# <u>İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ</u>

## MUDARLI-GEBZE-ORHANELİ SİSMİK KIRILMA/GENİŞ AÇILI YANSIMA VERİLERİNİN SİSMİK TOMOGRAFİ YÖNTEMİYLE DEĞERLENDİRİLMESİ

## YÜKSEK LİSANS TEZİ Müh. Adil TARANCIOĞLU 505001509

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 11 Ağustos 2004Tezin Savunulduğu Tarih: 20 Mayıs 2004

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Abdullah KARAMAN

Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Aysun Güney (İ.T.Ü)

Doç. Dr. Serdar Özalaybey (TÜBİTAK)

**AĞUSTOS 2004** 

## ÖNSÖZ

Çalışmam sırasında yol gösterici ve yönlendirici değerli tavsiyeleri için tez danışmanım Doç. Dr. Abdullah Karaman'a, tez çalışmam sırasında kullanmış olduğum verinin olanağını ve mesleki hayatımdaki birçok bilgiyi edinmemi sağlayan Doç. Dr. Serdar Özalaybey ve tüm TÜBİTAK-MAM-YDBAE çalışanlarına, verilerin toplanması sırasında ve mesleki yaşantımın başlamasında değerli emekleri olan Prof. Dr. Oğuz Selvi'ye ve kritik zamanlarda yapmış oldukları değerli yorumlar için, Doç. Dr. Hayrullah Karabulut, Doç. Dr. Argun Kocaoğlu ve Prof. Dr. Mustafa Aktar'a, tezimin son halini almasındaki katkılarından dolayı Yük. Müh. Rahşan Çakmak ve M. Cengiz Tapırdamaz'a, daima desteklerini hissettiğim ve minnettar olduğum aileme yürekten sevgilerimi sunarım.

Nisan, 2004

Adil TARANCIOĞLU

# İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	X
ÖZET	xi
SUMMARY	xii
1.GİRİŞ	1
1.1 Sismik Kırılma ve Geniş Açılı Yansıma Verilerinin Önemi	1
1.2 Türkiye'de Yapılan Önemli Çalışmalar	3
1.3 Calışma Alanının Jeolojisi ve Tektoniği	4
1.3.1 Mudarlı-Gebze Bölgesi Jeolojisi	4
1.3.2 Armutlu Yarımadası Jeolojisi	5
1.3.3 Uludağ ve Civarı	6
1.4 Sismik Kırılma / Genis Acılı Yansıma Verilerinde Kavdedilen Fazlar	8
2. SİSMİK VERİLERİN TOPLANMASI	10
2 1 Kavitcilarin Verlestirilmesi	10
2.2 Kullanılan Aletlerin Tanıtımı	11
2.2 1 Veri Aktarımı ve Zaman Hassasiyetlerinin Belirlenmesi	15
3 ÖN VERİ İSLEM ASAMALARI	17
3 1 Atis Grunlarinin Olusturulmasi	19
3 2 Varıs Zamanlarının Belirlenmesi	20
3 3 Belirsizliklerin Tavini	20
<b>4</b> IIVF3D (IOINT INTERFACE-VELOCITY ESTIMATION) VÖNTEMI	i 25
4. J Vöntem	26
4.1 1 Düz Cözüm	20
4.1.1 Duz Çozum	30
1 1 2 1 En Küçük Kareler (EKK) Vöntemi	30
4.1.2.7 Dirzenlenmis En Küçük Kareler (DEKK)Vöntemi	35
4.1.2.2 Duzemenning En Ruçuk Rafefer (DERR) Fontenni	30
1.2.5 Konjuge Gradyant Metodu (KON)	
4.2 1 Sontatik Testlerde Kullanılan Vaklasımlar	<u>+</u> 2 //5
5 VADAV VEDILEDLE MODELLEME	4J
5. 1 İki Tabakalı Madal İsin Taştlar	/ <b>+</b> /
5.2 Eliptik Vüzevlerin Tespitine Vönelik Testler	4/
5.2 Düğüm Naktaları Voğunluğu Tastlari	JI 51
5.5 Duguni Noktalan 1 ogunugu restleri	34
5.4 ÇOZUNUTUK VE GUTUNU TESHETI	39
O, WUUJAKLI-GEBZE-UKHANELI SISIMIK KIKILIMA/GENIŞ AÇILI Mansıma vedil edinin tede gözümü	"
YANSHVIA VEKILEKININ TEKS ÇUZUNU	00
/. SUNUÇLAK VE TAKTIŞMALAK	
KAYNAKLAK	80

KLER
------

# KISALTMALAR

KAF	: Kuzey Anadolu Fayı	
KAFZ	: Kuzey Anadolu Fay Zonu	
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu	
MAM	: Marmara Araştırma Merkezi	
YDBAE	: Yer ve Deniz Bilimleri Araştırma Enstitüsü	
KRDAE	: Kandilli Rasathanesi Deprem Araştırma Enstitüsü	
EGT	: Avrupa Jeotravers Projesi	
EUROPROBE	E : The Tectonic Evolution of Europe from Ural Mountains to the Atlantic Ocean	
IRIS	: The Incorporated Research Institution Seismology	
PASSCAL	: The Program for Array Seismic Studies of the Continental	
	Lithosphere	
LARSE II	: Los Angeles Region Seismic Experiment-1999	
CELEBRATIO	N 2000	
	: Central European Lithospheric Experiment Based on Refraction 2000	
TPAO	: Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı	
MTA	: Maden Tetkik Arama	
GPS	: Global Positioning System (Küresel Konumlandırma Sistemi)	
GMT	: Greenwich Mean Time	
	: General Mapping Tool	
SEGY	: The Society of Exploration Geophysicists-Y	
SAC	: Seismic Analyse Code	
SU	: Seismic Unix	
JIVE3D	: Joint Interface Velocity Estimation (Arayüz Hız Kestirimi)	
OBS	: Ocean Bottom Seismometer (Deniz Tabanı Sismometresi)	
EKK	: En Küçük Kareler Yöntemi	
DEKK	: Düzenlenmiş En Küçük Kareler Yöntemi	
KGM	: Konjuge Gradyant Metodu	
BIY	: Başarılı Işın Yüzdesi	

# TABLO LÍSTESÍ

Tablo 2.1

Tablo 6.1

Tablo 6.2

Tablo A.1

Tablo A.2

Tablo A.3

	Sayfa No
Texan sismik kayıt sistemlerinin birim ve özellikleri	. 13
Mudarlı, Gebze, Orhangazi, Iğdır, Çaybaşı, Orhaneli	
patlatmalarına ait Pg, PmP ve Pn varışlarına ait okuma	
değerleri	66
Tüm patlatmalar için elde edilen hız bilgileri ve tabaka	
kalınlıkları	. 69
Patlatma noktalarının koordinatları, patlayıcı miktarları,	
patlatma derinlikleri ve patlayıcı tipleri	. 91

91

92

Patlatma zamanları.....

Alıcı noktalarının koordinatları.....

# ŞEKİL LİSTESİ

# <u>Sayfa No</u>

Şekil 1.1	: Armutlu Yarımadasının bölgesel hareketleri (Erendil ve diğ.,
Salel 1 2	1991)
Şekii 1.2	kabuk fazları (Kulhànek 1990)
Sekil 2-1	· Patlatma noktaları ve kavıtçıların verlerini gösterir tonoğrafik
ŞUKII 2.1	harita
Sekil 2.2	· Sismik kavıt sisteminin cevre donanımı jeofonun Texan ile
ŞUMI <b>212</b>	bağlantısı ve Texan kavıtcının üstten görünümü 14
Sekil 2.3	· Jeofonların frekans ve cekirdek direncleri arasındaki iliski
y •••••	(http://www.geospace.com)15
Sekil 3.1	: İndirgenmis Zaman (Reduced Time) ile cizilmis zaman -
3	uzaklik eğrileri
Şekil 3.2(a)	: Tüm Pg-Pn varışları için seyahat zamanı – uzaklık
	eğrileri
Şekil 3.2(b)	: Tüm PmP yansıma varışları için seyahat zamanı – uzaklık
	eğrileri
Şekil 3.3	: İlk varış ve olasılık sınırlarının belirlenmesi. Kırmızı kutular
	artan uzaklık ile standatr hatanın artışını göstermektedir24
Şekil 4.1	: İşın yolunun bozulması yönteminin homojen bir ortamda
	davranışı
Şekil 4.2	: Kaynaktan çıkan ışınlar ıçın $\theta$ çıkış açısı, n toplam ışın mıktarı
G 1 1 4 A	ve alıcının konumuna ait tolerans değerinin görünümü
Şekil 4.3	: lek tabakalı model için ters çözüm işlemlerini gösterir akış
	diagrami
Şekii 4.4	: Birkaç tabakalı modeller için ters çozum işlemlerini gösterir
Salvil 5 1	· Sontatik varia zamanlarının üratildiği madala ait hız darinlik
ŞEKII J.I	değişimi 48
Sekil 5-2	· Sentetik verilerin ters cözümünde kullanılan haslangıc modeli
Şekii 5.2	(Hızlar Sekil 5 1'dekinden farklı olarak 4 km/s'den 6 km/s'ye
	kadar değismektedir.)
Sekil 5.3	: Final modelinin ısın yolları ve hız yapısı
Şekil 5.4	: Şekil 5.3'te gösterilen A noktası için, gerçek model ve çözüme
,	ait hız- derinlik grafikleri
Şekil 5.5	: Eğimli arayüzeye ait modeli
Şekil 5.6	: Eğimli arayüz problemi için final modelin hız yapısı ve ışın
	yolları
Şekil 5.7	: Sentetik verilerin oluşturulduğu eliptik arayüzey yer modeli 51
Şekil 5.8	: 1., 6., 18. ve 22. iterasyonların sonuçları ve herbir sonuç için $V^2$ il DIV 1.2. iterasyonların sonuçları ve herbir sonuç için
	A <sup>-</sup> IIe BIY degerleri. Final model 22. iterasyonda elde
	eanmıştır

düsayı bız kaşitlari	ktalarındaki
Salvil <b>5</b> 10 Vanay yang zamanlaring üratilagači biz modeli	
Sekil 5.10 . Tapay valiş zamamanının üretneceği niz modeli.	n ürətilməsi
şekii 5.11 . Mouchach auz çozani ne i g seyanat zamamanını	
Silasinda Kunannan Işin yonannın gösterinin	it ign vollari
Sekii 5.12 . 0x20 adet duguii noktasi ne elde editeli sonuca a	it işili yollalı
Soluil <b>5</b> 12	
<b>Sekii 5.15</b> : 22x20 adet dugum noktasi ne eide editen sonuca	alt işin yolları
	····· 3/
<b>Sekil 5.14</b> : 38x20 adet dugum noktasi ile elde edilen sonuca	ait işin yolları
Sekil 5.15 : 80x20 adet dugum noktasi ile elde edilen sonuca	ait işin yolları
ve hiz modeli	
<b>Şekil 5.16</b> : Veriler üzerine eklenen gürültünün uzaklığa bağl	1 değişimi 60
<b>Şekil 5.17</b> : Çözünürlük testlerinde kullanılacak olan 1, 2, 3 v	e 4 numaralı
modellere ait derinlik-hiz kesitleri	
<b>Şekil 5.18</b> : Bir numaralı modele ait işin yolları ve hesaplana:	n hız modelı 62
<b>Şekil 5.19</b> : İki numaralı modele ait ışın yolları ve hesaplanar	hız modeli 62
<b>Şekil 5.20</b> : Uç numaralı modele ait ışın yolları ve hesaplanar	n hız modeli 63
<b>Şekil 5.21</b> : Dört numaralı modele ait ışın yolları ve hesaplan	an hız modeli. 64
<b>Şekil 5.22</b> : Bir numaralı modelin daha iyi bir başlangıç mod	eli ile
çözümüne ait ışın yolları ve hesaplanan hız mode	li 65
Şekil 6.1 : Mudarlı – Gebze – Orhangazi – Iğdır – Çaybaşı -	- Orhaneli
profili boyunca topoğrafya	67
Şekil 6.2 : Tüm atışlar için kırılma verilerinden yorumlanmı	ş basit hız ve
derinlik bilgileri	
<b>Şekil 7.1</b> : Üst kabuk için elde edilen tomografik hız modeli	
<b>Şekil 7.2</b> : (a) Veriye ait (yeşil), ve final modelden elde edil	en (kırmızı)
ilk varışların 8 km/s indirgeme zamanı ile gösteri	mi; (b) Final
model için elde edilen ışın yolları	71
<b>Şekil 7.3</b> : (a) Mudarlı-Gebze-Orhaneli profilini ve 2001 yıl	ında yapılan
SEISMARMARA çalışmasını (Karabulut ve diğ.	, 2003)
gösterir harita. (b) Uludağ ve civarının detay jeol	ojisi ile
bölgeye denk gelen istasyon dağılımı (kırmızı no	ktalar) (Ketin,
1984'den derlenmistir); (c) İzmit körfezi ile Ulud	ağ arası
3 // ( )	
detaylı jeolojisi ve bölgeye düşen istasyon (kırmı	zı noktalar)
detaylı jeolojisi ve bölgeye düşen istasyon (kırmı dağılımı (Yılmaz, 1990'dan derlenmiştir)	zı noktalar)
<ul> <li>detaylı jeolojisi ve bölgeye düşen istasyon (kırmı dağılımı (Yılmaz, 1990'dan derlenmiştir)</li> <li>Şekil 7.4 : SEISMARMARA verilerinin tomografik ters çöz</li> </ul>	zı noktalar) 
<ul> <li>detaylı jeolojisi ve bölgeye düşen istasyon (kırmı dağılımı (Yılmaz, 1990'dan derlenmiştir)</li> <li>Şekil 7.4 : SEISMARMARA verilerinin tomografik ters çöz ve Mudarlı – Orhaneli Sismik Kırılma/Geniş Açı</li> </ul>	zı noktalar) 
<ul> <li>detaylı jeolojisi ve bölgeye düşen istasyon (kırmı dağılımı (Yılmaz, 1990'dan derlenmiştir)</li> <li>Şekil 7.4 : SEISMARMARA verilerinin tomografik ters çöz ve Mudarlı – Orhaneli Sismik Kırılma/Geniş Açı profili verilerinden elde edilen seyahat zamanı ter</li> </ul>	zı noktalar) 
<ul> <li>detaylı jeolojisi ve bölgeye düşen istasyon (kırmı dağılımı (Yılmaz, 1990'dan derlenmiştir)</li> <li>Şekil 7.4 : SEISMARMARA verilerinin tomografik ters çöz ve Mudarlı – Orhaneli Sismik Kırılma/Geniş Açı profili verilerinden elde edilen seyahat zamanı ter sonuçları (Benzer yapıların geçildiği alanlar kesil</li> </ul>	zı noktalar) 
<ul> <li>detaylı jeolojisi ve bölgeye düşen istasyon (kırmı dağılımı (Yılmaz, 1990'dan derlenmiştir)</li> <li>Şekil 7.4 : SEISMARMARA verilerinin tomografik ters çöz ve Mudarlı – Orhaneli Sismik Kırılma/Geniş Açı profili verilerinden elde edilen seyahat zamanı ter sonuçları (Benzer yapıların geçildiği alanlar kesil sınırlandırılmıştır.)</li> </ul>	zı noktalar) züm sonuçları lı Yansıma rs çözüm kli çizgilerle 
<ul> <li>detaylı jeolojisi ve bölgeye düşen istasyon (kırmı dağılımı (Yılmaz, 1990'dan derlenmiştir)</li> <li>Şekil 7.4 : SEISMARMARA verilerinin tomografik ters çöz ve Mudarlı – Orhaneli Sismik Kırılma/Geniş Açı profili verilerinden elde edilen seyahat zamanı tersonuçları (Benzer yapıların geçildiği alanlar kesil sınırlandırılmıştır.)</li></ul>	zı noktalar) züm sonuçları lı Yansıma rs çözüm kli çizgilerle 
<ul> <li>detaylı jeolojisi ve bölgeye düşen istasyon (kırmı dağılımı (Yılmaz, 1990'dan derlenmiştir)</li> <li>Şekil 7.4 : SEISMARMARA verilerinin tomografik ters çöz ve Mudarlı – Orhaneli Sismik Kırılma/Geniş Açı profili verilerinden elde edilen seyahat zamanı ter sonuçları (Benzer yapıların geçildiği alanlar kesil sınırlandırılmıştır.)</li></ul>	zı noktalar) züm sonuçları lı Yansıma rs çözüm kli çizgilerle 
<ul> <li>detaylı jeolojisi ve bölgeye düşen istasyon (kırmı dağılımı (Yılmaz, 1990'dan derlenmiştir)</li> <li>Şekil 7.4 : SEISMARMARA verilerinin tomografik ters çöz ve Mudarlı – Orhaneli Sismik Kırılma/Geniş Açı profili verilerinden elde edilen seyahat zamanı tersonuçları (Benzer yapıların geçildiği alanlar kesil sınırlandırılmıştır.)</li></ul>	zı noktalar) züm sonuçları lı Yansıma rs çözüm kli çizgilerle 
<ul> <li>detaylı jeolojisi ve bölgeye düşen istasyon (kırmı dağılımı (Yılmaz, 1990'dan derlenmiştir)</li> <li>Şekil 7.4 : SEISMARMARA verilerinin tomografik ters çöz ve Mudarlı – Orhaneli Sismik Kırılma/Geniş Açı profili verilerinden elde edilen seyahat zamanı ters sonuçları (Benzer yapıların geçildiği alanlar kesil sınırlandırılmıştır.)</li></ul>	zı noktalar) zu noktalar) züm sonuçları lı Yansıma rs çözüm kli çizgilerle 
<ul> <li>detaylı jeolojisi ve bölgeye düşen istasyon (kırmı dağılımı (Yılmaz, 1990'dan derlenmiştir)</li></ul>	zı noktalar) zı noktalar) züm sonuçları lı Yansıma rs çözüm kli çizgilerle 
<ul> <li>detaylı jeolojisi ve bölgeye düşen istasyon (kırmı dağılımı (Yılmaz, 1990'dan derlenmiştir)</li> <li>Şekil 7.4 : SEISMARMARA verilerinin tomografik ters çöz ve Mudarlı – Orhaneli Sismik Kırılma/Geniş Açı profili verilerinden elde edilen seyahat zamanı tersonuçları (Benzer yapıların geçildiği alanlar kesil sınırlandırılmıştır.)</li></ul>	zı noktalar) züm sonuçları lı Yansıma rs çözüm kli çizgilerle 
<ul> <li>detaylı jeolojisi ve bölgeye düşen istasyon (kırmı dağılımı (Yılmaz, 1990'dan derlenmiştir)</li> <li>Şekil 7.4 : SEISMARMARA verilerinin tomografik ters çöz ve Mudarlı – Orhaneli Sismik Kırılma/Geniş Açı profili verilerinden elde edilen seyahat zamanı ters sonuçları (Benzer yapıların geçildiği alanlar kesil sınırlandırılmıştır.)</li></ul>	zı noktalar) züm sonuçları lı Yansıma rs çözüm kli çizgilerle 

	kullanılan varışlar için ışın yolları; (d) final modeli	78
Şekil A.1	: Mudarlı Patlatmasının tüm kayıtçılardaki sıralı görünümü	
	(Varışların belirginleşmesi için 2-18 Hz bant geçirimli filtre	
	kullanılmıştır.)	. 85
Şekil A.2	: Gebze Patlatmasının tüm kayıtçılardaki sıralı görünümü	
	(Varışların belirginleşmesi için 2-18 Hz bant geçirimli filtre	
	kullanılmıştır.)	. 86
Şekil A.3	: Orhangazi Patlatmasının tüm kayıtçılardaki sıralı görünümü	
	(Varışların belirginleşmesi için 2-18 Hz bant geçirimli filtre	
	kullanılmıştır.)	. 87
Şekil A.4	: Iğdır Patlatmasının tüm kayıtçılardaki sıralı görünümü	
	(Varışların belirginleşmesi için 2-18 Hz bant geçirimli filtre	
	kullanılmıştır.)	. 88
Şekil A.5	: Çaybaşı Patlatmasının tüm kayıtçılardaki sıralı görünümü	
-	(Varışların belirginleşmesi için 2-18 Hz bant geçirimli filtre	
	kullanılmıştır.)	. 89
Şekil A.6	: Orhaneli Patlatmasının tüm kayıtçılardaki sıralı görünümü	
2	(Varışların belirginleşmesi için 2-18 Hz bant geçirimli filtre	
	kullanılmıştır.)	. 90

# SEMBOL LÍSTESÍ

Pn	: Kabukta oluşup Moho süreksizliğinden geçerek yüzeye ulaşan P- dalgası fazı
Pg	: Üst kabukta seyahat eden P-dalgası fazı
Sg	: Üst kabukta seyahat eden S-dalgası fazı
PmP	: Kabukta oluşup Moho sınırından yansıyarak yüzeye ulaşan P-dalgası fazı
σ	: Standart sapma
m	: Model parametreleri
$\chi^{2}$	: chi-square
$\mathbf{V}_i$	: Tabaka hızları
Ti	: Kesiş zamanı
Η	: Tabaka kalınlığı

## MUDARLI-GEBZE-ORHANELİ SİSMİK KIRILMA/GENİŞ AÇILI YANSIMA VERİLERİNİN SİSMİK TOMOGRAFİ YÖNTEMİYLE DEĞERLENDİRİLMESİ

#### ÖZET

Marmara Bölgesi'nin doğusuna ait kabuk yapısı Mudarlı-Gebze-Orhaneli doğrultusu boyunca toplanan kırılma/geniş açılı yansıma verilerinin modellenmesi ve ters çözümü ile elde edilmiştir. 2000 yılında toplanan verilerin kullanıldığı bu çalışmada Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun kuzey ve güney kolları geçilerek toplam 160 km'lik profil boyunca veri toplanmıştır. Altı farklı noktada yapılan patlatma ile oluşturulan sinyaller, TÜBİTAK-MAM-YDBAE tarafından sağlanan 80 adet Reftek-125 (Texan) kayıtçı ve 4.5 Hz jeofonun profil boyunca yerleştirilmesi ile kaydedilmiştir. Ortalama kayıtçı aralığı 1.9 km'dir. Veri setinden 342 adet Pg, 118 PmP ve 8 Pn varışı belirlenmiştir. Kabuk ile moho süreksizliği arasındaki yapılar, JIVE3D (Joint Interface Velocity Estimation) programında düz ve ters çözüm işlemlerinin ardışık olarak uygulanmasına dayanan yöntem kullanılarak belirlenmiştir. Yöntemin yeteneklerinin anlaşılması için birçok farklı testler yapılmış ve sonuçları irdelenmiştir. Üst kabuk yapısının güvenilir bir şekilde elde edilebilmesi için birçok farklı başlangıç modeli denenerek Pg zamanlarının ters çözümü yapılmıştır. Ters çözüm sonuçları bölgede ilk 10 km'lik yapı için 3.9 km/s ile 6.4 km/s arasında değisen hız yapılarının varlığını göstermiştir. İzmit körfezi ve Bursa baseni en düsük hızlı yapılar (3.9 km/s – 4.5 km/s) olarak göze çarparken, Armutlu yarımadası ve Uludağ bölgedeki en hızlı yapıları temsil etmektedirler. Ters çözümün ikinci kısmında alt kabuk yapılarının çözümü için PmP ve Pn fazları kullanılmıştır. Bu sayede, önceden belirlenen üst kabuk sabitlenerek Moho arayüzünün geometrisi belirlenmeye çalışılmış ve Pg , PmP ve Pn fazlarının birarada kullanılması ile yatayda 4 km, düşeyde 2 km aralıklı düğüm noktalarından oluşan model için komple kabuk hız yapısı belirlenmiştir. Sonuçta profil boyunca güneyden kuzeye doğru dalımlı ve Armutlu yarımadasının güney sınırına kadar devamlılık gösteren hızlı bir yapı elde edilmiştir.

# INTERPRETATION OF MUDARLI-GEBZE-ORHANELİ SEISMIC REFRACTION/WIDE ANGLE REFLECTION DATA USING SEISMIC REFRACTION TOMOGRAPHY

#### SUMMARY

The crustal structure of the eastern Marmara Region has been obtained by modeling and inversion of wide-angle seismic reflection/refraction data acquired through Mudarlı-Gebze-Orhaneli profile. A 160-km long profile, traversing seismically active northern and southern branches of the North Anatolian Fault System was acquired in the year of 2000. Six in-line seismic shots were recorded along this profile with 80 Reftek-125 (Texan) recorders and 4.5 Hz geophones supplied by TÜBİTAK-MRC-EMSRI. Average receiver spacing was determined to be about 1.9 km. Travel-time data set consisting of 342 Pg, 118 PmP and 8 Pn phases were clearly observed from the six shot gathers. The JIVE3D (Joint Interface Velocity Estimation) forward and inverse modeling technique was used to determine the structure of the crust to the depth of Moho discontinuity. Several synthetic caseses were examined to determine the capability and the limitations of the program. Inversion of Pg travel times using several different initial models have been carried out to constrain the upper-crust velocities. The inversion results show that velocities the to a depth of 10 km range from 3.9 to 6.4 km/s. Lower velocities (i.e. 3.9-4.5 km/s) were estimated beneath İzmit Bay and Bursa low-plains while higher velocities (i.e. 6.4 km/s) are found beneath Armutlu Peninsula and the Uludağ. The second phase of the modeling was to obtain the geometry of the moho interface along with lower crust velocities with fixed upper crust velocities as determined earlier. Lateral and vertical grid spacings of 4 km and 2 km respectively were used in this joint inverse model that took into consideration the Pg, PmP and Pn arrivals. The tomographic image indicates a high velocity zone dipping toward the north. This high velocity zone disappears near the southern border of Armutlu Peninsula.

# 1.GİRİŞ

#### 1.1 Sismik Kırılma ve Geniş Açılı Yansıma Verilerinin Önemi

Marmara Bölgesi, özelikle 1999 yılında meydana gelen ve büyük zararlara sebep olan iki büyük deprem (17 Ağustos-İzmit ve 12 Kasım-Düzce depremleri) sonrasında birçok ülkenin bilim adamlarınca birinci dereceden incelenen bölge konumuna gelmiş, böylece geçen kısa süre içersinde dünyadaki en çok çalışılan bölgelerden birisi olmuştur. Yapılan çalışmalarının temelinde Kuzey Anadolu Fayı'nın (KAF) depremselliğinin ve Marmara bölgesindeki dağılımının tespiti öncelikli çalışmalar olarak göze çarpmaktadır. Bu nedenle bölgede yüksek çözünürlüklü çalışmaların gerçekleştirilmesi amacı ile Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu-Marmara Araştırma Merkezi-Yer ve Deniz Bilimleri Araştırma Enstitüsü (TÜBİTAK-MAM-YDBAE), Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi Deprem Araştırma Enstitüsü (KRDAE) gibi kurum ve kuruluşlar tarafından, kalıcı ve geçici istasyonlardan oluşan deprem kayıtçı ağları da oluşturulmuştur. Bu kayıtçılar sayesinde, bölgede meydana gelen depremlerin verlerinin en küçük hata ile belirlenebilmekte ve fay hareketlerinin yorumlanması daha doğru mümkün olmaktadır. Tüm bu çalışmaların gerçekleştirilmesinde, kullanılan kabuk hız yapısının doğruluk derecesi oldukça önemlidir.

Kabuk çalışmalarında hedef, kabuk hız yapısı ve tektonik yapılarla olan ilişkileri, Moho derinliği ve geometrisinin kestirimi şeklindeki temel bilgilerin edinilmesidir. Bahsedilen genel amaçlar doğrultusunda Doğu Marmara Bölgesi'nde kuzey-güney yönelimli Mudarlı-Gebze-Orhaneli hattında bir sismik kırılma / geniş-açılı yansıma profili oluşturulmuş ve veri toplanmıştır. Bu şekilde profil boyunca sismik hızların tayin edilmesi, kırılmış ve/veya yansımış dalgalarla moho sınırının ve alt kabuk ile ilgili sınırlı hız bilgilerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu bilgiler ışığında bölgedeki birçok karmaşık jeolojik yapının (Armutlu yarımadası, Uludağ, Sakarya kıtası, v.s) sonuçlar çerçevesinde tartışılması da diğer beklenen sonuçlardır. Kabuğun hız yapısının belirlenmesi için yapılan çalışmalara bakıldığında sismik kırılma yönteminin önemli bir yer tuttuğu görülmektedir. Çeşitli ülkelerde sürdürülen kabuk çalışmaları ile ilgili programlarda sismik çalışmalar ağırlıklı olarak yer almaktadır. 1980'li yıllarda Avrupa Jeotravers Projesi-EGT programında olduğu gibi, 1990'lı yıllarda EUROPROBE programı kapsamında gerçekleştirilen projelerde sismik kırılma, sismik yansıma ile önemli bir yer tutmuştur (Blundell, 1999; Pharaoh, 1999).

Almanya'da, GeoForschungs Zentrum-Postdam ve Danimarka'da, University of Copenhagen, kabuk calısmaları anlamında Avrupa'da modern sismik kayıt sistemi ve alet parkı bakımından önemli iki merkez konumundadırlar. Amerika Birleşik Devletleri (ABD)'nde ise kabuk dahil olmak üzere tüm sismolojik calısmaların gerektirdiği modern sayısal sismik kayıtçı sistemleri belirli merkezlerde toplanmıştır. Bunun için 1984 yılında 26 üniversitenin katılımı ile The Incorporated Research Institution Seismology (IRIS) konsorsiyomu kurulmuştur. Böylece IRIS, aletsel altyapıyı belli merkezlerde toplamanın yanısıra bunların kullanılmasıyla ilgili olarak bilgisayar yazılımları için de gerekli standartları oluşturmuştur. IRIS'in aletsel altyapısının toplandığı birim The Program for Array Seismic Studies of the Continental Lithosphere (PASSCAL) olarak adlandırılmaktadır. IRIS/PASSCAL, Lamont Doherty Earth Observatory ve Stanford University'nin içinde bulunduğu iki kayıtçı merkezinden oluşmaktadır. Bunlardan ilki pasif kaynaklı sismoloji için kayıtçı sistemleri sağlarken, ikincisi yani Stanford Universitesi ise aktif kaynaklı sismoloji olarak adlandırılan kabuk çalışmalarına dönük sismik kayıtçı sağlayan merkez konumundadır.

Bu gelişmeler ışığında dünyada kabuğa yönelik yapılan sismik çalışmalar, giderek büyüyen bir uluslararası işbirliği çerçevesinde gerçekleşmektedir. Son dönemde yapılan çalışmalara örnek olarak LARSE II (Los Angeles Region Seismic Experiment-1999) projesi buna çarpıcı bir örnektir (Lutter ve diğ., 2000, Ryberg ve diğ., 2000). Ayrıca CELEBRATION 2000 (Central Europe Lithospheric Experiment Based on Refraction 2000) projesinde, Avrupa'nın en büyük sismik çalışması gerçekleştirilerek litosferik yapıların anlaşılmasına çalışılmıştır (Guterch ve diğ., 2000, Guterch ve diğ., 2001). Çalışma, Polonya, Çek Cumhuriyeti, Slovakya, Macaristan, Avusturya, Almanya ve Rusya'yı kapsamıştır. 200 kg'dan 10 ton'a kadar

değişen miktarlarda patllayıcılarla kaynaklar üretilerek litosferik amaçlı veriler toplanmıştır.

## 1.2 Türkiye'de Yapılan Önemli Çalışmalar

Türkiye'de sismik kaynak kullanılarak yapılan kabuk çalışmalarına genel olarak bakıldığında 1986 yılında "Türkiye Birinci Jeotravers Projesi" adıyla başlatılan girişim kapsamında Tuz Gölü havzasında vibrosismik yansıma çalışmasının gerçekleştirildiği görülmektedir. Bu çalışma sırasında toplanan verilerle kabuğa yönelik bazı özellikler saptanabilmiştir (Çoruh ve diğ.,1990). Yine aynı havzada, TPAO tarafından derlenmiş sismik verilerden sığ derinliklere ait hız bilgisi hesaplanmıştır (Gürbüz ve Evans, 1991).

Marmara bölgesi ve çevresinin hız yapısının anlaşılması için yapılan bazı sismik ve sismolojik kaynaklı çalışmalar da bulunmaktadır. Kabuk yapısının ve hız değişintilerinin incelenmesi bu çalışmalarda çoğunlukla P varışları ve kısmen S varışlarının yardımı ile yapılmıştır. Crampin ve Üçer (1975) çalışmalarında Marmara Denizine ait hız yapısını belirlemeye çalışmışlardır. Toplamda 35 kayıtçı ile algılanan 4 farklı depremin oluşturduğu veri grubu ile çalışmalar yapılmıştır. Bu calışmalar sonunda sırasıyla üst kabuk, alt kabuk ve üst manto hızları 5.8-6.0 km/s, 6.1 km/s, 8.1 km/s olarak saptanmıştır. Gürbüz ve Ücer (1985), kontrollü kaynaklarla Marmara bölgesi civarındaki kayıtlarla P dalgalarının ilk varışlarını değerlendirerek bölgenin hız yapısını belirlemeye çalışmış ve 5.8-6.0 km/s ve 6.1 km/s'lik üst ve alt kabuk hızları ile 8.1 km/s'lik üst manto hızları belirlemişlerdir. Bekler ve diğ. (1997) deprem kayıtlarını değerlendirerek, Bursa civarı için 4-5, 10-13 ve 14-15 km kalınlıklı üç tabakalı kabuk modeli önermişlerdir. Bölge için hesaplanan P dalgası hızları kabuk için 4.5-5, 5.8-6.0, 6.1-6.4 km/s, üst manto için ise 7.8 km/s şeklindedir. Diğer bir uygulama ise, Akyazı-Taraklı Profili üzerinde yapılan bir test çalışması olup, daha sonraki çalışmalara yol gösterir niteliktedir (Yalçın ve diğ., 1997). İncelenen alan bakımından en önemli çalışmalardan bir tanesi ise, 1999 yılında TÜBİTAK-MAM, YDBAE tarafından 4 noktada kontrollü kaynak (sismik dinamit) patlatılarak, bir profil boyunca bu verilerin değerlendirilmesi ile elde edilmiştir. Sonuçta, alt kabuk için hız 6.8 km/s ve Moho derinliği 34.5 km olarak elde edilmiştir. Bunlardan başka kırılma verisi toplanması amacıyla Frankfurt Üniversitesi Jeofizik Enstitüsü ile Bayındırlık Bakanlığı Deprem Araştırma Dairesi

işbirliğiyle İzmit-Abant, Karasu-Yenipazar doğrultularında çalışmalar yapılmıştır. Sismik kayıtçılar Frankfurt Üniversitesi, sismik kaynak ise TPAO tarafından karşılanarak veri toplanmıştır (Karahan ve diğ., 2001). Son dönemde yapılan ve kabuk kalınlığını hedefleyen önemli çalışmalardan birinde ise alıcı fonksiyonlarının (receiver function) grid tarama modellemesi kullanılarak Doğu Marmara Bölgesi'nin kabuk yapısı belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışma sırasında 12 adet geniş bantlı deprem istasyonu ile büyük manyitütlü depremler incelenmiş ve bölgeyi örnekleyen bu istasyonların genelinde 29-32 km'lik bir aralığı içeren kabuk kalınlığı elde edilmiştir (Zor, 2002). 17 Ağustos 1999 depreminin ve sonrasındaki 6 ay süreli zaman dilimi için toplanan ve değerlendirilen sismolojik veriler için, İzmit Körfezi ve civarında yüzeyde 2.90 km/s, 1 km'de 5.70 km/s, 6 km'de 6.10 km/s, 20 km'de 6.80 km/s ve 33 km'de 8.05 km/s'lik hızlar 15'ten fazla istasyonda okuması yapılan 300 artçı deprem için, en küçük rms (root mean square) ve istasyon gecikmesini verecek sekilde seçilmiştir (Özalaybey ve diğ., 2002). Bu tür çalışmalara ışık tutacak nitelikteki en önemli çalışmalardan bir diğeri ise, 2000 yılında İzmit ve Gemlik körfezinde air-gun ile üretilen kaynakların Şile-Gemlik arasında 120 km uzunluğundaki profilde 82 sismik kayıtçı ile elde edilen iki boyutlu tomografik ters çözüm sonuçlarıdır (Karabulut ve diğ., 2003).

#### 1.3 Çalışma Alanının Jeolojisi ve Tektoniği

Çalışma alanı jeolojik ve tektonik olarak birçok farklılıklara sahip birimleri birarada bulundurmaktadır. KAF'ın kuzey ve güney kolları, Armutlu Yarımadası, Uludağ ve Sakarya Kıtası bölgenin önemli yapılarıdır. Bu sebeple çalışma alanını Mudarlı–Gebze, Armutlu Yarımadası ve Uludağ ve çevresinden oluşan üç ana başlıkta incelemek doğru olacaktır.

#### 1.3.1 Mudarlı-Gebze Bölgesi Jeolojisi

Çalışma alanı ve yakın cevresinde genç birimler sadece vadi tabanlarında ve topografyanın düşük olduğu küçük alanlarda görülmektedir. Bölgede hakim kayaçlar paleozoik yaşlıdır. İstanbul Boğazı'nın batısında, istifin en altında yer alan Kurtköy formasyonu (Arkoz) ile onun üzerinde yer alan Aydos formasyonu (arkoz-kuvarsit) yüzeylenmemişdir. Bu iki formasyon hariç, paleozoik istifin diğer tüm birimleri (Ayazma formasyonu, Gözdağı formasyonu, Dolayoba Kireçtaşı, İstinye formasyonu, Kartal formasyonu, Büyükada formasyonu, Baltalimanı formasyonu, Trakya formasyonu) boğazın her iki yakasında da görüldüğü belirtilmiştir (Yurtsever, 1996) ve genel olarak altdan üste doğru birbirleri ile geçişli devamlı bir istif olduğu kabul edilmiştir. Bu sürekli istifin içerisinde elde edilen fosiller ve stratigrafik ilişkilendirmeler ile yapılan yaşlandırma sonucu istifin yaşının Triyas olduğu belirlenmiştir (Kaya ve Lys, 1981). Aşınmaya karşı dayanımlı olması nedeni ile çalışma alanı çevresinde görülen önemli yükseltilerin hepsi Aydos formasyonu (kuvarsit) tarafından oluşturulmuşlardır (Örneğin, Gaziler tepe, Beylikdağ, Mudarlı tepe, Çataldağ ve Çenedağ). Çalışma alanı yakınındaki en belirgin tektonik yapı ise Kuzey Anadolu Fay Zonu'dur (KAFZ). Bunun dışında çalışma alanı yakınında veya yakın çevresinde belirgin bir tektonik yapı görülmemektedir. Aslında çok çalışılmış gibi görünen İstanbul bölgesinin jeolojik, jeomorfolojik ve tektonik yönden veriye dayalı olarak çalışılmadığı, konuyla ilgili yayınlar tarandığında anlaşılmaktadır.

### 1.3.2 Armutlu Yarımadası Jeolojisi

Armutlu Yarımadası, Marmara Denizi'ne doğru doğu-batı uzanımlı bir çıkıntı oluşturur; birisi kuzeyde İzmit Körfezi-Sapanca Gölü hattı, diğeri güneyde Gemlik körfezi İznik gölü-Pamukova hattı olmak üzere iki önemli çizgisel çöküntü tarafından sınırlanmıştır. Şengör ve Yılmaz (1981) İntra-Pontid okyanusunun erken Jura'da açılmaya başladığını ve Paleosen-Lütesiyen'de kapandığını belirtir. Armutlu Yarımadası aynı zamanda KAFZ'nun batı bölümünde yer alır. Bu bölümde fay birkaç kola ayrılır. Bu kollar bir dizi çöküntüyle belli olur ve dolayısıyla zor izlenir. Kuzey kol İzmit Körfezi-Sapanca Gölü-Adapazarı ovası ile belirgindir ve Armutlu Yarımadasının kuzey sınırı oluşturur. Orta kol Gemlik körfezi-İznik Gölü-Pamukova ovası ile belirgindir ve yarımadayı güneyden sınırlar. Güney kol Mudurnu ve Bursa'dan geçen daha güney bir hattı izler.

Armutlu Yarımadası, deformasyon örneği değişikliklerine göre üç geniş bölüme ayırtedilebilir (Şekil 1.1). Doğu kısım KD-GB uzanımlı yapılar gösterir. Bu yapısal özellik bu bölümde KB-GD yönünde bir sıkışmanın olduğunu işaret eder. İznik gölü çöküntüsü denilebilecek bir başka göze çarpan çöküntü KAF'nın orta koluna bitişik gelişir. Bu çöküntünün kuzey sınırı batı ve orta kısımları sınırlayan sağ yanal doğrultu atımlı fayın uzanımıyla oluşmuş olabilir. Böylece çöküntünün, İznik Gölü'nün doğusundan ve batısından normal faylarla sınırlanmış olarak, bir pull-apart karakter taşıdığı ortaya çıkmaktadır. İki doğrultu atımlı fay arasında yer alan batı kısım saatin tersi yönünde bir ilave rotasyonal hareketle batıya doğru kaçar.



Şekil 1.1 Armutlu Yarımadasının bölgesel hareketleri (Erendil ve diğ., 1991).

Bu ana doğrultu atımlı faylar yarımada içinde iki ana bloklu kısımları içine alır. Armutlu Yarımadasının tektoniği, özelliğini bu blokların hareketleriyle kazanmıştır. Bölgenin başlıca özellikleri KAF'nın sağ yanal hareketinin sonuçları olarak açıklanabilir. Yarımadayı sınırlayan çizgisel çöküntü zonları, daha önce Şengör (1979) tarafından gösterildiği ve İzmit körfezinde bulunan normal faylarla belirgin olduğu gibi, genişleme şekilleri olarak görülür. İzmit Körfezi boyunca KAF'nın sürekliliğini incelemek için MTA Sismik-1 Gemisi tarafından bölgede sığ kıyı ötesi sismik ölçme uygulaması yapılmıştır. (Özhan ve diğ., 1985) 13 profil boyunca toplam 260 km uzunluğunda profiller kaydedilmiştir. Bu sismik ölçme sonuçlarına dayanılarak İzmit körfezinde iki graben yapısı belirlenmiştir.

#### 1.3.3 Uludağ ve Civarı

Permiyen öncesi yaşlı Dereyörük grubuna ait kayaçlar kısmen metamorfizma geçirmişlerdir. Bu birim üstüne Permiyen transgressif olarak gelir. Olasılı Permiyen sonunda oluşmaya başlayan riftleşme olayı sonucunda bölge aktif bir blok faylanma olayına maruz kalmıştır. Bazik volkanizma, diyabaz ve radyolaritlerle girik grovak, çörtlü kireçtaşı, şelf karbonatları oluşmaya başlamıştır. Temel üzerindeki Permiyen yaşlı kireçtaşları faylanmalar neticesi volkanik ve sedimanter birimler içinde blok olarak yerleşmişlerdir. Üst Triyas zamanında tektonik etkisi kaybolup durgunlaşma sonucu sığ deniz çökelleri oluşmuştur. Liyasta tüm Kuzeybatı Anadolu'da olduğu gibi transgrassif Bayırköy formasyonu ve üzerine Bilecik kireçtaşı çökelmiştir. Üst

Kretase-Alt Kretase ile geçişli olduğu gibi bir çok yerde de aşmalıdır. Üst Kretase'de Yenişehir-Bursa hattının kuzeyinde kalan alan flişel çökeller, güneyinde ise derin deniz çökelleri oluşmuştur. Kuzey bölgede alçalan yükselen bir rejim hakimken, güneyde ise duraylılık söz konusudur. Flişel Üst Kretase etkin tektonik dolayısı ile 1-2 km'ye varan Jura Yaşlı kireçtaşı olistolitleri içerir. Yenişehir ovasından geçen fakat yeri belirsiz bir kırık söz konusudur. Güney taraf alçalmış kuzey taraf ise yükselmiştir. Volkanik aktiflik kuzeyde daha fazladır. Güneyde sadece Lümbe köyü dolayında görülen tüfler, kuzey bölgede birçok yerlerde kalın istifler halinde görülür. Üst Kretase Paleosen geçişli ve Paleosen sonunda regressif hareketler sonucu karasal çökeller gözlenir (Genç, 1986).

Transgressif Eosen çökelelleri bölgedeki en kalın çökelleri temsil eder. Ypreziyen sonunda geniş yayılımlı bazalt oluşumlarından sonra Lütesiyen boyunca Andezit, Dasit, Trakit, Trakiandezitik volkanitler ile tüfleri sedimanterler içinde girik ve ardalanımlı olarak izlenir. En genç çökeller belli başlı kalın alüvyonlardır. Bölgede yerel küçük fayların yanında büyük ölçekli olayların etkisi ile gelişen faylar bilhassa genç birimlerin depolanmasını kontrol etmiş ve günümüzdeki ovaların oluşmasını sağlamıştır. Gözlenen ilk yapısal doğrultular D-B doğrultusunda kuzeye iç bükey bir yay yapmaktadır. Daha sonrakiler ise DKD-BGB yönündedir. Yapısal doğrultular ve kırılmalar büyük ölçekli hareketlerin sonucu oluşmuş ve eski masiflerin (Uludağ) etkisi ile belirli oriyantasyon kazanmıştır. Bu hareketler sonucu da masifler yükselmiştir.

Biga Yarımadasından başlayarak Bursa kuzeyinden Bilecik-Ankara-Tokat yönünde devam eden Karakaya Grubu'nun çökeldiği D-B yönlü bir açılma olayı neticesinde Üst Permiyen-Ü. Triyas zamanında bölgenin tümü etkilenmiştir. Bu zaman aralığında bölgede D-B yönlü gelişen faylar çökel çanağına kireçtaşı olistolitleri ve spilit, diyabaz gelişimini sağlamıştır. Kısa zaman aralığında gerilme nitelikli bu hareketler, Triyas sonunda sönmüştür. Fakat daha sonra gelişen Jura çökel çanağında DKD-BGB yönlü az çok Triyas çökel çanağına uygun olarak gelişmiştir. Bölge genel olarak Kuzey Anadolu Transform fayının etkisinde kalmış olup batıya doğru bir sıkışma sonucu K-G doğrultulu bindirmeler ile D-B doğrultulu normal faylarla K-G yönünde açılmaya başlamıştır. Diğer bir ifadeyle D-B yönlü sıkışma K-G yönlü gerilme ile karşılanmaya başlamıştır (Şengör, 1980). Normal faylar genel olarak iki sistemde gelişmiştir. Biri D-B veya KD-GB diğeri ise KB-GD'dir. Doğrultu atımlı olarak izleyebileceğimiz fay ise, K-G yönlü, O-Ü Miyosende gelişmeye başlayan sıkışma neticesinde Anadolu levhasının B'ya hareketi ile gelişen KAF'ndan ayrılan bir kol oluşturur. Sağ yönlü doğrultu atımlı olduğu söylenen KD-GB doğrultulu fay sistemi genel olarak bölgedeki geniş ovaları oluşturmuş olup bunlar KAF'ndan ayrılan tali kolları oluşturur.

Gemlik-İznik hattının güneyindeki dikliklerin kuzeyinde net olarak izlenir. Ayrıca Yenişehir ovasının B-KB sında, basamak şeklinde güney bloklar düşmüştür. KB-GD yönlü faylar ise D-B sıkışma tektoniği neticesinde Uludağ engellenmesi neticesinde oluşan faylardır. Üst Miyosen zamanında oluşan olaylar sonucu Uludağ kuzeydoğusunda hızlı depolanma ve merceklerde diklikler izlenmiştir. Gemlik güneybatısında denize doğru basamak faylar gelişmiştir. Bölgede iki yerde bindirme olayı izlenmiştir. Bunlardan birincisi Burşa kuzeydoğusunda Dışkaya dolayındadır. K-G sıkışma neticesinde, Jura kireçtaşları üzerine Bloklu seri bindirmiştir. Doğrultusu ve Eğimi: N 70E, 40 SE. Diğeri ise Yenişehir güneyinde bloklu seri üzerine metamorfik temel bindirmiştir. İnceleme alanında çok küçük alanda gözlenen olay, güneybatıya ve güneydoğuya doğru geniş alanlarda izlenir. Kuzeyden gelen bindirme K-G yönlü kuvvetlerde oluşmuştur. Zaman zaman geniş yayılımlı kıvrımlanmalar gösteren litolojiler D-B veya DKD-BGB yönlü aktiklinal ve senklinal eksenlere sahiptir. Neojen yaşlı birimler, çoğun yatay, bazı alanlardada farklı kıvrımlanmalar sunar. Mesozoik ve Paleojen yaşlı birimlerin kıvrım stilleri birbirine az çok benzemektedir (Genç, 1986).

#### 1.4 Sismik Kırılma / Geniş Açılı Yansıma Verilerinde Kaydedilen Fazlar

Bütüne bakıldığında kabuk yeryuvarının en dış ve en ince katmanı olarak adlandırılan kısmını oluşturur. Alt ve üst kabuk olarak genellikle iki kısımda düşünülür ve Konrat süreksizliği denen bir arayüz ile ayrıldığı bazı çalışmalarda belirlenmiştir. Kimysal içerik bakımından Ca, Na, ve Al-Silikat bileşiklerinin türevleri oluşumunda önemli bir kısmı içerir. Yapısal içerik bakımından ise kıtasal ve okyanusal olarak iki tip kabuk ayrımı yapılır. Kıtasal kabuk genel olarak 0-20 ile 0-90 km arasındaki derinliklerde değişen, değişken bileşimleri olmasına karşılık yoğun kuvars, monzolit içeriği görülülen bir yapıdayken, okyanusal kabuk nispeten daha ince (10-15 km civarında) ve daha tekdüze yapıdadır. Genel kabuk tanımlamalarında, üst kabuk granitik kayaçlarla alt kabuk ise bazaltik kayaçlar ile temsil edilir. Bu

sebeple üst kabukta seyahat eden dalgalar granitten gelen 'g' indisi ile anılırlar (Pg, Sg).

Kabuk ile üst manto olarak da adlandırılabilen Astonosfer ise Moho denen bir süreksizlik zonu ile ayrılmıştır. Bu süreksizliğin en önemli özelliği kabuktan sonra ani bir hız değişimine sahip olması ve bu sebeple bu katmandan gelen veya dönen varışların belirginliğidir. Ortalama 8 km/s civarında bir P dalgası hızına sahiptir.

Kabukta oluşup Moho'dan dönen P dalgası yansımaları PmP, kırılmalar ise Pn fazları olarak isimlendirilirler. Kabuk ve mantodan oluşan 2 tabakalı bir yeriçi modeli için kabuk fazları Şekil 1.2'de gösterilmektedir.





Tarifi yapılan varışların verilerden elde edilebilmesi için herbir atış grubu kontrol edilerek değerlendirilmiştir. Altta sırası ile Mudarlı, Gebze, Orhangazi, Iğdır, Çaybaşı ve Orhaneli patlatmalarına ait belirlenmiş varışlar ve okunan fazlar hakkında genel değerlendirmeler yapılmıştır.

## 2. SİSMİK VERİLERİN TOPLANMASI

#### 2.1 Kayıtçıların Yerleştirilmesi

Profilin ve istasyon noktalarının belirlenmesi amacıyla arazi koşullarının profil ile uyumunun tespiti için 1:25000 ölçekli haritalar ile detaylı yol bilgileri çıkartılmış ve istasyon koordinatları belirlenmiştir. Daha sonraki birçok veri işlem aşamasında kullanılacak olan istasyonlara ait 3 boyutlu koordinat bilgileri arazide el GPS (Global Positioning System–Küresel Konum Belirleme Sistemi) yardımıyla, yatayda 10, düşeyde 50 m hata ile tespit edilmiştir.

Kayıtçıların yerleştirilecekleri noktaların bulunmasının ardından, kayıtçıların araziye serilmesi için gerekli hazırlıklar yapılmıştır. Bu aşamada ilk olarak Reftek-125 (TEXAN)'lerin iç kristallerinin ayarlanması işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde, arazideki dönem içerisinde zaman bilgisinin yüksek hassasiyette doğruluğu sağlanmıştır. Tüm aletler için aynı işlem yapılarak zaman bilgileri optimum hassasiyete ulaştırılmıştır. Bir sonraki adım kayıtçıların arazide çalışacakları zaman ve örnekleme aralığı bilgilerinin girildiği parametre dosyasının oluşturulmasıdır. Sismik çalışmalarda kayıt yapılacak zamanın önceden biliniyor olması, kayıtçının 72 saatlik pil ömrü ve 32/64 Mbyte'lık hafiza kapasiteleri sebepleriyle kayıt parametre dosyasının doğru olması son derece önemlidir. Hazırlanan parametre bilgileri kayıtçılara yüklendikten sonra araziye çıkma asamasında tüm kayıçıların zaman bilgileri GPS zaman bilgisine göre düzeltilerek kayıtçılarla ilgili işlemler tamamlanmaktadır. Araziye serilen kayıtçıların rüzgar, yağmur, v.s gibi çevre gürültülerinden korunması, jeofonun sıkı şekilde toprağa çakılabilmesi ve aletlerin güvenliğinin sağlanması amacı ile yüzeydeki bitkisel toprak kaldırılarak jeofon bu yere çakılır ve kayıtçı bu kısma konulularak noktanın anlaşılmasını sağlayacak özel işaretlemeler yapıldıktan sonra çukurlar kapatılır. Şekil 2.1 yukarıda belirtilen uygulamalar yapıldıktan sonra kuzeyden güneye Mudarlı (SP1), Gebze (SP2), Orhangazi (SP3), Iğdır (SP4), Çaybaşı (SP5) ve Orhaneli (SP6) patlatmaları ve profil



boyunca yerleştirilen 80 kayıtçıdan oluşan doğrultuyu ve bölgedeki önemli topoğrafik yapıları göstermektedir (Şekil 2.1).

Şekil 2.1 Patlatma noktaları ve kayıtçıların yerlerini gösterir topoğrafik harita.

Patlatma noktalarına ve alıcılara ait genel bilgiler, Tablo A.1, Tablo A.2 ve Tablo A.3'de verilmiştir.

## 2.2 Kullanılan Aletlerin Tanıtımı

Sismik Kırılma/Geniş Açılı Yansıma çalışmalarında kayıtçılar arası mesafenin uzun olması nedeni ile yansıma sismiği çalışmalarında kullanılmakta olan çok kanallı kayıtçıların kullanımı oldukça kısıtlı ve zor olmaktadır. Bu sebeple deprem

istasyonlarında olduğu gibi birbirinden bağımsız ancak zaman bilgileri bakımından yüksek hassasiyette, birbirleri ile zamansal uyumluluğu olan kayıtçıların kullanımı gereksinimi doğmuştur. Bununla birlikte, istasyon yoğunluğunu arttırarak, çözünürlüğü yükseltmek amacı ile, daha çok istasyon kurulması gerekmektedir. Kurulacak istasyonların akü, harici GPS saati, harici depolama ünitesi, güneş paneli, v.s gibi birçok üniteden oluşan deprem istasyonu tipindeki kayıtçılar bu amaç için kullanışlı olmamaktadır.

Yapılan çalışma sırasında **Texan** isimli sismik kayıtçılar kullanılmıştır. Bu kayıtçılar Teksas eyaleti desteğinde Texas Üniversiteleri, Refraction Technology ve IRIS'den oluşan bir konsorsiyum tarafından küçük boyutlu, yekpare, hafif ve düşük güçle çalışan özel tasarımlı yeni nesil bir sismik kayıtçı olması amacıyla üretilmiştir. İlk üretim tarihleri olan 1999 yılından bu yana; sismik kırılma/yansıma çalışmaları, mikrotremör, artçı deprem çalışmaları, v.s gibi birçok çalışmada kullanımları sürmektedir.

Teknik özelliklerine bakıldığında, Texan'lar 24 bit'lik sayısallaştırma ayırımlılığına sahiptir. Kullanılan aletlerin bellekleri 32-64 Mbyte Flash EEPROM'dur. Son dönemde üretilen kayıtçılarda 128 ve 256 Mbyte bellekler kullanılmaya başlamıştır. Sayısal örnekleme için 16 farklı seçenek mevcuttur. Bunlar; 1000, 500, 250, 200, 125, 100, 50, 40, 25, 20, 10, 8, 5, 4, 2 ve 1 örnek/saniye olarak seçilebilen değerlerdedir. Zaman bilgisi için Texan'daki kristal 2048 MHz duyarlılığında, elektronik kontrollü (frekans sayacı sayesinde herbir kayıtçıya ait kristal kontrol ve kalibre edilebilir) ve kararlılğı 0.1 ppm (uygulamada bir günde yapabileceği maksimim hata miktarı 10 ms olarak saptanmıştır) dir.

Texan kayıtçılar ile sürekli tipte kayıt yapılabildiği gibi, 1000 adet ardışık (örnek olarak 1 dakika kayıt 2 dakika bekleme süresi şeklinde) aralıklar ya da 450 adet başlangıç ve bitişi tanımlanabilen zaman pencerelerinde de kayıt tipleri uygulanabilir. Texan'ların içerisine konulan 2 adet büyük boy (D-size) 1.5 Volt alkalin pil ile sürekli kayıt alma modunda 72 saate kadar kayıt yapılabilmektedir. Ana parçalarını Texan'ların oluşturduğu sismik kayıt sisteminin birimleri ve özellikleri özet olarak toplu halde Tablo 2.1'de verilmiştir. Şekil 2.2'de ise sismik kayıt sisteminin çevre donanımı ve Texan'lar görülmektedir.

Birim	Özellik
	Temelinde hir hilgisavar olun kavıt sisteminin tüm
	üniteleri arasıdaki iletisimi sağlayan hirimdir. Texan
	Kavitçilar ile ilgili yanılan işlemler ve onlarla
Bridge	ilatisim bu unita üzerinden gerçekleştirilir (zaman
	hilgisi ve kavit parametrelerinin girisi tonlanan
	varilarin alınması ön vari islam asamaları ve
Monitän vo toobizati	Pridgo ilo vonilon islomlorin görüntülendiği hirimdir
Nonitor ve teçnizati	Bridge lie yapitan işlemlerin görüntülendiği birimdir.
Frekans Sayici ve	Her bir lexan sismik kayıtçı içerisinde bulunan
teçhizati	osilatorun kalibrasyonu için kullanılan birimdir.
	GMT zamanını uydulardan aldığı bilgi ile sağlayan
GPS Alıcı/Saati	birimdir. Sağlanan GMT zamanı ile her bir Texan'ın
Gi 5 Mici/Saati	kendi iç zamanı her çalışma öncesinde ve sonrasında
	ayarlanır.
	REF-TEK 125, Texan sismik kayıtçıların araziye
	gitmeden yani veri toplanmasından önce ve arazi
Tasıma-Veri Aktarma	dönüşü yani veri toplanmasından sonra yapılan tüm
Cantası (Transcase)	işlemlerde Texanlar ile Bridge arasındaki bağlantıyı
Çantası (11 anscase)	sağlayan birimdir. Herbiri 15 adet Texan alabilen bu
	birim, güvenli taşıma amaçlı bir çanta olarak da
	kullanılır.
Transasa kablasu	Taşıma çantasını Bridge'e bağlayan kablodur. Bilgi
Transcase kablosu	akışını sağlar
A 1	Bridge ve Taşıma Çantası için gerekli 12V DC lik
AKU	güç kaynağıdır.
Derver leekleer	Gerekli enerjiyi aküden Bridge ve Taşıma–Veri
Power kablosu	aktarma çantasına aktarmak için kullanılır.
Redresör	Akünün şarj edilmesini sağlayan cihaz.
GPS kablosu	GPS saati ile Bridge'i bağlayan kablodur.
Klavye	Bridge ile kullanılan standart klavye.
Mouse ve Pad	Bridge ile kullanılan standart mouse ve pad.

Tablo 2.1 Texan sismik kayıt sistemlerinin birim ve özellikleri



Şekil 2.2 Sismik kayıt sisteminin çevre donanımı, jeofonun Texan ile bağlantısı ve Texan kayıtçının üstten görünümü.

Veri toplama aşamasında tek bileşen (düşey) jeofonlar kullanılmıştır. Jeofonların doğal frekansı 4.5 Hz ve çekirdek dirençleri 4000 Ohm'dur. Kullanılan jeofonların tepki spektrumu Şekil 2.3'de gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Jeofonların frekans ve çekirdek dirençleri arasındaki ilişki (http://www.geospacelp.com).

#### 2.2.1 Veri Aktarımı ve Zaman Hassasiyetlerinin Belirlenmesi

Toplanan veriler kayıtçılarda sıkıştırılmış olarak kaydedilir ve genel olarak sismik kayıtlar için oldukça yaygın bir yapı olan SEGY formatına daha sonra dönüştürülürler. Bu sırada hem veriler için, hem de kayıt sırasındaki birçok parametrenin içerildiği dosyalar kullanılabilir hale gelir. Texan'lar için de bu şekilde bir süreç izlenir. Her ne kadar klasik formatta başlık (header) yapılarına sahip olmasalar da veriler bu aşamadan sonra birçok farklı yazılım ile (SAC, SU, v.s) kullanılabilir yapıya ulaştırılabilirler.

Sismik verilerin toplanmasında zaman bilgilerinin hassasiyeti son derece önemlidir. Kullanılan kayıtçıların zaman bilgilerinin kontrol edilmesi ve oluşan hataların kabul edilebilir sınırlar içinde olması veya düzeltilerek bu sınırlar içine indirgenmesi çok önemlidir. Bu tipte bilgileri elde etmek için genel olarak kayıtçıların bilgi dosyaları (log)'lardan faydalanılır. Log dosyaları, kayıtçıların yerleştirildikleri yerden zaman bilgilerinin güvenilirliklerine kadar birçok bilgiyi barındırabilirler. Texan tipi kayıtçılarda zaman bilgisi GPS kontrollü olarak belirlenir. Genel bir tarifle çalışma prensibi; başlangıç ve bitiş sırasında zaman bilgisinin GPS ile belirlenmesi, çalışma sonunda GPS zamanı ile bir fark görüldüğü durumlarda düzeltme işlemlerinin yapılması şeklinde gerçekleşir. Bu şekilde tüm kayıtçılar için arazi çalışmaları sonrasında zaman sapmaları belirlenir. Bu işlem sonucunda oluşan en büyük hata miktarının bu çalışmada 20 ms olduğu tespit edilmiş ve bu değerin makul olduğu varsayılmıştır.

# 3. ÖN VERİ İŞLEM AŞAMALARI

Kullanılan Texan kayıtçılar birbirlerinden bağımsız olarak araziye yerleştirildikleri için birçok mühendislik çalışmasından farklı olarak herbir kayıtçının arazi bilgileri büyük önem taşımaktadır. Tüm kayıtçıların seri numaraları ve 3 boyutlu konum bilgileri, herbir atış için tüm alıcıların doğru ofset ile görüntülenmesinde kullanılmıştır. Ön veri işlem aşamaları izleyen adımlardan oluşmaktadır:

- Herbir atışın zamanı tespit edilir. Bunun için önceden ayarlanmış olan kuyu başı kayıtçılarındaki varışların mutlak zamanına bakılır. Bu yönü ile tetiklemeyle çalışan diğer tipteki kayıtçılardan farklı bir uygulama tipidir;
- 2. Belirlenen mutlak atış zamanı göz önüne alınarak herbir alıcının atış zamanlarını kapsayan 3 veya 5 dakika uzunluklu kayıtlar kesilerek ayrılır. Tüm alıcılar için bu işlem yapıldıktan sonra herbiri için 3 boyutlu yer bilgisini ve patlatma zamanını içeren başlık bilgileri oluşturulur ve tüm kayıtlar birleştirilerek bir atış kaydı (shot gather) elde edilir. Oluşturulan atış kaydı standart segy yapısında olup, birçok yazılım ile okunabilmektedir.

Yukarıdaki adımlar sonucu oluşturulan tüm patlatma kayıtları ve istasyon bilgileri ile bir SEGY dosyası oluşturulur. Bu işlemler sırasında patlatma zamanlarının mutlak olarak çok iyi belirlenmesi ve herbir kayıtçının başlık bilgisinin doğru olarak girilmesi veri işlem aşamalarının sağlıklı olarak yürütülebilmesi ve güvenilir sonuçlara ulaşılabilmesi açısından çok önemlidir.

Bu aşamadan sonra oluşan kayıtların görüntülenmesi için Colin A. Zelt (1997) tarafından hazırlanmış ve Unix platformda çalışan ZPLOT isimli ücretsiz yazılım kullanılmıştır. Bu program, kayıtlardan elde edilecek olan varış fazlarının belirlenip seçilmesinde kolaylık sağlayacak olan çeşitli ön veri-işlem aşamalarının rahatlıkla uygulanabildiği araçları sunmaktadır. ZPLOT programının sunduğu önveri işlem araçları özetle aşağıdaki gibidir.

*İndirgenmiş zaman (Reduced Time):* Özellikle uzun profillerden oluşan kırılma ve geniş açılı yansıma tipindeki çalışmalarda varışların birarada değerlendirilmesi

zorlaşır. Bu zorluğun üstesinden gelmek için zaman ekseninde öngörülen sabit bir ortalama hız (V) kullanılarak,

$$T' = T - \frac{X}{V}$$

uzaklığa göre zamanlar indirgenerek gösterilir (T'). Bu tipte bir uygulama, varışların okunması sırasında ardışık olan alıcıların birarada kontrol edilebilmelerini sağlar ve hatalı faz okuma ihtimalini azaltır. Şekil 3.1'de, V<sub>1</sub>=2 km/s, V<sub>2</sub>=4 km/s, h<sub>1</sub>=1 km şeklinde iki tabakalı, yarı sonsuz modelden türetilmiş, varış zamanları görülmektedir. Görüldüğü gibi indirgenmiş zaman (T-X/6) ile çizilen varışlar daha dar bir zaman penceresinde görülebilmektedir.



Şekil 3.1 İndirgenmiş Zaman (Reduced Time) ile çizilmiş zaman – uzaklık eğrileri.

*Filtreleme:* Kayıtların kalitesini ve/veya okunabilirliğini etkileyen gürültülerin kaldırılması amacı ile kullanılan bir uygulamadır. Bu şekilde özellikle yüksek gerilim hattı (50 Hz) gibi farklı frekans içeriğinde olup varışların okunabilirliğini etkileyebilen kaynakların etkileri azaltılabilir veya kaldırılabilir.

Bu özelliklerin yanısıra program; genlik kontrolü, istenilen zaman ve uzaklık değerlerinde kayıtların görüntülenmesi, AGC, ölü izlerin kapatılması, v.b. gibi birçok özellikleri de içermektedir.

Programın sunduğu bu araçlar kullanılarak kayıtların ön veri işlem çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sonrasında gerçekleşen işlemler (atış gruplarının oluşturulması, varışların belirlenmesi/seçilmesi ve belirsizliklerin tayin edilmesi) izleyen bölümlerde detaylı olarak anlatılmaktadır.

#### 3.1 Atış Gruplarının Oluşturulması

Ulaşım, hava ve çevre koşulları, aletlerin güvenliği gibi sebepler, büyük ölçekli arazi çalışmalarının uygulama aşaması ile planlama aşaması arasında farklılıklar oluşmasına neden olabilmektedir. Bu seeple aletlerin araziye serimi sırasında belli bir alan seçimi yapılarak, bu alan içine düşen uygun bir noktada alıcının yerleştirileceği nokta operatörler tarafından şeçilir. Bu işlem kaynak üretilmesi aşamasında da hemen hemen aynı şekilde uygulanır. Bu sebeple kayıtçının bulunduğu noktanın kesin yerine ait 3-boyutlu koordinat bilgileri arazide serim yapıldıktan sonra elde edilebilir.

Tezde değerlendirilen verilere ait arazi çalışması da benzer şekilde gerçekleşmiş ve koordinat bilgileri el GPS alıcıları yardımı ile saptanmıştır. Herbir nokta için kullanılan aletin seri numarası ve koordinat bilgilerinin bilinmesi, kayıtçıların arazi serilim bilgisinin sayısal olarak saklanıp, gerektiğinde kullanılması imkanını sağlamış ve atış grupları oluşturulmuştur.

Atış gruplarının oluşturulmasında temel olarak iki önemli bilgiye ihtiyaç vardır;

- Atış zamanı, kayıtçıların incelenecek olan sürelerinin belirlenmesini sağlar. Bu şekilde uzun bir süreyi kapsayan veri dosyası, genellikle atış zamanını içine alan ve kaynak ile en uzak alıcı arasındaki mesafeye bağlı varış zamanından etkilenmeyecek kadar uzun bir zaman penceresi seçilir. Teze konu olan uygulamada atış zamanlarından 1 saniye öncesi ile 1 dakika sonrasını kapsayan zaman penceresinde kayıtlar kesilmiştir.
- 2. Kayıtçıların ve atış noktalarının 3-boyutlu konumları, arazide yapılan çalışma sırasında 10-15 m hassasiyetli el GPS alıcıları ile belirlenir ve noktada bulunan kayıtçının seri numarası ile birleştirilmiş bilgi elde edilir. Alıcıların koordinat bilgileri ile seçilen referans noktası arasındaki uzaklıklar hesaplanır. Referans noktasının seçiminde tomografik çalışmalar için genellikle en kuzeydeki veya en güneydeki istasyon/atış noktası seçilir.

Bu işlemler sonrasında tüm kayıtlar sıralı ve eş zamanlı olarak biraraya gelerek atış gruplarını oluştururlar. Mudarlı-Gebze-Orhaneli profiline ait veriler için yukarıda bahsedilen işlemler yapılarak atış grupları oluşturulmuştur. Oluşturulan atış gruplarına ait kayıtların 8 km/s indirgeme zamanı ile çizimleri Ek-1'de verilmiştir.

Şekil A.1, A.2, A.3, A.4, A.5 ve A.6'da; Mudarlı, Gebze, Orhangazi, Iğdır, Çaybaşı ve Orhaneli bölgelerinde yapılan patlatmaların (Şekil 2.1) kayıtları görülmektedir.

# 3.2 Varış Zamanlarının Belirlenmesi

Şekil 3.2(a) ve 3.2(b)'de, 6 patlatma için yapılan okumalara ait Pg-Pn ve PmP zaman-uzaklık eğrileri görülmektedir.



Şekil 3.2(a) Tüm Pg-Pn varışları için seyahat zamanı - uzaklık eğrileri.



Şekil 3.2(b) Tüm PmP yansıma varışları için seyahat zamanı - uzaklık eğrileri.

Elde edilen uzaklığa göre sıralı atış grupları, farklı fazlardaki varışların arka arkaya sıralanarak seçilebilirliğini arttırır. Bu durumda bu fazların tanınması önemli hale gelir. Belirlenecek fazlar daha sonra ters çözüm sırasında belirtilecek ve buna göre değerlendirilecektir. Bu sebeple ilk önce kabuk hakkında genel bilgi sahibi olmak gereklidir.

Profilin en kuzey noktasında yer alan Mudarlı patlatması kırılma ve geniş açılı yansıma kayıtlarının belirlenebilmesi amacı ile seçilmiştir. Atış gruplarındaki kayıtlara bakılınca patlatmanın diğerlerine göre daha zayıf olduğu anlaşılmaktadır (Şekil A.1). Patlatma için ilk 30 km uzaklıktaki toplam 19 istasyon için Pg varışları belirlenebilmiştir. İzmit Körfezi'nin güneyine geçilir geçilmez sinyal/gürültü oranının 1'e yakın olması sebebiyle bu uzaklıktan sonra ilk varışlar tespit edilememiştir. Geniş açılı yansıma varışları (PmP) ise 125 km den sonra belirmeye başlamıştır ve toplamda 12 okuma yapılmıştır.

Gebze, TÜBİTAK-MAM kampüsünde yapılan patlatma yine hem ilk varışlar, hem de geniş açılı yansıma varışlarının görülebileceği tiptedir (Şekil A.2). Toplam 76 istasyonda Pg varışları okunmuştur. 80 km uzaklıktan (Uludağ yakınları) itibaren PmP varışları tespit edilmeye başlanmış ve toplamda 24 okuma yapılabilmiştir.

Orhangazi patlatması profilin 2-3 km batısında kalan taş ocaklarının olduğu bir alanda yapılmıştır (Şekil A.3). Gebze ve Bursa baseninde birkaç istasyon dışındaki tüm istasyonlarda Pg varışları belirlenmiştir. Toplam 73 okuma yapılmıştır. Güneyde 70 km den sonra PmP varışları belirlenmeye başlamış ve sonraki 12 istasyon için okumalar yapılabilmiştir.

Iğdır patlatması profilin neredeyse ortası denebilecek bir yerde yapılmıştır (Şekil A.4). Yakın varışlara bakıldığında Bursa basenin düşük hız yapısı kolaylıkla ayırt edilebilmektedir. Patlatma kayıtlarından toplam 71 tanesi için Pg varışı okunurken, İzmit körfezinin kuzey ve güneyi okumaların yapılamadığı alanlar olarak görülmüştür. Patlatma noktasının kuzeyinde ve güneyinde toplam 21 noktada PmP varışları belirlenmiştir. Güneyde 40 km ile 60 km arasında gözlenebilen üst kabuğa ait yansıma varışları yeterince belirgin olmadıkları için okunamamıştır.

Çaybaşı patlatma noktası Uludağ'ın hemen güneyinde yer almaktadır. Kayıtlara bakılınca Mudarlı patlatmasının ardından en zayıf varışların bu patlatma ile kaydedildiği görülmektedir (Şekil A.5). Toplam 41 adet Pg varışı okuması yapılabilmiştir ve yaklaşık 70 km'den sonra ilk varışların okunması mümkün olamamıştır. İlk PmP varışı yaklaşık 86 km kuzeyde okunabilmiş ve toplam 18 okuma yapılmıştır. Çaybaşı patlatması için güneyinde 20 km uzaklıktan başlayan ve en güneydeki istasyona kadar tüm istasyonlarda (22 km'lik mesafede) üst kabuk için belirgin yansıma varışları görülmüştür. Bu fazların yansıtıcı yüzeyleri hakkında yeterli bilgi olmadığından okumaları yapılmamıştır ve ters çözüm sırasında kullanılmayacaklardır.

Orhaneli patlatması, profilin en güneyindeki patlatmadır. Tıpkı Mudarlı ve Gebze atışlarında olduğu gibi hem ilk varışlar, hem de geniş açılı yansıma kayıtları sağlanmak üzere bu noktada patlatma yapılmıştır (Şekil A.6). Toplamda 70 tane ilk varış okuması tespit edilmiş, yaklaşık 145 km'den sonra zayıf olarak tespit edilebilen 8 ilk varışın Pn fazı olduğu saptanmıştır. PmP varışları kuzeyde 70 km'den sonra belirmiş ve toplam 31 okuma yapılmıştır.

#### 3.3 Belirsizliklerin Tayini

Tomografik ters çözüm sırasında sonuç modelin karakterini etkileyen en önemli parametrelerden birisi herbir varış zamanı ile kullanılan belirsizlik değerleridir. Bu değerin belirlenmesi sırasında en basit yaklaşım, standart okuma hatası sınırlarının belirlenmesi ve belirsizlik değeri olarak tüm okumalarda bu değerin kullanılması şeklindedir.

Sismik kayıtlarda belirsizliğe neden olan faktörler aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Zaman sapmaları (drift)
- Örnekleme aralığı hassasiyeti
- Uzaklığa bağlı soğrulmanın neden olacağı ilkvarış belirsizliği
- Uzaklık bilgilerinin küresel koordinat bilgilerinden kartezyen koordinat tipine çevrimi sırasında oluşan hatalar
- Konum belirleme sırasında kullanılan cihaz ve yöntemlerden doğan hatalar
- Sinyal-gürültü oranının düşmesi veya düşük olması sebebiyle oluşabilecek okuma hataları

Yukarıda belirtilen genel faktörlerin herbiri belirsizlik değeri saptanırken göz önüne alınmalıdır.

Daha önce belirtildiği gibi herbir kayıtçı için zaman sapması miktarı arazi çalışması sonrasında belirlenmiş ve kabul edilir sınırlar içinde (20 ms'den az) oldukları görülmüştür. Dört milisaniye örnekleme aralığı ile verilerin toplanması da kontrol edilebilir parametrelerden biridir. Fakat diğer parametrelere bağlı hata miktarlarını tam olarak belirlemek mümkün değildir. Bu sebeple, faz okumaları yapılırken herbir kayıt için okuma yapılabilecek aralıkta belirlenmiş ve bu değerler de belirsizlik parametrelerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Şekil 3.3'de, birkaç alıcıda ilk varış ve belirsizlik sınırlarının belirlenmesi gösterilmektedir. Belirsizliklerin saptanması sırasında geometrik açılma ve soğrulmanın uzaklığın fonsiyonu olması nedeni ile uzaklık ile arttığıda göz önüne alınmıştır.

Şekil 3.3 İlk varış ve olasılık sınırlarının belirlenmesi. Kırmızı kutular artan uzaklık ile standart hatanın artışını göstermektedir.
# 4. JIVE3D (JOINT INTERFACE-VELOCITY ESTIMATION) YÖNTEMİ

**JIVE3D** kelimesi, **J**oint Interface Velocity Estimation (Arayüz-Hız kestirimi) kelimelerinin baş harflerinin birleşiminden oluşmuştur. Bu yöntem J.W.D. Hobro tarafından 1995-1998 yılları arasında geliştirilmiş ve doktora tezi olarak 1999 yılında İngiltere'de Department of Earth Sciences, University of Cambridge'de kabul edilmiştir (Hobro, 1999). Geçen kısa süre içersinde yöntem birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır (Hobro ve diğ., 2003; Trinks, 2002).

JIVE3D yöntemi oldukça geniş aralıktaki veri tipleri ile kullanılmaya elverişli olarak geliştirilmiştir. Sözgelimi yöntem içerisinde kırılma, yansıma veya bu fazların tümünü birarada değerlendirebilecek bir yapıdadır. Veriler bir, iki veya üç boyutlu olarak modellenebilir. Çok kanallı sismik çalışmalar, düşey sismik profil verileri ve lokasyonları tespit edilmiş deprem verileri ile de yöntem kullanılabilir. Bu tipte birçok farklı fazdaki varışın birarada kullanılması yöntemin en belirgin ve güçlü kısmını oluşturmaktadır. Bu şekilde arayüzeylerin ve tabaka hızlarının ayrı ayrı denetlenmesi sağlanmıştır.

Programın çalışabilmesi için bir Fortran 77 derleyici ile Unix OS işletim sistemi gerekmektedir. Hobro (1999) tarafından yapılan testlerde çalışma ortamı olarak Sun Sparc (SunOS v4 & Solaris v5), SGI (Silicon Graphics) RS8000 & Origin 2000 (IRIX64) ve Intel Pentium (Linux v2), derleyici olarak ise bu ortamlarda çalışan Fortran77 derleyicileri denenmiş ve kullanılabilir oldukları görülmüştür. Tez çalışmasında kodların çalıştırılması sırasında Sun Enterprise (Solaris) ve Intel Pentium 4 (Redhat 7.3 ve 9.0) ve sonuçların çizimi için GMT 3.6 kullanılmıştır. Tanımlanan modelin boyutlarına ve iterasyon saysına göre yöntemin uygulama süresi değişim göstermektedir. Hobro (1999) tarafından yapılan test çalışmalarında, 12000 parametreden oluşan 3-boyutlu bir modelin (12000 veri noktasından oluşmuş), 65 MB'lık bir alana ihtiyaç duyduğu ve Pentium 2-350 MHz modelindeki bir makinada işlemlerin birkaç saat sürdüğü belirtilmiştir.

## 4.1 Yöntem

JIVE3D (tomografik ters çözüm programı), doğrusallaştırılmış yinelemeli (iterative) ters çözüm yaklaşımını kullanır. Bu işlem kısaca başlangıç modelden hesaplanan seyahat zamanları ile veriden elde edilen gözlemsel seyahat zamanlarının uygulanan bir seri iyileştirme adımları ile modelin araziden toplanan verilere uygun hale getirilmesi olarak açıklanabilir. İyileştirme olarak tarif edilen uygulamalar aslında doğrusal matris işlemleri ile elde edilen ve model üzerinde her defasında küçük fakat giderek daha iyiye doğru değişim sağlayan işlemlerdir. Bu şekilde ilerleyen adımlar sonrasında eğer model ile veri istenilen seviyede benzer hale gelirse sonuç model elde edilir.

Yöntemin uygulamasında kullanılan birçok parametre ters çözümün doğasındaki başlangıç modeline bağlılığı bir anlamda azaltmaya katkı sağlamaktadır. İyileştirilmiş ters çözüm olarak da isimlendirilen bu yöntemde, modelin yumuşak hatlardan oluşması için kullanılan zorlamalar (constraints) modelin veri setine uyumunun kolaylaştırılması için kullanılabilir tiptedir. Başlangıçtan son aşamalara kadar bu parametre farklı seviyelerde uygulanabilir. Bu konuda önerilen uygulama olarak ilk kısımlarda başlangıç modeline uygulanacak olan sıkı kısıtlamalar ile modelin genel sınırları ve karakterinin belirlenmesi şeklindedir. Bu şekilde başlangıç aşamasında ortamın ortalama hızının, hız gradyantının, eğer varsa arayüzlerin ortalama derinliğinin tespiti yapılabilir ve geniş ölçekte modelin yapısı belirlenir. Buna karşılık ilerleyen adımlarda detay bilgilerin modele adapte edilebilmeleri için yumuşatma parametrelerinin etkisi giderek azaltılır. Daha sonraki adımlarda modele uygulanan yumuşatma parametrelerinin etkisi ile gürültü olarak nitelendirilebilen ve modeli bozmaya başlayan etkiler oluşabilir. Bu aşamaya gelinirse ters cözüm durdurulmalıdır. Bu şekilde sonuç modeli, toplanmış olan veriye uygun en küçük dereceden yapıyı içerir tipte olacaktır.

Yöntemin uygulanması aşamasında; model parametreleri, ışın izleme parametreleri, varış zamanları ve parametreleri ve ters çözüm parametreleri dikkatlice gözönüne alınmalıdır. Bu parametreler kısaca açıklanırsa;

**Model Parametreleri:** Ters çözüm sırasında çözülmesi hedeflenen yapı burada belirtilir. Tanımlanmış olan tabakalar, arayüzeyler ve herbiri için öngörülen düğüm noktası sayısı burada tanımlanarak model belli bir referans noktasına göre oluşturulur (uzaklıklar metre veya kilometre olarak tanımlanabilir).

**Işın İzleme Parametreleri:** Atış noktalarının üç boyutlu koordinat bilgisi bu alanda girilir. Aynı zamanda tanımlanan tüm varış fazlarının tarifi, kaynaktan alıcıya gelebileceği üç boyuttaki açısal aralıklar, ışın izleme sırasında kabul edilebilecek hata miktarları ve log dosyalarına ait çıktılar yine bu alanda tanımlanır.

Varış Zamanları ve Parametreleri: Bu alanda, Işın izleme Parametre dosyasında tanımlanmış olan herbir atış için varış zamanları ve tipi (kırılmalar, yansımalar, v.s) tanımlanır. Yine bu alanda herbir varışa ait belirsizlikler değerlerinin miktarları tanımlanmalıdır.

**Ters Çözüm Parametreleri:** Bu alan ise ters çözüm işlemi sırasında kullanılacak parametrelerinin tanımlandığı oldukça kapsamlı içeriği sahip bir kısımdır. Burada tanımlanmış olan modelin herbir kısmı için ayrı ayrı parametreler (yumuşatma, zorlama, v.s) tanımlanabilir. Aynı zamanda iki veya üç boytulu modelden düz çözüm kullanılarak sentetik veri üretmek te mümkündür.

### 4.1.1 Düz Çözüm

Doğrusallaştırılmış yenilemeli ters çözüm uygulamalarında elde edilecek çözümün doğruluğu yarı yarıya düz ve ters çözümün işlevselliğine bağlıdır. Bu sebeple herbir yenilemede sentetik seyahat zamanları ve türevleri hesaplanarak ters çözümde kullanılır. Kaynak ve alıcıların konumlarının belli olması sebebiyle iki nokta arası ışın izleme rutinlerinde performans, sınır koşullarının tanımlanması ile belirlenir. Bu sınır koşulları aşağıda tanımlanan üç koşuldan birisi ile belirlenebilir.

- Kaynak konumu ve ışınların yayılacağı doğrultu tanımlanır. Kaynaktan çıkan ışınların ulaşabilirlerse yüzeye ulaştıkları yer ve seyahat zamanları hesaplanır.
- Kaynak konumu ve ışınların yayılacağı doğrultu tanımlanır. Tanımlanmış olan seyahat zamanlarına göre ışınların ulaşacakları yerler hesaplanır.
- Başlangıç ve bitiş noktaları tanımlanır. Bu bilgiler ile iki noktayı birleştirebilen ışınlar ve seyahat zamanları hesaplanır.

Bu koşullardan sonuncusunun sağlanması, ilk iki koşula göre daha zordur. Ancak, tomografik modellerde modelin karmaşık olup tekil olmaması durumlarında, modelden sentetik seyahat zamanları ve ışın geometrilerini elde edebilmek için son koşul kullanılmalıdır. İki nokta problemi (two-point problem) ile adlandırılan bu koşul aşağıdaki üç ana metod altında incelenebilir.

- Işın eğme (ray bending) metotları, ışın yolları deneme yanılma yöntemleri ile sınır koşulları elde edilinceye kadar iyileştirilir (Julian ve Gubbins, 1977; Um ve Thurber, 1987; Moser ve diğ., 1992).
- Atış (shooting) metotları, 1 numaralı koşula uygun bir seri çözümden elde edilen bilgileri iki nokta çözümü için kullanır (Cerveny, 1987).
- En-kısa yol (shortest path) metotları, yoğun ama basit yapıda bir ortam tanımlanarak ışınların seyahat edebilecekleri en kısa yol hesaplanır (Moser, 1991; Klimes ve Kvasnicka, 1994).

Yukarıda bahsedilen yöntemlerin kendilerine özgü avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Örneğin ışın eğme metotları yoğun verilerle kullanıldığı durumlarda göreceli olarak durağandır (stable), fakat sonuçlar her zaman en kısa seyahat zamanına yakınsamayabilir. Atış metotları tekrarlı iki nokta problemleri için uygundur ve az sayıda sismik kaynak ve çok sayıda alıcı (veya tam tersi) için kullanımı oldukça uygundur. Ancak alıcı ve kaynak sayılarının yakın olması durumunda problemin çözümü zorlaşır. En kısa yol metotları, yüksek hassasiyet gerektirmeyen ve en kısa seyahat zamanı aranan çalışmalar için uygundur. Bu genel tanımlarla da tomografi sırasında farklı fazlardaki verilerin kullanılabilecek olması düşünülerek atış metotları yönteminin daha avantajlı olduğu görülmektedir. Bu sayede yöntem, deniz tabanı sismometreleri (OBS) ile yapılacak çalışmalardan, kırılma/geniş açılı yansıma profilleri ile toplanan verilere kadar geniş bir veri grubunun birarada değerlendirilebilmesine imkan sağlamaktadır.

Yöntemin uygulanmasında ışın bozma teorisi (ray perturbation theory) esas alınmıştır. Bunun sebebi ışın yollarının, seyahat zamanlarının, Frechlet türevlerinin ve diğer birçok bilginin bu yöntemle hızlı ve başarılı olarak elde edilebilmesidir. Yöntemin çalışması kısaca, başlangıçta bir referans ortamında analitik çözümü olan bir ışın oluşturulup, bu ışının ufak bozucu etkilerle (ortamın hızı, anizotropi, çıkış açısı, v.s) istenilen şekle getirilmesi şeklindedir. Burada önemli parametre bozulmanın yeterince küçük olması ve bu miktarın hesaplanabilmesidir.

Şekil 4.1'de  $X_0$  noktasından hareket edip  $X(T_{int})$  noktasına gelen ışın, birinci bozulmada uç noktada  $\Delta X$  kadar yerdeğiştirir ve sınır koşullarından uzaklaşır. Daha sonra ikincil bir  $\Delta X_{int}$  kadar bozulma ile sürekliliği korunarak sınır koşulları sağlanmış yeni ışın yolu elde edilir.



Şekil 4.1 Işın yolunun bozulması yönteminin homojen bir ortamda davranışı.

Veri seti içinde atış ve alıcıların model içindeki tanımlamaları yapılmalıdır. Atışlar model içindede herhangi bir noktada tanımlanabilirken, alıcılar yüzey olarak tanımlanan ilk arayüzde olmalıdır. Seyahat zamanlarının sahip oldukları indisler sayesinde hangi faza ait oldukları ve hangi arayüzey ve tabakalarda seyahat ettikleri bilgileri tanımlanmıştır. Işınların seyahati sırasında belli başlı üç kritik parametre yöntemin başarısını kontrol eder. Bunlardan ilki, kaynaktan çıkacak olan ışınların sayısıdır. İlerleyen bilgisayar teknolojilerine rağmen hesaplamalarda belirli sınırlamaların olması kaçınılmazdır. Programda bu sınırlamanın üst limiti 1000 olarak tanımlıdır. Bir diğer önemli parametre ise ışınların kaynaktan alıcılara gönderilmeleri sırasında belirtilen düşeyle yaptığı çıkış açısıdır. Bu açı ne kadar daraltılırsa ışınların o kadar derinden ve uzağa başarı ile gitmesi sağlanacak ancak yakın varışlar kaçırılabilecek, geniş olması durumunda yakın istasyonlara ulaşılabilirken, sınırlı sayıdaki ışın miktarı sebebiyle modelin örneklenmesi daha seyrek olacağından ve bazı alıcılara ulaşamayabilecektir. Her bir atışın alıcılarla olan konumuna göre bu değer düzenlenmelidir. Sonuncu olarak ise düz çözüm için tolerans mesafesi tanımlanmalıdır. Bu mesafe kaynaktan çıkan ışının alıcının yakınlarına denk gelmesi durumunda kabul edilebilir mesafenin tanımlandığı değerdir. Tüm model için sadece bir tolerans değeri tanımlanabilmektedir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2 Kaynaktan çıkan ışınlar için  $\theta$  çıkış açısı, n toplam ışın miktarı ve alıcının konumuna ait tolerans değerinin görünümü.

#### 4.1.2 Ters Çözüm

En basit anlamda doğrusallaştırılmış ters çözüm yöntemlerinde bu tip bir problemin çözümü için; hız, derinlik ve ara yüzeylerin konfigürasyonu şeklindeki bir başlangıç modeline ait vektör (m), bu modelden türemiş olan ve düz çözüm yöntemi ile hesaplanmış olan sentetik seyahat zamanlarına ait bir vektör (t) ve Frechlet türevlerinden oluşan ve başlangıç modeli ile seyahat zamanlarının ilişkisini kontrol eden ve

$$a_{ij} = \frac{\partial t_i}{\partial m_j} \tag{4.1}$$

şeklinde verilen bir matris kullanılabilir. Bunlarla birlikte varolan bilgiler düşünüldüğünde, araziden toplanan veriler ( $t_{gercek}$ ), verilere ait öngörülmüş veya hesaplanmış belirsizlik değerleri ( $\sigma$ ) ve öngörülen model boyutları (çözüm sırasında kullanılacak olan model geometrisi) sayılabilir. Başlangıç modeli olarak isimlendirilen modelin veri ile uyumunun ölçülebilmesi için,

$$r = t_{gercek} - t \tag{4.2}$$

ile verilen seyahat zamanı hata vektörü tanımlanır. Hata vektörü olarak hesaplanan bu değerler yenilemeli ters çözüm yönteminin temelini oluşturur. Model parametrelerindeki küçük değişiklikler ve dolayısıyla beraberinde yapılan düz çözümle ede edilen seyahat zamanlarındaki değişimlere doğrusal denklemlerle yakınsanabilir. Buradaki doğrusallaştırma ile yaklaşım, sentetik seyahat zamanlarındaki küçük değişimler ile oluşacak olan vektörün (δt) başlangıç modeli olarak öngörülen model parametrelerindeki küçük değişiklikler cinsinden

$$\partial t = a \partial m \tag{4.3}$$

şekilde verilir. Bu terim basit olarak başlangıç modelinin civarındaki Taylor açılımının ilk terimidir ve *doğrusallık bölgesi* (Region of linearity) olarak adlandırılabilir. Bu sebeple bu tip doğrusallaştırılmış yöntemlerde başlangıç modelinin veriye uygun hale gelmesini sağlayacak yenileme değişimlerinin her defasında bu sınırda olması beklenir.

Sınır değerleri iyi şekilde belirlenmiş doğrusal bir problem için model değişimlerinin (δm) oluşturduğu vektörün hesaplanabilmesi için a matrisinin tersi alınarak seyahat zamanı farklarından oluşan vektör ile çarpılarak

$$\partial m = a^{-1}(t_{gercek} - t) \tag{4.4}$$

elde edilir. Ancak o zaman bu şekilde basit doğrusal bir problemin çözümü mümkün kılınabilir. Fakat tomografik problemler içerdikleri iki unsur yüzünden bu tipte çözümün elde edilmesini olanaksız kılar. Bunlardan ilki, başlangıç modelinden gerçek modele gidiş sırasında kullanılması gereken model değişiminin genellikle doğrusallık bölgesi içinde olmaması, diğeri ise tomografinin içerdiği matris yapısının cebrik işlemlere uygun olmayışıdır (ill-conditioned). İkinci problem matematiksel bir çıktı olarak beraberinde tomografi çalışmalarının en önemli sorunu olarak görülen çok çözümlülük (non-uniqueness) problemini doğurur. Bu da tek bir veri grubu ile birbirinden farklı birçok modelin (hesaplanacak parametrelerden oluşacak) elde edilebileceğini göstermektedir. Oluşan modellerin birçoğu kabul edilebilirlikten ve gerçekçilikten uzak olabilmesine karşılık veri ile uygun yapıda olabilmektedir. Bu gibi durumlarda genel olarak iki farklı yol izlenir. Bunlardan ilki, sonuç olarak model içinde küçük bir alan olan ancak diğer bölgelere göre daha iyi tespit edilmiş bölgelerin gösterilmesi, diğeri ise elde edilen birçok sonuç içinden çalışma alanı hakkındaki bilgilerden yola çıkılarak seçim yapılması şeklindedir.

Bu problemlerin ortadan kaldırılmasında en başarılı yol, ters çözüm sırasında model değişimini uygulanacak doğru yumuşatma parametreleridir (Hole, 1992; Zelt, 1994).

Başlangıç modeli olarak öngörülen model için gerçek veri ile sentetik veri arasındaki hata miktarının ölçülebilmesi için en çok kabul görmüş olan En Küçük Kareler yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yöntemin diğer yöntemlerle karşılaştırılmasına da bazı yayınlarda değinilmiştir (Scales and Gersztenkorn, 1988).

#### 4.1.2.1 En Küçük Kareler (EKK) Yöntemi

Bu yöntemde amaç modelin veri grubuna çakıştırılmasıdır. Temeli kısaca izleyen şekilde açıklanabilir (Hobro, 1999).

N tane veri ( $x_i$ ,  $y_i$ ), i = 1,...,N ve M uygun parametreden oluşan model,  $a_j$ , j=1,...M, için tanımlanacak bir 'y 'fonksiyonunun, tüm i değerlerinde fonsiyonun gözlemsel değerleri ile farkının karesinin toplamının en küçük olacağı

$$F(a_1,...,a_m) = \sum_{i=1}^{N} [y_i - y(x_i;a_1,...,a_m)]^2$$
(4.5)

şeklindeki bir yaklaşım yapılabilir ve bu tanımlamanın yapılabilmesi için bağımsız herbir y<sub>i</sub> verisinin bağımsız ve normal dağılımlı ve gerçek model civarında dağılım gösteren bir hata içerdiği öngörülür. Bununla birlikte eğer herbir veri için bir standart sapma ( $\sigma_i$ ) değeri saptanabilmişse, üstteki formül bu değerlere bağlı olarak iyileştirilebilir. Bu şekilde

$$\chi^{2}(a_{1},...,a_{m}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \left( \frac{y_{i} - y(x_{i};a_{1},...,a_{m})}{\sigma_{i}} \right)^{2}$$
(4.6)

şeklindeki normalize edilmiş  $\chi^2$  elde edilebilir. Bu fonksiyon için 1 veya minimum değer elde edildiğinde genel olarak veri ile öngörülen fonksiyonun birbiri ile iyice yaklaşması anlamına gelir ki, bu yenilemelerin durdurulması gerektiğini gösterir.

En küçük kareler yöntemi sadece normal dağılım gösteren ve birbirinden bağımsız 0 ortalamalı belirsizliklerin öngörüldüğü taktirde kabul edilmesine rağmen, uygulamada verinin toplanmasından kayıtçı tipine değişen birçok faktörün bir arada etkisi genel olarak hata miktarlarının tamamen bağımsız olmasını etkilemektedir. Bu sebeple sonuç üzerinde bu hataların korelasyonu olarak oldukça zayıf ve ihmal edilebilecek mertebede etkilerin oluşması nuhtemeldir.

Sismik seyahat zamanlarından yapılan modelleme çalışmalarında varış zamanlarının bağlı olduğu ve kullanılan kriterleri genel olarak aşağıdaki başlıklarla sıralayabiliriz.

- Kaynak üretilen noktaya ait koordinat bilgisi (x, y, z)
- Alıcı olarak kullanılan aletlerin birbirileri ile kalibre olmaları ve herbiri için bağıl / gerçek koordinat bilgisi (x, y, z)
- Üretilen kaynağın mutlak zamanı
- Yer hız modeli

Genel bir bakışla, bir sismik çalışma sonunda bu bilgiler verilerin işlenebilmesi için bilinmesi gereken parametrelerdir. Fakat uygulamada veri kalitesini etkileyen birçok unsur bulunmaktadır.

Daha önceden tartışıldığı gibi bunların en belirgin olanı kullanılan veri toplama sisteminin varış zamanlarına etkisi ile oluşabilecek sistematik hatalardır. Bu tip bir hata, sistem içindeki zamanlama yapılarınde (günümüzde genellikle GPS kontrollü veya atomik hassasiyetli senkronize kristallerde) oluşabilen zaman sapmalarının etkisi ile oluşabileceği gibi, veri toplama aşamasında kayıtçının örnekleme aralığına bağlı olarak yapabildiği hatalar olarak sınıflandırılabilir. Bu tipte hatalar özellikle

yüksek hacimli verilerde kullanılan otomatik varış zamanı algoritmaları önemli şekilde ön plana çıkabilir. Bu da en küçük kareler yönteminin performansını önemli ölçüde etkileyebilir.

Diğer önemli bir problem ise yöntemin temelinde bulunan veri hata miktarlarına ters çözüm işlemlerinin başlanmasından sonra işlem sürecinin gidişine göre karar verilmesidir ki, bu tipte problemlerin çözümü için genel olarak yumuşatma yaklaşımları kullanılmıştır. Bu yaklaşımın esası ters çözüm işlemleri ile problemi karmaşıklaştıran detayların azaltılıp genel bir resimin oluşturulmasına dayanır.

Bu durumda en küçük kareler anlamında fonksiyonun çözümü, m model parametresi ile isteğe bağlı olarak tanımlanacak olan model parametresindeki değişimin ( $\delta m$ ) etkisinde,

$$F(\delta m) = \Phi(\delta m) + \Psi(\delta m) \tag{4.7}$$

şeklini alır. Burada,

$$\Phi(\delta m) = \left\| r - A \delta m \right\|_{D}^{2} \tag{4.8}$$

ifadesi m modelinin civarında kabul edilen doğrusallık koşulunda modelde oluşacak  $\delta$ m kadarlık değişim ile oluşan hata miktarını temsil etmektedir. Bununla birlikte,

$$\Psi(\delta m) = \lambda_{\alpha} \left\| (m + \delta m) - m_{\alpha} \right\|_{M_{\alpha}}^{2} + \lambda_{\beta} \left\| (m + \delta m) - m_{\beta} \right\|_{M_{\beta}}^{2} + \dots$$
(4.9)

şeklinde ifade edilen ve fonksiyonu tamamlayan ikinci ifade ise  $\delta m$  kadar değişinti ile farklılaştırılmış model parametresinin çeşitli özelliklerinin (yumuşatma, v.s) anlaşılabilmesi veya kontrolü için kullanılan kısmı temsil eder. (4.8) ve (4.9) eşitlikleri birarada tüm fonksiyonu temsil eden ifadeler olup, en küçük kareler anlamında hesaplanırlar ve  $\lambda$  terimleri kontrol edilmek istenen bu özelliklere ait ağırlandırma olarak kullanılan katsayılardır. Bu sayede birbirinden bağımsız olarak istenilen ölçüde herbir parametre ön plana çıkarılabilir.

En küçük kareler yöntemi ile modeli, yumuşatılmış veya tabakalardan oluşmuş biçimde elde edebilme olanakları doğduğu gibi ters çözüm sırasında işlemlerde çeşitli zorlamalar (constrain) mümküm kılınır. Bu sayede belli bölgelerde başlangıçta öngörülen model korunabilirken, değişintisi de istenirse diğer bölgelere göre farklılaştırılabilir.

### 4.1.2.2 Düzenlenmiş En Küçük Kareler (DEKK)Yöntemi

EKK yöntemi içinde (4.7) eşitliğinde ifade edilen ve ana fonksiyonu oluşturan iki terimden ikincisi

$$\Psi(\delta m) = \lambda \left\| m + \delta m \right\|_{M_R}^2$$
(4.10)

şeklinde ifade edilebilir (Hobro, 1999). Burada  $|| ||_{MR}$  ifadesi ile modele ait birçok farklı değişinti ölçülebilir ki uygulamalara göz atıldığında yumuşatma, zorlama ve düz tabakalardan oluşum en çok görülen tipleridir. Böylece ters çözüm sırasında model parametrelerinin yumuşatılması ve değişimlerinin kontrollü yapılması  $\lambda$  terimi ile mümkün olabilir.

Örnek olarak model üzerindeki yatay tabakalılıktan bağımsızlığı (non flatness) ölçmek için modele ait birinci dereceden türevler hesaplanır. Bu deklem için sınır değerleri modelde tanımlı olan  $x_1$  ve  $x_2$  noktaları arasında seçilirken, ölçüm

$$\left\|m\right\|_{M_{F}}^{2} = (x_{2} - x_{1}) \int_{x_{1}}^{x_{2}} \left(\frac{dm}{dx}\right)^{2} dx$$
(4.11)

şeklindeki *m* parametresinin karesi ile ifade edilir. Bu şekilde mutlak değer anlamında değişim ölçülür. Benzer şekilde modele ait ani değişimlerin (roughness) kontrolü için ikinci dereceden türevlere bakılırak,

$$\left\|m\right\|_{M_{s}}^{2} = (x_{2} - x_{1})^{3} \int_{x_{1}}^{x_{2}} \left(\frac{d^{2}m}{dx^{2}}\right)^{2} dx$$
(4.12)

ifadesi ile elde edilir. Başlangıçta belirtilen olası en basit modele (minimum structure) ulaşabilmek için, yumuşatma ile tanımlanan kontrollü kullanımı kabul edilmiş bir yaklaşımdır. 3-boyutta düşünüldüğünde DEKK, modele ait keskin değişimleri

$$\left\|m\right\|_{M_{I}}^{2} = \frac{S}{n} \int_{S} \left(\frac{\partial^{2} z}{\partial x^{2}}\right)^{2} + \left(\frac{\partial^{2} z}{\partial y^{2}}\right)^{2} + 2\left(\frac{\partial^{2} z}{\partial x \partial y}\right)^{2} dS$$
(4.13)

ifadesi ile kontrol edebiliriz. Burada S arayüzeye ait alan ve z(x,y) arayüzeyi temsil eden fonksiyondu temsil etmektedir. Bu denklem birçok hız yapısından oluşan tanımlı bir hacim için,

$$\left\|m\right\|_{M_{v}}^{2} = \frac{V^{1/3}}{n} \int_{V} \left(\frac{\partial^{2} v}{\partial x^{2}}\right)^{2} + \left(\frac{\partial^{2} v}{\partial y^{2}}\right)^{2} + \left(\frac{\partial^{2} v}{\partial z^{2}}\right)^{2} + 2\left(\frac{\partial^{2} v}{\partial x \partial y}\right)^{2} + 2\left(\frac{\partial^{2} v}{\partial y \partial z}\right)^{2} + 2\left(\frac{\partial^{2} v}{\partial z \partial x}\right)^{2} dV$$

$$(4.14)$$

şeklini alır. Burada V ile tabakaya ait hacim ifade edilirken v(x,y,z) ile hız fonksiyonu tanımlanır.

Her iki terimin hesaplanmasında S ve V parametreleri ile payda dumunda bulunan toplamdaki tabaka sayısının kullanılması, herhangi bir tabaka için bu hesaplamanın tüm modelden bağımsız olarak yapılabileceğini yani yanlızca istenilen tabakaya ait belli ani değişimliliğin tanımlanabileceğini gösterir. Sonlu farklar yaklaşımı kullanılarak,

$$\left(\frac{\partial m}{\partial x}\right)_{ij} \equiv \frac{1}{\Delta x} \left(m_{ij} - m_{i-1,j}\right) \tag{4.15}$$

$$\left(\frac{\partial^2 m}{\partial x^2}\right)_{ij} \equiv \frac{1}{\left(\Delta x\right)^2} \left(m_{i-1,j} - 2m_{ij} + m_{i+1,j}\right)$$
(4.16)

$$\left(\frac{\partial^2 m}{\partial x \partial y}\right)_{ij} \equiv \frac{1}{\Delta x \Delta y} \left( m_{i-1,j-1} - m_{i+1,j-1} - m_{i-1,j+1} + m_{i+1,j+1} \right)$$
(4.17)

ayrık arayüz ve hız tabakalarının değerleri hesaplanabilir. Burada  $\Delta x$  ile x doğrultusundaki model parametrelerinin arasındaki mesafe tanımlanmaktadır. Bu operatörler (5.15) ve (5.16) denklemlerinde tarif edilen fonksiyonlarla herbir arayüzey ve tabaka için S matrisi ile uygulanır. Bir hız tabakası için tanımlı olan ve  $\partial^2 V/\partial x^2$  ile tanımlı  $S_x^v$  matrisi,

$$\sum_{k} (S_{x})_{jk} v_{k} \equiv \left(\frac{\partial^{2} v}{\partial x^{2}}\right)_{j}$$
(4.18)

ile tanımlanır. Bu formül tabaka sınırlarında ise,

$$\sum_{k} (S_{x})_{jk} v_{k} \equiv \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_{j}$$
(4.19)

şeklini alır. x ekseni boyunca birbirleri ile komşu olan model vektörleri düzenirse S matrisi

şeklini alır. Matrisin diagonal ve iki komşu paralel elemanı dışında tüm elemanları 0'dır. x ekseni boyunca hesaplanan S matrisleri gibi diğer tüm hız tabakaları için  $(S_x^V, S_y^V, S_z^V, S_{xy}^V, S_{yz}^V, S_{xz}^V)$  ve arayüzler için  $(S_x^I, S_y^I, S_{xy}^I)$  bu matrisler hesaplanır.

Herbir tabaka ve arayüz için S matrislerinin alanı (5.21) ve (5.22) eşitlikleri ile elde edilir.

Tabaka için,

$$(S^{T}S)_{i}^{V} = \frac{V_{i}^{4/3}}{n_{i}^{V}} ( (S_{x}^{T}S_{x})^{V} + (S_{y}^{T}S_{y})^{V} + (S_{z}^{T}S_{z})^{V} )$$

$$+ 2 (S_{xy}^{T}S_{xy})^{V} + 2 (S_{yz}^{T}S_{yz})^{V} + 2 (S_{zx}^{T}S_{zx})^{V} )_{i}$$

$$(4.21)$$

arayüz için,

$$\left(S^{T}S\right)_{i}^{I} = \frac{S_{i}^{2}}{n_{i}^{I}} \left( \left(S_{x}^{T}S_{x}\right)^{I} + \left(S_{y}^{T}S_{y}\right)^{I} + \left(S_{z}^{T}S_{z}\right)^{I} \right)$$
(4.22)

ile ifade edilir. Denklem (4.21) ve (4.22) içinde geçen V<sub>i</sub>, i numaralı tabaka için hacim,  $n_i^V$ , tabakanın içerdiği toplam düğüm noktası sayısı, S<sub>i</sub>, i numaralı arayüz için alan ve  $n_i^I$ , toplam düşey düğüm noktası sayısını ifade eder. Her iki alan hesabında sonuç düğüm noktaları ile normalize edilmiş durumdadır. Bu sayede denklemlerdeki düğüm noktasının sayısındaki değişim ile ani değişim teriminin denkleme etkisi değişmeyecektir.

Tüm model için ters çözümde kullanılacak ve arayüzler ile tabakaları içeren toplam **S** matrisi

$$S^{T}S = \frac{1}{n} \left( \left( S^{T}S \right)_{1}^{V} + \left( S^{T}S \right)_{2}^{V} + \dots + \left( S^{T}S \right)_{1}^{I} + \left( S^{T}S \right)_{2}^{I} + \dots \right)$$
(4.23)

denklemi ile ifade edilir. Burada n sayısı, arayüz ve tabaka sayısılarının toplamını ifade eder. Bu durumda ters çözüm için kullanılacak olan DEKK ani değişim terimi

$$\left\|\boldsymbol{m}\right\|_{M}^{2} = \boldsymbol{m}^{T}\boldsymbol{S}^{T}\boldsymbol{S}\boldsymbol{m} \tag{4.24}$$

şeklini alır. S matrisi oldukça büyük fakat bir o kadar da seyrek (sparse) yapıdadır. Bu sebeple S matrisi içindeki 0'dan farklı olan ifadeler saklanıp tüm 0'lı ifadeler atılarak S matrisinin yeni yapısı oluşturulur:

$$S = \left( \left( s_{ij}, j = j_1, j_2, \dots j_n \right), i = 1, m \right)$$
(4.25)

Bu eşitlikte; m, satır ve sütun numarasını, n, i numaralı satırdaki 0'dan farklı elemanların sayısını gösterir. Bu şekilde, S matrisinin sıkıştırılmış hali üzerinden tekrar S<sup>T</sup>S hesaplanarak (Hobro, 1999),

$$F(\delta m) = \left\| r - A \,\delta m \right\|_{D}^{2} + \lambda \left\| m + \delta m \right\|_{M_{R}}^{2}$$
(4.26)

şeklinde DEKK için *F* fonksiyonu hesaplanabilir. Fonksiyonun hesaplanmasında kullanılacak olan birinci ve ikinci türevlerin elde edilmesi için *ters kovaryans matris* (Tarantola, 1987)'ler  $C_D^{-1}$  ve  $C_M^{-1}$  hesaplanır. Bu durumda fonksiyon;

$$F(\delta m) = (r - A\delta m)^T C_D^{-1} (r - A\delta m) + \lambda (m + \delta m)^T C_M^{-1} (m + \delta m)$$
(4.27)

şeklini alır. Denklem (4.27)'de  $C_D^{-1}$  terimi

$$\begin{bmatrix} C_D^{-1} \end{bmatrix}_{ij} = \begin{cases} 1/(\sigma_i^2 n_{ioplam} & i=j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$$
(4.28)

eşitliği ile tanımlanır. Burada  $\sigma_i$  herbir varış zamanı için tanımlanmış olan belirsizlik terimidir ve "i" indisi, hangi rezidüel için ağırlıklandırma olarak kullanılacağını belirtir.  $n_{total}$  ile belirtilen terim ise toplam seyahat zamanı verisi sayısını belirtir. Rezidüel vektörü toplam  $n_{res}$  tane elemana sahiptir ve bu sayı her durumda toplamdaki rezidüel sayısının eşiti veya daha azı olacaktır. Verinin ağırlıklandırılması yapılırken tüm rezidüel bilgisi kullanılır. Bunun sebebi ters çözümün kararlılığının bozulmasını engellemektir. Eğer her defasında yanlızca kullanılan verilere ait rezidüeller saklanırsa bir sonraki yenilemede en fazla birönceki iterasyondaki kadar veri ile işlem yapılacaktır ki bu da giderek kullanılan verinin azalmasına ve sonuçların ufak bir bölge için oluşturabilmesine veya tamamen matematiksel sonuçların bulunduğu fakat gerçekçilikten uzak bir çözüm elde edilmesine sebep olacaktır (Hobro, 1999).

Fonksiyondaki diğer ifade olan  $C_M^{-1}$  terimi ise,

$$C_M^{-1} = S^T S \tag{4.29}$$

ile tanımlanır. Tanımlanan bu terimlerden oluşan F fonksiyonun türevi,

$$\nabla F(\delta m) = 2\left((r - A\delta m)^T C_D^{-1} A + \lambda (m + \delta m)^T C_M^{-1}\right)$$
(4.30)

şeklinde elde edilir ve bu fonsiyonun eğim derecesi ise Hessian matris ile hesaplanabilir.

$$H = \nabla \nabla F = 2 \left( -A^T C_D^{-1} A + \lambda C_M^{-1} \right)$$
(4.31)

### 4.1.2.3 Konjuge Gradyant Metodu (KGM)

DEKK yöntemi ile ters çözüm sırasında amaç herbir yenileme sırasında model parametresindeki değişimi doğrusallık koşullarında gerçek modelden uzaklaşmadan gerçekleştirmek ve böylece ters çözümün kararsız ve belirsiz ilerleyişini engellemektir. Genelde bu koşulun kendiliğinden oluşması neredeyse imkansızdır. Bunu sağlamak için uygulamalarda farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bunlardan biri F fonsiyonun içinde kullanılan bir katsayı ile matematsel hesaplamaların kolaylaştırılması ve model parametrelerinin bu şekilde tutulmasını sağlamak şeklindedir (damping). Ancak bu tipteki uygulamalarda fonksiyona etkiyen sayı ile gerçekte olmayan bir etkinin direk olarak model parametreleri üzerinde oluşması sözkonusudur ki bu da elde edilecek olan sonuçların gerçek veriler ile dışarıdan olan etkilerin (eklenen sayının etkisi) bileşkesi olması sonucunu doğurabilir.

Bir diğer yöntem ise F fonksiyonunu giderek azalan ve minimum azalıma doğru değişiminin sağlandığı durumda ve doğrusallık koşullarından ayrılmadan önce değişimin durması ile tanımlanabilecek olan konjuge gradyant metodu (KGM)'dur (Hobro, 1999). Bu yöntem ile herbir yenileme ile elde edilebilecek maksimum  $\delta$ m kadarlık değişim kontrol edilir ve bu değişimin doğrusallık bölgesi içinde kalması sağlanır. Uygulama aşamasında değer başlangıçta 0 olarak tanımlanır ve daha sonraki yenilemelerde giderek azaltılır. Bu şekildeki i. yenileme,

$$\delta m_i = \delta m_{i-1} + \alpha_i d_i \tag{4.32}$$

ile hesaplanır. Burada d<sub>i</sub> azalan yöndeki vektörü,  $\alpha_i$  ise adım sayısını belirtir ve,

$$d_{i} = \begin{cases} g_{i} + \left(\frac{(g_{i} - g_{i-1})g_{i}}{g_{i}g_{i}}\right) & i > 1\\ g_{1} & i = 1 \end{cases}$$
(4.33)

$$g_i = \begin{cases} -\nabla F(\delta m_{i-1}) & i > 1\\ -\nabla F(0) & i = 1 \end{cases}$$

$$(4.34)$$

denklemi ile elde edilir ve son olarak  $\alpha_{i}$ ,

$$\alpha_i = \frac{g_i d_i}{d_i^T H d_i} \tag{4.35}$$

denklemi ile bulunur. Burada H, (4.31) denklemindeki Hessian matrisidir. Denklem (4.35) açık şekilde

$$\alpha_i = \frac{g_i d_i}{2\left(\left\|Ad_i\right\|_D + \lambda \left\|d_i\right\|_M\right)}$$
(4.36)

şeklini alır. Kısaca, z ve x doğrultusu olmak üzere 2-boyutlu bir sistem için yöntemin getirisi, ilerleme yönünün direkt x doğrultusunda seçilebilmesi şeklindedir. Fakat bunun en derin noktası boyunca olması bu aşamada sağlanamaz. Yani iyileştirme tek bir boyutta/yönde gerçekleştirilebilmektedir. Dolayısıyla bu problemi ortadan kaldırmak için en az iki farklı adım gerekir ve ilk adımda örnek olarak derinlik ile ilgili problem çözülürken, ikinci adımda x doğrultusunda ilerlenerek sorun giderilir. Fakat tomografi problemlerinde iki veya özellikle üçüncü boyutun çözülmeye çalışıldığı problemler için model parametrelerinin kombinasyonun sayısına denk sayıda adım gerekir ki, bu durumda A matrisindeki hız ve derinlik bilgileri denk olmayan büyütmelere maruz kalabilirler, bu da dışarıdan problemin etkilenmesi ve sonuçlarda etkisinin görülmesi demektir. Bu sebeple derinlik ve hız bilgleri için bir normalizasyon katsayısı ile işlemlerin parametreler üzerindeki artık etkileri engellenebilir. A matrisindeki herbir parametre için kullanılacak olan bu katsayı,

$$a_{rms} = \sqrt{\sum_{i,j} (a_{ij})^2}$$
(4.37)

ile hesaplanır. Matris içinde kullanılacak olan yapısında  $a_{ij}$  ve  $m_i$  parametreleri hesaplanan bu normalizasyon değeri ile

$$a_{ij} = a_{ij} / a_{rms} \tag{4.38}$$

$$m_i = m_i a_{rms} \tag{4.39}$$

şeklinde yeniden hesaplanırlar. Bu sayede  $A\delta m$  yapısı ve dolayısıyla F fonksiyonu etkilenmeden korunur.

Tanımlanan parametrelerin ve yöntemin ne denli başarılı olduğunu görmek için değişik parametreler incelenebilir. Bu kontrolün yapılması için uygulamalarda en çok görülen parametre model ile verinin uyumunu ölçen  $\chi^2$  ifadesidir. Bu ifade

$$\chi^2 = \frac{1}{n_{res}} \sum_{i=1}^{n_{res}} \left(\frac{r_i}{\sigma_i}\right)^2$$
(5.40)

şeklinde hesaplanabilir. Parametrenin hesaplanmasında normalizasyon için kullanılan  $n_{res}$  herbir yenileme sonrasında düz çözüm ile elde edilen modeldeki seyahat

zamanlarında kullanılacak olan rezidüel sayısını temsil eder ve  $r_i$  buradaki rezidüelleri,  $\sigma_i$  ise hesaplanan seyahat zamanlarına veriden karşılık gelen belirsizlikleri belirtir.

Bu parametrenin anlamının sorgulanması için  $\chi^2 = 1$  genel olarak araziden toplanan veri seti ile modelden hesaplanan sentetik veri seti ve kullanılan belirsizlik değerleri bazında ortalamada uyumlu olduğunu gösterir. Bu sebeple eğer belirsizlik değerleri bilinçli olarak şeçilmiş ise  $\chi^2 = 1$  ters çözümü durdurmak ve uygun bir model elde edildiğini söylemek için oldukça kabul edilebilir bir değerdir. Ancak bu tipte tomografi çalışmalarında gerçekte herbir varış zamanı için *öngörülmüş olan* belirsizlik değeri Bölüm 3.3'te tartışıldığı gibi oldukça fazla değişkene bağlıdır ve doğru şekilde tespiti neredeyse imkansızdır. Bu sebeple  $\chi^2$  değerinin değişiminin azaldığı ve değer olarak küçüldüğü iterasyonlar da sonuç olarak seçilebilir.

Bu parametrenin hesaplanması iki farklı şekilde yapılır. Bunlardan birincisi ve ilk kontrol edilmesi gerekeni herbir kaynak ve alıcıların oluşturduğu grubu kontrol eden tipidir. Bu şekilde varolan birden çok kaynak ve kayıtlar için birbirinden bağımsız olarak yorum yapma imkanı doğacaktır. Ikinci olarak ise yapılan iterasyon sonunda genel olarak hesaplanan  $\chi^2$  dir ki, bu ise tüm modelin genel olarak veriler ile uyumunu anlatır yapıdadır. Dikkat edilmesi gereken durum tüm model için hesaplanan  $\chi^2$  parametresinin tek tek herbir atış için hesaplanandan çok farklı olmamasıdır. Çünkü bu durumda iyi bir genel  $\chi^2$  değeri aslında modelin küçük bir kısmının iyi şekilde çözülebildiğini fakat diğer kısımlar için çözümün kabul edilebilir sınırların dışında olabileceğini gösterebilir.

### 4.2 Sentetik Testlere Genel Bir Bakış

Literatürde modelleme çalışmalarının etkinliğinin arttırılabilmesi için farklı metotlarda kullanılabilecek farklı tekniklere rastlamak mümkündür (Zelt, 1999). Bu anlatımlara göre yapılması gereken çalışmalardan ilki verinin okunması (piklenmesi) sırasında farklı fazların belirlenmesidir. İkinci olarak modellenecek olan alanın belirlenip problemin bu alan için çözümüne yönelik uygulamalarla çözülmesi gereklidir (deniz sismiği çalışmalarında sabit hıza sahip olan su tabakasının

geometrisinin belirtilmesi ve hızının sabitlenmesi, v.s). Bu şekilde, kullanılan verinin etkinliğinin arttırılması hedeflenir.

Diğer bir önemli adım, yumuşatma ve iyileştirme parametrelerinin etkin kullanımıdır (Zelt, 1994). Bu parametreler, modelin bütünü için öngörülen varsayımları destekler sekilde seçilir. Aksi durumlarda çözüm genellikle modelin küçük bir bölümüne odaklanır ve *dana gözü*'ne benzer anomaliler ile hatalı çözümler elde edilir. Bu tipte olaylar genel olarak model için yapılacak düz çözüm sonucunda kaynaktan alıcılara ulaşan ışınların sayısında ani azalmalar ve  $\chi^2$  değerindeki ani bir değişimle de belirlenebilir. Bu da elde edilecek sonucun tüm model yerine sadece modelin küçük bir kısmına duyarlı olmasına neden olacaktır.

Bu genel tanımlamalar ışığında yöntemin çalışması Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'deki akış diagramları ile verilebilir.



Şekil 4.3 Tek tabakalı model için ters çözüm işlemlerini gösterir akış diagramı.



Şekil 4.4 Birkaç tabakalı modeller için ters çözüm işlemlerini gösterir akış diagramı.

Şekil 4.3'te bir tabakalı yapılar için ters çözüm işlemini gösteren akış diagramı verilmiştir. Burada ters çözüm için kullanılacak olan varışların seçilerek okunması, başlangıç modeli seçimi ve yumuşatma parametrelerinin kullanımı genel başlıklar olarak belirmektedir. Birden çok tabakalı modellerde ise Şekil 4.4'de görüldüğü gibi ise farklı tabakalara ait varış fazları belirli ise genel çözüm için iki farklı yaklaşım vardır. Birinci yaklaşımda, tüm varışlar birarada kullanılıp genel çözümün elde edilir. Elde edilen bu çözüm aslında en doğru yaklaşım olarak kabul edilebilir. Çünkü derin yapılardan gelen varışlar, sığ katmanlara ait bilgiyi de içermektedir ve bu bilgilerin kullanılması durumunda çözümün kalitesinin artması beklenir. İkinci yaklaşımda ise üstten aşağıya doğru tabakalar ilgili fazlarla belirlenir, bir sonraki çözüm için sabit olarak kabul edilir. İki uygulama karşılaştırıldığında, ikinci yöntemin daha istikrarlı sonuçlar üretebildiği ancak birinci yaklaşımı çözümün kalitesini arttırır yapıda olduğu kabul edilmektedir. Bu sebeple tomografi çalışmalarında her iki yöntemin denenmesi ve aralarından en uygun sonucun kabul edilmesi gerekmektedir.

### 4.2.1 Sentetik Testlerde Kullanılan Yaklaşımlar

Kullanılmış olan ters çözüm yönteminin çalışma prensiplerinin anlaşılması, güçlü ve zayıf yönlerinin tespit edilmesi ve çözülmeye çalışılan problemin yapısına uygunluğu, kullanılacak parametrelerin tespiti ve benzeri kontrollerin yapılabilmesi amacıyla oldukça önemlidir. Bu sonuçlara göre gerçek veri ile yapılacak çalışmalar yönlenecek ve çözümün kalitesi hakkında bilgi edinilecektir.

Ters çözüm yönteminde herbir yineleme, 1 düz ve 1 ters çözümün arka arkaya uygulanmasından oluşur. Problemin büyüklüğüne (bilinmeyen sayısı), veri miktarına, kaynak-alıcı geometrisine, öngörülen veri kısmının/kısmlarının çözümüne ve çözünürlüğüne (resolution), öngörülen belirsizliklere göre (varış zamanlarındaki olası hata miktarları, kaynak ve alıcı konumlarının tespiti ve uzunluğa çevrimi sırasında öngörülen hata miktarları, örnekleme aralığından doğan hata miktarları, v.s) problemin çözümüne yönelik parametrelerin tayin edilmesi gereklidir. Genel olarak bakıldığında; tek parametre çözünürlüğü, dama tahtası ve kaynak-alıcı geometrisi tipi testler uygulamada sıkça rastlanan testlerdir.

*Tek parametre çözünürlüğü (Single-parameter resolution test):* Bu tür testlerde genel olarak ışın yollarının yoğun olduğu bir alanda civara göre farklı hız yapısına sahip bir blok oluşturulur. Bu blok içersinden geçen ışınlar diğerlerine göre bir miktar varış zamanı farklılığı göstereceğinden (bozunmaya uğrayacağından), üzerinde çalışılan blok derinlik ve hız ile ilgili bilgi taşır.

*Dama tahtası (checker board):* Bu tür testler uygulamada oldukça sık rastlanan testlerden bir tanesidir. Bu testte önceki yöntemden farklı olarak verilen modele ait model çözümlülüğü (model resolution) tahmin edilmeye çalışılır. Düşük ve yüksek hız anomalilerinin birarada bulunduğu modelin çözümü ile, gerçek veri ile problemin çözülmesi sırasında elde edilecek rezolüsyonun sınırları anlaşılabilir. Elde edilen çözünürlük yüksek derecede ışın yolları ile ilgilidir ve hız yapısına göre ışın yolları değişecektir. Bu sebeple özellikle karşılıklı kuyulardan üretilecek sismik kaynak-alıcı geometrisi (bore-hole) veya deprem tomografisi gibi ışın yollarının olabildiğince değişim göstermeyeceği geometrilerde yöntemin kullanılabilirliği oldukça yüksektir. Uygulamada hücre tomografisi (cell tomography) çalışmalarında bu yönteme sıkça rastlanmaktadır.

*Kaynak-Alıcı geometrisi(source-receiver geometry):* Arazide kullanılan veya kullanılacak geometrinin çözümü ne kadar etkilediğini, en iyi çözümü elde etmek için eldeki kaynak-alıcı geometrisi ile hangi parametrelerin çözülebileceğinin tespit edilmesi ana hedeftir. Çalışma alanı için öngörülen yeraltı modellerine ait yaklaşımlar yapılarak veya önceden gelen bilgiler ışığında, düz çözüm ile sentetik varış zamanları hesaplanır. Elde edilen verilerden hız ve arayüzey yapıları için kullanılacak olan farklı fazlardaki varışlar (kırılmış, yansımış, v.s) ters çözüm yönteminde veri olarak girilerek, sonuçta elde edilen yapının gerçek model ile uyumu kontrol edilir. Bu yöntem farklı arayüzey ve hız yapısına sahip modellerle kullanılarak, çözümlere ait belirsizlikler ve sınırlamalar ile kullanılan yöntemin çözüme etkisi anlaşılabilir.

Sentetik veri ve eklenecek farklı miktarlardaki gürültüler ile, modeli temsil edebilecek en uygun düğüm noktası sayısı ile iyileştirme parametreleri (yumuşatma, ani değişim, v.s.) tespit edilebilir. Bu yöntemin dezavantajı, gürültü miktarlarının yapılacak öngörülerle tayin edilmesidir (Zelt, 1999). Yapılmış olan uygulamalara bakıldığında, eklenen gürültülerin sabit miktarlarda (örneğin 50 ms) veya uzaklığa bağlı olarak değişen yapıda oldukları görülmektedir.

Araziden toplanan verilerin ters çözümünde kullanılacak olan parametrelerin tespiti için, üstteki testlerden uygun olan veya olanların kullanılması, veriden elde edilecek yer modelinin güvenilirliği ve açıklanabilmesinde önemli rol oynayacaktır. Tüm bu sebeplerle, test tipinin arazideki kaynak-alıcı geometrisini içerir yapıda olması önem taşır.

# 5. YAPAY VERİLERLE MODELLEME

Bu bölümde iki tabakalı bir model için testler yapılmış ve ikinci tabaka sınırının çeşitli halleri için çözümler irdelenmiştir. Ayrıca alt tabakanın eliptik bir şekle sahip olması durumu ve verilerin çözüme olan katkıları ile başlangıç modelinin etkileri tartışılmıştır. Daha sonraki testlerde ise model için en uygun düğüm noktası sayısının tespit edilebilmesi için farklı yoğunluktaki düğüm sayıları kullanılarak sokulum tipli bir yapı içeren modeller incelenmiştir. Son olarak 2 düşey yönlü ve hızlı yapı içeren model için çeşitli varyasyonlar denenmiş ve testler sonlandırılmıştır. Testler için kullanılan veriler, 6 patlatma noktası ve 80 kayıtçı ile toplanan gerçek verilerin toplanmasındaki kayıtçı ve patlatma noktalarının konumları sabit tutularak elde edilmiştir.

## 5.1 İki Tabakalı Model İçin Testler

Yöntemin test edilmesi için uygulanması en kolay ve sonuçlarının en kolay tartışılabileceği model iki tabakadan oluşan yansıtıcı bir arayüzü bulunan modeldir. Bu sayede direk varışlar ve yansımış varışlar kolaylıkla üretilebilir ve bu verilerin kullanımı ile ters çözümün sonuçları tartışılabilir. Bu modelde patlatma ve kayıt noktalarının yerleri gerçek veridekilerle aynı tutulmuştur. Yapay Pg ve PmP verileri Şekil 5.1'de verilen katmanlı modelden üretilmiştir. Elde edilen varış zamanlarının üzerine standart sapması 50 ms, ortalaması 0 olan gauss dağılımlı gürültü eklenmiştir. Bu şekilde ilk tabakanın hız yapısı ve yansıtıcı ara yüzeyin şekli elde edilmeye çalışılmıştır.



Şekil 5.1 Sentetik varış zamanlarının üretildiği modele ait hız-derinlik değişimi.

Sentetik Pg ve PmP varış zamanları, yüzeyde 5.01 km/s, 10 km'de 5.1 km/s yatay tabakalı modelden üretilmiştir. Yarı sonsuz ortamda Şekil 5.2 ters çözümde kullanılacak olan tabakalı başlangıç modelini ve hızları göstermektedir.



Şekil 5.2 Sentetik verilerin ters çözümünde kullanılan başlangıç modeli. (Hızlar, Şekil 5.1'dekinden farklı olarak 4 km/s'den 6 km/s'ye kadar değişmektedir.)

Modelin yatay ve düşeydeki boyutları 160 km x 40 km olarak tanımlanmıştır. Yansıtıcı arayüzey 22 km derinliktedir ve sismik hızlar 4.2 km/s ile 6.5 km/s arasında doğrusal artmaktadır. Yarı sonsuz ortam için ise, 7 km/s'lik sabit hız tanımlanmıştır.

Final modelinde  $\chi^2$  değeri 0.99 hesaplanmıştır. İlk 10 km ye ait hız yapısı Pg ve PmP varışlarının kontrolünde ortalama 5 km/s civarına yakınsamıştır (Şekil 5.3). Başlangıç modelinde 22 km de tanımlanan yansıtıcı arayüzey, final modelde 10 km civarlarına çekilmiştir. Bununla birlikte arayüzeyin model sınırlarına yakın kısımlarında bükülmeler görülmüştür. Bunun sebebi yansımalara ait ışın yollarının bu bölgeyi içermemesi ve çözümün başlangıç modeline bağlılığıdır.



Şekil 5.3 Final modelinin ışın yolları ve hız yapısı.

Elde edilen sonucun değerlendirilebilmesi için 80 km ofsette belirtilmiş olan **A** noktasında gerçek model ve final modelden düşey hız kesitleri alınmıştır (Şekil 5.4).



Şekil 5.4 Şekil 5.3'te gösterilen A noktası için, gerçek model ve çözüme ait hızderinlik grafikleri.

Artan derinlikle gerçek hız değerinin civarında sapma miktarlarının da arttığı görülmektedir. Bunun sebebi, veriye eklenen gürültü ve hız bilgisini kontrol eden ışınların sayısındaki azalmadır.

Genel bir değerlendirme yapılırsa, hız yapısının gerçek modele yakınsadığı görülmüştür. Benzer şekilde arayüzeyin derinliğinin kontrolü de iyi şekilde sağlanmıştır. Farklı arayüzeylere sahip modeller için sonuçların kontrol edilmesi için, sentetik verilerin ürettildiği modelde küçük bir değişiklik yapılmış ve Şekil 5.5'teki gibi yansıtıcı yüzeye küçük bir eğim verilerek varış zamanları yeniden üretilmiştir.





Modelin sol ucunda arayüzey 10 km'de ve sağ ucunda ise 15 km derinde durmaktadır. Ters çözüm için başlangıç modeli bir önceki testte kullanılan modelin aynısıdır. Final çözüm ise Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.6 Eğimli arayüzey problemi için final modelinin hız yapısı ve ışın yolları.

Gösterilen final model için  $\chi^2$  değeri 1.14 olarak elde edilmiştir. Model ile uyumluluğu oldukça belirgindir. Işın yoları ile çözülebilen bölgenin uyumu da bir önceki modelde olduğu gibi açıkça görülmektedir. Modelin sol ve sağ kısımlarındaki arayüzey bükülmeleri, bu bölgelerin veriden çözülememelerinden ve başlangıç modeline bağımlı olarak çözülmelerinden kaynaklanmaktadır. Eğimli tabakanın yapısında da birçok değişiklikler yapılarak farklı testlerin sonuçları incelenmiş (yönü, açısı, v.s) ve benzer çözümler elde edilmiştir.

### 5.2 Eliptik Yüzeylerin Tespitine Yönelik Testler

Yansıtıcı yüzeyin doğrusal olmayıp eliptik olması durumunda arayüzeyin belirlenebilmesi önemlidir. Arayüzeyin geometrisinin başarılı birşekilde belirlenebilmesi Moho yansımalarının belirlenip kullanılmasıyla sağlanacak ve bu şekilde yüzeyin geometrisi elde edilebilecektir.

Bu amaçla Şekil 5.7'deki iki ucu derinde ve ortalara doğru yükselen bir arayüzey içeren kabuk modelinden varış zamanları hesaplanmıştır.



Şekil 5.7 Sentetik verilerin oluşturulduğu eliptik arayüzey yer modeli.

Modelden elde edilen varış zamanlarına 50 ms lik gürültü eklenerek ters çözüm işlemleri uygulanmıştır. Şekil 5.8'de, 1., 6., 18. ve 22. iterasyonlara ait sonuçlar ile  $\chi^2$  değerleri ve kaynaktan çıkan ışınların ne kadarının alıcılara ulaşabildiğini

gösteren Başarılı Işın Yüzdesi (**BIY**) ve model için yinelemelerin bir kısmına ait sonuçlar ve kontrol parametreleri verilmiştir. Dikkat edilirse  $\chi^2$  değeri ilerleyen iterasyonlarla azalıp 1'e yaklaşmış, final model için BIY değeri %75 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler ters çözümün iyi gittiğini gösteren parametrelerdir. Arayüzey için geometri ve ilk tabakanın derin bölgelerine ait hız bilgileri yansıma verilerinin kontrolünde hesaplanacağı için ışınların taradıkları alanda çözüm veri kullanılarak elde edilirken, diğer bölgelerde çözüm başlangıç modeli ve yumuşatma parametrelerine bağlı durumdadır.

Final modeli olarak 22. iterasyon seçilmiştir. Bu iterasyonla elde edilen sonucun daha iyi anlaşılabilmesi için final modelin 3 özel noktasına ait (A ışınların çok az geçebildiği alan, B tamamı ile ışınların kontrolünde çözülen alan, C çözümün hem ışın yollarına hem başlangıç modeline ait olduğu alan) düşey hız profilleri seçilmiş, profillerin gerçek modeldeki değerleri ile karşılaştırmaları Şekil 5.9'da yapılmıştır.



Şekil 5.8 1., 6., 18. ve 22. iterasyonların sonuçları ve herbir sonuç için  $\chi^2$  ile BIY değerleri. Final model 22. iterasyonda elde edilmiştir.



Şekil 5.9 Başlangıç, çözüm ve gerçek modelde A, B, C noktalarındaki düşey hız kesitleri.

Modelin çözümlülüğünde ışın yollarının etkisi oldukça açıktır. Final modeli için arayüzey orta kısmının doğru derinlikte olması ve hız bilgisinin gerçek hız ile uyumluluğu (Şekil 5.9 - B profili) buradan dönen ışınların yoğun olarak hız ve derinlik kontrolü yapması ile sağlanmıştır. Bu sebeple bundan sonraki test çalışmalarında ışın yollarının içinde olmayan alanlar kapatılacak ve değerlendirmeler geri kalan alan için yapılacaktır.

## 5.3 Düğüm Noktaları Yoğunluğu Testleri

Her bir düğüm noktası aslında ters çözümde bulunması hedeflenen ve tümü birarada A matrisi içindeki bilinmeyenleri oluşturan hız değerlerini temsil eder. Düğüm noktalarının sayısı ve konumları problemin çözümü için oldukça önemlidir. Eğer doğru sayıda ve konumda düğüm noktaları tanımlanırsa, tüm yapıyı en iyi temsil eden çözüm bulunabilecektir. Tipik ters çözüm çalışmalarında düğüm noktalarının sayısının belirlenmesi ile ilgili genel yaklaşım **n** sayıda veri olan bir model için **n** tane veya daha az bilinmeyenin uygun koşullarda çözülebileceği, daha fazla sayıda bilinmeyen olması durumunda ise bazı bilinmeyenlerin başka bilinmeyenlere bağımlı olarak çözülebileceği şeklindedir. Dolasıyı ile sismik tomografi çalışmalarında çözümün okunan varış zamanı sayısına bağlı olduğu düşünülebilir. Ancak kullanılan yumuşatma parametrelerinin etkisi bu problemi ciddi ölçülerde azaltmaktadır. Bu genel bilgilerin ardından düşey ve yatay hız değişimi tanımlanmış bir model için en uygun düğüm sayısı bulunmaya çalışılacaktır. Şekil 5.10'da gösterilen model için arazi verisine uygun olarak olarak ilk varış verileri üretilmiştir.



Şekil 5.10 Yapay varış zamanlarının üretileceği hız modeli.



Şekil 5.11 Modelden düz çözüm ile Pg seyahat zamanlarının üretilmesi sırasında kullanılan ışın yollarının gösterimi.

Şekil 5.11'de görüldüğü gibi ışınların derinlerden geçeceği gözönüne alınarak böyle bir model kullanılmıştır. Işın yollarına bakıldığında modelin ortalarına doğru büyük bir bölümünün tarandığı ve uç kısımların derinlerinde kontrol edilemeyen (ışınların geçemediği) kısımlar olduğu görülmektedir. Bu tipte bir model için en uygun düğüm noktası sayısının kaç olduğu kritik sorulardan birisidir. Bu sorunun cevabı, başlangıçtaki bilgilere göre en çok toplam ışın sayısı kadar olacaktır. Örnek olarak 310 tane ilk varış olduğu düşünülürse, tüm parametrelerin tam çözülebilmesi için limit değer 310 bilinmeyen olarak görülmektedir. Bu aşamadan sonra testlerin sonuçlarının yorumlanması daha sağlıklı olarak yapılabilir.

Çözünürliğün kontrolü için düğüm noktalarının yataydaki sayısı 6, 22, 38 ve 80 olacak şekilde sonuçlar elde edilmiş ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Kaynaktan alıcılara ulaşan varışların düşey penetrasyonlarının sağlanması için düşeyde en az 20 düğüm noktası kullanılması gerekmektedir. Aralarında en düşük çözünürlüklü olan 6x20 düğüm noktası için yapılan testin sonuçları incelendiğinde (Şekil 5.12) seçilen çözüm için  $\chi^2$  değeri 0.1148, BIY ise %80 olarak hesaplamıştır.





Çözümde ışın yollarının sınırladığı alan gösterilmiştir. Yataydaki düşük düğüm noktası sayısı kaynaklardan alıcılara giden ışınların köşeli bir geometriye sahip olmasını sağlamıştır. Ayrıca modelin ortasındaki yüksek hızlı yapının etkisi kısmen belli olmakla birlikte, modelin derinlerine ait bilgiler elde edilememiş, çözüm geometrinin etkisi ile dar bir derinlik içersine sıkıştırılmıştır.

Şekil 5.13'te düğüm sayısının 22x20 olarak alındığı durumda ışın yolları ve hız yapısı gösterilmektedir. Elde edilen sonuç için  $\chi^2$  değeri 0.03, BIY ise %82 olarak

hesaplandığı iterasyon final modeli olarak belirlenmiştir. Bu model, Şekil 5.12 ile karşılaştırılınca ışın yollarının modeli daha iyi temsil ettiği görülmüştür. Ortada anomali olarak konan hızlı kısım bu çözümde daha belirgin olarak elde edilebilmiştir. Bunlarla birlikte hala modelin tamamını temsil eden derinlikte çözüm elde edilemediği de görülmektedir. Özellikle orta bölümde çözülebilen derinlik 5 km kadardır.



Şekil 5.13 22x20 adet düğüm noktası ile elde edilen sonuca ait ışın yolları ve hız modeli.

Yapılan üçüncü testte düğüm noktası sayısı yoğunluğu 38x20'ye arttırılmış ve sonuç Şekil 5.14'de verilmiştir. Elde edilen en iyi sonuç için  $\chi^2$  değeri 0.018, BIY ise %96 olarak hesaplanmıştır. Düğüm sayısının arttırılması ile sonuçların modele benzerliğinin arttığı ve ışın yollarının giderek daha derinden dönmesi ile modeli daha iyi temsil edebilen sonuçların elde edildiği görülmektedir. Nitekim bu test ile modelin orta kısımları ile ilgili daha derin yapıların kontrol edilebildiği görülmüş ve ilk 10 km'lik derinlik için iyi sayılabilecek bir çözüm elde edilmiştir.



Şekil 5.14 38x20 adet düğüm noktası ile elde edilen sonuca ait ışın yolları ve hız modeli.

Şekil 5.15'de düğüm noktası aralığı ortalama istasyon aralığı olan 2 km'ye daraltılmış ve 80x20 düğüm noktasından oluşan model ile çözüm elde edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen en iyi sonuç için  $\chi^2$  değeri 0.043, BIY değeri %97 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuç için ışın yollarının taramış olduğu alan hemen hemen gerçek model ile aynı yoğunlukta ve bölge içinde gözlenmektedir. Bu sayede uzak atışlardan elde edilebilecek derinden dönen ışınların modellenebildiği görülmektedir. Bununla birlikte artan düğüm noktası sayısı ile, problemin eksik tanımlı (under determined) yapısı daha belirginleşmiştir ve üst kısımlarda düz olması gereken tabakalı hız yapısına suni ondülasyonlar eklemiştir ancak yumuşatma parametreleri ile tüm model için çözümün ıraksaması engellenmiştir. Bu iki kriter göz önüne alınarak ve sonuçların üzerindeki etkileri öngörülerek verinin değerlendirilmesi sırasında ödünleşimli bir yoruma gidilmelidir.



Şekil 5.15 80x20 adet düğüm noktası ile elde edilen sonuca ait ışın yolları ve hız modeli.

## 5.4 Çözünürlük ve Gürültü Testleri

Tomografi çalışmalarında çözülmek istenen problem ile ilgili ön bilgiler, test aşamalarında uygulamalar şeklinde denenerek elde edilecek sonuçlara benzer ve gerçekçi yaklaşımlarda bulunulabilir. Bunun için ilk olarak bölgenin hız yapısı ile ilgili varsayımlarda bulunmak gereklidir. Çalışma alanı ile ilgili ön bilgilerden Armutlu Yarımadası ve Uludağ gibi derin yapıların varlığı bilinmektedir. Bu sebeple verilerle elde edilebilecek çözünürlük, bu şekildeki yapılardan elde edilecek verilerin ters çözümlerinin tartışılması ile kontrol edilebilir.

Oluşturulan seyahat zamanlarının bölge için hakim hız yapılarını kontrol etmesi ile birlikte, doğanın bu varış zamanları üzerindeki etkilerini de öngörmek gereklidir. Bu sebeple veri üzerine eklenecek gürültünün şeçimi önem kazanmaktadır. Bu testlerde eklenecek olan gürültü 2 temele dayandırılarak oluşturulmuştur.

Bunlardan birincisi daha öncden tartışıldığı gibi uzaklığa bağı olarak ilk varış zamanlarının giderek belirgin yapılarını kaybetmeleridir. Bu şekilde bir etki artan uzaklık ile yapılabilecek okumaların daha geç olabilme ihtimalini arttırır tiptedir. İkinci olarak ise ortama, kayıtçılara, v.s bağlı olarak verilerin üzerine binmiş

durumda olan doğal ve/veya yapay gürültülerdir. Bu gürültülerin etkisi genel olarak filtreleme gibi metotlarla giderilmeye çalışılsada genel olarak hiçbir zaman tam olarak veri üzerinden kaldırılamaz. Ters çözümde asıl ilgilendiğimiz gürültünün rastgele olanıdır.

Bu sebepler göz önüne alınarak sentetik veri üzerine Şekil 5.16 ile verilen gürültü eklenmiştir.



Şekil 5.16 Veriler üzerine eklenen gürültünün uzaklığa bağlı değişimi.

Eklenecek rastgele gürültünün hesaplanması sırasında önce herbir alıcının referans noktaya uzaklığı (0'dan olan uzaklık) belirlenmiştir. 0 km'de 0, 160 km'deki değeri 100 ms olacak şekilde bir doğrusal fonksiyon ile herbir nokta için eklenecek gürültü değerleri hesaplanmış, hesaplanan değerlere 50 ms standart sapma öngörülmüştür. Elde edilen değerlerin sentetik veriye eklenmesiyle, verinin uzaklık ve gürültü ile değişimi sağlanmış ve modellenmeye çalışılmıştır.

Yapılan testlerde yer modeli iki adet sokulum içermekte ancak bu sokulumların yerleri değişmektedir (Şekil 5.17). Bu modellerde hız değişim aralığı 5–7 km/s yataydaki model sınırı 160 km ve düşeydeki sınır ise 20 km olacak şekilde seçilmiştir. Bütün modellerin çözümlerinin bulunması sırasında sabit hızlı, düşeyde
artan hız gradyanlı, v.s. gibi çeşitli başlangıç modelleri denemmiş ve benzer sonuçlar üretilmiştir. Gösterilecek olan sonuçlarda başlangıç modeline ait hız 5 km/s'lik sabit hız ile belirlenmiştir.



Şekil 5.17 Çözünürlük testlerinde kullanılacak olan 1, 2, 3 ve 4 numaralı modellere ait derinlik-hız kesitleri.

Şekil 5.17'deki bir numaralı model için elde edilen çözümde,  $\chi^2$  değeri 0.15, BIY değeri %98 olarak hesaplanmıştır (Şekil 5.18). Modele ait ışın yolları incelendiğinde 10 km derinliğin altının ışın yoğunluğu üste göre oldukça düşük olduğu görülüyor. Bunun sonucu olarak derinlerdeki hız bilgisinin güvenilirliği düşmüş ve ışınlara ait seyahat zamanlarının etkisi ile iki ana düşey hız yapısının çevresinde daha zayıf fakat anomali yaratabilecek sonuçlar üretmiştir.



Şekil 5.18 Bir numaralı modele ait ışın yolları ve hesaplanan hız modeli.



Şekil 5.19 İki numaralı modele ait ışın yolları ve hesaplanan hız modeli.

İkinci modelde (Şekil 5.19) düşey hız yapılarının aralarındaki mesafe azaltılarak etkisi gözlenmeye çalışılmıştır. Elde edilen çözümde,  $\chi^2$  değeri 0.145, BIY değeri %97 olarak hesaplanmıştır. Düşey hız yapılarının birbirlerine yakınlaştırılması ile elde edilen sonuç incelendiğinde ışın yollarının çok daha üniform bir hal aldıkları ve alanın daha iyi tarandığı görülüyor. Elde edilen hız modelinde, ayrımlılığın bir numaralı modele göre iyi sağlandığı da görülmektedir. Bunun sebebi olarak ön plana ışın yoğunluğunun düşey hız yapılarının olduğu yerde daha fazla ve düzenli olması çıkmaktadır.

Üçüncü modelde düşey hız yapılarının aralarındaki mesafe daha da azaltılarak mevcut istasyon dağılımının bu kadar yakın yapılarda çözüm gücü incelenmiştir (Şekil 5.20). Elde edilen çözümde,  $\chi^2$  değeri 0.15, BIY değeri %100 olarak hesaplanmıştır. Üç numaralı model için ilk olarak ışın yollarındaki düşük tarama alanı dikkat çekmektedir. Bu sebeple veriye bağımlı çözülen alan önceki testlere göre daha azdır. Düşey hız yapılarından sağ tarafta (105–110 km arasında) olanı daha belirginken, diğer yapının etkisi 50 km ve 85 km uzaklıklardaki hız yapısını arttırarak görülmüştür.



Şekil 5.20 Üç numaralı modele ait ışın yolları ve hesaplanan hız modeli.

Son modelde ise, düşey hız yapılarının pozisyonları daha uzak ofsetlerde (85 km ile 145 km uzaklıklarda) oluşturularak profil verisinin uç kısımlarının etkilerinin bütünüyle anlaşılması planlanmıştır (Şekil 5.21). Çözümde  $\chi^2$  değeri 0.11, BIY değeri %100 olarak hesaplanmıştır. Yaklaşık 145 km uzaklıkta yer alan yapının seyahat eden ışınların o bölgedeki sığ penetrasonu sebebiyle model üzerindeki etkisi oldukça azalmıştır. Bu sebeple modelin ortalarında yer alan diğer yapının çözümlülüğü elde edilecek olan modele ait sonucu ağırlıklı olarak etkiler durumdadır. Bu bölge için ışın yollarının yoğun oluşu çözümü güçlendirmiştir.





Yapılan tüm testlerde ışın yollarının kontrolü etkisinde olmayan alanların başlangıç modeline bağlı çözümü ön plana çıkarttığı görülmüştür. Bu sebeple çalışma alanını en iyi şekilde temsil ettiği düşünülen bir numaralı modelde daha iyi bir başlangıç modeli denenmiştir. Başlangıç modeli için düşeydeki hız değişimi yüzeyde 5 km/s'den 20 km derinlikte 7 km/s'ye varacak şekilde artım gösterir şekilde hazırlanmıştır. Çözümde (Şekil 5.22)  $\chi^2$  değeri 0.165, BIY değeri %98 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.22 Bir numaralı modelin daha iyi bir başlangıç modeli ile çözümüne ait ışın yolları ve hesaplanan hız modeli.

Elde edilen çözüm için ışın yollarının dağılımı oldukça üniform yüksek bir yüzde ile temsil etmiştir. Bunların sonucu olarak düşey hız anomalilerinin yerleri çözümde iyi şekilde tespit edilmiş ve önceki testlerde diğer alanlarda görülen hız değişimleri ve ikincil yapılar bu modelde azalmıştır (Şekil 5.22). Bu modeller iki ana unsuru ön plana çıkarmaktadır.

- 1. Çözümde kaynaktan alıcılara giden ışınların yoğun şekilde taradığı alanların çözünürlüğü diğer alanlara göre daha iyi olmaktadır.
- Ters çözüm sonucunda elde edilen final modelin tekil olmaması (nonuniqueness), veri ile çözülemeyen alanlarda yapay hız anomalileri oluşturabilmektedirler. Bu alanlarda çözüm başlangıç modeli ile yumuşatma parametrelerinin kontrolünde gerçekleşmektedir.

## 6. MUDARLI-GEBZE-ORHANELİ SİSMİK KIRILMA/GENİŞ AÇILI YANSIMA VERİLERİNİN TERS ÇÖZÜMÜ

Tablo 6.1 Mudarlı, Gebze, Orhangazi,	Iğdır,	Çaybaşı,	Orhaneli	patlatmalarına	ait Pg,
PmP ve Pn varışlarına ait okuma değer	leri.				

VFR	Okunan Pg	Okunan PmP	Okunan Pn	
	varışı sayısı	varışı sayısı	varışı sayısı	
MUDARLI	19	12	-	
GEBZE	76	24	-	
ORHANGAZİ	73	12	-	
IĞDIR	71	21	-	
ÇAYBAŞI	41	18	-	
ORHANELİ	62	31	8	
TOPLAM	<u>342</u>	<u>118</u>	<u>8</u>	

Tablo 6.1'de Mudarlı – Orhaneli profili üzerinde yapılan atışlar ve herbir atıştan elde edilen okumaların adetleri verilmektedir.

Toplam 342 tane Pg varışı, 118 PmP varışı ve 8 tane Pn varışı belirlenebilmiştir. Verilerin sınıflandırılmasında düz çözüm yöntemini daha efektif kullanabilmek için Mudarlı dışındaki tüm patlatmalar kuzey ve güneyindeki kayıtlar olmak üzere eğim aşağı ve eğim yukarı patlatma gibi gruplandırılmış, bu şekilde kaynaktan alıcılara ulaşabilen ışınların sayısının arttırılması hedeflenmiştir.

Alıcıların ve patlatma noktalarının yükseklik bilgileri, 1/25000 ölçekli haritalarda ölçülen yükseklik değerleri ve alıcıların olduğu noktaların yükseklik bilgilerinin birarada kontrollü kullanılması ile oluşturulmuş ve ters çözümle bulunması hedeflenen modelin en üst tabakası olarak girilmiştir.

Verilerin gruplandırılarak programda tanımlanması ve topoğrafya bilgisinin (Şekil 6.1) ters çözümde tabaka olarak tanıtılmasından sonra, ters çözüm için başlangıç modelinin saptanmasına yönelik çalışmalar yapılmıştır. Klasik kırılma verisinin

analizinden elde edilen tabakalı model (Şekil 6.2) başlangıç modeli olarak kullanılmıştır.



Şekil 6.1 Mudarlı – Gebze – Orhangazi – Iğdır – Çaybaşı – Orhaneli profili boyunca topoğrafya.

Profil boyunca geçilen yapıların yanal yöndeki farklılaşması, tek bir derinlik ve hız için tabaka elde edilmesine imkan vermemiştir. Bunun yerine herbir patlatma için zaman - uzaklık grafiklerindeki kuzey ve güney varış zamanlarından birinci ve ikinci tabakanın hızları ile kesiş zamanları bilgileri elde edilerek, kısmi tabaka derinlikleri elde edilmiştir.



Şekil 6.2 Tüm atışlar için kırılma verilerinden yorumlanmış basit hız ve derinlik bilgileri.

Şekil 6.2'den elde edilen hız, derinlik ve kesiş zamanları birarada Tablo 6.2'de gösterilmiştir. Kayıtlarda genellikle iki tabaka için yorum yapılabilmiş ve buna bağlı olarak üst tabakanın hız ve derinlik bilgileri elde edilebilirken, alt tabaka için tek bir hız değeri hesaplanabilmiştir.

PATLATMA NOKTASI	<b>V</b> <sub>1</sub> (km/s)	V <sub>2</sub> (km/s)	$T_{i}(s)$	h (km)
Mudarlı (güney)	4.7	6.2	0.5	1.7
Gebze(kuzey)	4.4	6.2	0.45	1.4
Gebze(güney)	4.3	6.2	1.3	3.8
Orhangazi(kuzey)	4.3	6.2	0.9	2.6
Orhangazi(güney)	4.7	6.2	1.15	3.9
Iğdır(kuzey)	4.4	6.2	0.8	2.4
Iğdır(güney)	4.0	6.2	1.25	3.2
Çaybaşı(kuzey)	4.1	6.2	0.5	1.3
Çaybaşı(güney)	5.0	6.2	0.3	1.2
Orhaneli(kuzey)	5.2	6.2	0.35	1.2

Tablo 6.2 Tüm patlatmalar için elde edilen hız bilgileri ve tabaka kalınlıkları.

Elde edilen hızlar hakkında; Mudarlı - Gebze arasında görülen kireçtaşı mostraları, Gebze -Orhangazi arası bölgenin hız yapısını kontrol eden sedimanlar, Orhangazi -Iğdır arasındaki Bursa baseninin düşük hız yapısı ve Orhaneli bölgesinde yüzeyde görülen mostralar ile uyum içindedir. Bu sebeple ters çözümde başlangıç modeli olarak hesaplanan bu hızlar kullanılacaktır.

## 7. SONUÇLAR ve TARTIŞMALAR

Şekil 7.1'de Mudarlı – Orhaneli profili boyunca sismik verilerin ters çözümünden elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. Şekilde profil boyunca topoğrafya bilgisi ve profile denk gelen önemli yapılar ve yerleşim bölgeleri gösterilmiştir. Kabul edilebilir çözümün elde edilebildiği alanlarda ışınların yoğun olarak geçtiği gözlenmiş, diğer alanlar ise siyaha boyanarak kapatılmıştır.



Şekil 7.1 Üst kabuk için elde edilen tomografik hız modeli.

Model boyutları yatayda 160 km ve düşeyde 14 km olarak belirlenmiş, çözünürlük testlerinde elde edilen yapılan testlerde gözönüne alınarak yatayda 2 km, düşeyde ise 1 km lik düğüm noktası aralıkları seçilmiştir. Model değişimi ilk iterasyonlarda daha fazla olurken ilerleyen iterasyonlarda giderek azalmıştır. İlk model için  $\chi^2$  değeri 710 hesaplanırken, final model için ise 1.10 seviyesinde sabitlenmiş ve elde edilen model için 6 patlatma noktasından çıkan ışınlar için BIY %90 olarak hesaplanmıştır. Final modeline ait ışın yolları ve veri ile modelden türetilen varış zamanları Şekil 7.2 de gösterilmektedir.

Şekil 7.2'deki ışın yollarından da görüldüğü gibi ilk 10-12 km'lik derinlikte çözüm, ışın yollarının kontrolünde olacaktır. Diğer kısımlarda testlerde de bahsedildiği gibi hız değerleri başlangıç modeli ve yumuşatma parametrelerinin kontrolünde hesaplanmıştır.



Şekil 7.2 (a) Veriye ait (yeşil), ve final modelden elde edilen (kırmızı) ilk varışların 8 km/s indirgeme zamanı ile gösterimi; (b) Final model için elde edilen ışın yolları.

Bu bölüme kadar yapılan çalışmalarda bölgenin genel hız yapısı hakkında bazı ön bilgiler derlenmiş ve tomografik ters çözümle ilgili başlangıç modeli, model sınırları ve modelleme stratejilerinin etkileri belirlenmiştir. Bu bilgiler kullanılarak üst kabuğa ait iki farklı yaklaşım ile bölgeyi en iyi modelleyen hız yapısı bulunmaya çalışılmıştır. Bunlar, bölgeyi yatay tabakalardan oluşan bir hız yapısı ile temsil eden 1-boyutlu yatay tabakalı hız modeli ile, yatayda ve düşeyde hız değişimlerinin olabileceği 2-boyutlu hız modelidir.

Bir boyutlu yatay tabakalı hız modelinin hesaplanmasında amaç, büyük ölçekli çalışmalarda veya çalışılan bölgenin civarında meydana gelen depremlerin anlaşılmasında kullanılabilecek olan, bölgenin ortalama hız yapısını temsil edebilecek bir yapının elde edilmesidir. Bu sebeple farklı yumuşatma, düzenleme parametreleri kullanılarak birçok çözüm elde edilmesine rağmen, kabul edilebilir hata sınırları içinde bölgeyi temsil edebilen bir yatay tabakalı hız yapısına ulaşılamamıştır. Bunun sebebi, toplanan profil verisinin kuzeyden güneye birçok farklı karakterdeki yapıyı kesmesi ve buralardaki farklı derinlik-hız yapılarının varlığıdır.

Çalışma alanını temsil edebilecek 2-boyutlu hız modelinin belirlenmesi için yatay ve düşey yönde hız bilgilerinin değiştirilmesine izin verilerek sonuçlar üretilmiştir. İlk denemelerde birçok gradyanlı ve sabit hızlı başlangıç modelleri ile yumuşatma parametreleri kullanılmış ve sonuçlar kıyaslanmıştır. Bölgeyi en iyi temsil edecek başlangıç modeli ise verilerden elde edilen hız modelinin, çalışma alanı yakınlarında yapılan önceki çalışmalardan elde edilmiş kabuk hızı çalışmalarından ve jeoloji bilgilerinin birarada kullanılması ile derlenmiş ve sonuçların yorumlanmasında bu verilerle kıyaslamalar yapılmıştır (Şekil 7.3).



Şekil 7.3 (a) Mudarlı-Gebze-Orhaneli profilini ve 2001 yılında yapılan SEISMARMARA çalışmasını (Karabulut ve diğ., 2003) gösterir harita. (b) Uludağ ve civarının detay jeolojisi ile bölgeye denk gelen istasyon dağılımı (kırmızı noktalar) (Ketin, 1984'den derlenmiştir); (c) İzmit körfezi ile Uludağ arası detaylı jeolojisi ve bölgeye düşen istasyon (kırmızı noktalar) dağılımı (Yılmaz, 1990'dan derlenmiştir).

Şekil 7.1 incelendiğinde, Mudarlı'dan İzmit körfezine ilk 3.5 km için ortalama 4.5 - 6.0 km/s, sonrasında ise 6.0–6.5 km/s gibi yüksek hıza sahip yapı gözükmektedir. Bu sonuçla bölgeyi temsil eden Paleozoik yaşlı kayaçların çalışma alanında oldukça üniform bir yapıda olduğu anlaşılmaktadır. İzmit körfezi ile ani olarak hız değerlerinde düşüş gözlenmiş ve 10–12 km lik bir zonda yapısını koruduğu görülmektedir. Armutlu yarımadasına ait yapıların etkisi KAF'nın etkisini ani olarak sonlandırmaktadır. Yüzeyden 3 km'lik derinliğe kadar 4.4 km/s ile 6.0 km/s arasında değişen hız yapısı belirlenmiş, daha derinlerde hızın derinlikle değişimi azalarak yaklaşık 12 km derinlikte 6.6 km/s'lik klasik kabuk modelleri için yüksek sayılabilecek hızlar elde edilmiştir.

Profilin 55–60 km'lerinden 100 km sonrasında Uludağ ile başlayan yapılara kadar bölgenin yüzey jeolojisinden, İznik gölü civarındaki sedimanlar, güneye gidildikçe metamorfik yapılar, sedimanlar ve volkanik içerikli malzemelerin görüldüğü ve sınırlarının belirlendiği çalışmalar yapılmıştır (Yılmaz ve diğ., 1995). Bu bölgede Orhangazi yakınında bulunan patlatma noktası ve civarındaki 6–7 istasyon metamorfiklerin üzerinde yer almış ve yüzeyde ortalama 5 km/s gibi bölge için yüksek hız belirmiştir. İznik gölünün batısında kalan sediman karakterli bölge ve güney sınır ile KAF'nın güney kolunun geçilmesi yeniden İzmit körfesine benzer hızların görülmesine sebep olmuş ve yüzeyden 12–13 km derinlere kadar 3.5–5.7 km/s'lik hızlar elde edilmiştir. Gemlik körfezinin güney sınırının alt kesimlerine geçildiğinde yaklaşık 10 km için volkanik malzemelerin olduğu bir bölgede hız değerleri yeniden yüksek yapıya ulaşmış, 4 km derinlikte 6 km/s lik hızlar belirmiştir.

Bursa ili civarında yüzeyden tespit edilen miyosen yaşlı genç çökel malzemeler için 2.5 km civarında bir derinlik belirmektedir. Bu derinlikteki hız 4.0 km/s civarındayken 2.5 km'den derinde hız değeri ani değişim göstererek 5 km'lik derinlikte 6.0 km/s hızına ulaşmaktadır. Bu bilgi Bursa ilinin altındaki yaklaşık 2.5 km'lik bir gevşek malzemenin varlığını gösterir yapıdadır. Bursa baseninde 200 m civarında olan yükseklik Uludağ yapısının başlaması ile çalışma alanının en yüksek noktaları olan 1700 m'lere ulaşır. Burası ile ilgili yapılan jeolojik çalışmalardan granitik bir çekirdek ve çevresindeki gnays, amfibolit, kireçtaşları ve metamorfiklere işaret edilmiştir (Ketin, 1984). Bu yapıların etkisi Uludağ ve altındaki yüksek hızlarla

doğrudan ilişkilendirilebilir tiptedir. Çalışma alanının en yüksek hızları 1.5 km derinlikte 6.0 km/s ile bu bölgede görülmüştür.

Uludağ'ın güneyinde Nilüfer çayının yakınları için hız yapısında belirgin bir şekilde düşme görülmüştür. Çaybaşı patlatmasının da yapıldığı bu alanda kısmi bir düşük hızlı yapı belirmiştir. Benzer şekilde Çaybaşı patlatmasına ait atış grubuna bakıldığında da oluşturulabilen enerjinin uzak kayıtçılarda okunamadığı gözlenmiştir. Bu da bölgede kalın sayılabilecek olası bir örtü tabakasını işaret etmektedir. Devamında ise Sakarya kıtası ismi ile anılan yapıya girilmektedir. Bölge için elde edilen hızlar 1 km'lik derinlikte 5.2 km/s gibi yüksek değerlere sahiptirler.

Elde edilen çözüm, Karabulut ve diğ., 2003 sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Burada kullandığımız veri seti Mudarlı–Gebze–Orhaneli sismik hattının 25 km batısında, yaklaşık olarak aynı doğrultulu ve 75-80 km'lik kısımda ortak olarak İstanbul– Zonguldak Zonu, İzmit Körfezi, Armutlu Yarımadası, Gemlik körfezi ve Sakarya kıtasına ait ana hız yapılarını geçmektedir (Şekil 7.1).



Şekil 7.4 SEISMARMARA verilerinin tomografik ters çözüm sonuçları ve Mudarlı– Orhaneli Sismik Kırılma/Geniş Açılı Yansıma profili verilerinden elde edilen seyahat zamanı ters çözüm sonuçları (Benzer yapıların geçildiği alanlar kesikli çizgiler ile sınırlandırılmıştır.).

Şekil 7.4'te üst kabuk için elde edilen sonuçlar Karabulut ve diğ., (2003)'e ait tomografi sonuçlarıyla birarada görülmektedir. İki çalışma için kullanılan kaynak tipleri ve alıcı geometrileri birbirinden oldukça farklıdır. Sözkonusu çalışmada kaynak olarak İzmit ve Gemlik körfezinde hava tabancaları kullanılmış ve karada 0.5 ile 2 km arasında değişen aralıklardaki istasyonlarla veriler toplanmıştır. Model için ters çözümde kullanılan hücre boyutları yatayda 1 km, düşeyde ise 0.5 km'dir. İlk 6 km derinlikte güvenilir çözümün elde edebilmişlersede, yakın offset verilerinin olmaması nedeniyle 1 km'den daha sığ kısımlarda hız bilgisi elde edilememiş ve 6 km'den daha derinlerde de ışın yoğunluğunun güvenilmeyecek kadar az olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle her iki profildeki ortak hız unsurları olan Gebze, İzmit körfezi ve Armutlu yarımadasının 1-5 km derinlikler için hız yapılarındaki uyumluluk dikkate değer bir sonuç olarak göze çarpmaktadır. Daha derinle ilgili çözümlerin farklılıklarında buralardaki düşük ışın yoğunlukları ve programların kullandıkları farklı yumuşatma algoritmalarının etkili olduğu söylenebilir.

Moho ve alt kabuk incelemesinde 118 PmP varışı ile 8 Pn varışı kullanılmıştır ve Bölüm 5'te bahsedilen her iki yaklaşım ile çözüm elde edilmeye çalışılmıştır. İlk yaklaşımda, önceden hesaplanan üst kabuk hız yapısı sabitlenip, PmP ve Pn varışları ile alt kabuk ile Moho çözümlenmeye çalışılmış; diğerinde ise elde edilen üst kabuk modeli ve ortalama alt kabuk modeli başlangıç modeli oluşturularak Pg, PmP ve Pn varışları birarada kullanılmış, tüm kabuk ve Moho arayüzeyi hakkında çözümler elde edilmiştir. Her iki model için de model sınırları yatayda 160 km ve düşeyde 38 km olarak belirlenmiş, yatayda 4 km, düşeyde ise 2 km'lik düğüm noktası aralığı kullanılmıştır. Başlangıç modelleri için Moho sınırı olarak Zor (2002)'de bölgeyi temsil eden ortalama 30 km'lik derinlik girilmiş, alt kabuk (10–30 km) için ise 6.8 km/s'den 7.4 km/s'ye doğrusal değişim gösteren kabuk modeli seçilmiştir. Moho altında sabit 8 km/s lik hız değeri kullanılmıştır.

Üst kabuğun sabitlenmesi ile yapılan ters çözümde alt kabuğun hızının düşey yönde değişimine izin verilirken yatay değişim engellenmiştir. Bu sayede yansıma ve birkaç kırılma verilerinin Moho arayüzeyinin değişimini ve ortalama alt kabuk hızını modellenmesi amaçlanmıştır. Elde edilen en iyi çözüm için  $\chi^2$  değeri 1.18 ve BIY değeri %91 olarak elde edilmiştir. Yansıma varışları için 150 ms'lik belirsizlik miktarları kullanılmış ve düz çözümdeki iki nokta ışın izleme için 100 m'lik tölerans öngörülmüştür. Şekil 7.5 ile final modelin rezidüel, seyahat zamanları, ışın yolları ve tomografik ters çözümü gösterilmiştir.



Şekil 7.5 (a) Okuma hataları; (b) Veri (yeşil) ve model (kırmızı) için seyahat zamanları (8 km/s indirgenmiş zamanla çizilmiştir); (c) Kullanılan varışlar için ışın yolları; (d) Sabit hızlı üst kabuk ve yatay tabakalı alt kabuk için final modeli (Moho hızı ters çözüme katılmamış, 8 km/s olarak sabitlenmiştir). Çözülmeyen alanlar siyah ile kapatılmıştır.

Final modelde güney kısmındaki yansımaların erken gelişleri Moho arayüzeyinin 25 km civarındaki derinliğe yükselmesine sebep olmuştur. Çözülebilen diğer kısımlarda ise Moho'nun ortalama derinliği 30 km civarındadır. Moho derinliğine alt kabuk için 6.9 km/s'den 7.1 km/s'ye artan alt kabuk hızı eşlik etmektedir. Şekil 7.5 b'de seyahat

zamanlarına bakıldığında çözüme ait seyahat zamanları ile veri ortalamada bir bütünlük sağlamış, ancak Şekil 7.6 a'da belirgin olarak görüldüğü gibi rezidüel miktarları ± 400 ms'lere ulaşmıştır. En fazla yansıma verisi okuması yapılan Orhaneli patlatmasına ait hiçbir varış, elde edilen final model için kullanılamamıştır. Bu hız yapısı ve/veya arayüz derinliği ile ilgili uyumsuzluğu gösterir bir sonuç olarak belirmektedir. Tüm sonuçlar birarada değerlendirilince bölgenin alt kabuk yapısının yatay tabakalı olarak elde edilmesinin güç olduğu ve profilin güneyinde 25 km'lere yükselen kabuk kalınlığı karakterinin tam olarak belirlenememiş hız yapısının etkisinde olduğu düşünülmektedir.

İkinci yaklaşımda üst ve alt kabuğun tek bir tabaka olarak değerlendirilmiş, PmP ve Pn varışlarına tüm Pg varışları da eklenerek, hız yapısı ve Moho arayüzeyi tespit edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen en iyi çözüm için  $\chi^2$  değeri 1.2 ve BIY değeri %92 olarak elde edilmiştir. Yansıma varışları için Orhaneli PmP varışlarında ve Pn varışlarında 100 ms, diğer PmP varışlarında 150 ms'lik belirsizlik değerleri kullanılmıştır. Önceki modelde olduğu gibi iki nokta ışın izleme algoritmasında 100 m'lik tölerans öngörülmüştür. Şekil 7.6 ile final modelin rezidüel, seyahat zamanları, ışın yolları ve tomografik ters çözümü gösterilmiştir.

Final model için üst kabukta tartışılan ana hız yapılarının belirginliğinin yansıma verilerinden de elde edilmesi iki sonucun birbirini desteklediğini göstermektedir. Moho için başlangıçta tanımlanan 30 km'lik derinlik, final modelde 33 km civarlarında düze yakın bir geometride belirmiştir. Önceki yaklaşımda görülen en büyük sorunlardan biri olan Orhaneli PmP varışlarının modellenebilmesi de bu sonuç ile mümkün olmuştur ve hata miktarları diğer varışlara göre 50 ms daha dar aralıktadır. Modelin veri ile uyumunun artmasını sağlayan değişiklik modelin güney kısmında yaklaşık 10 km civarından başlayıp kuzeye doğru yaklaşık 10<sup>°</sup>ilik bir açı ile dalan ve Armutlu yarımadasının güney sınırına kadar devamlılığı gözlenebilen hızlı bir yapı olduğu belirlenmiştir.



Şekil 7.6 (a) Okuma hataları, (b) veri (yeşil) ve model (kırmızı) için seyahat zamanları (8 km/s indirgenmiş zamanla çizilmiştir), (c) kullanılan varışlar için ışın yolları ve (d) final modeli.

Genel olarak bakıldığında; ilk 10 km'lik derinlik için elde edilen hız yapısı, kontrol parametreleri ( $\chi^2$ , BIY) ve yapılan testlerin sonuçları göz önüne alınarak, toplanan verilerin kontrolünde iyi şekilde tespit edilmiştir. İlk bakışta bölgenin hız yapısındaki ana değişimlerin, Gebze ve kuzeyi, Armutlu Yarımadası, Uludağ ve KAF'nın kuzey ve güney kollarının etkisinde olduğu görülmektedir. Toplanan kırılma verilerinden de açıkça görüldüğü gibi (Şekil 6.2), Bursa baseninden kuzey ve güneye ilerlenince hız belirgin şekilde artmakta ve bu, bölgenin kalın alüvyonel malzemelerle örtülü

olduğunu işaret etmektedir. Bu bölgede yapılacak yerel sismik risk çalışmalarının önemi ve gerekliliği, çalışmadan çıkan önemli sonuçlardan biri olarak göze çarpmaktadır. Moho süreksizliğinin belirlenmesine yönelik çalışmalardan 33 km'lik yaklaşık bir derinlik elde edilebilmiş, ancak güneyden kuzeye doğru dalımlı bir yapınında varlığı belirgin olarak saptanmıştır. Bu yapının kuzeydeki sınırları belirli olmakla birlikte, güneyde profilin boyu yetersiz gelmiştir. Doğru bir yorum yapılabilmesi için bu çalışmanın Uludağ'ın güney sınırından başlayan ve uzunluğu güneye doğru en az 200 km olan benzer bir profil ile desteklenmesi gereklidir. Bu uzunluktaki profiler ile Moho kırılmalarıda belirginleşecek ve daha iyi yorumlanabilecektir. Kayıtlara bakıldığında incelenmesi gereken bir diğer husus olarak Çaybaşı patlatması görülmektedir. Nilüfer çayının yakınlarında yapılan patlatmanın kayıtlarının zayıf olması beklenenden az dinamit patlamasına bağlı olabileceği gibi, patlatma noktasının olası bir deposit alanının içinde olmasındanda kaynaklanabilir. Özellikle tomografi sonucunda patlatma noktasının altında görülen düşük hızlı yapının değerlendirilmesi sırasında bahsedilen hususlara dikkat edilmelidir.

Halen çok sınırlı bilgilere sahip olduğumuz Türkiye'nin kabuk yapısının anlaşılmasında, tez çalışmam sırasında kullandığım yöntem ve benzerlerinin getirebileceği faydalar apaçık görülmektedir. Özellikle kontrollü kaynak sağlanması ve başarıyla patlatılması konularındaki gelişmeler bu tip çalışmalarda büyük ilerlemelere imkan doğuracak niteliktedir.

## KAYNAKLAR

- **Bekler, T.**, 1997. The Crustal Structure of the Agean Region by using Reflectivity modelling, *MSc Thesis*, Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, İstanbul.
- Blundell, D.J., 1999. The legacy of the European Geotraverse, *Tectonophysics*, **314**, 7-16.
- Cerveny, V., 1987. Ray tracing algorithms in three-dimensional laterally varying layered structures, in *Seismic Tomography, with Applications in Global Seismology and Exploration Geophysics*, Ed. Nolet, G., Reidel, Dordrecht.
- Crampin, S. and Ücer, S.B., 1975. The seismicity of the Marmara Sea Region of Turkey, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 40, 269-288.
- Çoruh, C., Costain, J.K., Demirbağ, E., and Saatçılar, R., 1990. Seismic imaging of crustal blocks: preliminary results from the First Turkish Geotravers, EOS Trans. AGU, 71, Fall Meet Suppl., 557.
- Erendil, M., Göncüoğlu, M.C., Tekeli, O., 1991. Armutlu Yarımadası jeolojisi, MTA Raporu, Rapor No: 9165, Ankara.
- Genç, Ş., 1986, Uludağ-İznik gölü arasının jeolojisi, MTA Raporu, Rapor No: 7853, Ankara.
- Guterch, A., Grad, M., Keller, G.R., Organizing Commitee-Posgay, K., Vozar, J., Spicak, A., Brueckl, E., Hajnal, Z., Thybo, H., Selvi, O., and CELEBRATION 2000 Experiment Team, 2001. Seismologists Celebrate The New Millenium with an Experiment in Central Europe, *EOS Trans. AGU*, 82, 529-535.
- Guterch, A., Grad, M., Keller, G.R., Posgay, K., Vozar, J., Spicak, A., Brueckl,
   E., Hajnal, Z., Thybo, H., Selvi, O., and CELEBRATION 2000
   Experiment Team, 2000. Huge Seismic Experiment in Central Europe, *Geologica Carpathica*, 51, 413-414.

- Gürbüz, C. and Evans, J.R., 1991. A seismic refraction study of the western Tuz Gölü Basin, Central Turkey, *Geophys J. Int.*, **106**, 239-251.
- Gürbüz, C. ve Üçer, B., 1980. Anadolu kavağında yapılan taş ocağı patlatmalarından elde edilen sismik kayıtların değerlendirilmesi, *Deprem Araştırma Enstitüsü Bülteni*, **49**, 39-49.
- Hobro, J.W.D., Singh, S.C., and Minshull, T.A., 2003. Three-dimensional tomographic inversion of combined reflection and refraction seimic travel-time data, *Geophys. J. Int.*, **152**, 79-93.
- Hobro, J.W.D., 1999. Joint Interface Velocity Estimation, *Ph.D. Thesis*, Department of Earth Sciences, University of Cambridge, England.
- Hole, J.A., 1992. Nonlinear high-resolution three-dimensional seismic travel time tomography, J. Geophys. Res., 97, 6553-6562.
- Julian, B.R. and Gubbins, D., 1977. Three-dimensional seismic ray tracing, J. *Geophys.*, 43, 95-113.
- Karabulut, H., Özalaybey, S., Taymaz, T., Aktar, M., Selvi, O., and Kocaoğlu,
  A., 2003. A tomographic image of the shallow crustal structure in the Eastern Marmara, *Geophysical Research Letters*, 30, 24, 2277, SDE 10, 1-4.
- Karahan, A.E., Berckhemer, H., Baier, B., 2001. Crustal Structure at the western end of the North Anatolian Fault Zone from deep seismic sounding, *Annali di Geofisica*, 44, 49-68.
- Kaya, O. ve Lys, M., 1980. İstanbul Boğazının batı yakasında (Kilyos) yeni bir Triyas bulgusu, MTA Bülteni, 93-94, 20-27, Ankara.
- Ketin, İ., 1984. Türkiye'nin Bindirmeli-Naplı Yapısında Yeni Gelişmeler ve Bir Örnek: Uludağ Masifi, Ketin Sempozyumu, İTÜ, İstanbul, 19-36.
- Klimes, L. and Kvasnicka, M., 1994. 3-D network ray tracing, *Geophys. J. Int.*, 116, 726-738.
- Kulhánek, O., 1990. Anatomy of Seismograms, Developments in Solid Earth Geophysics, 18, Elsevier, Amsterdam – Oxford – New York - Tokyo.
- Lutter, W.J., Fuis, G.S., Murphy, J.M., Okaya, D.A., Clayton, R.W., Davis,
   P.M., Godfrey, N.J., Ryberg, T., Prodehl, C., Simila, G., Thybo,
   H., Langenheim, V.E., Christensen, N.I., Thurber, C.H., 2000.
   Preliminary tomographic images from the Los Angeles Region

Seismic Experiment, Phase II (LARSE II), Southern CA, *EOS Trans. AGU*, **81**, Fall Meet Suppl., F855.

- Moser, T.J., Nolet, G., and Snieder, R., 1992. Ray bending revisited, Bull. Seism. Soc. Am., 82, 259-288.
- Moser, T.J., 1991. Shortest path calculations of seismic rays, *Geophysics*, 56, 59-67.
- Özhan, G., Kavukçu, S., Çete, M. ve Kurtuluş, C., 1985. Marmara Denizi, İzmit Körfezi, yüksek ayrımlı sığ sismik etüdü raporu, *MTA raporu*, Rapor No:7836, Ankara.
- Özalaybey, S., Ergin, M., Aktar, M., Tapirdamaz, M., C., Biçmen, F., Yörük, A., 2002. The 1999 İzmit Earthquake sequence in Turkey: seismological and tectonic aspects, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **92**, 376-386.
- Pharaoh, T.C., 1999. Palaezoic terranes and their lithospheric boundaries within the Trans-European Suture Zone (TESZ): a review, *Tectonophysics*, 314, 17-41.
- Ryberg, T., Fuis, G.S., Murphy, J.M., Okaya, D.A., Clayton, R.W., Davis, P.M.,
  Godfrey, N.J., Prodehl, C., Simila, G., Keller, G.R., Thygesen, K.,
  2000. Preliminary reflection images from the Los Angeles Region
  Seismic Experiment, Phase II (LARSE II), Southern CA, *EOS Trans. AGU*, **81**, Fall Meet Suppl., F855.
- Scales, J.A. and Gersztenkorn, A., 1988. Robust methods in inverse theory, *Inverse Problems*, 4, 1071-1091.
- Şengör, A.M.C. and Yılmaz, Y., 1981. Tethyan evolution of Turkey. A plate tectonic approach, *Tectonophysics*, 75, 181-241.
- Şengör, A.M.C., 1979. Mid-Mesozoic closure of Permo-Triassic Tethys and its implications, *Nature*, 279, 590-593.
- **Tarantola, A.**, 1987. *Inverse Problem Theory: methods for data fitting and model parameter estimation*, Elsevier, Amsterdam.
- Trinks, I., 2002. Travel time tomography using irregular parameterized grids: solving the inverse problems, *Lithos Science Report*, 4, 35-40, Cambridge, UK.
- Um, J. and Thurber, C., 1987. A fast algorithm for two-point seismic ray tracing, Bull. Seism. Soc. Am., 77, 972-986.

- Yalçın, M.N., ve diğ., 1997. Kırılma sismiği yöntemiyle kabuk yapısının araştırılması (Akyazı-Taraklı Profili), TÜBİTAK-YDABÇAG Raporu, Rapor No:229/G, Ankara.
- Yılmaz, Y., 1990. Allochthonous terranes in the Tethyan Middle East: Anatolia and the surrounding regions, *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 331, 611-624.
- Yılmaz, Y., Genç, Ş.C., Yiğitbaş, E., Bozcu, M., Yılmaz, K., 1995. Geological evolution of the late Mesozoic continental margin of Northwestern Anatolia, *Tectonophysics*, 243, 155-171.
- **Yurtsever, A.**, 1996. İstanbul Yarımadasının (1/50.000 ölçekli haritasının) Jeolojisi, *MTA Raporu*, Rapor No: 9989, Ankara.
- Zelt, C.A., 1999. Modelling strategies and model assessment for wide-angle seismic traveltime data, *Geophys. J. Int.*, **139**, 183-204
- Zelt, C.A., 1994. 3-D velocity structure from simultaneous traveltime inversion of in-line seismic data along intersecting profiles, *Geophys. J. Int.*, 118, 795-801.
- Zor, E., 2002. The Shear Wave Velocity Structure of The Eastern Marmara Region by Using Receiver Function Analysis, *Ph.D. Thesis*, Boğaziçi University, İstanbul.

EKLER



filtre kullanılmıştır.



















Şekil A.6 Orhaneli Patlatmasının tüm kayıtçılardaki sıralı görünümü (Varışların belirginleşmesi için 2-18 Hz bant geçirimli filtre kullanılmıştır)

	Enlem (°)	Boylam (°)	Yükseklik (m)	Patlayıcı Miktarı (kg)	Kuyu Derinliği (m)	Patlayıcı Tipi
SP1	29.57175	41.01890	300	250	60	Sismik Dinamit
SP2	29.45910	40.78830	250	450	60	Sismik Dinamit
SP3	29.29780	40.47440	295	250	60	Sismik Dinamit
SP4	29.20262	40.26400	720	250	60	Sismik Dinamit
SP5	29.08735	40.04135	260	250	60	Sismik Dinamit
SP6	28.91950	39.73080	800	450	60	Sismik Dinamit

Tablo A.1 Patlatma noktalarının koordinatları, patlayıcı miktarları, patlatma derinlikleri ve patlayıcı tipleri.

Tablo A.2 Patlatma zamanları.

İstasyon Kodu	Patlatma Zamanı (GMT)
SP1	2000:293:22:10:58.184
SP2	2000:323:23:20:29.244
SP3	2000:294:02:10:29.516
SP4	2000:302:23:40:30.132
SP5	2000:302:22:10:53.680
SP6	2000:324:03:30:14.900

#	Boylam	Enlem	Yükseklik	#	Boylam	Enlem	Yükseklik
#	(°)	(°)	( m )	#	(°)	(°)	( m )
1	41.01893	29.57182	302	41	40.39905	29.25715	260
2	41.00240	29.56110	216	42	40.38443	29.23968	578
3	40.99010	29.56128	266	43	40.36377	29.24223	584
4	40.98198	29.55355	219	44	40.35467	29.23853	377
5	40.97158	29.54970	290	45	40.33613	29.23178	568
6	40.96508	29.54463	320	46	40.31560	29.22068	728
7	40.95637	29.54177	274	47	40.30552	29.21737	720
8	40.94018	29.53347	193	48	40.28397	29.20535	616
9	40.93123	29.52800	202	49	40.26412	29.20262	158
10	40.90102	29.51340	210	50	40.25253	29.18660	114
11	40.89470	29.50895	223	51	40.23702	29.18033	110
12	40.88075	29.50357	229	52	40.22732	29.17638	114
13	40.87138	29.49797	207	53	40.20860	29.16818	146
14	40.86373	29.49475	203	54	40.19425	29.15758	135
15	40.85298	29.48965	205	55	40.17842	29.14985	850
16	40.84440	29.48453	172	56	40.16160	29.14133	1200
17	40.82418	29.47627	205	57	40.14118	29.13605	1718
18	40.81513	29.47050	223	58	40.11858	29.11850	1800
19	40.79442	29.45995	210	59	40.11017	29.09330	920
20	40.78853	29.45873	190	60	40.07983	29.09862	624
21	40.77003	29.44905	120	61	40.06735	29.09537	915
22	40.67973	29.40658	62	62	40.04140	29.08743	625
23	40.66925	29.40105	240	63	40.02892	29.07283	730
24	40.65217	29.39200	205	64	40.01167	29.05917	805
25	40.63177	29.37823	149	65	39.99423	29.05565	982
26	40.61333	29.37245	165	66	39.97380	29.04317	793
27	40.59458	29.36590	312	67	39.94792	29.03435	894
28	40.56727	29.34753	728	68	39.93177	29.02175	370
29	40.55457	29.34393	374	69	39.91430	29.01813	655
30	40.53507	29.33383	249	70	39.89795	29.00740	658
31	40.51187	29.32108	148	71	39.88280	28.99955	520
32	40.50387	29.29758	201	72	39.86667	28.99243	720
33	40.48940	29.29645	296	73	3985217	28.98577	750
34	40.47447	29.29787	135	74	39.83688	28.97167	878
35	40.46538	29.28408	184	75	39.81667	28.96550	895
36	40.45825	29.28443	154	 76	39.79813	28.95538	882
37	40.44723	29.26615	137	 77	39.78515	28.95048	810
38	40.43940	29.25453	150	78	39.76650	28.94072	765
39	40.41952	29.27033	135	 79	39.74767	28.93043	749
40	40.41320	29.26505	146	80	39.73063	28.92000	828

Tablo A.3 Alıcı noktalarının koordinatları.

## ÖZGEÇMİŞ

Adil Tarancıoğlu, 1977 yılında Ankara'da doğmuştur. 1988 yılında İstanbul, Ahmet Haşim İlkokulu, 1994 yılında İstanbul, Tuna Lisesi'nden mezun olarak ilk, orta ve lise öğrenimini tamamlamıştır. 1994 yılında girdiği İTÜ, Maden Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü'nden 1999 yılında mezun olmuştur. 1999 yılından itibaren TÜBİTAK-Marmara Araştırma Merkezi, Yer ve Deniz Bilimleri Araştırma Enstitüsü'nde mühendis olarak görev yapmaktadır.