jeofizik verilere neden olan problemi; diğer bir deyişle yeraltı bilinmeyenlerini tanımlayabilmektir. Ters-çözüm, veri ortamından bilinmeyen model ortamına bir geçiş işlemidir. Ters-çözüm işleminde doğrusal ve doğrusal olmayan problemlerin çözümü, gözlem verileri ile model parametreleri arasındaki ilişkiye bağlı olarak değişmektedir. Eğer, veri ile parametre arasındaki ilişki bir dizey (matris) denklemi ile çözülebiliyorsa problem doğrusaldır ve model parametreleri ölçülen veriden dizey işlemleri ile hesaplanabilir. Veri ve parametreler arasındaki ilişki, dizey denklemleri ile çözülemezse problem doğrusal değildir ve parametreleri çözmek için yinelemeli olarak model yanıtının hesaplanması gerekir (Başokur, 2002). Doğrusal olmayan en-küçük kareler problemlerinin çözümü,

$$\min_{x \in \mathfrak{R}^m} F(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (f_i(x))^2 = \frac{1}{2} \|f(x)\|^2 = \frac{1}{2} f(x)^T f(x) \quad n \geq m \quad (5.3)$$

bağıntısı ile tanımlanır.  $F(x): \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$ , amaç fonksiyonudur. Bu amaç için,  $\|f(x)\|$  en-küçükleme işleminin veya eşdeğeri olan

$$x^* = \arg \min_x \{F(x)\} \quad (5.4)$$

eşitliğinin bulunması gerekir. Burada  $\|\cdot\|$ , “Euclidean” normunu belirtir ve  $f: \mathfrak{R}^m \rightarrow \mathfrak{R}^n$ ,  $x$ ’e bağlı doğrusal olmayan bir vektör fonksiyonudur. Eğer,  $f(x)$  doğrusal bir fonksiyon ise (5.3) denklemi ile verilen problem doğrusal en-küçük kareler problemidir. Doğrusal olmayan en-küçük kareler problemi, özgü yapısıyla kısıtsız en-küçükleme için özel bir durum sayılabilir, ayrıca bu problem, doğrusal olmayan  $n$  adet denklem sistemlerinin çözümü gibi değerlendirilir. Doğrusal olmayan en-küçük kareler problemleri veri uydurma, parametre kestirimi, fonksiyon tahmini gibi geniş uygulamalara sahiptir ve çözümleri, bazı etkili ve özel yöntemler ile sağlanır. Örneğin,  $(t_1, y_1), (t_2, y_2), \dots, (t_n, y_n)$  verileri doğrusal olmayan  $\phi(t, x)$  fonksiyonuna uydurulmak istensin,  $x$ ’in seçimine bağlı olarak  $\phi(t, x)$  fonksiyonu,

$$\min \sum_{i=1}^n [f_i(x)]^2 \quad (5.5)$$

farkının kareleri toplamının en-küçükleme duyarlılığında veriye uydurulur. Burada,

$$f_i(x) = \phi(t_i, x) - y_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5.6)$$

eşitliği fark fonksiyonu olarak tanımlanır. Genellikle,  $n \geq m$ ’dir. Doğrusal olmayan jeofizik problemlerinin çözümünde, arazide ölçülen veriler her zaman gürültü içerir, bu nedenle ölçülen ve kuramsal verilerin tam olarak çakışması beklenmez. Ölçülen

verinin kalitesi oranında çakışma olması istenir. Ölçülen veriler ile kuramsal olarak hesaplanan veriler arasındaki fark, yani hata her zaman vardır ve

$$e = f_i(x) - d_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5.7)$$

bağıntısı ile tanımlanır. Burada  $d_i$ , ayrı noktalarda ölçülmüş verileri içeren (nx1) boyutlu sütun vektör,  $f_i(x_j)$ , model parametrelerini ( $x_j$ ) içeren (nx1) boyutlu bir vektördür. Amaç, hatayı en-küçük yapan (minimizer) değeri bulmaktır. Bu denklemden model parametrelerinin çözümünü bulabilmek için, bilinmeyen  $x_j$  parametrelerinden hesaplanan  $f_i(x_j)$  model tepkisi olmak üzere,  $f_i(x_j + \Delta x_j)$  değeri için Taylor serisine açılarak aşağıdaki gibi doğrusallaştırılabilir

$$f_i(x_j + \Delta x_j) = f_i(x_j) + \frac{\partial f_i(x_j)}{\partial x_j} \Delta x_j + \frac{\partial^2 f_i(x_j)}{\partial x_j^2} \frac{\Delta x_j^2}{2} + \dots$$

$$i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (5.8)$$

burada ikinci ve daha yüksek dereceden terimler, yüksek dereceden türevlerin çok küçük olduğu düşünülerek ihmal edilir ve

$$f_i(x_j + \Delta x_j) = f_i(x_j) + \sum_{j=1}^m \Delta x_j \frac{\partial f_i(x_j)}{\partial x_j} \quad (5.9)$$

eşitliği yazılır. Burada,

$$(J(x))_{ij} = \frac{\partial f_i(x)}{\partial x_j} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_j} \\ \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_i(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_i(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_i(x)}{\partial x_j} \end{bmatrix}_{ixj} \quad (5.10)$$

$J \in \mathfrak{R}^{n \times m}$ , “Jacobian” veya duyarlılık (katsayılar) matrisi olarak isimlendirilir. Bu, fonksiyon bileşenlerinin birinci kısmi türevlerini içeren bir matristir. Amaç fonksiyonunun yani  $F(x)$ ’in gradyenti ise,

$$F'(x) = g(x) = \sum_{i=1}^n f_i(x) \frac{\partial f_i(x)}{\partial x_j} = J(x)^T f(x) \quad (5.11)$$

denklemleri ile elde edilir ve aynı zamanda  $F(x)$ ’in “Hessian” matrisine ihtiyacımız vardır. “Hessian” matrisi,

$$G(x) = F''(x) = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f_i(x)}{\partial x_j} \right) \left( \frac{\partial f_i(x)}{\partial x_j} \right)^T + f_i(x) \frac{\partial^2 f_i(x)}{\partial x_j^2} = J(x)^T J(x) + S(x) \quad (5.12)$$

$$S(x) = \sum_{i=1}^n f_i(x) \frac{\partial^2 f_i(x)}{\partial x_j^2} = \sum_{i=1}^m f_i(x) f_i''(x) \quad (5.13)$$

denklemleri ile ifade edilir. Burada  $f_i(x)$ , 0’a veya doğrusal fonksiyona yaklaştığı zaman  $\frac{\partial f_i^2(x)}{\partial x_j^2}$  denklemi de 0’a yaklaşır,  $S(x)$  çok küçüktür ve ihmal edilebilir.

### 5.2.1 İniş Yöntemleri

Doğrusal olmayan en-iyileme yöntemleri, çözümü yinelemeli olarak gerçekleştirmektedir. İniş yöntemi, bir başlangıç noktasından ( $x_0$ ) belirlenen amaç fonksiyonunu  $F(x): \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$ , en-küçük yapan ( $x^*$ ) değere yakınsayan vektör serilerini

$$x_0, x_1, x_2, \dots \quad (5.14a)$$

üretir. İniş yöntemlerinin çoğu, iniş koşulunu yerine getiren sınırlara sahiptir.

$$k \rightarrow \infty \text{ 'a giderken } x_k \rightarrow x^* \quad (5.14b)$$

burada  $x^*$ , lokal en-küçük yapan bir değerdir. Bütün yöntemlerde iniş koşulu,

$$F(x_{k+1}) < F(x_k) \quad (5.15)$$

durumunda sağlanır, ayrıca en-büyük yapan (maximizer) değere yakınsamayı engeller. Belirli bir fonksiyonun birkaç en-küçük yapan değere sahip olması durumunda, sonuç başlangıç noktasına ( $x_0$ ) bağımlı olacaktır. Yineleme işlemi,  $x_0$  gibi bir değerden başladığında yakınsama, sınırlı (local) en-küçük yapan  $x^*$  değerine yakın değildir. Bunun yanında, en-küçük yapan değerlerin doğruluğu tartışılır.  $x_0$  'a en yakın olan, en-küçük yapan değer olmayabilir.  $x_0$  'ın çözümden uzak olduğu durumda yöntemin,  $x^*$  'a doğru gittikçe yaklaşan yinelemeleri üretmesi ve yinelemenin global aşamasında güncel hataların,  $\|e_{k+1}\| < \|e_k\|$  şeklinde, ilk adımların dışında artmaması beklenir. Burada  $e_k$ ,  $e_k = x^* - x_k$ , güncel hatayı gösterir. Yinelemenin son (final) aşamasında  $x_k$ ,  $x^*$  değerine yaklaşır. Sınırlı yakınsama sonuçları, istenen bir doğrulukta  $x^*$  ile uyumlu bir sonucun daha hızlı nasıl elde edilebileceğini bize gösterir. Bazı yöntemler,

$$x_k, x^* \text{ 'ya yakın (yani } \|e_k\|, \text{ küçük) ve } 0 < c_1 < 1 \text{ ise } \|e_{k+1}\| \leq c_1 \|e_k\| \quad (5.16)$$

eşitliğindeki gibi doğrusal bir yakınsamaya sahiptir ve daha yüksek-dereceli yakınsamaya sahip olmak daha cazip olabilir. Örneğin, ikinci dereceden yakınsama:

$$x_k, x^* \text{ 'a yakın ve } 0 < c_2 < 1 \text{ ise } \|e_{k+1}\| \leq c_2 \|e_k\|^2 \quad (5.17)$$

eşitliği ile verilir. Uygulamalarda kullanılan yöntemlerin sadece birkaçında ikinci dereceden son yakınsama sağlanır. Diğer yandan, doğrusal son yakınsamadan daha

iyisi istenir. Pratikte kullanılan yöntemlerin çoğu aşırı dereceden doğrusal yakınsamaya sahiptir.

$$k \rightarrow \infty \text{ için } \frac{\|e_{k+1}\|}{\|e_k\|} \rightarrow 0 \quad (5.18)$$

Bu, ikinci mertebeden yakınsama kadar iyi olmasa da doğrusal yakınsamadan daha iyidir. İniş yöntemleri yinelemenin her bir adımında iniş koşulunu yani (5.15) denklemini sağlar. Güncel yinelemenin ilk adımında iniş doğrultusu  $h$  bulunur, daha sonra  $F$ -değerindeki iyi bir azalmayı veren adım uzunluğu bulunur.

### 5.2.1.1 İniş Yönteminin Temel Yapısı ve İniş Doğrultuları

Arama doğrultusu, bir iniş doğrultusu olmak zorundadır. Uygun bir yürüme uzaklığının seçilmesiyle  $F(x)$  fonksiyonunun daha küçük değerine ulaşılabilir ve bu sonuçla, iniş koşulu (5.15) denklemi sağlanabilir.

Algoritma 5.1 İniş yöntemi

**begin**

$k := 0$ ;  $x := x_0$ ; sağlama := yanlış

**repeat**

$\Delta x = \text{arama\_doğrultusu}(x)$

**if** ( $\Delta x$ 'in var olmaması durumu)

sağlama := doğru

$\rightarrow x$ , durağan ise

**else**

$\alpha := \text{adım\_uzunluğu}(x, \Delta x)$

$x := x + \alpha \Delta x$

$k := k + 1$

sağlama := güncelleme (sağlama)

**until** sağlama veya ( $k < k_{\max}$ )

**end**

(5.19)



Durdurma kriteri olarak, güncel hatanın yeterli küçüklükte olduğu ideal bir kriter kullanılmak istenir  $\|e_k\| < \delta_1$ . Diğer ideal koşul, en-küçük değere yeterli yakınlıkta olan  $F(x)$  'in güncel değeri olabilir  $F(x_k) - F(x^*) < \delta_2$ . Her iki koşul  $x_k \rightarrow x^*$  'a yakınsamayı gösterir ve gerçek uygulamalarda kullanılmayabilir. Çünkü  $x^*$  ve  $F(x^*)$  bilinmez. Bu koşullara göre yaklaşımın kullanılması yerine,

$$\|x_{k+1} - x_k\| < \varepsilon_1 \text{ veya } F(x_k) - F(x_{k+1}) < \varepsilon_2 \quad (5.20)$$

eşitlikleri kullanılmalıdır. Bu bağıntı, küçük  $\varepsilon_1$  ve  $\varepsilon_2$  değerleri ile gerçekleştirilirse  $\|e\|$  veya  $F(x_k) - F(x^*)$  değerlerinin küçük olup olmadığından emin olunmadığı vurgulanmalıdır. (5.18) nolu denklemde verilen yakınsamanın diğer bir çeşidi  $k \rightarrow \infty$  için  $F'(x_k) \rightarrow 0$  'dır. Bu, durdurma kriterinde gösterilebilir.

$$\|F'(x_k)\| < \varepsilon_3 \quad (5.21)$$

ve iniş yöntemlerinin birçok uygulamalarına dahil edilir. Yakınsayan fonksiyon değerlerinin özelliklerinin kullanımında yeni bir yöntem vardır.  $x^*$  değerinde  $F(x)$  'in Taylor serileri,

$$F(x_k) \cong F(x^*) + (x_k - x^*)^T F'(x^*) + \frac{1}{2} (x_k - x^*)^T F''(x^*) (x_k - x^*) \quad (5.22)$$

$x^*$ , sınırlı en küçükleyen ise  $F'(x^*) = 0$  ve  $H^* \equiv F''(x^*)$ , yarı-pozitif tanımlıdır. Bu eşitlikler bize,  $F(x_k) - F(x^*) \cong \frac{1}{2} (x_k - x^*)^T H^* (x_k - x^*)$  bağıntısını verir. Bu nedenle, durdurma kriteri,

$$x_k \cong x^* \text{ ile } \frac{1}{2} (x_{k+1} - x_k)^T H_k (x_{k+1} - x_k) < \varepsilon_4 \quad (5.23)$$

eşitliği ile sağlanır. Burada  $x_k - x^*$ ,  $x_{k+1} - x_k$  ile ve  $H^*$ ,  $H_k = F''(x_k)$  ile tahmin edilir. Taylor açılımından,  $\Delta x$  doğrultusunda  $x$  'e yakın bir noktada fonksiyon değerine göre birinci derecede bir yaklaşım

$$\alpha > 0 \text{ ile } F(x + \alpha \Delta x) = F(x) + \alpha \Delta x^T F'(x) + O(\alpha^2) \quad (5.24)$$

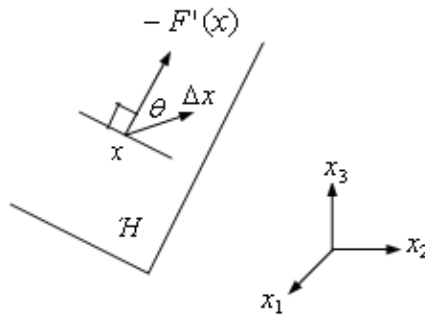
bağıntısı ile verilir. Burada  $\alpha$  'nın yeteri kadar küçük olması durumunda sonuncu terim ihmal edilebilir.

$$F(x + \alpha \Delta x) \cong F(x) + \alpha \Delta x^T F'(x) \quad (5.25)$$

$\alpha \Delta x^T F'(x)$  teriminin işareti, tepe yukarı (uphill) mı yoksa tepe aşağı (downhill) mı başlanacağını kararlaştırır.  $\mathfrak{R}^3$  vektör uzayında  $-F'(x)$  'e dik olan ve güncel pozisyon içerisinde bir hiper düzlem (Hyperplane,  $H$ ),

$$H = \{x + \Delta x \mid \Delta x^T F'(x) = 0\}$$

olarak gösterilir. Bu hiper düzlem, tepe-yukarı bir yarım-uzay ve tepe-aşağı bir yarım-uzay da alanı böler. İstenen yarım-uzay, içinde gösterilen bir  $-F'(x)$  vektörüne sahiptir. Şekil 5.7,  $\mathfrak{R}^3$  'deki konumunu gösterir.



Şekil 5.7 Tepe yukarıya (uphill) ve tepe aşağıya (downhill) bölünmüş bir  $\mathfrak{R}^3$  vektör uzayı (Frandsen ve diğer., 1999).

$F(x + \alpha\Delta x)$ ,  $\alpha = 0$  'da  $\alpha$  'nın azalan bir fonksiyonu ise,

$$\Delta x^T F'(x) < 0 \Leftrightarrow \Delta x, \text{ bir iniş doğrultusudur.} \quad (5.26)$$

(5.26) nolu eşitlikte verilen koşula dayanan yöntem, bir iniş yöntemidir. Şekil 5.7 'de  $\Delta x$ , iniş doğrultusu gösterilmiştir. Böyle bir  $\Delta x$  'ın var olmaması durumunda  $x$ , sabittir. Ayrıca amaç fonksiyon değerinde bir azalma elde edebilmek için  $\alpha$  'nın bulunması gerekir.  $\Delta x$  ve  $-F'(x)$  arasındaki açı,

$$\cos \theta = \frac{-\Delta x^T F'(x)}{\|\Delta x\| \cdot \|F'(x)\|} \text{ ile } \theta = \angle(\Delta x, F'(x)) \quad (5.27)$$

bağıntısı ile verilir. Mutlak iniş yöntemi,  $k$  'dan bağımsız  $\mu > 0$  ile, bütün  $k$  için  $\theta < \frac{\pi}{2} - \mu$  ile sağlanan  $\Delta x_k$  arama doğrultularına sahiptir. Burada anlatılanlar,  $\mathfrak{R}^3$  'deki geometri ile ilişkilidir ve ayrıca  $\mathfrak{R}^2$  içinde geçerli olduğu görülür. Eğer  $n$  boyutu 3 'den daha büyükse  $\theta$ ,  $\Delta x$  ve  $-F'(x)$  arasında sözde-açı (pseudoangle) olarak isimlendirilir. Bu durumda,  $\mu \geq 2$  olduğundan dolayı (5.26) ve (5.27) nolu denklemler kullanılabilir.

### 5.2.2 Sönüm Yöntemi

İniş yöntemlerinde yineleme adımları amaç fonksiyon ( $F(x)$ ) modelinin özelliklerinden tanımlanır.  $x$  güncel yinelemenin komşuluğunda  $F(x)$  fonksiyonunun ikinci dereceden Taylor serisi açılımı,

$$F(x + \Delta x) \cong L(\Delta x) \equiv F(x) + \Delta x^T g + \frac{1}{2} \Delta x^T A \Delta x \quad (5.28)$$

bağıntısı ile verilir. Burada  $g \in \mathfrak{R}^n$  ve  $A \in \mathfrak{R}^{n \times n}$  matrisi simetriktir. Model  $L(\Delta x)$ , bu açılıma göre bir tahmindir. Böyle bir modelin doğruluğu sadece  $\Delta x$ 'in yeterli derecede küçük olmasına bağlıdır.  $\Delta x$  adımının, saptanmasındaki bu durum sönümleme yöntemleri ile gerçekleştirilir.

Sönüm yönteminde adım,

$$\Delta x = \Delta x_{dm} \equiv \arg \min_h \left\{ L(\Delta x) + \frac{1}{2} \mu \Delta x^T \Delta x \right\} \quad (5.29)$$

ile hesaplanır. Burada, sönüm parametresi  $\mu \geq 0$ 'dır. Aşağıda görüldüğü gibi (5.19) nolu algoritmada (5.29) nolu denklem kullanılarak adım  $\Delta x$  hesaplanır,

$\Delta x$ 'in hesabı

if  $F(x + \Delta x) < F(x)$

$$x := x + \Delta x \quad (5.30)$$

$\mu$  güncelleştirilir

Adım  $\Delta x$ , iniş koşulunu sağlar ise bu işlem  $\alpha = 1$ 'e karşılık gelir. Aksi durumda  $\alpha = 0$ 'dır.  $\mu$ 'nın uygun bir değişimi ile bir sonraki yinelemede daha iyi bir şansa sahip olmak amaçlanır. Çünkü  $\Delta x$ 'in yeterli derecede küçük olması durumunda  $L(\Delta x)$ ,  $F(x + \Delta x)$  göre iyi bir tahmin olacağı varsayılır. Adımın ( $\Delta x$ ) başarısızlığının nedeni  $\Delta x$ 'in gereğinden fazla büyük olmasıdır ve azaltılmalıdır. Adım onaylanırsa bir sonraki yinelemede daha büyük adımın kullanımı olasıdır. Bu şekilde,  $x^*$ 'e ulaşılmadan önce gerekli adım sayıları azaltılır.

Amaç fonksiyon değerindeki kazanç, sonraki adım için güvenli bölge büyüklüğünü ve sönüm faktörünü kontrol eder. Hesaplanan adım ile modelin kalitesi kazanç oranıyla değerlendirilebilir. Kazanç faktörü,

$$\rho = \frac{F(x) + F(x + \Delta x)}{L(0) - L(\Delta x)} \quad (5.31)$$

bağıntısı ile verilir yani fonksiyon değerindeki doğru ve tahmini azalma arasındaki orandır.  $\rho$ 'nin küçük olması durumunda tahmin değeri  $F(x)$  fonksiyonu ile zayıf bir uyum gösterir ve  $\rho$ 'nin büyük olması durumunda ise uyum iyidir. Sönüm yönteminde  $\rho$ 'un küçük değerli olması durumunda sönüm faktörü arttırılmalıdır. Aksi durumda ( $\rho$ 'un büyük değerli olması) hesaplanan  $\Delta x$  için  $L(\Delta x)$ ,  $F(x + \Delta x)$  göre iyi bir yaklaşımdır ve sönüm azaltılmalıdır. Yaygın olarak kullanılan strateji (5.19) nolu algoritma ile benzerdir ve Marquardt (1963) tarafından önerilmiştir.

$$\begin{aligned} &\text{if } \rho < 0.25 \\ &\quad \mu := \mu * 2 \\ &\text{elseif } \rho > 0.75 \\ &\quad \mu := \mu / 3 \end{aligned} \quad (5.32)$$

bu yöntemde, 0.25 ve 0.75 eşliğindeki veya  $p_1 = 2$  ve  $p_2 = 3$  sayılarındaki küçük değişikliklere fazla duyarlı değildir. Fakat  $p_1$  ve  $p_2$  sayıları önemlidir çünkü  $\mu$ -değerlerinin salınmaması için seçilir.

### 5.2.3 En-dik İniş (Steepest Descent) Yöntemi

En-dik iniş yöntemi, Cauchy (1847) tarafından geliştirilmiştir. Arama doğrultusu, amaç fonksiyonun ( $F(x)$ ) en-küçükleyen değerini bulmak için adım doğrultusu olarak negatif gradyent doğrultusunu kullanır. Birinci dereceden Taylor serisi açılımı ile (5.27) nolu tanımda kullanılan, aşağıdaki yaklaşım ile elde edilir.

$$\frac{F(x) - F(x + \alpha h)}{\alpha \|\Delta x\|} \cong -\frac{\Delta x^T F'(x)}{\|\Delta x\|} = \|F'(x)\| \cos \theta \quad (5.33)$$

burada  $\theta$ ,  $\Delta x$  ve  $-F'(x)$  vektörleri arasındaki açıdır.  $\theta = \pi$  olduğu zaman en büyük kazanç oranı elde edilir ve

$$\Delta x_{sd} = -F'(x) \quad (5.34)$$

eşitliği ile belirlenen En-dik iniş (negatif gradyent) doğrultusu  $\Delta x_{sd}$  kullanılır. (5.34) eşitliğine dayanan yöntem, En-dik iniş yöntemi veya gradyent (gradient) yöntemi olarak adlandırılır. Bu yöntem,  $x$  'in en-küçükleyenden uzak olduğu durumda amaç fonksiyonunda önemli bir azalış sağlanır. Bu yöntem çoğu uygulamalı problemin çözümünde etkili değildir. Adım yeterli derecede küçük ise En-dik iniş yönteminde son yakınsama doğrusal ve çok yavaştır.

#### 5.2.4 Gauss-Newton Yöntemi

Bu yöntem, sonraki bölümde tanımlanacak birçok etkili yöntemin temelidir. Yöntem, vektör fonksiyonunun bileşenlerine göre alınan kısmi türev işlemlerine dayanır. Özel durumlarda, genel en-iyileme (optimizasyonu) için Newton yönteminin yaptığı gibi ikinci dereceden bir yakınsama verebilir. Gauss-Newton yöntemi  $x$  'in komşuluğunda  $f$  'in bileşenlerine göre doğrusal yaklaşımına dayanır.  $\|\Delta x\|$ , küçük olması durumunda Taylor serisi (5.8) açılımından,

$$f(x + \Delta x) \cong l(\Delta x) \equiv f(x) + J(x)\Delta x \quad (5.35)$$

bağıntısı elde edilir. Bunu,  $F$  'in (5.3) tanımında yerine konulursa,

$$\begin{aligned} F(x + \Delta x) &\cong L(\Delta x) \equiv \frac{1}{2}l(\Delta x)^T l(\Delta x) \\ &= \frac{1}{2}f(x)^T f(x) + \Delta x^T J(x)^T f(x) + \frac{1}{2}\Delta x^T J(x)^T J(x)\Delta x \\ &= F(x) + \Delta x^T J(x)^T f(x) + \frac{1}{2}\Delta x^T J(x)^T J(x)\Delta x \end{aligned} \quad (5.36)$$

Bağıntısı elde edilir. Gauss-Newton adımı  $\Delta x_{gn}$ ,  $L(\Delta x)$  'i küçültür.

$$\Delta x_{gn} = \arg \min_{\Delta x} \{L(\Delta x)\}$$

$L$  'nin "Hessian" ve gradyent (gradient) matrisi, aşağıdaki denklemler ile verilir.

$$L'(\Delta x) = J(x)^T f(x) + J(x)^T J(x) \Delta x \quad L''(\Delta x) = J(x)^T J(x) \quad (5.37)$$

Bu denklem (5.12) nolu bağıntı ile karşılaştırıldığında,  $L'(\Delta x) = F'(x)$  eşitliği gözlenir.  $L''(\Delta x)$  matrisi  $\Delta x$  'den bağımsızdır ve simetriktir. Eğer,  $J(x)$  tam mertebeye sahipse sütunlar doğrusal bağımsızdır.  $L''(\Delta x)$ , aynı zamanda pozitif tanımlıdır. Bunlar,  $L(\Delta x)$  'in tek bir küçültücü değere sahip olduğu anlamına gelir ve

$$(J(x)^T J(x)) \Delta x_{gn} = -J(x)^T f(x) \quad (5.38)$$

çözümü ile bulunur. Bu,  $F$  için bir iniş doğrultusudur.

$$\Delta x_{gn}^T F'(x) = \Delta x_{gn}^T (J(x)^T f(x)) = -\Delta x_{gn}^T (J(x)^T J(x)) \Delta x_{gn} < 0 \quad (5.39)$$

Burada karakteristik adım,

$$(J(x)^T J(x)) \Delta x_{gn} = -J(x)^T f(x) \quad (5.40)$$

$$x := x + \alpha \Delta x_{gn}$$

denklemleri ile verilir ve  $\alpha$ , çizgisel arama (line search) yöntemi ile bulunur. Klasik Gauss-Newton yöntemi bütün adımlarda  $\alpha = 1$  'i kullanır. En-küçükleme işleminde Newton yöntemi ikinci dereceden bir yakınsamaya sahiptir. Bu, Gauss-Newton yöntemi için normal bir durum değildir. Bunu anlamak için iki yöntemde kullanılan arama doğrultuları karşılaştırılır.

$$F''(x)\Delta x_n = -F'(x) \text{ ve } L''(\Delta x) \Delta x_{gn} = -L'(0)$$

(5.38) nolu denklemde belirtildiği üzere, üstteki iki eşitliğin sağ tarafındakiler benzerdir. Fakat (5.12) ve (5.38) nolu denklemler, katsayı matrislerinin farklılıklarını ortaya koyar.

$$F''(x) = L''(\Delta x) + \sum_{i=1}^m f_i(x) f_i''(x) \quad (5.41)$$

Eğer  $f(x^*) = 0$  ise  $x, x^*$  'e yakın olması için  $L''(\Delta x) \cong F''(x)$  eşittir ve aynı zamanda, Gauss-Newton yöntemi ile ikinci dereceden yakınsama elde edilir. Eğer  $\{f_i\}$  fonksiyonu küçük eğriliğe sahipse veya  $\{|f_i(x^*)|\}$  fonksiyonu küçükse, aşırı derecede doğrusal bir yakınsama beklenir. Fakat genelde, doğrusal bir yakınsama beklenmeli ve  $F(x^*)$  değerinin yakınsama hızını kontrol ettiği düşünülmelidir.

### 5.2.5 Levenberg-Marquardt Yöntemi

Levenberg (1944) ve daha sonra Marquardt (1963), sönümlü Gauss-Newton yönteminin kullanımını önermişlerdir. Burada adım vektörü  $\Delta x_{lm}$ , (5.38) denklemi üzerinde yapılan aşağıdaki değişiklikler ile tanımlanmıştır.

$$g = J(x)^T f(x) \text{ ve } \mu \geq 0 \text{ ile } (J(x)^T J(x) + \mu I) \Delta x_{lm} = -g \quad (5.42)$$

Sönüm parametresi  $\mu$ , birkaç etkiye sahiptir:

a) Bütün  $\mu > 0$  için duyarlılık matrisi pozitif tanımlıdır ve  $\Delta x_{lm}$  'nin bir iniş doğrultusu olmasını sağlar.

b)  $\mu$  'nin büyük değerleri için,  $\Delta x_{lm} \cong -\frac{1}{\mu} g = -\frac{1}{\mu} F'(x)$  bağıntısı elde edilir.

Örneğin, en-dik iniş yönünde kısa bir adımdır. Bu işlem, güncel yinelemenin çözümden uzak olduğu durumda iyidir.



c) Eğer  $\mu$ , çok küçük ise  $\Delta x_{gn} \cong \Delta x_{lm}$  eşitliği  $x$ ,  $x^*$  'e yakınsa, yinelemenin son safhasında iyi bir adımdır. Eğer  $F(x^*) = 0$  ise (veya çok küçükse) ikinci dereceden nihai bir yakınsama elde edilebilir.

d) Bu şekilde sönüm parametresi hem yönü hem de adımın büyüklüğünü etkiler. Bu işlem, özel bir çizgisel arama yöntemi kullanılmadan yöntemin uygulanmasını sağlar. Başlangıç  $\mu$ -değerinin seçimi,  $A_0 = J(x_0)^T J(x_0)$  eşitliğinde elementlerin büyüklüğü ile ilişkilendirilir.

$$\mu_0 = \tau \max_{ij} \{ A_0 \} \quad (5.43)$$

burada  $\tau$ , kullanıcı tarafından seçilir ve  $x_0$ ,  $x^*$  'e yakınsa  $\tau$  için çok küçük bir değer verilir. Yineleme boyunca  $\mu$  'nın büyüklüğü, aşağıdaki algoritmada tanımlandığı gibi güncelleştirilir.

$k := 0$ ;  $x := x_0$ ;  $\mu := \mu_0$  sağlama := yanlış

**repeat**

$\Delta x :=$  arama\_doğrultusu ( $x$ )

Çözüm  $(J^T J + \mu I) \Delta x = -F'$

$\alpha :=$  adım\_uzunluğu ( $x, \Delta x$ )

$x := x + \alpha \Delta x$

$k := k + 1$

Güncelleme  $\mu$

**until** STOP

Güncelleştirme, aşağıdaki bağıntı ile verilen kazanç oranıyla kontrol edilir.

$$\rho = \frac{F(x) - F(x + \Delta x_{lm})}{L(0) - L(\Delta x_{lm})}$$

burada payda, doğrusal model tarafından tahmin edilen kazançtır.

$$\begin{aligned}
L(0) - L(\Delta x_{lm}) &= -\Delta x_{lm}^T J(x)^T f(x) - \frac{1}{2} \Delta x_{lm}^T J(x)^T J(x) \Delta x_{lm} \\
&= -\frac{1}{2} \Delta x_{lm}^T (2g + J(x)^T J(x) + \mu I - \mu I) \Delta x_{lm} \\
&= \frac{1}{2} \Delta x_{lm}^T (\mu \Delta x_{lm} - g)
\end{aligned}$$

bu bağıntıda ise hem  $\Delta x_{lm}^T \Delta x_{lm}$  hem de  $-\Delta x_{lm}^T g$  pozitifdir, bu yüzden  $L(0) - L(\Delta x_{lm})$  eşitliğinin pozitif olması gerekir.  $\rho$  değerinin büyük olması,  $L(\Delta x_{lm})$ 'nin  $F(x + \Delta x_{lm})$ 'e göre iyi bir tahmin olduğunun göstergesidir. Gauss-Newton adımına daha yakın olan bir sonraki Levenberg-Marquardt adımı için  $\mu$  azaltılabilir. Eğer  $\rho$  çok küçük (hatta belki negatif) ise  $L(\Delta x_{lm})$  zayıf bir tahmindir. Adım uzunluğu azaltılarak, en-dik iniş yönüne daha yakın olması amacıyla  $\mu$ , iki kat arttırılmalıdır.

Algoritmanın durdurma kriteri global bir küçültmede,  $F'(x^*) = g(x^*) = 0$  olması durumunda sağlanır. Bu yüzden,

$$\|g\|_{\infty} \leq \varepsilon_1 \quad (5.44a)$$

eşitliği kullanılabilir. Burada  $\varepsilon_1$ , küçük pozitif bir sayıdır ve kullanıcı tarafından seçilir. Diğer ilgili durdurma kriteri,  $x$ 'deki değişikliklerin çok küçük olması durumunda gerçekleşir.

$$\|x_{yeni} - x\| \leq \varepsilon_2 (\|x\| + \varepsilon_2) \quad (5.44b)$$

Bu ifade eğer  $x$ , 0'a yakın ise  $\|x\|$ , mutlak adım uzunluğuna göre büyük olduğu zaman bağıl adım uzunluğundan dolayı aşamalı bir değişim gösterir. Sonuç olarak, yineleme işleminde sonsuz döngü,

$$k \geq k_{\max} \quad (5.44c)$$

koşulu ile kontrol altına alınır. Ayrıca  $\varepsilon_2$  ve  $k_{\max}$  kullanıcı tarafından seçilir.

Algoritma 5.2 Levenberg-Marquardt algoritması (Madsen ve diğer., 2004).

**Begin**

$$k := 0; \quad v := 2; \quad x := x_0$$

$$A := J(x)^T J(x); \quad g := J(x)^T f(x)$$

$$\text{sağlama} := (\|g\|_{\infty} \leq \varepsilon_1); \quad \mu := \tau * \max_{jj} \{A_0\}$$

**While** (sağlamazsa) ve ( $k < k_{\max}$ )

$$k := k + 1; \quad \text{çözüm} \quad (A + \mu I)\Delta x_{lm} = -g$$

$$\text{if} \quad \|\Delta x_{lm}\| \leq \varepsilon_2 (\|x\| + \varepsilon_2)$$

**sağlama := doğru**

**else**

$$x_{\text{yeni}} := x + \Delta x_{lm}$$

$$\rho := (F(x) - F(x_{\text{yeni}})) / (L(0) - L(\Delta x_{lm}))$$

**if**  $\rho > 0$

$$x := x_{\text{yeni}}$$

$$A := J(x)^T J(x); \quad g := J(x)^T f(x)$$

$$\text{Sağlama} := (\|g\|_{\infty} \leq \varepsilon_1)$$

$$\mu := \mu \cdot \max\left\{\frac{1}{3}, 1 - (2\rho - 1)^3\right\}; \quad v := 2$$

**else**

$$\mu := \mu * v; \quad v := 2 * v$$

**end**

### 5.3 Melez (Hybrid) Yöntemi

Yerel ve global optimizasyon yöntemleri jeofizik problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılmakta ve yeraltı yapılarının haritalanmasında başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Yerel ve global algoritmalar ile ilişkili temel sakınca, iyi bir başlangıç model parametreleri seçimi ve hesaplama işlemlerinin fazlalığıdır.

Bu çalışmada, iki algoritmanın birleştirildiği hem Global hem de Yerel optimizasyon yöntemlerinin eksikliklerini gidermek için Melez optimizasyon algoritması geliştirilmiştir. Jeofizik ters-çözüm işleminde Yerel ve Global

optimizasyon tasarımının birleştirilmesinde çeşitli araştırmacılar tarafından başarılı denemeler yapılmıştır (Cary ve Chapman, 1998; Porsani ve diğer., 1993; Stork ve Kusuma, 1992; Liu ve diğer., 1995). Cary ve Chapman (1988), sismik dalga-biçimi ters-çözüm problemi için gradyent algoritması ile Monte Carlo yöntemini birleştirmiştir. İki adımdan oluşan bu yöntemde ilk adımda, Monte Carlo rastgele arama yöntemi, seyahat zaman verisine uygun iyi bir hız modelini bulmak için kullanılmıştır. İkinci adımda bir yerel algoritma, verinin hem seyahat zaman hem de genlik bilgisinin kullanımıyla yerküre modelini güncelleştirmek için uygulanmıştır. Bu yaklaşımda düşük frekanslı model bilgisi, Monte Carlo yöntemi ile elde edilir ve modelin yüksek frekans bilgisi gradyent algoritmasının kullanımıyla elde edilir. Porsani ve diğer., (1993) ve Stork ve Kusuma (1992), dalga-biçimi ters-çözümünde ve rezidüel (kalıntı) statik problemlerinde, genetik algoritma olarak adlandırılan Global optimizasyon yöntemlerinin diğer bir çeşidini kullanmıştır. Porsani ve diğer., (1993) melez (hybrid) ters-çözümünde bir çift iki adımlı yöntem kullanmıştır. Yerel algoritma, genetik algoritmanın her bir neslinden (generation) elde edilen en iyi modele uygulanmıştır. Stork ve Kusuma (1992), rezidüel statik problemleri için dalga-biçim endik çıkış (steepest ascent) yöntemi ve genetik algoritmanın birleşimini kullanmıştır. Stork ve Kusuma (1992) 'nın çalışmasında Yerel yöntem, modellerin başlangıç topluluğunun (population) uygunluğu arttırmak için başlangıç neslinde genetik algoritmaya uygulanmıştır. Ters-çözüm işlemi boyunca Yerel yöntem, modellerin topluluğunun genel uygunluğunu geliştirmek için keyfi olarak uygulanmıştır. Liu ve diğer., (1995) ise sismik dalga-biçimi ters-çözüm işleminde ve Rosenbrock fonksiyonunun minimumunun bulunmasında tekyönlü (simplex) bir yöntem ve simulated annealing yönteminin birleşimini uygulamıştır. Önerilen hemen hemen bütün Melez algoritmaların hepsi, klasik Global optimizasyon yaklaşımından hesaplama işlemi olarak daha hızlı ve verimli olduğu bulunmuştur.

Böylece, Melez ters-çözüm yönteminin başarılı uygulamalarıyla jeolojik yapıların ve litolojinin daha iyi çözülmesi, iyi bir başlangıç modeli zorunluluğunun giderilmesi, ters-çözüm işleminin hesap maliyetini azaltması ve iyi bir model veya modeller elde edilmesi beklenir. Bunların hepsi, yeraltı malzemesinin özelliklerinin ve yapılarının daha iyi tanımlanmasında çözüm gücümüzü geliştirir.

#### 5.4 Başlangıç Modelinin Oluşturulması

Başlangıç modeli ( $m_0$ ), yerel ters-çözüm yöntemlerinde yinelemeyi başlatmak için giriş parametresi olarak kullanılır. Başlangıç modeli, temel-mod 'dan Rayleigh dalgası hızı ( $V_R$ ) ve frekans ( $f$ ) veri çifti kullanılarak oluşturulur. İlk olarak,  $V_S$  'nin  $z$  derinliğiyle ilişkili  $V_R$  'e eşit olduğu varsayılır:

$$z = \frac{\lambda_R}{3} \quad (5.45)$$

$$\lambda_R = \frac{V_R}{f} \quad (5.46)$$

burada  $\lambda_R$ , Rayleigh dalga boyudur.  $V_S$  ve  $z$  veri çiftlerinden “cubic spline interpolation”, yarı-uzayın dışında tabakaların sayısı ( $n$ ) ve yarı-uzayın derinliği ( $z_{hs}$ ) ile tanımlanan belirli derinliklerde ( $z_i$ ) zeminin  $V_S$  'sini hesaplamak için kullanılır.

$$\begin{aligned} dz &= z_{hs} / n \\ z_0 &= 0 \\ \text{for } i &= 1 : n \\ z_i &= z_0 + dz \\ z_0 &= z_i \\ \text{end} \end{aligned} \quad (5.47)$$

Başlangıç modelini hesaplamak için birkaç yol vardır (Xia ve diğer., 1999; Liu ve Luke, 2002). Burada tanımlanan başlangıç modeli hesaplama yöntemi, oldukça basit bir yöntemdir ve genellikle yeterli sonuçlar sağlar. Pratikte, yarı-uzayın derinliği genellikle maksimum ofsetin yarısı kadar alınır ve tabakaların sayısı kullanıcı tarafından belirlenir. Bu tezde, arazi çalışmaları için yarı uzay derinliği 4 m, tabaka kalınlığı 0.5 m ve tabaka sayısı 8 olarak seçilmiştir.

## BÖLÜM ALTI

### UYGULAMALAR

Bu bölümde, aktif çok-kanallı yüzey dalgası analizinin yüzeye-yakın yeraltı yapılarına uygulanabilirliğini ve başarısını sınamak amacıyla kuramsal ve arazi çalışma sonuçları irdelenmiştir. İlk aşamada, kuramsal ve arazi yüzey dalgası verileri kullanılarak dispersiyon (frekans-bağımlı faz hızı) eğrileri oluşturulmuştur, daha sonra dispersiyon eğrilerinin ters-çözümüyle yeraltı yapılarına ait S-dalgası hız profilleri elde edilmiştir. Ters-çözüm aşamasında Matlab ortamında geliştirilen program kodları sırasıyla Levenberg-Marquardt, Genetik Algoritma ve Melez yöntemi uygulanmıştır. Levenberg-Marquardt yöntemi için Madsen ve diğer., 2004 tarafından geliştirilen algoritma, Genetik Algoritma için Shiffeld Üniversitesi, Otomatik kontrol ve sistem mühendisliği araştırmacıları tarafından geliştirilen Genetik algoritma toolbox 'ı problemin ters-çözüm aşamasına değiştirilerek uyarlanmıştır.

#### 6.1 Kuramsal Çalışmalar

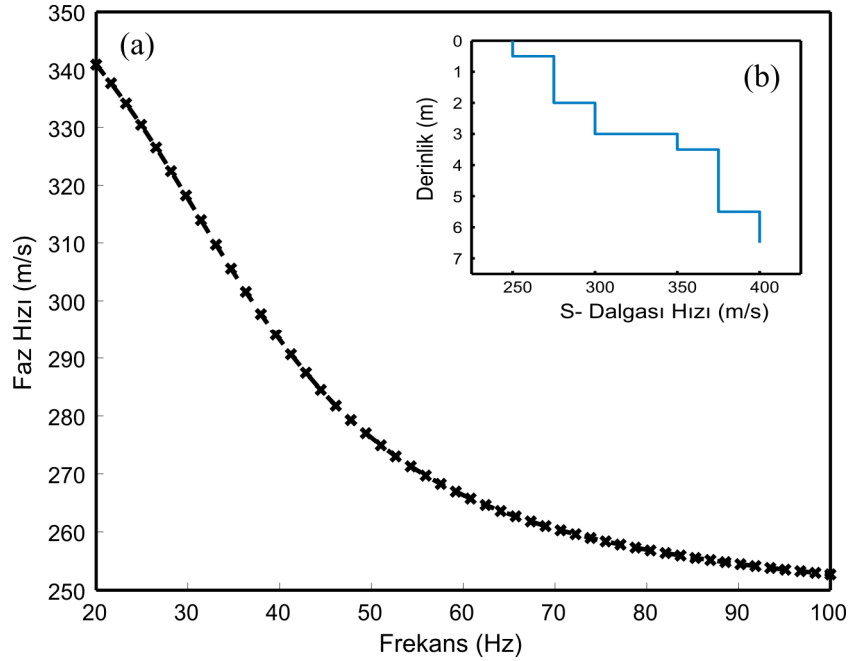
Tablo 6.1 ve Tablo 6.2 'deki kuramsal tabaka modellerinin malzeme özellikleri kullanılarak iki adet kuramsal dispersiyon eğrisi oluşturulmuştur. Dispersiyon eğrileri, düz modelleme algoritması kullanılarak sentetik yatay zemin profillerinden oluşturulur. Düz modelleme algoritması, Rayleigh dalgası hızlarını oluşturmak için kriter olarak En-küçük Mutlak Özdeğeri (smallest absolute eigenvalue) ve kuramsal model olarak Dinamik Sıklık Matrisinden (dynamic stiffness matrix) yararlanır. Bu amaç için Matlab ortamında geliştirilen program kodu (Supranata, 2006) problemin düz çözüm aşamasında değiştirilerek uyarlanmıştır. Bu çalışmada, dispersiyon verisinin bant genişliği 20–100 Hz olarak seçilmiştir.

### 6.1.1 Kuramsal Modellerin Oluşturulması

Model-1 için Tablo 6.1 görüldüğü gibi farklı yoğunluk, kalınlık ve hız değerleri kullanılmıştır. S-dalgası hız profili derinlikle artmaktadır.

Tablo 6.1 Model-1 için kuramsal yeraltı yapı model parametreleri

Tabaka sayısı	$V_S$ (m/s)	$V_P$ (m/s)	$\rho$ (gr/cm <sup>3</sup> )	$h$ (m)
1	250.0	500.0	1.79	0.5
2	275.0	550.0	1.80	1.5
3	300.0	600.0	1.81	1.0
4	350.0	700.0	1.82	0.5
5	375.0	750.0	1.83	2.0
6	400.0	800.0	1.84	

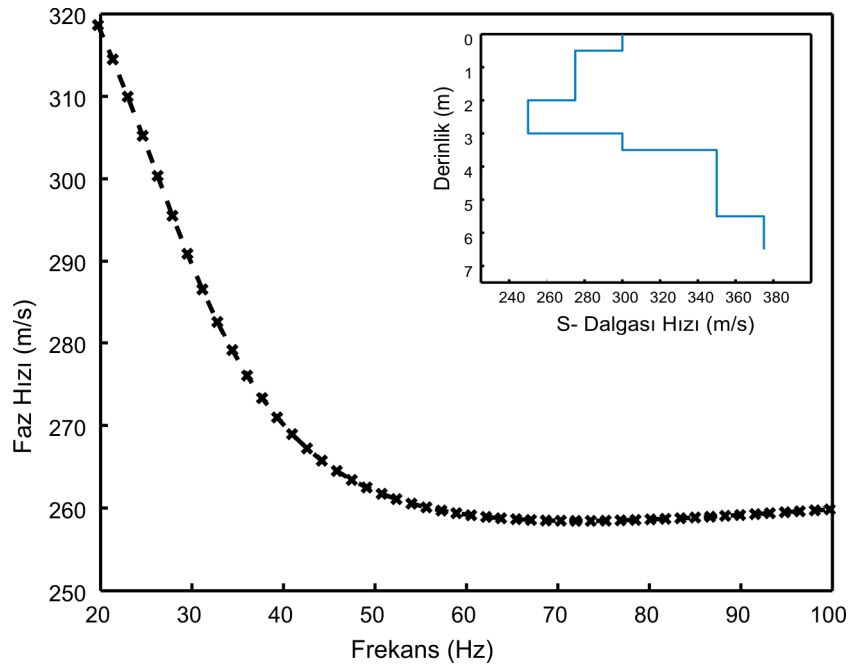


Şekil 6.1 Model-1 için kuramsal yeraltı yapı modeli a) dispersiyon eğrisi b) S-dalgası hız profili

Model-2 için Tablo 6.2 görüldüğü gibi farklı yoğunluk, kalınlık ve hız değerleri kullanılmıştır. S-dalgası hız profili derinlikle bir azalış ve sonrasında artma gösterir.

Tablo 6.2 Model-2 için kuramsal yeraltı yapı model parametreleri

Tabaka sayısı	$V_S$ (m/s)	$V_P$ (m/s)	$\rho$ (gr/cm <sup>3</sup> )	$h$ (m)
1	300.0	600.0	1.79	0.5
2	275.0	550.0	1.78	1.5
3	250.0	500.0	1.77	1.0
4	300.0	600.0	1.79	0.5
5	350.0	700.0	1.81	2.0
6	375.0	750.0	1.83	

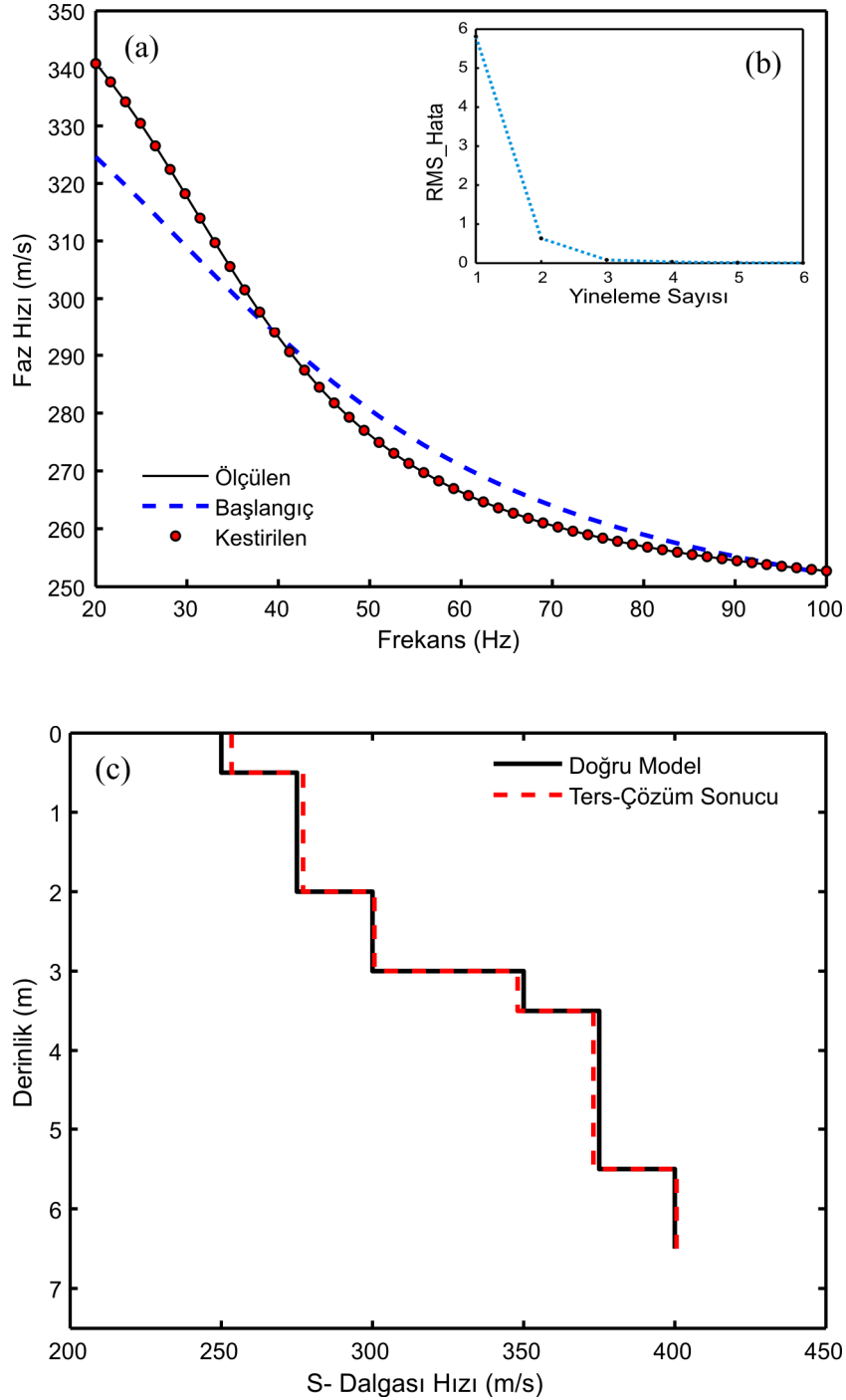


Şekil 6.2 Model-2 için kuramsal yeraltı yapı modeli a) dispersiyon eğrisi b) S-dalgası hız profili

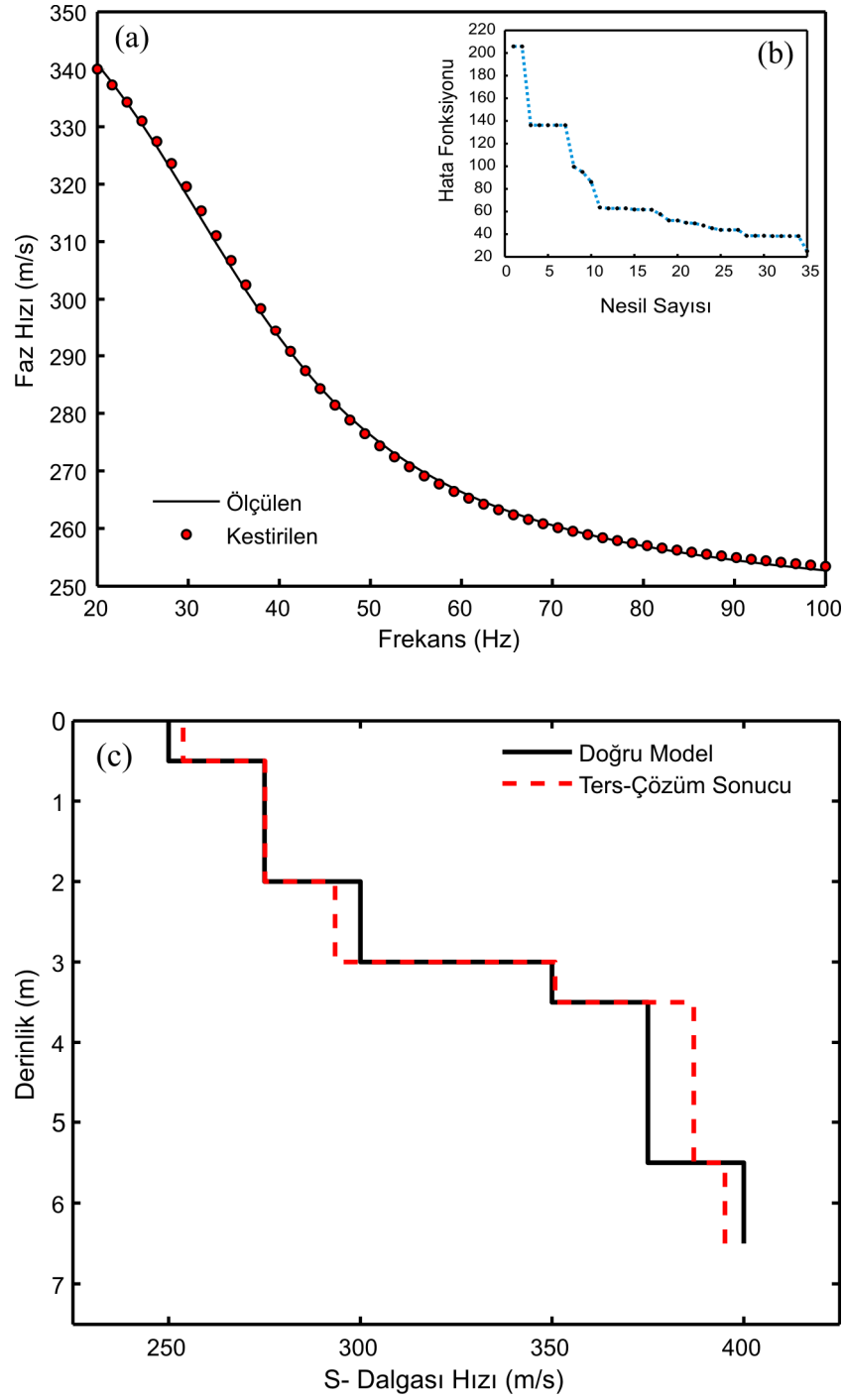


### 6.1.2 Modellerin Çözüm İşlemleri

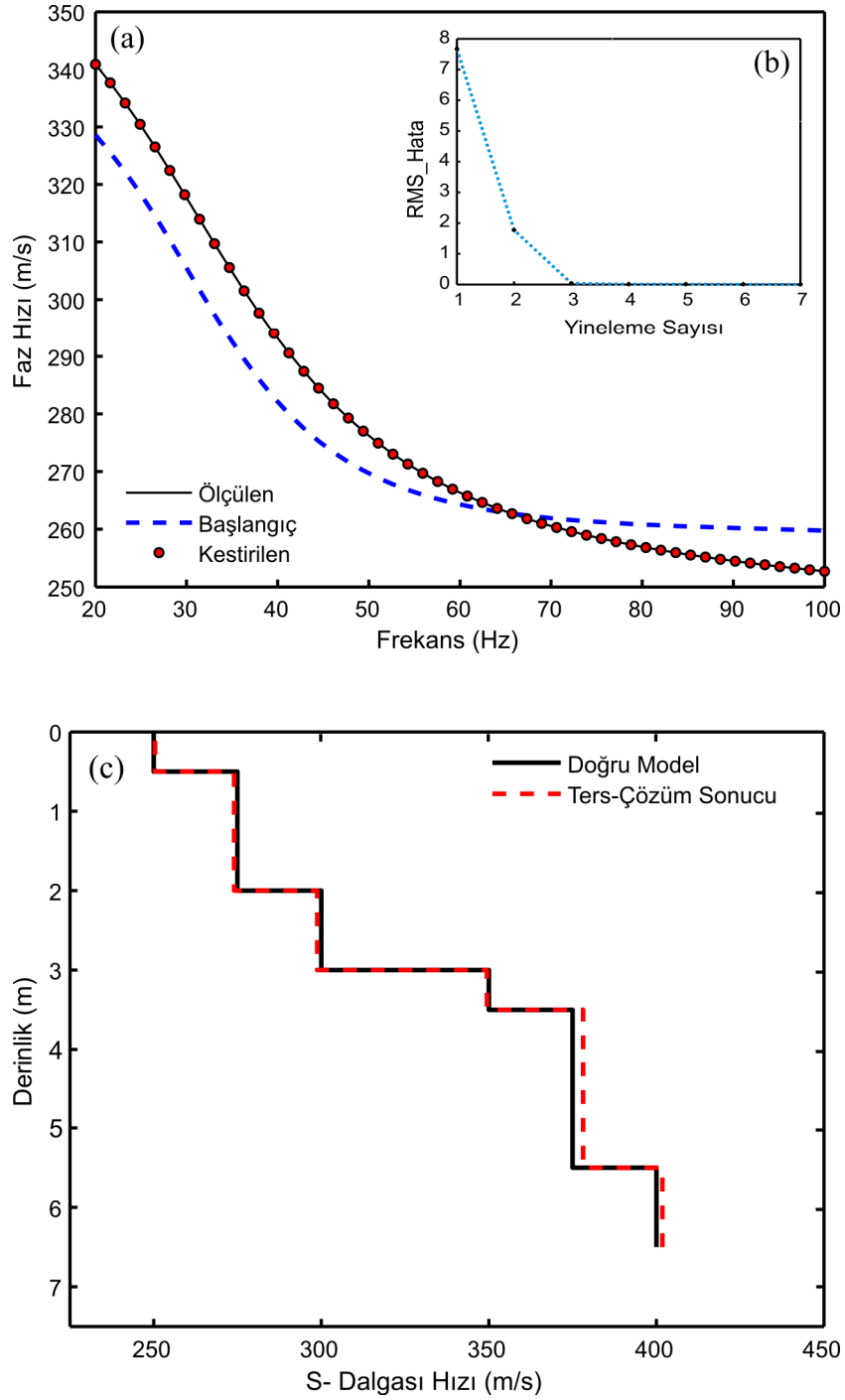
Model-1 için,



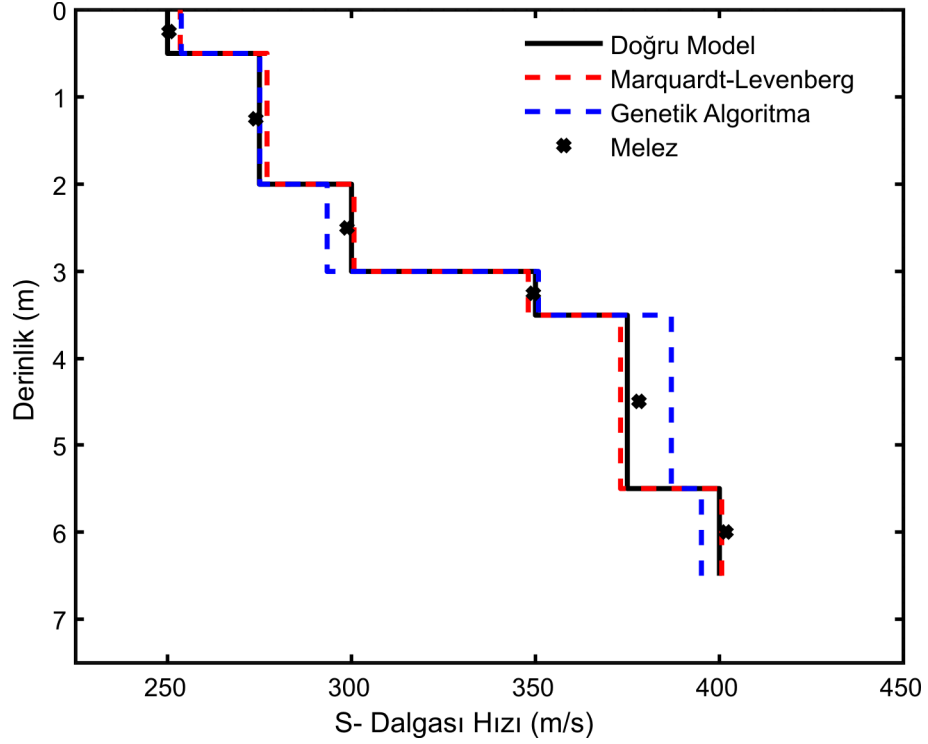
Şekil 6.3 Çok-kanallı yüzey dalgası verilerinin Levenberg-Marquardt yöntemi ile değerlendirilmesi: a) ölçülen (siyah düz çizgi), başlangıç (mavi kesikli çizgi) ve kestirilen (kırmızı noktalı çizgi) dispersiyon eğrileri. b) RMS hata. c) S-dalgası hız profillerinin derinlikle değişimi: doğru model (siyah düz çizgi), ters-çözüm sonucu (kırmızı kesikli çizgi).



Şekil 6.4 Çok-kanallı yüzey dalgası verilerinin Genetik Algoritma yöntemi ile değerlendirilmesi: a) ölçülen (siyah düz çizgi) ve kestirilen (kırmızı noktalı çizgi) dispersiyon eğrileri. b) RMS hata. c) S-dalgası hız profillerinin derinlikle değişimi: doğru model (siyah düz çizgi), ters-çözüm sonucu (kesikli kırmızı çizgi).



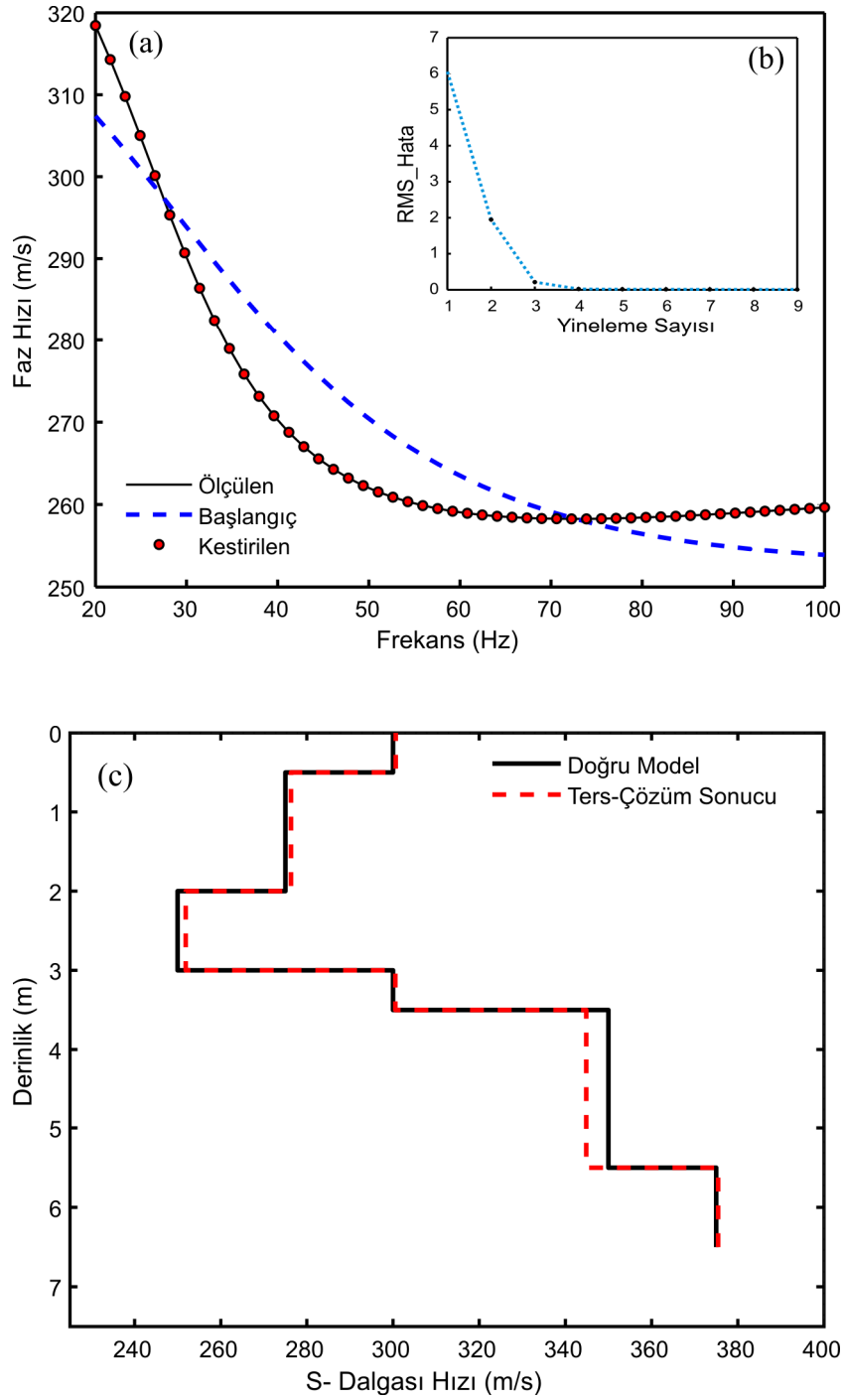
Şekil 6.5 Çok-kanallı yüzey dalgası verilerinin Melez (Hybrid) yöntemi ile değerlendirilmesi: a) ölçülen (siyah düz çizgi), başlangıç (mavi kesikli çizgi) ve kestirilen (kırmızı noktalı çizgi) dispersiyon eğrileri. b) RMS hata. c) S-dalgası hız profillerinin derinlikle değişimi: doğru model (siyah düz çizgi), ters-çözüm sonucu (kırmızı kesikli çizgi).



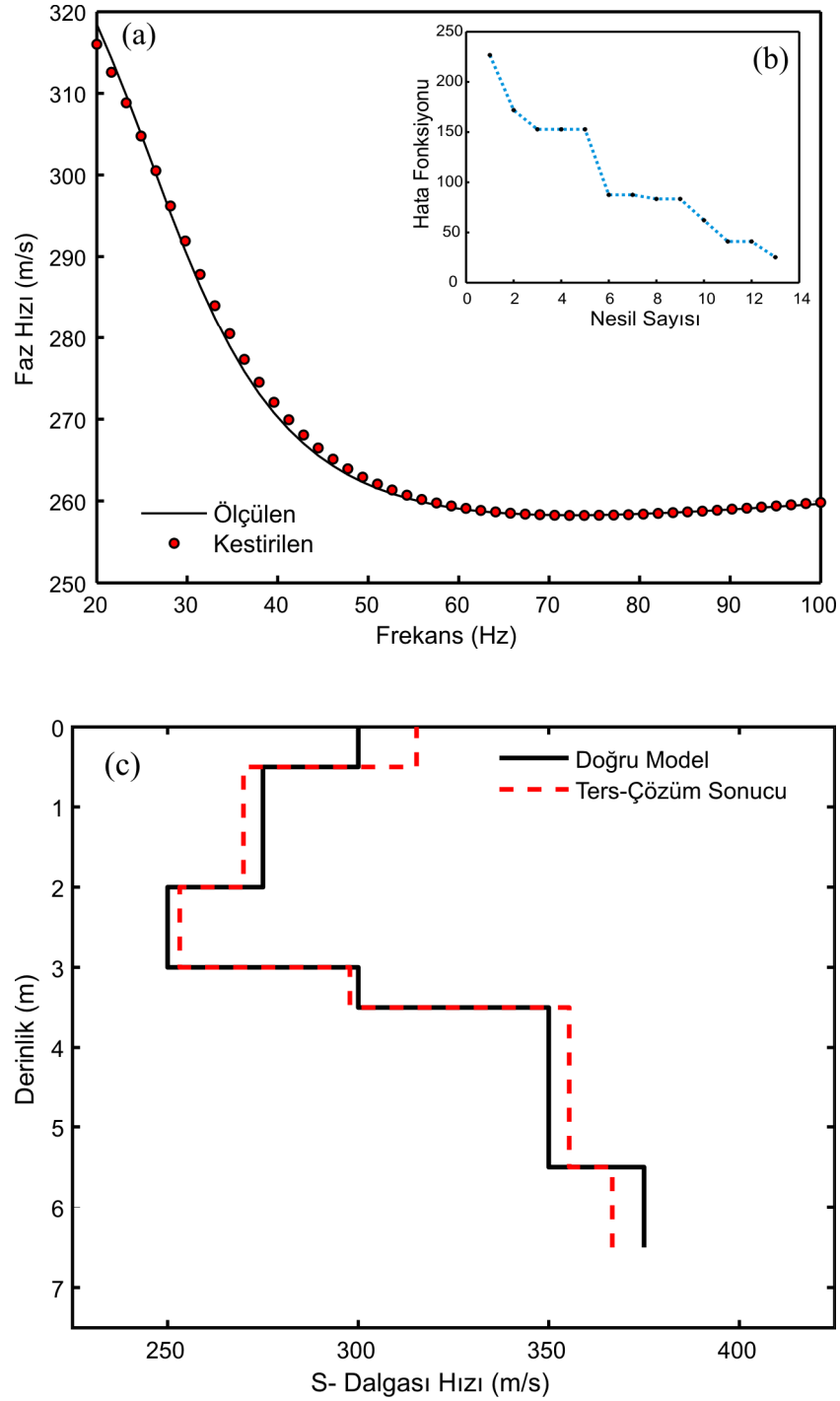
Şekil 6.6 S-dalgası hız profillerinin elde edilmesinde kullanılan ters-çözüm yöntemlerinin karşılaştırılması. Doğru model (düz siyah çizgi), Levenberg-Marquardt yöntemi (kırmızı kesikli çizgi), Genetik Algoritma (mavi kesikli çizgi), Melez yöntemi (siyah çapraz nokta).

Model-1 için elde edilen dispersiyon eğrisine sırasıyla Levenberg-Marquardt, Genetik Algoritma ve Melez ters-çözüm yöntemleri uygulanmıştır. Levenberg-Marquardt yönteminde temel mod dispersiyon eğrisinden Rayleigh dalgası hızı ve frekans bilgisi (5.45, 5.46 ve 5.47) bağıntıları kullanılarak başlangıç modeli oluşturulmuştur. Dolayısıyla gürültüsüz bir dispersiyon verisi ile iyi bir başlangıç modeli oluşturulur (Şekil 6.3). Levenberg-Marquardt yöntemi için ölçülen, başlangıç ve kestirilen dispersiyon eğrileri ve S-dalgası hız profilleri çizilmiştir. Genetik algoritma yönteminde araştırma uzayı için alt ve üst S-dalgası hız değerleri kullanılarak çözüme ulaşılır. Melez yönteminde Genetik Algoritma ve Levenberg-Marquardt yöntemi ardışık olarak uygulanır. Levenberg-Marquardt yönteminde kullanılan başlangıç modeli genetik algoritma ile sağlanır ve işleme sokulur. Model-1 için doğru model hız profilleri, ters-çözüm sonucunda elde edilen hız profilleri ile başarılı bir çakışma göstermiştir.

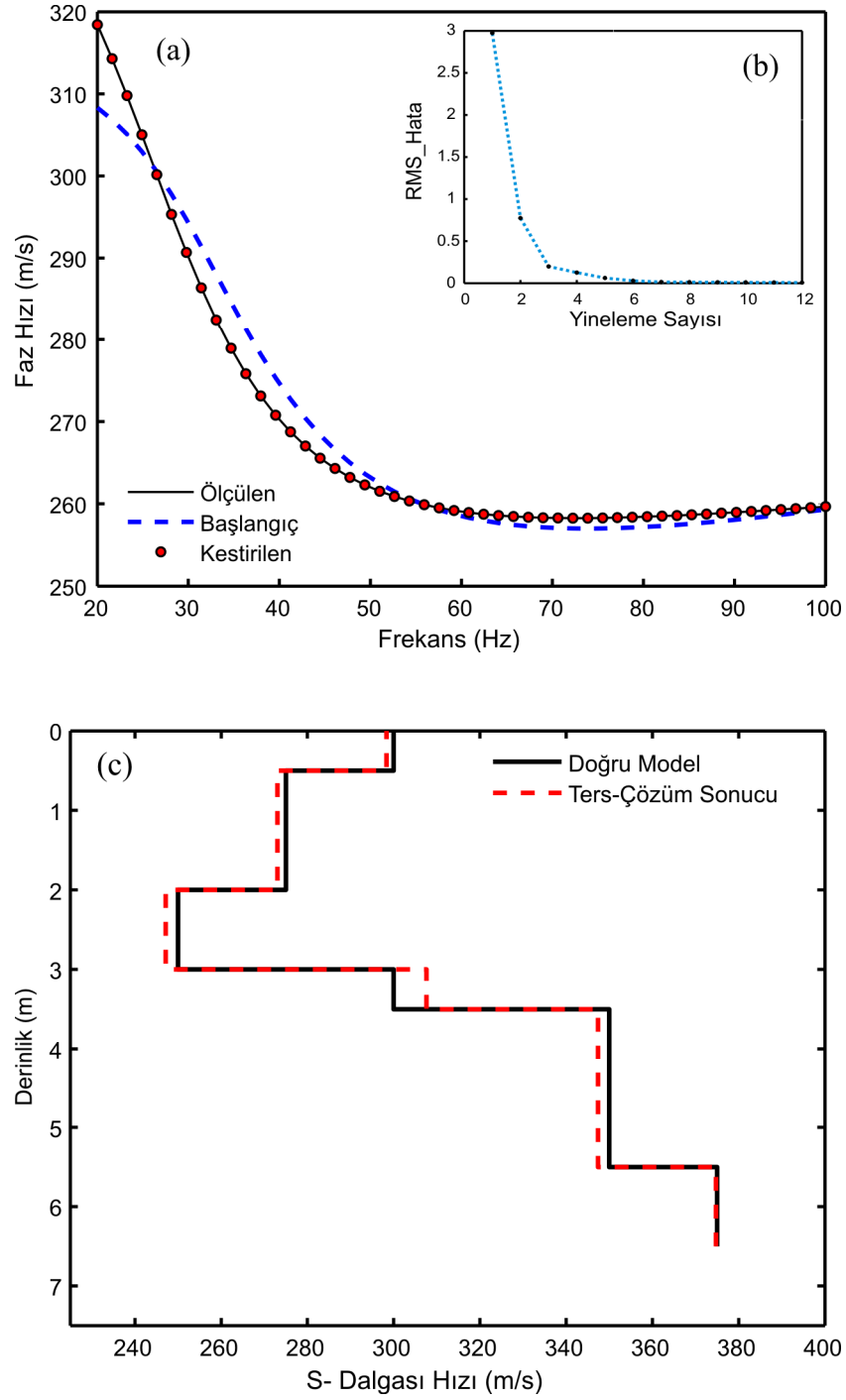
Model-2 için,



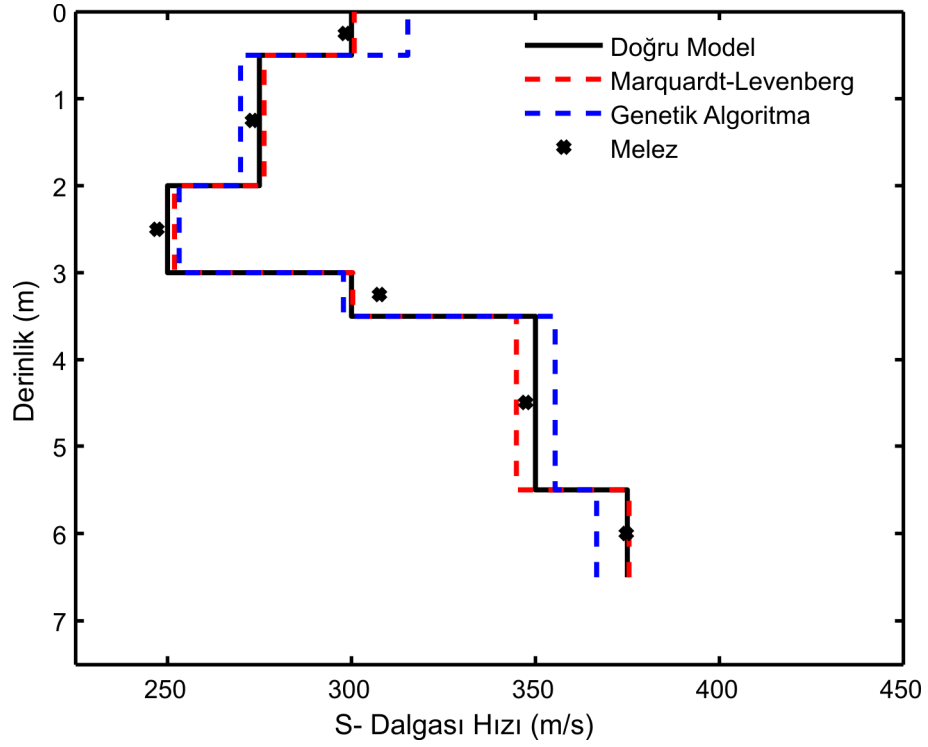
Şekil 6.7 Çok-kanallı yüzey dalgası verilerinin Levenberg-Marquardt yöntemi ile değerlendirilmesi: a) ölçülen (siyah düz çizgi), başlangıç (mavi kesikli çizgi) ve kestirilen (kırmızı noktalı çizgi) dispersiyon eğrileri. b) RMS hata. c) S-dalgası hız profillerinin derinlikle değişimi: doğru model (siyah düz çizgi), ters-çözüm sonucu (kırmızı kesikli çizgi).



Şekil 6.8 Çok-kanallı yüzey dalgası verilerinin Genetik Algoritma yöntemi ile değerlendirilmesi: a) ölçülen (siyah düz çizgi) ve kestirilen (kırmızı noktalı çizgi) dispersiyon eğrileri. b) RMS hata. c) S-dalgası hız profillerinin derinlikle değişimi: doğru model (siyah düz çizgi), ters-çözüm sonucu (kırmızı kesikli çizgi).



Şekil 6.9 Çok-kanallı yüzey dalgası verilerinin Melez (Hybrid) yöntemi ile değerlendirilmesi: a) ölçülen (siyah düz çizgi), başlangıç (mavi kesikli çizgi) ve kestirilen (kırmızı noktalı çizgi) dispersiyon eğrileri. b) RMS hata. c) S-dalgası hız profillerinin derinlikle değişimi: doğru model (siyah düz çizgi), ters-çözüm sonucu (kırmızı kesikli çizgi).



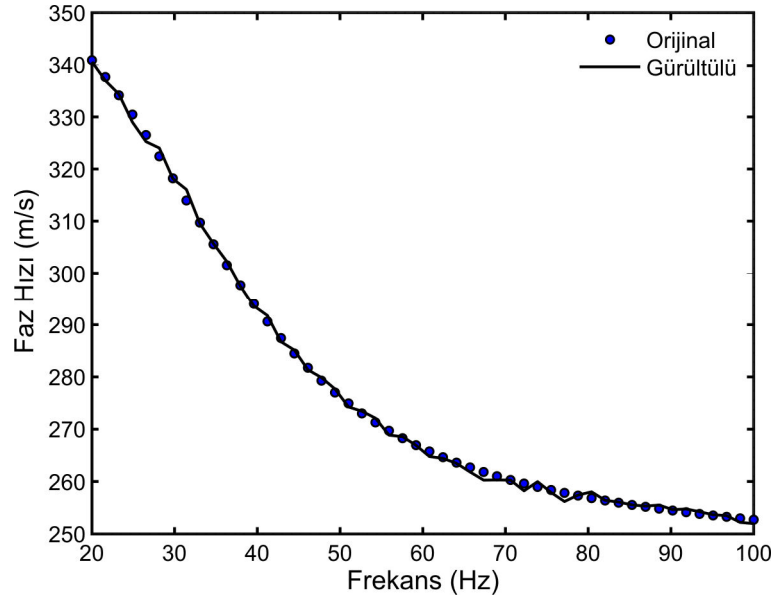
Şekil 6.10 S-dalgası hız profillerinin elde edilmesinde kullanılan ters-çözüm yöntemlerinin karşılaştırılması. Doğru model (düz siyah çizgi), Levenberg-Marquardt yöntemi (kırmızı kesikli çizgi), Genetik Algoritma (mavi kesikli çizgi), Melez yöntemi (siyah çapraz nokta).

Aynı şekilde, model-2 için elde edilen dispersiyon eğrisine sırasıyla Levenberg-Marquardt, Genetik Algoritma ve Melez ters-çözüm yöntemleri uygulanmıştır. Her bir yöntem için ölçülen, başlangıç ve kestirilen dispersiyon eğrileri ve S-dalgası hız profilleri çizilmiştir. Doğru model hız profilleri, ters-çözüm sonucunda elde edilen hız profilleri ile başarılı bir çakışma göstermiştir.

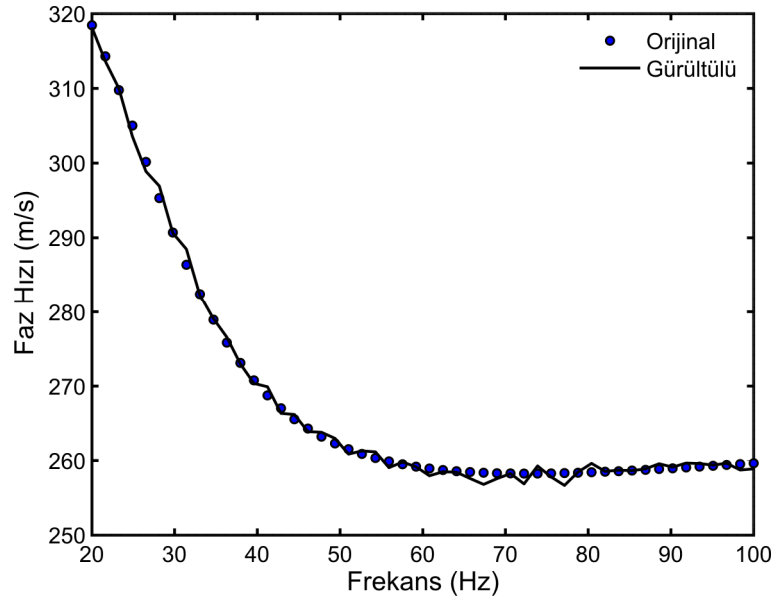


### 6.1.3 Veriye Gürültü Eklenmesi İşlemi

Araziden toplanan verilerin bozucu etkileri olacağı düşünülerek her iki model için dispersiyon eğrilerine standart sapması 0,8 olan rasgele bir gürültü eklenmiştir. Gürültülü dispersiyon eğrilerine sırasıyla Levenberg-Marquardt, Genetik Algoritma ve Melez ters-çözüm yöntemleri uygulanmıştır.



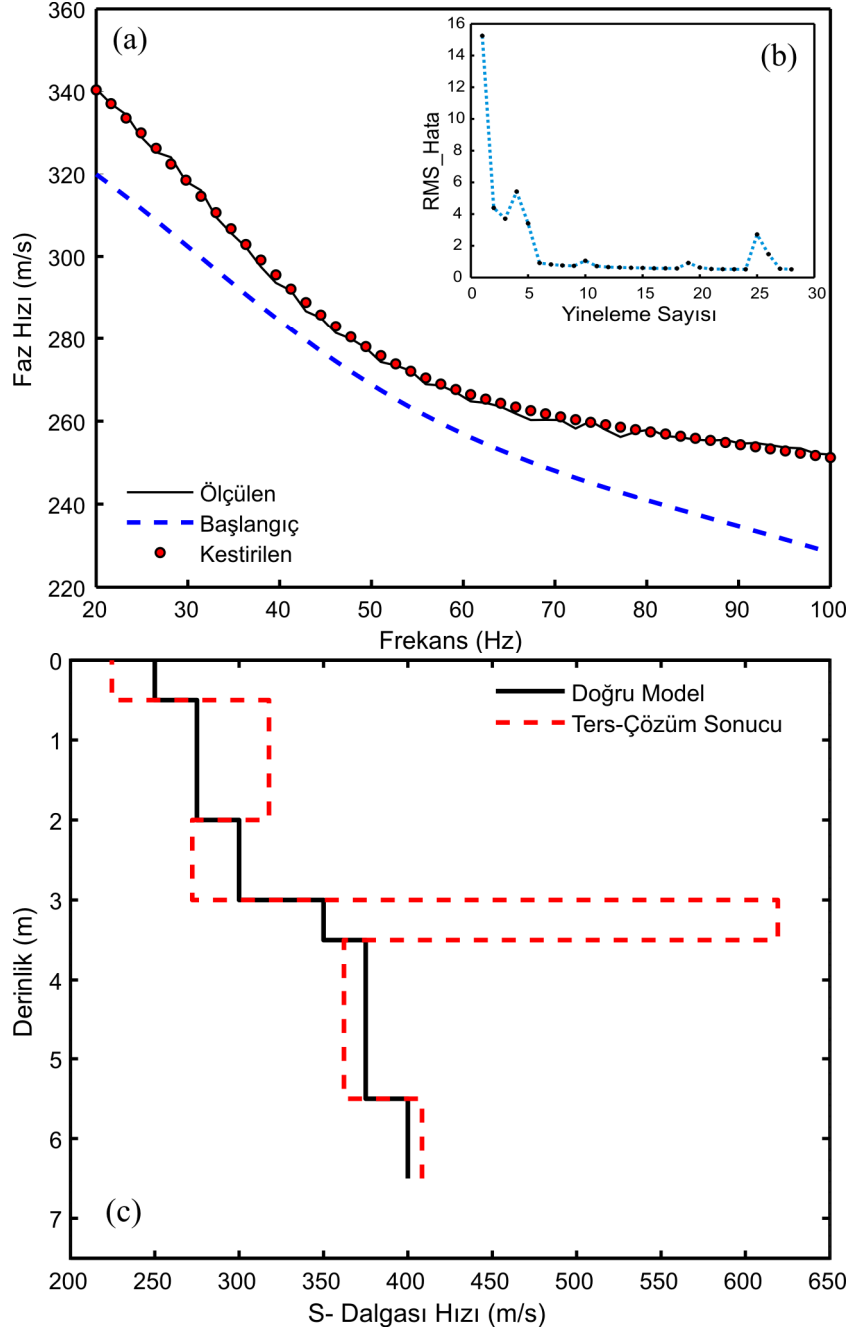
Şekil 6.11 Model-1 için gürültülü dispersiyon eğrisi



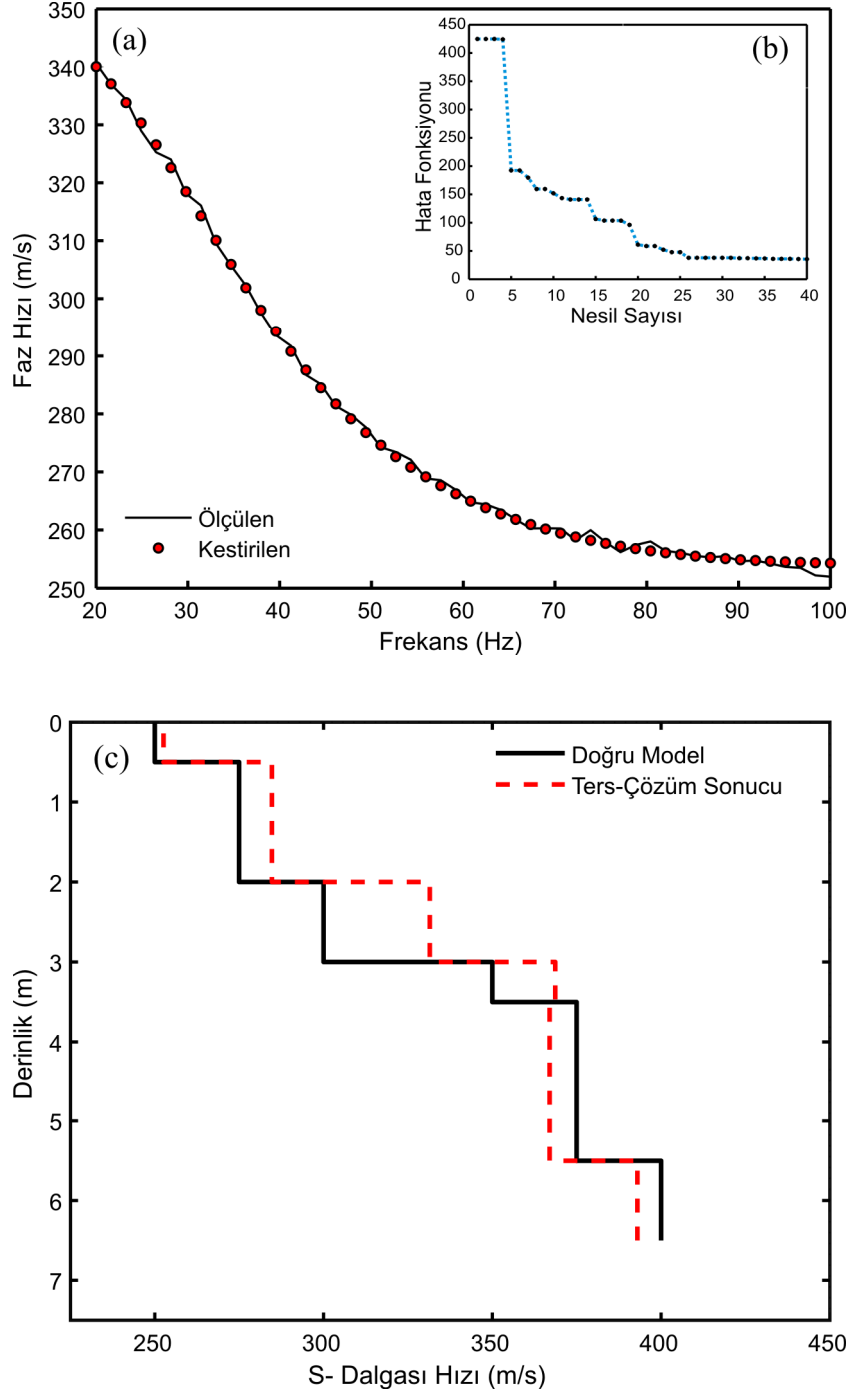
Şekil 6.12 Model-2 için gürültülü dispersiyon eğrisi

### 6.1.4 Gürültülü Modellerin Çözümü

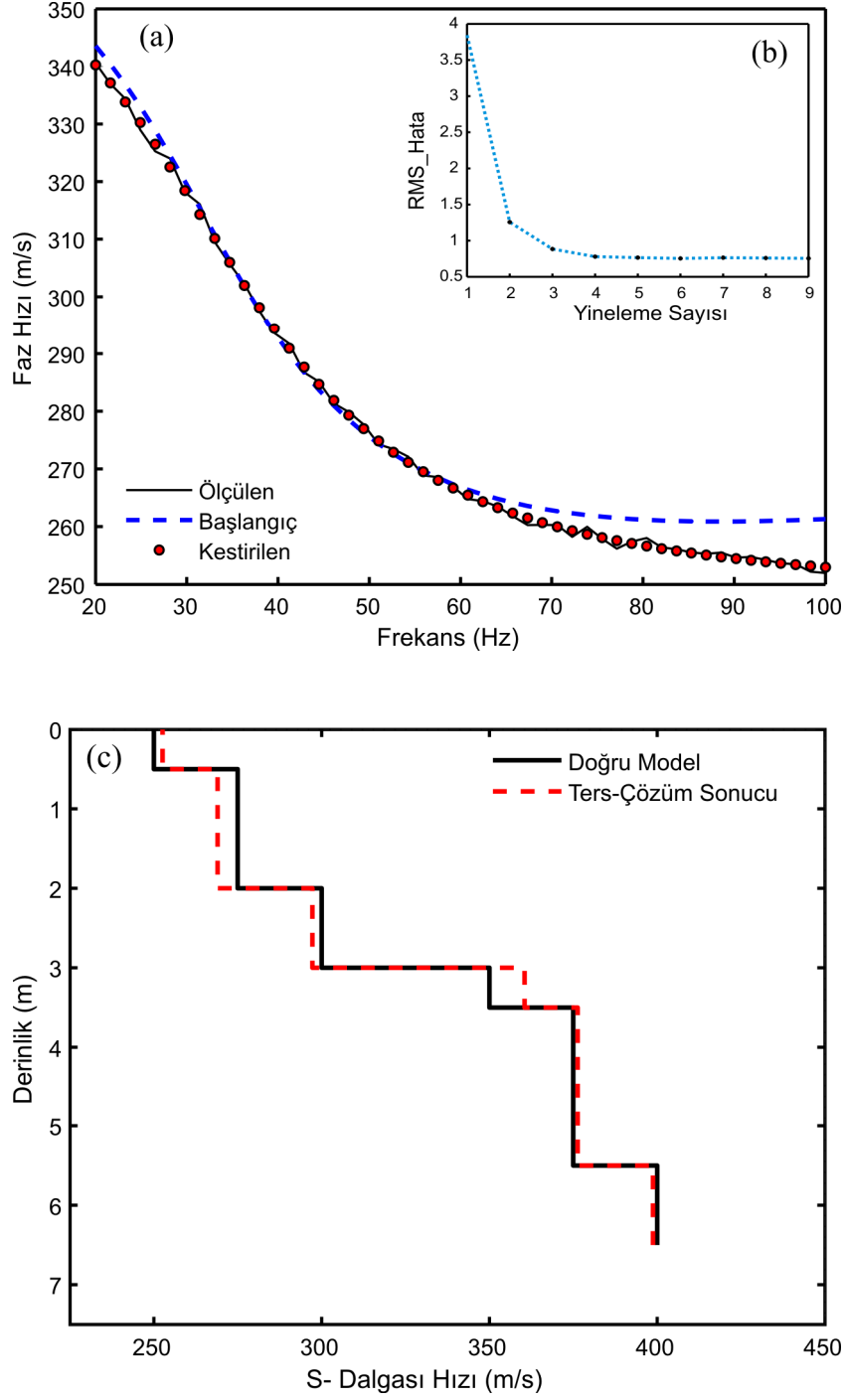
Model-1 için,



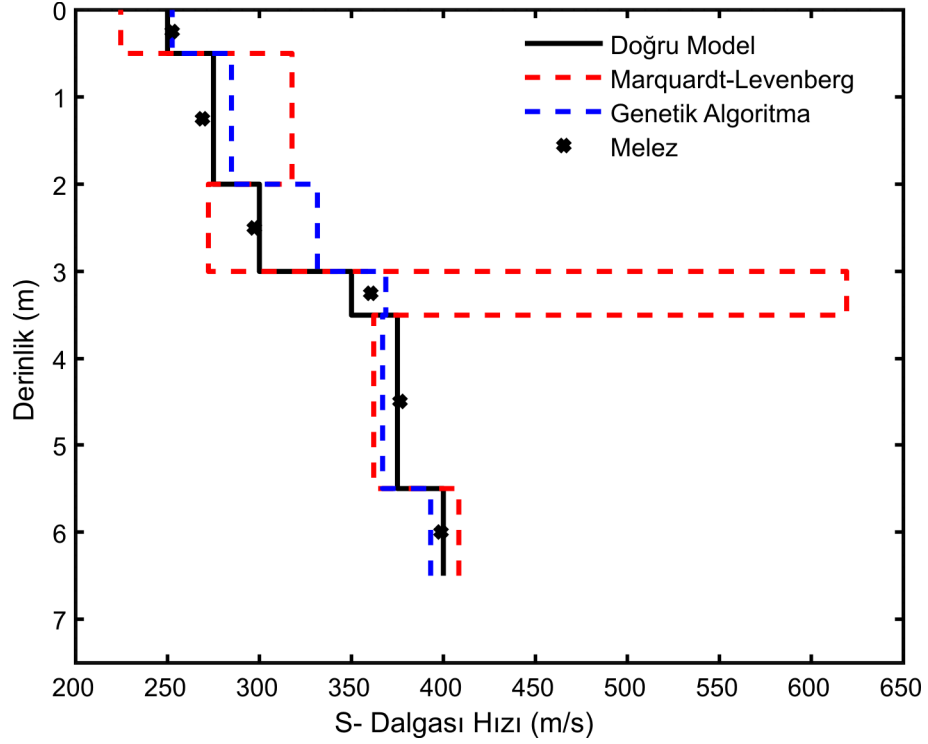
Şekil 6.13 Gürültülü çok-kanallı yüzey dalgası verilerinin Levenberg-Marquardt yöntemi ile değerlendirilmesi: a) ölçülen (siyah düz çizgi), başlangıç (mavi kesikli çizgi) ve kestirilen (kırmızı noktalı çizgi) dispersiyon eğrileri. b) RMS hata. c) S-dalgası hız profillerinin derinlikle değişimi: doğru model (siyah düz çizgi), ters-çözüm sonucu (kırmızı kesikli çizgi).



Şekil 6.14 Gürültülü çok-kanallı yüzey dalgası verilerinin Genetik Algoritma yöntemi ile değerlendirilmesi: a) ölçülen (siyah düz çizgi) ve kestirilen (kırmızı noktalı çizgi) dispersiyon eğrileri. b) RMS hata. c) S-dalgası hız profillerinin derinlikle değişimi: doğru model (siyah düz çizgi), ters-çözüm sonucu (kırmızı kesikli çizgi).



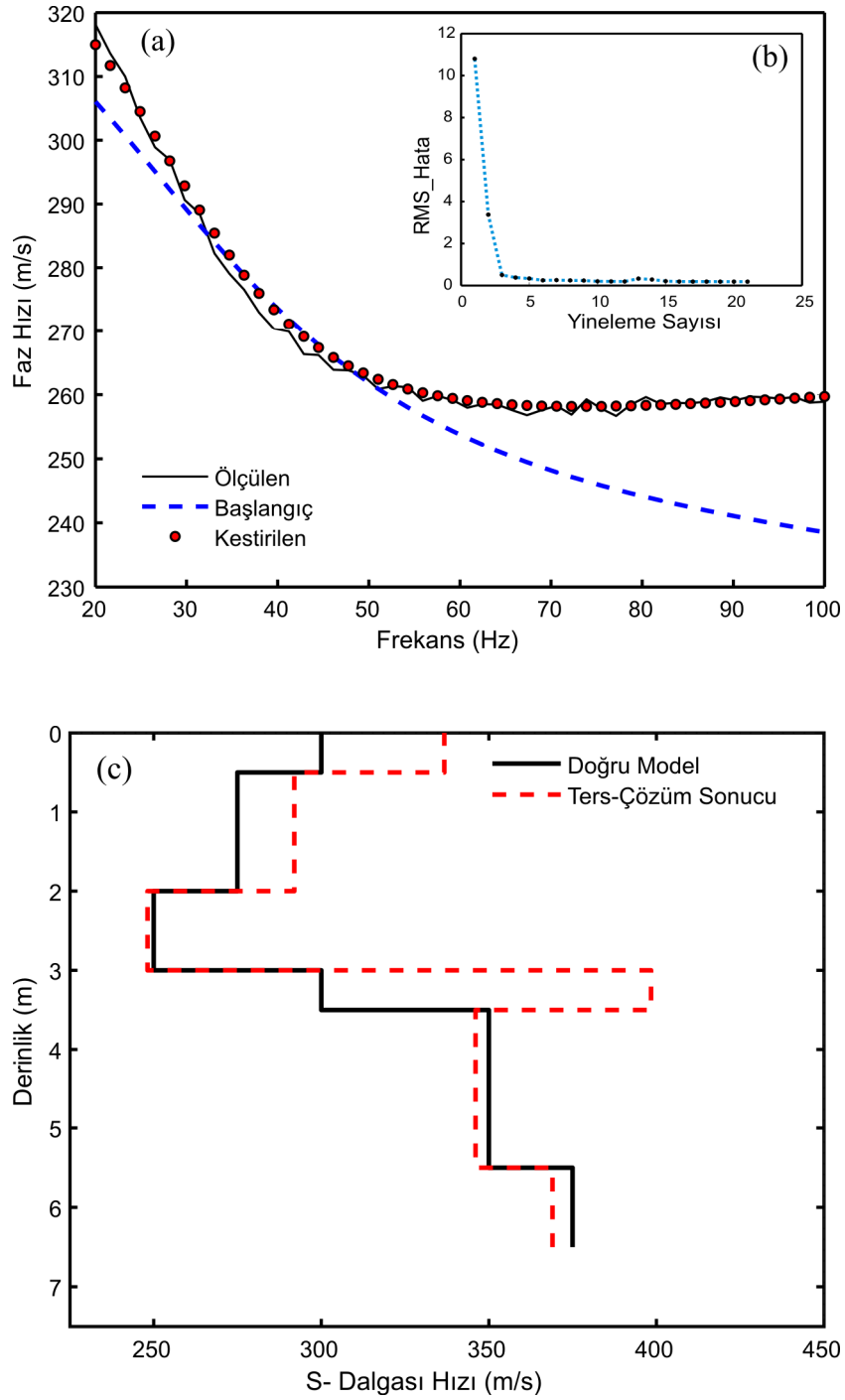
Şekil 6.15 Gürültülü çok-kanallı yüzey dalgası verilerinin Melez (Hybrid) yöntemi ile değerlendirilmesi: a) ölçülen (siyah düz çizgi), başlangıç (mavi kesikli çizgi) ve kestirilen (kırmızı noktalı çizgi) dispersiyon eğrileri. b) RMS hata. c) S-dalgası hız profillerinin derinlikle değişimi: doğru model (siyah düz çizgi), ters-çözüm sonucu (kırmızı kesikli çizgi).



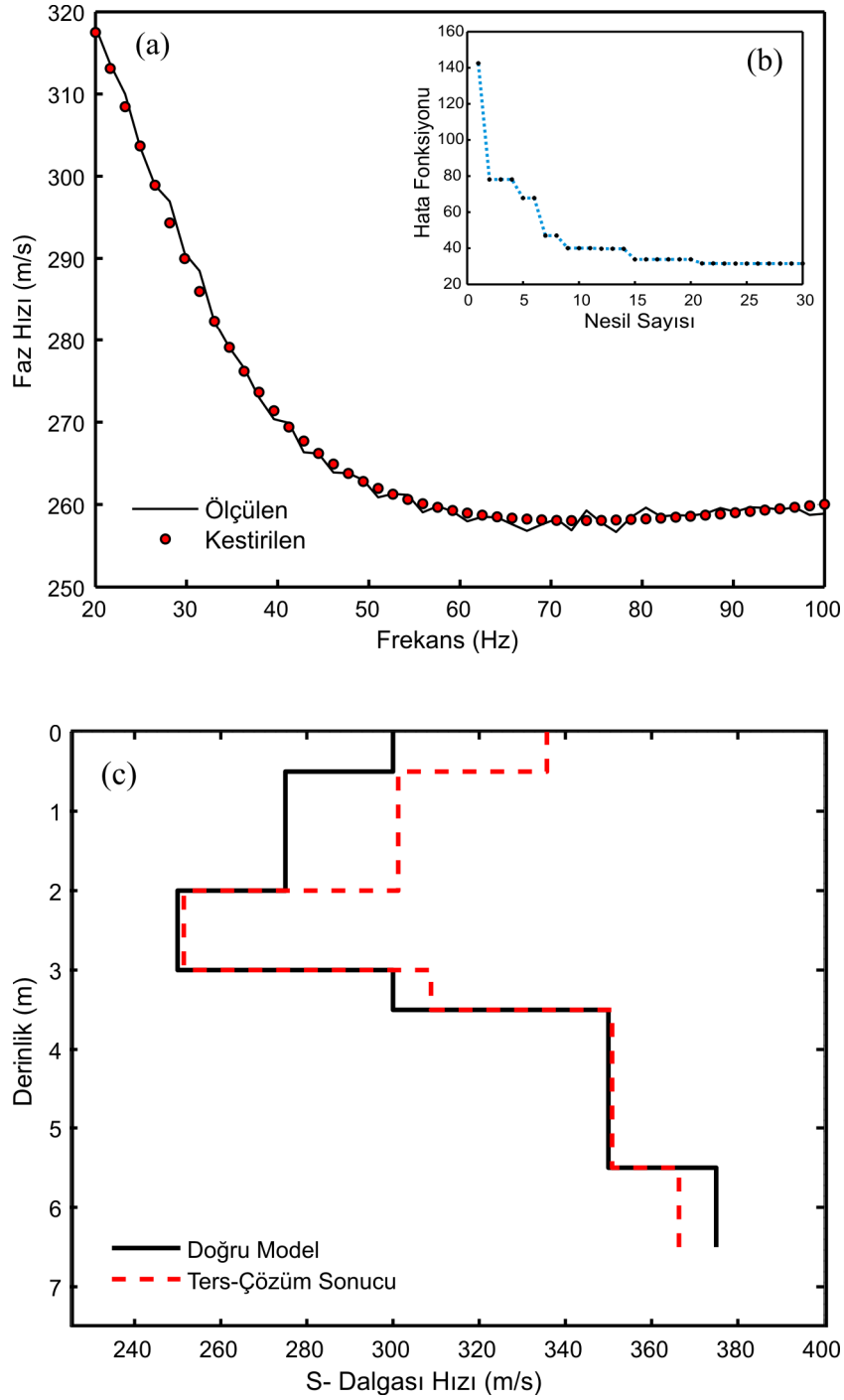
Şekil 6.16 Gürültü eklenmiş dispersiyon eğrisinin (model 1) çözümünde kullanılan ters-çözüm yöntemlerinin karşılaştırılması. Doğru model (düz siyah çizgi), Levenberg-Marquardt yöntemi (kırmızı kesikli çizgi), Genetik Algoritma (mavi kesikli çizgi), Melez yöntemi (siyah çapraz nokta).

Ters-çözüm sonuçları incelendiğinde Levenberg-Marquardt yönteminde gürültülü temel mod dispersiyon eğrisinden dolayı doğru başlangıç modeli oluşturulamamıştır. Yineleme işlemi ile belirli noktada iyileştirme yapılmıştır (Şekil 6.13). Genetik Algoritma yönteminde dispersiyon eğrisinin gürültülü olması başarıyı etkilemektedir, sadece hesaplama işlemleri uzun zaman almaktadır (Şekil 6.14). Melez yöntemde ise Genetik Algoritma ile birkaç nesil içerisinde kısa zamanda iyi bir başlangıç modeli oluşturulmuş ve bu başlangıç modeli, Levenberg-Marquardt yöntemine sokulmuş ve kısa zamanda iyi bir uyum yakalanmıştır (Şekil 6.15). Melez yönteminin başarısı Şekil 6.16 'da görülmektedir.

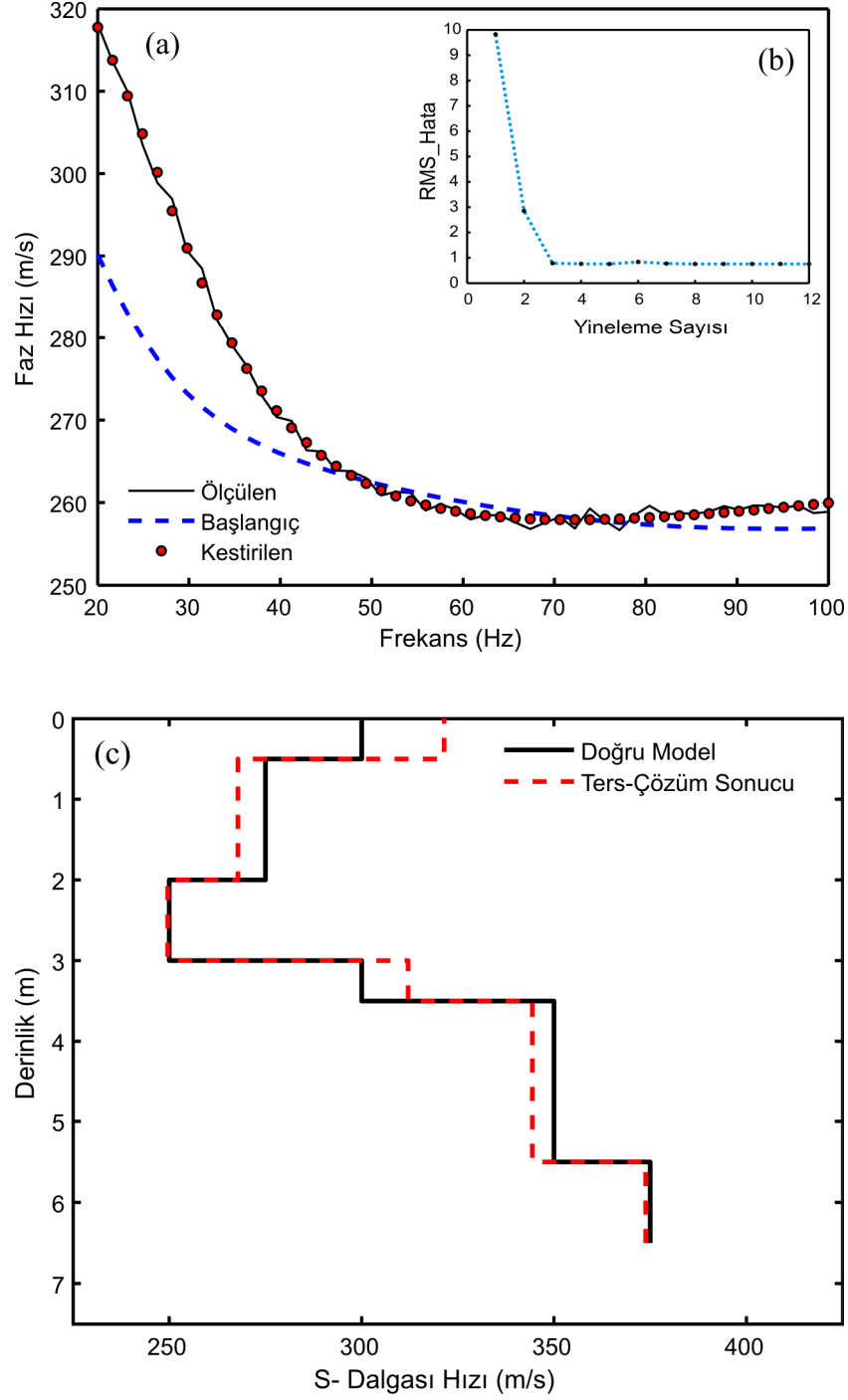
Model-2 için,



Şekil 6.17 Gürültülü çok-kanallı yüzey dalgası verilerinin Levenberg-Marquardt yöntemi ile değerlendirilmesi: a) ölçülen (siyah düz çizgi), başlangıç (mavi kesikli çizgi) ve kestirilen (kırmızı noktalı çizgi) dispersiyon eğrileri. b) RMS hata. c) S-dalgası hız profillerinin derinlikle değişimi: doğru model (siyah düz çizgi), ters-çözüm sonucu (kırmızı kesikli çizgi).

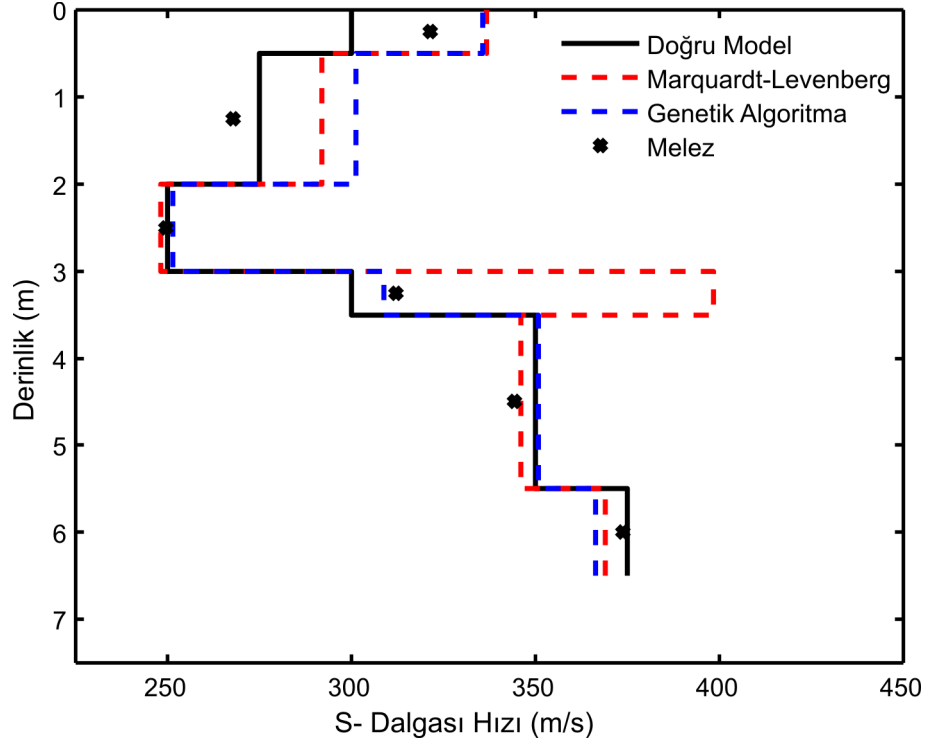


Şekil 6.18 Gürültülü çok-kanallı yüzey dalgası verilerinin Genetik Algoritma yöntemi ile değerlendirilmesi: a) ölçülen (siyah düz çizgi) ve kestirilen (kırmızı noktalı çizgi) dispersiyon eğrileri. b) RMS hata. c) S- dalgası hız profillerinin derinlikle değişimi: doğru model (siyah düz çizgi), ters-çözüm sonucu (kırmızı kesikli çizgi).



Şekil 6.19 Gürültülü çok-kanallı yüzey dalgası verilerinin Melez (Hybrid) yöntemi ile değerlendirilmesi: a) ölçülen (siyah düz çizgi), başlangıç (mavi kesikli çizgi) ve kestirilen (kırmızı noktalı çizgi) dispersiyon eğrileri. b) RMS hata. c) S-dalgası hız profillerinin derinlikle değişimi: doğru model (siyah düz çizgi), ters-çözüm sonucu (kırmızı kesikli çizgi).





Şekil 6.20 Gürültü eklenmiş dispersiyon eğrisinin (model 2) çözümünde kullanılan ters-çözüm yöntemlerinin karşılaştırılması. Doğru model (düz siyah çizgi), Levenberg-Marquardt yöntemi (kırmızı kesikli çizgi), Genetik Algoritma (mavi kesikli çizgi), Melez yöntemi (siyah çapraz nokta).

Aynı şekilde, model-2 için ters-çözüm sonuçları incelendiğinde Levenberg-Marquardt yönteminde gürültülü temel mod dispersiyon eğrisinden dolayı doğru başlangıç modeli oluşturulamamıştır. Yineleme işlemi ile belirli noktada iyileştirme yapılmıştır (Şekil 6.17). Genetik Algoritma yönteminde dispersiyon eğrisinin gürültülü olması başarıyı etkilemektedir, sadece hesaplama işlemleri uzun zaman almaktadır (Şekil 6.18). Melez yöntemde ise Genetik Algoritma ile kısa zamanda iyi bir başlangıç modeli oluşturulmuş ve başlangıç modeli olarak Levenberg-Marquardt yöntemine sokulmuş ve kısa zamanda iyi bir uyum yakalanmıştır (Şekil 6.19). Melez yönteminin başarısı Şekil 6.20 'de görülmektedir.

## 6.2 Arazi Çalışmaları

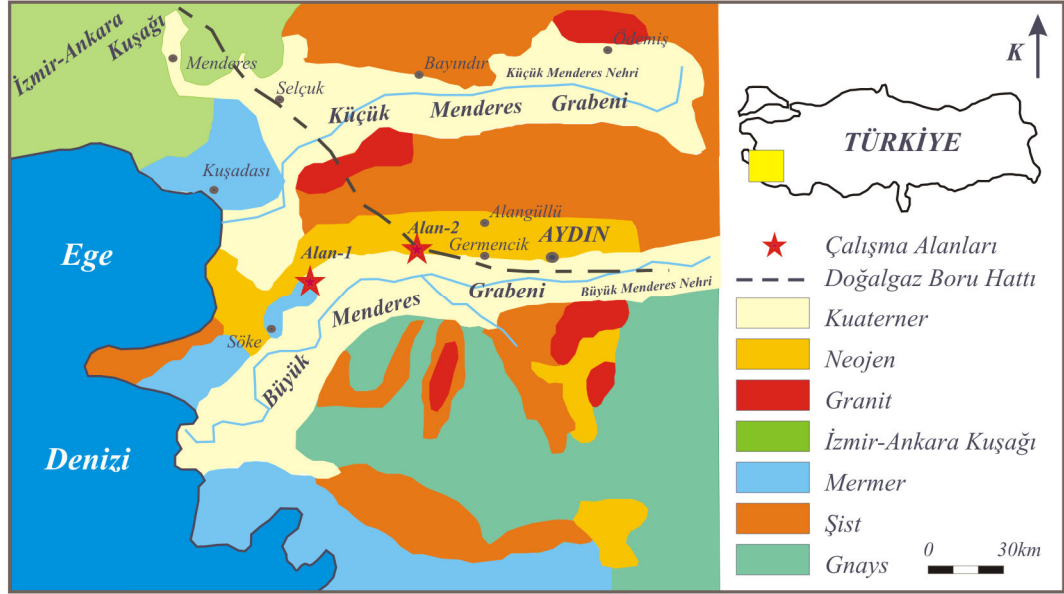
Bu bölümde, MASW yönteminin yüzeye-yakın yeraltı yapılarına uygulanabilirliği ve çözebilirliği, yapılan arazi çalışmalarıyla irdelenecektir. İlk olarak yöntemin uygulanabilirliği amacıyla Magnesia antik kentinde farklı veri toplama parametreleri kullanılarak deneme ölçüleri yapılmıştır. Daha sonra yeraltında derinliği belli olan gömülü doğalgaz boru hattı ve boyutları belli olan iki yapının (dikdörtgen prizma ve varil) gömülmesiyle oluşturulan bir test alanı üzerinde çok-kanallı yüzey dalgası verileri toplanmıştır ve ters-çözüm yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Son olarak, önceden yapılmış ve değerlendirilmiş bir çalışmanın (Zhang ve diğer., 2003) arazi dispersiyon eğrisinin değerlendirme sonuçları, tarafımızdan elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Arazi çalışmaları, Aydın ili Germencik ilçesine bağlı Magnesia Antik kentinde (Alan-1) ve Sarıyer mevkiinde (Alan-2) gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.21).

### 6.2.1 Çalışma Alanlarının Tanıtımı

#### 6.2.1.1 Coğrafi Konumu

Arazi çalışma alanları, Büyük Menderes havzasının (grabeninin) batı bölümünde Aydın ili Germencik ilçesi sınırları içerisinde yer alır (Şekil 6.21). Büyük Menderes havzası Türkiye'nin batısında Ege bölgesi sınırları içerisinde bulunmaktadır. Havzaya adını veren Büyük Menderes nehri; Çine çayı, Akdere, Emir çayı, Banaz çayı, Küfi çayı, Karacasu ve Madran çaylarının birleşmesinden oluşmuştur. Havza, kuzeyinde Samsun dağları, Barla dağı ve Söğütlü dağı; güneyde Gökbel dağı, Madran dağı, Babadağ ve Bozdağ ile batıda Ege denizi ile çevrilidir. Büyük Menderes nehri Afyonkarahisar'ın güneyindeki Sandıklı dağ yaylasındaki Pınarbaşı düdeninden doğar. En son Bafa gölü ve Milet yakınlarından geçerek Eşek adası (Gaydaronis) karşısında, Akköy'ün kuzeyinde denize dökülür (Munsuz ve Ünver, 1983).



Şekil 6.21 Çalışma alanının jeolojik haritası (Şengör, 1982; Dora ve diğer., 1995 'den değiştirilmiştir).

#### 6.2.1.2 Genel Jeolojik Yapısı

Büyük Menderes havzası, büyük Menderes nehrinin ve sel sularının taşıyıp yığmış olduğu Alüviyal topraklardan oluşmuş olup, çevre kayaçlarının özelliği bunu çok iyi yansıtmaktadır. Jeolojik açıdan Büyük Menderes havzasını çevreleyen kayaçlar, temelde Paleozoik ve daha yaşlı olan Menderes masifi ait kayaçlar ve üzerinde Senezoik (Neojen) yaşlı karasal tortul kayaçlar olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Havzanın temelini oluşturan kayaçlar alttan üste doğru gnayslar, meta volkanikler, şistler ve mermerlerdir. Bu metamorfikler kayaçlar, granit ve gabro türü magmatik kayaçlar tarafından kesilmiştir. Gnaysların mineral bileşiminde; kuvars, plajioloklas, ortoklas, mikroklin, biotit, muskovit, granat ve apatit bulunmaktadır. Şistler; eski tortulların başkalaşım hali olup, mikaşist, muskovit, granat ve kuvars şist alt gruplarını içerirken, mermerler bölgede genelde dolomitik mermer bileşimindedirler (Kun ve diğer., 1986).

Graben sistemine bağlı olarak havzanın çökme olayı günümüzde halen devam etmektedir. Havzayı oluşturan Alüvyonlar bu metamorfik kayalardan türeyen kırıntılardan oluşmuştur. Germencik ovası, Menderes masifinin ortasındaki çöküntü

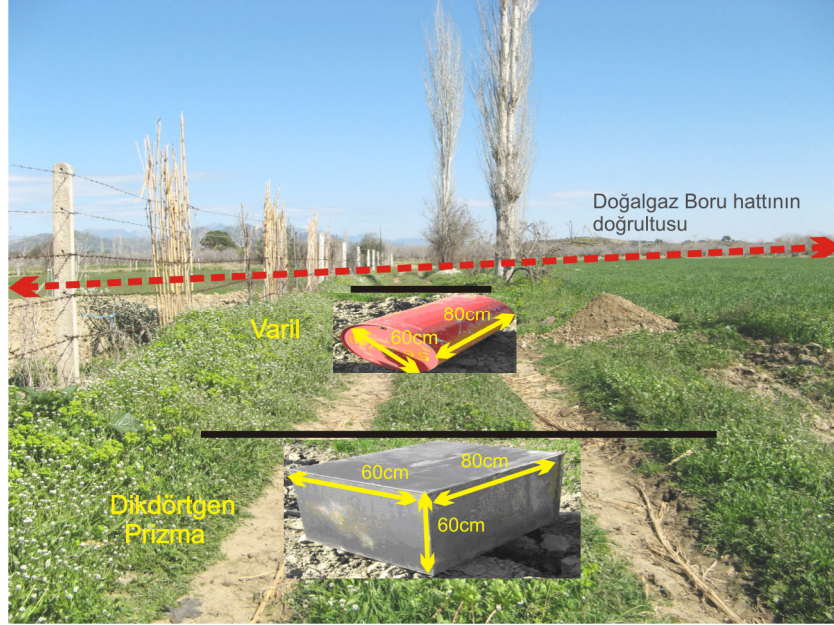
izleyerek akan Büyük Menderes nehrinin, değişik zamanlarda taşımış olduğu Alüvyonlardan oluşmuş genç topraklara sahiptir (Kun ve diğer., 1986).

### *6.2.1.3 Magnesia Antik Kenti*

Menderes Magnesiası; Aydın ili, Germencik ilçesi Ortaklar kasabasına bağlı Tekin Köy sınırları içinde, Ortaklar-Söke karayolunun üzerinde yer almaktadır (Alan-1, Şekil 6.21). Kent, anlatılan efsane ve antik kaynaklara göre, Thessalia 'dan gelen ve Magnetler olarak adlandırılan bir kavim tarafından kurulmuştur. Kent; sur ile çevrili, yaklaşık 1,5 km çapında bir alanı kapsayan, ızgara planlı cadde ve sokak sistemine sahiptir ve Priene, Ephesos ve Tralleis üçgeni arasında ticari ve stratejik açıdan önemli bir konuma sahiptir. Menderes'in sürekli yatak değiştirip taşması sonucu oluşan salgın hastalıklar ve Perslere karşı daha emin bir kent kurma zorunda kalmaları nedeniyle Magnetler, M.Ö. 400 yıllarında kenti bugünkü yerinde, Gümüştay 'ın yanında yeniden kurmuşlardır. Magnesia antik kenti insan kaynaklı fazla yıkım ve tahribata uğramamıştır. Bunda akarsuların ve Gümüşt Dağı'ndan inen yağmur sularının getirdiği milin kenti örtmesinin de payı yüksektir. Ancak M.S. 17 'de yıkıcı bir deprem geçirdiğinden önemli oranda zarar görmüştür (Bingöl, 2005).

### *6.2.2 Test Modellerin Oluşturulması ve Doğalgaz Boru Hattı*

Çok-kanallı yüzey dalgası analiz yönteminin yüzeye-yakın yeraltı yapılarının saptanmasındaki başarısını sınamak amacıyla Alan-2 'de bir tane test alanı oluşturulmuştur. Test alanında yapı olarak, içi beton (çimento-kum karışımı) ile doldurulmuş dikdörtgen prizma ve boş bir varil kullanılmıştır (Şekil 6.22). Bu yapılar, yüzeyden yaklaşık 1,5 m derinliğe gömülmüştür (Şekil 6.23, 6.24, 6.25). Ayrıca test alanının yakınında derinliği, boyutu ve yeri bilinen gömülü Denizli-İzmir doğalgaz boru hattının üzerinde bir çalışma gerçekleştirilmiştir(Şekil 6.26). Doğalgaz boru hattının yaklaşık olarak derinliği 1,5 m ve çapı 1 m 'dir. Gömülü yapıları ve doğalgaz borusunu kesecek şekilde profiller üzerinde çok-kanallı yüzey dalgası verileri toplanmıştır.



Şekil 6.22 Alan-2 'de test alanlarının ve doğalgaz boru hattının görünümü



Şekil 6.23 Test alanı yapım çalışması



Şekil 6.24 Dikdörtgen prizmasının beton ile doldurulması



Şekil 6.25 Dikdörtgen prizmasının üzerinin örtülmesi



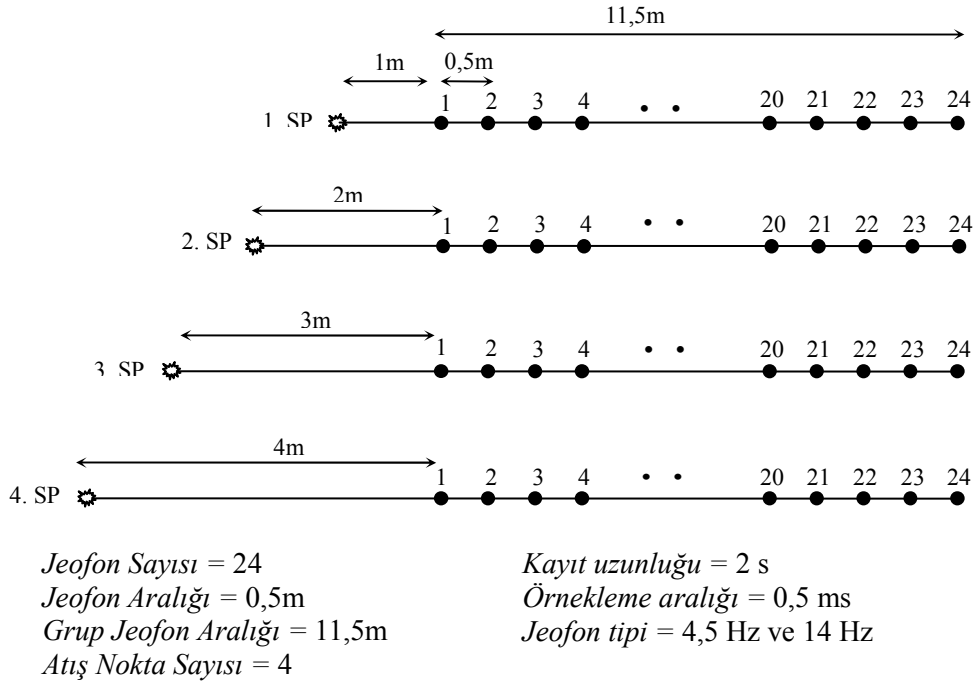
Şekil 6.26 Aydın - İzmir arası doğalgaz boru hattı döşeme çalışması

### **6.2.3 Kullanılan Aletler ve Veri Toplama Düzenegi**

MASW uygulamasında, kırılma yönteminde kullanılan standart kayıtçılar ve jeofonlar kullanılmıştır. Alıcı olarak 24 adet 4,5 Hz ve 14 Hz P (düşey-bileşenli) jeofonunun, kaynak olarak 8 kg 'lık bir balyoz ve demir plakanın kullanıldığı bu çalışmada, her bir atış istasyonunda sinyal / gürültü oranını artırmak için ard arda 5 vuruş gerçekleştirilmiştir. Kayıtlarda, kayıt uzunluğu 2 s, örnekleme aralığı 0,5 ms seçilmiştir. Veriler, SEG2 formatında Geometrics Smartseis Sismografi kullanılarak kaydedilmiştir. Alan kayıtlarında herhangi bir süzgeçleme işlemi uygulanmamıştır.

### **6.2.4 Alan-1 (Magnesia Antik Kenti)**

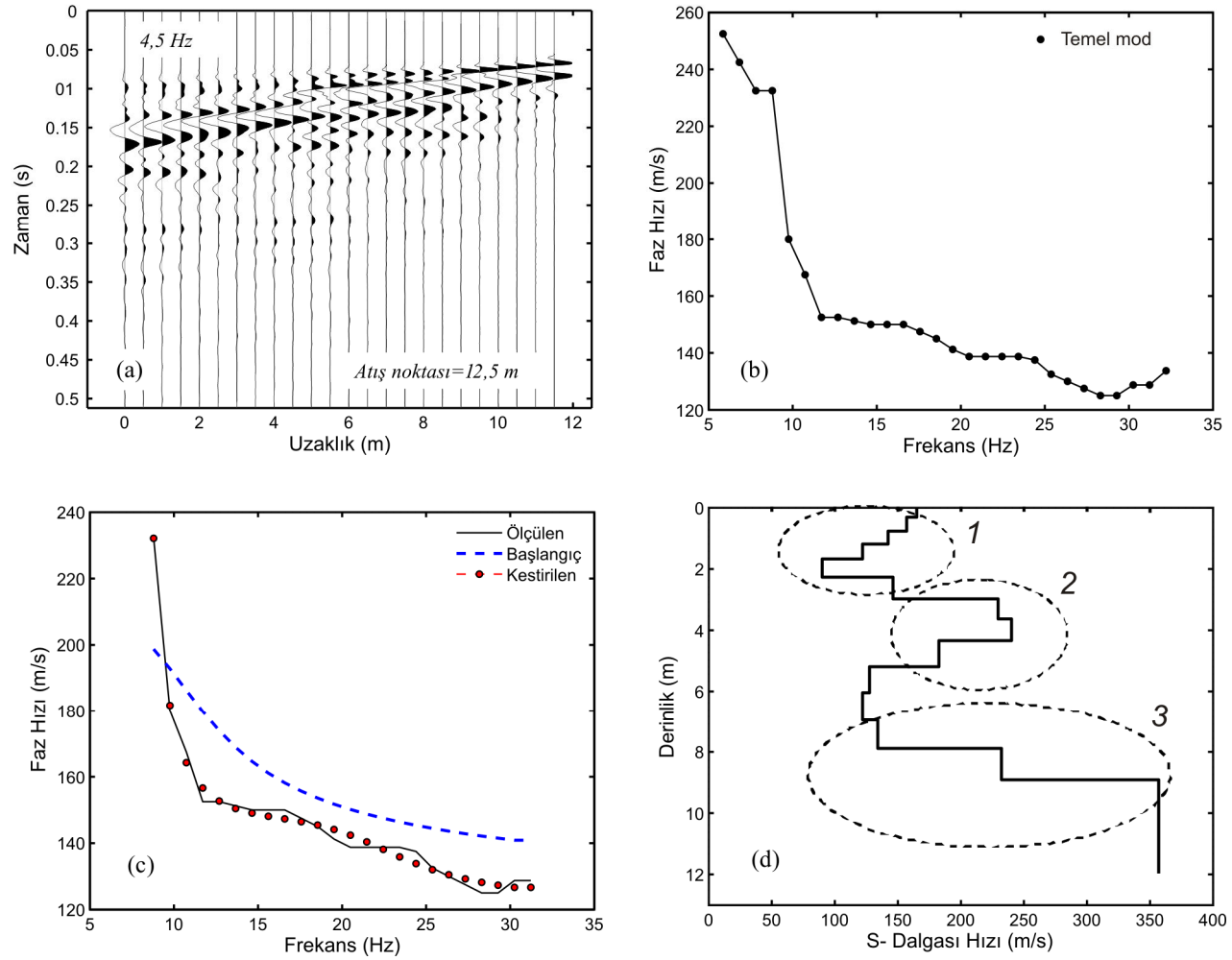
Yüzey dalgası analizinin yapı ve ortam kestirimindeki başarısı ve uygun parametre seçimi Magnesia antik kentinde yapılan arazi çalışmasında gerçekleştirilen deneme ölçüleriyle irdelenmiştir. Alıcı olarak; 24 adet 4,5 Hz ve 14 Hz 'lik P jeofonu, kaynak olarak 8 kg 'lık bir balyoz ve demir plakanın kullanıldığı bu çalışmada, her bir atış istasyonunda sinyal/gürültü oranını arttırmak için ardı ardına 5 vuruş gerçekleştirilmiştir. Veri toplama alan geometrisi Şekil 6.27 'de gösterilmiştir. Burada, jeofonlar (alıcılar), eşit aralıklarla bir platform şeklinde sabit olarak yerleştirilmiştir. Jeofon aralığı 0,5 m, serim uzunluğu (ilk jeofondan son jeofona uzaklık), 11,5 m 'dir. Yakın açılım uzaklığı, 1, 2, 3 ve 4 m olarak değişim göstermekte olup, her iki farklı frekansa sahip (4,5 Hz ve 14 Hz) jeofonlar için dörder olmak üzere 8 noktada ölçü alınmıştır. Arazi çalışmasında kullanılan kaynak, jeofon grup aralığı ve yakın açılım (offset) uzaklığına bağlı etkin araştırma derinliği, en yüksek 10 m ile sınırlandırılmaktadır.



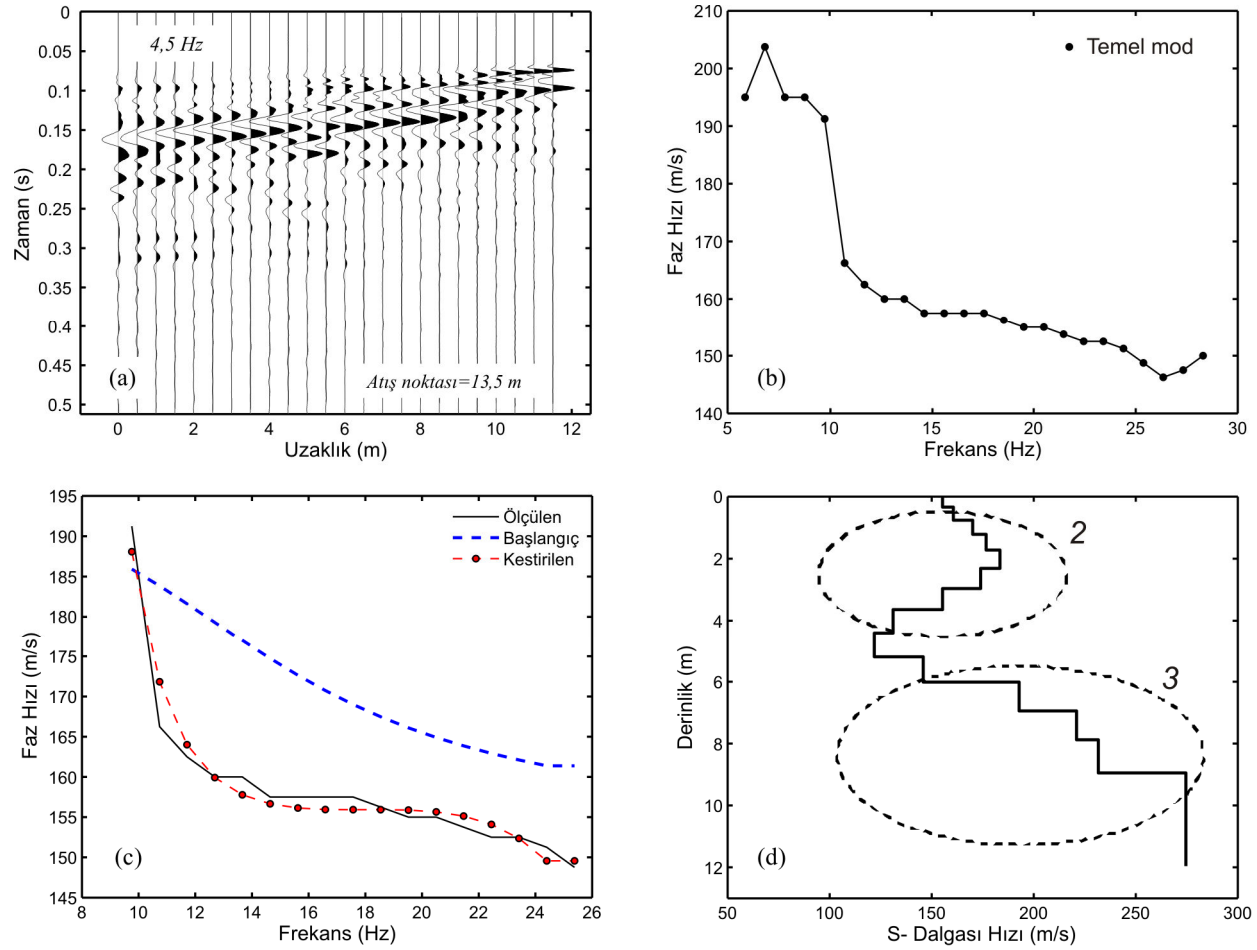
Şekil 6.27 Veri toplama geometrisi

Değerlendirmeler, araştırma derinliğinin jeofon yayılım uzunluğunun yaklaşık yarısı kadar derine nüfuz edeceği düşünülerek irdelenmiştir ve alan kayıtlarında herhangi bir süzgeçleme işlemi uygulanmamıştır. Şekil 6.27 'de atış nokta yerleri ve atış grupları ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. Her bir ölçü noktası için elde edilen çok-kanallı alan atış kayıtları, normal bir veri işlem sürecinden geçirilmiştir. Arazi çalışmalarında, temel mod dispersiyon eğrilerinin çıkarılmasında Park ve diğer., (1999) tarafından önerilen çok-kanallı yüzey dalgası analizi hesaplama yöntemi kullanılmıştır. İlk olarak, atış kaydı (Şekil 6.28a) temel mod dispersiyon (frekans-bağımlı faz hızı) eğrisini çıkarmak için frekans-dalgasayısı (f-k) dönüşümü yapılır. Daha sonra faz düzeltmesi yapılarak ters-çözüm için temel mod dispersiyon eğrisi belirlenmiştir (Şekil 6.28c). Temel mod dispersiyon eğrisi referans olarak alınmış ve bir başlangıç eğrisi (yapay model) oluşturulmuştur (Şekil 6.28c, kesikli mavi çizgi). Bu başlangıç ve ölçülen model eğriler, en küçük kareler algoritması ile yinelemeli olarak en küçük hata içerisinde karşılaştırılmıştır. Sonuçta, zeminin fiziksel özelliklerini temsil eden derinliğe-bağlı bir boyutlu S-dalgası hız profili ve derinlik parametreleri belirlenmiştir (Şekil 6.28d). Bu işlem, her bir atış noktası için tekrarlanmıştır (Şekil 6.29, 6.30, 6.31, 6.32, 6.33, 6.34, 6.35).

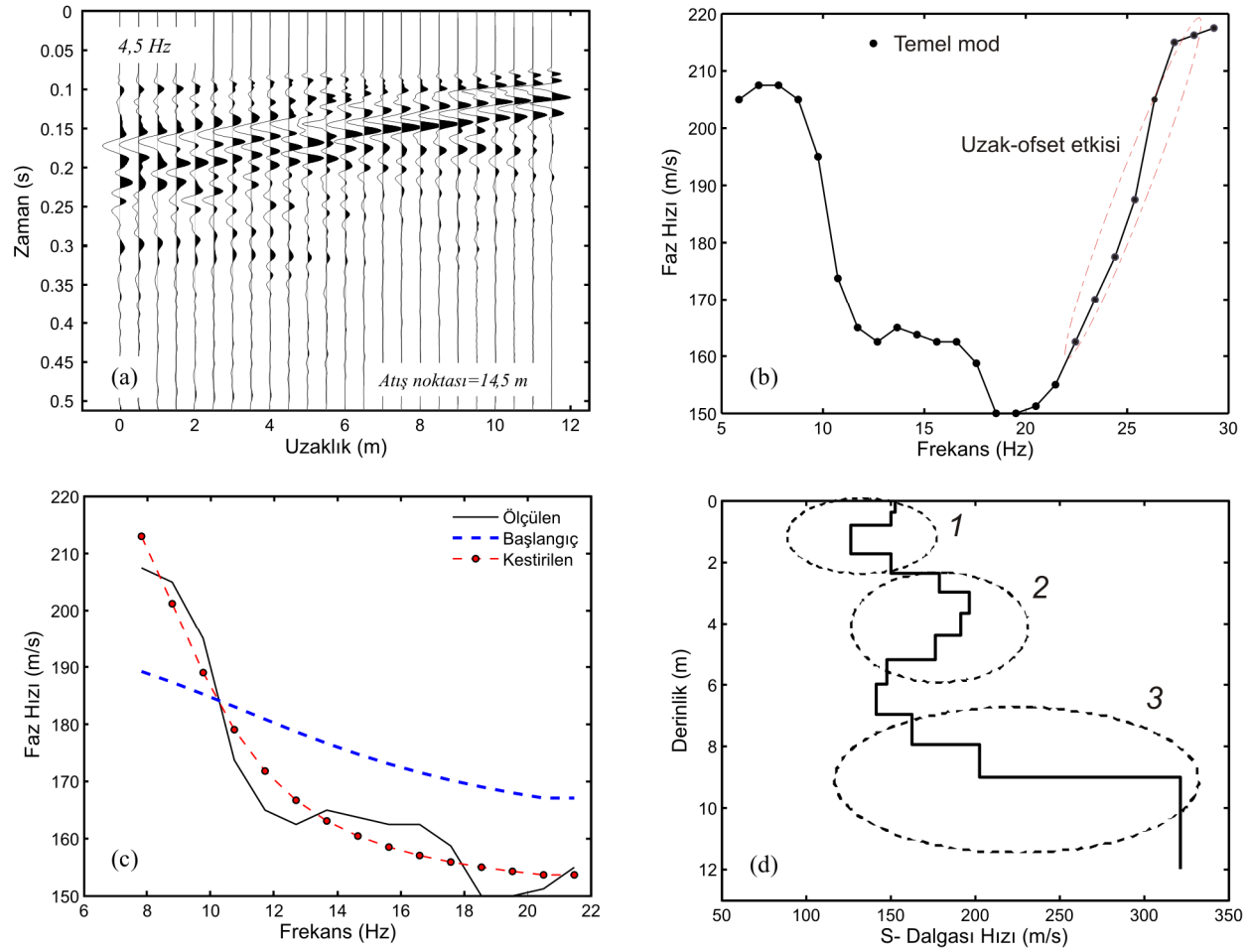




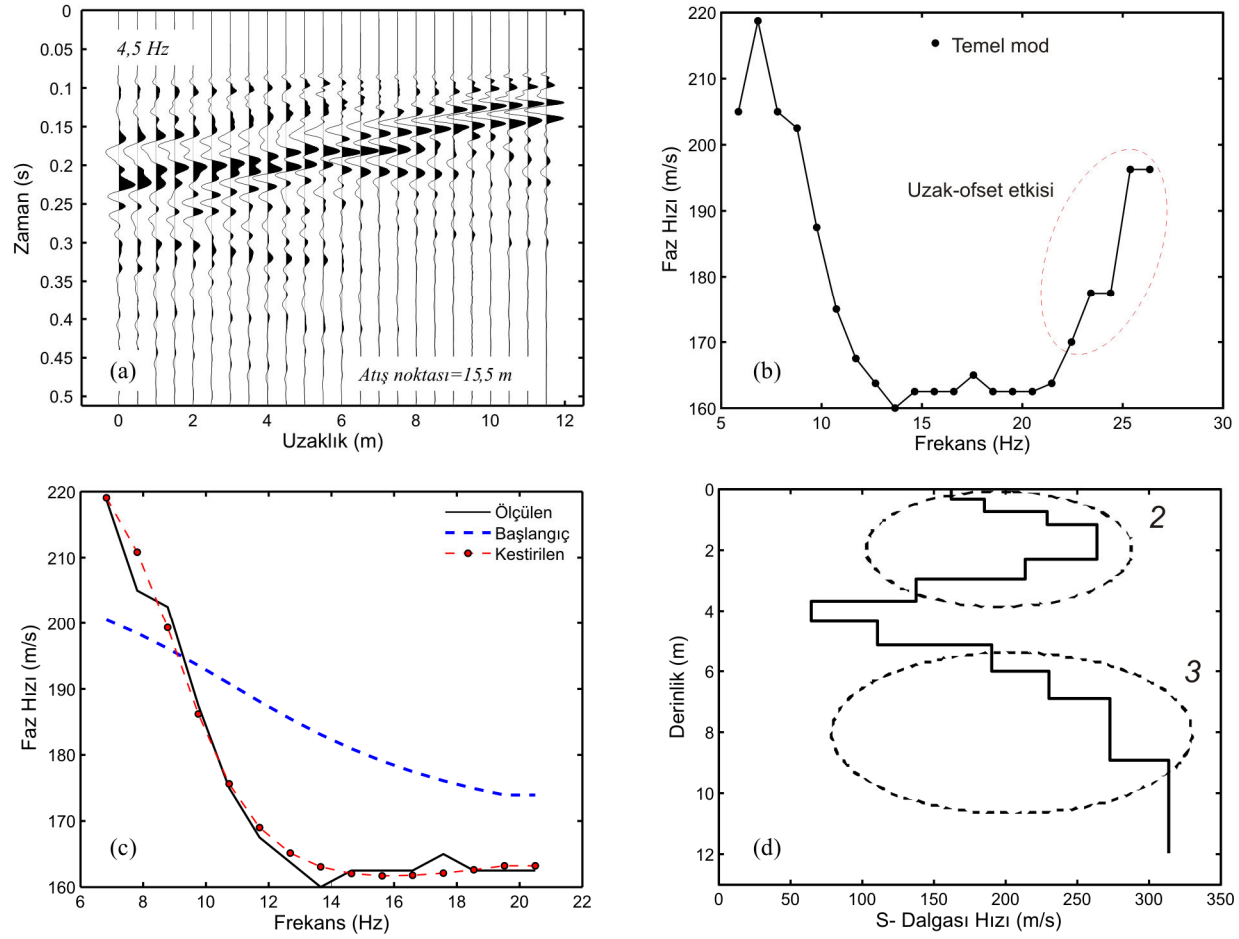
Şekil 6.28 (a) Yakın açılım = 1m için elde edilen atış kaydı, (b) temel mod dispersiyon eğrisi, (c) yapay ölçülen, başlangıç ve kestirilen dispersiyon eğrisi, (d) S-dalgası hız profiline derinlikle değişimi (1: Toprak örtüsü, 2: Arkeolojik malzeme, 3: Anakaya).



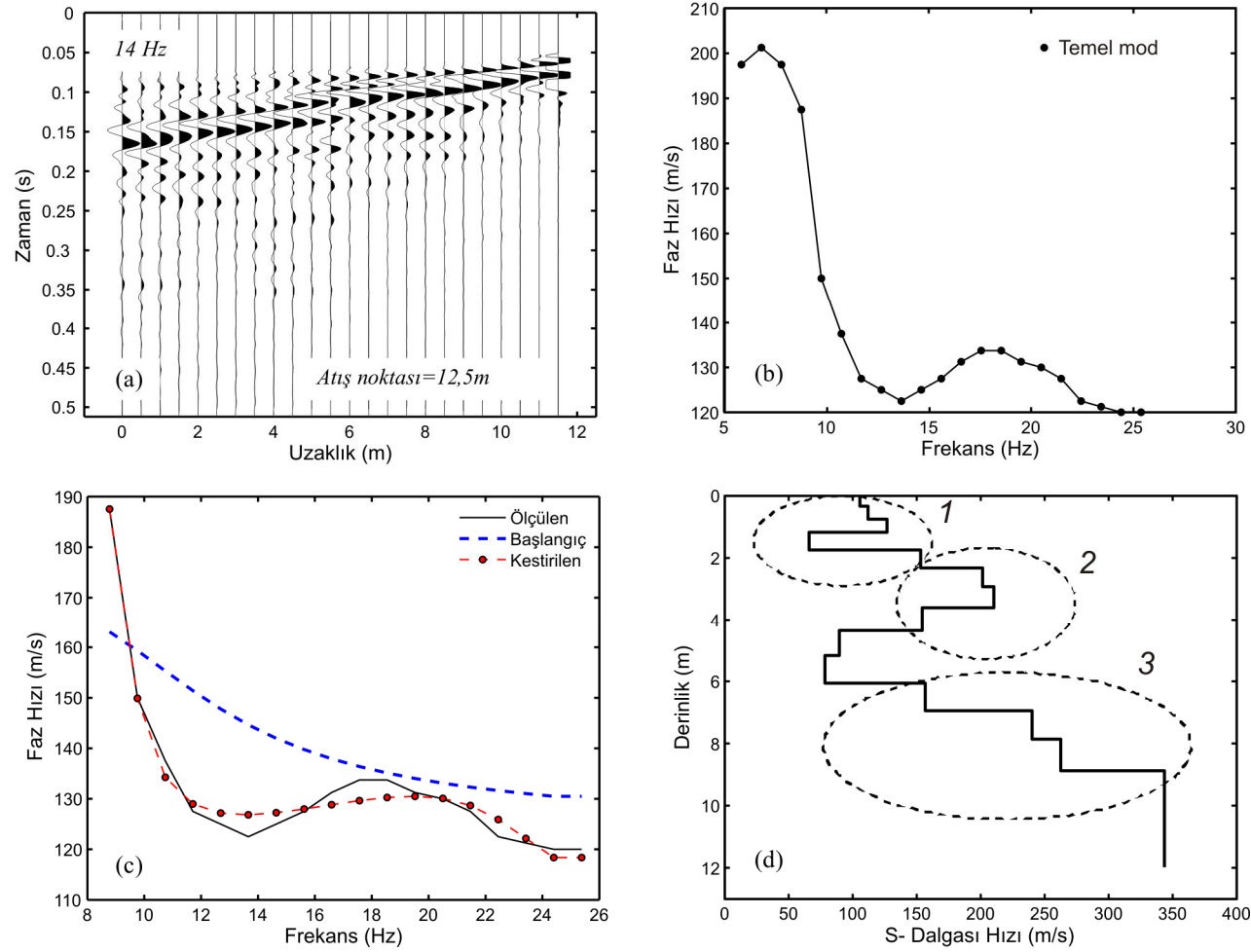
Şekil 6.29 (a) Yakın açılım = 2m için elde edilen atış kaydı, (b) temel mod dispersiyon eğrisi, (c) yapay ölçülen, başlangıç ve kestirilen dispersiyon eğrisi, (d) S-dalgası hız profilinin derinlikle değişimi (1: Toprak örtüsü, 2: Arkeolojik malzeme, 3: Anakaya).



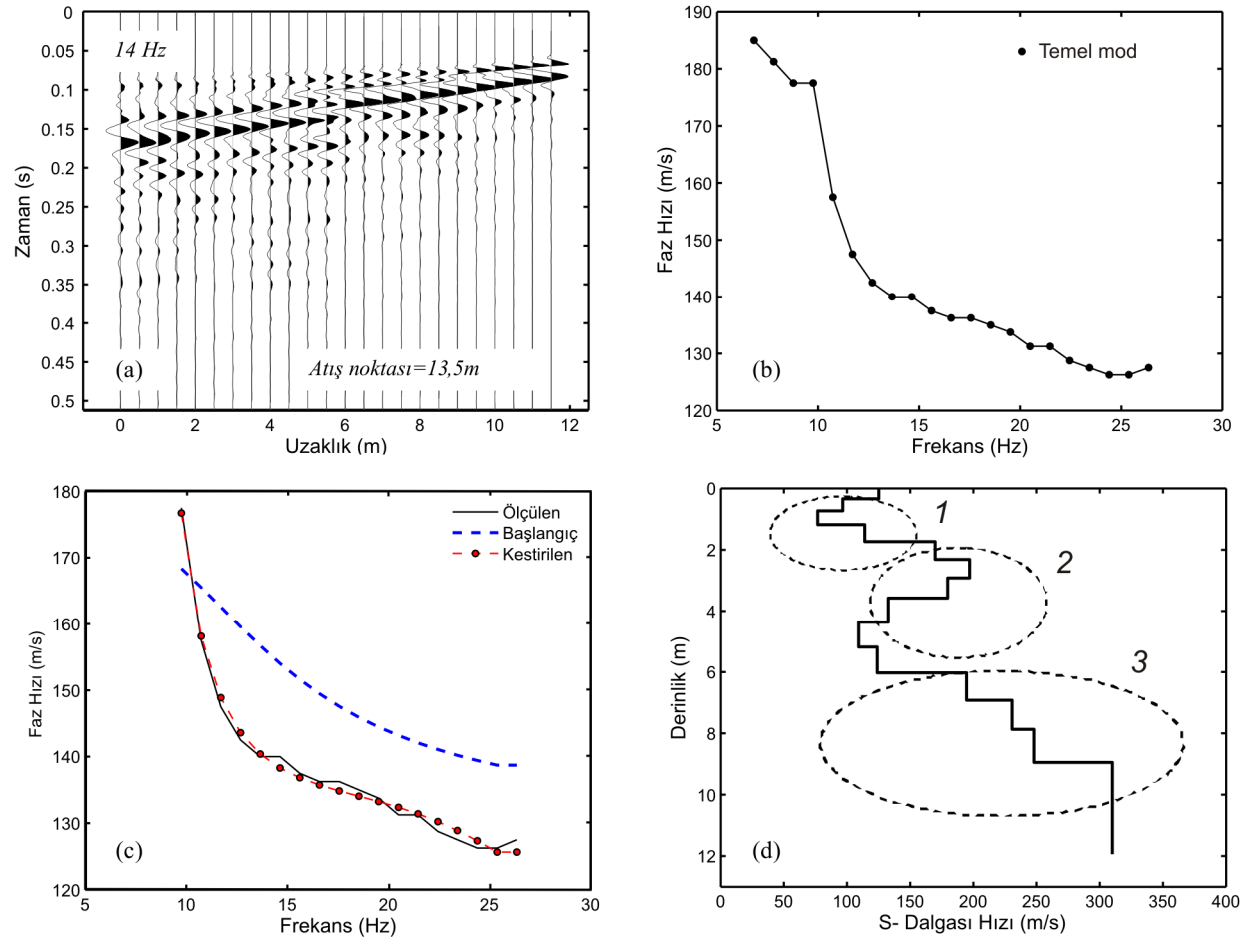
Şekil 6.30 (a) Yakın açılım = 3m için elde edilen atış kaydı, (b) temel mod dispersiyon eğrisi, (c) yapay ölçülen, başlangıç ve kestirilen dispersiyon eğrisi, (d) S-dalgası hız profiline derinlikle değişimi (1: Toprak örtüsü, 2: Arkeolojik malzeme, 3: Anakaya).



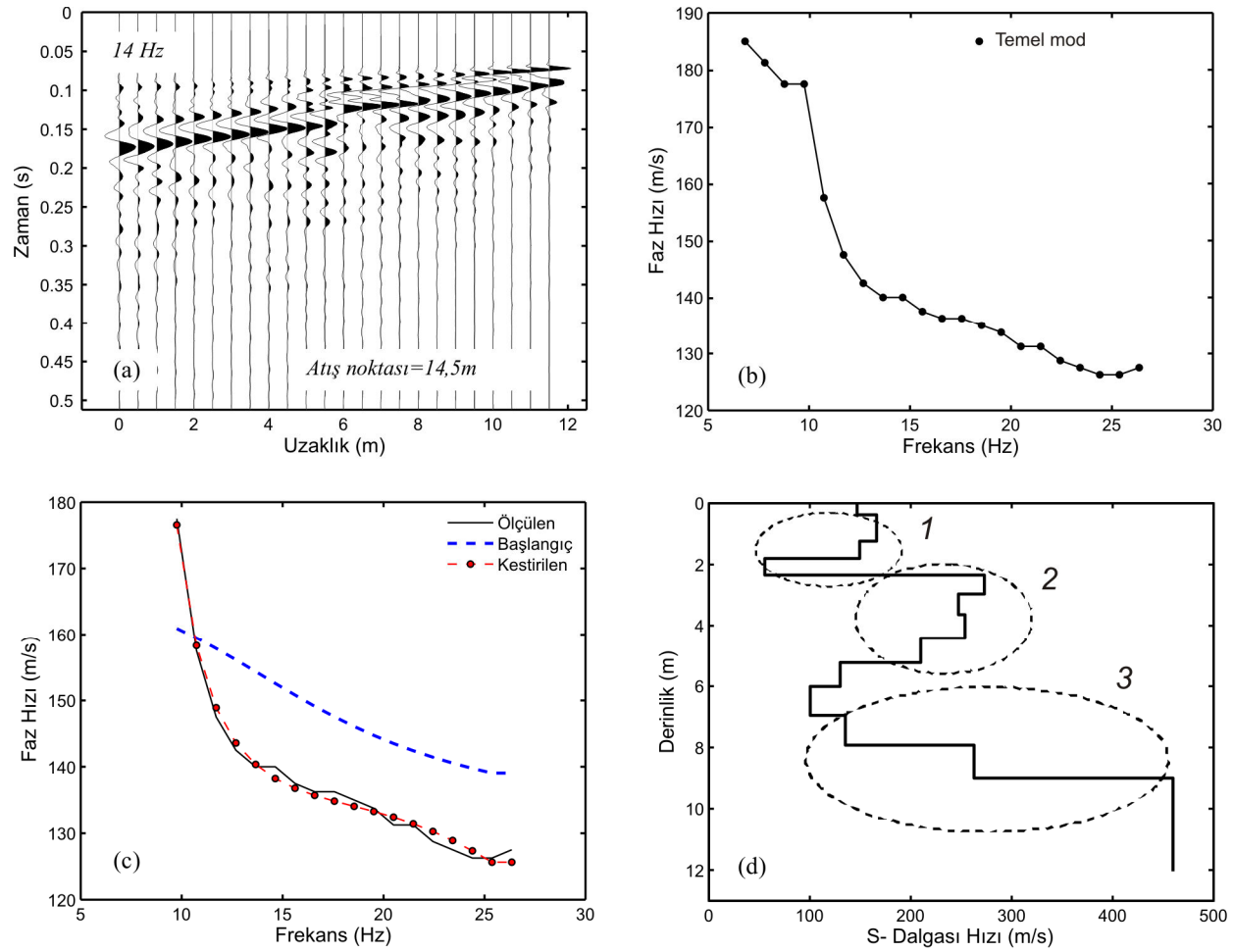
Şekil 6.31 (a) Yakın açılım = 4m için elde edilen atış kaydı, (b) temel mod dispersiyon eğrisi, (c) yapay ölçülen, başlangıç ve kestirilen dispersiyon eğrisi, (d) S-dalgası hız profilinin derinlikle değişimi (1: Toprak örtüsü, 2: Arkeolojik malzeme, 3: Anakaya).



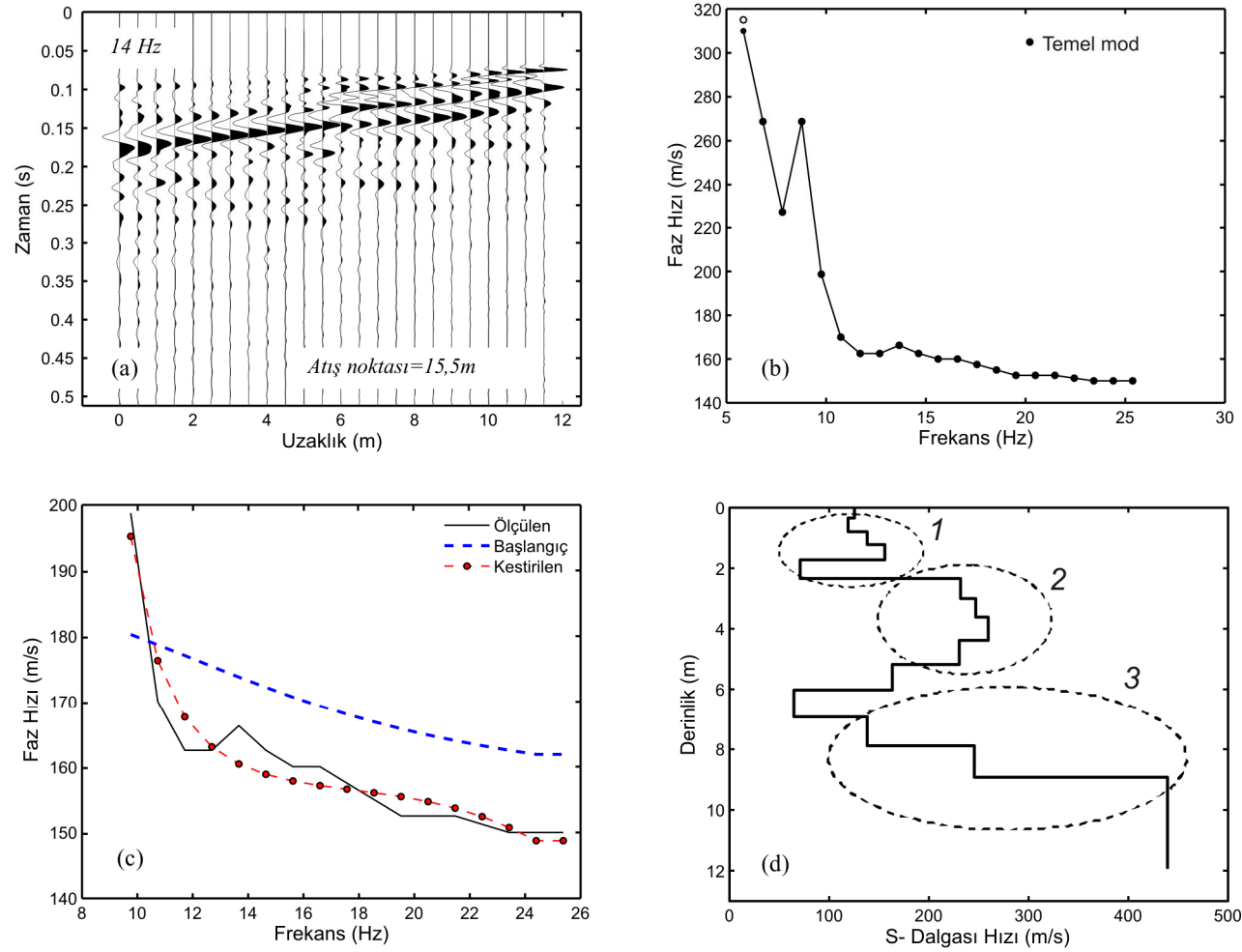
Şekil 6.32 (a) Yakın açılım = 1m için elde edilen atış kaydı, (b) temel mod dispersiyon eğrisi, (c) yapay ölçülen, başlangıç ve kestirilen dispersiyon eğrisi, (d) S-dalgası hız profilinin derinlikle değişimi (1: Toprak örtüsü, 2: Arkeolojik malzeme, 3: Anakaya).



Şekil 6.33 (a) Yakın açılım = 2m için elde edilen atış kaydı, (b) temel mod dispersiyon eğrisi, (c) yapay ölçülen, başlangıç ve kestirilen dispersiyon eğrisi, (d) S-dalgası hız profilinin derinlikle değişimi (1: Toprak örtüsü, 2: Arkeolojik malzeme, 3: Anakaya).



Şekil 6.34 (a) Yakın açılım = 3m için elde edilen atış kaydı, (b) temel mod dispersiyon eğrisi, (c) yapay ölçülen, başlangıç ve kestirilen dispersiyon eğrisi, (d) S-dalgası hız profilinin derinlikle değişimi (1: Toprak örtüsü, 2: Arkeolojik malzeme, 3: Anakaya).



Şekil 6.35 (a) Yakın açılım = 4m için elde edilen atış kaydı, (b) temel mod dispersiyon eğrisi, (c) yapay ölçülen, başlangıç ve kestirilen dispersiyon eğrisi, (d) S-dalgası hız profilinin derinlikle değişimi (1: Toprak örtüsü, 2: Arkeolojik malzeme, 3: Anakaya).



Bu çalışmada, sabit jeofon aralığıyla farklı yakın açılımlar kullanılarak, her iki jeofon frekansı için ortamın S-dalgası hızı değişimleri saptanmıştır. Bir boyutlu makaslama hızı profilleri nüfus etki derinliği dikkate alınarak incelendiğinde, ilk 8 m'lik derinlikte  $V_s$ , 100 ile 350 m/s arasında değişmektedir. 4,5 Hz jeofon kullanılarak toplanan veri kayıtları işlendiğinde, farklı yakın açılım değerleri için elde edilen S-dalgası hızının derinlikle değişimi birbiriyle uyuşmamıştır. Farklı yakın açılım değerleri için, 14 Hz jeofon kullanılarak elde edilen S-dalgası hızının derinlikle değişim sonuçları ise 4,5 Hz'e göre birbiriyle daha uyumludur. Örneğin, tüm yakın açılımlarda, 3 m derinlikte yaklaşık 250m/s, 6 m için 150 m/s S-dalgası hız değeri saptanmıştır. Bu değişimler, farklı birimlerin arasındaki geçişler olarak nitelendirilebilir. Bunun yanı sıra,  $V_s$ 'nin derinlikle değişim değerleri, 14 Hz jeofon kullanımının 4,5 Hz'e göre birim geçişlerinin ortaya çıkarılmasında daha başarılıdır. 14 Hz jeofon frekansı ile bu derinlikler için daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir ve bu sonuçlara bakılarak yorum yapılması daha uygun olacaktır.

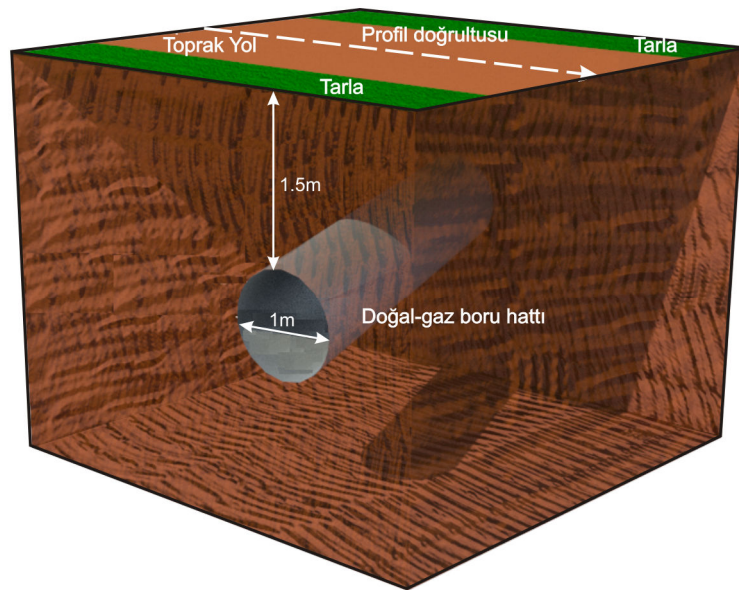
S-dalgası hızlarının derinlikle değişim sonuçları incelendiğinde, yüzeyden 2 m'lik derinliğe kadar toprak örtüsü, 2 ile 6 m arası arkeolojik malzeme ve 6 m'den sonra daha sıkı ve sert malzemedен oluşan ana kaya olarak adlandırılabilen üç farklı birim ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca, yakın açılımın jeofon aralığının yaklaşık üç katı olduğu durumda, verilerde sinyal/gürültü oranı daha yüksektir ve S-dalgası hızı daha belirgin bir değişim göstermektedir. Ölçülen ve hesaplanan frekans bağımlı faz hızı eğrilerine uygulanan ters-çözüm işlemi sonucunda bunlar arasında iyi bir çakışma sağlanmış olup, karekök (RMS) hata 1,47 ile 3 m/s arasında değişmektedir.

### 6.2.5 Alan-2 (Doğalgaz-Boru Hattı)

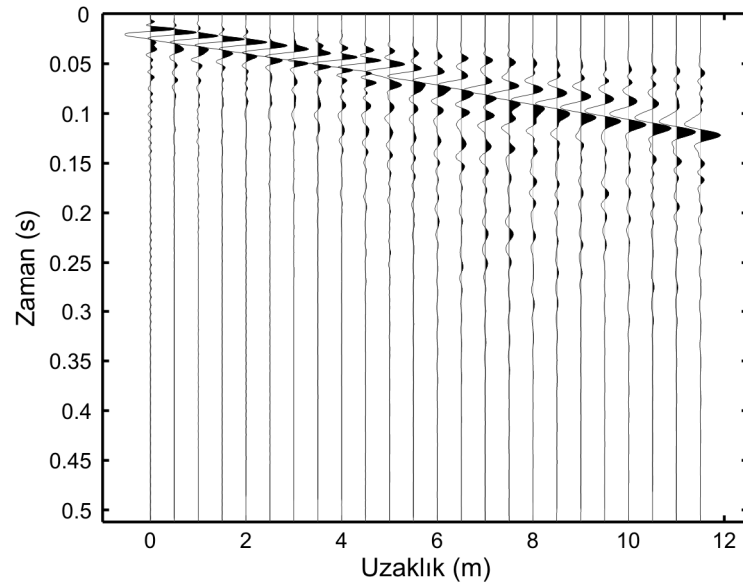
Bu bölümde, Aydın ili Germencik ilçesinde derinliği, boyutu ve yeri bilinen gömülü Denizli-İzmir doğalgaz boru hattını kesecek şekilde bir profil üzerinde çalışma gerçekleştirilmiştir. Doğal gaz boru hattının yaklaşık olarak derinliği 1,5 m ve çapı 1 m 'dir (Şekil 6.37). Atış kayıtlarında, 14 Hz düşey P jeofonu kullanılmıştır. Burada jeofon aralığı 0,5 m ve yakın açılım uzaklığı 1,5 m seçilmiştir (Şekil 6.36).



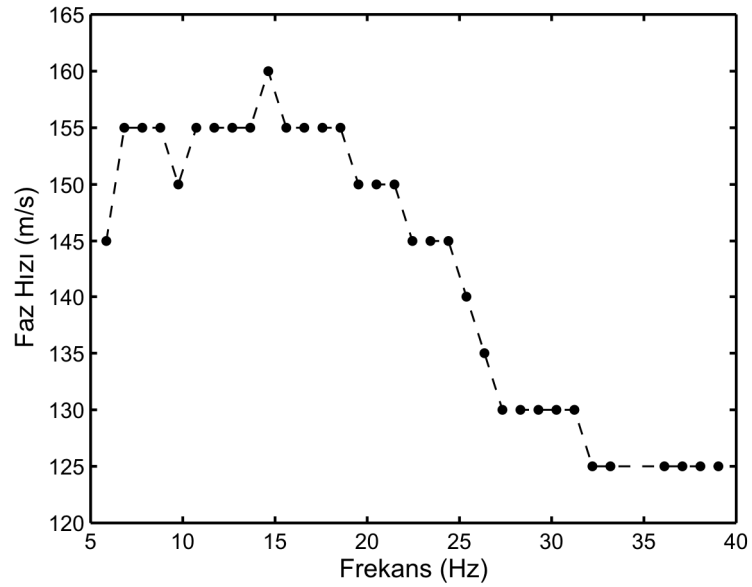
Şekil 6.36 Doğalgaz boru hattı üzerinde alınan profil



Şekil 6.37 Doğalgaz borusunun yeraltındaki konumu

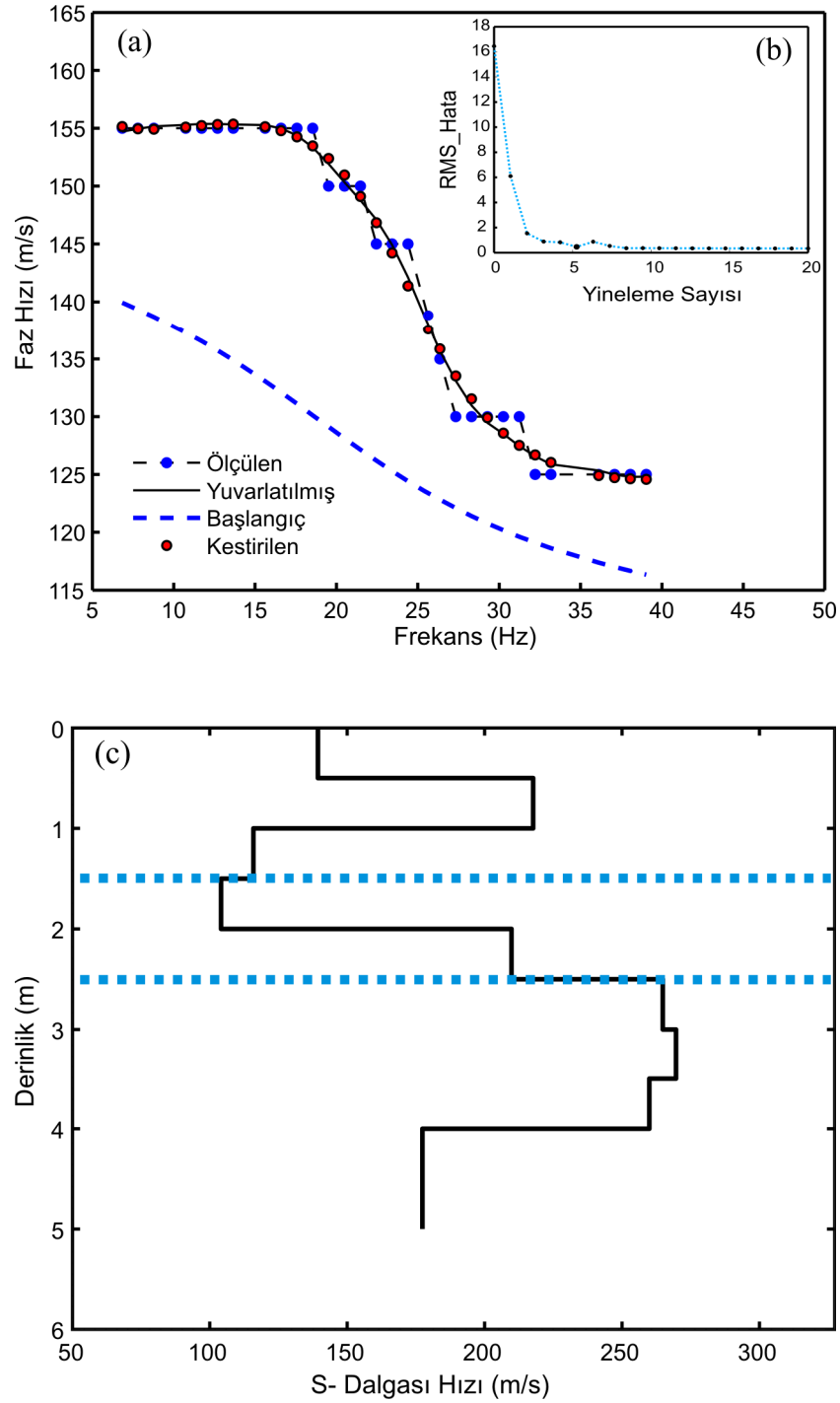


Şekil 6.38 Atış kaydı.

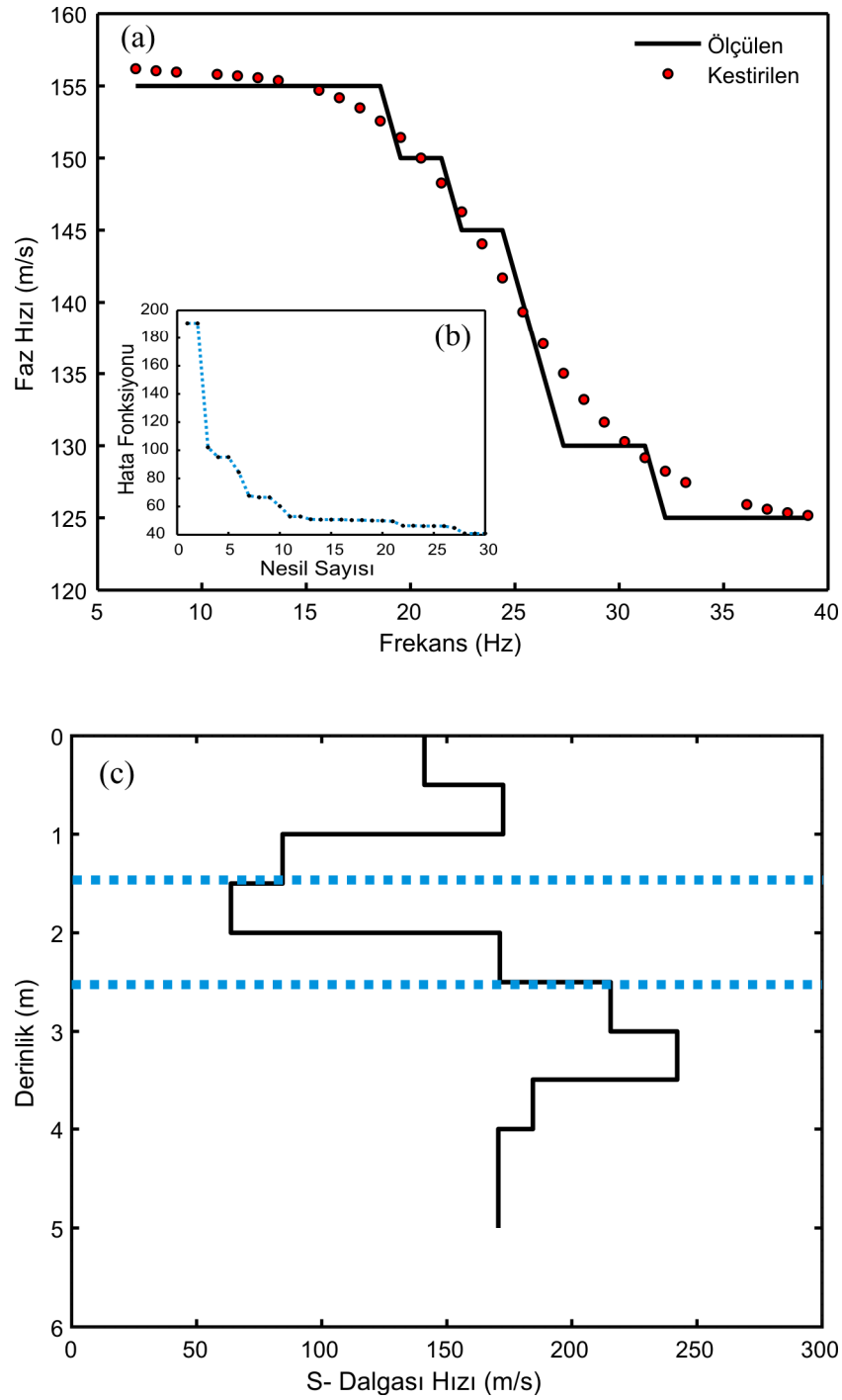


Şekil 6.39 Temel mod dispersiyon (frekans-bağımlı faz-hızı) eğrisi.

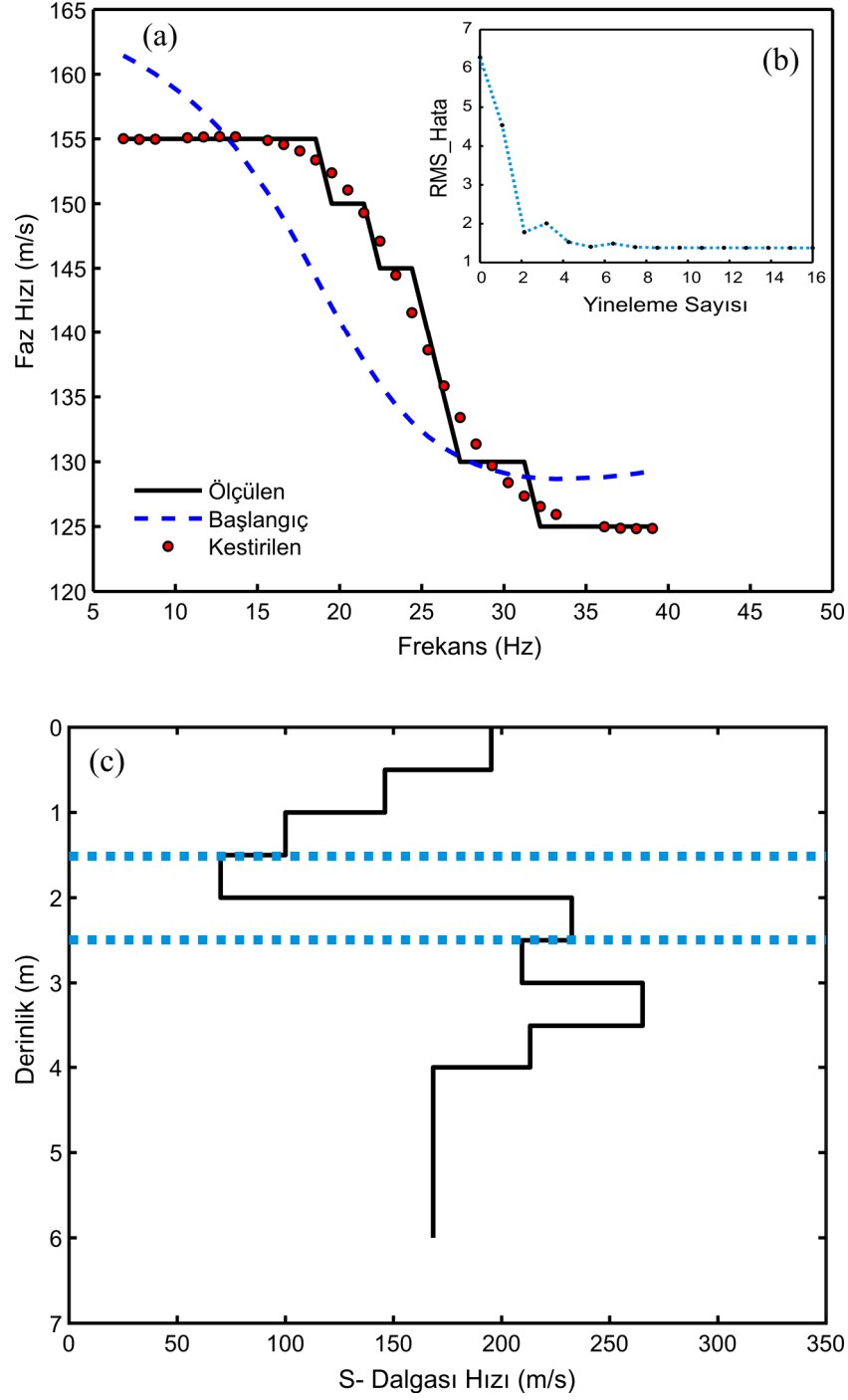
Arazi çalışmalarında, temel mod dispersiyon eğrilerinin çıkarılmasında Park ve diğer., (1999) tarafından önerilen çok-kanallı yüzey dalgası analizi hesaplama yöntemi kullanılmıştır. Dispersiyon eğrisine sırasıyla Levenberg-Marquardt, Genetik Algoritma ve Melez ters-çözüm yöntemleri uygulanarak S-dalgası hız profilleri çıkarılmıştır.



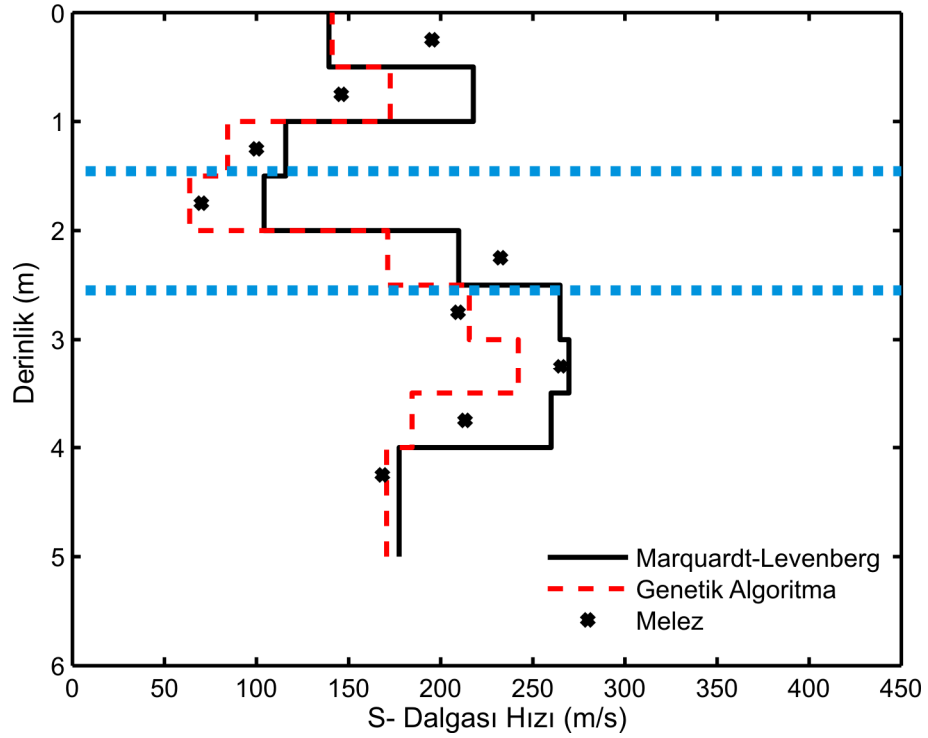
Şekil 6.40 Çok-kanallı yüzey dalgası verilerinin Levenberg-Marquardt yöntemi ile değerlendirilmesi: a) ölçülen (mavi noktalı siyah kesikli çizgi), yuvarlatılmış (siyah düz çizgi), başlangıç (mavi kesikli çizgi) ve kestirilen (kırmızı noktalı çizgi) dispersiyon eğrileri. b) RMS hata. c) S-dalgası hız profili: ters-çözüm sonucu (siyah düz çizgi) ve derinliği bilinen doğalgaz borusunun alt ve üst sınırları (mavi kesikli çizgi).



Şekil 6.41 Çok-kanallı yüzey dalgası verilerinin Genetik Algoritma yöntemi ile değerlendirilmesi: a) ölçülen (mavi noktalı siyah kesikli çizgi), yuvarlatılmış (siyah düz çizgi) ve kestirilen (kırmızı noktalı çizgi) dispersiyon eğrileri. b) RMS hata. c) S-dalgası hız profili: ters-çözüm sonucu (siyah düz çizgi) ve derinliği bilinen doğalgaz borusunun alt ve üst sınırları (mavi kesikli çizgi).



Şekil 6.42 Çok-kanallı yüzey dalgası verilerinin Melez yöntemi ile değerlendirilmesi: a) ölçülen (mavi noktalı siyah kesikli çizgi), yuvarlatılmış (siyah düz çizgi), başlangıç (mavi kesikli çizgi) ve kestirilen (kırmızı noktalı çizgi) dispersiyon eğrileri. b) RMS hata. c) S-dalgası hız profili: ters-çözüm sonucu (siyah düz çizgi) ve derinliği bilinen doğalgaz borusunun alt ve üst sınırları (mavi kesikli çizgi).



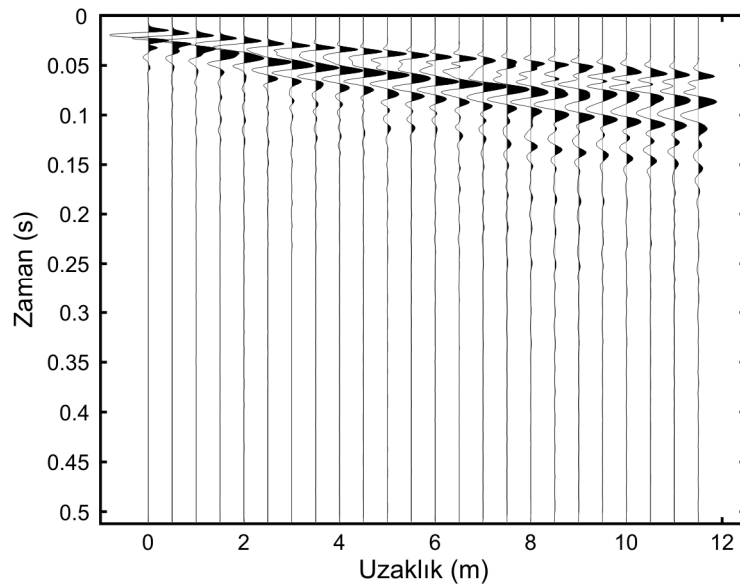
Şekil 6.43 S-dalgası hız değişimleri: Levenberg-Marquardt yöntemi (siyah düz çizgi), Genetik Algoritma (kırmızı kesikli çizgi), Melez yöntemi (siyah çapraz nokta) ve gömülü boyutları bilinen bir doğalgaz borusunun alt ve üst sınır derinliği (mavi kesikli çizgi).

Arazi çalışmalarında yüksek sinyal/gürültü yüzey dalgası verileri elde etmek için ard arda 5 vuruş gerçekleştirilmiştir. Veri kaybını önlemek için kayıtlarda herhangi bir süzgeçleme işlemi uygulanmamıştır. Doğalgaz boru hattı üzerinde alınan yüzey dalgası verileri Levenberg-Marquardt, Genetik Algoritma ve Melez ters-çözüm yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Her üç yöntemde, doğalgaz borusunun alt ve üst sınırları kabaca belirlenebilmektedir.

### 6.2.6 Alan-2 (Prizma ve Varil)

MASW yönteminin arazi uygulamalarında, doğalgaz boru hattı üzerinde yapılan çalışmaya ek olarak gömülü dikdörtgen prizma ve varilin kullanıldığı bir test alanı oluşturulmuştur. Test alanında dikdörtgen prizma, 1,75 m, varil ise 1,5 m derinliğe gömülmüştür. Test alanları üzerinde çok-kanallı yüzey dalgası verileri toplanarak, yöntemin bu tür yapılara uygulanabilirliği ve yapıların çözülebilirliği değerlendirilmiştir. Atış kayıtlarında 14 Hz jeofon kullanılmış, jeofon aralığı 0,5 m ve yakın açılım uzaklığı 1,5 m seçilmiştir.

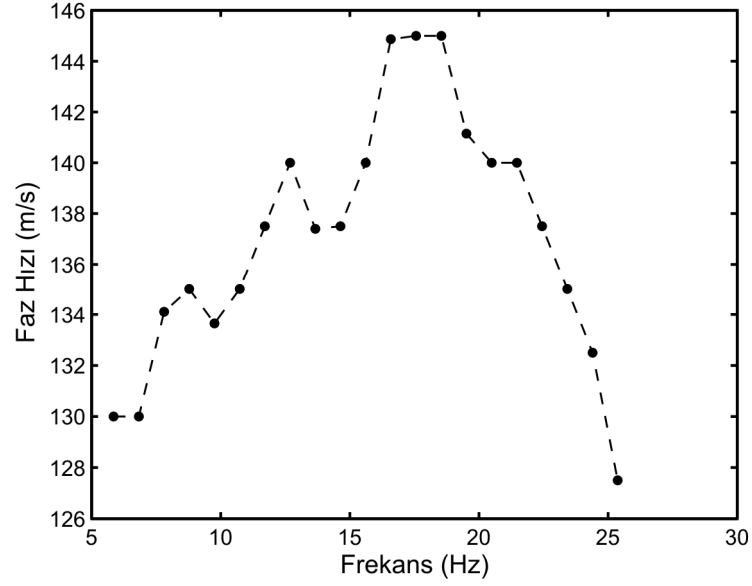
Dikdörtgen prizması için,



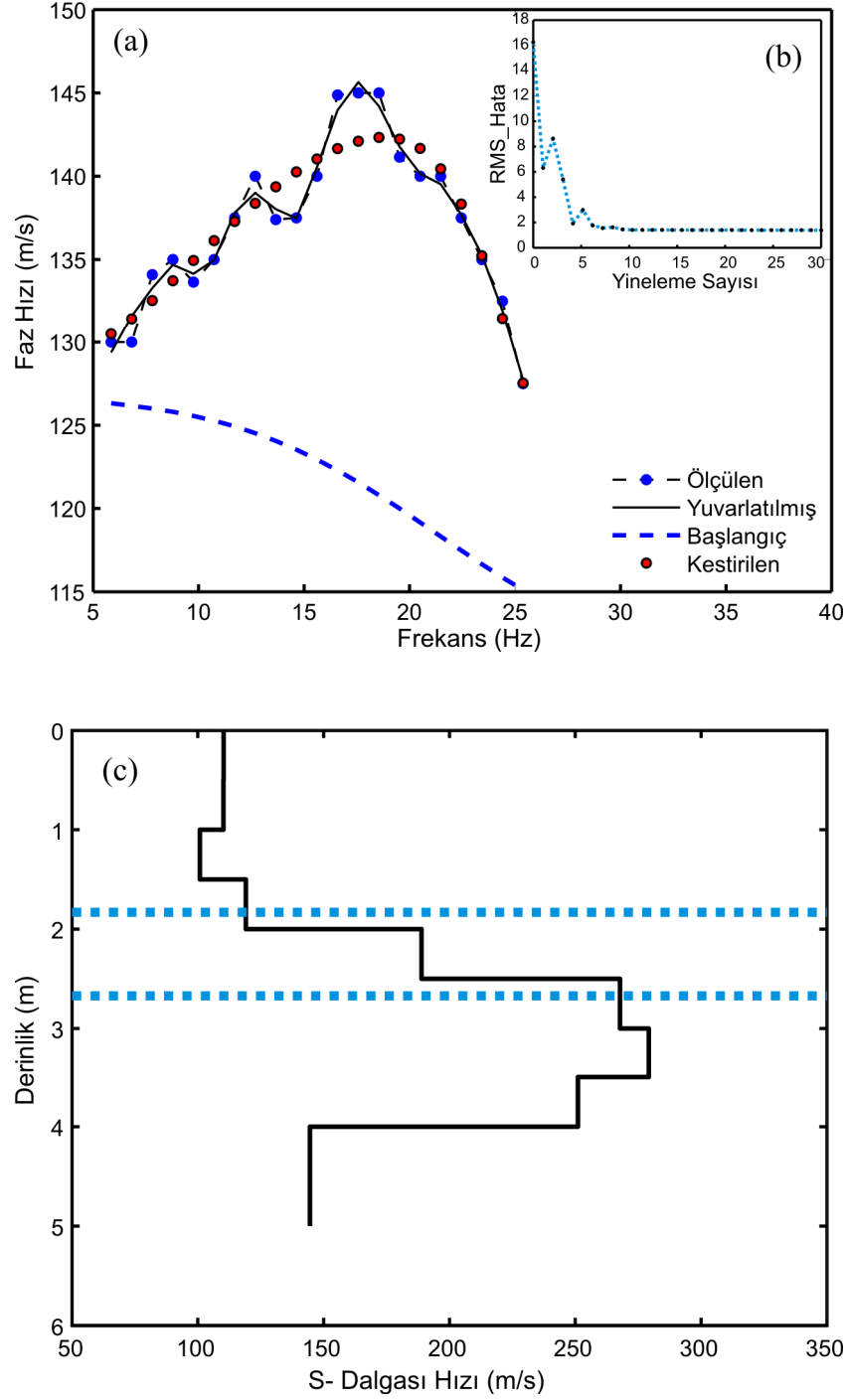
Şekil 6.44 Gömülü dikdörtgen prizması için elde edilen atış kaydı.



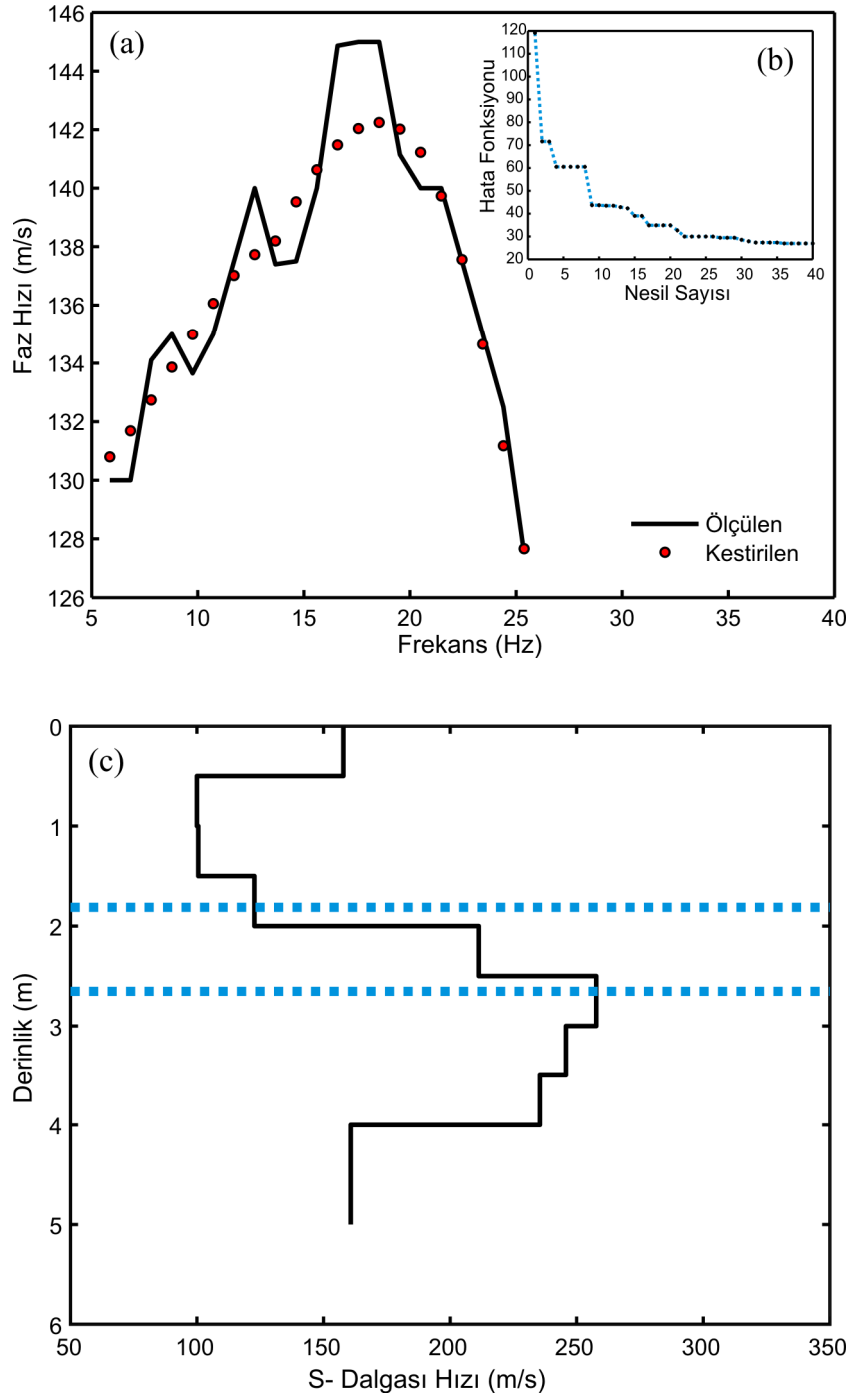
Şekil 6.45 'da görüldüğü gibi çok-kanallı yüzey dalgası analizi hesaplama yöntemi ile atış kayıtlarından elde edilen temel mod dispersiyon eğrisi elde edilmiştir. Dispersiyon eğrisine sırasıyla Levenberg-Marquardt, Genetik Algoritma ve Melez ters-çözüm yöntemleri uygulanarak test modellerine ait S-dalgası hız profilleri çıkarılmıştır.



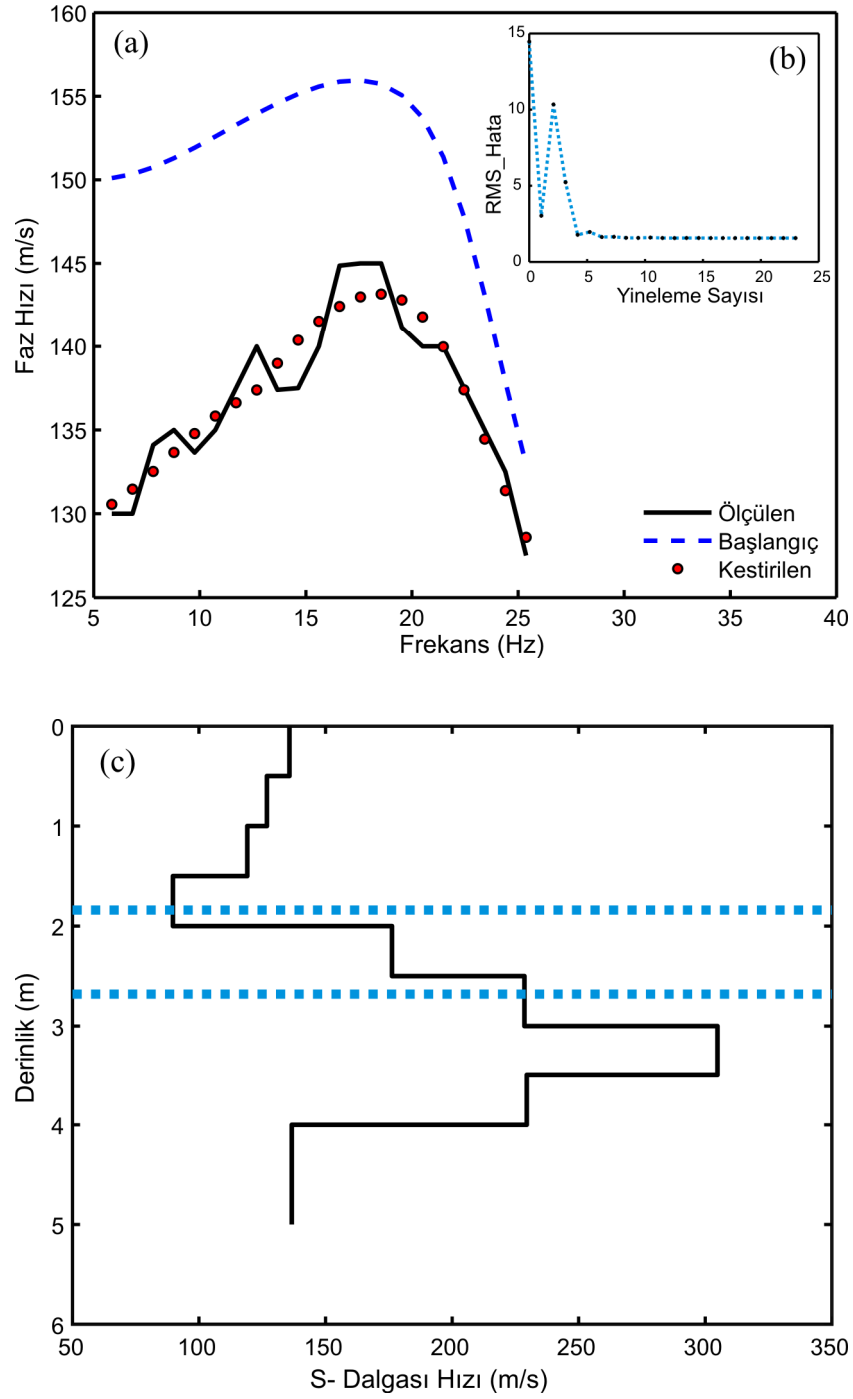
Şekil 6.45 Temel mod dispersiyon (frekans-bağımlı faz hızı) eğrisi.



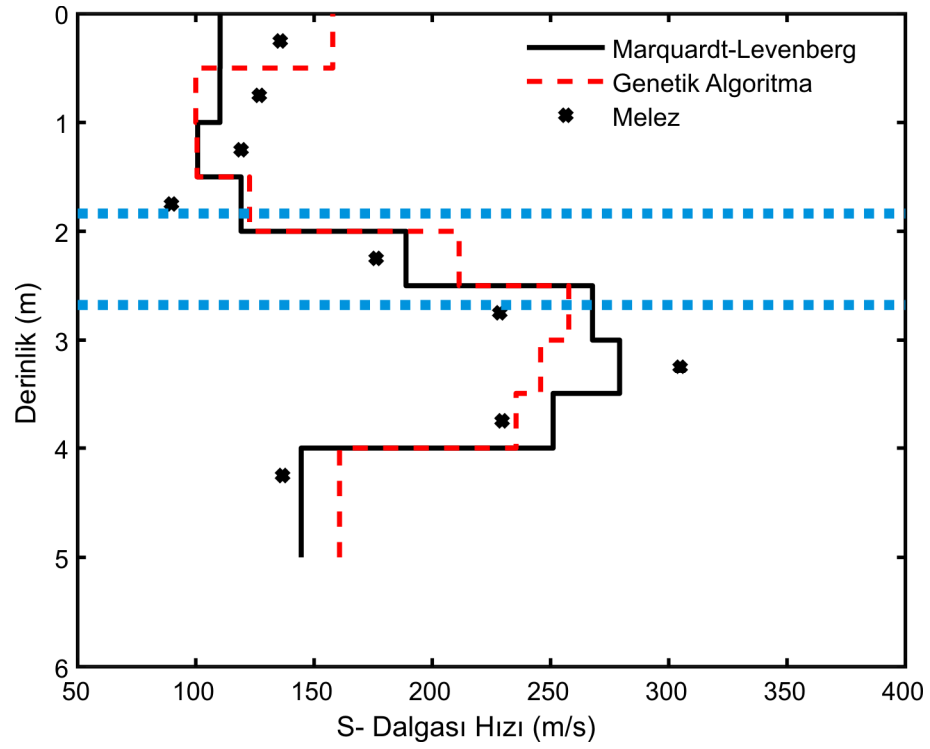
Şekil 6.46 Çok-kanallı yüzey dalgası verilerinin Levenberg-Marquardt yöntemi ile değerlendirilmesi: a) ölçülen (mavi noktalı siyah kesikli çizgi), yuvarlatılmış (siyah düz çizgi), başlangıç (mavi kesikli çizgi) ve kestirilen (kırmızı noktalı çizgi) dispersiyon eğrileri. B) RMS hata. C) S-dalgası hız profili: ters-çözüm sonucu (siyah düz çizgi) ve derinliği bilinen prizmanın alt ve üst sınırları (mavi kesikli çizgi).



Şekil 6.47 Çok-kanallı yüzey dalgası verilerinin Genetik Algoritma yöntemi ile değerlendirilmesi: a) ölçülen (mavi noktalı siyah kesikli çizgi), yuvarlatılmış (siyah düz çizgi) ve kestirilen (kırmızı noktalı çizgi) dispersiyon eğrileri. B) RMS hata. C) S-dalgası hız profili: ters-çözüm sonucu (siyah düz çizgi) ve derinliği bilinen prizmanın alt ve üst sınırları (mavi kesikli çizgi).



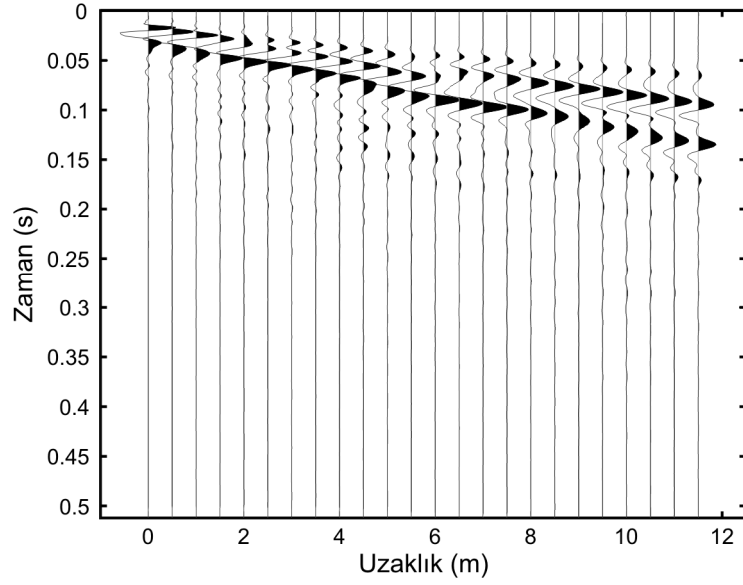
Şekil 6.48 Çok-kanallı yüzey dalgası verilerinin Melez yöntemi ile değerlendirilmesi: a) ölçülen (mavi noktalı siyah kesikli çizgi), yuvarlatılmış (siyah düz çizgi), başlangıç (mavi kesikli çizgi) ve kestirilen (kırmızı noktalı çizgi) dispersiyon eğrileri. B) RMS hata. C) S-dalgası hız profili: ters-çözüm sonucu (siyah düz çizgi) ve derinliği bilinen prizmanın alt ve üst sınırları (mavi kesikli çizgi).



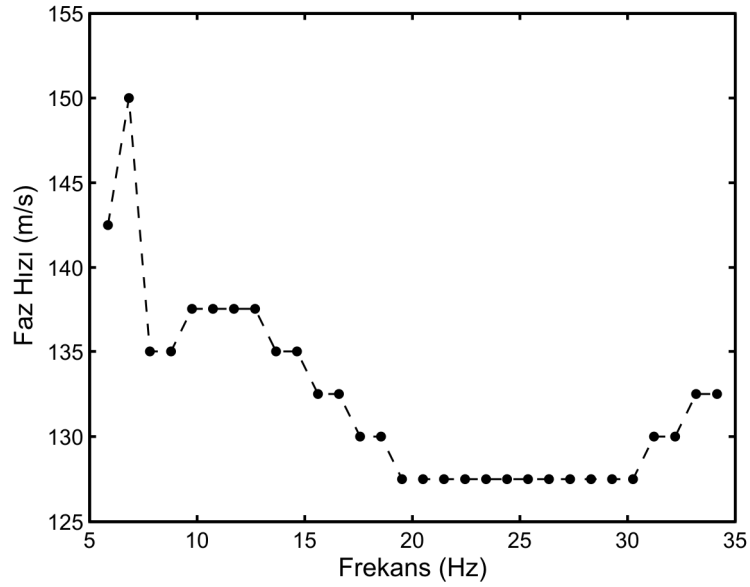
Şekil 6.49 S-dalgası hız değişimleri: Levenberg-Marquardt yöntemi (siyah düz çizgi), Genetik Algoritma (kırmızı kesikli çizgi), Melez yöntemi (siyah çapraz nokta) ve gömülü boyutları bilinen bir prizmanın alt ve üst sınır derinliği (mavi kesikli çizgi).

Yeraltına gömülü olan dikdörtgen prizmasının üst yapı sınırı, her üç yöntem için başarılı bir şekilde ortaya konmuştur, yapı sınırında hızlarda belirgin bir şekilde artma gözlenmiştir.

Varil için,

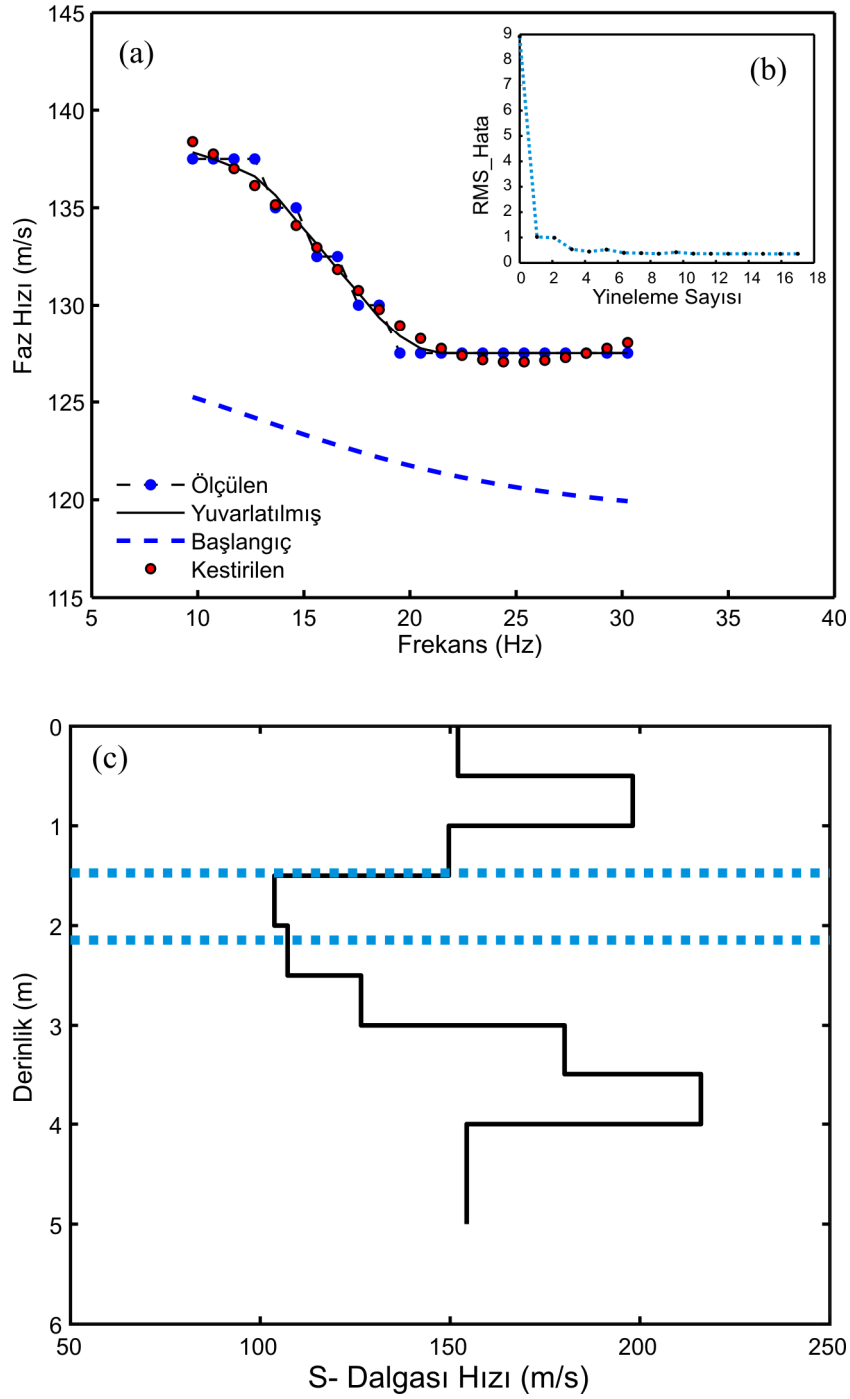


Şekil 6.50 Gömülü Varil için elde edilen atış kaydı.

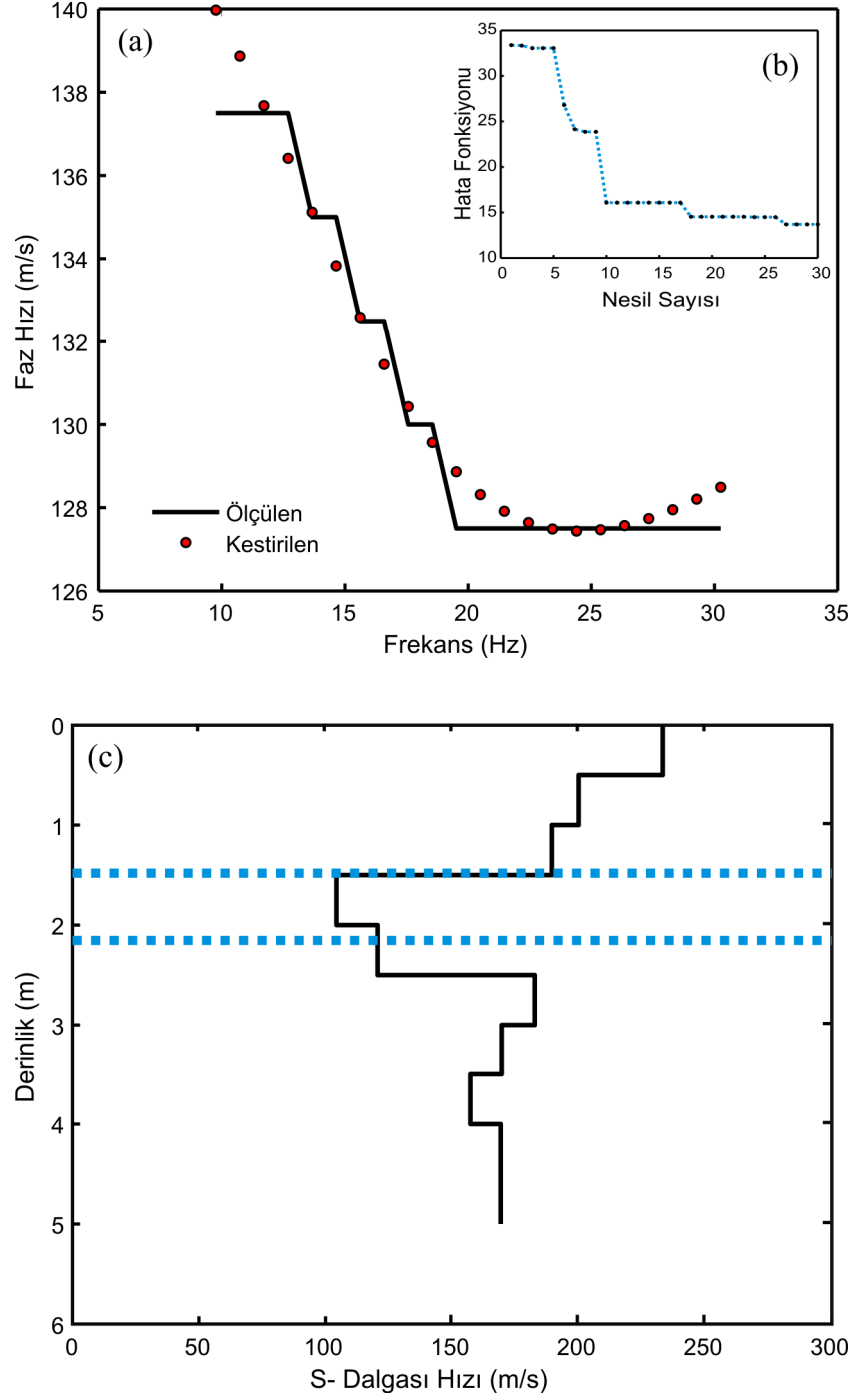


Şekil 6.51 Temel mod dispersiyon (frekans-bağımlı faz hızı) eğrisi.

Çok-kanallı yüzey dalgası analizi hesaplama yöntemi ile atış kayıtlarından (Şekil 6.50) temel mod dispersiyon eğrisi elde edilmiştir (Şekil 6.51).

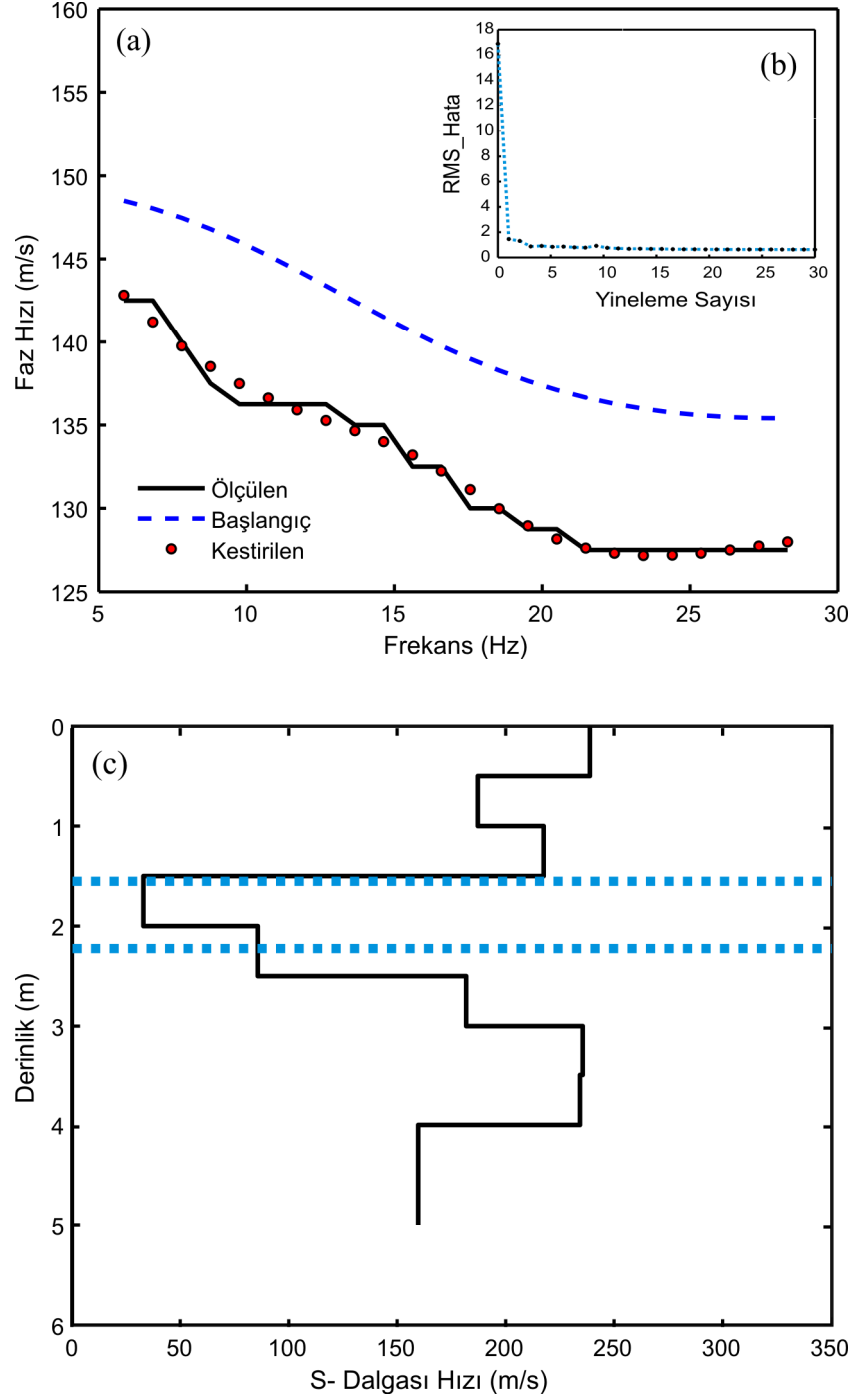


Şekil 6.52 Çok-kanallı yüzey dalgası verilerinin Levenberg-Marquardt yöntemi ile değerlendirilmesi: a) ölçülen (mavi noktalı siyah kesikli çizgi), yuvarlatılmış (siyah düz çizgi), başlangıç (mavi kesikli çizgi) ve kestirilen (kırmızı noktalı çizgi) dispersiyon eğrileri. B) RMS hata. C) S-dalgası hız profili: ters-çözüm sonucu (siyah düz çizgi) ve derinliği bilinen varilin alt ve üst sınırları (mavi kesikli çizgi).

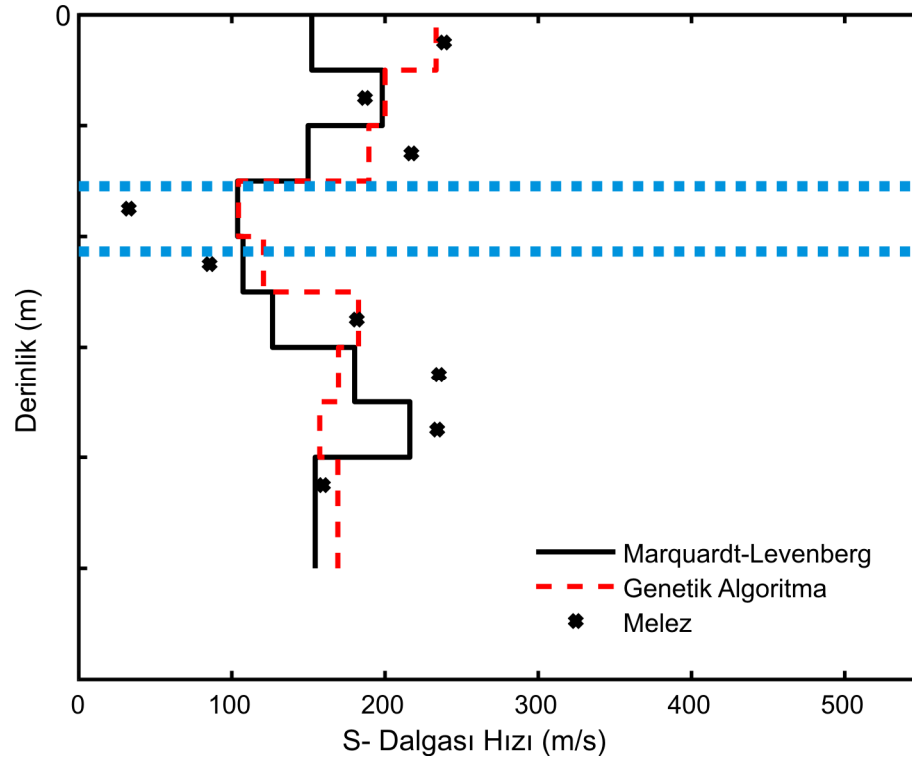


Şekil 6.53 Çok-kanallı yüzey dalgası verilerinin Genetik Algoritma yöntemi ile değerlendirilmesi: a) ölçülen (mavi noktalı siyah kesikli çizgi), yuvarlatılmış (siyah düz çizgi) ve kestirilen (kırmızı noktalı çizgi) dispersiyon eğrileri. B) RMS hata. C) S-dalgası hız profili: ters-çözüm sonucu (siyah düz çizgi) ve derinliği bilinen varilin alt ve üst sınırları (mavi kesikli çizgi).





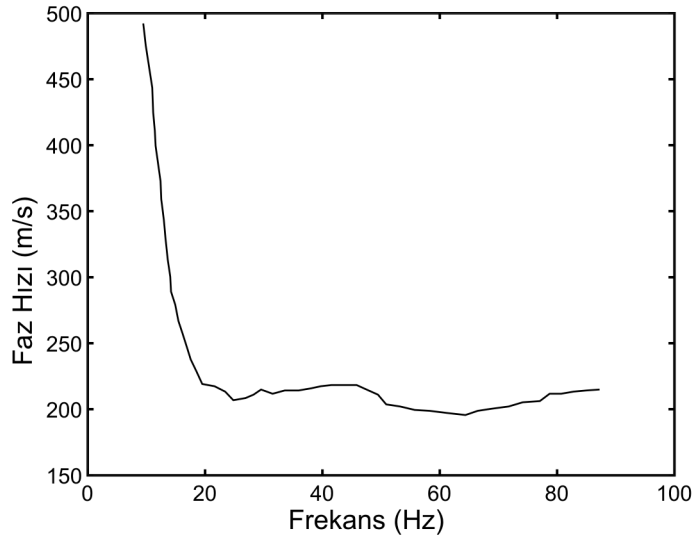
Şekil 6.54 Çok-kanallı yüzey dalgası verilerinin Melez yöntemi ile değerlendirilmesi: a) ölçülen (mavi noktalı siyah kesikli çizgi), yuvarlatılmış (siyah düz çizgi), başlangıç (mavi kesikli çizgi) ve kestirilen (kırmızı noktalı çizgi) dispersiyon eğrileri. B) RMS hata. C) S-dalgası hız profili: ters-çözüm sonucu (siyah düz çizgi) ve derinliği bilinen varilin alt ve üst sınırları (mavi kesikli çizgi).



Şekil 6.55 S-dalgası hız değişimleri: Levenberg-Marquardt yöntemi (siyah düz çizgi), Genetik Algoritma (kırmızı kesikli çizgi), Melez yöntemi (siyah çapraz nokta) ve gömülü boyutları bilinen bir varilin alt ve üst sınır derinliği (mavi kesikli çizgi).

### 6.2.7 Melez yöntemin Zhang ve diğer., (2003) tarafından yapılan arazi çalışma sonuçları ile karşılaştırılması

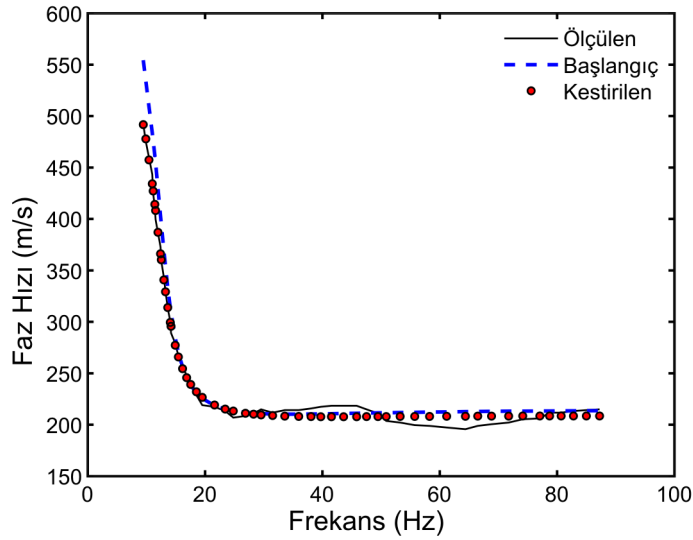
Bu bölümde, S-dalgası hız profillerinin elde edilmesinde kullanılan Melez ters-çözüm yönteminin başarısı irdelenecektir. Bu amaç için, Zhang ve diğer., (2003) tarafından toplanan MASW verisi kullanılmıştır (Şekil 6.56). Zhang ve diğer., (2003) tarafından MASW verisi kullanılarak elde edilen S-dalgası hız profili, Şekil 6.58 'de görülmektedir, tarafımızdan Melez yöntemi kullanılarak değerlendirilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 6.56 Temel mod dispersiyon eğrisi (Zhang ve diğer., 2003).

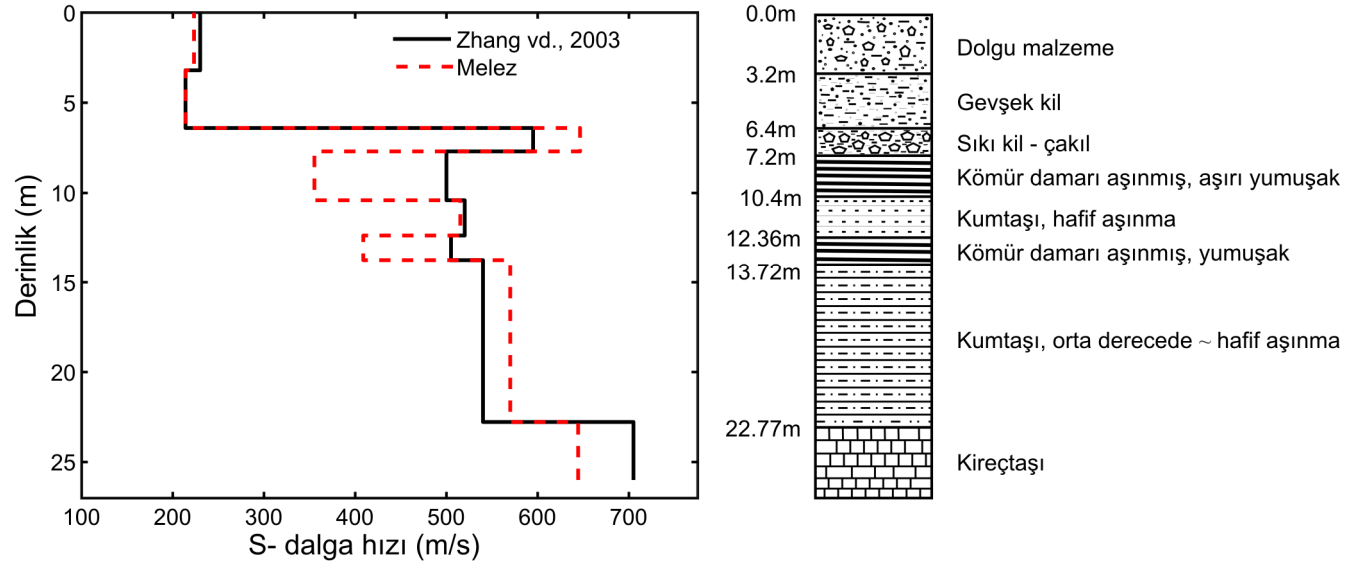
Zhang ve diğer., (2003) tarafından toplanan yüzey dalgası verileri için alan çalışması Kuzey Çin 'de 108 otoyolunda K125-K129 kesitlerinde gerçekleştirilmiştir. Bu noktada, kuyu sondajı ve jeofizik aramacılığı içeren geniş kapsamlı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Kuyu sondaj kayıtları, 7,7-10,4 m ve 12,36-13,72 m derinliklerde kömür katmanlarının varlığını göstermektedir. Jeoteknik olarak kömür katmanları, muhtemelen özünde yumuşak ve plastiktir. Yüzey dalgası incelemeleri, kömür katmanlarının uzunluğunu izlemek amacıyla uygulanmıştır. Yüzey dalgası verilerinden elde edilen ortama ait S-dalgası hız profillerinin doğruluğu kuyu kayıtları ile karşılaştırılmıştır.

Yüzey dalgası verileri için yapılan alan çalışmalarında 4,5 Hz jeofon ile 12 kanallı bir sismograf ve kaynak olarak 8 kg 'lık bir balyoz kullanılmıştır. Jeofon aralığı 1 m, yakın açılım uzaklığı 15 m 'dir. Kayıtlarda örnekleme aralığı, 0,5 ms ve kayıt uzunluğu 2 s seçilmiştir.



Şekil 6.57 Çok-kanallı yüzey dalgası verilerinin Melez yöntemi ile değerlendirilmesi: a) ölçülen (siyah düz çizgi), başlangıç (mavi kesikli çizgi) ve kestirilen (kırmızı noktalı çizgi) dispersiyon eğrileri.

Melez ters-çözüm yöntemi kullanılarak yüzey dalgası temel mod dispersiyon eğrisinden (Şekil 6.56) S-dalgası hız profili elde edilmiştir (Şekil.6.57). Daha sonra, Zhang ve diğer., 2003 tarafından ve Melez yöntemi sonucunda elde edilen S-dalgası hızı profilleri çizdirilmiştir (Şekil 6.58). Sonuçlar, kuyu sondaj kesitleri ile karşılaştırıldığında katman yapılarına uyumlu doğru değişimler gözlenmiştir (Şekil 6.58).



Şekil 6.58 S-dalgası hız profillerinin değişimi ve kuyu sondajı (borehole drilling) kesit sonuçları: Zhang ve diğer., 2003 (siyah düz çizgi) ve Melez yöntemi (kırmızı kesikli çizgi).

## BÖLÜM YEDİ

### SONUÇLAR

Bu çalışmada aktif çok-kanallı yüzey dalgası analizinin (MASW), yüzeye-yakın yeraltı yapılarına uygulanabilirliği ve çözümlülüğü, kuramsal ve arazi çalışmalarıyla irdelenmiştir. Yüzey dalgası analiz yöntemleri ile S-dalgası hız profillerinin elde edilmesi işlemi, çok-kanallı yüzey dalgası verilerinin toplanması, dispersiyon (frekans-bağımlı faz hızı) eğrisinin çıkarılması ve ters-çözüm işlemi olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilir.

İlk aşamada, çok-kanallı yüzey dalgası analizi yönteminin uygulanabilirliği kuramsal çalışmalarla incelenmiştir. Kuramsal olarak iki model oluşturulmuş ve modele ait dispersiyon eğrileri çıkarılmıştır. Daha sonra gerçek arazi verilerinin gürültülü olabileceği düşünülerek dispersiyon eğrisine gürültü eklenmiştir. Dispersiyon eğrilerinden S-dalgası hız profillerini elde etmek için ters-çözüm aşamasında Levenberg-Marquardt, Genetik Algoritma ve Melez yöntemleri kullanılmıştır. Değerlendirmelerde, Levenberg-Marquardt ve Genetik Algoritma yöntemlerinin temel sakıncaları, iyi bir başlangıç model parametreleri seçimi ve hesaplama işlemlerinin fazlalılığı gözlemlenmiştir. Kuramsal çalışmalar, S-dalgası hız profillerinin saptanmasında Melez yönteminin daha doğru ve hızlı sonuçlar ortaya koyduğunu göstermektedir.

İkinci aşamada, çok-kanallı yüzey dalgası analizi yönteminin yüzeye-yakın yeraltı yapılarına uygulanabilirliği ve uygun parametre seçimi, Magnesia antik kentinde yapılan arazi çalışmasında deneme ölçüleriyle irdelenmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde, 4,5 Hz jeofon kullanılarak toplanan veri kayıtları işlendiğinde, farklı yakın açılım değerleri için elde edilen S-dalgası hızının derinlikle değişimi birbiriyle uyuşmamıştır. Farklı yakın açılım değerleri için, 14 Hz jeofon kullanılarak elde edilen S-dalgası hızının derinlikle değişim sonuçları ise 4,5 Hz'e göre birbiriyle daha uyumludur. Örneğin, tüm yakın açılımlarda, 3 m derinlikte yaklaşık 250m/s, 6 m için 150 m/s S-dalgası hız değeri saptanmıştır. Bu değişimler, farklı birimlerin arasındaki geçişler olarak nitelendirilebilir. Bunun yanı sıra,  $V_s$  'nin derinlikle

değişim değerleri, 14 Hz jeofon kullanımının 4.5 Hz 'e göre birim geçişlerinin ortaya çıkarılmasında daha başarılıdır. 14 Hz jeofon frekansı ile bu derinlikler için daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir ve bu sonuçlara bakılarak yorum yapılması daha uygun olacaktır. Ayrıca, yakın açılımın jeofon aralığının yaklaşık üç katı olduğu durumda, verilerde sinyal/gürültü oranı daha yüksektir ve S-dalgası hızı daha belirgin bir değişim göstermektedir.

Son olarak, çok-kanallı yüzey dalgası analiz yöntemi arazi çalışmalarına uygulanmıştır. Değerlendirmelerde, Yerel ve Global algoritmaların çözümünde karşılaşılan sorunları gidermek amacıyla her iki algoritmanın belli başlı özellikleri kullanılarak birleştirildiği Melez (hybrid) optimizasyon algoritmasının başarısı gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, Melez ters-çözüm yönteminin klasik Yerel ve Global optimizasyon yaklaşımından hesaplama işlemi olarak daha hızlı ve verimli olduğu bulunmuştur.

Böylece, Melez ters-çözüm yönteminin başarılı uygulamalarıyla jeolojik yapıların ve litolojinin daha iyi çözülmesi, iyi bir başlangıç modeli zorunluluğunun giderilmesi, ters-çözüm işleminin hesap maliyetini azaltması ve iyi bir model veya modeller elde edilmesi beklenir. Bunların hepsi, yeraltı malzemesinin özelliklerinin ve yapılarının daha iyi tanımlanmasında çözüm gücümüzü geliştirir.

MASW yöntemi; sismik kırılma, yansıma, kuyu içi, kuyuda yapılan ölçümler, tomografi ve sondaj çalışmalarına göre çok daha hızlı ve etkin bir şekilde kullanılabilir. Yöntem, günümüzde pek çok zemin (jeoteknik, mikro bölgelendirme, mühendislik jeofiziği amaçlı) yapısının ve kayma dalga hızının (Vs) saptanmasında etkili bir seçenek olarak değerlendirilebilir. Buna göre; ölçüm alma, alınan ölçümlerin sonuçlarının kolay ve kısa zamanda değerlendirildiği çok-kanallı yüzey dalga analizi yöntemi, arkeolojik alanlar da dahil olmak üzere, kentsel alanlarda sığ yeraltı yapılarının araştırılmasında yaygın olarak kullanılmasının uygun olacağı düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

- Altıparmak, F., Dengiz, B. & Smith, A.E. (2000). An Evolutionary Approach For Reliability Optimization in Fixed Topology Computer Networks. *Transactions On Operational Research, Volume: 12*, 57–75.
- Babuska, V., & Cara, M. (1991). *Seismic Anisotropy in the Earth*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, 217.
- Back, T., Fogel, D.B. & Michalewicz, T. (2000). Evolutionary Computation 1: Basic Algorithms and Operators, *Institute of Physics Publishing*, Bristol and Philadelphia.
- Baker, J.E. (1985). Adaptive selection methods for genetic algorithms, *In Proceedings of International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications*, 100–111.
- Başokur, A.T. (2002). *Doğrusal ve doğrusal olmayan problemlerin ters-çözümü*. TMMOB Jeofizik Mühendisleri Odası Eğitim Yayınları, No. 4, 166, Ankara.
- Bath, M. (1973). *Introduction to the Theory of Seismology*. Birkhauser Verlag, Basel: A Halsted Press Book.
- Bergstrom, J., (1999). Non-destructive testing of ground strength using the SASW-method, *The symposium on the application of geophysics to engineering and enviromental problems (SAGEEP)*, Conference proceedings, March 14–18, Oakland, CA, 57–65.
- Bingöl, O. (2005). *Menderes Magnesia on the Meander: Theatron*. İstanbul: Homer yayınları.



- Braile, L.W. (2008). *Seismic waves and slinky*: Developed in cooperation with the IRIS Consortium, supported by the National Science Foundation, 2009, from <http://web.ics.purdue.edu/~braile/indexlinks/educ.htm>.
- Braysy, O. (2001). *Local Search and Variable Neighborhood Search Algorithms for The Vehicle Routing Problem With Time Windows*, Ph.D.Dissertation, University of Vaasa, Finland.
- Cary, P.W. & Chapman, C.H. (1988). Automatic 1-D waveform inversion of marine seismic reflection data. *Geophysical Journal International*, 93, 527–46.
- Cauchy, A. (1847). Methodes generales pour la resolution des systemes d'equations simultanees. *C. R. Acad. Sci. Par.*, 25, 536–538.
- Demmel, J.W. (1997). Applied numerical linear algebra. *Society for industrial and applied mathematics*, Philadelphia.
- Dobrin, M.B., & Savit, C.H. (1988). *Introduction to Geophysical Prospecting*. New York: McGraw-Hill Book Co.
- Dora, O.Ö., Candan, O., Dürr, H., & Oberhansli, R. (1995). New evidence on the geotectonic evolution of the Menderes Massif. In: *Proceedings of the International Earth Sci. Col. on the Aegean Region* (Pişkin, Ö., Ergün, M., Savaşçın M.Y., & Tarcan, G. -eds), 53-72, İzmir.
- Dorman, J., & Ewing, M. (1962). Numerical inversion of seismic surface wave dispersion data and crust-mantle structure in the New York–Pennsylvania area. *Journal of Geophysical Research*, 67, 5227–5241.
- Fıglalı, A. ve Engin, O. (2002). Genetik Algoritmalarla Akış Tipi Çizelgelemede Üreme Yöntemi Optimizasyonu, *İTÜ Dergisi*, 1–6.
- Frandsen P.E., Jonasson K., Nielsen H.B., & Tingleff O. (1999). *Unconstrained optimization*, Lecture Note, Technical University of Denmark, 2009, from <http://www.imm.dtu.dk/~hbn/software.html>.

- Fung, R.Y.K., Tang, J. & Wang, D. (2001). Extension of A Hybrid Genetic Algorithm For Nonlinear Programming Problems With Equality And Inequality Constraints. *Computers & Operations Research*, 3, 261–74.
- Goldberg, D.E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, New York: Addison Wesley.
- Goldberg, D.E., & Deb, D. (1991). A comparative analysis of selection schemes used in genetic algorithms, *In Rawlins, G.J.E. (ed.) Foundations of Genetic Algorithms*, 69-93.
- Gucunski, N., & Wood, R.D. (1991). Instrumentation for SASW testing, Recent advances in instrumentation, data acquisition and testing in soil dynamics. *American Society of Civil Engineers*, 29, 1–16.
- Guo, T., & Liu, L. (1999). Non-intrusive evaluation of submarine tunnel foundation using dynamic high-frequency surface wave prospecting *Proc. Symp. on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (Environmental and Engineering Geophysics Society)*, Oakland, 67–74.
- Haskell, N.A. (1953). The dispersion of surface waves on multilayered media. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 43, 17–34.
- Haataja, J. (1999). Using Genetic Algorithms for Optimization: Technology Transfer in Action. *in Evolutionary Algorithms in Engineering and Computer Science*, Edited by Miettinen, K., Makela, M.M., Neittaanmaki, P., & Periaux, J., Wiley, Chichester. 3–22.
- Haupt, R.L., & Haupt, S.E. (1998). *Practical Genetic Algorithms*. USA: John Wiley-Sons.
- Heisey, J.S., Stokoe K.H., & Meyer, A.H. (1982). Moduli of pavement systems from spectral analysis of surface waves. *Transportation Research Research*, 852, 22–31.

- Holland, J. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems*, University of Michigan, Press, An Arbor.
- Jang, J.S.R. (1997). Neuro-Fuzzy and Soft Computing: *A Computational Approach To Learning and Machine Intelligence*, Chapter 7: Derivative-Free Optimization, Prentice-Hall, USA, 173–196.
- Jones, R.B. (1958). In-situ Measurement of the Dynamic Properties of Soil by Vibration Methods. *Geotechnique*, 8, 1–21.
- Kahraman, A.M., ve Özdağlar, D. (2004). Su dağıtım sistemlerinin Genetik Algoritma ile optimizasyonu. *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 3, 1–18, İzmir.
- Kanlı, A.I., Tjldy, P., Pronay, Z., Pınar, A., & Hermann, L. (2006).  $V_s^{30}$  mapping and soil classification for seismic site effect evaluation in Dinar region, SW Turkey, *Geophys. J. Int.* 165, 223–235.
- Kausel, E., & Roesset, J.M. (1981). Stiffness matrices for layered soils. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71, 1743–1761.
- Kudo, K., Kanno, T., Okada, H., Sasatani, T., Morikawa, N., Apostollidis, P., Raptakis D., Takahashi, M., Ling, S., Nagumo, H., Irikura, K., Higashi, S., & Yoshida, K. (2002). S- wave velocity structure at EURO-SEISTEST, Volvi, Greece. Determined by the spatial Auto-correlation method applied for array records of microtremors. *Proc. 11th Japan Earthquake Engineering Symposium*, 62.
- Kun, N., Özcan, Ö., ve Candan, O. (1986). Menderes masifinde dev kuvars kristalleri. E.Ü. *Journal of the Faculty of Science*, 8, 192–200.
- Levenberg, K. (1944). A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. *The Quarterly of Applied Mathematics*, 2, 164–168.

- Liu P., Hartzell S., & William S. (1995). Non-linear multiparameter inversion using a hybrid global search algorithm: applications in reflection seismology. *Geophysical Journal International*, 122, 991–1000.
- Liu, H.P., Boore, D.M., Joyner, W.B., Oppenheimer, D.H., Warrick, R.E., Zhang, W., Hamilton, J.C., & Brown, L.T. (2000). Comparison of phase velocities from array measurements of Rayleigh waves associated with microtremors and results calculated from borehole shear-wave velocity profiles. *Bulletin of The Seismological Society Of America*, 90, 666–678.
- Madsen, K., Nielsen, H., & Tingleff, O. (2004). *Methods for Non-Linear Least Squares Problems*. Technical University of Denmark, Lecture notes, 2009, from <http://www.imm.dtu.dk/courses/02611/nllsq.pdf>.
- Malagnini L., Herrmann R.B., Biella G., & de Frando R. (1995). Rayleigh waves in quaternary alluvium from explosive sources: determination of shear-wave velocity and Q structure. *Bull. of Seism. Soc. of A.*, 85, 900-922.
- Marquardt, D.W. (1963). An algorithm for least squares estimation of non linear parameters, *Journal of the Society of Industrial and Applied Mathematics*, 11, 431–441.
- McMechan, G.A., & Yedlin, M.J. (1981). Analysis of dispersive waves by wave field transformation. *Geophysics*, 46, 869–874.
- Miller, R.D., Xia, J., Park, C.B., & Ivanov, J.M. (1999). Multichannel analysis of surface waves to map bedrock. *The Leading Edge*, 1392–1396.
- Munsuz, N., ve Ünver, İ. (1983). *Türkiye suları*. Ankara: Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları: 247.
- Nabiyev, V.V. (2003). *Yapay Zeka*, Ankara: Seçkin Yayıncılık.

- Nazarian, S., Stokoe K.H., & Hudson, W.R. (1983). Use of spectral analysis of surface waves method for determination of moduli and thicknesses of pavement systems: *Transportation Research Record*, 930, 38–45.
- Nazarian, S. (1984). *In situ determination of elastic moduli of soil deposits and pavement systems by spectral analysis of surface waves method*. Ph.D.Dissertation, The University of Texas at Austin, 453.
- Okada, H. (2003). The Microseismic Survey Method. Geophysical monograph series. *The Society of Exploration Geophysicists*, 12, Tulsa.
- Park, C.B., Miller, R.D., & Xia, J. (1998). Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record. *The Society of Exploration Geophysicists*, Expanded Abstracts, 1377–1380.
- Park, C.B., Miller, R.D., & Xia, J. (1999). Multi-channel analysis of surface waves (MASW). *Geophysics*, 64, 800–808.
- Park, H.C., Kim, D.C., Bang, E.S., & Kim, J.T. (2007). Seismic site characterization using HWAW (harmonic wavelet analysis of waves) method. *4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, 1352, Greece.
- Palko, S. (1996). Structure optimization of an induction motor using a genetic algorithm and a finite element method. *Acta Polytechnica Scandinavica, Electrical Engineering*. Helsinki, 10–12.
- Porsani M.J., Stoffa P.L., Sen M.K., Chunduru R. & Wood W.T. (1993). A combined genetic and linear inversion algorithm for seismic waveform inversion. *63rd SEG meeting*, Washington, DC, USA, Expanded Abstracts, 692–695.

- Puech, A., France, F., Rjvoallan, X., Cherel, L. (2004). Institut Français Du Pétrole, *The use of surface waves in the characterisation of seabed sediment: Development of a MASW system for offshore applications*, Seatech Week, Brest, France.
- Rao, S.S. (1996). *Engineering Optimization*, New York, USA: A Wiley-Interscience Publication, 903.
- Rayleigh, J.W.S. (1885). On wave propagating along the plane surface of an elastic solid. *Proc. London Math. Soc.*, 17, 4-11.
- Richart, F.E., Jr., Woods, R.D., & Hall, J.R. Jr. (1970). *Vibrations of Soils and Foundations*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 414.
- Rix, G.J., Lai, C.G., & Foti, S. (2001). Simultaneous measurement of surface wave dispersion and attenuation curves. *Geotechnical Testing Journal*, 24, 350–358.
- Sanchez-Salinero, I., Roesset, J.M., Shao, K.Y., Stokoe II, K.H., & Rix, G.J. (1987). Analytical evaluation of variables affecting surface wave testing of pavements. *Transportation Research*, 1136, 86–95.
- Satoh, T., Kawase, H., & Matsushima, S. (2001). Difference between site characteristics obtained from microtremors, S-wave, P-wave, and codas, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 91, 313–334.
- Schaffer, J.D., Caruana, R.A., Eshelman, L.J., & Das, R. (1989). A study of control parameters affecting online performance of genetic algorithms for function optimization. In: Schaffer, J.D. (Ed.), *Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms*. Morgan Kaufmann, 51–60.
- Sinriech, D. ve Samakh, E. (1999). A Genetic Approach to the Pickup/Delivery Station Location Problem in Segmented Flow Based Material Handling Systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 2, 81–99.

- Sheriff, R.E. (1991). Encyclopedic dictionary of exploration geophysics. third edition, *Society of Exploration Geophysicists*, 376.
- Sheu, J.C., Stokoe II, K. H., & Roesset, J. M. (1988). Effect of reflected waves in SASW testing of pavements. *Transportation Research*, 1196, 51–61.
- Steeple, D.W., & Miller, R.D. (1990). Seismic-reflection methods applied to engineering, environmental, and groundwater problems. *The Society of Exploration Geophysicists*, 5, 1–30.
- Stokoe II, K.H., & Nazarian, S. (1983). Effectiveness of ground improvement from spectral analysis of surface waves. Helsinki, Finland: *Proceeding of the eighth European conference on soil mechanics and foundation engineering*.
- Stokoe II, K.H., Rix, G.J., & Nazarian, S. (1989). In situ seismic testing with surface wave. *Proceeding of 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio de Janeiro, 331–334.
- Stokoe, K.H., II, Wright, G.W., James, A.B., & Jose, M.R. (1994). *Characterization of geotechnical sites by SASW method in Geophysical Characterization of Sites*, Edited R. D. Woods, New Hampshire: International Science Publisher, 785–816.
- Stork, C., & Kusuma, T. (1992). Hybrid genetic autostatics: new approach for large-amplitude statics with noisy data, in *Proc. of the 62nd SEG Meeting, Society of Exploratory Geophysics*, Tulsa, 1127–1131.
- Supranata, Y.E. (2006). *Improving the uniqueness of shear wave velocity profiles derived from the inversion of multiple-mode surface wave dispersion data*. Ph.D.Dissertation, The University of Kentucky, 147.
- Şengör, A.M.C. (1982). Egenin neotektoniğini yöneten etkenler: In: Batı Anadolunun Genç Tektoniği ve Volkanizması (Erol, O., Öygür, V. -eds.), *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 59-71.

- Thompson, W.T. (1950). Transmission of elastic waves through a stratified solid medium. *Journal of Applied Physics*, 21, 89–93.
- Tokimatsu, K. (1995). Geotechnical site characterization using surface waves. *Proceedings, 1st International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, IS-Tokyo '95*, Balkema, Rotterdam, 1333–1368.
- Turner, G. 1990. Aliasing in the tau–p transform and the removal of spatially aliased coherent noise, *Geophysics*, 55, 1496– 1503.
- Varlı, A. (2007). *Çok amaçlı ve çok konumlu aktarmalı taşıma problemlerinin Genetik Algoritma ile optimizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 123, İstanbul.
- Whitley, D. (1989). The Genitor algorithm and selection pressure: Why rank-based allocation of reproductive trials is best, *In Proceedings of Third International Conference on Genetic Algorithms*, Morgan Kaufmann, 116–121.
- Wolf, J.P. (1985). *Dynamic soil-structure interaction*, New Jersey: Prentice Hall.
- Wurtz, F., Richomme, M., Bigeon, J., & Sabonnadiere, J.C. (1997). A Few Results for Using genetic algorithms in Design of Electrical Machines. *IEEE Transactions on Magnetics*, 33.
- Xia, J., Miller, R.D., & Park, C.B. (1999). Estimation of near-surface shear wave velocity by inversion of Rayleigh waves. *Geophysics*, 64, 691–700.
- Xia, J., Miller, R.D., & Park, C.B. (2000). Advantages of calculating shear-wave velocity from surface waves with higher modes. *The Society of Exploration Geophysicists*, Expanded Abstracts, 1295–1298.
- Xia, Y., Tong, H. & Li, W. K. (2002). Single-index volatility models and estimation. *Statistica Sinica*, 12, 785–799.
- Yeniay, Ö. (2001). An Overview of Genetic Algorithms. *Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 1, 37–49.



- Yeo, M.F. & Agyel, E.O. (1996). Optimising Engineering Problems Using Genetic Algorithms. *Engineering Computations*, 2, 268–280.
- Yoon, S. (2005). *Array-based measurements of surface wave dispersion and attenuation using frequency-wavenumber analysis*. Ph.D.Dissertation, Georgia Institute of Technology, Atlanta.
- Yuan, D., & Nazarian, S. (1998). Automated surface wave method: Inversion technique. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 119(7), 1112–1126.
- Zhang, S.X., Chan, L.S., Chen, C.Y., Dai, F.C., Shen, X.K., & Zhong, H. (2003). Apparent phase velocities and fundamental-mode phase velocities of Rayleigh waves. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23, 563–569.