



İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İSTANBUL ÇATALCA BÖLGESİ FAYLARININ
MANYETOTELÜRİK YÖNTEMLE İNCELENMESİ

Jeofizik Müh. Gökhan KARCIOĞLU
Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman
Prof. Dr. Aysan GÜRER
Yrd. Doç. Dr. S. Bülent TANK

Ocak, 2008

İSTANBUL



İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**İSTANBUL ÇATALCA BÖLGESİ FAYLARININ
MANYETOTELÜRİK YÖNTEMLE İNCELENMESİ**

Jeofizik Müh. Gökhan KARCIOĞLU
Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

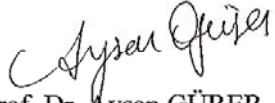
Danışman
Prof. Dr. Aysan GÜRER
Yrd. Doç. Dr. S. Bülent TANK

Ocak, 2008

İSTANBUL

Bu çalışma 29/01/2008 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Jeofizik Anabilim Dalı Jeofizik Mühendisliği programında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

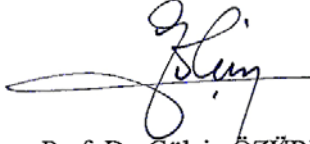
Tez Jürisi



Prof. Dr. Aysan GÜNER
İstanbul Üniversitesi



Prof. Dr. Ali PINAR
İstanbul Üniversitesi



Prof. Dr. Gülçin ÖZÜRLAN
İstanbul Teknik Üniversitesi



Doç. Dr. Murat BAYRAK
İstanbul Üniversitesi



Doç. Dr. Ali ELMAS
İstanbul Üniversitesi

ÖNSÖZ

Çatalca Bölgesi'nin bölgesel ölçekte, incelemeye değer birçok önemli jeolojik yapıyı bünyesinde barındırdığı düşünülmektedir. İstanbul ve civarının jeolojisini etkileyen temel yapıları, bunların yüzeyde ve derine doğru değişimlerini gözlemek her geçen gün yoğunlaşan kentsel yapılaşma nedeniyle zorlaşmaktadır. Çalışma alanı olarak seçilen Çatalca Bölgesi'nin yoğun yapılaşma etkisinden henüz uzak olması bu açıdan önemli bir şanstır. Bölgede gözlenen Çatalca Fayı'nın yanı sıra bölgesel ölçekte (Kırım'a kadar) uzanan tektonik olayları denetleyen bir fayın (Batı Karadeniz Fayı) olduğu düşünülmekte ancak bu fay yüzey jeolojisinde açıkça gözlenememektedir.

Bölgenin derin yapısını ve faylarını görüntülemek amacıyla Kuzeydoğu-Güneybatı yönlü bir profil üzerinde manyetotelürik ölçmeler yapılmış ve değerlendirilmiştir. Bu çalışma yalnızca derin jeolojik yapılar için yeni bulgular sunmakla kalmamış ölçme aşamasından yorumlama aşamasına kadar manyetotelürik yöntem hakkında bilgi ve deneyim kazanmamıza da yardımcı olmuştur.

Bu nedenlerle, gerçekleştirdiğimiz çalışmaya araç ve şoför desteği sağladığı için öncelikle İstanbul Büyükşehir Belediyesi Afet Koruma Müdürlüğü'ne ve ölçüm cihazlarını temin eden Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü'ne ve çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Çatalca Fayı ve çevresindeki birimler hakkındaki jeofizik bilginin yetersizliğini, bölgenin araştırılmasının gerekliliğini dile getirerek bize araştırma için fikir sağlayan Prof. Dr. O. Metin İlkışık'a teşekkürlerimi sunarım.

Tüm bu çalışma boyunca alet, araç desteğini sağlayan, bunun için çaba ve zaman harcayan; bilgisiyle ve bildiklerini öğretme çabasıyla sadece bu çalışmaya değil, bana da katkıları sonsuz olan; hem istasyonların kurulumunda, hem de verilerin işlenmesinde ve yorumlanmasında yanımda yer alan Yrd. Doç. Dr. S. Bülent Tank'a çok teşekkür ederim.

Lisans ve yüksek lisans eğitimimde ve yüksek lisans tezimi oluşturan bu çalışma boyunca kendisinden çok şey öğrendiğim, bana yol gösteren ve göstermekte olan tez danışmanım Prof. Dr. Aysan Gürer'e teşekkür ederim.

Hem arazi çalışmalarında istasyonların kurulumunda sürekli yardım eden, hem de verilerin işlenmesinde bana vakit ayırarak, gerekli araçların kullanımını öğretten, şu ana kadar edindikleri bilgileri paylaşan, Jeofizik Yük.Müh. Elif Tolak'a, Jeofizik Yük.Müh. Tülay Kaya'ya ve yine arazi çalışmasının çoğu kısmında yanımda olup yardım eden Doç. Dr. Mustafa Kemal Tuncer'e teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin yazım aşamasında bulunduğu katkılardan dolayı, Jeofizik Yük. Müh. Anisya B.Tekkeli'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca beni bugünlere getirdikleri ve destekledikleri için tüm aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

OCAK 2008

GÖKHAN KARCIOĞLU

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
SEMBOL LİSTESİ	xiii
ÖZET.....	xv
İSTANBUL ÇATALCA BÖLGESİ FAYLARININ MANYETOTELÜRİK YÖNTEMLE İNCELENMESİ.....	xv
SUMMARY	xvii
INVESTIGATION OF ISTANBUL CATALCA REGION FAULTS BY MAGNETOTELLURIC METHOD.....	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1 ÇATALCA VE CİVARININ JEOLJİSİ.....	2
2. GENEL KISIMLAR.....	6
2.1 JEOFİZİKTE ELEKTROMANYETİK YÖNTEMLER.....	6
2.2 ELEKTROMANYETİK İRGİTİM	8
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	11
3.1. MANYETOTELÜRİK YÖNTEM	11
3.1.1. Manyetotelürik Yöntemde Temel Varsayım ve Sorunlar	15
3.2. MANYETOTELÜRİK ÖLÇÜMLERİN İŞLENMESİ VE YORUMA HAZIRLANMASI.....	23
3.2.1. Alınan Ölçülerin Düzeltilmesi.....	23
3.2.2. Düz çözüm ve ters çözüm	28
3.3. ÇALIŞMADA KULLANILAN AYGIT	30
3.3.1. MT Ölçüm Cihazının Bileşenleri	30
4. BULGULAR.....	34

4.1. ÖLÇÜM NOKTALARI.....	34
4.2. VERİ SUNUMU	36
4.2.1. ANDIRAN KESİTLER	36
4.2.2. İRGİTİM YÖNEYLERİ	37
4.3. BOZULMA ETKİLERİNİN ATILMASI VE JEOLJİK DOĞRULTULARIN MATEMATİKSEL OLARAK HESAPLANMASI	41
4.4. VERİLERİN TERS ÇÖZÜM SONUÇLARININ ELDE EDİLMESİ	45
4.4.1. B-Pol durumu için ters çözüm	48
4.4.2. E-Pol durumu için ters çözüm	61
4.4.3. Bileşik durum için ters çözüm.....	71
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	89
KAYNAKLAR.....	96
EKLER.....	100
EK A. ELEKTROMANYETİK DALGA DENKLEMİNİN ELDE EDİLMESİ	100
EK B. MAXWELL DENKLEMLERİNDE B-POL VE E-POL DURUM AYRIMI	103
EK C. ELEKTROMANYETİK SINIR ŞARTLARININ BELİRLENMESİ..	105
ÖZGEÇMİŞ.....	110

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1: Çatalca çevresinin jeolojisi ve ölçüm noktaları (MTA)	3
Şekil 1.2: Ölçüm noktaları Çatalca Fayı ve Batı Karadeniz Fayı için öngörülen çeşitli modellerin konumlarının karşılaştırılması (Okay ve diğ, 1994; Yılmaz ve diğ, 1997; Nikishin ve diğ, 2003)	4
Şekil 2.1: Jeofizikte kullanılan elektromanyetik yöntemlerin sınıflandırılması.....	6
Şekil 2.2: Elektromanyetik irgitem (Vozoff, 1972'den faydalananarak çizilmiştir)	10
Şekil 3.1: Nüfuz derinliğinin frekansa bağlı olarak temsili değişimi. Şekilde görüldüğü gibi 1 Hz frekansına sahip dalga 10 Hz frekansındaki bir dalgadan daha derine inmektedir yani dalgaların frekansları küçüldükçe nüfuz derinlikleri artar.....	12
Şekil 3.2: Yer içindeki çeşitli iletkenlerin farklı gözeneklilik değerlerine göre öz direnç değerleri (Ritter ve diğ., 2005).....	13
Şekil 3.3: Güneş-Manyetosfer ilişkisi (a) ve yıldırımlar (b) Manyetotelürik (MT) yöntemin kaynağıdır (Vozoff, 1991, Jones, 1992; Jiracek ve diğ., 1995'ten faydalananarak çizilmiştir)	14
Şekil 3.4: Homojen yarısonsuz ortam (Başokur, 2005'ten yeniden çizilmiştir)	17
Şekil 3.5: Yatay tabakalanmış bir boyutlu ortam (Başokur, 2005'ten yeniden çizilmiştir)	17
Şekil 3.6: İki boyutlu ortam (Başokur, 2005'ten yeniden çizilmiştir).....	19
Şekil 3.7: a) 10 ve 0.1 Hz frekanslarında B-Pol ve E-Pol ölçümlerinin yeraltındaki üç boyutlu bir iletken kütlenin farklı uzanımları için verdiği değerler (Ting ve Hohmann,1981), b) Ting ve Hohmann (1981) tarafından modellenen bu kütlenin üç boyutlu diyagramı (Orijinal şeklin kolay anlaşılabilmesi için Ting ve Hohmann, 1981'den faydalanılarak çizilmiştir)	21
Şekil 3.8: İki boyutlu ölçümlerde B-Pol ve E-Pol durumları için ölçülen bileşenler	22
Şekil 3.9: Üç boyutlu ortam (Başokur, 2005'ten yeniden çizilmiştir).....	23
Şekil 3.10: MTU 5A Manyetotelürik ölçüm cihazı kayıtçısı	31
Şekil 3.12: Elektrotlar	32

Şekil 3.13: Bir MT istasyonunda artı şeklindeki elektrot açılımı için cihaz bileşenlerinin örnek yerleşimi (1-4: Potansiyel elektrotları, 5-7: Alıcı bobinler, 8: Toprak elektrotu, 9: Kayıtcı, 10: GPS anteni) (Phoenix Geophysics, 2005’ten yeniden çizildi)	33
Şekil 3.14: Bir MT istasyonunda “L” şeklindeki elektrot açılımı için cihaz bileşenlerinin örnek yerleşimi (1-4: Potansiyel elektrotları, 5-7: Alıcı bobinler, 8: Toprak elektrotu, 9: Kayıtcı, 10: GPS anteni) (Phoenix Geophysics, 2005’ten yeniden çizildi).....	33
Şekil 4.2: B-Pol durumu görünür öz dirençleri için andıran kesitler (Görünür öz dirençler ve fazlar)	36
Şekil 4.3: E-Pol durumu görünür öz dirençleri için andıran kesitler (Görünür öz dirençler ve fazlar)	37
Şekil 4.4: İrgitim yöneylerinin frekanslara göre doğrultuları	38
Şekil 4.5: İrgitim yöneyleri ile B-Pol durumu öz dirençleri ve fazlarına ait andıran kesitlerin çakıştırılmış şekli	39
Şekil 4.6: İrgitim yöneyleri ile E-Pol durumu öz dirençleri ve fazlarına ait andıran kesitlerin çakıştırılmış şekli	39
Şekil 4.7: Frekanslara göre; a) Tek istasyon-Tek frekans; b) Çok istasyon-Tek frekans ve c) Tek istasyon-Çok frekans d) Çok istasyon-Çok frekans doğrultu açılarının jeoloji haritası üzerinde gösterimi e) Çalışma bölgesinin jeoloji haritası üzerinde yeri (Harita Yılmaz ve diğ. 1997’den yeniden çizilmiştir)	44
Şekil 4.8: B-Pol durumu için Ogawa ve Uchida (1996) yazılımının akış diyagramı (Ogawa ve Uchida,1996)	46
Şekil 4.9: Başlangıç model ağının (mesh) ve başlangıç modeli olarak verilen 100 $\Omega.m$ öz dirençli yarı sonsuz ortamın görselleştirilmiş hali.	47
Şekil 4.10: B-Pol durumu için, 100 $\Omega.m$ yarısonsuz ortam başlangıç modeliyle ters çözüm sonucu elde edilen, 1.68 RMS hatalı model.....	48

Şekil 4.11: B-Pol durumu için, arazide ölçülen (üstte) ve 100Ω.m yarısonsuz ortam başlangıç modeliyle ters çözüm sonucu elde edilen modele ait, hesaplanan (altta) görünür öz dirençlerin grafiği.....	49
Şekil 4.12: B-Pol durumu için, arazide ölçülen (üstte) ve 100Ω.m yarısonsuz ortam başlangıç modeliyle ters çözüm sonucu elde edilen modele ait, hesaplanan (altta) görünür fazların grafiği	49
Şekil 4.13: B-Pol durumu ters çözümü için, ölçümler (artılar) ve 100Ω.m yarısonsuz ortam başlangıç modeliyle ters çözüm sonucu elde edilen modele ait hesaplanan değerlerin (düz çizgiler) her istasyon için, log.pariyota karşı grafiği (sağ sütun görünür öz dirençleri, sol sütun fazları içermektedir)	50
Şekil 4.14: B-Pol durumu için elde edilen modelin (Şekil 4.10), Kadıköy istasyonu altındaki iletkeni test etmek üzere değiştirilmiş hali (RMS hata: 1.83).....	51
Şekil 4.15: B-Pol modeli (Şekil 4.10) ve Kadıköy istasyonu altındaki iletkeni test etmek üzere hazırlanan modelin (Şekil 4.14) karşılaştırması. Ölçümler (artılar) ve hesaplanan değerlerin (ters çözüm sonucu, mavi; test sonucu kırmızı çizgiler) her istasyon için, log.pariyota karşı grafiği (sağ sütun görünür öz dirençleri, sol sütun fazları içermektedir)	52
Şekil 4.16: B-Pol durumu için elde edilen modelin (Şekil 4.10), Örcünlü istasyonu altında görülen iletkenin sınanması için değiştirilmiş hali (RMS hata: 1.67)..	53
Şekil 4.17: B-Pol modeli (Şekil 4.10) ve Örcünlü istasyonu altındaki iletkeni test etmek üzere hazırlanan modelin (Şekil 4.16) karşılaştırması. Ölçümler (artılar) ve hesaplanan değerlerin (ters çözüm sonucu, mavi; test sonucu kırmızı çizgiler) her istasyon için, log.pariyota karşı grafiği (sağ sütun görünür öz dirençleri, sol sütun fazları içermektedir)	54
Şekil 4.18: B-Pol durumu için elde edilen modelin (Şekil 4.10), Tayakadın istasyonu altında görülen iletkenin sınanması için değiştirilmiş hali (RMS hata: 1.73)..	55
Şekil 4.19: B-Pol modeli (Şekil 4.10) ve Tayakadın istasyonu altında görülen iletkenin sınanması için hazırlanan modelin (Şekil 4.18) karşılaştırılması. Ölçümler (artılar) ve hesaplanan değerlerin (ters çözüm sonucu, mavi; test sonucu kırmızı çizgiler) her istasyon için, log.pariyota karşı grafiği (sağ sütun görünür öz dirençleri, sol sütun fazları içermektedir)	56

- Şekil 4.21:** B-Pol durumu için, Şekil 4.20’da görünen başlangıç modeliyle gerçekleştirilen ters çözümü sonucu elde edilen, 1.60 RMS hatalı model 58
- Şekil 4.22:** B-Pol durumu için, Şekil 4.20’da görünen başlangıç modeliyle gerçekleştirilen ters çözümü sonucu elde edilen modele ait ölçülen (altta) ve hesaplanan (üstte) görünür öz dirençlerin, log.frekansa karşı grafiği..... 59
- Şekil 4.23:** B-Pol durumu için Şekil 4.20’da görünen başlangıç modeliyle gerçekleştirilen ters çözümü sonucu elde edilen modele ait ölçülen (altta) ve hesaplanan (üstte) fazların, log.frekansa karşı grafiği 59
- Şekil 4.24:** B-Pol durumu için, ikinci ters çözüm sonucunda ölçümler (artılar) ve Şekil 4.20’de görünen başlangıç modeliyle gerçekleştirilen ters çözümü sonucunda hesaplanan değerlerin (düz çizgiler) her istasyon için, log.peryota karşı grafiği (sağ sütun görünür öz dirençleri, sol sütun fazları içermektedir) 60
- Şekil 4.25:** E-Pol durumu için, 100Ω.m yarı sonsuz ortam başlangıç modeliyle ters çözüm sonucu elde edilen, 1.7 RMS hatalı model..... 62
- Şekil 4.26:** E-Pol durumu için, 100Ω.m yarı sonsuz ortam başlangıç modeliyle ters çözümü sonucunda elde edilen modele ait ölçülen (altta) ve hesaplanan (üstte) görünür öz dirençlerin, log.frekansa karşı grafiği..... 62
- Şekil 4.27:** E-Pol durumu için, 100Ω.m yarı sonsuz ortam başlangıç modeliyle ters çözümü sonucunda elde edilen modele ait ölçülen (altta) ve hesaplanan (üstte) fazların, log.frekansa karşı grafiği 63
- Şekil 4.28:** E-Pol durumu ters çözümü için, ölçümler (artılar) ve 100Ω.m yarı sonsuz ortam başlangıç modeliyle ters çözümü sonucunda elde edilen modele ait hesaplanan değerlerin (düz çizgiler) her istasyon için, log.peryota karşı grafiği (sağ sütun görünür öz dirençleri, sol sütun fazları içermektedir) 64
- Şekil 4.29:** E-Pol durumu için elde edilen modelin (Şekil 4.25), modelde gözlenen iletkenlikleri test etmek üzere değiştirilmiş hali (RMS hata: 2.17) 65
- Şekil 4.30:** E-Pol modeli (Şekil 4.25) ve iletkenlerin testi için hazırlanan yeni modelin (Şekil 4.29) karşılaştırılması. Ölçümler (artılar) ve hesaplanan değerlerin (ters çözüm sonucu, mavi; test sonucu kırmızı çizgiler) her istasyon için,

log.peryota karşı grafiği (sağ sütun görünür öz dirençleri, sol sütun fazları içermektedir)	66
Şekil 4.31: E-Pol modeli için hazırlanan ikinci başlangıç modeli.....	67
Şekil 4.32: E-Pol durumu için, Şekil 4.31’de görünen başlangıç modeliyle gerçekleştirilen ters çözümü sonucunda elde edilen, 1.62 RMS hatalı model.	68
Şekil 4.33: E-Pol durumu için, Şekil 4.31’de görünen başlangıç modeliyle gerçekleştirilen ters çözüm sonucunda elde edilen modele ait ölçülen (altta) ve hesaplanan (üstte) görünür öz dirençlerin, log.frekansa karşı grafiği.....	68
Şekil 4.34: E-Pol durumu için, Şekil 4.31’de görünen başlangıç modeliyle gerçekleştirilen ters çözüm sonucunda elde edilen modele ait ölçülen (altta) ve hesaplanan (üstte) fazların, log.frekansa karşı grafiği	69
Şekil 4.35: E-Pol durumu ikinci ters çözümü için, ölçümler (artılar) ve Şekil 4.31’de görünen başlangıç modeliyle gerçekleştirilen ters çözümü sonucunda elde edilen hesaplanan değerlerin (düz çizgiler) her istasyon için, log.peryota karşı grafiği (sağ sütun görünür öz dirençleri, sol sütun fazları içermektedir).....	70
Şekil 4.36: Bileşik durum için 100Ω.m yarı sonsuz ortam başlangıç modeliyle ters çözüm sonucu elde edilen, 2.62 RMS hatalı model.....	72
Şekil 4.37: Bileşik durum için 100Ω.m yarı sonsuz ortam başlangıç modeliyle ters çözüm sonucu elde edilen modelin B-Pol durumuna ait ölçülen (altta) ve hesaplanan (üstte) görünür öz dirençlerin, log.frekansa karşı grafiği.....	72
Şekil 4.38: Bileşik durum için 100Ω.m yarı sonsuz ortam başlangıç modeliyle ters çözüm sonucu elde edilen modelin B-Pol durumuna ait ölçülen (altta) ve hesaplanan (üstte) fazların, log.frekansa karşı grafiği	73
Şekil 4.39: Bileşik durum için ters çözüm sonucunda, B-Pol durumuna ait ölçümler (artılar) ve 100Ω.m yarı sonsuz ortam başlangıç modeliyle ters çözüm sonucu elde edilen modele ait hesaplanan değerlerin (düz çizgiler) her istasyon için, log.peryota karşı grafiği (sağ sütun görünür öz dirençleri, sol sütun fazları içermektedir)	74

- Şekil 4.40:** Bileşik durum için $100\Omega.m$ yarısansuz ortam başlangıç modeliyle ters çözüm sonucu elde edilen modelin E-Pol durumuna ait ölçülen (altta) ve hesaplanan (üstte) görünür öz dirençlerin, log. frekansa karşı grafiği..... 75
- Şekil 4.41:** Bileşik durum için $100\Omega.m$ yarısansuz ortam başlangıç modeliyle ters çözüm sonucu elde edilen modelin E-Pol durumuna ait ölçülen (altta) ve hesaplanan (üstte) fazların, log. frekansa karşı grafiği 75
- Şekil 4.42:** Bileşik durum için ikinci ters çözüm sonucunda, E-Pol durumuna ait ölçümler (artılar) ve $100\Omega.m$ yarısansuz ortam başlangıç modeliyle ters çözüm sonucu elde edilen hesaplanan değerlerin (düz çizgiler) her istasyon için, log. periyota karşı grafiği (sağ sütun görünür öz dirençleri, sol sütun fazları içermektedir) 76
- Şekil 4.43:** Bileşik durum için elde edilen modelin (Şekil 4.36), Elbasan istasyonunun altında gözlenen iletkenin sınanması için değiştirilmiş hali (RMS hata: 2.65) 77
- Şekil 4.44:** Bileşik durum modelinin (Şekil 4.36), Elbasan istasyonunun altında gözlenen iletkenin sınanması için değiştirilmesiyle hazırlanan yeni modelle (Şekil 4.43) karşılaştırılması, B-Pol durumu için ölçümler (artılar) ve hesaplanan değerlerin (ters çözüm sonucu, mavi; test sonucu kırmızı çizgiler) her istasyon için, log. periyota karşı grafiği (sağ sütun görünür öz dirençleri, sol sütun fazları içermektedir) 78
- Şekil 4.45:** Bileşik durum modelinin (Şekil 4.36), Elbasan istasyonunun altında gözlenen iletkenin sınanması için değiştirilmesiyle hazırlanan yeni modelle (Şekil 4.43) karşılaştırılması. E-Pol durumu için ölçümler (artılar) ve hesaplanan değerlerin (ters çözüm sonucu, mavi; test sonucu kırmızı çizgiler) her istasyon için, log. periyota karşı grafiği (sağ sütun görünür öz dirençleri, sol sütun fazları içermektedir) 79
- Şekil 4.46:** Bileşik durum için elde edilen modelin (Şekil 4.36), Tayakadın istasyonunun altında gözlenen iletkenin sınanması için değiştirilmiş hali (RMS hata: 2.69) 80
- Şekil 4.47:** Bileşik durum modelinin (Şekil 4.35) ve test için hazırlanan yeni modelin (Şekil 4.46), karşılaştırması. B-Pol için ölçümler (artılar) ve hesaplanan değerlerin (ters çözüm sonucu, mavi; test sonucu kırmızı çizgiler) her istasyon

için, log.peryota karşı grafiği (sağ sütun görünür öz dirençleri, sol sütun fazları içermektedir)	81
Şekil 4.48: Bileşik durum modelinin (Şekil 4.36) ve test için hazırlanan yeni modelin(Şekil 4.46), karşılaştırması. E-Pol için ölçümler (artılar) ve hesaplanan değerlerin (ters çözüm sonucu, mavi; test sonucu kırmızı çizgiler) her istasyon için, log.peryota karşı grafiği (sağ sütun görünür öz dirençleri, sol sütun fazları içermektedir)	82
Şekil 4.49: Bileşik durum ters çözümü için hazırlanan ikinci başlangıç modeli.....	83
Şekil 4.50: Bileşik durum için Şekil 4.49’da görülen başlangıç modeliyle gerçekleştirilen ters çözümü sonucunda elde edilen, 2.56 RMS hatalı model.	84
Şekil 4.51: Bileşik durum için Şekil 4.49’da görülen başlangıç modeliyle gerçekleştirilen ters çözümü sonucunda elde edilen modelin B-Pol durumuna ait ölçülen (altta) ve hesaplanan (üstte) görünür öz dirençlerin, log.frekansa karşı grafiği	84
Şekil 4.52: Bileşik durum için ikinci Şekil 4.49’da görülen başlangıç modeliyle gerçekleştirilen ters çözümü sonucunda elde edilen modelin B-Pol durumuna ait ölçülen (altta) ve hesaplanan (üstte) fazların, log.frekansa karşı grafiği	85
Şekil 4.53: Bileşik durum ikinci ters çözüm modelinde, B-Pol durumuna ait ölçümler (artılar) ve Şekil 4.49’da görülen başlangıç modeliyle gerçekleştirilen ters çözümü sonucunda hesaplanan değerlerin (düz çizgiler) her istasyon için, log.peryota karşı grafiği (sağ sütun görünür öz dirençleri, sol sütun fazları içermektedir)	86
Şekil 4.54: Bileşik durum için Şekil 4.49’da görülen başlangıç modeliyle gerçekleştirilen ters çözümü sonucunda elde edilen modelin E-Pol durumuna ait ölçülen (altta) ve hesaplanan (üstte) görünür öz dirençlerin, log.frekansa karşı grafiği	87
Şekil 4.55: Bileşik durum Şekil 4.49’da görülen başlangıç modeliyle gerçekleştirilen ters çözümü sonucunda elde edilen modelin E-Pol durumuna ait ölçülen (altta) ve hesaplanan (üstte) fazların, log.frekansa karşı grafiği	87

Şekil 4.56: Bileşik durum için ikinci ters çözüm modelinde, E-Pol durumuna ait ölçümler (artılar) ve Şekil 4.49’da görülen başlangıç modeliyle gerçekleştirilen ters çözümü sonucunda hesaplanan değerlerin (düz çizgiler) her istasyon için, log.peryota karşı grafiği (sağ sütun görünür öz dirençleri, sol sütun fazları içermektedir)	88
Şekil 5.1: Aralı aşmalı fay modeli (Angelier ve diğ. 2004).....	90
Şekil 5.2: Ters çözüm sonuçlarından elde edilen yer altı modeli	91

SEMBOL LİSTESİ

A	: Groom ve Bailey çözümlemesinde anizotropi gereyi (tensörü) elemanı
B	: Manyetik ırgitim (indüksiyon) veya manyetik akı yoğunluğu ($\text{kg.s}^{-2}.\text{A}^{-1}$)
C	: Groom ve Bailey çözümlemesinde bozulma gereyi (tensörü)
D	: Elektriksel yer değiştirme alanı (C/m^2)
e	: Groom ve Bailey çözümlemesinde makaslama gereyi elemanı
E	: Elektrik alan (V/m)
ϵ_0	: Serbest uzayın elektrik geçirgenliği ($8.8541878176 \times 10^{-12} \text{ C}^2\text{N}^{-1}\text{m}^{-2}$)
f	: Frekans (sn^{-1} ; Hz)
g	: Groom ve Bailey çözümlemesinde alanın büyütmesi
H	: Manyetik alan (A/m)
I	: Elektrik akı (A)
I	: İndüksiyon
J	: Akım yoğunluğu (A/m^2)
k	: Yayılım sabiti
μ_0	: Boşluğun manyetik geçirgenliği ($\text{N}.\text{A}^{-2}$)
n	: Birim yöney (vektör)
ρ	: Özdirenç (Ωm)
ρ_a	: Görünür özdirenç ($\Omega.\text{m}$)
q	: Elektrik yükü (C)
R(θ)	: Döndürme gereyi (tensörü)
S	: Groom ve Bailey çözümlemesinde makaslama gereyi
s	: Groom ve Bailey çözümlemesinde anizotropi gereyi elemanı
T	: Periyot, Groom ve Bailey çözümlemesinde burulma gereyi
T_x, T_y	: İrgitim yöneyi bileşenleri
t	: Groom ve Bailey çözümlemesinde burulma gereyi elemanı, zaman
ω	: Açısal frekans (sn^{-1})
h	: Derinlik (m)
Z	: Direnti (Empedans; V/A)

z	: Derinlik (m)
∇	: Nabla operatörü
$\nabla \cdot$	: Diverjans
$\nabla \times$	: Rotasyonel
∇^2	: Laplasyen
δ	: Nüfuz derinliği (m)
ϕ	: Faz (Derece), gözeneklilik (%)
σ	: Ortamın iletkenliği (Siemens/m)

ÖZET

İSTANBUL ÇATALCA BÖLGESİ FAYLARININ MANYETOTELÜRİK YÖNTEMLE İNCELENMESİ

Türkiye'nin en Kuzeybatısını teşkil eden Trakya Bölgesi'nde Güneydoğu-Kuzeybatı doğrultulu uzanıma sahip birçok doğrultu atımlı fay yer almaktadır. İstanbul'un batısında bulunan ve çalışma bölgesini de kapsayan Çatalca Bölgesi'nde de Kuzeybatı-Güneydoğu doğrultulu aralı aşmalı (en-echelon) bir fay kendini göstermektedir. Ayrıca Çatalca Bölgesi, Trakya havzasının sonlandığı, Istranca Masifi'nin en batıdaki uzanımlarını gösterdiği ve doğusunda İstanbul-Zonguldak Bölgesi'nin başladığı noktadadır. Bu iki bölge arasındaki sınırı da Çatalca Fayı'nın doğusunda bulunan günümüzde çökellerle örtülmüş büyük bir ana fayın oluşturduğu çoğu jeologun ortak görüşüdür. Ancak bu fayın kara içerisindeki kesin yeri tahminden öteye gidememektedir. Çatalca Bölgesi jeolojik yapıları pek çok araştırmaya konu olmuşsa da derin yapılara kadar inen öz direnç kesitleri bulunmamaktadır. Bu bölgedeki yer iletkenlik yapısını belirlemek, sınırlarını ortaya koymak ve yorumlamak bu çalışmanın kapsamını oluşturmaktadır.

Bu amaç doğrultusunda, 28 Nisan-4 Mayıs 2007 tarihleri arasında Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü'nün sağladığı iki adet Phoenix MTU-5A manyetotelürük ölçüm cihazı kullanılarak bölgedeki fayları dik kesecek şekilde Güneybatı'dan başlanarak Kuzeydoğu'ya uzanan dokuz istasyon içeren ~30 km uzunluğundaki bir profil üzerinde manyetotelürük ölçümler alınmış, daha sonra bu veriler bilgisayarda işlenerek yoruma hazır hale getirilmiştir. İki boyutlu ters çözümleme işlemleriyle elde edilen öz direnç kesitleriyle bölgede bulunan birimler yorumlanarak ilişkilendirilmiş; bu birimlerin düşey ve yanal sınırları belirlenmiştir.

Çalışmalar sonucunda havza kalınlıkları, Çatalca Fayı'nın yeri, derinden yüzeye jeolojik doğrultunun değişimi ve birimlerin öz dirençleri elde edilmiştir.

Ölçülerin alındığı profilin doğusunda gittikçe derinleşen ve kesitlerde en fazla 700m derinliğe ulaşan iletken çökel kalınlığı gözlenmiştir. Çatalca fayının neden olduğu,

derine doğru uzanan iletken bir bölge Elbasan'da kurulan istasyonun doğusunda kendini göstermiştir. Profilin en güneybatısında çökellerin aniden derinleşmesi olarak yorumlanan ve bir faya bağlantılı olduğu düşünülen bir başka iletken yapı tespit edilmiştir. Yassıören ve Baklalı istasyonlarının altında büyük bir düşey iletken sınır belirlenmiştir. Bu sınırın, jeolojik olarak tartışılan ve daha önce hakkında bir jeofizik veri bulunmayan süturu yani Batı Karadeniz Fayı'nı temsil ettiği düşünülmektedir.

SUMMARY

INVESTIGATION OF ISTANBUL CATALCA REGION FAULTS BY MAGNETOTELLURIC METHOD

Thrace Region representing the most northwestern Turkey contains many Southeast-Northwest oriented strike slip faults. Also at the Catalca Region where our studies take place, at the western side of Istanbul a Southeast-Northwest oriented en-echelon fault shows itself at the surface. Catalca Region is the place where the Thrace basin ends, most eastern extensions of Istranca (Strandja) Massive observed and Istanbul-Zonguldak Zone starts. The idea that the suture between these two zones represented by a major continental fault which is covered by sediments, is a commonly accepted by the most geologists. This major fault is thought to be at the eastern side of the Catalca Fault but the exact inland place of this fault is not going further of being estimation. In spite of the fact that the region is investigated many times before, there are not any study which gave deep resistivity cross-sections. The purpose of this work is to reveal the resistivity structure beneath the surface, determining boundaries and making interpretations on them.

In that purpose between 28 April and 4 May 2007 magnetotelluric studies carried on and two Phoenix MTU-5A magnetotelluric measuring devices which are provided by Bogazici University, Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute are used on a single ~30 kms long Southwest-Northeast profile contains nine measuring points and crosses the fault in the region (Catalca Fault) perpendicularly. Then the data is processed, inverted in 2-D and resistivity cross-sections obtained. We compared and correlated our magnetotelluric (MT) model to geologic information and defined horizontal-vertical boundaries of the units.

As the result of the study, thicknesses of the sediments, place of the Catalca Fault, change of the geologic strike with depth and resistivities of geological units are determined.

At the east of the Catalca Fault a sediment zone has an increasing thickness up to 700 m determined. A conductive zone extending trough depth developed due to Catalca Fault showed itself at the east of Elbasan station. At the most southwestern part of the profile another conductive zone determined and interpreted as sediments with steeply increasing thickness developed in relation to a fault. Beneath Yassören and Baklalı stations a vertical conductive boundary determined and its thought to be representing a suture; West Black Sea Fault, which is geologically controversial and in lack of geophysical measurements taken before.

1. GİRİŞ

Türkiye'nin kuzeybatısında kalan Çatalca Bölgesi, Istanca Masifi'nin sonlandığı ve İstanbul-Zonguldak kıtasal parçasının başladığı yerdedir (Şekil 1.1). Bu bölgede, küçük ölçekli, etkinliği tartışmalı olan faylarla beraber bir de tamamen gömülü aktif olmayan kıtasal ölçekli, büyük bir fayın varlığı öne sürülmektedir.

Bu çalışma kapsamında yapılan araştırmalarda, bu bölgedeki tektonik yapılarla ilgili yeni bilgiler edinmek ve var olan bilgileri geliştirmek amaçlanmıştır. Sonuçların, bölge jeolojisine, tektoniğine; incelenen fayların etkinlikleri ile ilgili mevcut bilgilere ve tartışmalara, yeni veriler sunması umulmaktadır. Bu amaç doğrultusunda, yeraltının elektrik özdirenç yapısını belirlemek için Çatalca Fayı üzerinden geçerek Kuzeydoğu'ya uzanan dokuz istasyonluk bir profil üzerinde manyetotelürik (MT) ölçümler alınmıştır (Şekil 1.1, Şekil 1.2).

Elektromanyetik arama tekniklerinden biri olan manyetotelürik (MT) yöntemin temelleri ilk olarak Rus bilim adamı A.N. Tikhonov ve Fransız bilim adamı L. Cagniard tarafından ortaya atılmıştır (Tikhonov, 1950; Cagniard, 1953). Bu iki bilim adamı 1950'li yılların başlarında, değişen elektrik ve manyetik alanların kullanılmasıyla frekansa bağlı olarak yeraltından bilgi alınabileceğini ispatlamış ve yöntemin ilk kurallarını ortaya koymuşlardır (Tikhonov, 1950; Cagniard, 1953).

Bugüne kadar gelişmeye devam eden MT yöntemi, günümüzde derin yeraltı araştırmaları için en önemli yöntemlerden biri haline gelmiştir. Manyetotelürik yöntem, günümüzde petrol, maden ve kirlilik araştırmalarından akademik amaçlı kabuk-üst manto çalışmalarına kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır.

MT yöntemin çok çeşitli kullanım alanlarından birisi de fay araştırmalarıdır. Yeraltı özdirenç değişimini bize ayrıntılı olarak verebilen bu yöntem, yeraltındaki fayların konumunu, uzanımını ve elektriksel özelliklerini gösterebilmektedir.

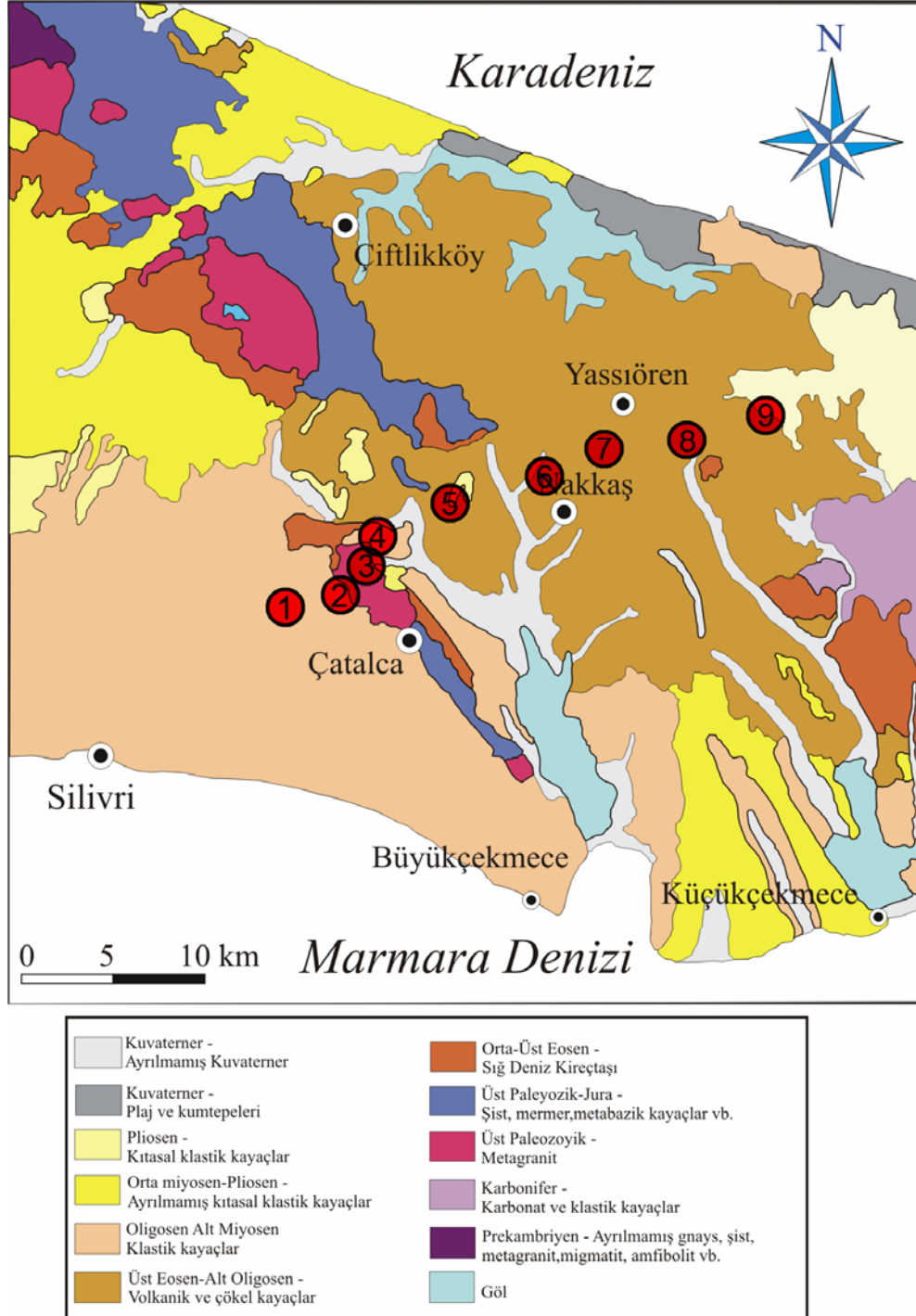
1.1. ÇATALCA VE CİVARININ JEOLJİSİ

Çatalca'nın çevresini kapsayan çalışma alanı pek çok önemli yapıyı içermektedir. Çalışma alanında yer alan Istranca Masifi (IM), doğu Bulgaristan'a kadar uzanan metamorfik bir masiftir. IM'nin güney sınırını KB-GD doğrultulu faylardan oluşan bir sistem belirlemekte ve masifi Trakya Havzasından ayırmaktadır (Yılmaz ve diğ., 1997).

Çalışma alanının en batısında yer alan aralı aşmalı (en-echelon) tipindeki fayların olduğu bölgede Istranca Masifi'nin bölgedeki izleri görülür. Yoğun tektonik hareketlere maruz kalmış olan bu uzanım mercek yapısındadır ve Jura-Kretase yaşlı granitlerden oluşur (Koral, 1998). Bölgedeki sağ doğrultu atımlı fayların küçük büyüklüklerde depremler yaratabilecek aktif faylar oldukları bazı araştırmacılar tarafından düşünülmektedir. Gökaşan ve diğ., (2002)'de de bu faylar aktif olarak düşünülmüş, çiçek benzeri yapılar ve, delta çökellerinde sağ yanallı yer değiştirmeler bildirilmiştir. Bu faylar Geç Kretaseden beri zaman zaman aktif olmuştur (Kasar ve Okay, 1992). Bu görüşlere karşın bölge faylarının etkinliği tartışmalıdır. Bölgede belirlenen sismik etkinliğin civar taş ocaklarından kaynaklandığı düşüncesi de genel kabul gören bir savdır.

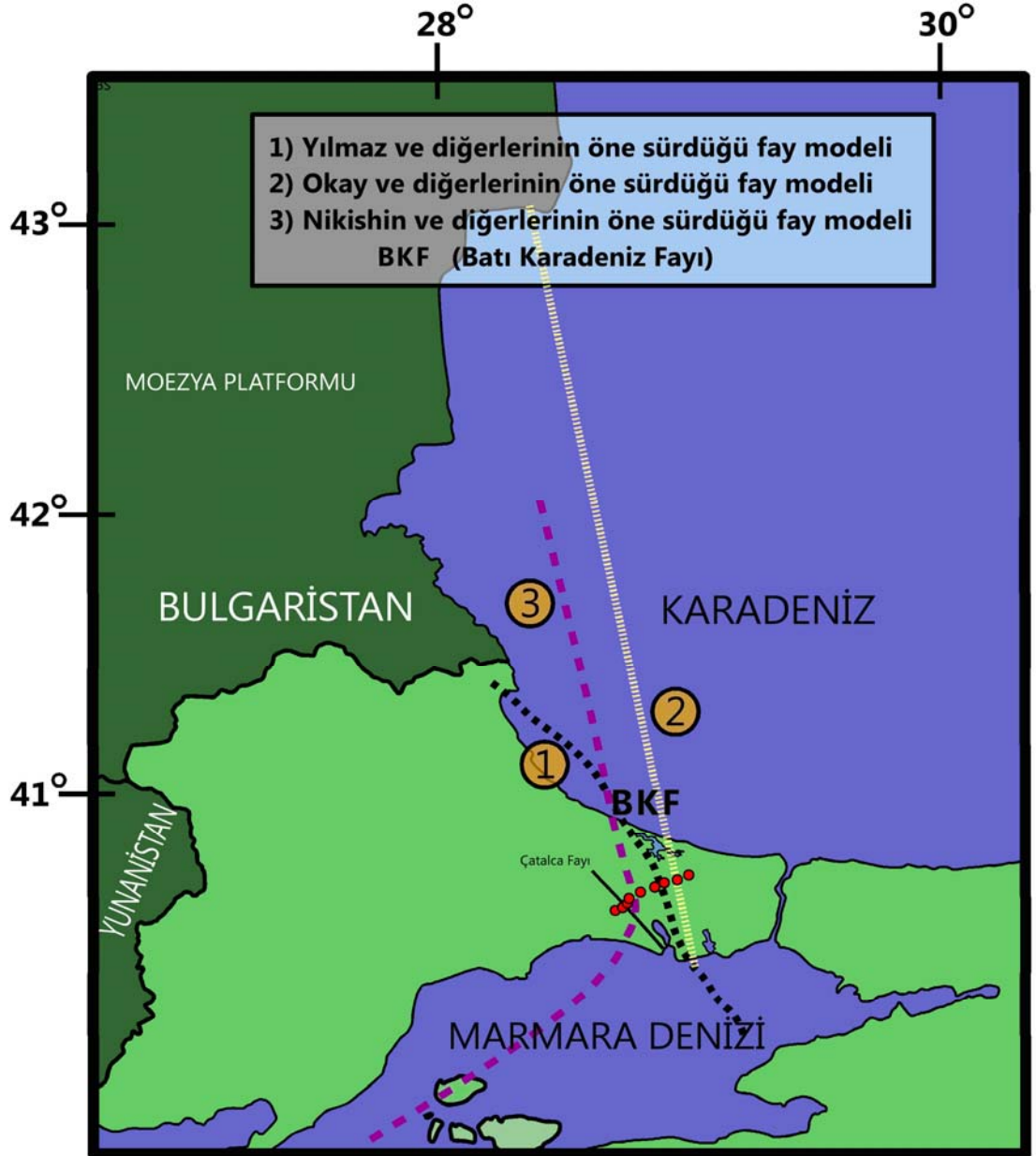
Çalışma alanının doğusunda da tartışmalı bir başka yapı olan 'Batı Karadeniz Fayı' (BKF) yer almaktadır. Çatalca Fayı ve çevresindeki diğer fayların Batı Karadeniz Fayı'na paralel uzandığı ileri sürülmektedir. Yüzeyde belirgin olarak gözlenmeyen bu fay ancak Karadeniz'in Bulgaristan tarafındaki kıta sahanlığında sismik kesitlerde gözlenmiştir (Dachev ve diğ. 1988). Ancak Türkiye'nin batısında Trakya Bölgesi'nde bu faya ait herhangi bir belirgin jeolojik ve jeofizik bulgu yoktur. Bu nedenle varlığı tartışmalıdır. Şekil 1.2'de BKF için öne sürülen çeşitli modeller harita üzerinde gösterilmiştir. İstanbul-Zonguldak Bölgesi'nin, Karadeniz'in oluşumu sırasında, batıda doğrultu atımlı BKF, doğuda ise yine doğrultu atımlı olan Batı Kırım Fayı sayesinde, batıda Moezya Platformu, doğuda ise Odessa Şelf'inden koparak günümüzde bulunduğu yere sürüklenmiş olduğu düşünülmektedir. Daha sonra geç Jura öncesinde Sakarya Bölgesi ile çarpışmasıyla (Elmas ve Yiğitbaş, 2001) bu iki fayın aktivitelerini yitirdiği ileri sürülmektedir (Okay ve diğ. 1994). Bu hipotezle öne sürülen, Batı Karadeniz Fayı (BKF)'nin bölgedeki varlığı iki önemli jeolojik yapının arasında sınır

teşkil etmektedir. Günümüzde BKF, Eosen Kuvaterner çökelleri ile örtülü olduğu için gözlenememektedir. Fakat bu fayın varlığı genel olarak kabul görmüştür. BKF'nın erken Miyosene kadar aktif olduğu düşünülmektedir ve çalışma bölgesi içindeki fayların uzanım doğrultusu bu ana fayla benzer yöndedir (Okay ve diğ., 1994; Koral , 1998).



Şekil 1.1: Çatalca çevresinin jeolojisi ve ölçüm noktaları (MTA)

Çatalca Bölgesi'nde yer alan ve Güneydoğu-Kuzeybatı yönünde uzanan fayların büyük bir fay kuşağının parçası olduğu çeşitli araştırmacılar tarafından öne sürülmektedir. Bu fay bölgesi, Trakya Eskişehir Fay Bölgesi (TEFZ) olarak adlandırılmaktadır. Bu bölge, etkinliğini Kuzey Anadolu Fayı'nın erken Pliyosen'de Marmara Bölgesi'ne girerek TEFZ'ni kesip dört parçaya ayırmasıyla yitirdiği ileri sürülmektedir (Yaltırak, 2002).



Şekil 1.2: Ölçüm noktaları Çatalca Fayı ve Batı Karadeniz Fayı için öngörülen çeşitli modellerin konumlarının karşılaştırılması (Okay ve diğ, 1994; Yılmaz ve diğ, 1997; Nikishin ve diğ, 2003)

Ölçümlerin alındığı noktalar boyunca istasyonların altında bulunan jeolojik birimleri detaylı olarak ele alırsak:

Trakya Havzası'nın doğu kısmı iki grupta ele alınabilir. Bunlardan ilki, Tersiyer öncesi kristalin kayalardır. Bunlar, granitik ve metamorfik birimlerden oluşan bir taban niteliğindedir. İkincisi ise Tersiyer çökellerdir (Çağlayan ve diğ., 1988; Turgut ve Eseller, 2000).

Kadıköy'de kurulan (1 numaralı) istasyon Osmancık Formasyonu (Oligosen) üzerinde bulunmaktadır. Osmancık Formasyonu, Pınarhisar (Alt Oligosen) ve Mezardere (Alt Oligosen) Formasyonlarını örter, inceden iriye kadar çakıllı taneli kumtaşları içerir (Turgut ve Eseller, 2000).

Elbasan'da yer alan (2 numaralı) istasyon ise Mesozoyik Metamorfikleri üzerinde bulunmaktadır (Çağlayan ve diğ., 1988). Bu metamorfik birimler Istranca Masifi'nin en doğudaki kısmını oluşturur.

Üçüncü istasyonun üzerinde yer aldığı Mezardere Formasyonu yeşilimsi griden maviye kadar şeyller, silttaşları ve ince tanecikli kumtaşları içermektedir.

Dördüncü istasyon ise kuvaterner alüvyonları üzerindedir (Çağlayan ve diğ., 1988).

Oklalı, Örcünlü, Yassıören ve Baklalı'daki (5, 6, 7 ve 8 numaralı) istasyonların üzerinde yer aldığı Ceylan formasyonu, koyu griden griye kadar şeyller, marl taşları, silt taşları, tuf ve volkanik katmanlı killi kireçtaşları içerir (Turgut ve Eseller, 2000).

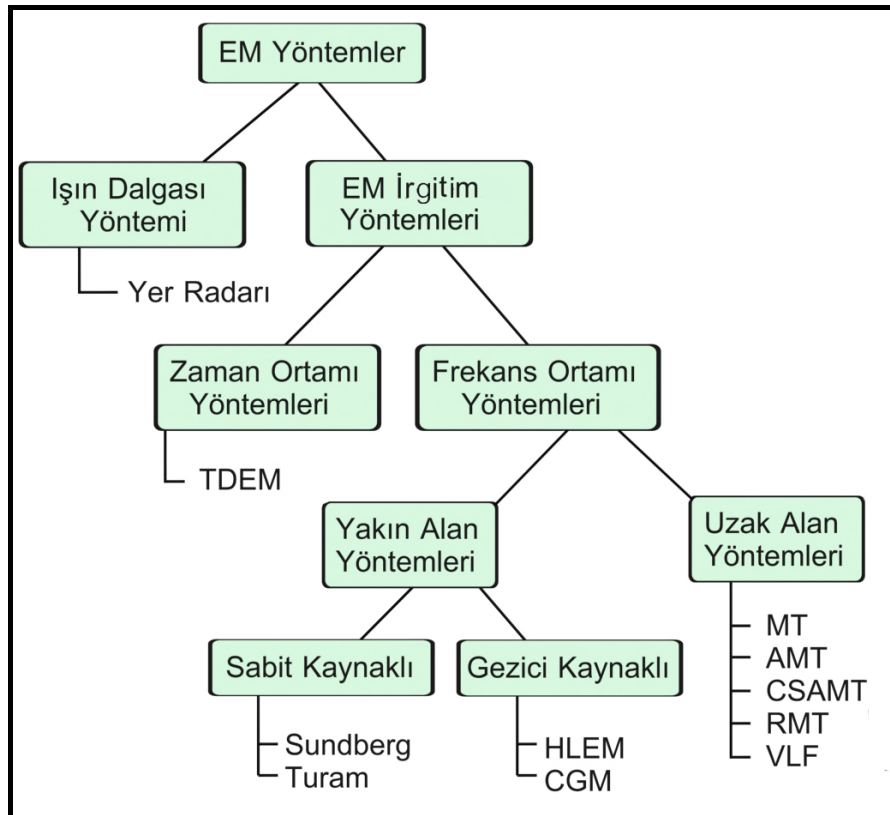
Tayakadın köyüne kurulan istasyon (9 numaralı) ise Ergene Grubu üzerine yerleşmiştir. Ergene Grubu, konsolide olmamış konglamera, kumtaşları ve kil taşlarından oluşmaktadır (Turgut ve Eseller, 2000).

2. GENEL KISIMLAR

2.1. JEOFİZİKTE ELEKTROMANYETİK YÖNTEMLER

Hem elektrik ($\mathbf{E}$) hem manyetik ($\mathbf{H}$) dalgaları içeren elektromanyetik dalgalar, gözle görülebilir ışıktan ve dolayısıyla renklerden, bunun üzerindeki frekanslarda röntgen ve gamma ışınlarına, altında ise kızıl ötesine ve radyo dalgalarına kadar uzanan çok geniş bir tayfta yayılmıştır. Jeofizik yöntemlerde ise elektromanyetik tayfın en büyük dalga boylarını (en düşük frekanslarını) kapsayan bölümleri kullanılmaktadır.

Jeofizikte kullanılan elektromanyetik (EM) yöntemler, (i) çalışma ilkelerine, (ii) kullandıkları frekans bandına, (iii) EM alan kaynaklarına, (iv) alıcıların kaynaktan uzaklığına göre sınıflandırılabilirler. Bu sınıflandırmalar, yöntemlerin özellikleri hakkında da bilgi verir. Yapılan sınıflandırmaya göre (Gürer, yayınlanmamış ders notları) jeofizikte kullanılan elektromanyetik yöntemler Şekil 2.1’de yeniden düzenlenerek çizilmiş ve açıklanmıştır.



Şekil 2.1: Jeofizikte kullanılan elektromanyetik yöntemlerin sınıflandırılması

Yukarıdaki tabloda elektromanyetik yöntemler öncelikle ırgitim (indüksiyon) veya ışın dalgası ilkesiyle çalışmalarına göre ayrılmıştır. Işın dalgası ilkesini kullananlar tıpkı sismik dalgalarla yapılan ölçümler gibi çalışmakta olup, 100 MHz den 1 GHz'e kadar olan frekansları kullanırlar. Yeraltından bilgi edinmek için elektromanyetik dalgaların, yer içinde, yansıyan ve kırılan bir ışın dalgası olarak ilerlemesini esas alırlar.

İrgitim yöntemi ile çalışan aletler ise daha alçak frekansları kullanmakta olup, kaynaklardan yayılan birincil manyetik alana tepki olarak yeraltındaki iletkenlerin oluşturduğu ikincil elektrik ve manyetik alanları ölçerler.

İrgitim yöntemleri, kendi içinde zaman veya frekans ortamında çalışmasına göre sınıflandırılır. Zaman ortamında ölçüm yapan yöntemler, genellikle yer içine elektromanyetik dalgalar yayıp sonra bunları keserek ikincil alanı ölçerler.

Frekans ortamında çalışanlar ise belli frekanslarda yer içinde oluşan tepkiyi sürekli olarak ölçer ve kaydederler. Frekans ortamında çalışan yöntemler yakın alan ve uzak alan yöntemleridir. Yakın alan yöntemlerinde kaynak ve alıcı arası mesafe kısıyken, uzak alan yöntemlerinde bu mesafe çok büyüktür. Yakın alan, uzak alan sınırı genelde yaklaşık araştırma derinliğinin üç katı olarak alınır.

Yakın alan yöntemlerinin ikisinde de kaynak yapay vericiler olduğu için, bu yöntemlerde gruplandırma kaynağın gezici veya sabit olması dikkate alınarak yapılmıştır.

Uzak alan yöntemler ise, kendi içinde doğal kaynaklı ve yapay kaynaklı yöntemler olarak ayrılabilirler. Bu çalışmada kullanılan Manyetotelürik yöntem de, frekans yöntemlerinden uzak alan ölçüm yapanlardan biridir ve kuramsal ilkeleri bu sınıf içerisindeki diğer yöntemlerle aynıdır. Yer EM yöntemleri kavrayabilmemiz için EM ırgitimi (indüksiyonu) anlamak önemlidir.

2.2. ELEKTROMANYETİK İRGİTİM

Elektromanyetik teori Maxwell'in elektrik ve manyetik olayları tarif eden Gauss, Ampere ve Faraday'ın ortaya koyduğu kanunları bir araya getirmesiyle ortaya çıkmıştır. Bu nedenle elektromanyetik kuram ve elektromanyetik ırgitim (indüksiyon) hakkında bilgi verirken Maxwell'in ortaya koyduğu bütünden yola çıkılabilir.

Maxwell denklemleri:

1)Faraday yasası

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{d\mathbf{B}}{dt} \quad (2.1)$$

2) Ampere yasasının Maxwell tarafından geliştirilmiş hali

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon \frac{d\mathbf{E}}{dt} \quad (2.2)$$

3a ve 3b) Gauss yasası

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.3a) \quad , \quad \nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{q'}{\epsilon} \quad (2.3b)$$

Birinci denklem (2.1) zamanla değişen manyetik alanın elektrik alan meydana getireceğini, ikinci denklem (2.1) ise zamanla değişen elektrik alanın da manyetik alan meydana getireceğini gösterir. Üçüncü denklem (2.3a) manyetik alanın noktasal bir kaynağı olmadığını gösterirken dördüncü denklem (2.3b) elektrik alanın kaynağının elektrik yükü olduğunu ve büyüklüğünün ortamın dielektrik katsayısına bağlı olduğunu ortaya koyar (Griffiths, 1998'de Maxwell yasaları hakkında daha detaylı bilgi bulunabilir).

Bu denklemlerden yola çıkarak elektromanyetik alanlar için dalgaların yayılımını gösteren dalga denklemlerini de aşağıdaki gibi elde edebiliriz (EK 1. de dalga denklemlerin elde edilmesi detayıyla bulunabilir).

Elektrik alan için dalga denklemi:

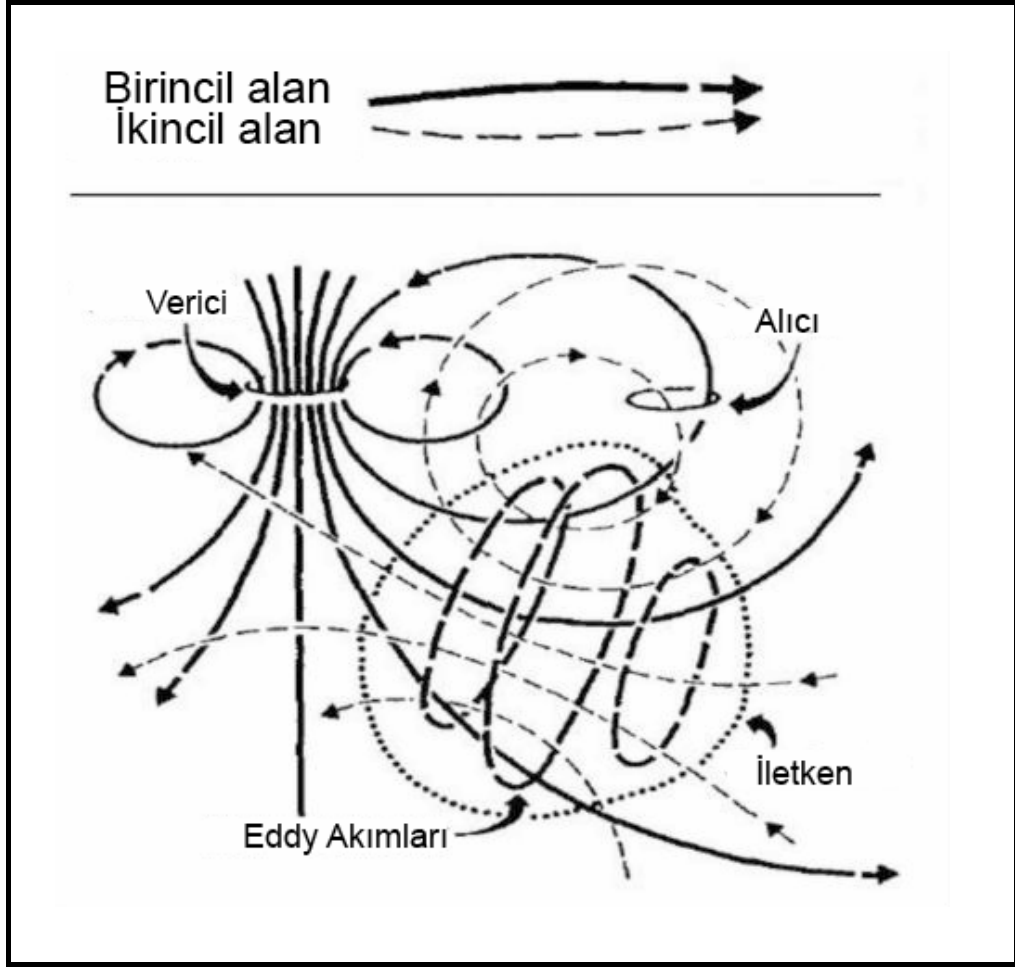
$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu_0 \sigma \frac{d\mathbf{E}}{dt} + \mu_0 \varepsilon \frac{d^2 \mathbf{E}}{dt^2} \quad (2.4)$$

Manyetik alan için dalga denklemi:

$$\nabla^2 \mathbf{B} = \mu_0 \sigma \frac{d\mathbf{B}}{dt} + \mu_0 \varepsilon \frac{d^2 \mathbf{B}}{dt^2} \quad (2.5)$$

şeklindedir.

Yukarıda da bahsedildiği gibi, manyetik alanın zamanla değişimi elektrik alan oluşturur. Dolayısıyla bir elektromanyetik alan kaynağından doğan manyetik alan yerin altındaki iletkenler üzerinde bir elektrik alan (Eddy akımları) ve bu elektrik alan da ikincil bir manyetik alan meydana getirir. Ancak kaynaktan yayınan elektrik alanlar yerin altında manyetik alan oluşumuna yol açamaz çünkü hava-yer arasındaki sınır koşullarına göre (EK 3.) elektrik alanın düşey bileşeni süresizdir. Bu nedenle elektrik alanlar yer içine nüfuz edemez, bu nedenle EM yöntemlerde elektrik alanın düşey bileşeni değil sadece yatay bileşenleri ölçülür. Bu şekilde zamanla değişen manyetik alanın bir başka iletken içerisinde elektrik akımları ve bu elektrik akımların bir manyetik alan oluşturmaya irgitim (indüksiyon) adı verilir.



Şekil 2.2: Elektromanyetik ırgitim (Klein ve Lajoie 1980)

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. MANYETOTELÜRİK YÖNTEM

Manyetotelürik (MT) yöntemde yapay veya doğal kaynaklarca üretilip yayılan elektromanyetik dalgaların (birincil elektrik ve manyetik alanlar) yerin altında ırgitimle (indüksiyonla) meydana getirdiği ikincil alanlarla beraber oluşturduğu toplam alan ölçülür. Amaç, yer derinliklerindeki elektriksel öz direnç sınırlarını ortaya koymak ve bunları yorumlayarak araştırmanın amacına uygun yeraltı bilgilerini edinmektir.

Manyetotelürik yöntemler kullanılan kaynağa ve kullanılan frekansa göre sınıflandırılabilir. Yapay kaynaklı yöntemler (RMT, CSAMT vb.) ile yıldırımların yarattığı elektromanyetik dalgaların kaynak olarak kullanıldığı AMT metodu, frekans bandının 0.1 Hz ve üstündeki kısmını kullanır. Manyetotelürik (MT) yöntemin kaynağı ise; 1 Hz ve üstü frekanslar için yıldırımlar, 1 Hz'den düşük frekanslar içinse Güneş-Manyetosfer etkileşimidir (Şekil 3.3).

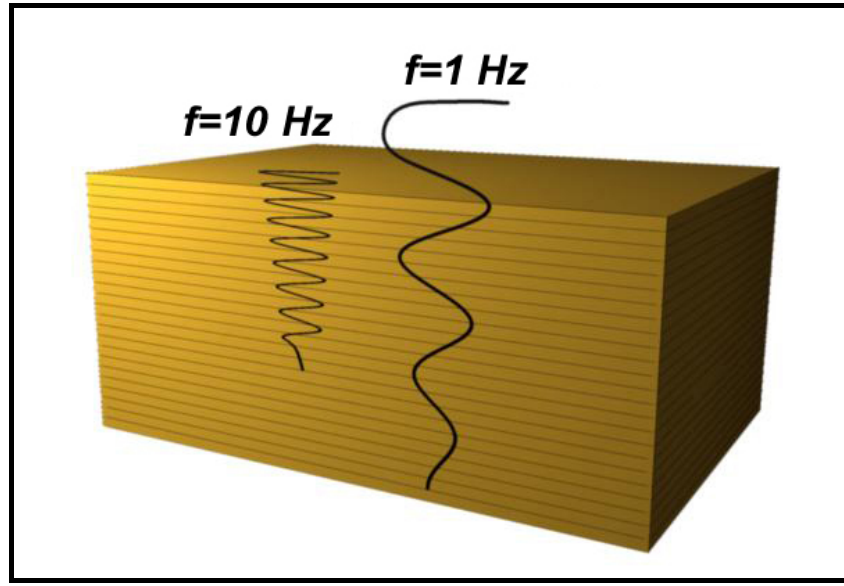
Elektromanyetik yöntemlerde, yöntemlerin kullandığı frekans aralığı ile ulaşmak istediğimiz araştırma derinliği arasında yakın bir ilişki vardır. Elektromanyetik yöntemlerde sinyalin ulaşabildiği derinliğini belirleyen bir parametre olan nüfuz derinliği (δ), kullanılan elektromanyetik dalgaların frekansına bağlı olarak değişir (Şekil 3.1). Elektromanyetik dalganın frekansı küçüldükçe nüfuz ettiği derinlik artar. MT yöntemler arasında seçim yaparken, araştırılacak hedefin bulunduğu derinlik dikkate alınarak, yöntemin kullandığı frekans bandına göre seçim yapılır. Homojen ortamlarda nüfuz derinliği yaklaşık olarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\delta \approx 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (3.1)$$

Nüfuz derinliği (3.1) dalganın inebildiği en büyük derinliği verirken buna benzer başka bir formül olan Bostick derinliği formülü (3.2), bir boyutlu ortam için belli bir frekanstaki elektromanyetik dalganın bize hakkında en çok bilgi sağladığı derinliği sağlar. Bu derinlik nüfuz derinliğinden daha düşük bir derinlik değerine denk

gelmektedir. İki formülde de görülmektedir ki, düşük öz dirençli bölgelerde dalgalar daha sığ derinliklere nüfuz etmektedir ve bu düşük öz dirençli bölgelerin altında verinin çözünürlüğü düşmektedir (Hyndman ve Shearer, 1989'da veri çözünürlüğü ile ilgili daha detaylı bilgi bulunabilir).

$$\delta \approx 356 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (3.2)$$



Şekil 3.1: Nüfuz derinliğinin frekansa bağlı olarak temsili değişimi. Şekilde görüldüğü gibi 1 Hz frekansına sahip dalga 10 Hz frekansındaki bir dalgadan daha derine inmektedir yani dalgaların frekansları küçüldükçe nüfuz derinlikleri artar.

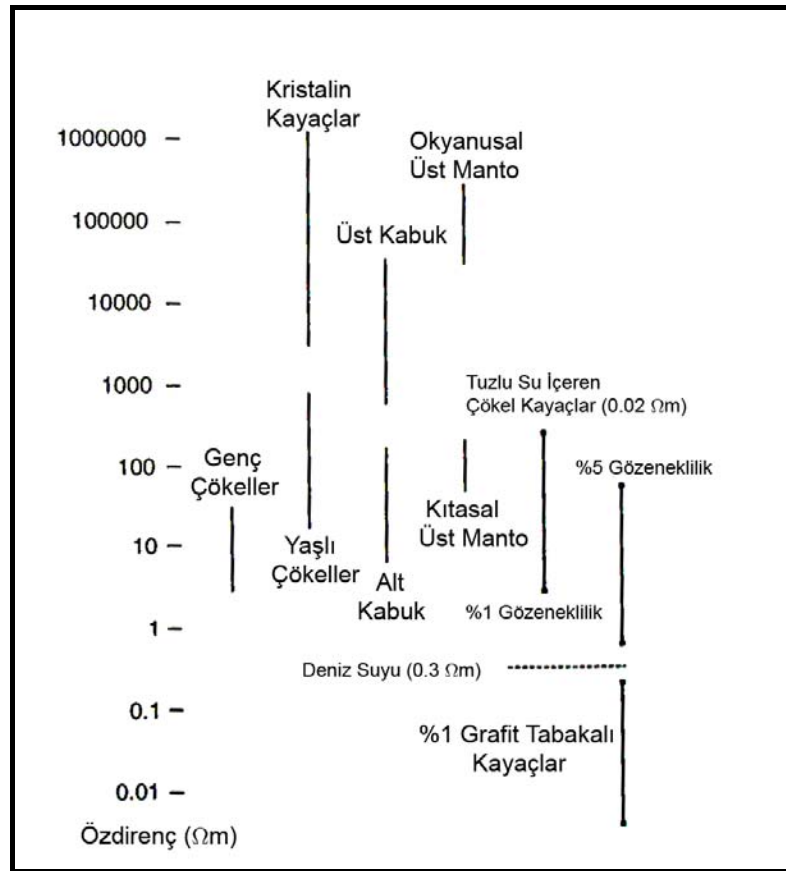
Farklı frekanslarda farklı derinlikten elde edilen yerin elektrik yapısına ilişkin verilerden, yeraltındaki birimlerin sınırları ve öz dirençleri hakkında bilgi almak mümkündür. Herhangi bir kayacın öz direnci, su içeriği, içerdiği suyun kimyası, sıcaklığı, kayacın kısmi ergimesi ile büyük ölçüde değişmektedir. Su içeriğinin kayaç öz direncinde bu önemli etkisi su-kayaç iletkenliği ve gözeneklilik arasında bir ilişki tanımlayan Archie kanununun temelinde durur.

Archie kanununa göre (Archie, 1942) gözeneklilik, sıvıların ve bölgedeki kayaçların iletkenliği ile ilişkili olarak elde edilebilir.

Bu kanuna göre (Archie, 1942);

$$\Phi^{-m} = \frac{\sigma_{SIVİ}}{\sigma_{kayaç}} \quad (3.3)$$

Burada katsayı (m); kayaçların gözenekliliğini oluşturan boşlukların geometrisine göre değişim göstermektedir. Küresel boşluklar için 1'den, çatlaklar için 2'ye kadar değişmektedir.

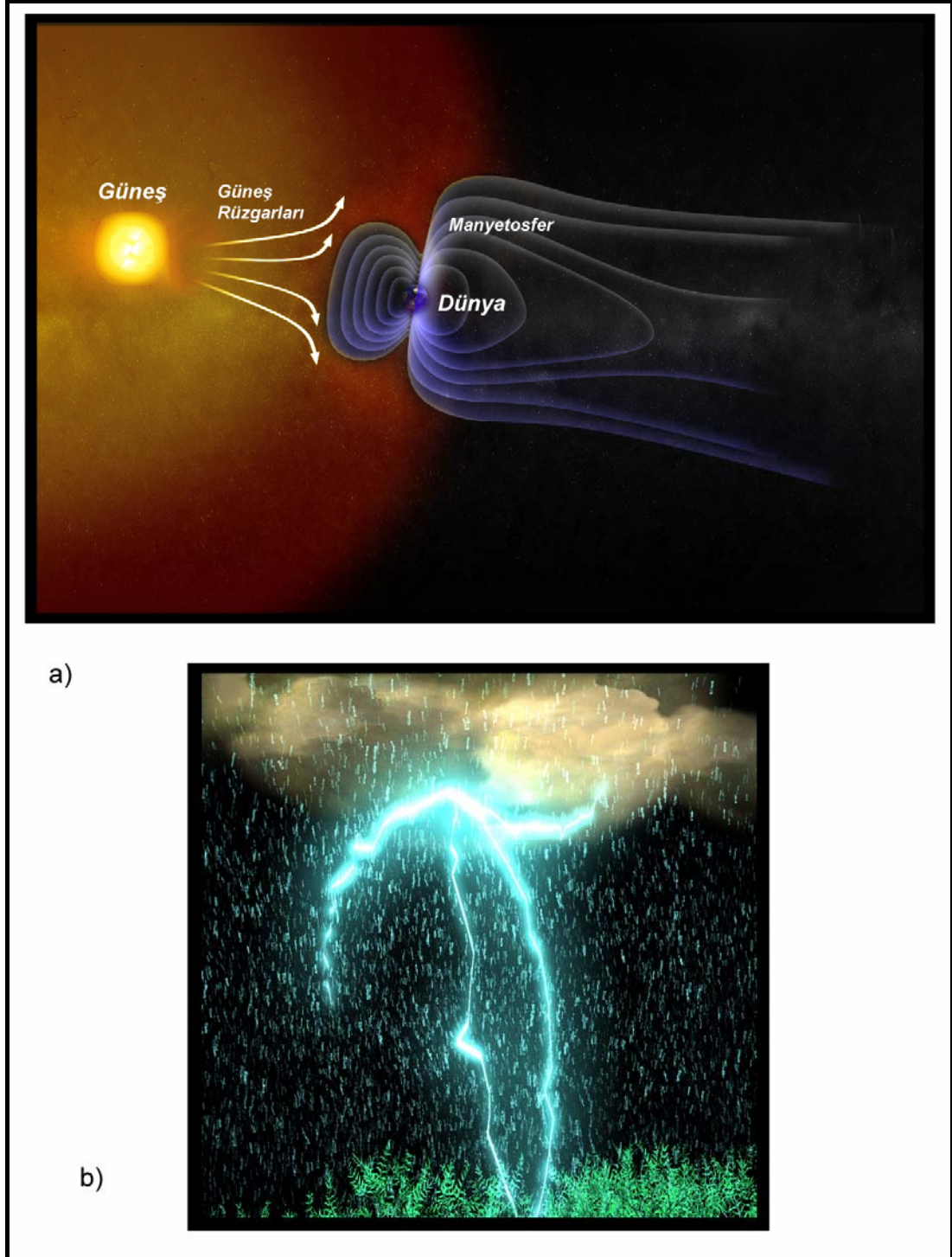


Şekil 3.2: Yer içindeki çeşitli iletkenlerin farklı gözeneklilik değerlerine göre öz direnç değerleri (Ritter ve diğ., 2005).

Yeraltındaki iletkenlerin türleri hakkındaki yorumlara da yukarıdaki gibi kayaç-öz direnç sınıflamaları sayesinde ulaşılabilir.

Ortaman iletkenliğini bulmaya yönelik olarak yapılacak MT çalışmalarda, sığ derinliklerde yer alan hedefler için yüksek frekanslı (AMT), derinde yer alanlar için ise düşük frekanslı yöntemler (MT) kullanmak uygundur. Bu çalışmanın konusu olan

yöntem ise doğal kaynaklı ve geniş frekans bantlı MT yöntemidir. Yukarıda da söz edildiği gibi bu yöntem için kaynak hem yıldırımlar hem de Güneş-Manyetosfer (Şekil 3.3) etkileşimidir.



Şekil 3.3: Güneş-Manyetosfer ilişkisi (a) ve yıldırımlar (b) Manyetotelürik (MT) yöntemin kaynağıdır (Vozoff, 1991, Jones, 1992; Jiracek ve diğ., 1995'ten faydalananarak çizilmiştir)

3.1.1. Manyetotelürük Yöntemde Temel Varsayım ve Sorunlar

Kaynaklardan yayımlanan elektromanyetik dalgalar yer yüzeyi ile karşılaştıklarında bir kısmı yansır ve bir kısmı ise kırılarak yer içine yayılır. Bu yansıma ve kırılarak aşağıya nüfuz etme işlemi tüm tabaka sınırlarında sürekli olarak gerçekleşir. Yansıyan bu dalgalar, yer içine nüfuz eden dalgalarla karşılaşır ve sönümlenmelerine neden olur; bu nedenle de yeryüzünden ölçülen alan sıfıra çok yakın olsa dahi sıfır değildir. Eğer sıfır olsaydı Manyetotelürük yöntemden bahsedilemezdi (Jiracek ve diğ.; 1995 ve Vozoff, 1972’de manyetotelürük yöntemin temelleriyle ilgili detaylı bilgiye ulaşılabilir).

Yeraltına iletilen elektromanyetik dalgalar, yeraltındaki iletken yapılarda akım akış ırgiterek (indüksiyon oluşturarak) ikincil alanlar meydana getirir, bu birincil ve ikincil elektrik alanların bir araya gelerek oluşturdukları toplam alanlar ölçülür. Yüzeyde ölçülen bu alanlar ise zaman ortamında kaydedilir. İşlem kolaylığı sağlaması için Fourier dönüşümü ile frekans ortamına dönüştürülür ve bunlar kullanılarak direntiler aşağıdaki gibi hesaplanır (Berdichevsky, 1999; Jones ve Groom, 1993’den daha detaylı bilgiye ulaşılabilir). Hesaplanan direntilerden de yerin varsayılan boyutsallığına göre çeşitli eşitlikler ve yöntemler kullanılarak diğer parametreler (özdirençler, fazlar vs.) belirlenir.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_x \\ \mathbf{E}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{xx} & \mathbf{Z}_{xy} \\ \mathbf{Z}_{yx} & \mathbf{Z}_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{H}_x \\ \mathbf{H}_y \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

MT yönteminde kabul edilen bazı varsayımlar vardır. Bunlardan en önemlisi bütün hesaplamaların yapılabilmesini sağlayan, ölçümün yapılacağı ortamda Maxwell denklemlerinin geçerli olduğu varsayımdır. Diğer önemli varsayımlar ise düzlem dalga varsayımı ve yerin boyutsallığı ile ilgili varsayımlardır.

a) Düzlem dalga varsayımı:

Bu varsayım elektromanyetik alanların düzlem dalgalar şeklinde olduğu varsayımdır. Bu varsayım büyük işlem kolaylıkları sağlar. Bu nedenle hangi yöntem olursa olsun düzlem dalga kabulünün geçerli olması sağlanmaya çalışılır. Kaynak güneş ise MT yöntem için bu kabul hemen her zaman geçerli olsa da çok yakında yıldırımların olması vb. durumlar bu varsayımı bozabilir, özellikle AMT frekanslarında (1Hz ve üstü) ölçü

alırken yöntemin kaynağı yıldırımlar olduğu için ölçümler alınırken dalgaların düzlem sayılamayacağı mesafelerde yıldırımların gerçekleşmemesi gerekir (Jiracek ve diğ., 1995'den daha detaylı okuma yapılabilir).

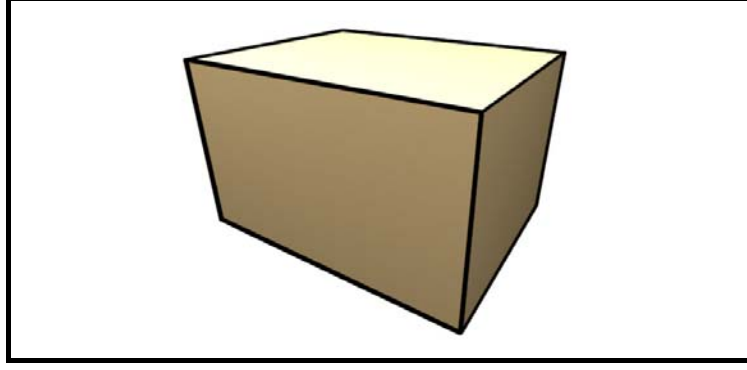
Elektromanyetik dalgaların düzlem olduğu varsayımı; elektrik ve manyetik alanların $1/r^3$ oranıyla azaldığı ve yaklaşık olarak nüfuz derinliğinin üç katı (~ 3.8) olan mesafeden itibaren geçerlidir (Goldstein ve Strangway, 1975).

b) Yer özdirenç değişiminde boyutsallık kavramı:

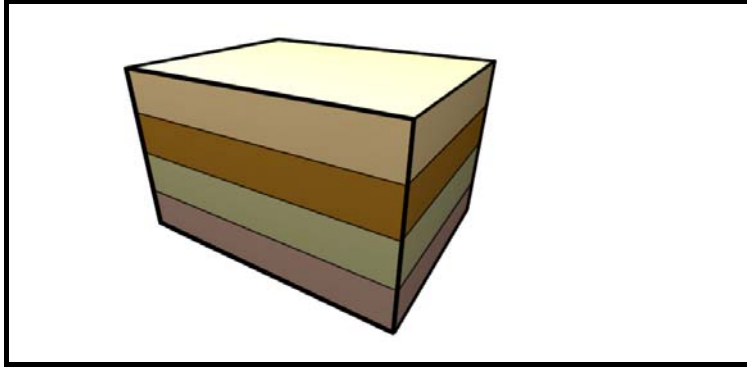
Genellikle yapılacak ölçümün, yeraltının ve donanımın niteliğine göre seçilir. Yeraltını basite indirgeyebilmek için gerçekte olduğundan düşük boyutluluklarda da ele alınabilir. Ancak yeraltı iletken yapısında Dekart konaç sistemine (kartezyen koordinat sistemi) göre her doğrultuda hızlı bir değişim varsa (üç boyutluluk) bu yöntemler ile elde edilecek sonuçlarda önemli hatalar olabilir. Bu durumda yer iletkenliğinin üç boyutlu değiştiği varsayılarak problem ele alınabilir. Ancak boyutsallık arttıkça gereken işlem yükü de katlanarak artmaktadır, özellikle üç boyutlu modelleri üretmek için gereken işlemlerin yapılmasında güçlü bilgisayarlara ihtiyaç duyulur. Aşağıda farklı boyutsallık durumları ele alınacaktır.

i) Tek boyutlu yer:

Homojen ve yatay tabakalanmış yer varsayımları (Şekil 3.4, Şekil 3.5) ancak çökel ortamlarda kısa periyot aralıklarında çalışılırken yahut çok büyük periyotların kullanılarak üst mantoda ölçümlerin yapılması gibi durumlarda geçerli olabilir. Yatay katmanlanmış yer varsayımı, yataya yakın katmanlanmış çökel katmanlarda düşey doğrultudaki tek boyutlu (düşey yönde) değişimi hesaplamak amacıyla tek ölçme noktasında birçok frekansı içeren bir bantta kayıt yapılıyorsa geçerlidir (Jones, 1992).



Şekil 3.4: Homojen yarısonsuz ortam (Başokur, 2005'ten yeniden çizilmiştir)



Şekil 3.5: Yatay tabakalanmış bir boyutlu ortam (Başokur, 2005'ten yeniden çizilmiştir)

Tek boyutlu ve homojen ortamda manyetik ve elektrik alan aşağıdaki gibi değişiklik gösterir;

$$A = A_0 e^{-i(kz - \omega t)} \quad (3.5)$$

$$= A_0 e^{i\omega t} e^{-i\alpha z} e^{-\alpha z} \quad (3.6)$$

Burada;

A_0 , alanın yüzeydeki değeri

$e^{i\omega t}$, sinüzoidal zaman değişimi

$e^{-i\alpha z}$, sinüzoidal derinlik değişimi

$e^{-\alpha z}$, derinlikle üstel azalmadır

$$\alpha = \sqrt{\omega \mu \sigma / 2}$$

Formülün son ifadesine göre $z = \delta = 1/\alpha$ olduğunda, bu derinlikte alan, yüzeydeki değerinin 1/e katı kadar olacak demektir. Bu nedenle, “ δ ”, nüfuz derinliği olarak adlandırılır.

Nüfuz derinliği, herhangi bir periyot, T , için yaklaşık olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\delta(T) = [2\rho_a(T) / \omega\mu]^{1/2} \approx 503[\rho_a(T)T]^{1/2} \quad (3.7)$$

Tek boyutlu ortamlarda iletkenlik sadece derinlik (z) yönünde değişiklik gösterir.

İletkenlik:

$$\sigma = (1/\rho) \quad (3.8)$$

formülü ile verilir. Burada; h , derinlik; ρ , öz dirençtir (Kaufman ve Keller, 1981; Vozoff, 1991'den faydalanarak detayıyla incelenebilir).

Değişimin tek yönlü olması nedeniyle direnti gereyi (empedans tensörü) basit bir forma indirgenerek

$$\mathbf{Z}_{1D} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{Z}_{xy} \\ -\mathbf{Z}_{xy} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

şeklini alır ve herhangi frekanstaki direnti değeri birbirine dik yöndeki elektrik ve manyetik alanların oranından bulunur.

$$\mathbf{Z}(\omega) = \frac{\mathbf{E}_x(\omega)}{\mathbf{H}_y(\omega)} = \frac{\omega\mu_0}{k} \quad (3.10)$$

Yatay tabakalanmış ortamda ise katman sınırlarından yansıyan enerji de hesaplara katılmalıdır bu nedenle yatay katmanlı ortamlarda elektrik ve manyetik alanların değişimi hesaplanırken yukarıda verilen ifadeye bir eleman daha ilave edilir.

$$A = A e^{ikz} + B e^{-ikz} \quad (3.11)$$

Burada ilk ifade, “A” dalganın aşağı giden kısmı; ikinci ifade “B” ise sınırdan yansıyarak yukarı giden kısmı ifade eder. Direnti gereyi ise homojen ortam için geçerli olan ifadenin aynısıdır.

Deri olayı (skin effect) nedeniyle her frekansta direnti (empedans) nüfuz ettiği derinlikle ilgili bilgi taşır. Direntinin görünür öz direnç ve fazlarla ilişkisi sayesinde de aynı noktada pek çok farklı derinlik için görünür öz direnç ve faz değerleri elde edilebilir.

Direnti-görünür öz direnç ilişkisi,

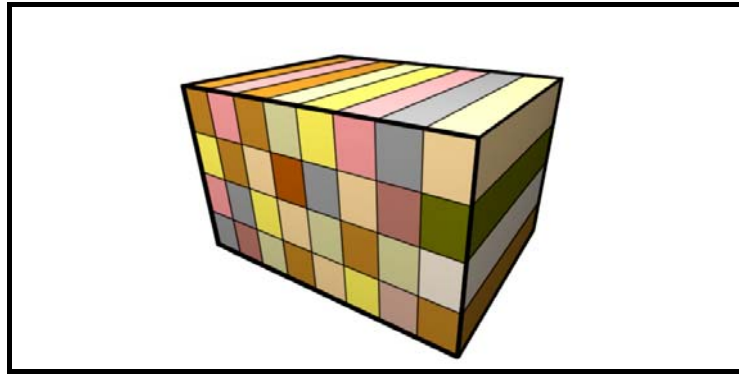
$$\rho_{a,xy}(\omega) = (1 / \mu \omega) \left| \mathbf{Z}_{xy}(\omega) \right|^2 \quad (3.12)$$

formülü ile, direnti-faz ilişkisi,

$$\phi_{xy}(\omega) = \tan^{-1} [\text{Imag } \mathbf{Z}_{xy}(\omega) / \text{Real } \mathbf{Z}_{xy}(\omega)] \quad (3.13)$$

formülüyle verilir. Burada; μ , manyetik geçirgenlik ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N.A}^{-2}$); ω , açısal frekans ($2 \cdot \pi \cdot f$).

ii) İki boyutlu yer:



Şekil 3.6: İki boyutlu ortam (Başokur, 2005'ten yeniden çizilmiştir)

Yeryüzü iki boyutlu (Şekil 3.6) kabul edilerek ölçümler yapıldığında sadece düşey yönde değil yatay yöndeki değişimi de ele alma olanağı doğar. Bu sayede Maxwell denklemlerinden, E polarizasyonu (kutuplanması) ve B polarizasyonu (kutuplanması) ayrımı yapılır (Şekil 3.8). B Kutuplanması durumu jeofizik yazınında çoğu kez “Transvers Manyetik” veya “TM” olarak da adlandırılır, $\mathbf{H}_y$, $\mathbf{E}_x$ ve $\mathbf{E}_z$ alan bileşenlerini kapsar, manyetik alan jeolojik doğrultuya paralel, elektrik alan ise jeolojik yapıya dik ve düşey yöndedir. Ancak uygulamada elektrik alanın düşey bileşeni ölçülmez, çünkü elektrik alanın normal bileşeni hava-yer sınır şartlarına (Ek: 5.1) göre sürekli olmadığından yer içine nüfuzu gerçekleşemez (Tikhonov, 1950). Elektrik

alandaki süreksizlik, kontaklardaki elektrik yükü birikiminden kaynaklanmaktadır ve bu galvanik etki yaratmaktadır. B-Pol (B Kutuplanması), çevresine göre nispeten düşük iletkenliğe sahip yapılara (sığ derinliklerdeki yüksek öz dirençli yapılar vb.) daha duyarlıdır. Ayrıca B-Pol durumu üç boyutlu iletken yapıların yarattığı bozucu etkilere karşı daha az duyarlıdır (Berdichevsky, 1999; Jiracek ve diğ; 1995; Ting ve Hohmann, 1984'ten E-Pol ve B-Pol durumlarının özellikleri hakkında daha fazla bilgi edinilebilir). B-Pol durumu için Maxwell denklemleri aşağıdaki gibidir;

$$\frac{\partial \mathbf{H}_y}{\partial x} = \sigma \mathbf{E}_z \quad (3.14.a)$$

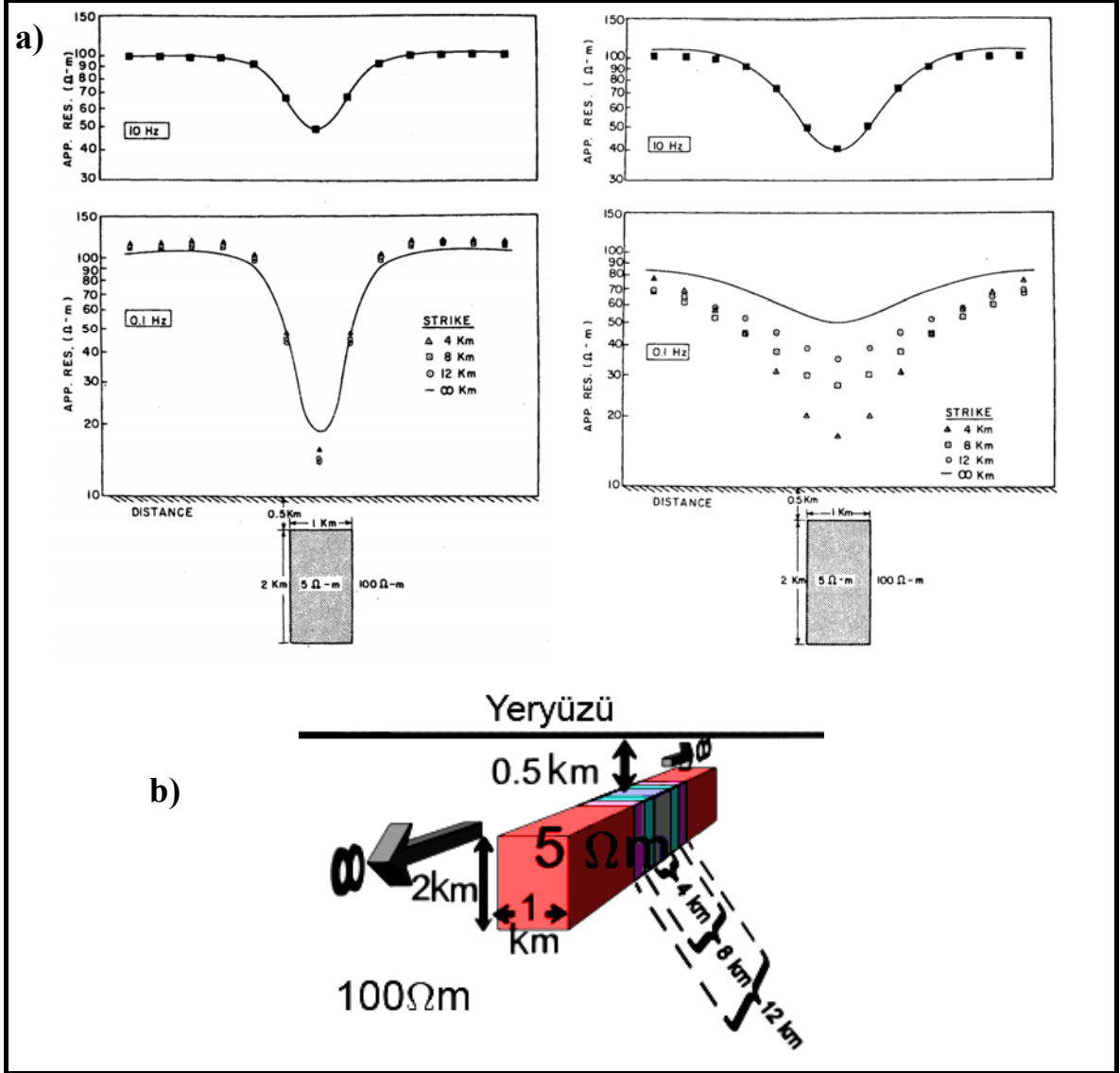
$$-\frac{\partial \mathbf{H}_y}{\partial z} = \sigma \mathbf{E}_x \quad (3.14.b)$$

$$\frac{\partial \mathbf{E}_z}{\partial x} - \frac{\partial \mathbf{E}_x}{\partial z} = -i\omega \mu \mathbf{H}_y \quad (3.14.c)$$

E Kutuplanması (E-Pol) durumu “Transvers Elektrik” veya “TE” olarak da adlandırılır ve B-Pol’un tam tersi şekilde, yani $\mathbf{E}_y$, $\mathbf{H}_x$ ve $\mathbf{H}_z$ bileşenleri ölçülerek yapılır. Elektrik alan jeolojik doğrultuya paralel, manyetik alan ise dik ve düşey yöndedir. Bu alan bileşenlerinin hepsi sınırlarda sürekli olduğundan alanlar jeolojik sınırlar çevresinde yumuşak geçişlidir, bu nedenle görünür öz direnç de kontaklarda yumuşak bir geçişe sahip görünecektir (Jiracek ve diğ., 1995). E-Pol durumu ise B-Pol durumunun aksine çevresine göre iletken yapılara (derindeki iletken yapılar vb.) karşı daha duyarlıyken; yalıtkan üç boyutlu kütlelerin yarattığı bozucu etkilere karşı daha az duyarlıdır (Berdichevsky, 1999; Jiracek ve diğ; 1995; Ting ve Hohmann, 1984'ten E-Pol ve B-Pol durumlarının özellikleri hakkında daha fazla bilgi edinilebilir).

Özdirenci ortamdan fark eden üç boyutlu cisimler üzerinde alınan ölçülerde jeolojik doğrultunun uzanımı ile E-Pol durumunun duyarlılığı arasında bir ilişki vardır. Ting ve Hohmann, 1981’de farklı miktarlardaki jeolojik uzanımlar için B-Pol ve E-Pol durumlarında alınan ölçümlerin nasıl fark ettiği ortaya konmuş ve Şekil 3.7’deki gibi gösterilmiştir. Buna göre jeolojik doğrultu uzanımı arttıkça E-Pol durumu için ölçümler, düşük frekanslarda öz direnç değişimlerine karşı duyarsızlaşmaktadır. Buna karşın, B-

Pol durumu için hesaplanan öz dirençler her uzanım miktarı için modeldeki iletkenlik değişimlerine duyarlıdır ve bu değişim öz direnç eğrilerinde daima kendini göstermektedir.



Şekil 3.7: a) 10 ve 0.1 Hz frekanslarında B-Pol ve E-Pol ölçümlerinin yeraltındaki üç boyutlu bir iletken kütlenin farklı uzanımları için verdiği değerler (Ting ve Hohmann, 1981), b) Ting ve Hohmann (1981) tarafından modellenen bu kütlenin üç boyutlu diyagramı (Orijinal şeklin kolay anlaşılabilmesi için Ting ve Hohmann, 1981'den faydalanılarak çizilmiştir)

E-Pol durumu için Maxwell denklemleri ise aşağıdaki gibi verilir;

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -i\omega \mu H_z \quad (3.15.a)$$

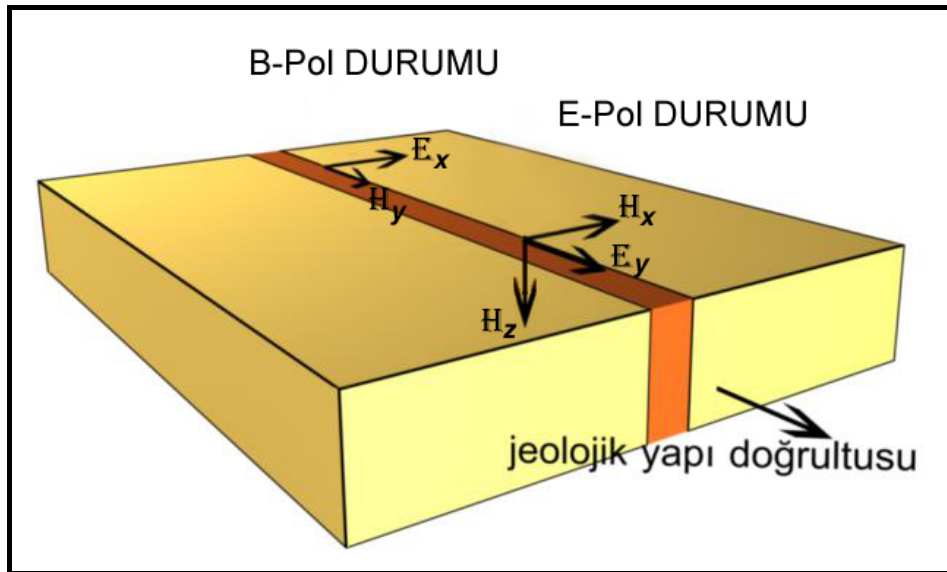
$$\frac{\partial E_y}{\partial z} = i\omega \mu H_x \quad (3.15.b)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial z} = \sigma E_y \quad (3.15.c)$$

İki boyutlu ortamlarda direnti gereyi (tensörü) ise aşağıdaki şekli alır;

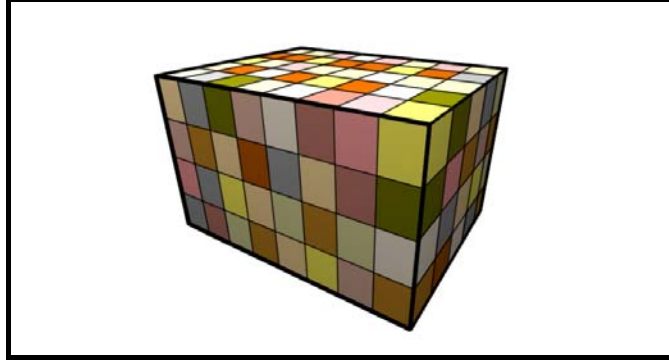
$$Z_{2D} = \begin{bmatrix} 0 & Z_{xy} \\ Z_{yx} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Tek boyutlu veya homojen ortamlar için direnti gereyine (tensörüne) bakılacak olursa ortamın iki parametre ile ortaya konulabildiği görülebilir (Direntinin gerçel ve sanal bileşenleri). Ancak iki boyutlu ortamlar için iki farklı direnti değerinden bahsedildiği için bu sayı dörde, ölçüm doğrultusunun jeolojik yapıya açısını da ele almamız gerektiği için beşe çıkmaktadır (Jiracek ve diğ, 1995'ten boyutsallık ve yerin boyutsallığına göre empredans tensörünün özellikleri ile ilgili daha fazla bilgi edinilebilir).



Şekil 3.8: İki boyutlu ölçümlerde B-Pol ve E-Pol durumları için ölçülen bileşenler

iii) Üç boyutlu yer:



Şekil 3.9: Üç boyutlu ortam (Başokur, 2005'ten yeniden çizilmiştir)

Yerin üç boyutlu olarak ele alındığı durumlarda yer içindeki değişimin her üç yönde de meydana geldiği kabul edilmektedir (Şekil 3.9). Bu durumda direnti gereyi en karışık şekline bürünür ve;

$$\mathbf{Z}_{3D} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{xx} & \mathbf{Z}_{xy} \\ \mathbf{Z}_{yx} & \mathbf{Z}_{yy} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

halini alır. Görüldüğü gibi üç boyutlu yer durumunda direnti gereyinin (tensörünün) bütün elemanları birbirinden farklıdır ve yukarıda bahsedildiği gibi iki boyutlu ortamlar için 5 adet parametreden bahsedilirken üç boyutlu ortamlar için bu sayı 8'e çıkmaktadır. Bunlar her gerey elemanının sanal ve gerçel bileşenleridir (Jiracek ve diğ, 1995'ten daha detaylı bilgi edinilebilir). Ayrıca iki boyutlu yer konusunda bahsedilen gibi bir durum ayrımı yapma olanağı da bulunmadığından işlemler oldukça güçleşmektedir ancak üç boyutlu yorumlamada iki boyutlu yer varsayımında olduğu gibi bir açı seçiminin yeri yoktur.

3.2. MANYETOTELÜRİK ÖLÇÜMLERİN İŞLENMESİ VE YORUMA HAZIRLANMASI

3.2.1. Alınan Ölçülerin Düzeltilmesi

Manyetotelürük ölçüm cihazlarında da diğer birçok cihazdaki gibi veri kalitesinin yükseltilmesi işlemi, ölçümlerin alınmasının öncesinde başlar. Bunun ilk adımı gürültünün az olduğu uygun bir istasyon yeri belirlemektir (Vozoff, 1972; Phoenix Geophysics, 2005). İkinci adım ise istasyonun kurulumunda gösterilecek titizliktir

(kabloların bir bobin oluşturmaması, bağlantıların sağlamlığı, bobinlerin doğrultularının ve düzeçlerinin doğruluğu vb.) (Phoenix Geophysics, 2005). İşlemlerin bu aşamadan sonrası ise aygıt unsurunu da içermektedir (doğru filtrelerin seçilmesi vb.). Ancak kaydedilen bu veriler de, ham halleriyle çeşitli bozucu etkileri içermektedirler (bölüm 2.3.1.-b). Bu nedenle verilerden yorumlamaya gidebilmek için yapılacak işlemlerden önce bunların düzeltilmesi gerekir.

Manyetik alanın elektrik alana göre daha bölgesel değişimler göstermesi özelliği nedeniyle, veri kalitesinin iyi olmaması durumlarında manyetik alan, aynı anda bir başka bölgede çalışmakta olan diğer bir istasyonda ölçülen manyetik alanın verisi ile düzeltililebilir. ‘Uzak Başvuru’ (Remote Reference) adı verilen bu yöntem ile veri kalitesinin bazı durumlarda arttırılması mümkündür (Gamble ve diğ., 1979).

Verilerin içerdiği bozucu etkilerin atılması ve verinin doğru jeolojik açıya çevrilmesi için de işlemler yapılmaktadır (Groom ve Bailey, 1989; Swift, 1967). Ancak bu aşamadan sonra, veri yorumlamaları için gereken düz ve ters çözümleme işlemleri doğrulukla yapılabilir.

a) Doğrultu Seçimi:

Ölçülen alan bileşenlerinin jeolojik doğrultuya dik veya paralel alınması, uygulamada sağladığı pratik özelliklerden (E Kutuplanması ve B Kutuplanması durumunun ayrımı) dolayı önem taşır. Ancak ölçüm esnasında doğrultuyu doğru bir şekilde bilmek genellikle mümkün olmamaktadır. Bu nedenle de, doğru açı, matematiksel yöntemlerle bulunmaya çalışılır.

Herhangi bir doğrultuda ölçülmüş olan alanlar matematiksel olarak istenilen doğrultuya çevrilebilir. Yani, $\mathbf{E}$ alanını, herhangi bir $+\theta$ açısı kadar döndürerek bu açıda ölçüm alındığında bulunulacağı düşünülen $\mathbf{E}'$ alanı aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$\begin{pmatrix} \mathbf{E}'_x \\ \mathbf{E}'_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{E}_x \\ \mathbf{E}_y \end{pmatrix} \quad (3.18)$$

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (3.19)$$

$$\mathbf{E}' = \mathbf{R} \mathbf{E} \quad (3.20)$$

Burada $\mathbf{R}$, döndürme dizeyidir (matrisidir) (Swift, 1967).

Manyetik alan da elektrik alanla aynı şekilde hesaplanabilir;

$$\mathbf{H}' = \mathbf{R} \mathbf{H} \quad (3.21)$$

Direntiler ise;

$$\mathbf{Z}' = \mathbf{R} \mathbf{Z} \mathbf{R}^T, \quad (3.22) \quad (\text{Swift, 1967})$$

formülü ile bulunabilir. Yukarıdaki formülde (3.22) $\mathbf{R}^T$, $\mathbf{R}$ ' nin devrik dönüşümüdür (transpozudur);

$$\mathbf{R}^T = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (3.23)$$

Jeolojik doğrultu hakkında bilgi verdiği düşünülen elektromanyetik alan doğrultusunun bulunması büyük ölçüde matematiksel yöntemlerle gerçekleştirilmekte, ancak başka bir seçenek olarak, jeolojik bilgilere dayalı yorumlarla da doğrultu seçimi yapılabilir. Buna karşın jeolojik bilgi ile yeraltının durumu hakkında sınırlı bilgi sahibi olunabildiğinden, direnti gereyi mümkün olduğunca iki boyutlu duruma (3.16) yaklaştırılır. θ açısını bulmak için, direnti gereyi (tensörü), $\mathbf{R}$ döndürme dizeyi (matrisi) ile çevrilerek, köşegen (diagonal) elemanlarının en büyük, gereyin diğer elemanlarının en küçük olduğu açı bulunur (Swift, 1967). Bu açı verinin en fazla iki boyutluluk gösterdiği açı, dolayısıyla jeolojik doğrultu açısı olacaktır. Swift (1967) yönteminde jeolojik doğrultu açısı aşağıdaki ifadenin yardımıyla elde edilir;

$$4\theta_0 = \tan^{-1} \frac{\left[(Z_{xx} - Z_{yy})(Z_{xy} + Z_{yx})^* + (Z_{xx} - Z_{yy})^* (Z_{xy} + Z_{yx}) \right]}{|Z_{xx} - Z_{yy}|^2 - |Z_{xy} + Z_{yx}|^2} \quad (3.24)$$

(Swift, 1967)

b) Bozucu Etkiler ve Giderilmesi

Manyetotelürük yöntemde karşımıza çıkan bozucu etkiler, verinin ırgitim (indüktif) ve doğru akım (galvanik) etkileriyle bozulmasından kaynaklanan problemlerdir. Manyetotelürük ölçüm verilerinin, söz edilen etkilerle bozulmasından kaynaklanan problemler ve bunların giderilmesi aşağıdaki şekildedir;

Frekans bağımlı olan ırgitim etkileri, bozucu kütlenin içinde oluşan ikincil elektrik akımlarıyla ilişkilidir. İrgitimde (indüksiyonda) zamanla değişen birincil alan, kapalı kütle içinde ikincil elektrik akımlarını (eddy akımları) meydana getirir. Bu akımlar ikincil manyetik alanları oluşturur. Girdap akımlarının oluşturduğu ikincil alan, birincil alana eklenerek ırgitimsel bozulmayı meydana getirir. MT dalgaların periyodu büyüdükçe (frekansı küçüldükçe) yüzeye yakın kütlelerin ırgitim etkileri azalım gösterir ve sonunda yerel iletkenlik yapısının ırgitim yanıtı yanında önemsiz kalır. Yani ırgitim etkiler, düşük periyotlarda (yüksek frekanslarda) etkindir. Bu nedenle bir frekans değerinden sonra, EM alanda ortaya çıkan bozulma periyottan bağımsız hale gelir. İrgitim etkilerinden manyetik alan fazla etkilenmezken, elektrik alan önemli ölçüde etkilenir. Bazı ırgitimsel etkiler hakkında ayrıntılı değerlendirmeler, Caldwell ve diğ (2004) ve Gürer (1995)'de bulunabilir.

Doğru akım (Galvanik) etkiler frekanstan bağımsız olarak elektrik alanda meydana gelen bozulmalardır. Bu etkiler, Manyetotelürük (MT), doğru akım öz direnç (DC) ve aktif kaynaklı EM ölçümlerinde gözlenirler. Elektrik alandaki bu bozulmalar, ölçüm yeri yakınlarındaki yüzeye yakın kütleler ve topografya sınırlarında meydana gelen yük birikimlerinden kaynaklanır. Bu konuda ayrıntılı bilgi veren kaynaklar için Caldwell ve diğ (2004), Chave ve Smith (1994), Gürer, (1995)' e başvurulabilir.

Yüzeye yakın üç boyutlu kütlelerin yarattığı bozulmalar iki başlık altında toplanabilir; bunlar (i) faz karışması ve (ii) statik kayma etkileridir (Ogawa, 2002).

i) Faz karışması, yüzeydeki elektrik dağılımının, iki boyutlu ortam üzerinde yer alan üç boyutlu cisimler tarafından etkilenmesiyle oluşur. Faz karışmasının giderilmesinde sıklıkla Groom ve Bailey'in (1989) geliştirdiği bir gerey (tensör) çözümleme yöntemi kullanılır. Groom ve Bailey'in (1989) yaklaşımı iki varsayım taşır; bunlardan birincisi

ortamın iki boyutlu olması gereksinimi, diğeri ise yerel yapıların sadece galvanik bozulmalara sebep olmasıdır.

Bu yöntemde, bütün bozucu etkiler $\mathbf{C}$ ile gösterilen bir gerey (tensör) içerisine toplanmış ve bu gereyle bozulmaya uğramamış direntileri (direntileri) içeren $\mathbf{Z}'$ gereyinin çarpımının ölçülen direntilere eşit olması gerektiği ortaya konmuştur.

$\mathbf{C}$ dizeyini (matrisini) oluşturan bozucu etkiler de ayrı ayrı gereylerle ifade edilmişlerdir;

Buna göre,

$$\mathbf{C} = g\mathbf{TSA}, \text{ dır.} \quad (3.25)$$

Burada; $\mathbf{C}$, bozulma gereyi; $\mathbf{T}$, burulma gereyi (twist); $\mathbf{S}$, makaslama gereyi (shear); $\mathbf{A}$, anizotropiyi içeren dizey; g , istasyon kazancıdır (site gain). Alanın büyütmesi olan g , elektrik alanın genelini büyütür. Bozulma gereyi $\mathbf{C}'$ 'ye, doğru şekilde ulaşmak için $\mathbf{A}$, $\mathbf{S}$ ve $\mathbf{T}'$ nin verdiği değerler bahsedilen büyütme faktörü, g , ile çarpılır (Groom ve Bailey; 1989).

$$\mathbf{T} = \frac{1}{\sqrt{1+t^2}} \begin{bmatrix} 1 & -t \\ t & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.26)$$

$$\mathbf{S} = \frac{1}{\sqrt{1-e^2}} \begin{bmatrix} 1 & e \\ e & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.27)$$

$$\mathbf{A} = \frac{1}{\sqrt{1-s^2}} \begin{bmatrix} 1+s & 0 \\ 0 & 1-s \end{bmatrix}, \quad (3.28)$$

Yukarıdaki formüllerde: t , burulma; e , makaslama; s , yön bağımlılık (anizotropi) etkisidir.

Yöntem verilerin bozulmasına sebep olan bu etkileri, (3.25) ifadesindeki gereylerle veriden ayırarak işler;

$$\mathbf{Z} = \mathbf{R}(\theta) [\mathbf{CZ}^1] \mathbf{R}^T(\theta) \quad (3.29)$$

$$\mathbf{Z} = \mathbf{R}(\theta) [\mathbf{gTSA} \mathbf{Z}^1] \mathbf{R}^T(\theta) \quad (3.30)$$

Burada; $\mathbf{Z}$, ölçülen direnti gereyi (tensörü); $\mathbf{Z}^1$ ise, bozulmamış, ideal iki boyutlu direnti gereyidir (Groom ve Bailey, 1989).

Eğer verideki bozulma gerçekten frekans bağımsız gerçekleşmişse, metot, makaslama (e) , burulma (t), döndürme açısı (θ) ve yerel direntileri (empedansları) verecektir (Groom ve Bailey; 1989).

ii) Durağan (statik) kayma etkisi ise direntilerin büyüklüğünün her frekansta sabit bir miktar artması ya da azalması şeklinde gözlemlenir. Bütün frekanslarda gözlemlenen bir etki olduğundan ek bilgiler olmadan büyüklüğü hakkında kesin bir şey söylemek mümkün değildir. Faz karışmasının aksine, giderilmesinde, gerey çözümleme yöntemleri tek başına yeterli olmaz (Ogawa, 2002). Durağan etkiler, iki şekilde giderilebilirler. Bunlardan biri, başka kaynaklar kullanarak yeraltı hakkında ek bilgilere ulaşmak; diğeri ise verinin kendisini kullanarak gidermektir (Ogawa ve Uchida, 1996). Bu çalışmada durağan etkiler, bilinmeyen olarak ters çözüm işlemine (bölüm 3.2.1-b) dahil edilmiştir (Ogawa ve Uchida, 1996).

3.2.2. Düz çözüm ve ters çözüm

a) Manyetotelürikte düz çözüm:

Düz çözüm işlemi, ölçme yapılan bölgede jeolojik bilgileri de kullanarak, gerçeğe olabildiğince benzer yer altı modelleri tasarlayarak, bu modele benzer bir arazi üzerinde ölçülecek tepkiyi (yapay veri) üretme işlemidir. Ölçüm yapılacak arazi için geçerli olabilecek yeraltı yapılarının sınırlarına ve öz dirençlerine bir modelle benzeşim yaparak ve elektromanyetik dalgaların yer içindeki fiziksel yayılım özellikleri kullanarak yer tepkisinin elde edilmesi işlemidir. Çeşitli kullanım alanları vardır (Düz çözüm ve kullanım alanlarıyla ilgili daha detaylı bilgi Simpson ve Bahr, 2005'te bulunabilir), bunlardan bazıları:

- Arazi çalışması planlanırken aranan yapının bulunabilmesi için hangi periyotların kullanılması gerektiğinin belirlenmesi, alınacak ölçümler üzerinde çevredeki sığ kütleler vb. etkilerin yaratacağı olası bozulmaların tanımlanması, ölçümlerin planlanması.
- Arazide yapılan ölçümlerle bölgedeki bilinen iletkenlik yapılarının modellenmesiyle elde edilen model tepkilerinin karşılaştırılarak aralarındaki benzerlik ve farkların belirlenmesi, hataların veya daha önceden bilinmeyen yapıların ortaya çıkarılması. Düz çözümde kullanılmak üzere öngörülen yapıları değiştirerek araziden elde edilen verilere benzetilmesi böylece yerin altı ile ilgili bilgilere ulaşılması.
- Ayrıca ters çözüm işlemi için de düz çözüm sonuçlarına ihtiyaç vardır. Düz çözümle modellenen ortam gerçeğe ne kadar yakın olursa ters çözüm de bize o kadar doğruya yakın yeraltı görüntüsü verecektir. Ancak çok karmaşık başlangıç modelleri üretmek işlemlerimizi sağlıklı etkileyecektir, eğer öngörümüz çok hatalıysa bizi yanlış sonuçlara yönleltebilir. Yeraltı, olabilecek en sade ve gerçeğe yakın haliyle temsil edilmelidir.

b) Manyetotelürikte ters çözüm:

Ters çözüm, bilinen bir başlangıç modelinden düz çözümle elde edilen model tepkilerinin, başlangıç modeli parametrelerinin bir algoritma yardımıyla adım adım değiştirilerek, araziden alınan verilere yaklaştırılmasıyla model tepkisi ve arazi verisi arasındaki farkı kabul edilebilir tutan bir yeraltı modeli elde etme işlemidir. Ters çözüm yinelemeli bir işlemdir. Her yinelemede, düz çözüm için belirlenen başlangıç model değişkenleri ile araziden alınan veriler karşılaştırılarak belli hata sınırları içerisinde yeni model değişkenleri elde edilir. Her tekrarın sonunda elde edilen yeni model parametreleri bir sonraki tekrarda düz çözümleme için başlangıç modeli parametreleri olarak alınırlar. Belli şartlar sağlandığında tekrarlama işlemi durdurularak sonuç elde edilir. Bu şartlar; belli bir tekrar sayısının tamamlanması, ters çözümün her tekrarda aynı sonucu vermeye başlaması, istenilen hata sınırı içerisinde bir sonuca ulaşılması ve istenen hata sınırı içerisindeki en yumuşak sınırlara sahip modelin elde edilmesi olabilir. Ters çözüm işleminin durdurulması için bu şartlardan birinin veya birkaçının gerçekleşmesi şart olarak koşulabilir.

Birbirinden farklı yapılar ters çözümleme işleminde bize aynı yanıtı verebilir. Yani, aynı veri kümesinin ters çözümlemesi ile aynı hata aralığına sahip ancak birbirinden çok farklı modellere ulaşabiliriz. Yapılan işlemler gerçekte olması olası olmayan özellikte katmanlar bile verebilirler (Constable ve diğ, 1987). Ayrıca fazla hassas çalışılırsa gürültünün de etkisiyle aslında var olmayan çok yüksek sayıda katman bulunabileceği açıktır (Constable ve diğ, 1987). Fakat, gerçekte var olmadığı da iddia edilemez çünkü sonuç olarak elde edilen yapı bize arazide aldığımız ölçüyü mükemmel olarak verecektir. Buna rağmen, akla daha yatkın yapı sınırları veren çözümler bulunmak istenir. Bu nedenle ters çözümlerde bir yumuşatma faktörü (smoothness factor) tanımlanmıştır (Constable ve diğ, 1987). Böylece istenilen hata aralığında elde edilebilen en yumuşak sınırlara sahip model seçilebilir ve akla uygun olmayan; aşırı keskin sınırlar taşıyan sonuçlar bertaraf edilir.

3.3. ÇALIŞMADA KULLANILAN AYGIT

Çalışmada Phoenix Geophysics şirketinin ürettiği MTU-5A model, iki adet Manyetotelürik ölçüm cihazı kullanıldı. Bu cihazlar piyasada en çok kullanılan cihazlardan biri olup geniş frekans aralıklarında (384 Hz-0.0005 Hz arasında) ölçüm yapabilmektedirler (Phoenix Geophysics, 2005).

3.3.1. MT Ölçüm Cihazının Bileşenleri

Cihaz Bileşenleri:

- Kayıtçı:

Bobinlerden ve elektrotlardan gelen bilgiyi zaman serileri şeklinde hafıza kartının içine kaydeder. Bu kartlar dahili olarak kayıtçının içine yerleştirilmiştir. GPS (Küresel Yer-belirleme Sistemi) anteni aracılığıyla aygıtın kurulduğu yeri ve zaman serilerini doğru oluşturabilmek için zaman bilgisini GPS uydularından alır.



Şekil 3.10: MTU 5A Manyetotelürik ölçüm cihazı kayıtcısı

- Alıcı Bobinler:

Yatay iki yönde (x ve y) elektrik ve manyetik alan, düşeyde (z) sadece manyetik alanı ölçmek üzere 3 adet bobin bulunmaktadır. Bunlardan yatay yönde ölçüm yapacak olanlar kuzey-güney ve doğu-batı yönünde, düşey yönde ölçüm yapılacak ise düşey olarak gömülerek kullanılır.



Şekil 3.11: Alıcı bobin

- Elektrotlar:

Çalışma yerindeki gürültü seviyesini ve doğal potansiyel farkını ölçmek için 5 adet potansiyel elektrotu gereklidir. Bunlarda ikisi kuzey-güney, diğer ikisi ise doğu batı uzanımında açılarak kullanılır. Ayrıca cihazı her türlü aşırı yüklenmeden korumak amaçlı olarak bir elektrot da cihazın toprak hattına bağlanarak yere gömülür.



Şekil 3.12: Elektrotlar

- GPS Anteni:

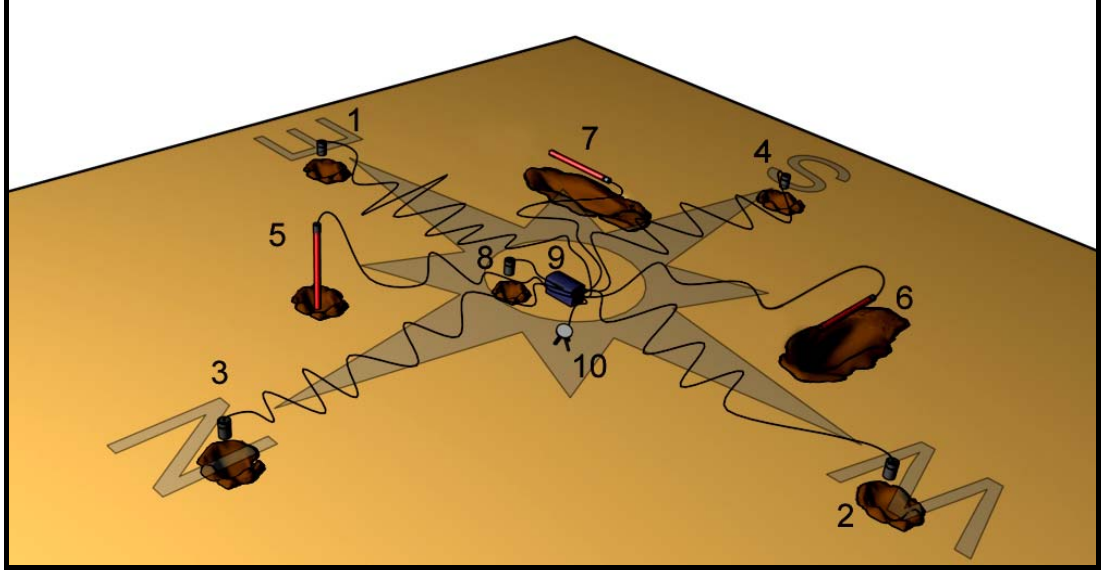
Kayıtçının GPS uyduları ile bağlantı kurarak, kaydın tam yerini, doğru zamanda kaydın alınıp bitirebilmesini ve elektrik-manyetik alanların kaydının eşzamanlı gerçekleştirilmesi için ayrıca sürekli olarak zaman bilgisini alabilmesini sağlar.

- Enerji Kaynağı:

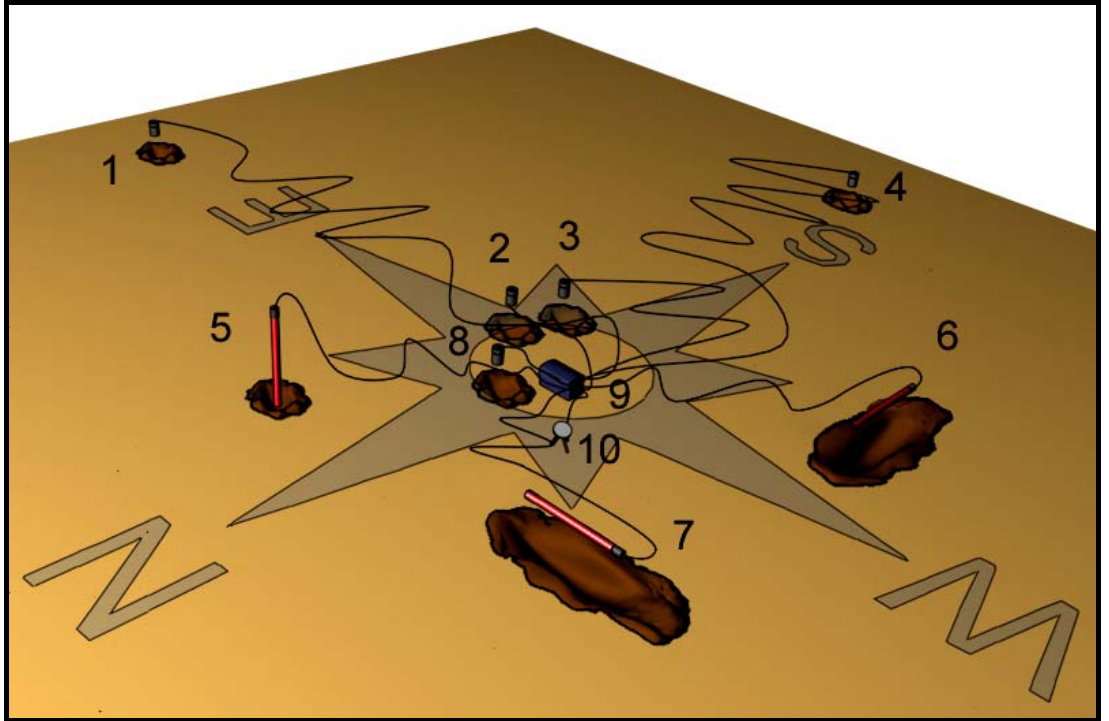
Çalışmada enerji kaynağı olarak standart 12 V araba aküleri kullanılmıştır. Ancak başka enerji kaynaklarının da kullanılması mümkündür (aynı voltajı verebilecek bataryalar vs.)

Yukarıda sayılan bileşenler arazi düzeninde iki şekilde yerleştirilebilirler. Bunlardan birincisi elektrot açılımını artı şeklinde (Şekil 3.13) yapılarak yapılır. Ancak artı şeklinde açılım yapmak arazi koşullarından dolayı mümkün değilse elektrotları “L”

şeklinde (Şekil 3.14) açarak daha az yer kaplayan bir açılım da gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada da iki istasyonda açılım bu şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.13: Bir MT istasyonunda artı şeklindeki elektrot açılımı için cihaz bileşenlerinin örnek yerleşimi (1-4: Potansiyel elektrotları, 5-7: Alıcı bobinler, 8: Toprak elektrotu, 9: Kayıtçı, 10: GPS anteni) (Phoenix Geophysics, 2005'ten yeniden çizildi)



Şekil 3.14: Bir MT istasyonunda "L" şeklindeki elektrot açılımı için cihaz bileşenlerinin örnek yerleşimi (1-4: Potansiyel elektrotları, 5-7: Alıcı bobinler, 8: Toprak elektrotu, 9: Kayıtçı, 10: GPS anteni) (Phoenix Geophysics, 2005' ten yeniden çizildi)

4. BULGULAR

4.1. ÖLÇÜM NOKTALARI

Çalışmanın gerçekleştirildiği ölçüm noktaları, Şekil 1.1'deki haritada görülmektedir. Ölçüm noktalarının en batısında, Büyükçekmece Gölü'nün batısından geçerek Kuzeybatıya uzanan doğrultu atımlı faylar yer almaktadır. Ölçüm noktaları yerleri bilinen bu fayları dik kesecek şekilde Güneybatı-Kuzeydoğu istikametinde yerleştirilmiş ve bu faylarınkine benzer bir uzanıma sahip olduğu tahmin edilen ancak kesin yeri bilinmeyen Batı Karadeniz Fayı'nı da kesebilmek için doğuya doğru uzatılmıştır. Ancak Batı Karadeniz Fayı'nın yeri tam bilinemediğinden, böyle bir fay var olduğu halde Şekil 1.1'de gösterilen istasyon yerleşimlerin daha batısında kalıyorsa MT profilimizin araştırma alanı dışında kalmış olabilir.

Sekiz gün gibi sınırlı bir süre içerisinde arazi çalışmaları gerçekleştirilen bu çalışma esnasında her çalışmada karşılaşılabilecek pek çok aksilik ve problemlerle karşılaşmıştır. Yoğun yağış altında çalışmak, lastik patlaması, trafiğin kilitlenmesinden dolayı gerekli bölgelere zamanında ulaşamamak vb. Çalışmada kullanılan Manyetotelürik metot da, gerekli aletlerin hem ağırlık ve kapladıkları alanlar hem de kurulumu açısından zahmetli ve çok kişiye ihtiyaç duyan bir yöntemdir. Ayrıca verilerin işlenmesi ve yoruma hazırlanması da deneyim gerektiren bir işlem olduğu için, bu çalışma pek çok kişinin yoğun katkısını içermektedir. Zaman sınırı nedeniyle düşük kalitede ölçü alınan bölgelerdeki ölçümlerin tekrarlanması mümkün olmadığı gibi bahsedilen problemler de var olan kısıtlı zamanda istenilen miktarda istasyonda ölçü alınmasını engel olmuştur.

Yüksek gürültü içeriği nedeniyle, Kadıköy istasyonu, aynı anda ölçüm yapılan Örcünlü istasyonu ile Tayakadın istasyonu ise Baklalı'da kurulan istasyonla uzak referans (Gamble ve diğ, 1979) tekniği ile veri düzeltilmesi gerçekleştirilmiştir. Diğer istasyonlar için ise, gürültü daha az olduğundan veya uzak referans yöntemi ile belirgin bir düzelme yakalanamadığından, uzak referans uygulanmasına gerek görülmemiştir.



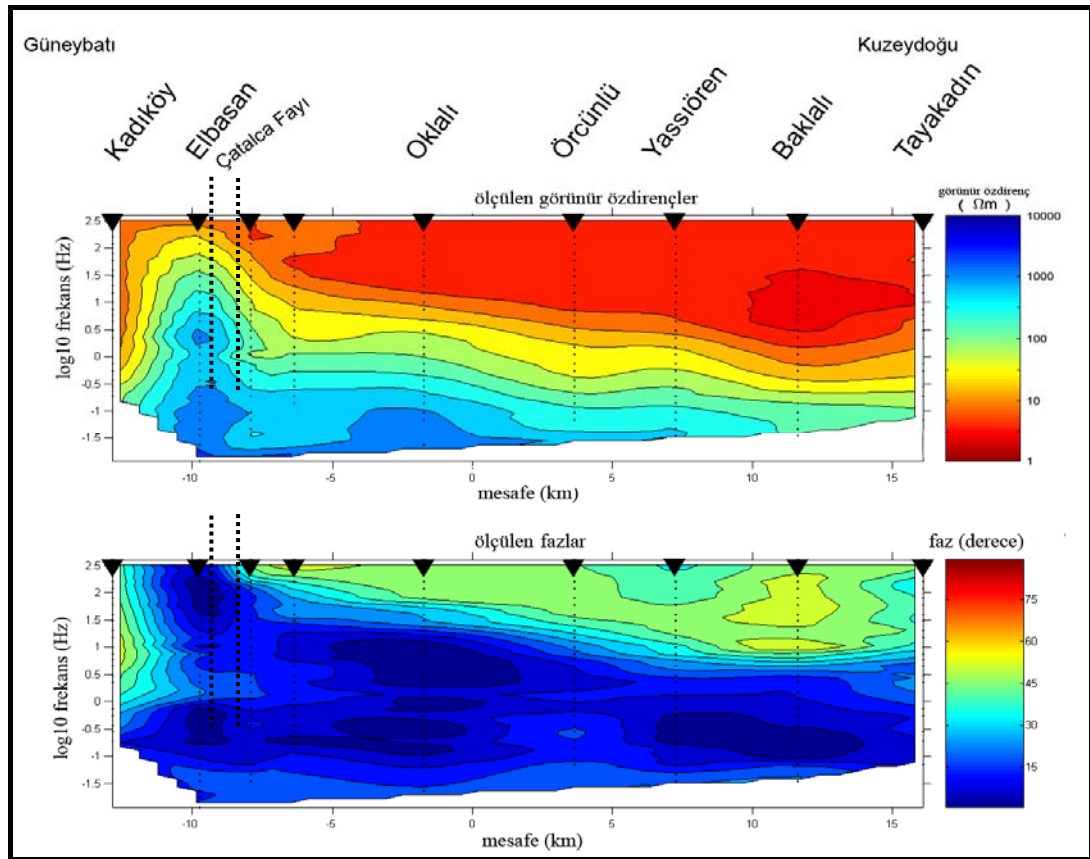
Şekil 4.1: Arazi çalışması sırasında çekilen çeşitli fotoğraflar

4.2. VERİ SUNUMU

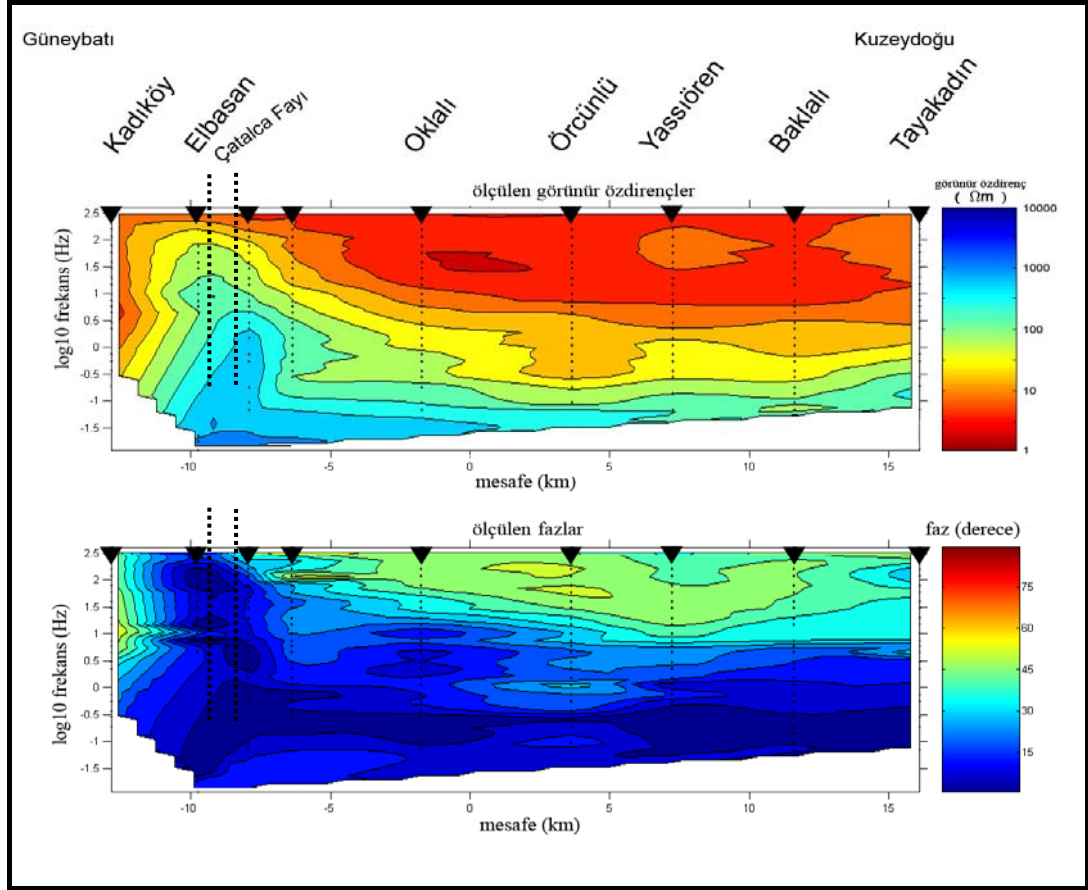
4.2.1. ANDIRAN KESİTLER

Ters çözümleme işlemlerine sokulmadan önce, elde edilen veriler; frekans ortamında görüntülenir. Bunlar derinliğe göre sınırları ve yapı gerçek öz dirençlerini yansıtan kesitler değildir; yalnızca verinin iki boyutlu sunumlarıdır.

Bu çalışmada E Kutuplanması (E-Pol) ve B Kutuplanması (B-Pol) durumlarından elde edilen görünür öz direnç ve faz andıran kesitleri aşağıdaki şekillerde (Şekil 4.2, Şekil 4.3) yer almaktadır.



Şekil 4.2: B-Pol durumu görünür öz dirençleri için andıran kesitler (Görünür öz dirençler ve fazlar)



Şekil 4.3: E-Pol durumu görünür öz dirençleri için andıran kesitler (Görünür öz dirençler ve fazlar)

4.2.2. İRGİTİM YÖNEYLERİ

İrgitim (indüksiyon) yöneyleri, farklı frekans ve noktalar için manyetik alanın yatay ve düşey bileşenlerinin karmaşık (gerçel ve sanal bileşenli) oranlarının yöneyler (vektörler) şeklinde ifadesidir (Simpson ve Bahr, 2005). Yöneylerin işaret ettiği; akımın nerede yoğunlaştığı ve yoğunlaşan akımın büyüklüğüdür. Pratik olarak ise bunu, yöneylerin doğrultuları ile iletken yapıların yerini ve büyüklükleri ile de bu iletkenin ne kadar çok iletken olduğunu gösterdikleri şeklinde yorumlayabiliriz (Simpson ve Bahr, 2005).

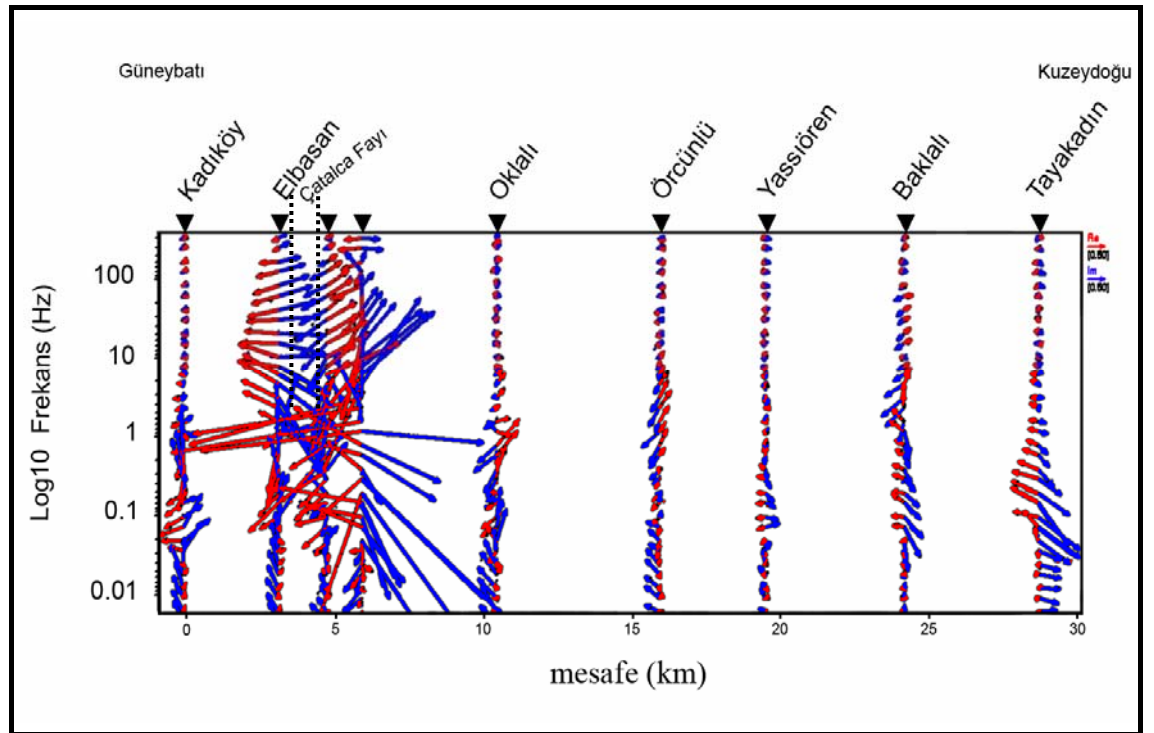
İrgitim yöneylerinin farklı şekillerde kullanıldığı yöntemler mevcuttur. Bunlardan biri olan ve bu çalışmada kullanılan Parkinson yönteminde, yukarıda bahsedildiği gibi yöneylerin (vektörlerin) doğrultusu iletken yapıyı gösterir. Bazı başka yöntemlerde ise (Wiese veya Schmucker) yukarıda anlatılanın tam aksine yöneyler yalıtkanları işaret eder (Ritter ve diğ., 2005). İrgitim yöneyleri ile hangi frekanslara karşılık gelen

derinlikte, nerede bir iletken yapı olduğu, ölçüm yerinin boyutsallığı veya yakınlardaki denizler gibi güçlü iletkenlerin veriyi ne kadar etkilediği hakkında yorumda bulunulabilir.

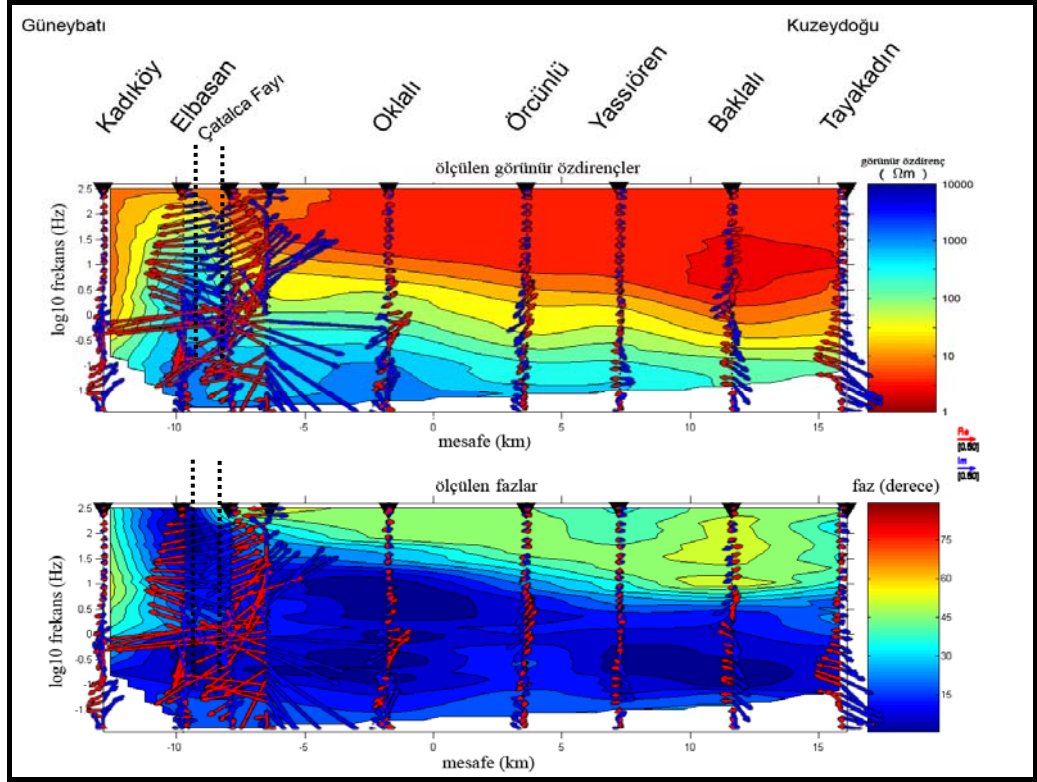
Parkinson yöntemi için ırgitim yöneyleri aşağıdaki ifadeye (4.1) göre verilir (Simpson ve Bahr, 2005' ten daha detaylı bilgiye ulaşılabilir).

$$\mathbf{H}_z(w) = \begin{pmatrix} T_x(w) & T_y(w) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{B}_x / \mu_0 \\ \mathbf{B}_y / \mu_0 \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

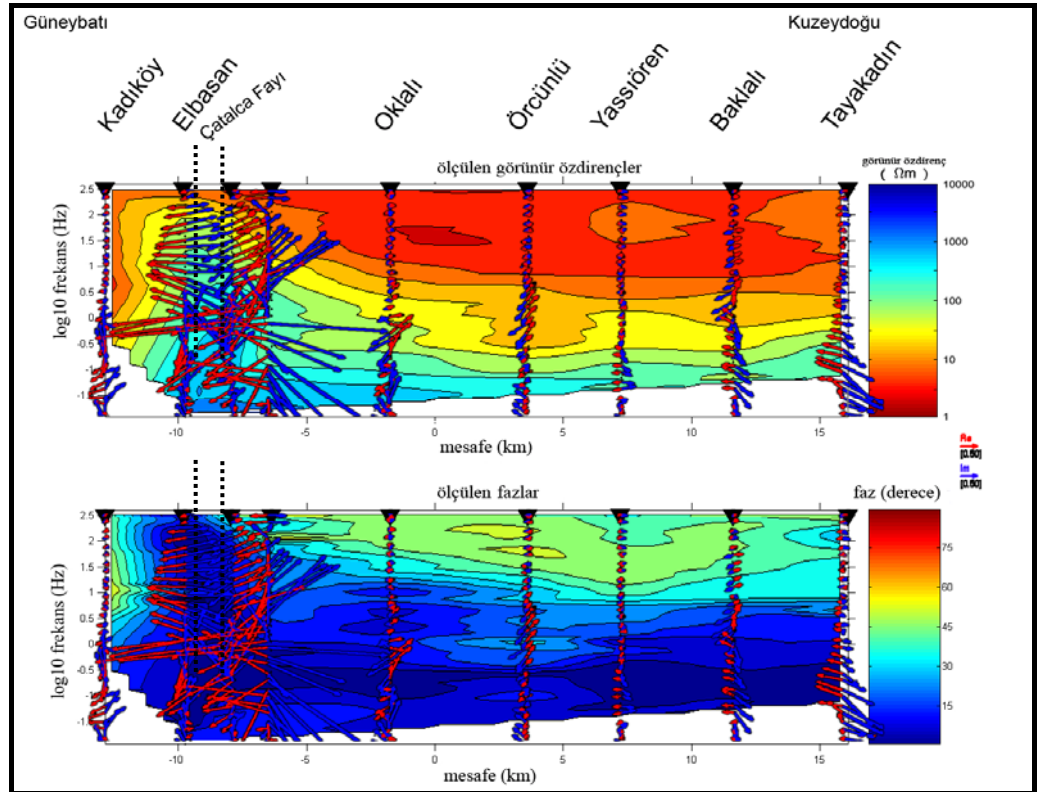
Aşağıda da ırgitim yöneyleri (Şekil 4.4) ile veri arasındaki ilişkiyi görmek için andıran görünür öz direnç kesitleriyle üst üste çakıştırılmıştır (Şekil 4.5, Şekil 4.6).



Şekil 4.4: İrgitim yöneylerinin frekanslara göre doğrultuları



Şekil 4.5: İrgitim yöneyleri ile B-Pol durumu öz dirençleri ve fazlarına ait andıran kesitlerin çakıştırılmış şekli



Şekil 4.6: İrgitim yöneyleri ile E-Pol durumu öz dirençleri ve fazlarına ait andıran kesitlerin çakıştırılmış şekli

Yukarıdaki öz direnç ve faz kesitlerinde görüldüğü gibi E Kutuplanması (E-Pol) ve B Kutuplanması (B-Pol) durumları birbirine oldukça yakındır. Bu da ortamın bir boyutluluğunun yüksek olduğunu göstermektedir. Kesitlerin güneyinde istasyonların sıklaştırıldığı bölgeye bakacak olursak, burada fayların neden olduğu değişim de kolaylıkla görülebilmektedir.

Ritter ve diğ. (2005)'e göre Parkinson ırgitim (indüksiyon) yöneylerinin gerçel bileşenleri iletkenleri işaret eder, Bu nedenle ırgitim yöneylerinin en büyük değerlere ulaştığı bölgenin yani ikinci (Elbasan) ve üçüncü istasyonların hemen yanlarında bulunan iletken bölgeleri işaret ettiği söylenebilir. Yine Ritter ve diğ. (2005)'e göre, tıpkı burada, ikinci (Elbasan) ve üçüncü istasyonlarda görüldüğü gibi, birbirine göre ters yönleri işaret eden, gerçel ve sanal bileşenleri arasındaki paralelliğin bozulduğu ırgitim yöneyleri burada bir yapı sınırı olduğunu işaret etmektedir.

Baklalı istasyonunda da yöneylerin 1 Hz'den küçük frekanslarda yöndeğiştirdiği gözlenebilir. 1 Hz'in üstünde kalan frekanslara denk gelen derinliklerde kuzeydoğuda bir iletken varken 1 Hz'in altında ırgitim yöneyleri bu iletkenin etkisinden kurtulmuştur.

Dördüncü istasyondan sonra ırgitim (indüksiyon) yöneylerinin yüzeye yakın bölgelerde küçüldüğü gözlenmektedir. İrgitim yöneylerinin küçülmesi, o bölgelerde iletkenlik değişiminin olmadığını göstermektedir (Ritter ve diğ. 2005). Buna göre, bu bölgelerde ~3.16 Hz'e kadar yaklaşık aynı iletkenlik değerlerine sahip geniş bir bölge varken, daha düşük frekanslarda iletkenlik yapısında değişiklikler olduğu görülmektedir. Altıncı (Örcünlü) ve yedinci (Yassıören) istasyonlarda ~3.16 Hz altında kalan bölgeye bakıldığında, yine gerçel-sanal bileşenlerin birbirine göre paralelliğinin bozulduğu ve bu iki istasyona ait ırgitim yöneylerinin gerçel bileşenlerinin birbirine göre ters yönleri işaret ettikleri görülmektedir. Ritter ve diğ., 2005'e göre bu durum, bir düşük iletkenlikli bölgenin iki yanında yer alan yüksek iletkenlik bölgelerini işaret edebilir. Ancak ırgitim yöneylerinin büyük olmaması bu iki istasyonun altında, bu bölgeler arasındaki iletkenlik farkının çok küçük ve yumuşak geçişli olduğunu, dolayısıyla bir sınır teşkil etmeyebileceğini göstermektedir.

4.3 BOZULMA ETKİLERİNİN ATILMASI VE JEOLJİK DOĞRULTULARIN MATEMATİKSEL OLARAK HESAPLANMASI

Verilerden doğru akım (galvanik) bozulmaların etkilerini atılması ve matematiksel olarak jeolojik doğrultunun bulunması; Mc Neice ve Jones, 2001’de tarif edilen yöntem ile ve yine bu araştırmacıların geliştirdiği bilgisayar programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

Bu yazılım öncelikle, Groom ve Bailey’in (1989) geliştirdiği, veri çözümlemesine dayanan yöntem ile (Groom ve Bailey yöntemi bölüm 3.2.1-b’de detaylı olarak açıklanmıştır) bozulma etkilerini giderir. Bozucu etkilerin veride yarattığı etkiler çok önemli miktarlara ulaşabildiğinden bu işlem yapılmadan doğrultu açılarını bulmak ve modelleme işlemleri sağlıklı olmayabilir.

Yüzeye yakın üç boyutlu kütlelerden kaynaklanan bu etkiler giderildikten sonra Swift (1962) yöntemi (bölüm 3.2.1-a’da bu yöntem detaylı olarak açıklanmıştır) ile direnti gereyinin köşegenel (diagonal) olan ve olmayan elemanları iki boyutlu direnti gereyi ifadesine olabildiğince yaklaştırılarak verinin en yüksek iki boyutluluk gösterdiği açı elde edilir.

a) Doğrultu açılarının hesaplanması

Bu yöntemin özelliği olarak dört şekilde doğrultu hesaplanabilir (Mc Neice ve Jones; 2001):

- i) Tek istasyon-tek frekans (Singlesite-Singlefrequency): Her istasyon ve her frekans bandı için farklı farklı jeolojik doğrultu açıları hesaplar.
- ii) Çok istasyon-tek frekans (Multisite-Singlefrequency): Bütün istasyonları aynı anda kullanarak, bütün istasyonlar için ortak olarak her frekans bandı için ayrı jeolojik doğrultu hesaplar

iii) Tek istasyon-çok frekans (Singlesite-Multifrequency): Her istasyon için, ilgili istasyonlardaki bütün frekanslardaki verileri kullanarak, her istasyon için birer jeolojik doğrultu hesaplar.

iv) Çok istasyon-çok frekans (Multisite-Multifrequency): Aynı anda bütün istasyonların ve bütün frekanslardaki verilerini kullanarak bize verinin geneli için geçerli bir jeolojik doğrultu verir.

b) Elde edilen açılar

Bölgede elde edilen verilerden faydalanan yukarıda bahsedilen dört yöntem kullanılmış ve doğrultu açıları elde edilmiştir (Şekil 4.7). En Güneybatı'da kurulan istasyonda, yüksek gürültü nedeniyle çok sayıda verinin atılması doğru bulunmuştur. Bu nedenle bu istasyonda 10-100 Hz aralığında veri bulunmamaktadır. Dolayısıyla, söz konusu istasyonda bu frekans aralığında ya açı elde edilememiş ya da bu frekans için elde edilen açıların belirlenmesinde bir etkisi olmamıştır.

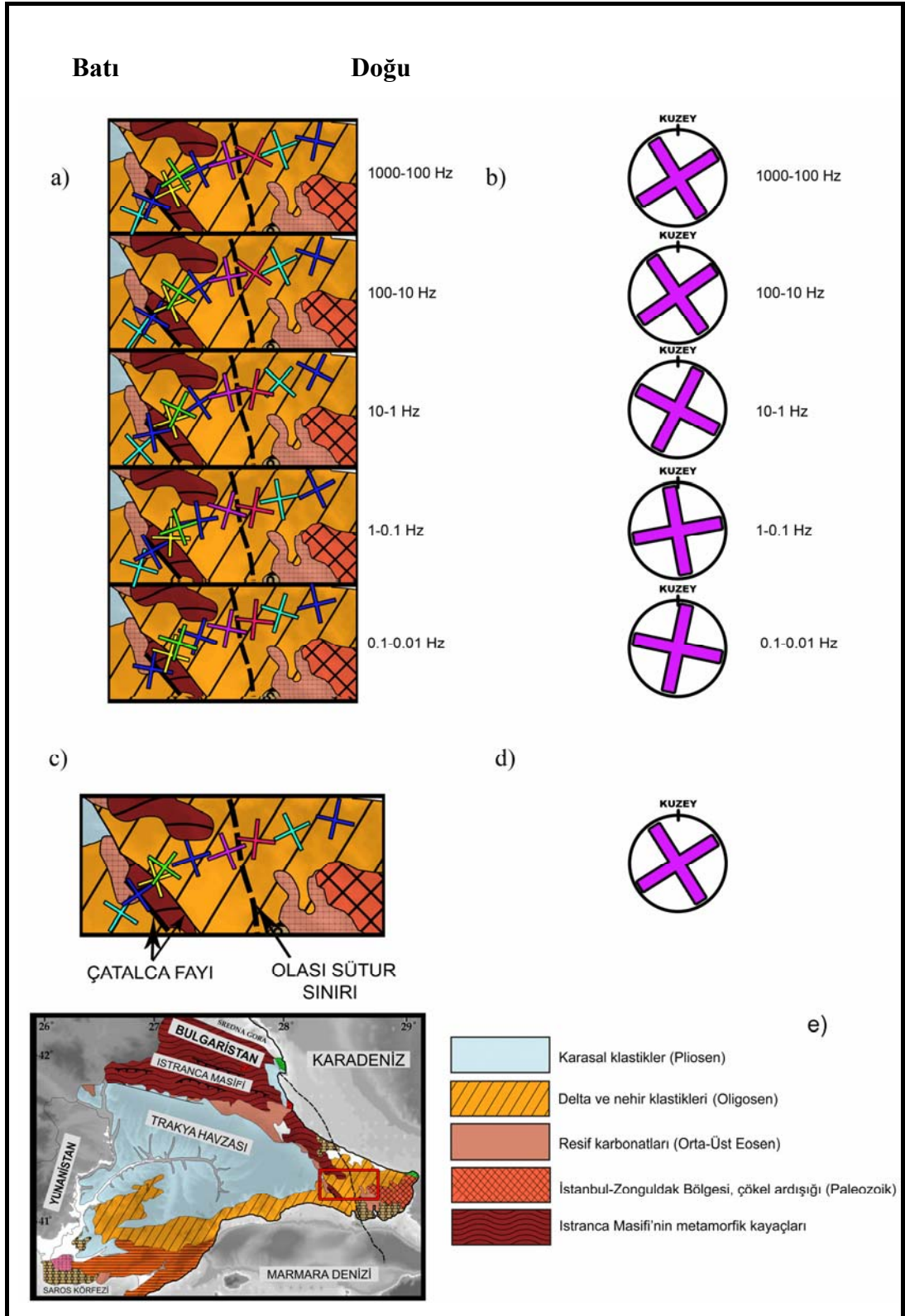
Elde edilen açılara bakılırsa, kullanılan yöntem fark etmeksizin, ilk istasyonlarda (Güneybatı), Çatalca Fayı'nın uzanımına oldukça yakın açı değerleri elde edilmiştir. Özellikle Tek istasyon-Tek frekans verisinde (Şekil 4.7 a) bu durum en net şekilde gözlenmektedir. Düşük frekanslarda gözlenen jeolojik doğrultu, daha yüksek frekanslara doğru ilerledikçe saat yönünde dönmektedir. Sadece Çok istasyon-Tek frekans verisinde 1-10 Hz frekans aralığında bu durumdan sapma gözlenmiştir. Bu sapmanın, Çok istasyon-Tek frekans yönteminde ilgili frekans için, açıları, bütün istasyonlar için ortak üretildiğinden, diğer istasyonların etkisi olduğu söylenebilir.

Bu saat yönündeki dönme hareketi 1-0.1 Hz ve altında saat yönünün tersine dönmeye başlamaktadır.

Tek istasyon-Tek frekans ve Çok istasyon-Tek frekans verilerinin (Şekil 4.7) 10-100 Hz frekans aralığına ulaşıldığında bütün istasyonlar hemen hemen aynı yönü göstermektedir (Tek istasyon-Tek frekans açılarının). Bu da, 10-100 Hz frekans aralığında, bir çok farklı yönü gösterebilecek, küçük yapıların bu derinlikte yitip aşağıdaki yapının tek düzeleştiğini (yanal değişimlerin yok olduğunu), işaret etmektedir.

Tek istasyon-Çok frekans için bulunan açılara (Şekil 4.7 c) bakıldığında, Doğu'dan Batı'ya doğru gidildikçe doğrultu açılarının Kuzey'e döndüğü görülmektedir. Bu da genel olarak bölgedeki fayların doğrultusu olan Kuzeybatı-Güneydoğu yönüyle örtüşmektedir.

Çok istasyon-Çok frekans için elde edilen doğrultu açısı (Şekil 4.7 d) ise ayrıca öneme sahiptir, çünkü bu açı bölgeden alınan verilerin en çok iki boyutluluk özelliği gösterdiği; jeolojik yapıların en çok uzanım gösterdiği açıdır. Veriler genellikle Çok istasyon-Çok frekans için elde edilen açılara göre döndürülür ve üzerlerindeki işlemlere devam edilir. Çalışma bölgesinin de en büyük iki boyutluluğu temsil ettiği açı olarak -26 derece ($K26^{\circ}B$) bulunmuş ve araziden toplanan veriler matematiksel olarak bu açığa çevrilmiştir.



Şekil 4.7: Frekanslara göre; a) Tek istasyon-Tek frekans; b) Çok istasyon-Tek frekans ve c) Tek istasyon-Çok frekans d) Çok istasyon-Çok frekans doğrultu açılarının jeoloji haritası üzerinde gösterimi e) Çalışma bölgesinin jeoloji haritası üzerinde yeri (Harita Yılmaz ve diğ. 1997'den yeniden çizilmiştir)

4.4 VERİLERİN TERS ÇÖZÜM SONUÇLARININ ELDE EDİLMESİ

Bu çalışmada verilere Ogawa ve Uchida'nın (1996) ters çözüm yazılımı kullanılarak iki boyutlu ters çözümleme işlemi uygulanmıştır. Yazılım, aşağıdaki ifadenin, istenilen şartlar dahilinde, en küçüklenmesine dayanır.

$$U = \|\mathbf{W}\mathbf{d} - \mathbf{W}F(\mathbf{m})\|^2 + \alpha^2 \|\mathbf{C}\mathbf{m}\|^2 \quad (4.2)$$

Burada $\mathbf{W}$, ağırlık dizeyidir (matrisidir). Bu dizey sayesinde güvenilmeyen verilerin işlemler üzerindeki etkisi azaltılabilir. $\mathbf{d}$, gözlemlenen veri; $\mathbf{m}$, model değişkenleri; α , yumuşaklık parametresi (smoothing factor); $\mathbf{C}$, katılık dizeyi (roughening matrice); $F(\mathbf{m})$ geçerli model parametreleri, $\mathbf{m}$, için düz çözüm sonuçlarını veren bir işleçtir. U ise, veri çakışmasında hatadır (data misfit) Uchida, (Ogawa ve Uchida 1996). Hatayı istenilen ölçüde küçülten en yüksek yumuşaklığa (smoothness) sahip model parametreleri bulunmaya çalışılır (Constable ve diğ., 1987; Uchida, 1993).

Bunun için belirlenen her yeni model parametresi için aşağıdaki eşitlik çözülür;

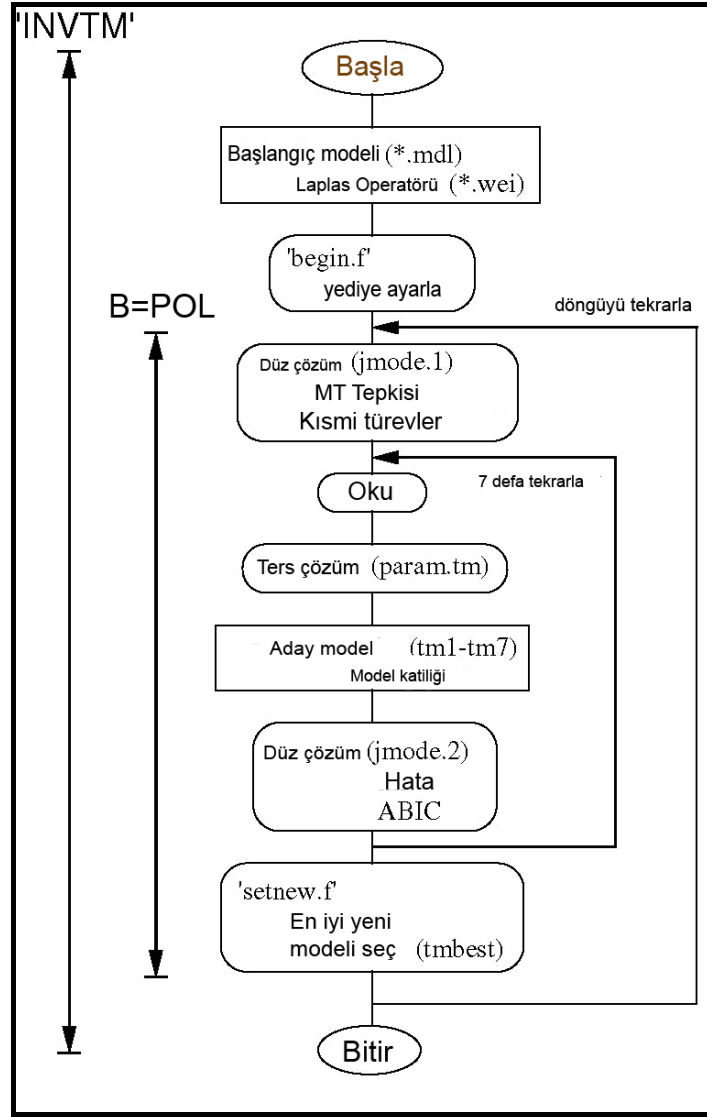
$$\{(\mathbf{W}\mathbf{A})^T (\mathbf{W}\mathbf{A}) + \alpha^2 \mathbf{C}^T \mathbf{C}\} \mathbf{m}_{k+1} = (\mathbf{W}\mathbf{A})^T (\mathbf{W}\hat{\mathbf{d}}) \quad (4.3)$$

Burada;

$$\hat{\mathbf{d}} = \Delta\mathbf{d} + \mathbf{A}\mathbf{m}_k, \text{ ve} \quad (4.4)$$

$$\Delta\mathbf{d} = \mathbf{d} - F(\mathbf{m}_k) \text{ dir (Ogawa ve Uchida 1996).} \quad (4.5)$$

Ters çözüm işleminin sağlıklı bir şekilde işleyebilmesi için; model yumuşaklığını denetleyen parametrelerin doğru seçimi gereklidir. Ogawa ve Uchida'nın (1996) geliştirdiği bu yazılımda bu işlem için ABIC (Akiake'nin Bayes İstatistik Kriteri; Akiake, 1980) minimum bulma metodu kullanılır. Yukarıdaki bağıntı ve ifadelerin detaylarına Ogawa ve Uchida (1996) makalesinden ulaşılabilir.

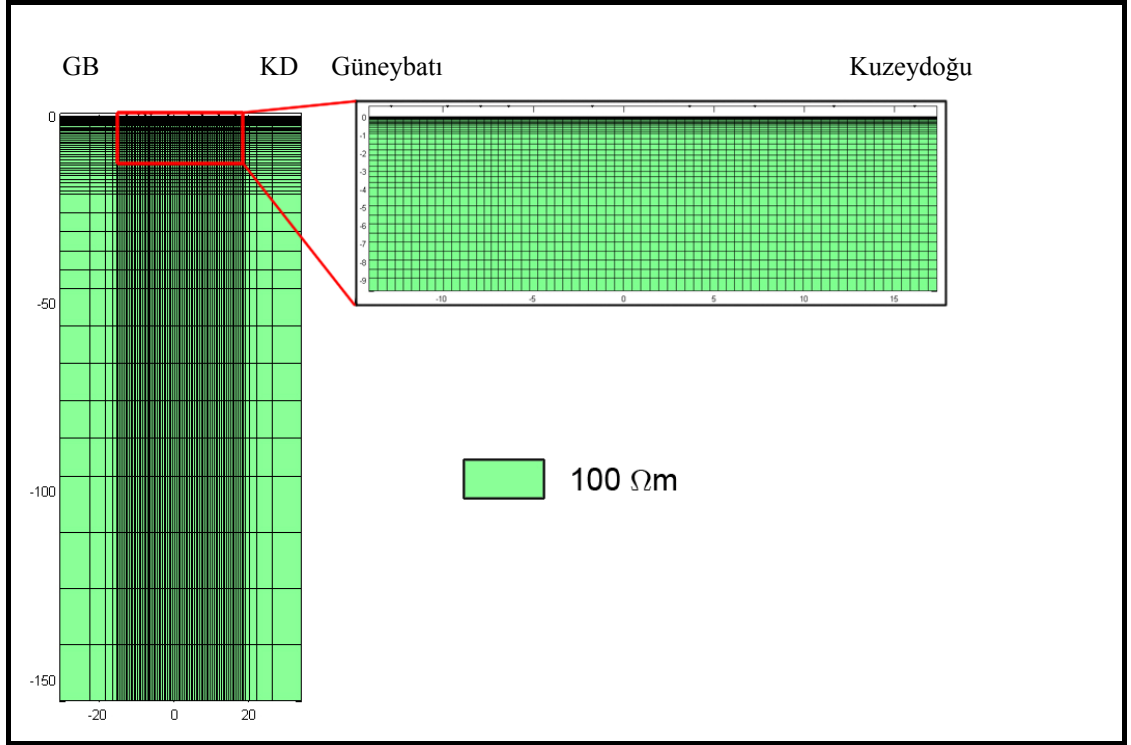


Şekil 4.8: B-Pol durumu için Ogawa ve Uchida (1996) yazılımının akış diyagramı (Ogawa ve Uchida,1996)

İki boyutlu ters çözüm işlemlerinde, yeraltı bir üçgen ya da dörtgen gibi, belli boyutları ve geometrileri olan hücrelere ayrılarak bu birimlerin her birinin köşelerindeki değerler için düz çözüm işlemi gerçekleştirilir (de Groot ve Constable, 1990). Bu çalışmada ters çözümde kullanılan model ağı yatayda 87 ve düşeyde 79 birimden meydana gelmektedir ve toplam 6873 bloktan oluşmaktadır. Kullandığımız algoritma, derinliğe doğru düşen çözünürlük nedeniyle kullanıcının seçimine bağlı olarak derine artan sayılarda komşu bloğu bir sayarak hesap yapar, hem işlem kolaylığı hem de azalan çözünürlüğün daha gerçekçi olarak modele işlenmesini sağlar. Model ağı bu şekilde ele alınırsa toplam 1662 bloktan oluşmaktadır. Ters çözümde kullanılacak bu birimlerin boyutlarını içeren model

ağı (mesh) görselleştirildiğinde aşağıdaki gibi (Şekil 4.9) olmaktadır. Başlangıç modeli için ise bütünüyle 100 Ω .metrelik homojen bir ortam verilmiştir (Şekil 4.9).

Ters çözüm işlemleri aşağıdaki başlangıç modeliyle, B-Pol, E-Pol ve bileşik durum (E-Pol + B-Pol) için yapılmıştır.

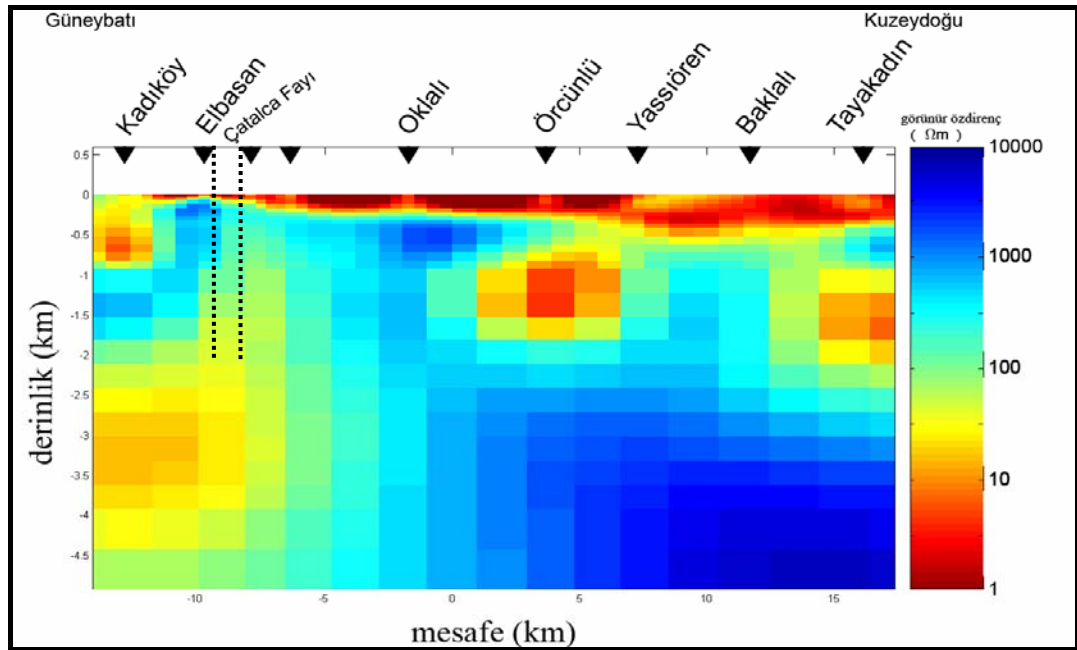


Şekil 4.9: Başlangıç model ağının (mesh) ve başlangıç modeli olarak verilen 100 Ω .m öz dirençli yarı sonsuz ortamın görselleştirilmiş hali.

4.4.1 B-Pol durumu için ters çözüm

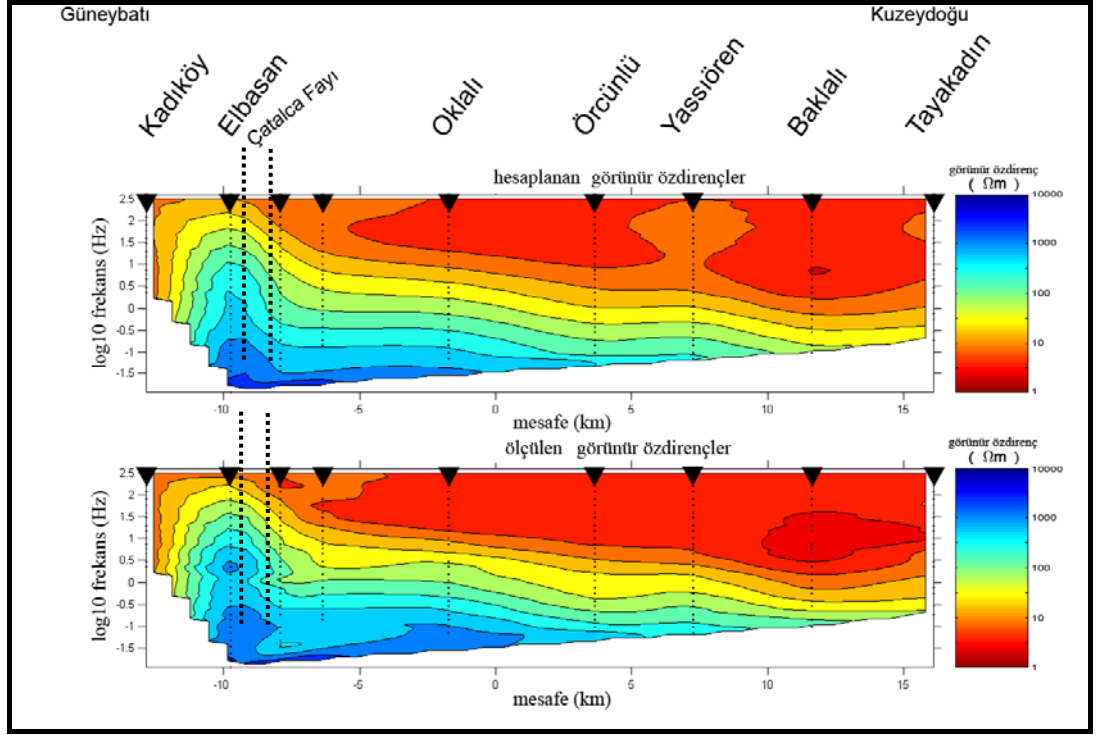
a) B Kutuplanması (B-Pol) durumu için 1. ters çözüm

B-Pol durumu için ters çözüm işlemi, verinin %15 hata tabanına sahip olduğu varsayılmış, Şekil 4.9’da görülen 100 Ω .m yarısonsuz ortam başlangıç modeli kabul edilmiş ve aşağıda görülen model 1.68 RMS hata ile elde edilmiştir (Şekil 4.10). Hesaplanan ve arazide ölçülen değerler arasındaki farklar Şekil 4.11, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’te yer alan grafiklerden görülebilir. Elde edilen modelde ilk bakışta dikkat çeken yapılar, profilin en güneybatısında (Kadıköy ve Elbasan’daki istasyonların altında), farklı derinliklerde yer alan iki iletken (üstteki iletken 1 km, alttaki iletken 4.5 km derinliğe kadar ulaşmaktadır), profilin ortasında 0.5-2 km arasında yer alan iletken ve en kuzeydoğuda 1-2 km arasında yer alan iletkenidir.

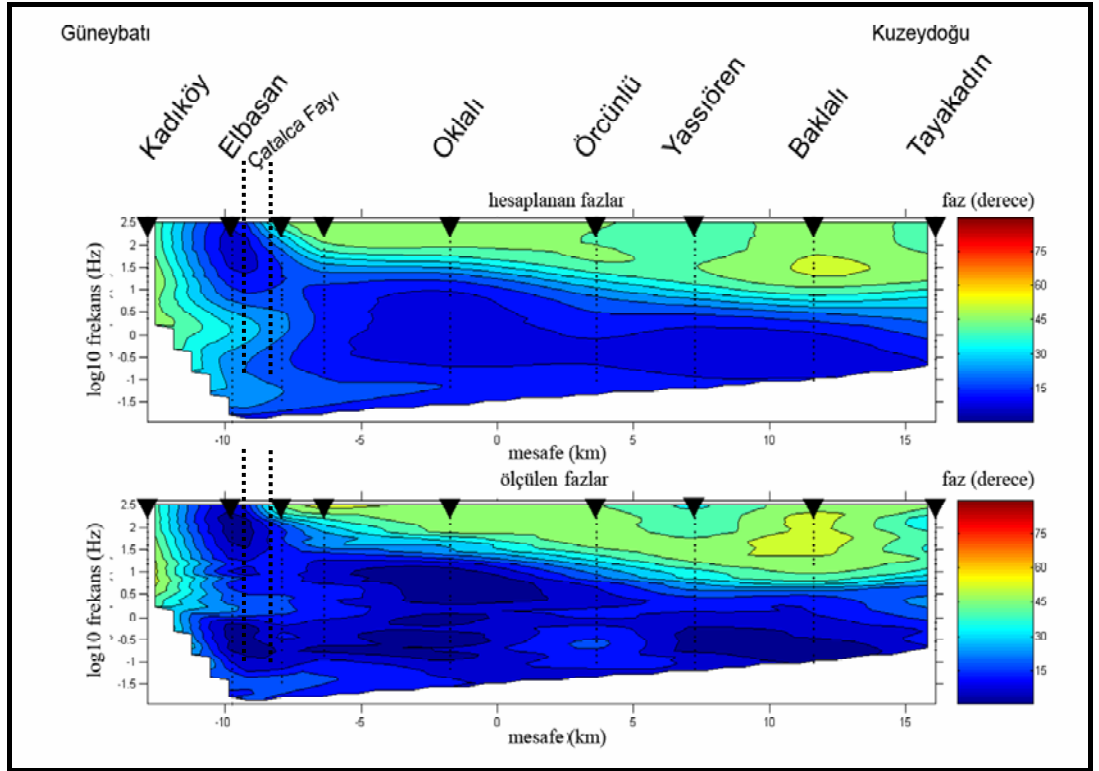


Şekil 4.10: B-Pol durumu için, 100 Ω .m yarısonsuz ortam başlangıç modeliyle ters çözüm sonucu elde edilen, 1.68 RMS hatalı model

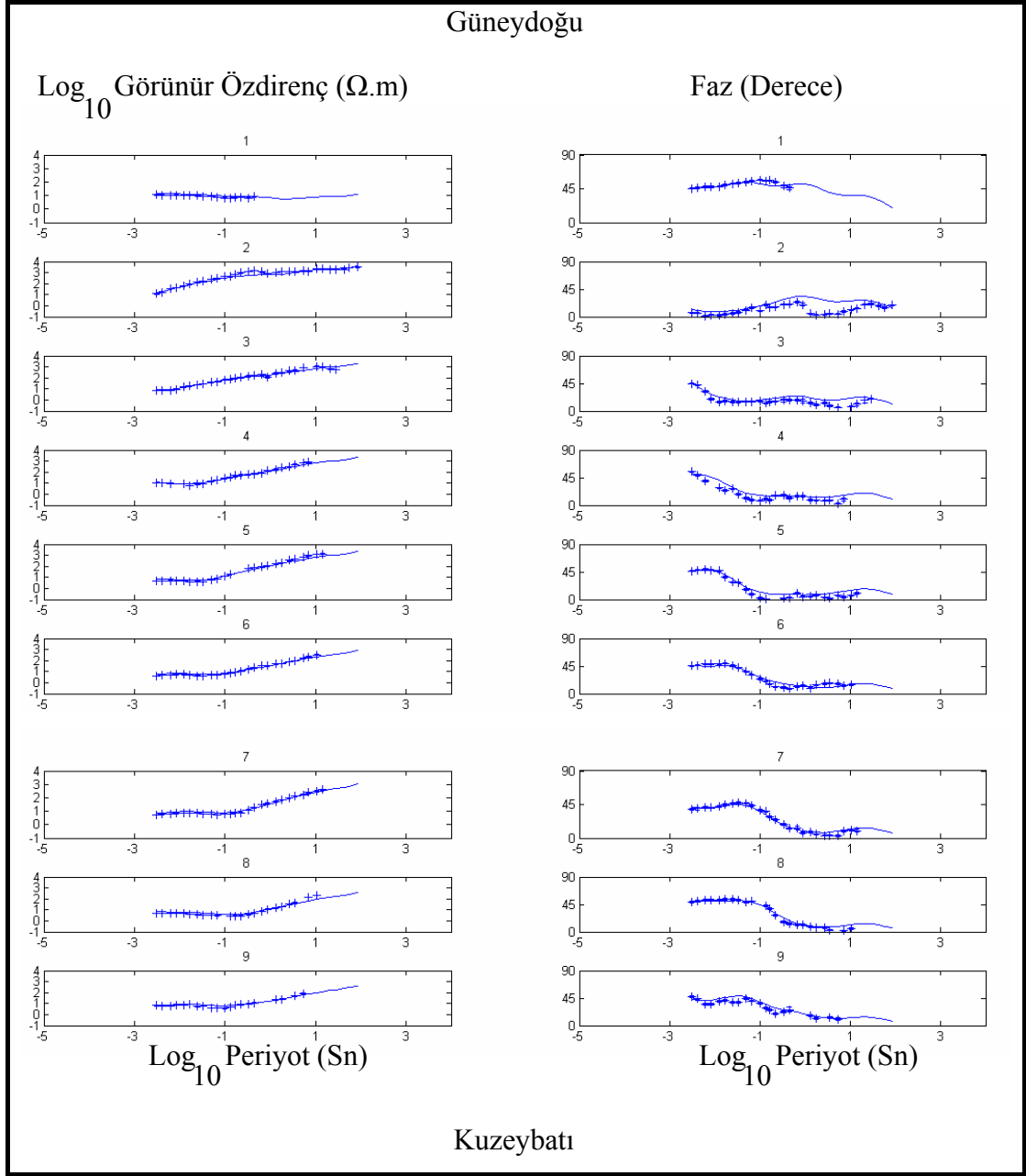
Profiller için ölçülen ve ters çözümünden elde edilen verilere ait eğrilere (Şekil 4.13) bakacak olursak ikinci ve üçüncü istasyonlarda faz eğrilerinin verilere tam çakışmadığı görülebilir. Özellikle ilk istasyonda (Güneybatı) çok az veri vardır ve bu istasyonun altında görülen büyük iletken kütleinin de gerçek olmadığı yargısına varılabilir. Modeldeki iletkenleri sınamak için de modelde görülen iletkenler yalıtkanlara dönüştürülerek ölçülen ve hesaplanan verilerin yer aldığı eğrilerdeki çakışmanın değişimine bakılmıştır.



Şekil 4.11: B-Pol durumu için, arazide ölçülen (üstte) ve 100Ω.m yarısonsuz ortam başlangıç modeliyle ters çözüm sonucu elde edilen modele ait, hesaplanan (altta) görünür öz dirençlerin grafiği



Şekil 4.12: B-Pol durumu için, arazide ölçülen (üstte) ve 100Ω.m yarısonsuz ortam başlangıç modeliyle ters çözüm sonucu elde edilen modele ait, hesaplanan (altta) görünür fazların grafiği

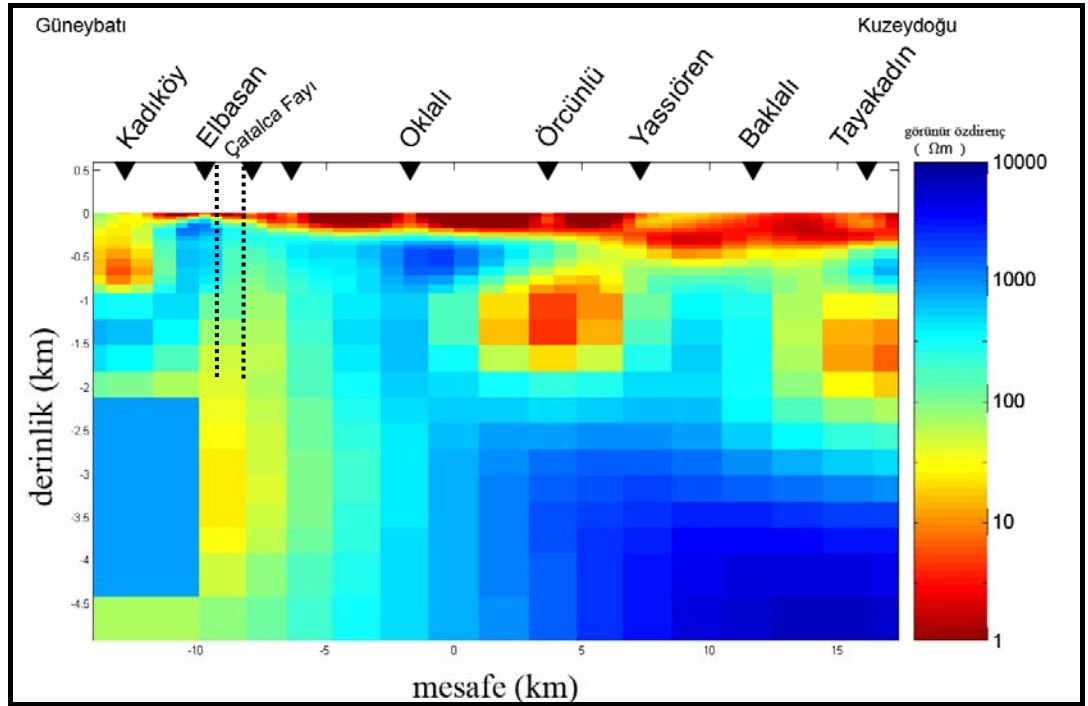


Şekil 4.13: B-Pol durumu ters çözümü için, ölçümler (artılar) ve 100 $\Omega.m$ yarısonsuz ortam başlangıç modeliyle ters çözüm sonucu elde edilen modele ait hesaplanan değerlerin (düz çizgiler) her istasyon için, log.periyota karşı grafiği (sağ sütun görünür öz dirençleri, sol sütun fazları içermektedir)

b) B-Pol durumu için gerçekleştirilen testler:

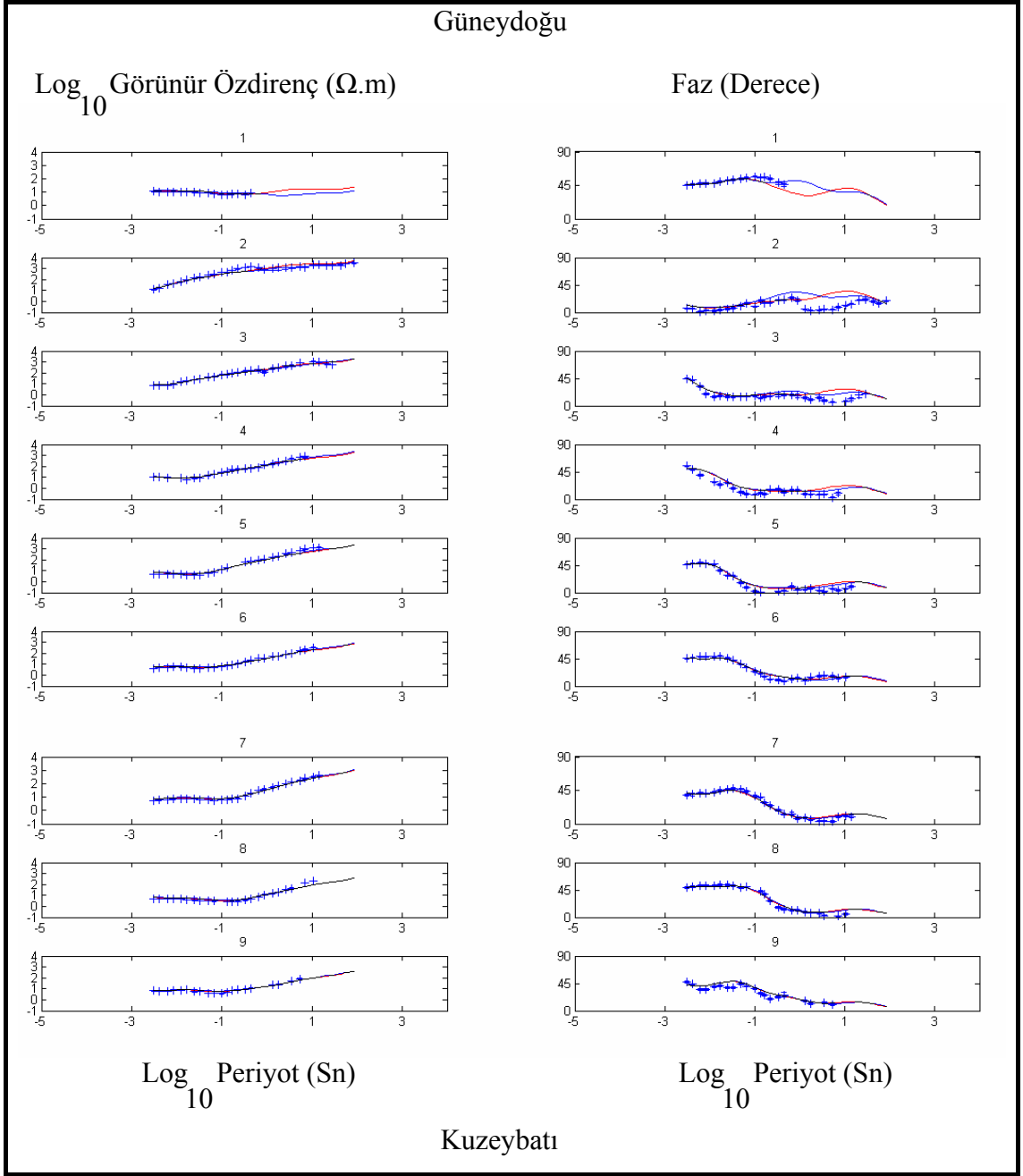
Elde edilen B-Pol modelinde, veride (Şekil 4.2, Şekil 4.3) kendisini doğrudan göstermeyen ancak ters çözüm sonuçlarında belirlenen üç önemli iletken birim gözlenmektedir. Elde edilen modelin bu iletkenlere duyarlılığını ve bu iletkenlerin gerçekliğini test etmek için aşağıdaki modeller hazırlanmıştır (Şekil 4.14, Şekil 4.15, Şekil 4.18). İlk testte Kadıköy istasyonunun altında görülen, ikinci testte Örcünlü’de kurulan istasyonun altında görülen üçüncü testte ise Tayakadın istasyonunun altındaki iletkenler yalıtıkana dönüştürerek modelin bu yapılara ne kadar duyarlı olduğu sınanmıştır.

i) Test 1



Şekil 4.14: B-Pol durumu için elde edilen modelin (Şekil 4.10), Kadıköy istasyonu altındaki iletkeni test etmek üzere değiştirilmiş hali (RMS hata: 1.83)

Kadıköy’de kurulan istasyon altındaki bölgede yalıtıkana dönüştürüldüğünde, sonuçta elde edilen modelin hatasının az yükseldiği (1.68’den 1.83’e) görülebilir. İstasyonlara ait eğrilere (Şekil 4.15) bakıldığında ilk istasyonun (Kadıköy) altındaki iletkenin, burada yeterli veri olmadığı için gerçekten de bütünüyle ters çözümün aldatıcı bir ürünü olarak ortaya çıktığı ve yanındaki istasyonları da etkileyerek geniş bir alana yayıldığı söylenebilir.

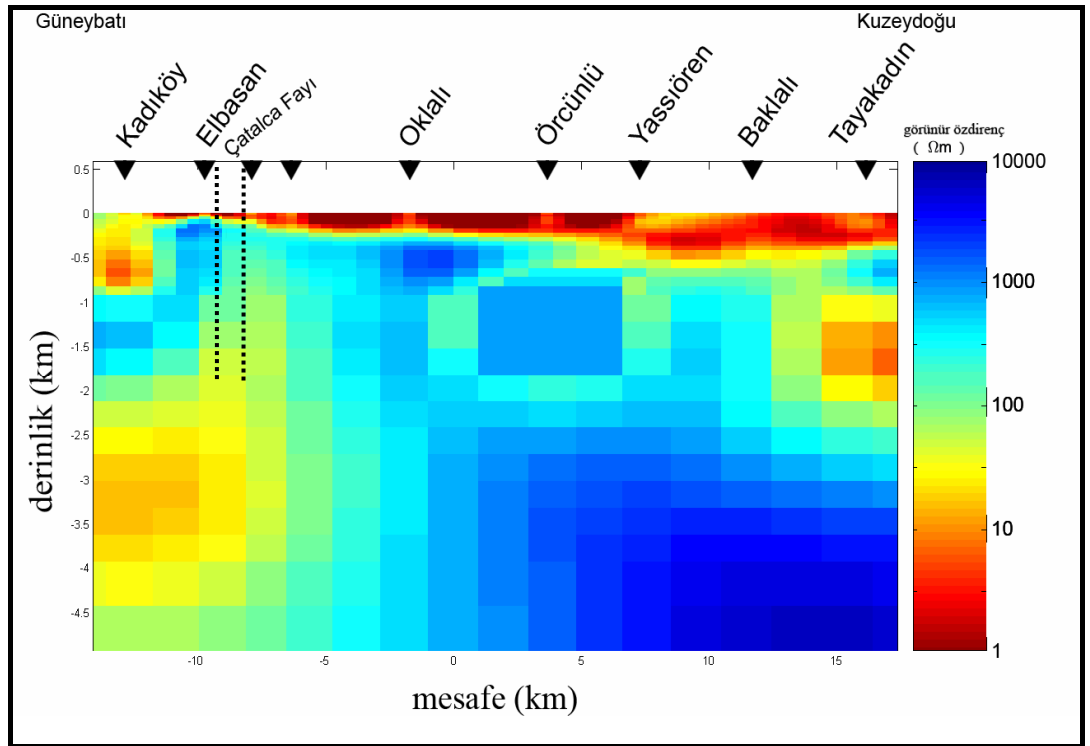


Şekil 4.15: B-Pol modeli (Şekil 4.10) ve Kadıköy istasyonu altındaki iletkeni test etmek üzere hazırlanan modelin (Şekil 4.14) karşılaştırması. Ölçümler (artılar) ve hesaplanan değerlerin (ters çözüm sonucu, mavi; test sonucu kırmızı çizgiler) her istasyon için, log.periyota karşı grafiği (sağ sütun görünür öz dirençleri, sol sütun fazları içermektedir)

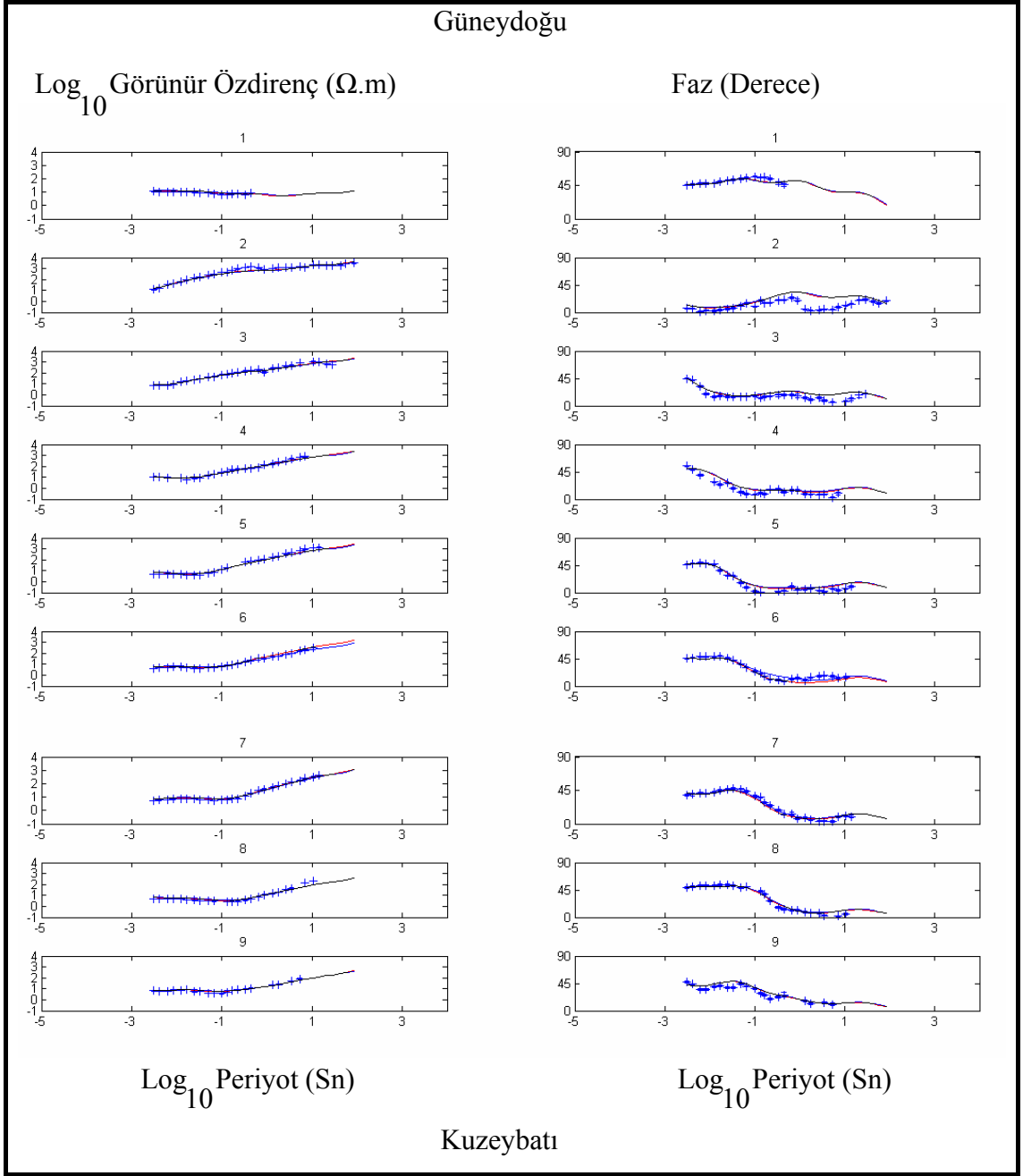
ii) Test 2

İlk yapılan denemede Kadıköy altında gözlenen iletken yapının gerçekliği üzerinde durduktan sonra aynı denemenin bir benzeri Örcünlü istasyonu altında kalan bölge için de uygulanmıştır.

Bu test için elde edilen aşağıdaki modelde (Şekil 4.16) RMS hata 1.67 seviyesine gelmiştir. Yani çok az da olsa ters çözüm sonucu elde edilen modelde (Şekil 4.10) olduğundan daha yüksek çakışma elde edilmiştir (Şekil 4.17). Ayrıca ters çözüm sonuçları ile bu denemenin sonuçları üst üste çakıştırıldığında da eğrilerde net bir değişim gözlenmemektedir. Modelimiz bu iletkene neredeyse tamamen duyarsızdır.



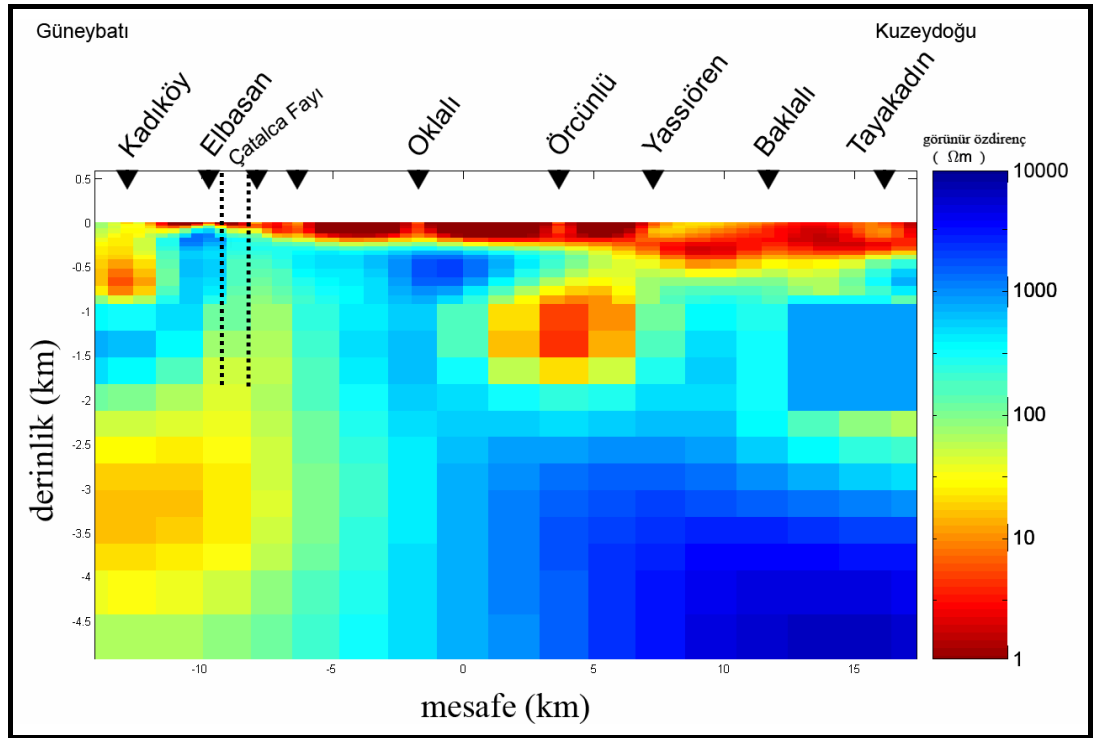
Şekil 4.16: B-Pol durumu için elde edilen modelin (Şekil 4.10), Örcünlü istasyonu altında görülen iletkenin sınanması için değiştirilmiş hali (RMS hata: 1.67)



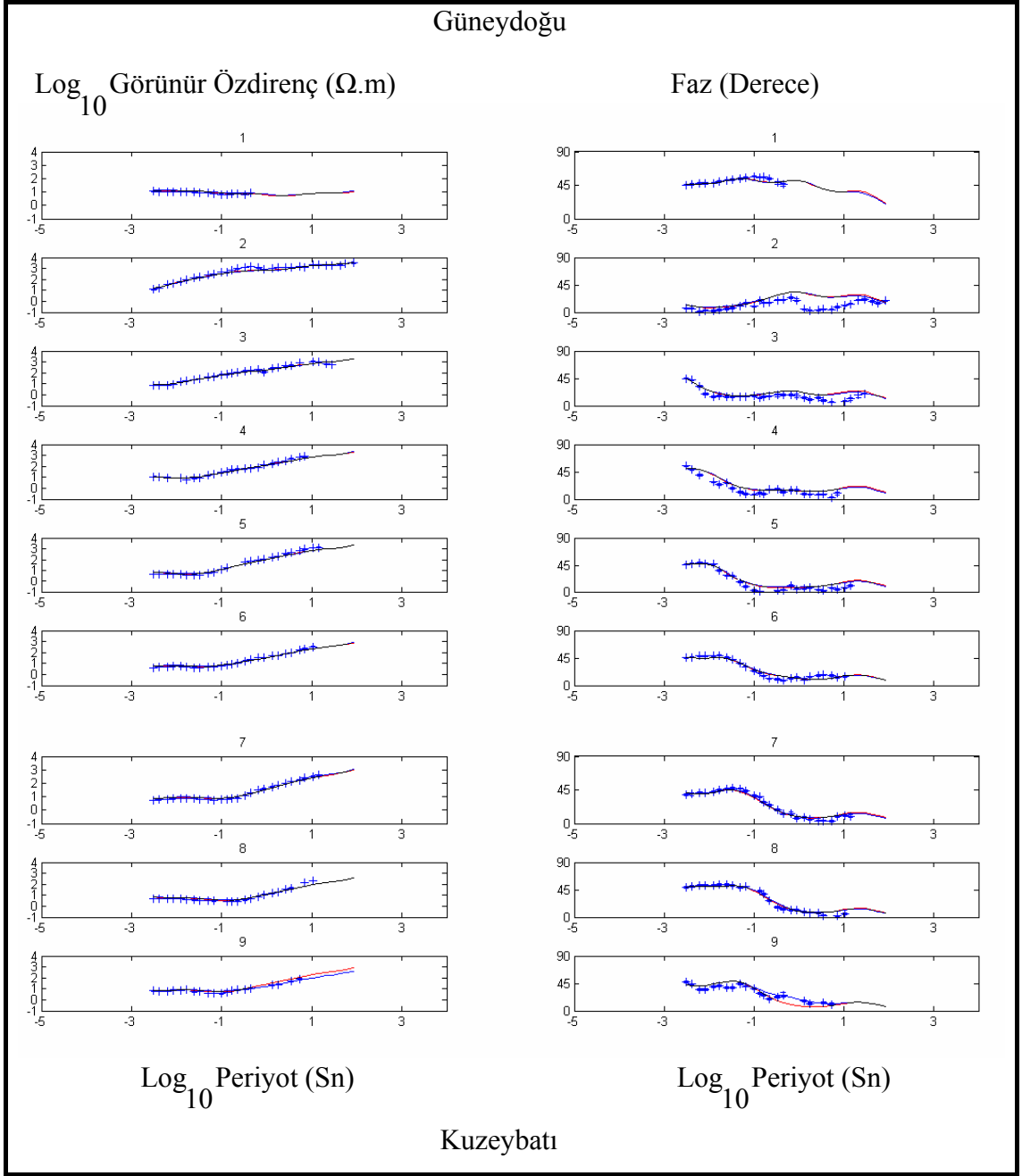
Şekil 4.17: B-Pol modeli (Şekil 4.10) ve Örcünlü istasyonu altındaki iletkeni test etmek üzere hazırlanan modelin (Şekil 4.16) karşılaştırması. Ölçümler (artılar) ve hesaplanan değerlerin (ters çözüm sonucu, mavi; test sonucu kırmızı çizgiler) her istasyon için, log.periyota karşı grafiği (sağ sütun görünür öz dirençleri, sol sütun fazları içermektedir)

iii) Test 3

Tayakadın istasyonu altındaki iletkenin sınanması için yapılan bu denemede (Şekil 4.18) RMS hatanın ilk gerçekleştirilen denemede olduğu kadar değişmemiş görünmesine rağmen. Tayakadın istasyonuna karşılık gelen eğrilerde (Şekil 4.19) özellikle fazda çakışmada bozulma gözlenmektedir. Ayrıca özdirenç değerlerinin çakışmasında da değişim gözlenmiştir. Arazi verisi daha iletken değerleri göstermektedir. Bu nedenle Tayakadın altında kalan bu iletkenin varlığı diğerlerine göre daha muhtemeldir.



Şekil 4.18: B-Pol durumu için elde edilen modelin (Şekil 4.10), Tayakadın istasyonu altında görülen iletkenin sınanması için değiştirilmiş hali (RMS hata: 1.73)



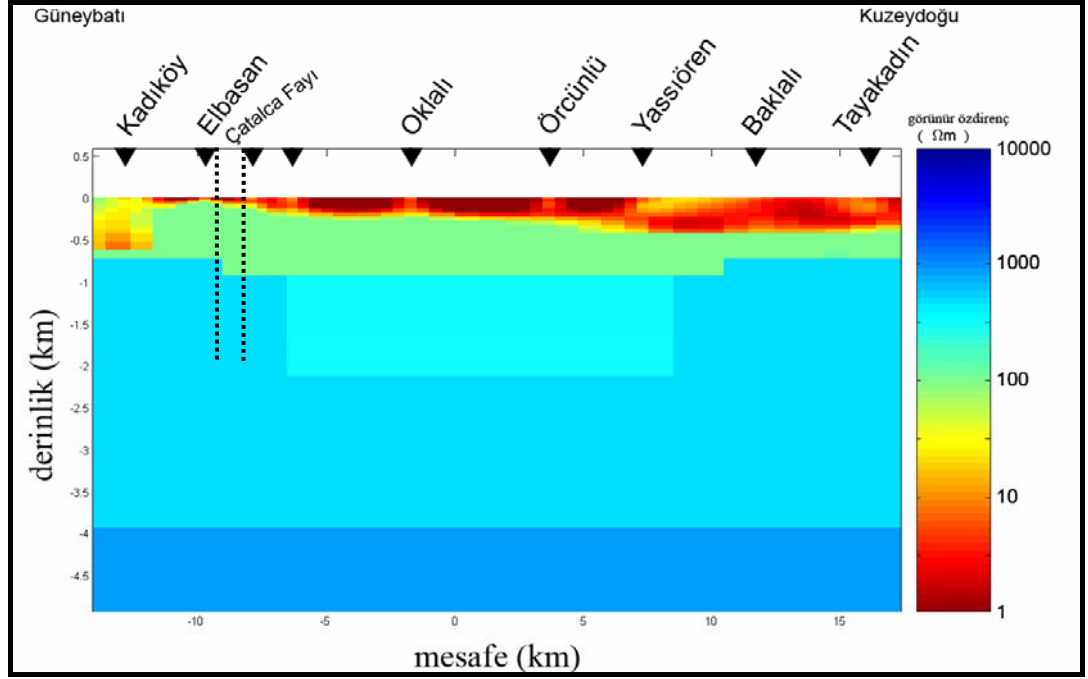
Şekil 4.19: B-Pol modeli (Şekil 4.10) ve Tayakadın istasyonu altında görülen iletkenin sınanması için hazırlanan modelin (Şekil 4.18) karşılaştırılması. Ölçümler (artılar) ve hesaplanan değerlerin (ters çözüm sonucu, mavi; test sonucu kırmızı çizgiler) her istasyon için, log.periyota karşı grafiği (sağ sütun görünür öz dirençleri, sol sütun fazları içermektedir)

c) B-Pol durumu için 2. ters çözüm

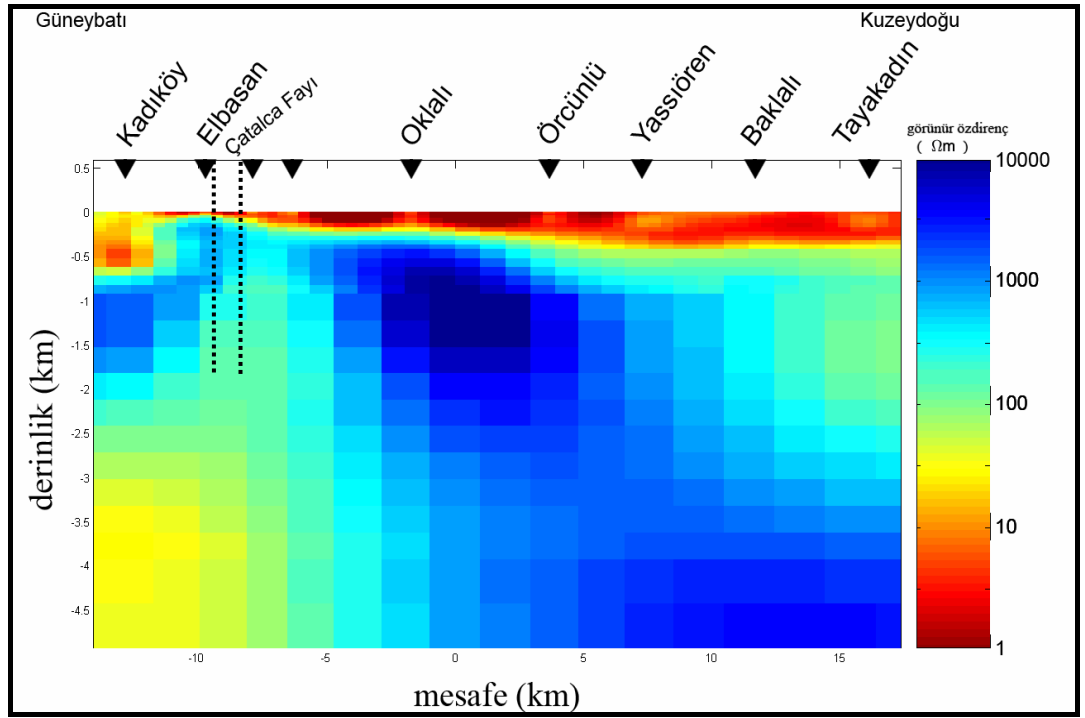
B-Pol durumu için elde edilen model (Şekil 4.10) üzerinde yukarıda yapılan denemelerde, yeraltında ters çözüm sonucu ortaya çıkan birçok iletken yapının gerçekliğinin sorgulanabilir olduğu görüldü. Bu nedenle ilk ters çözüm sonucunda elde edilen model değiştirilerek ikinci bir ters çözüm işlemi için başlangıç modeli olarak kullanılmış (Şekil 4.20), ters çözümün bu bölgelerde yine iletkenler yaratıp yaratmadığı gözlenmiştir. Yeni başlangıç modeli hazırlanırken derine doğru iletkenliğin düşmesi beklendiği için gittikçe direnci artan bir ortam hazırlanmıştır. Ayrıca ters çözümün ilk ve son istasyonların altında bulunan iletkenleri yalıtkan olarak elde etmesini teşvik için bu bölgeler nispeten yalıtkan olarak verilmiştir.

B-Pol durumu için yapılan ikinci ters çözüm sonrasında, Şekil 4.21'deki model, 1.60 RMS hata ile elde edilmiştir. Gözlenen ve ters çözümle hesaplanan değerler andıran kesitler olarak Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'de yer almaktadır. Görünür öz direnç ve faz eğrilerinden de (Şekil 4.24) elde edilen modelin arazi verileriyle uyumlu olduğu görülmektedir.

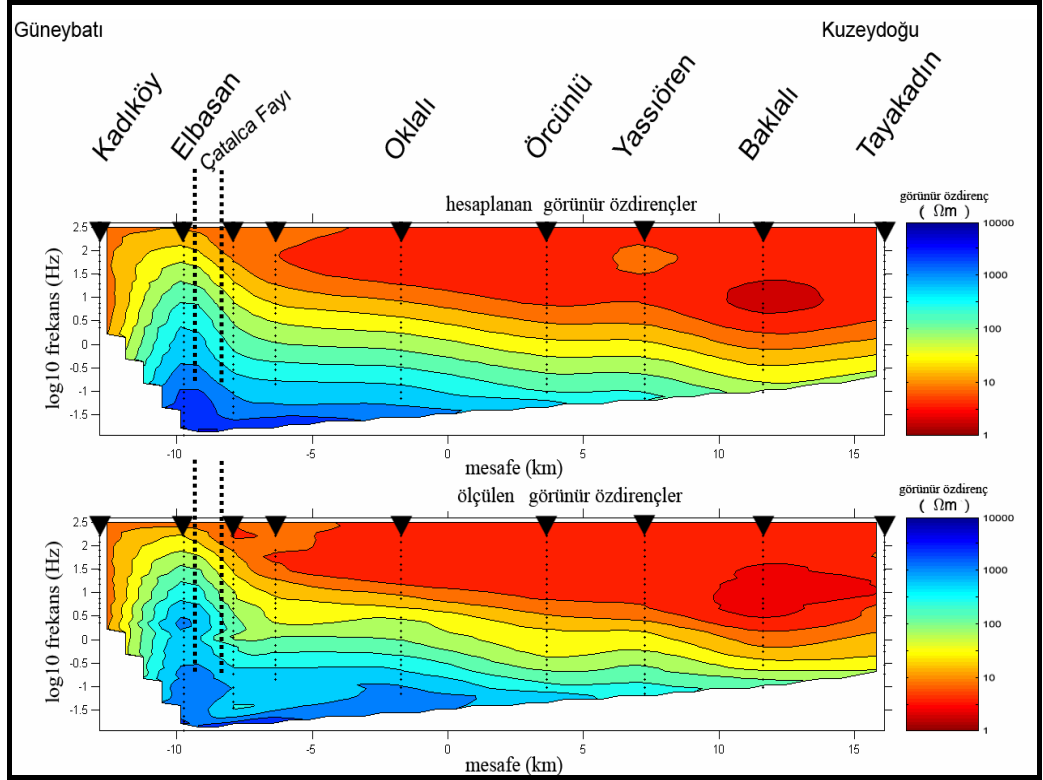
Yapay olma olasılığı yüksek yapıların bulunmadığı, çakışmanın B-Pol durumu için gerçekleştirilen bir önceki ters çözüm sonucundan (Şekil 4.10) biraz daha yüksek olduğu bu model (Şekil 4.21) sonuç modeli kabul edilmiştir ve yorumlarda bu model ele alınmıştır.



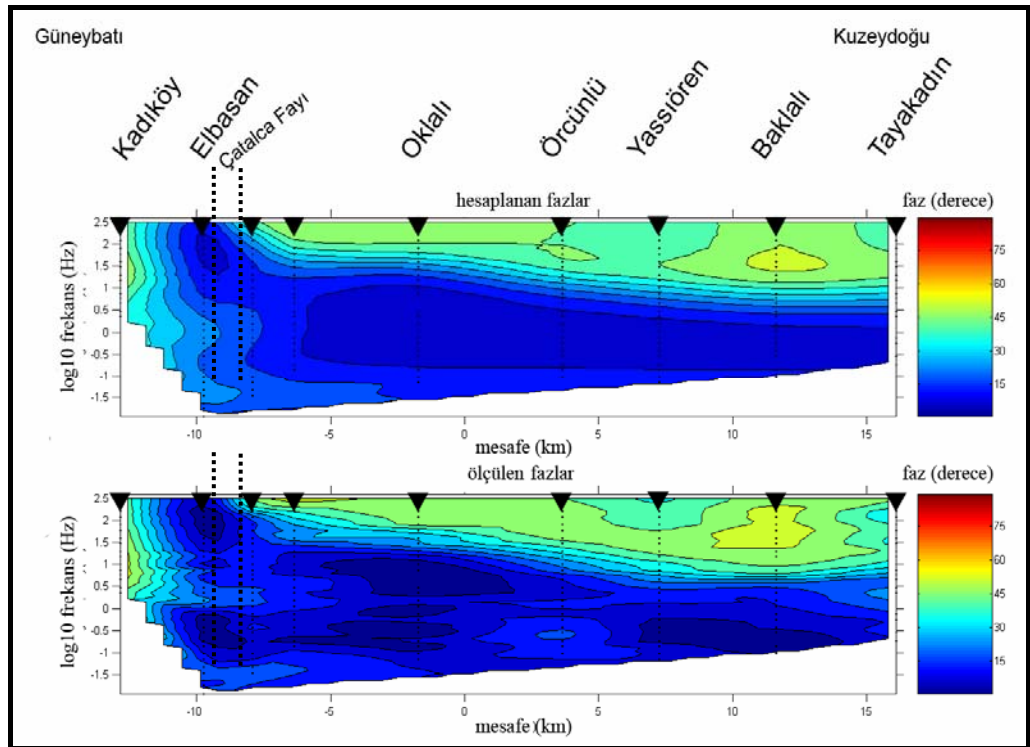
Şekil 4.20: B-Pol modeli için hazırlanan ikinci başlangıç modeli



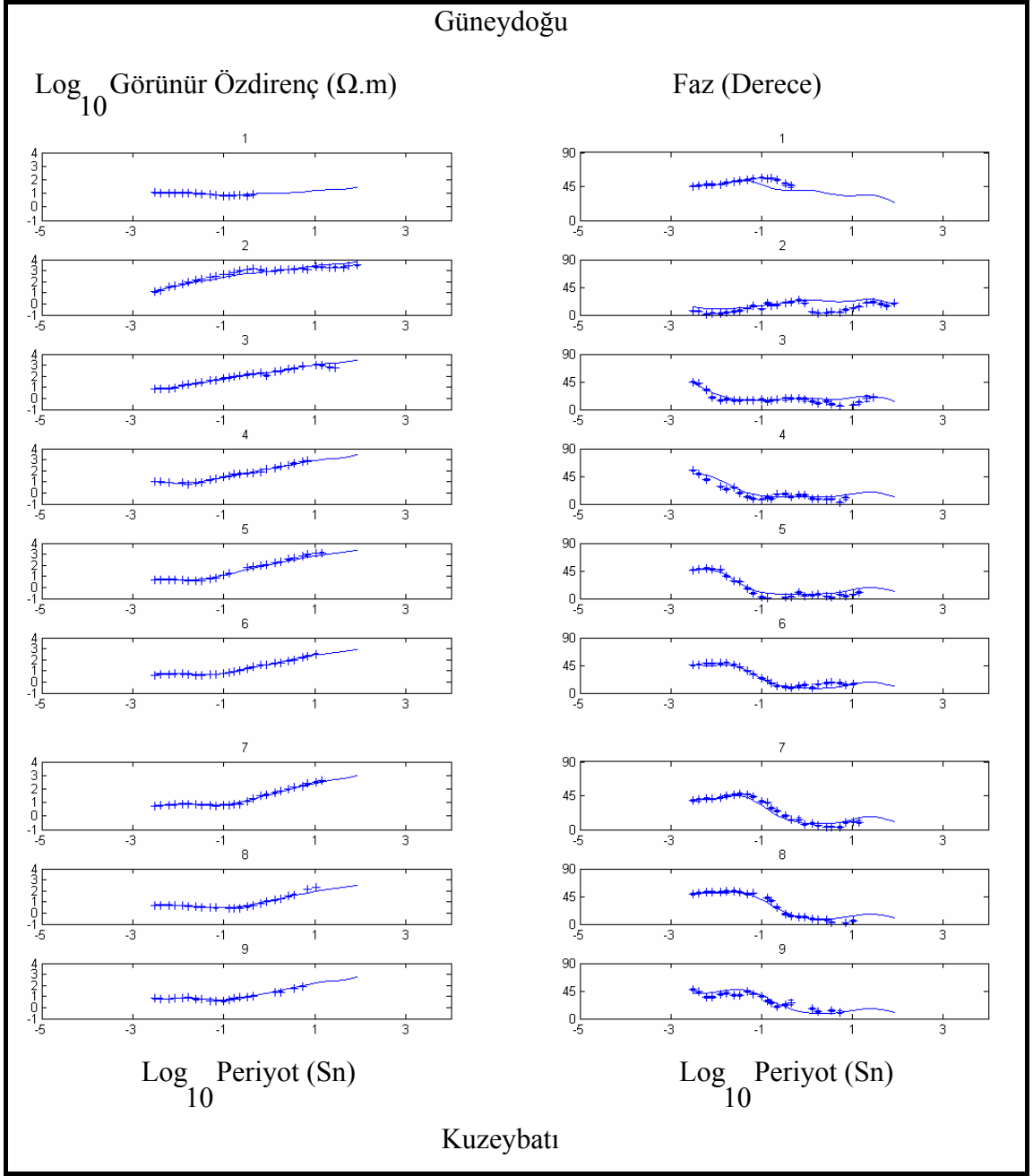
Şekil 4.21: B-Pol durumu için, Şekil 4.20’da görünen başlangıç modeliyle gerçekleştirilen ters çözümü sonucu elde edilen, 1.60 RMS hatalı model



Şekil 4.22: B-Pol durumu için, Şekil 4.20’da görünen başlangıç modeliyle gerçekleştirilen ters çözümü sonucu elde edilen modele ait ölçülen (altta) ve hesaplanan (üstte) görünür öz dirençlerin, log.frekansa karşı grafiği



Şekil 4.23: B-Pol durumu için Şekil 4.20’da görünen başlangıç modeliyle gerçekleştirilen ters çözümü sonucu elde edilen modele ait ölçülen (altta) ve hesaplanan (üstte) fazların, log.frekansa karşı grafiği



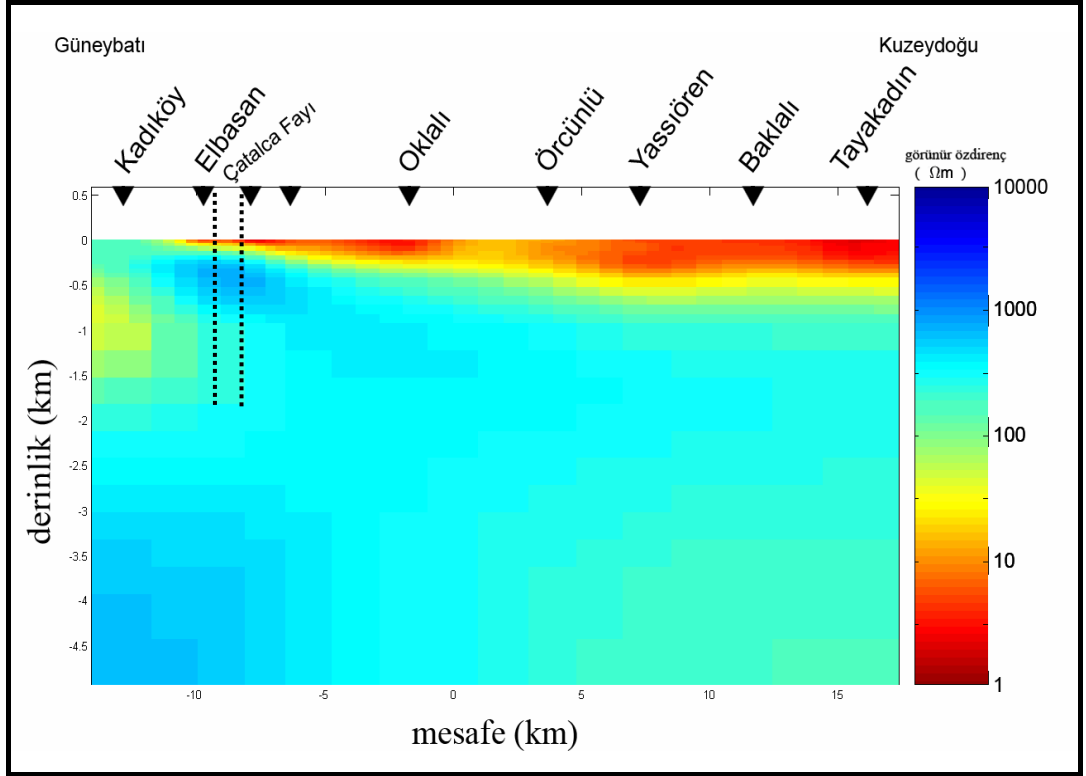
Şekil 4.24: B-Pol durumu için, ikinci ters çözüm sonucunda ölçümler (artılar) ve Şekil 4.20’de görünen başlangıç modeliyle gerçekleştirilen ters çözümü sonucunda hesaplanan değerlerin (düz çizgiler) her istasyon için, log.periyota karşı grafiği (sağ sütun görünür öz dirençleri, sol sütun fazları içermektedir)

4.4.2 E-Pol durumu için ters çözüm

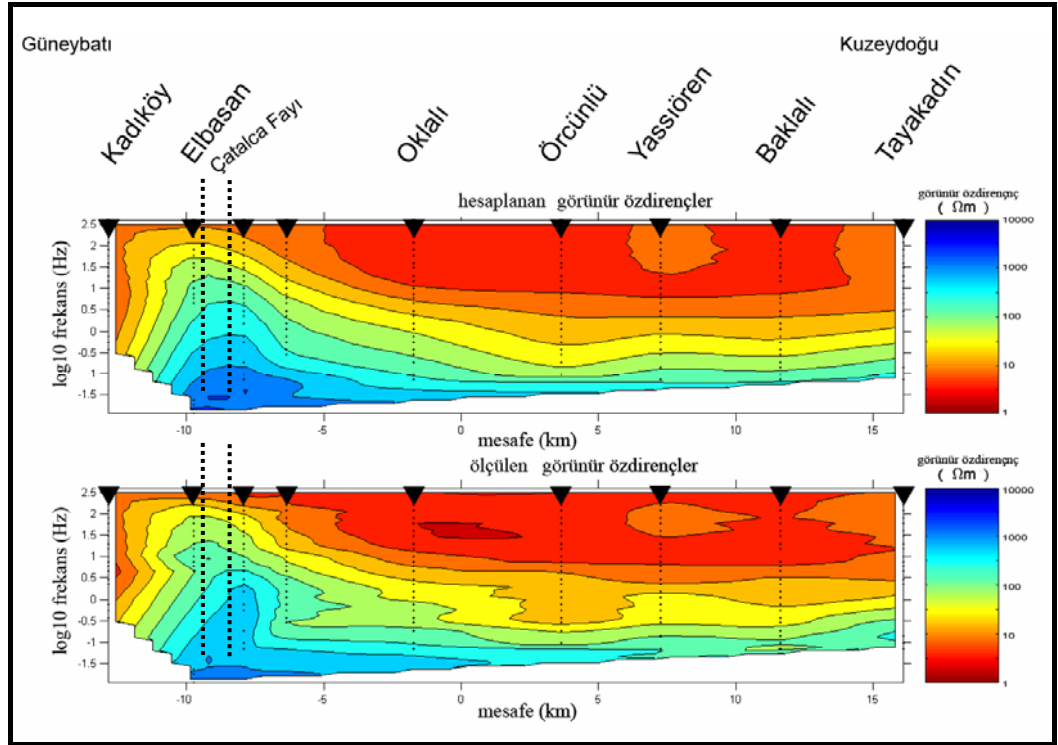
a) E Kutuplanması (E-Pol) durumu için 1. ters çözüm

Verilerin %15 hata tabanında kabulü ile 100 Ω .m yarısonsuz ortam şeklindeki başlangıç modeli için 1.7 RMS hata ile aşağıdaki model elde edilmiştir (Şekil 4.25). B-Pol modelinin aksine E-Pol durumu için elde edilen bu modelde derindeki iletkenlikler gözlenmemektedir. Modelin güneybatısında yüzeyden 750m derinliğe kadar gözlenen iletken bu durum için elde edilen modelde de kendini göstermiştir.

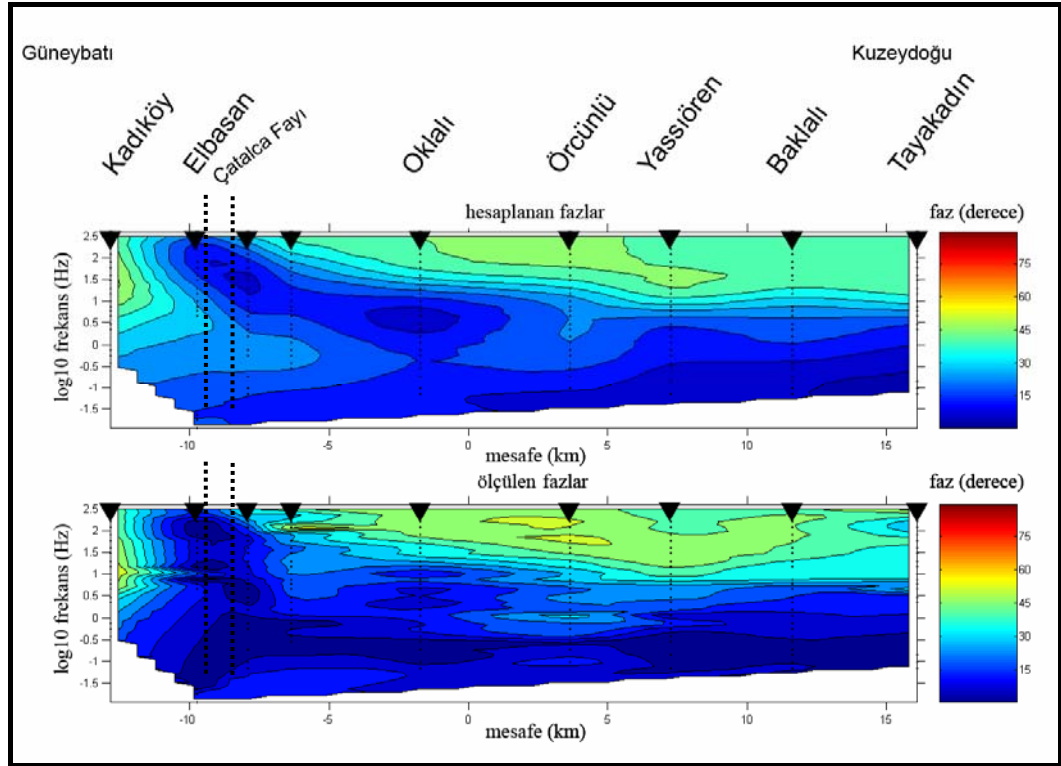
İstasyonlara ait eğrilere (Şekil 28) ve andıran kesitlere (Şekil 4.26, Şekil 4.27) bakıldığında öz direnç eğrilerinin veriye çakışması yüksekken faz eğrilerinde çakışma daha düşüktür. Ayrıca Şekil 4.21’de görüldüğü gibi B-Pol durumunda derin yapı yalıtkan olarak gözlenirken bu durum için aynı bölgeler daha iletken gözlenmektedir. Benzer şekilde iletken yapılar da B-Pol durumunda gözlenenden biraz daha yalıtkan gözlenmektedir ve genel olarak yapı sınırları daha belirsizdir. Şekil 3.7’de de görüldüğü gibi jeolojik yapıların uzanımı arttıkça E-Pol durumunun duyarlılığı azalmaktadır. Buradan bölgedeki yapıların uzanımlarının büyük olduğu (yapıların iki boyutlu olduğu) yargısına kolayca varılabilir. Bu durumda E-Pol modu yeterli duyarlılığı gösteremediğinden bize yapı sınırları ve öz dirençleri ile ilgili yeterli bilgiyi sağlayamayacaktır. Ancak E-Pol durumu ölçümleri bu zayıflığa rağmen çok yararlı bilgiler vermektedir. Profilin en güneybatısında gözlenen 0-750m arasındaki iletken ve profil boyunca yalıtkan taban üzerinde çökellerin oluşturduğu iletken örtünün derinlik değerleri yine B-Pol durumundakine (Şekil 4.21) yakın belirlenmiştir. Bu da, bu iletkenlerin gerçekliği ve sınırlarının doğru çözümlendiğini göstermektedir. En önemlisi, B-Pol durumunda profilin batısında 2.5km’de başlayan iletkenin gerçek olmadığını; verinin az olmasından dolayı, ters çözüm işleminin yan etkisi olarak ortaya çıktığını ispatlamasıdır. E-Pol durumu için bu bölgede daha fazla veri bulunduğu için, bu bölge için elde edilen öz direnç değerleri B-Pol ters çözümleriyle elde edilenlere göre daha sağlıklıdır. Bütün bu hususlara rağmen E-Pol için derinde gözlenen yüksek iletkenlik B-Pol durumuna benzer şekilde yalıtkana dönüştürülerek veriyi ne kadar sağlayacağı sınanmıştır.



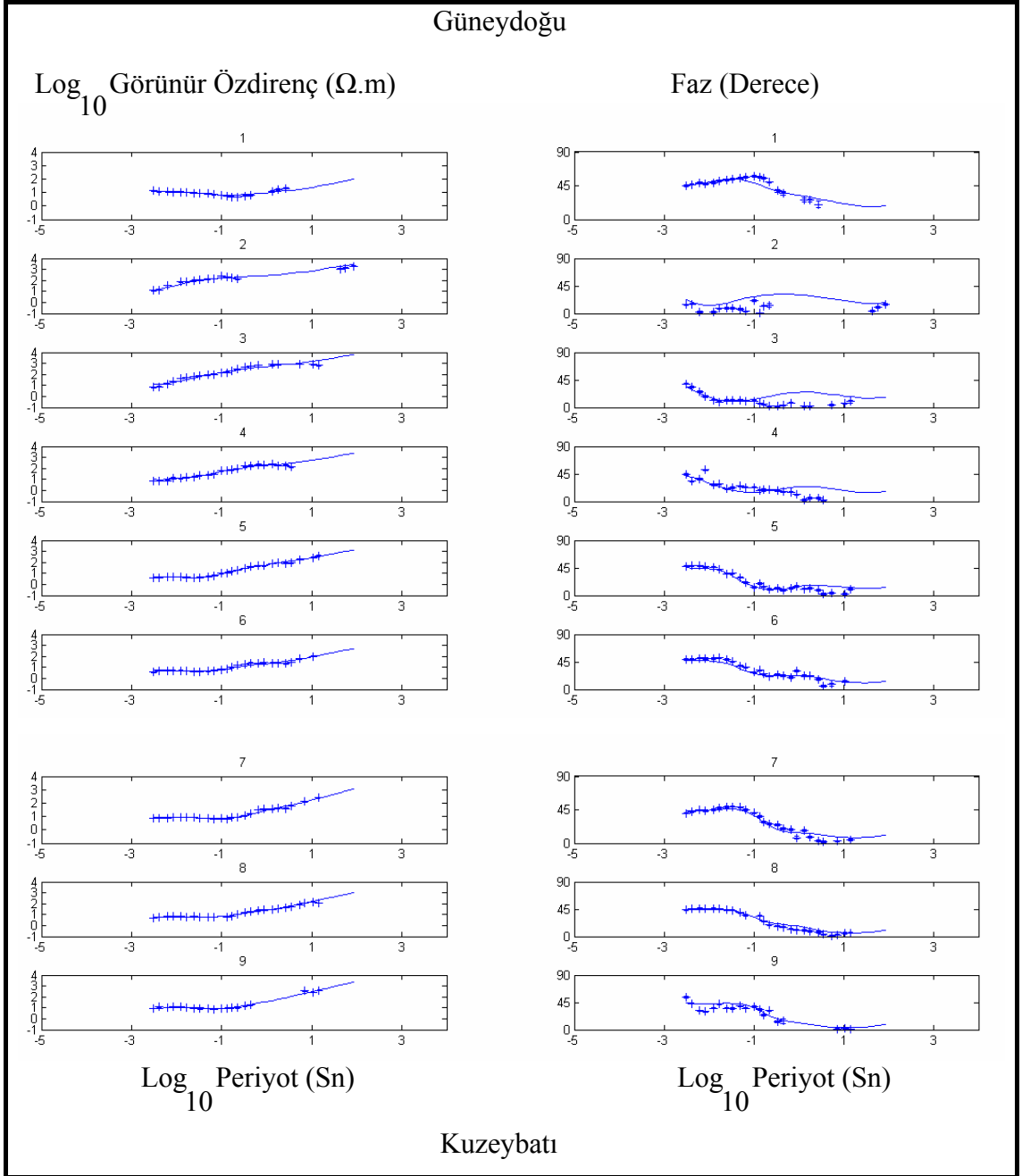
Şekil 4.25: E-Pol durumu için, $100\Omega.m$ yarısız ortam başlangıç modeliyle ters çözüm sonucu elde edilen, 1.7 RMS hatalı model



Şekil 4.26: E-Pol durumu için, $100\Omega.m$ yarısız ortam başlangıç modeliyle ters çözümü sonucunda elde edilen modele ait ölçülen (altta) ve hesaplanan (üstte) görünür öz dirençlerin, log.frekans karşı grafiği



Şekil 4.27: E-Pol durumu için, 100Ω.m yarısonsuz ortam başlangıç modeliyle ters çözümü sonucunda elde edilen modele ait ölçülen (altta) ve hesaplanan (üstte) fazların, log.frekansa karşı grafiği



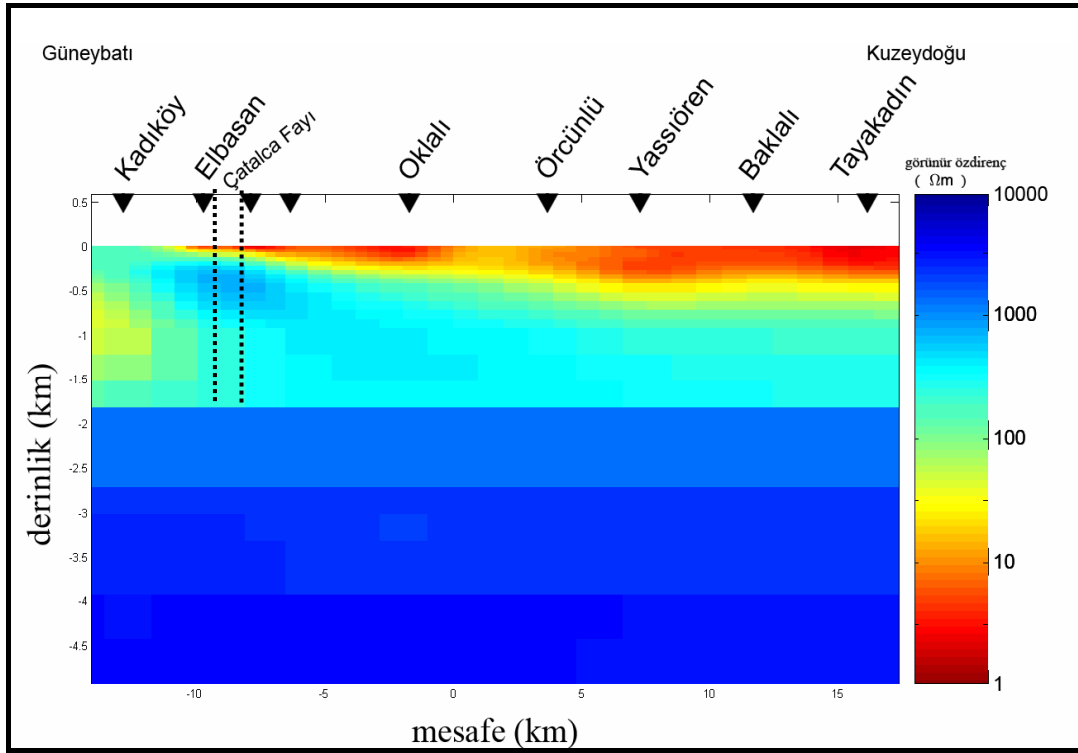
Şekil 4.28: E-Pol durumu ters çözümü için, ölçümler (artılar) ve $100\Omega.m$ yarısonsuz ortam başlangıç modeliyle ters çözümü sonucunda elde edilen modele ait hesaplanan değerlerin (düz çizgiler) her istasyon için, log.periyota karşı grafiği (sağ sütun görünür öz dirençleri, sol sütun fazları içermektedir)

b) E-Pol durumu için gerçekleştirilen testler:

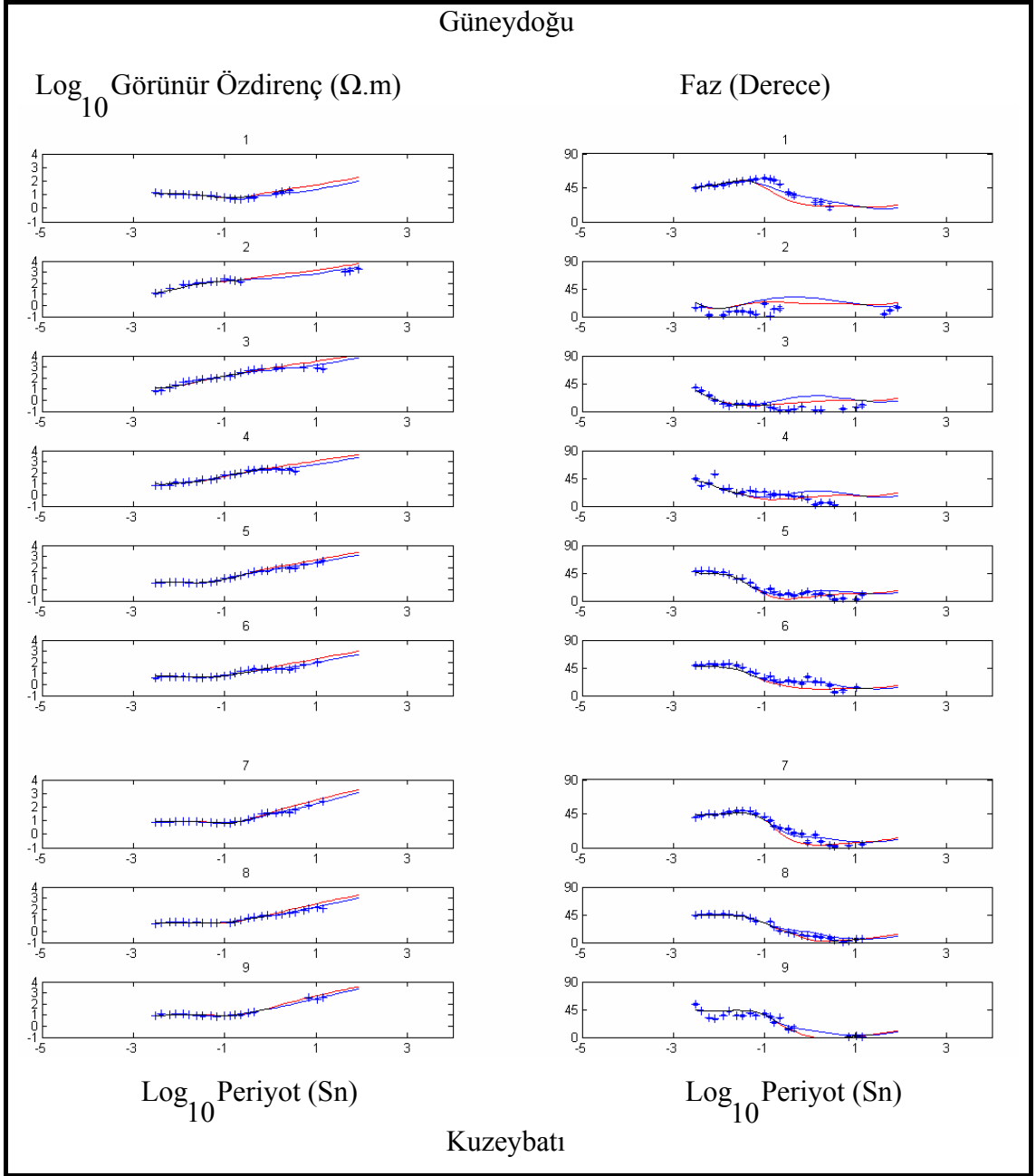
E-Pol durumunda iletken olarak görülen bölgelerin testi için aşağıdaki model (Şekil 4.29) hazırlanmıştır. E-Pol durumunda, B-Pol durumu için elde edilen kesitlerdeki gibi pek çok farklı iletken görülmediği için sadece bir test yapılması uygun bulunmuştur.

i) Test 1

Geniş bir alana ait öz direnç değerleri değiştirildiği için modelin RMS hata miktarı 2.17'ye yükselmiştir. Ayrıca bütün öz direnç ve faz eğrilerinde (Şekil 4.30) çakışmanın küçük miktarlarda da olsa bozulduğu ve verinin test için hazırlanan modelden daha düşük öz direnç değerleri içerdiği gözlenmektedir.



Şekil 4.29: E-Pol durumu için elde edilen modelin (Şekil 4.25), modelde gözlenen iletkenlikleri test etmek üzere değiştirilmiş hali (RMS hata: 2.17)

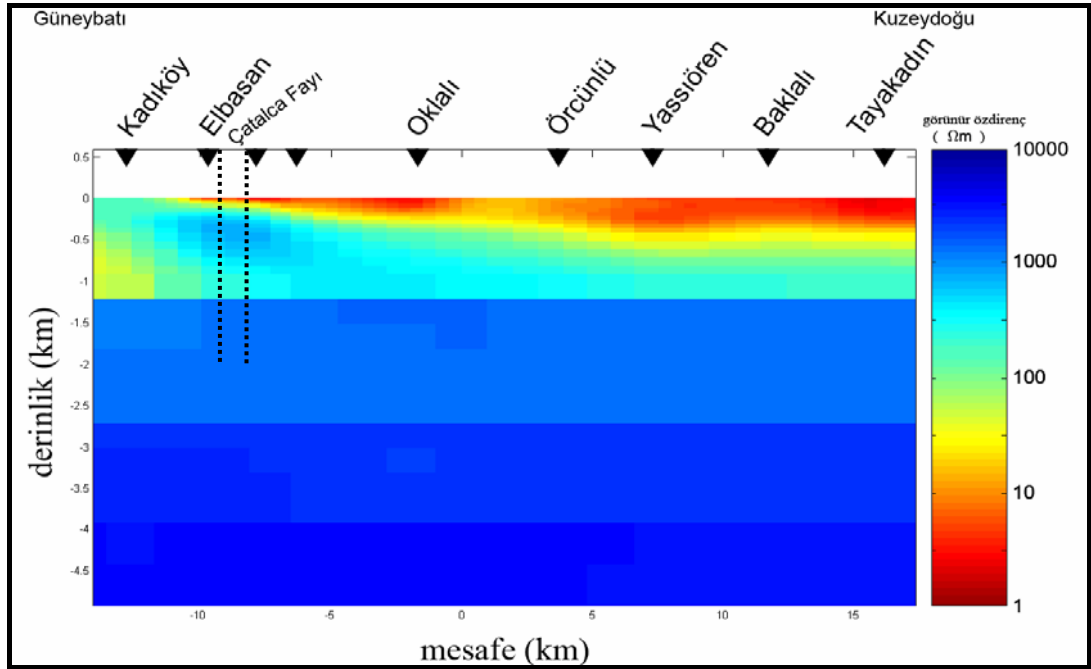


Şekil 4.30: E-Pol modeli (Şekil 4.25) ve iletkenlerin testi için hazırlanan yeni modelin (Şekil 4.29) karşılaştırılması. Ölçümler (artılar) ve hesaplanan değerlerin (ters çözüm sonucu, mavi; test sonucu kırmızı çizgiler) her istasyon için, log.periyota karşı grafiği (sağ sütun görünür öz dirençleri, sol sütun fazları içermektedir)

c) E-Pol durumu için 2. ters çözüm

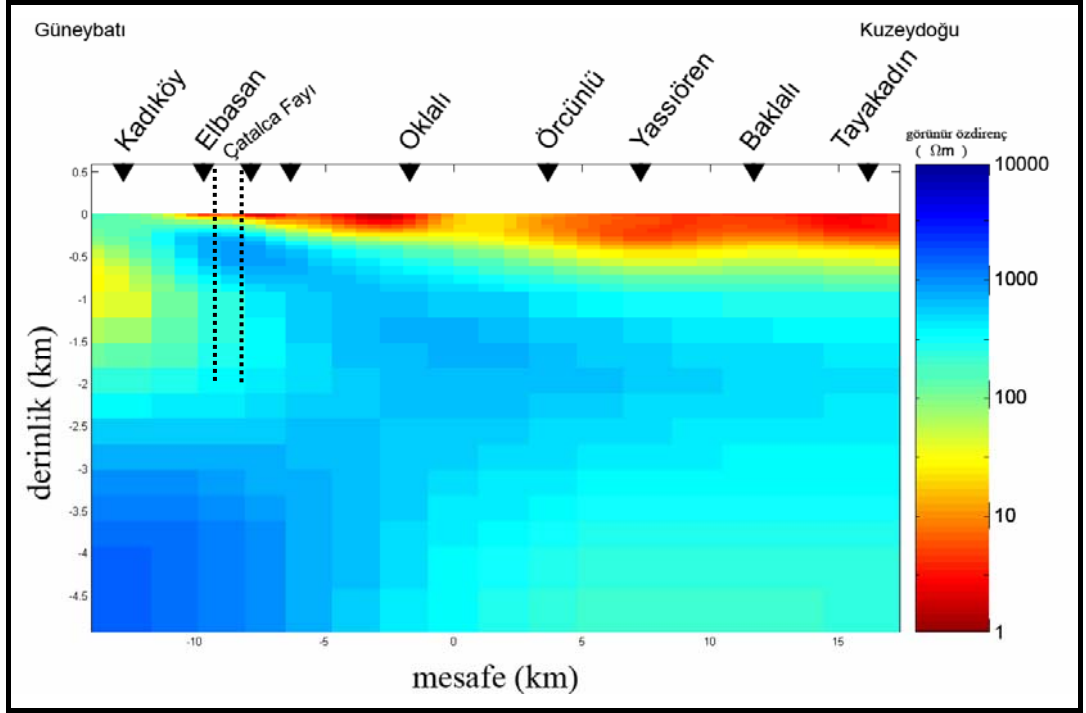
E-Pol durumu için elde edilen model (Şekil 4.25) üzerinde, B-Pol durumu için elde edilenin aksine (Şekil 4.10, Şekil 4.21) derin yapıda, beklenenden düşük gözlenen öz dirençler test edilmişti ve bu iletken bölgenin, elde edilen modelin (Şekil 4.25) sağlanması için gerekli olduğu sonucuna, elde edilen grafikler yardımıyla (Şekil 4.30) varılmıştı.

Ancak yine modelin daha yalıtkan bir ortamı sağlayıp sağlamayacağı düşüncesiyle, B-Pol durumu için gerçekleştirilen gibi ikinci bir ters çözüm işlemi gerçekleştirilmiştir. Başlangıç modeli (Şekil 31) olarak E-Pol durumu için ilk ters çözümde elde edilen modeldeki (Şekil 4.25) derin yapı, yalıtkanlaştırılarak kullanılmıştır.

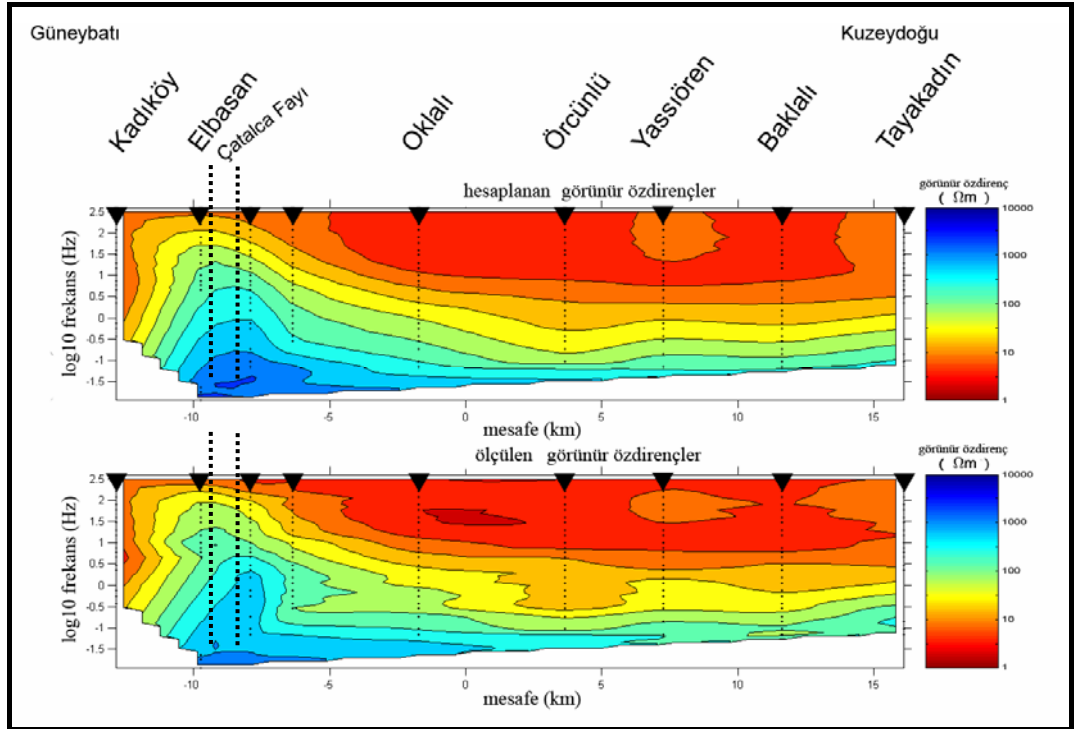


Şekil 4.31: E-Pol modeli için hazırlanan ikinci başlangıç modeli

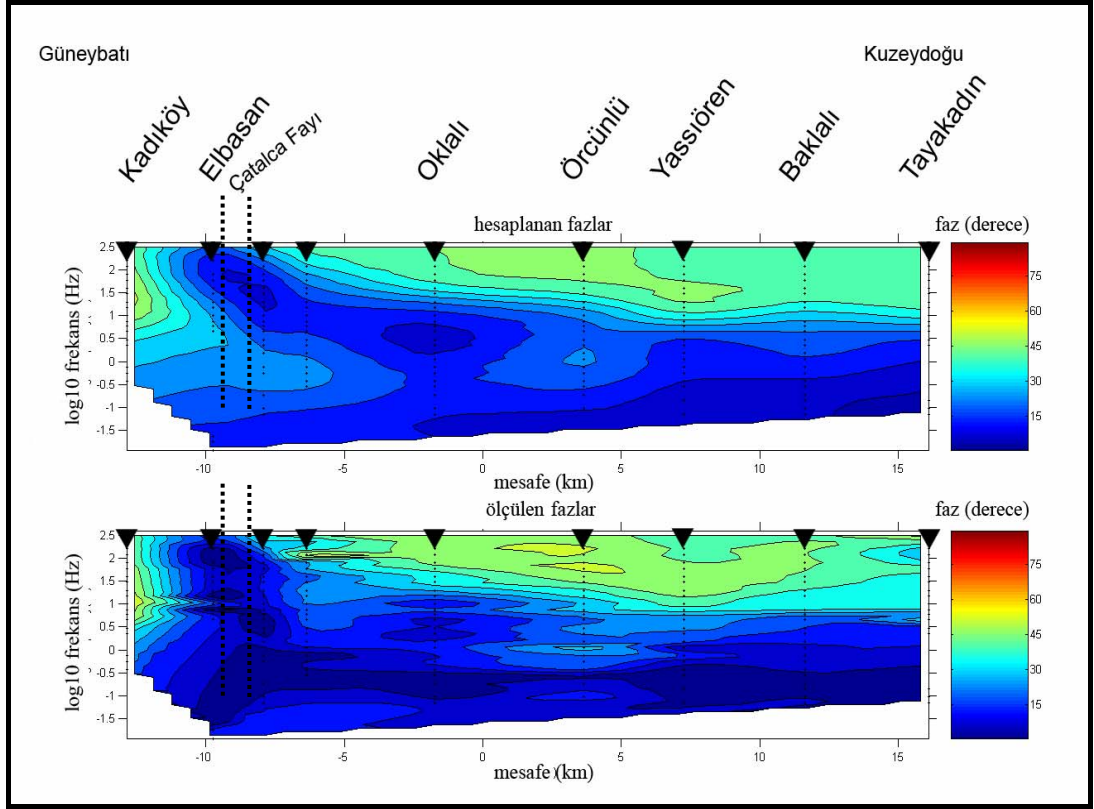
Sonuç olarak Şekil 4.32'deki model 1.62 RMS hata ile elde edilmiştir. Model E-Pol durumu için ilk gerçekleştirilen ters çözüm sonucuna (Şekil 4.25) oldukça yakındır ve derin yapı yine, B-Pol durumu için her iki ters çözüm işleminde de elde edilen öz direnç modellerine (Şekil 4.10, Şekil 4.21) göre daha iletken gözlenmektedir. Sonuç olarak elde edilen bu modele göre, E-Pol durumu için verilere çakışmanın sağlanabilmesi için derin yapıda gözlenen yaklaşık 300 $\Omega.m$ 'lik bu yapı gereklidir.



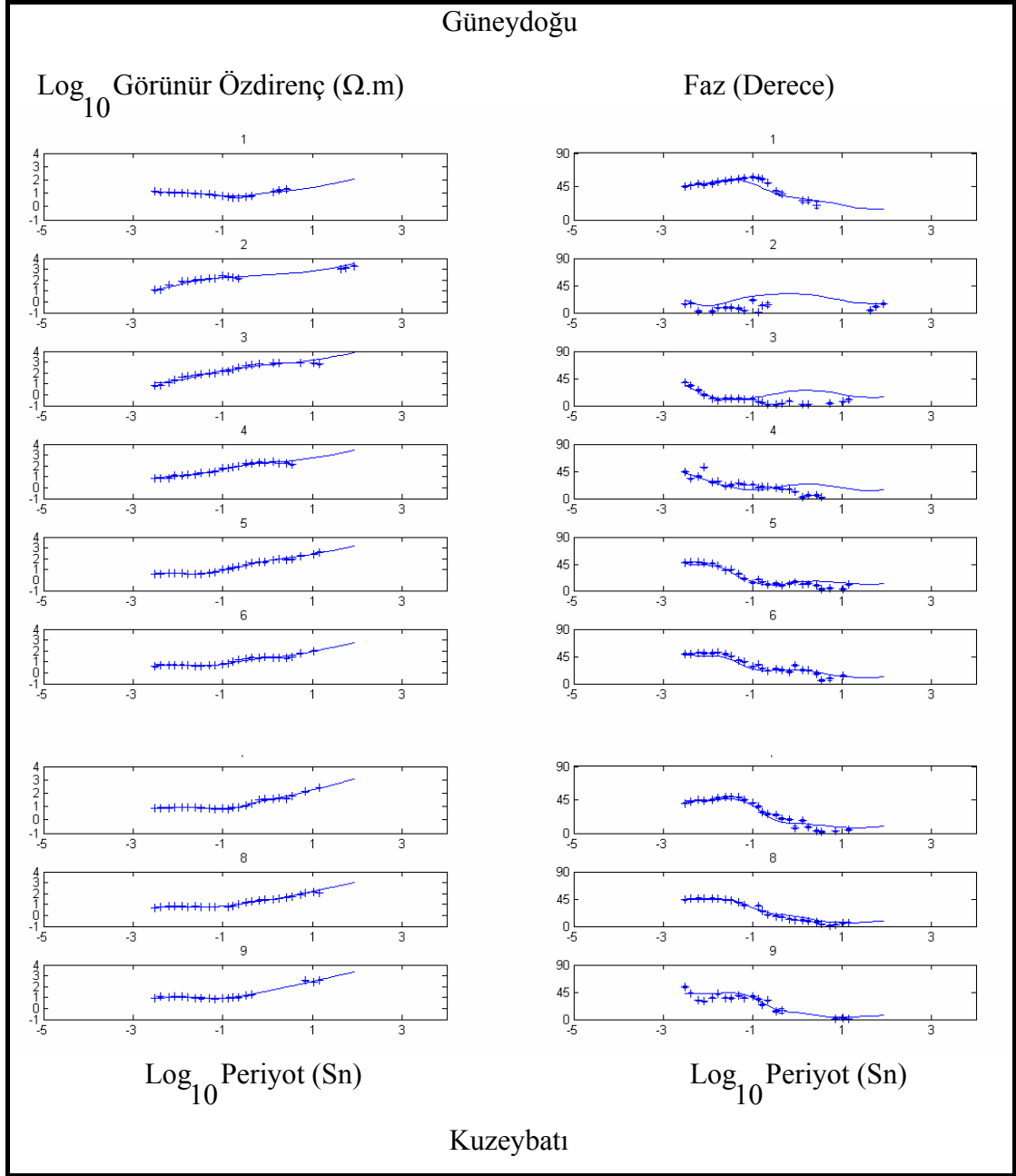
Şekil 4.32: E-Pol durumu için, Şekil 4.31’de görünen başlangıç modeliyle gerçekleştirilen ters çözüm sonucunda elde edilen, 1.62 RMS hatalı model



Şekil 4.33: E-Pol durumu için, Şekil 4.31’de görünen başlangıç modeliyle gerçekleştirilen ters çözüm sonucunda elde edilen modele ait ölçülen (altta) ve hesaplanan (üstte) görünür öz dirençlerin, log.frekansa karşı grafiği



Şekil 4.34: E-Pol durumu için, Şekil 4.31’de görünen başlangıç modeliyle gerçekleştirilen ters çözüm sonucunda elde edilen modele ait ölçülen (altta) ve hesaplanan (üstte) fazların, log. frekansa karşı grafiği



Şekil 4.35: E-Pol durumu ikinci ters çözümü için, ölçümler (artılar) ve Şekil 4.31’de görünen başlangıç modeliyle gerçekleştirilen ters çözümü sonucunda elde edilen hesaplanan değerlerin (düz çizgiler) her istasyon için, log.periyota karşı grafiği (sağ sütun görünür özdirençleri, sol sütun fazları içermektedir)

4.4.3 Bileşik durum için ters çözüm

a) Bileşik durumu için 1. ters çözüm

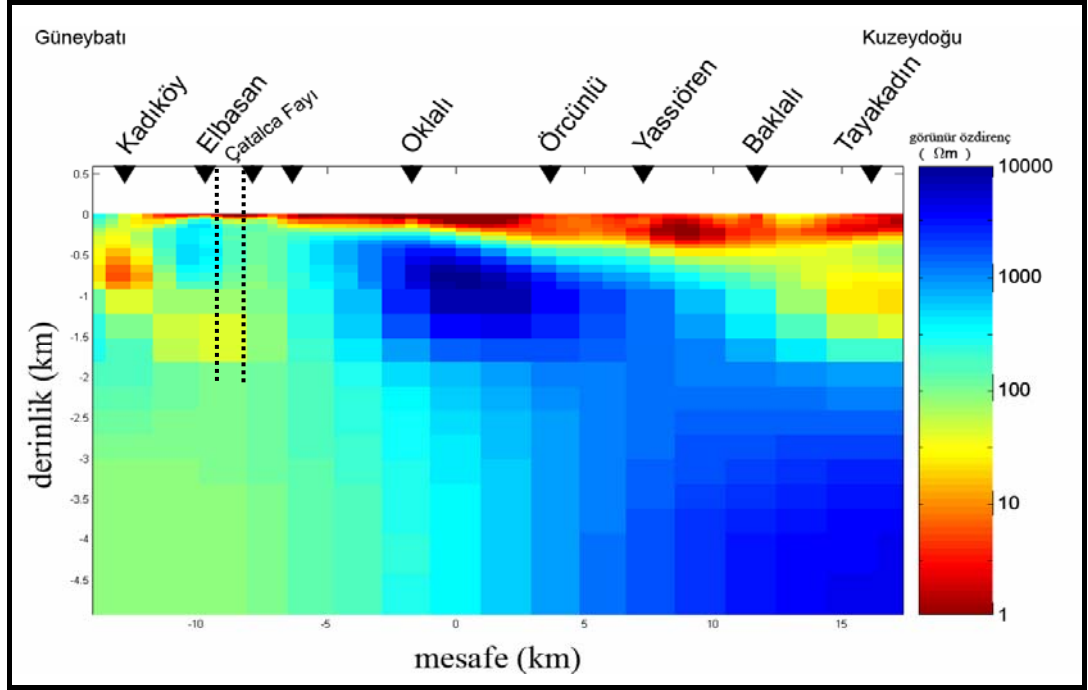
Bileşik durum için ters çözüm hem E-Pol hem de B-Pol verilerinin (Şekil 4.2, Şekil 4.3) eşzamanlı işlenmesi ile gerçekleşir. E-Pol durumu için yapılan ters çözümlerde bahsedildiği gibi E-Pol yapıların iki boyutlu olması nedeniyle düşey süreksizliklere duyarlılığını oldukça yitirmiştir. Bu nedenle E-Pol verisinin etkisiyle bileşik durum için yapılan ters çözümün, tek başına B-Pol durumu için gerçekleştirilen ters çözüm kadar duyarlı düşey süreksizlik bilgisi sağlamayacağı düşünülebilir.

Bileşik durum için ters çözüm işlemi, verilerin %10 hata tabanına sahip olduğu varsayımı ile 100 $\Omega.m$. yarısonsuz ortam başlangıç modeliyle gerçekleştirilmiş ve hata miktarı 2.62 olan aşağıdaki model elde edilmiştir (Şekil 4.36). Bileşik durum için elde edilecek modelin hem E Kutuplanması (E-Pol) hem de B Kutuplanması (B-Pol) durumları için ölçülen verilere çakışması gerektiğinden daha yüksek hata değerlerine sahip modeller elde edilmektedir.

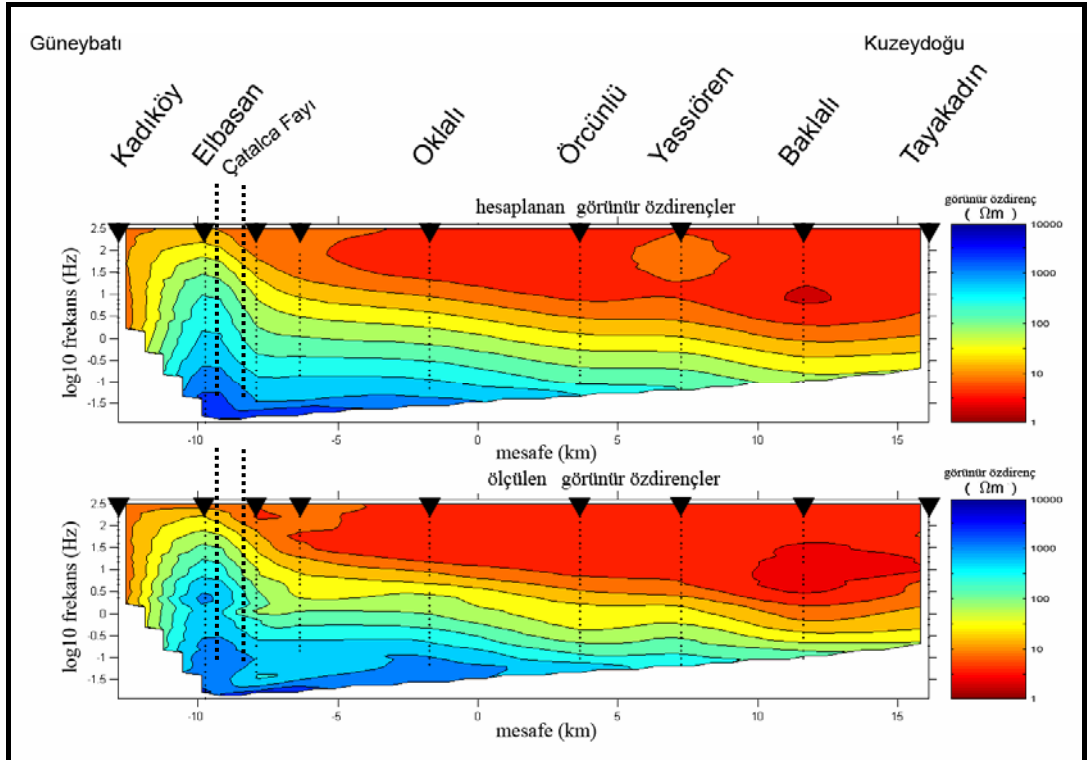
Elde edilen modelin B-Pol durumu verisine olan çakışmasına bakıldığında, (Şekil 4.37, Şekil 4.38, Şekil 4.39) öz direnç eğrilerine olan çakışma yüksekken faz eğrilerine olan çakışmanın düşük olduğu görülebilir. Buna karşın E-Pol durumu verilerine olan çakışma (Şekil 4.40, Şekil 4.41, Şekil 4.42) daha yüksektir.

Elde edilen modelin (Şekil 4.36) B-Pol modeline (Şekil 4.10) daha yakın olduğu görülmesine rağmen, bileşik durumda, B-Pol modelinde bulunan derin iletkenler gözlenmemiştir. Modelin en kuzeydoğusunda ve güneybatısında ikinci istasyonun (Elbasan) altında 1.5 km derinlikte E-Pol ve B-Pol durumlarında (Şekil 4.21, Şekil 4.32) görülmeyen, düşük iletkenliğe sahip bölgeler gözlenmektedir. Bunun yanı sıra, en güneybatı'da derinde (>2.5 km) B-Pol durumunda (veri olmayan bölgede) $\sim 10-50 \Omega.m$ arasında, bileşik durumda $\sim 100 \Omega.m$ olarak kendini gösteren, E-Pol durumunda ise yalıtkan olarak gözlenen ($\sim 1000 \Omega.m$), iletken yapı mevcuttur.

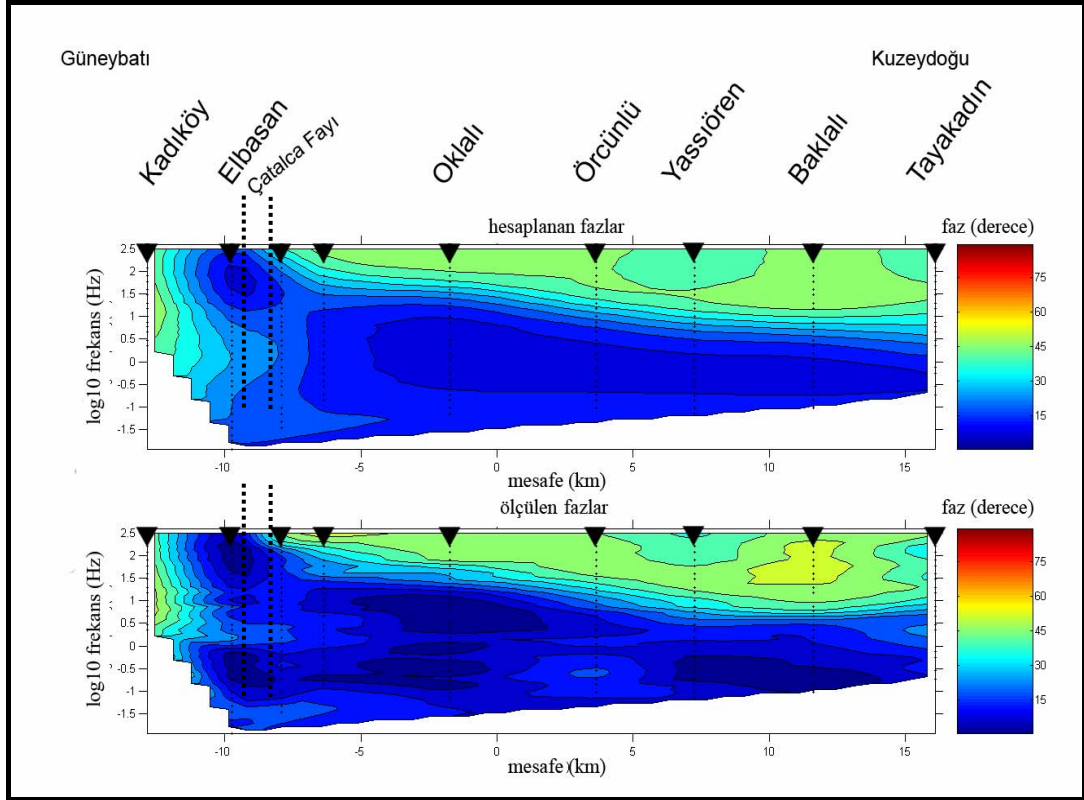
Bileşik durum için gözlenen bazı iletkenlerin tıpkı diğer (B-Pol ve E-Pol) durumlar için olduğu gibi gerçekliği sınanmıştır.



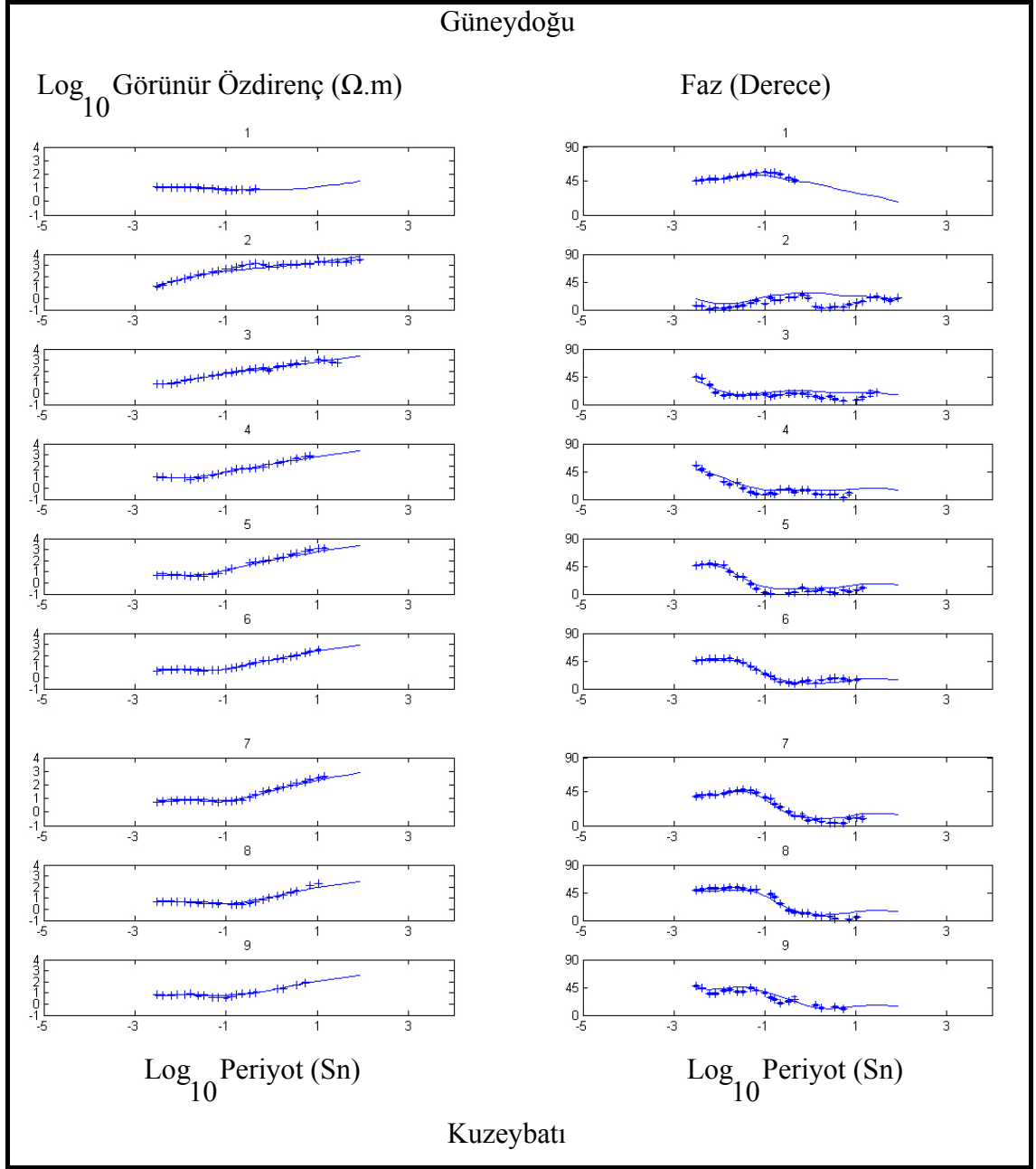
Şekil 4.36: Bileşik durum için $100\Omega.m$ yarısonsuz ortam başlangıç modeliyle ters çözüm sonucu elde edilen, 2.62 RMS hatalı model



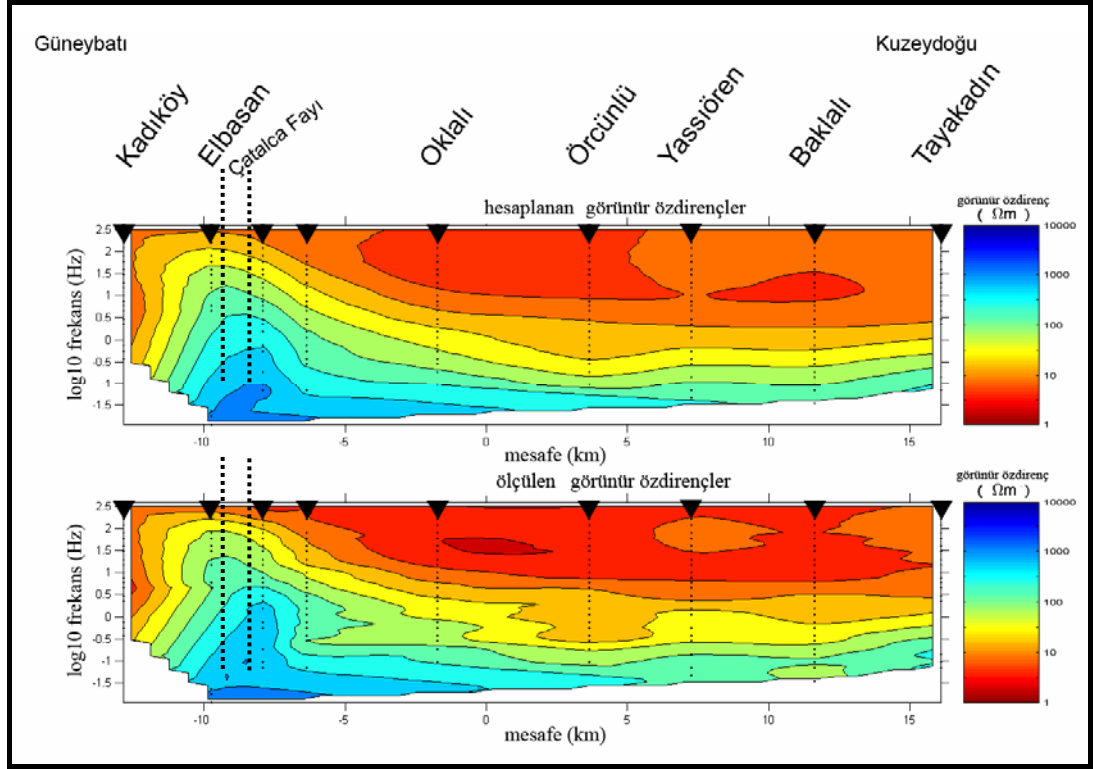
Şekil 4.37: Bileşik durum için $100\Omega.m$ yarısonsuz ortam başlangıç modeliyle ters çözüm sonucu elde edilen modelin B-Pol durumuna ait ölçülen (altta) ve hesaplanan (üstte) görünür öz dirençlerin, log.frekans karşı grafiği



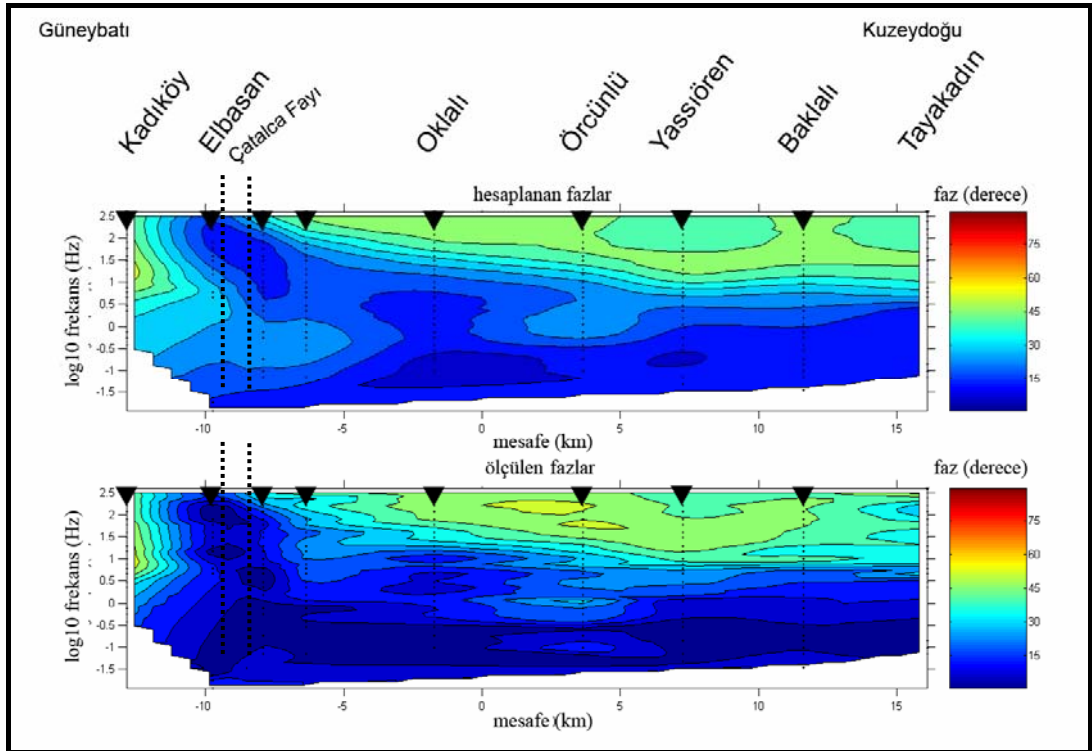
Şekil 4.38: Bileşik durum için $100\Omega.m$ yarısonsuz ortam başlangıç modeliyle ters çözüm sonucu elde edilen modelin B-Pol durumuna ait ölçülen (altta) ve hesaplanan (üstte) fazların, log.frekans karşı grafiği



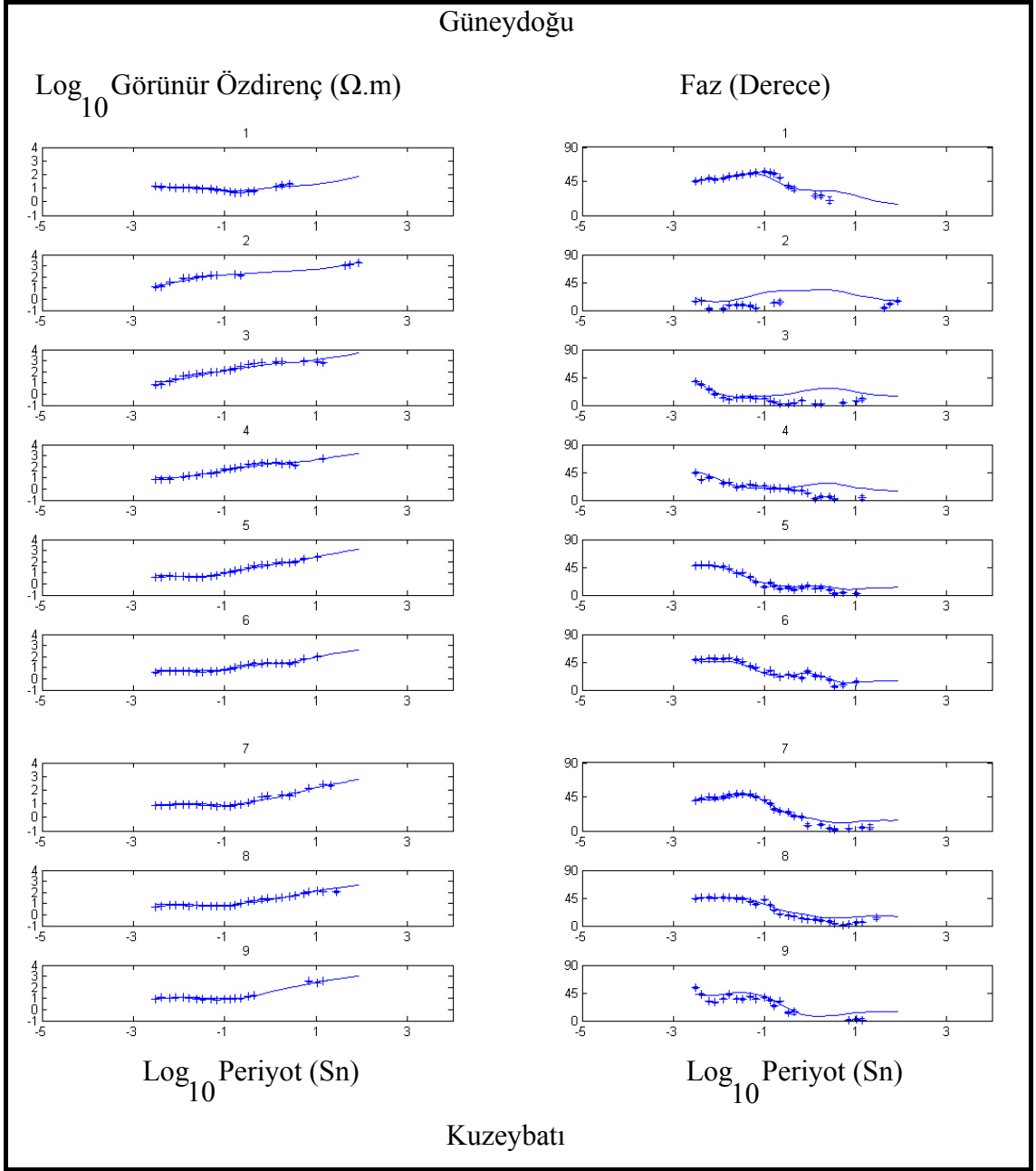
Şekil 4.39: Bileşik durum için ters çözüm sonucunda, B-Pol durumuna ait ölçümler (artılar) ve 100 $\Omega.m$ yarısonsuz ortam başlangıç modeliyle ters çözüm sonucu elde edilen modele ait hesaplanan değerlerin (düz çizgiler) her istasyon için, log.periyota karşı grafiği (sağ sütun görünür öz dirençleri, sol sütun fazları içermektedir)



Şekil 4.40: Bileşik durum için $100\Omega.m$ yarısonsuz ortam başlangıç modeliyle ters çözüm sonucu elde edilen modelin E-Pol durumuna ait ölçülen (altta) ve hesaplanan (üstte) görünür öz dirençlerin, log.frekans karşı grafiği



Şekil 4.41: Bileşik durum için $100\Omega.m$ yarısonsuz ortam başlangıç modeliyle ters çözüm sonucu elde edilen modelin E-Pol durumuna ait ölçülen (altta) ve hesaplanan (üstte) fazların, log.frekans karşı grafiği



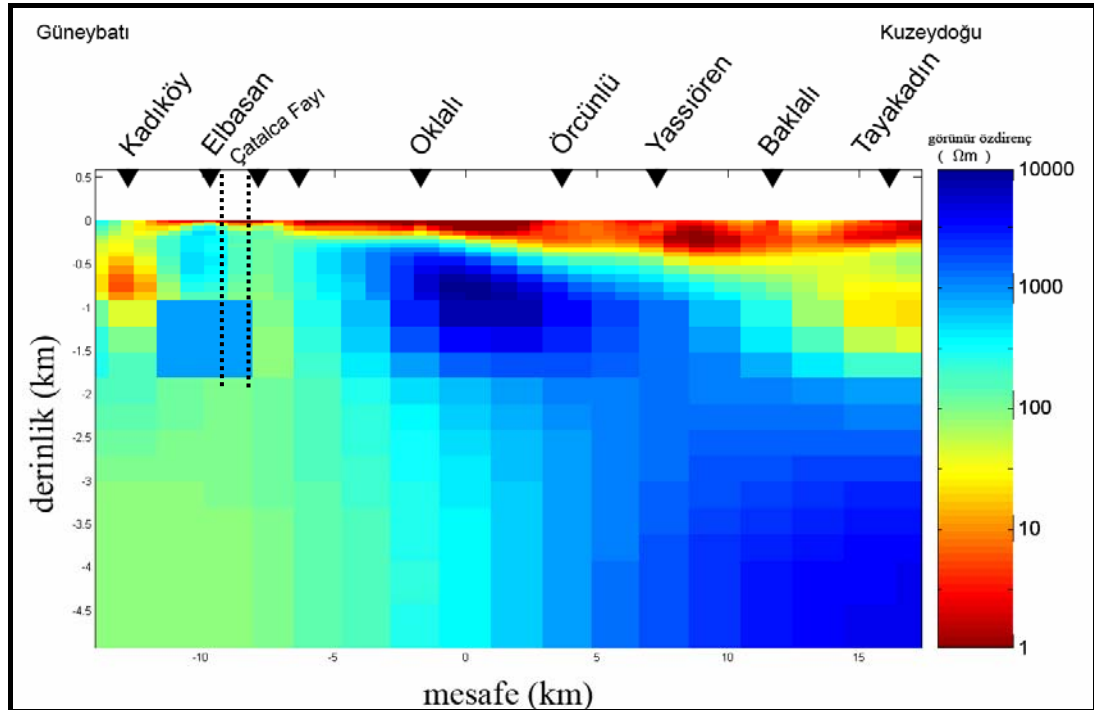
Şekil 4.42: Bileşik durum için ikinci ters çözüm sonucunda, E-Pol durumuna ait ölçümler (artılar) ve $100\Omega.m$ yarısız ortam başlangıç modeliyle ters çözüm sonucu elde edilen hesaplanan değerlerin (düz çizgiler) her istasyon için, log.periyota karşı grafiği (sağ sütun görünür öz dirençleri, sol sütun fazları içermektedir)

b) Bileşik durum için gerçekleştirilen testler:

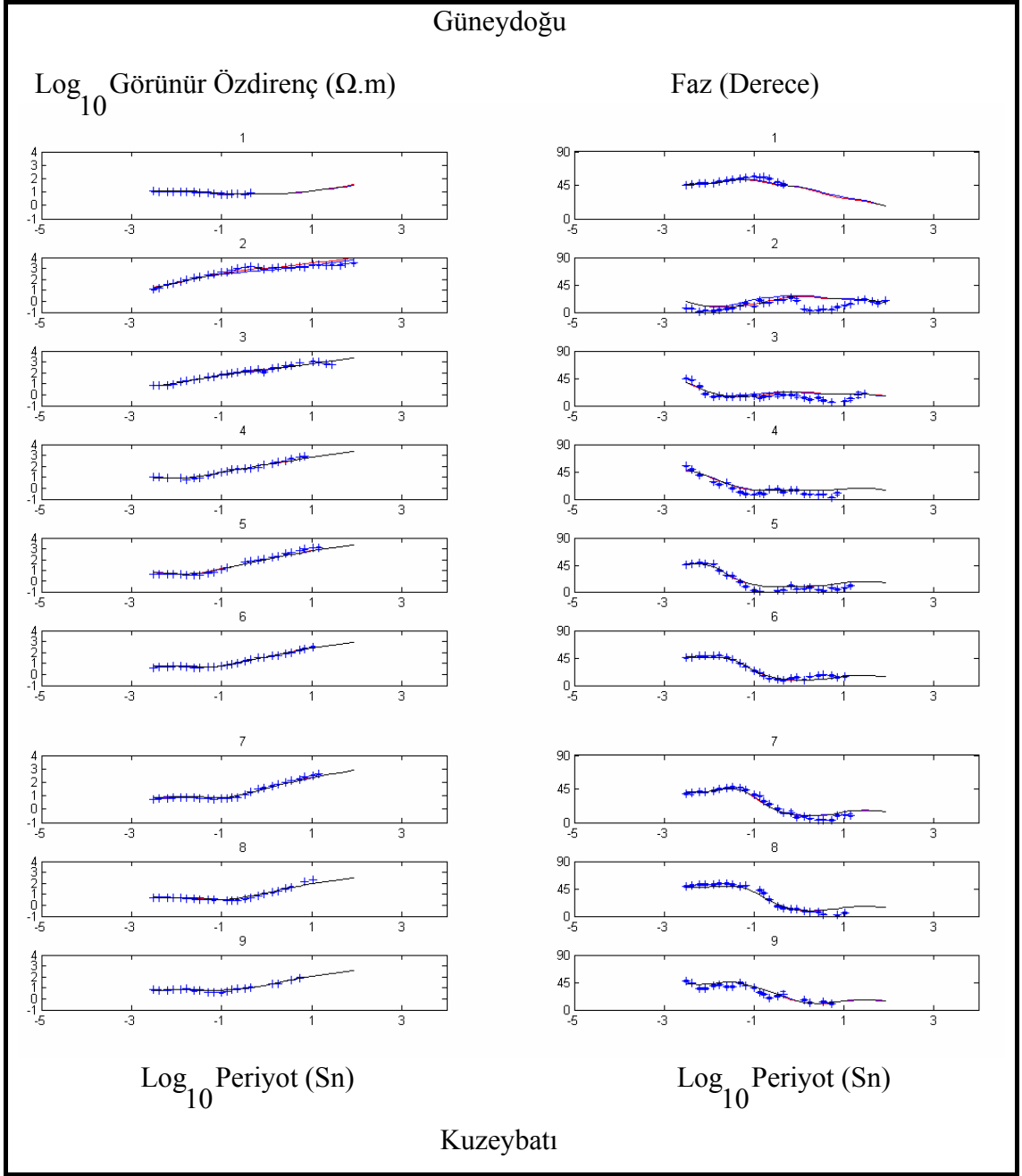
Elde edilen bileşik durum modelinde (Şekil 4.36), Elbasan istasyonu altında, B-Pol modelinde görülmeyen bir iletken yapı gözlenmiştir. Ayrıca, Tayakadın istasyonunun altında, B-Pol modelinde de gözlenen ve B-Pol durumu için gerçekliği sınanan ikinci bir iletken yapı mevcuttur. Bileşik durum modelinin bu iki iletkene duyarlılığı ayrı ayrı sınanmıştır.

i) Test 1

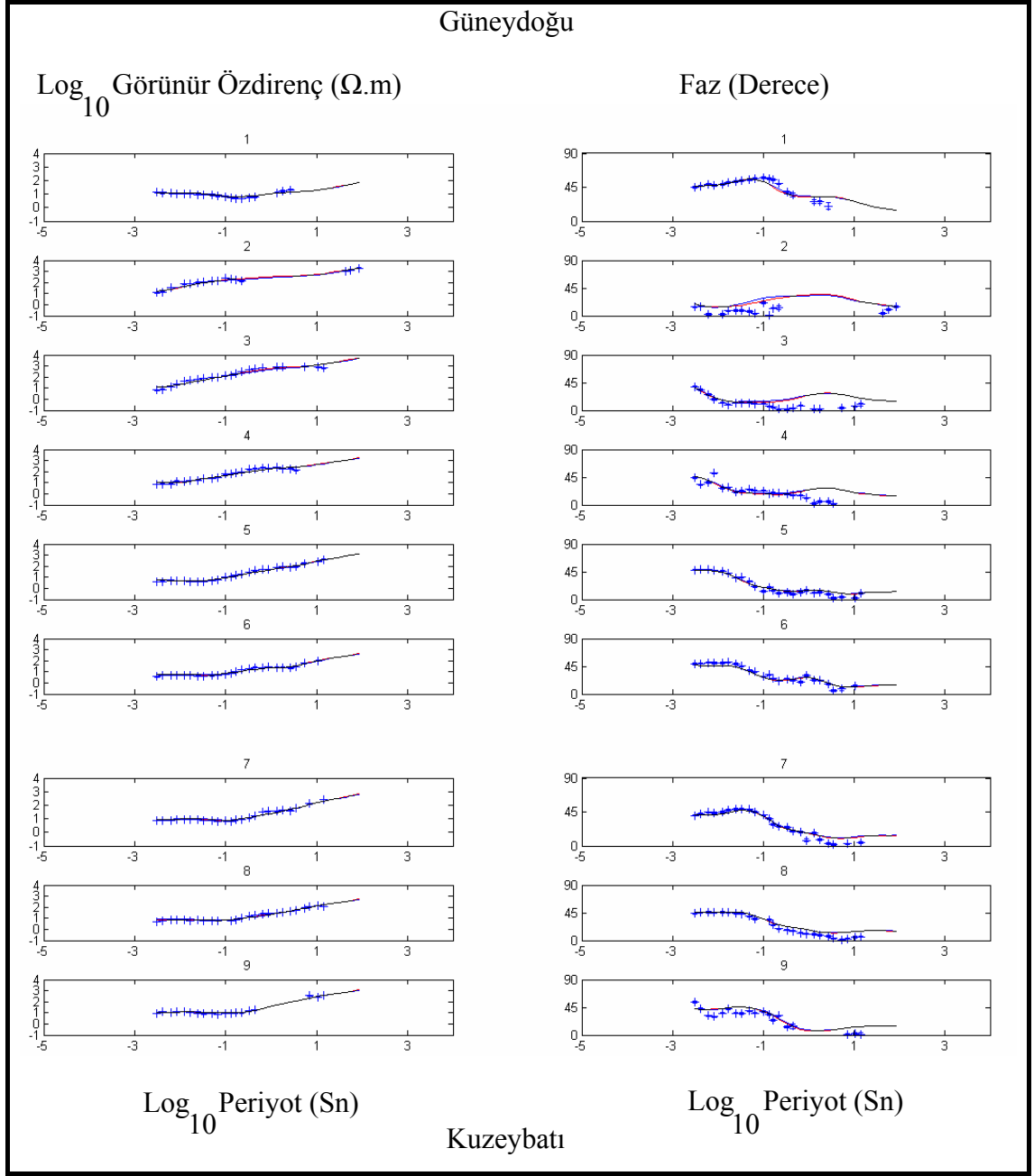
Bileşik durum için elde edilen modelde (Şekil 4.36) gözlenen şüpheli iletken yapılardan öncelikle Elbasan istasyonu altında kalan bölge yalıtıkana çevrilmiş ve meydana gelen değişimler izlenmiştir. Elde edilen model tepkisindeki RMS hatanın sadece 0.03 lük bir artışla 2.65 olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.43). Ayrıca hem E Kutuplanması (E-Pol) hem de B Kutuplanması (B-Pol) durumu için elde edilen değerlerin ölçülen verilere çakışmasında dikkati çeken bir değişim gözlenmemiştir (Şekil 4.44, Şekil 4.45). Buna göre bileşik durum modeli bu iletkenlere yüksek duyarlılık göstermemektedir. Bu iletken, modelin ortaya koyduğu çok güvenilir bir yapı olarak düşünülmemelidir.



Şekil 4.43: Bileşik durum için elde edilen modelin (Şekil 4.36), Elbasan istasyonunun altında gözlenen iletkenin sınanması için değiştirilmiş hali (RMS hata: 2.65)



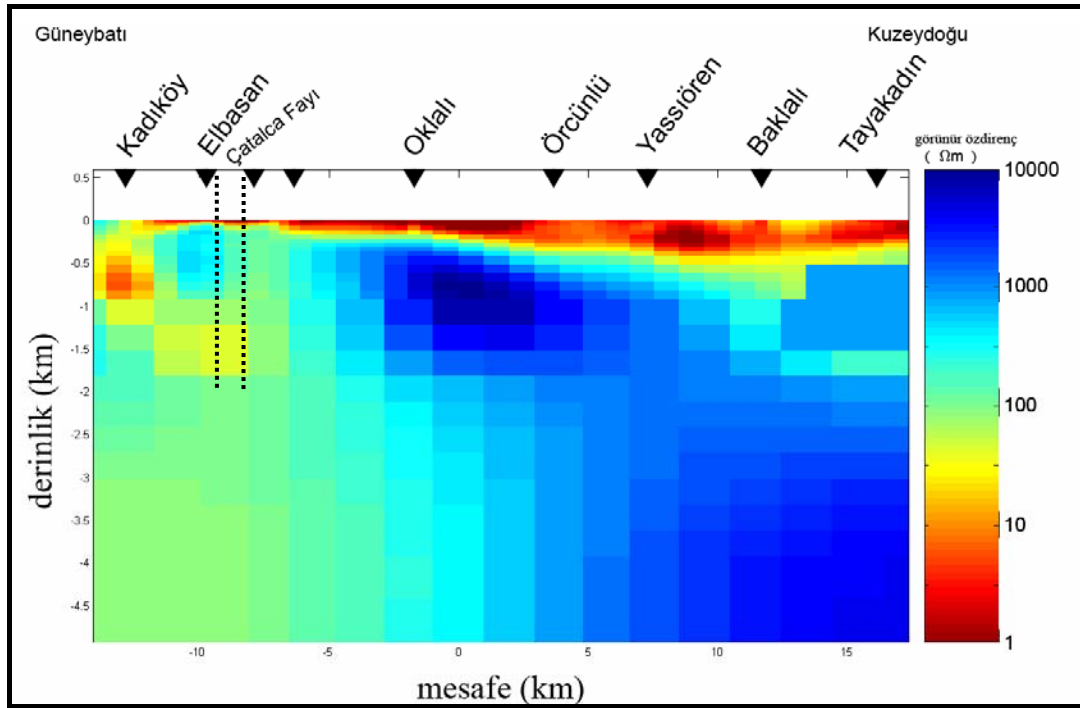
Şekil 4.44: Bileşik durum modelinin (Şekil 4.36), Elbasan istasyonunun altında gözlenen iletkenin sıranması için değiştirilmesiyle hazırlanan yeni modelle (Şekil 4.43) karşılaştırılması, B-Pol durumu için ölçümler (artılar) ve hesaplanan değerlerin (ters çözüm sonucu, mavi; test sonucu kırmızı çizgiler) her istasyon için, log.periyota karşı grafiği (sağ sütun görünür öz dirençleri, sol sütun fazları içermektedir)



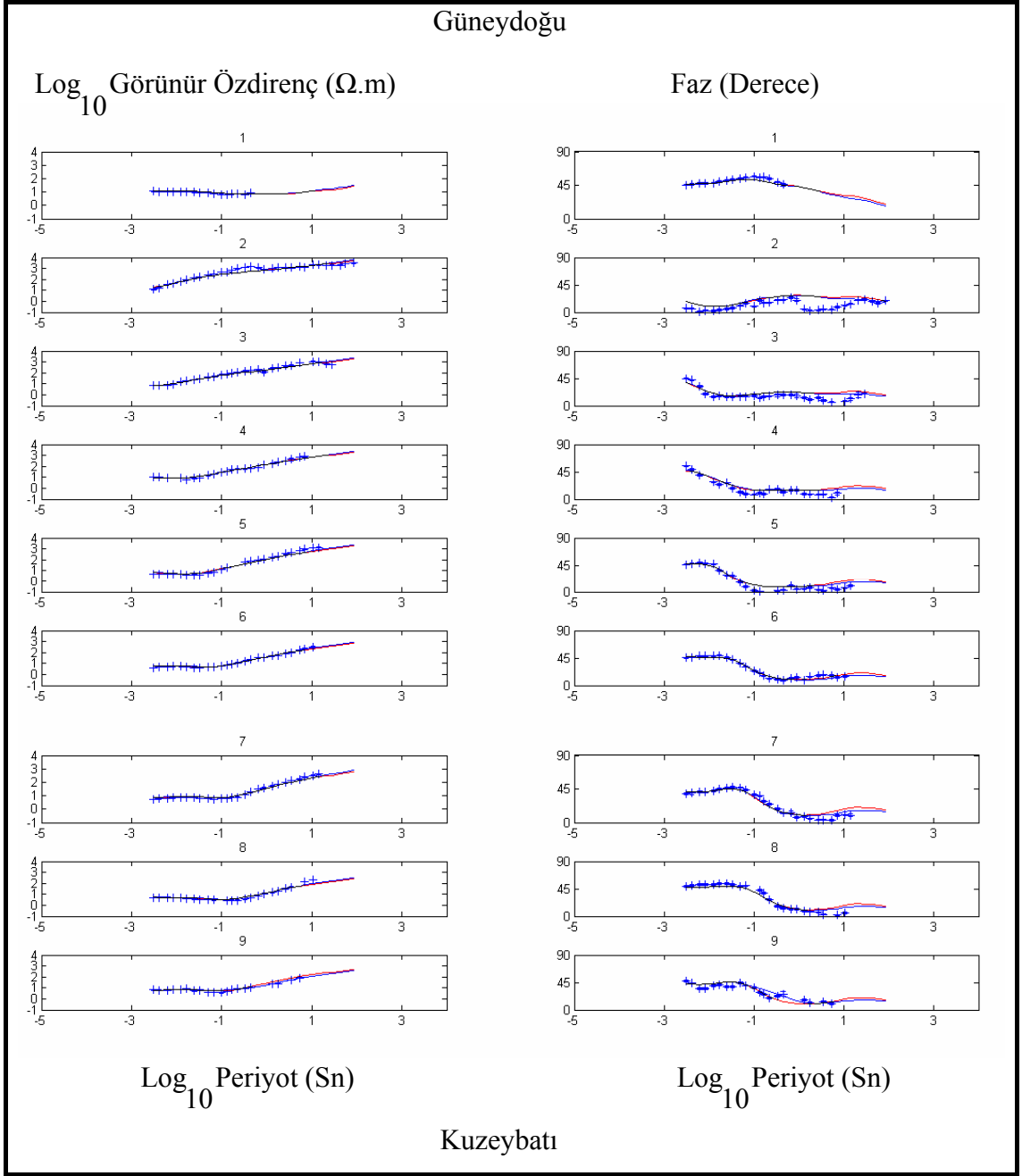
Şekil 4.45: Bileşik durum modelinin (Şekil 4.36), Elbasan istasyonunun altında gözlenen iletkenin sıranması için değiştirilmesiyle hazırlanan yeni modelle (Şekil 4.43) karşılaştırılması. E-Pol durumu için ölçümler (artılar) ve hesaplanan değerlerin (ters çözüm sonucu, mavi; test sonucu kırmızı çizgiler) her istasyon için, log.periyota karşı grafiği (sağ sütun görünür öz dirençleri, sol sütun fazları içermektedir)

ii) Test 2

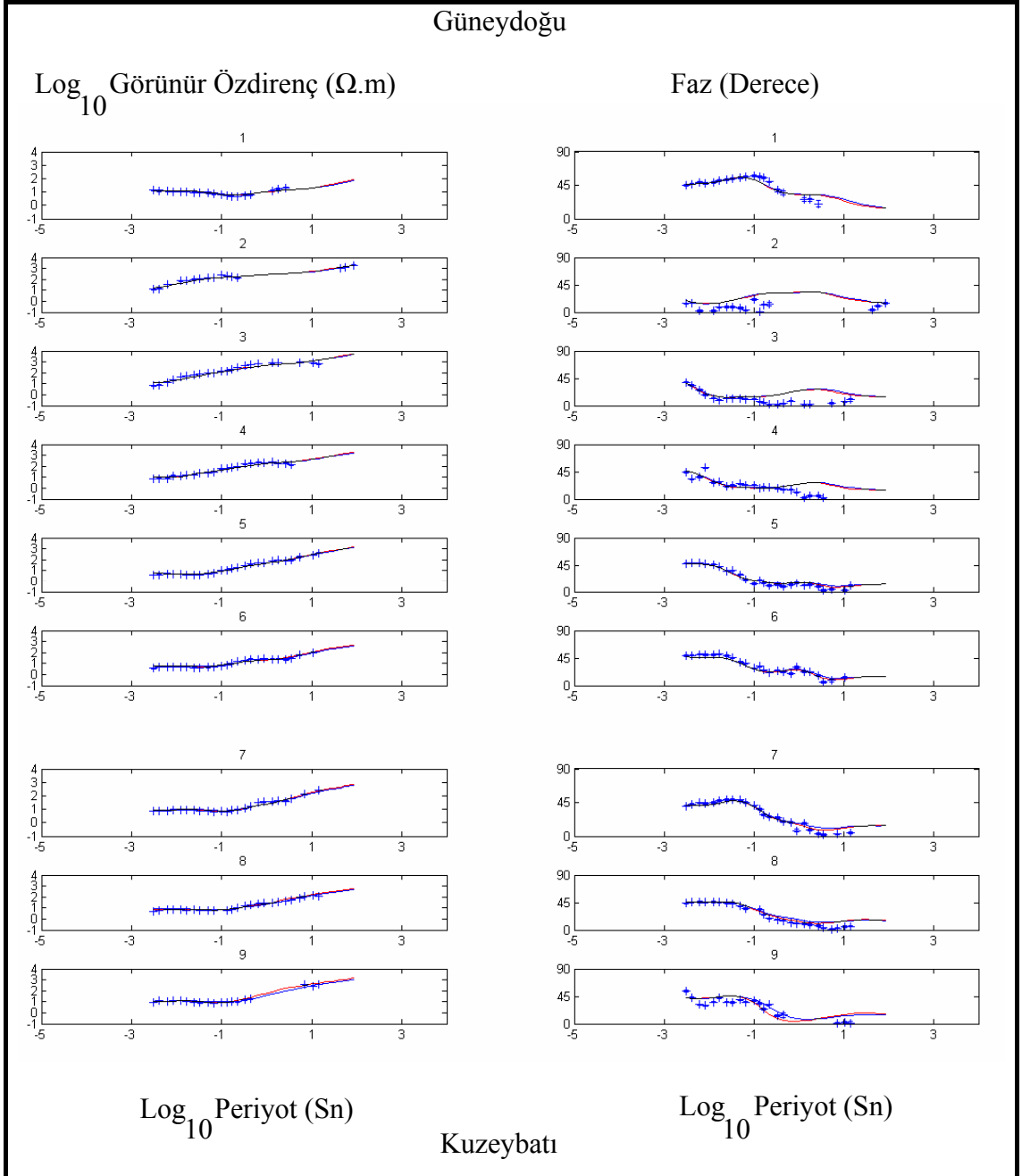
Elbasan istasyonunun altında kalan bölge sılandıktan sonra, B-Pol durumunda da gözlenen ve bu durum için sınanması gerçekleştirilmiş olan Tayakadın istasyonu altındaki iletken sınanmıştır. Hazırlanan bu modelde RMS hata 2.62'den 2.69'a çıkmıştır ve elde edilen eğrilerde (Şekil 4.47, Şekil 4.48) Tayakadın altında kalan istasyonda öz direnç ve faz çakışmasında gözle görünür farklılıklar oluşmuştur. Tıpkı B-Pol içi yapılan test sonuçlarından elde edildiği gibi bu sınamada da bu iletkenin daha somut şekilde ortaya konduğunu göstermiştir.



Şekil 4.46: Bileşik durum için elde edilen modelin (Şekil 4.36), Tayakadın istasyonunun altında gözlenen iletkenin sınanması için değiştirilmiş hali (RMS hata: 2.69)



Şekil 4.47: Bileşik durum modelinin (Şekil 4.35) ve test için hazırlanan yeni modelin (Şekil 4.46), karşılaştırması. B-Pol için ölçümler (artılar) ve hesaplanan değerlerin (ters çözüm sonucu, mavi; test sonucu kırmızı çizgiler) her istasyon için, log.periyota karşı grafiği (sağ sütun görünür özdirençleri, sol sütun fazları içermektedir)

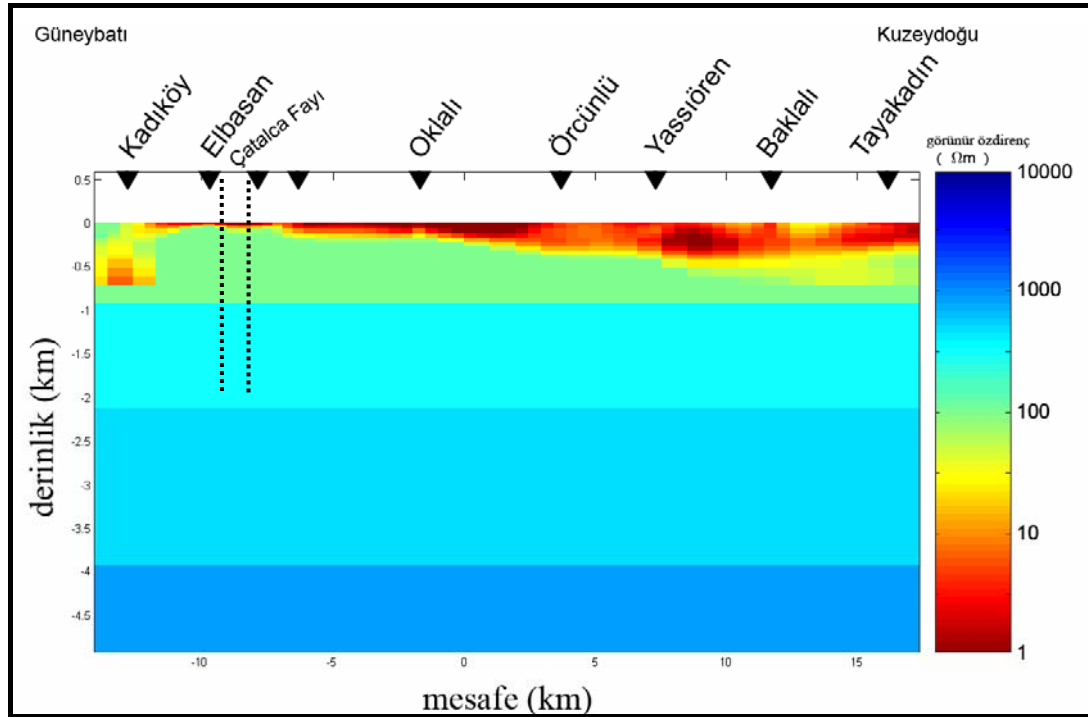


Şekil 4.48: Bileşik durum modelinin (Şekil 4.36) ve test için hazırlanan yeni modelin(Şekil 4.46), karşılaştırması. E-Pol için ölçümler (artılar) ve hesaplanan değerlerin (ters çözüm sonucu, mavi; test sonucu kırmızı çizgiler) her istasyon için, log.periyota karşı grafiği (sağ sütun görünür özdirençleri, sol sütun fazları içermektedir)

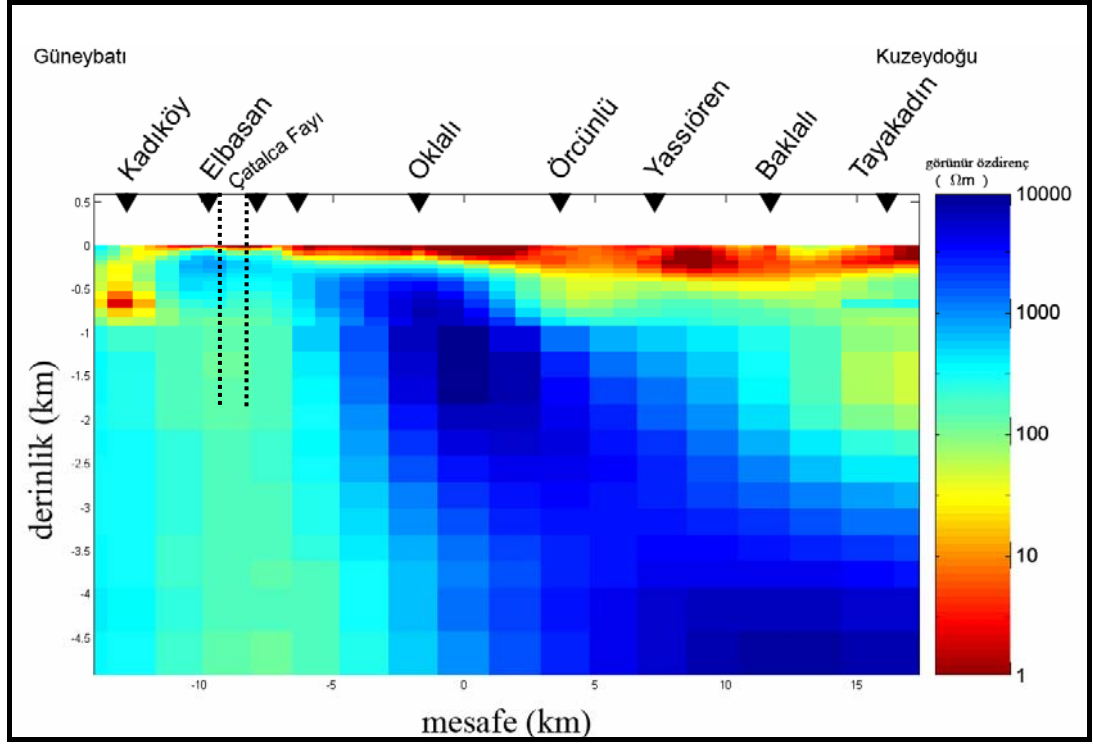
c) Bileşik durum için 2. ters çözüm

Bileşik duruma da gerek B Kutuplanması (B-Pol) gerek E Kutuplanması (E-Pol) durumu için gerçekleştirilenler gibi testler gözlenen iletken yapılar için sırayla yapılmış ve sonuçlar modelin iletken yapılara duyarlılığının göreceli olarak az olduğunu ortaya koymuştur.

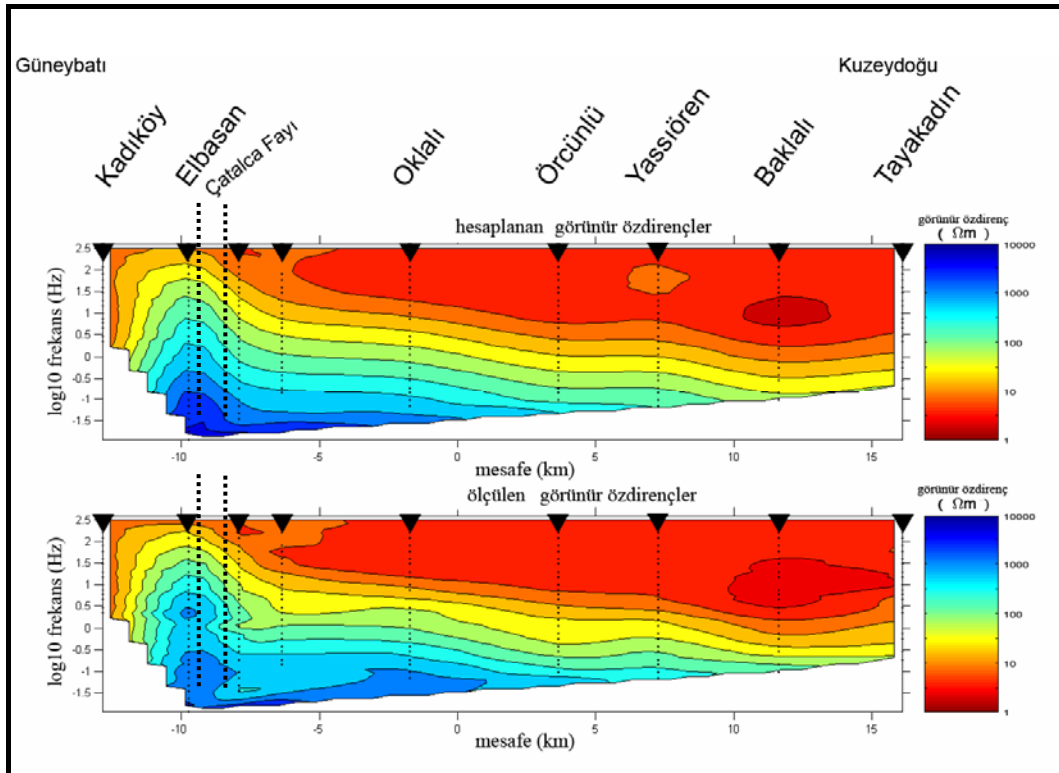
Aynı şekilde bileşik durum için de $100\Omega.m$ yarısonsuz ortam başlangıç modeliyle gerçekleştirilen ilk ters çözüm sonucunda elde edilen model (Şekil 4.36) değiştirilerek derinde iletkenliği gittikçe azalan katmanlar eklenmiş, başlangıç modeli kabul edilmiş (Şekil 4.49) ve yeniden ters çözüm işlemi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen model (Şekil 4.50) B-Pol durumu için elde edilen model ile (Şekil 4.21) ve bileşik durum için gerçekleştirilen ilk ters çözüm sonucuyla (Şekil 4.36) neredeyse aynı görünüme sahiptir. Arazide ölçülen verilerle RMS hatası 2.56 olan bu model için hesaplanan değerler, B-Pol durumu için, Şekil 4.51, Şekil 4.52, Şekil 4.53'te, E-Pol durumu için, Şekil 4.54, Şekil 4.55 ve Şekil 4.56'da gösterilmiştir. Başlangıç modelinde sığ iletken yapılar örtülerek ters çözüm yapıldığında, ters çözüm sonucu elde edilen model (Şekil 4.50) yine bu iletkenleri vermektedir.



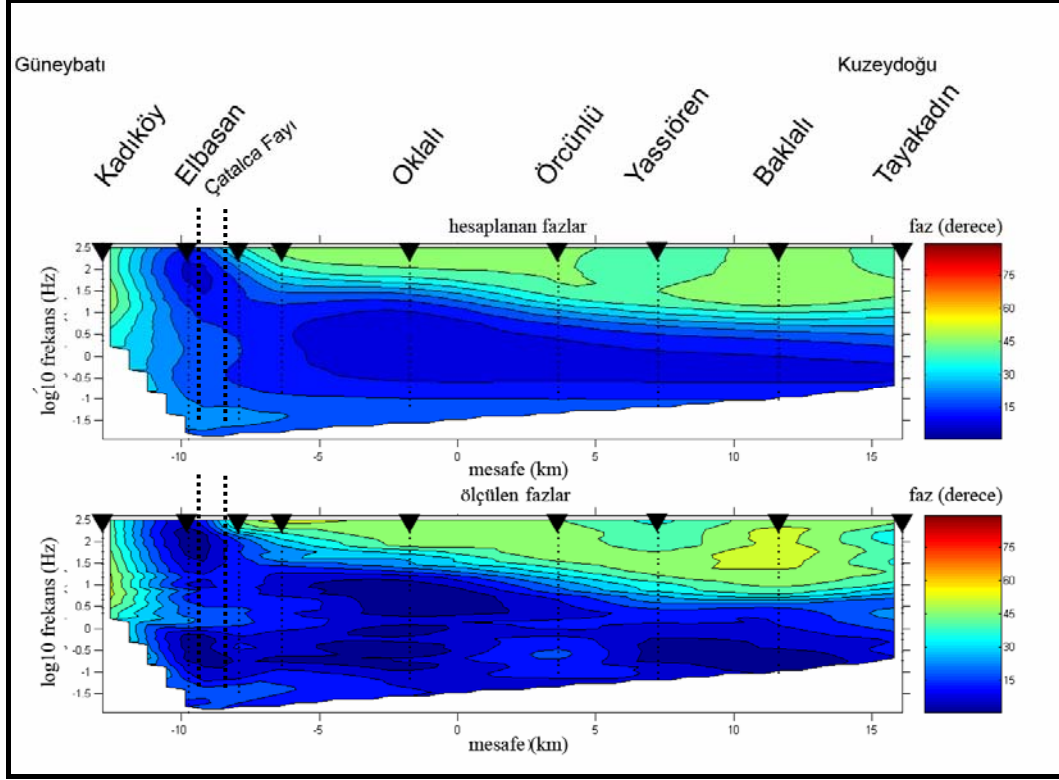
Şekil 4.49: Bileşik durum ters çözümü için hazırlanan ikinci başlangıç modeli



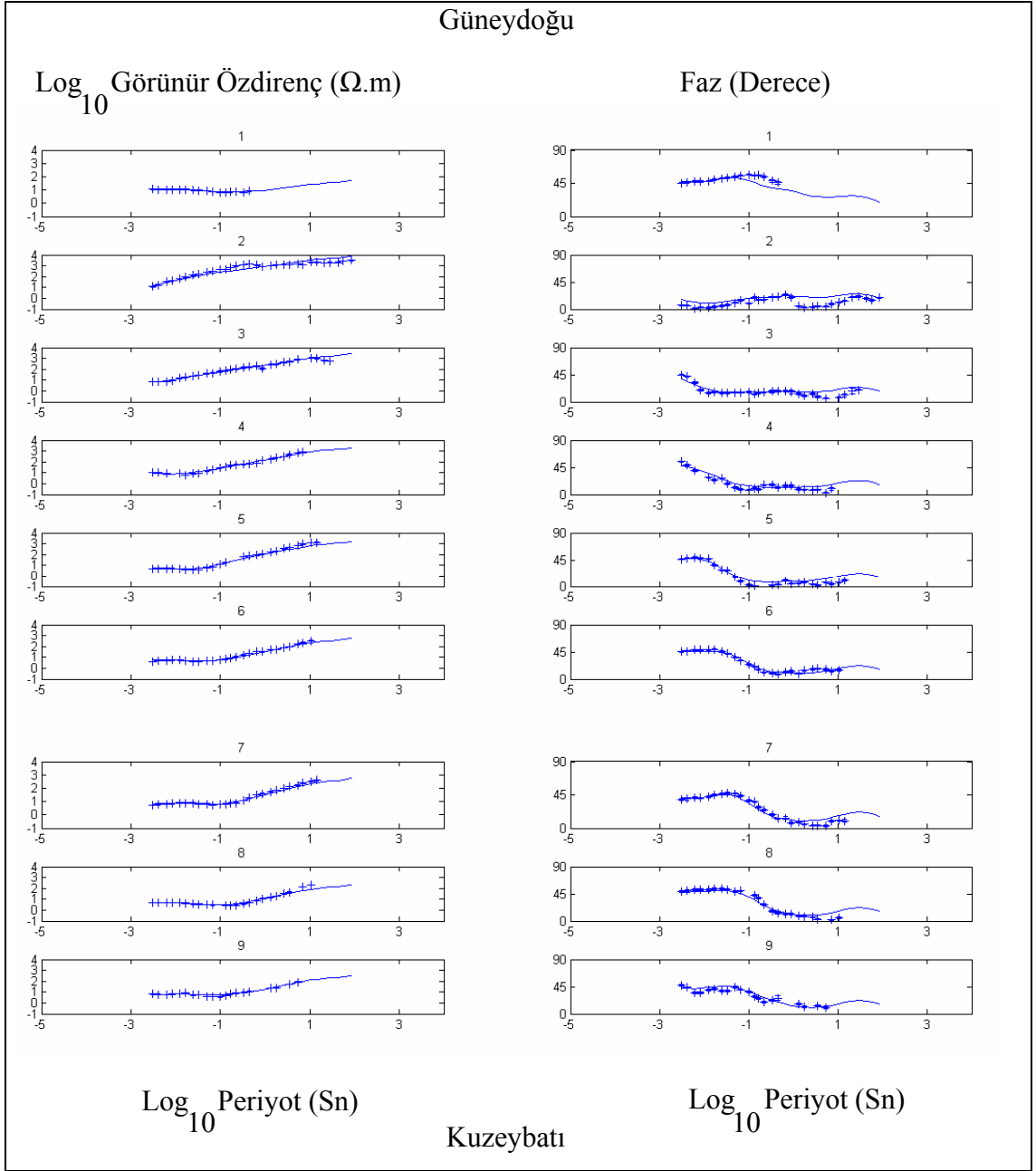
Şekil 4.50: Bileşik durum için Şekil 4.49’da görülen başlangıç modeliyle gerçekleştirilen ters çözümü sonucunda elde edilen, 2.56 RMS hatalı model



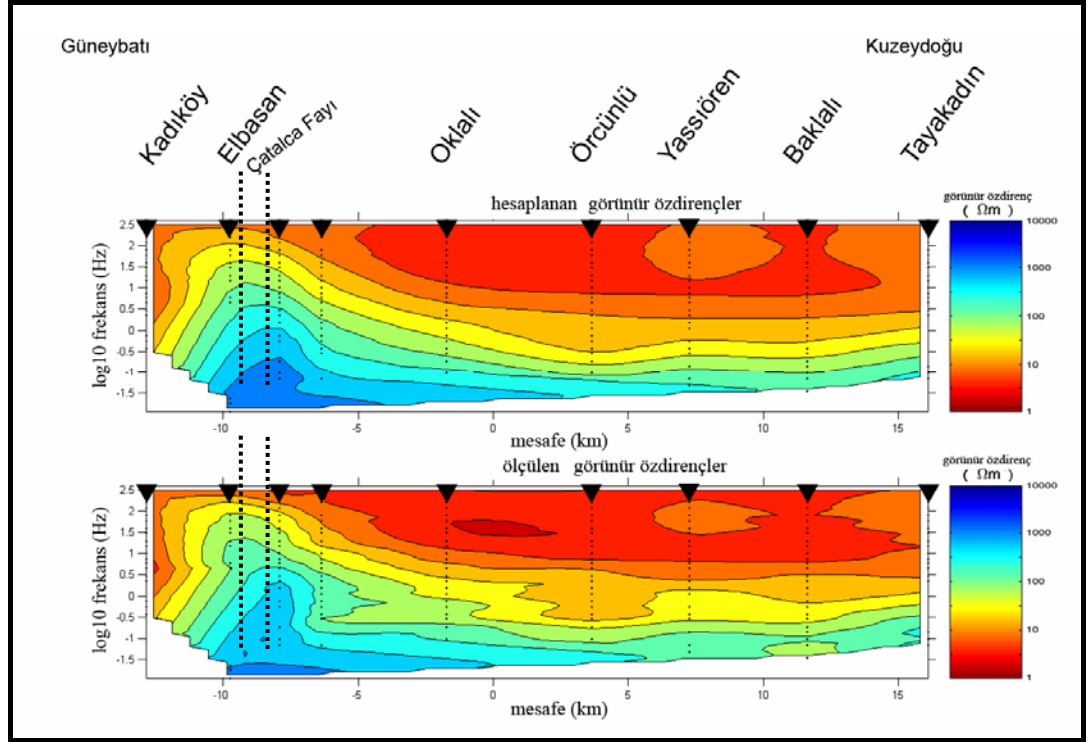
Şekil 4.51: Bileşik durum için Şekil 4.49’da görülen başlangıç modeliyle gerçekleştirilen ters çözümü sonucunda elde edilen modelin B-Pol durumuna ait ölçülen (altta) ve hesaplanan (üstte) görünür öz dirençlerin, log. frekansa karşı grafiği



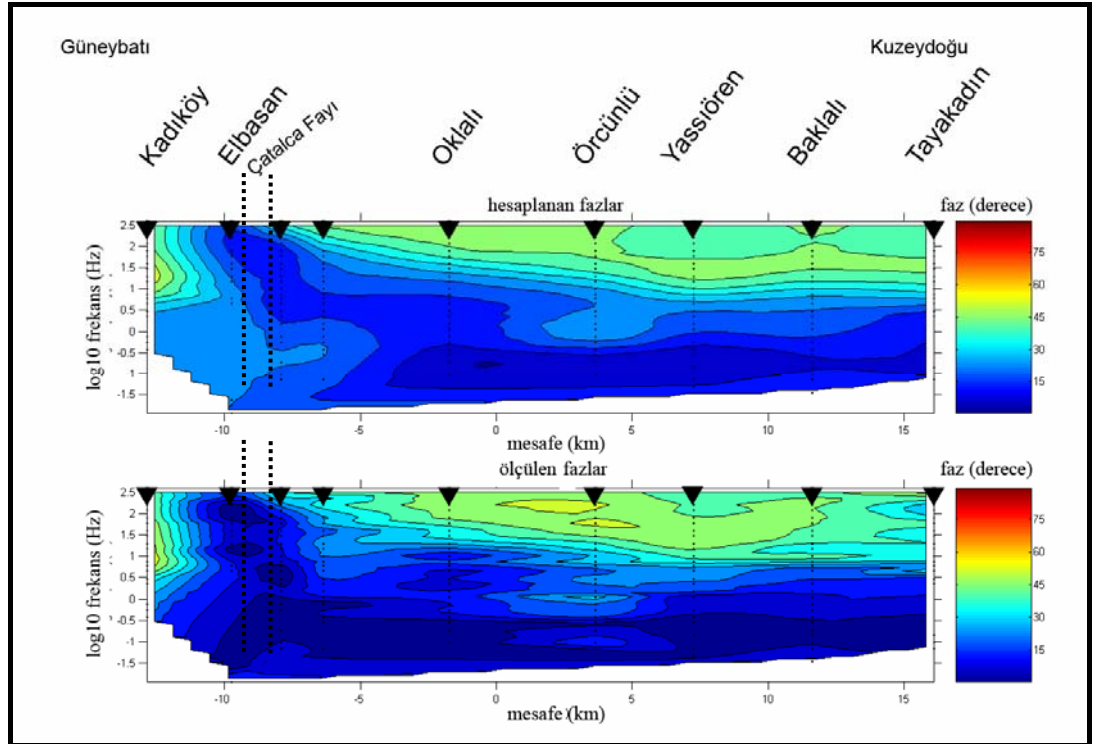
Şekil 4.52: Bileşik durum için ikinci Şekil 4.49’da görülen başlangıç modeliyle gerçekleştirilen ters çözümü sonucunda elde edilen modelin B-Pol durumuna ait ölçülen (altta) ve hesaplanan (üstte) fazların, log.frekans karşı grafiği



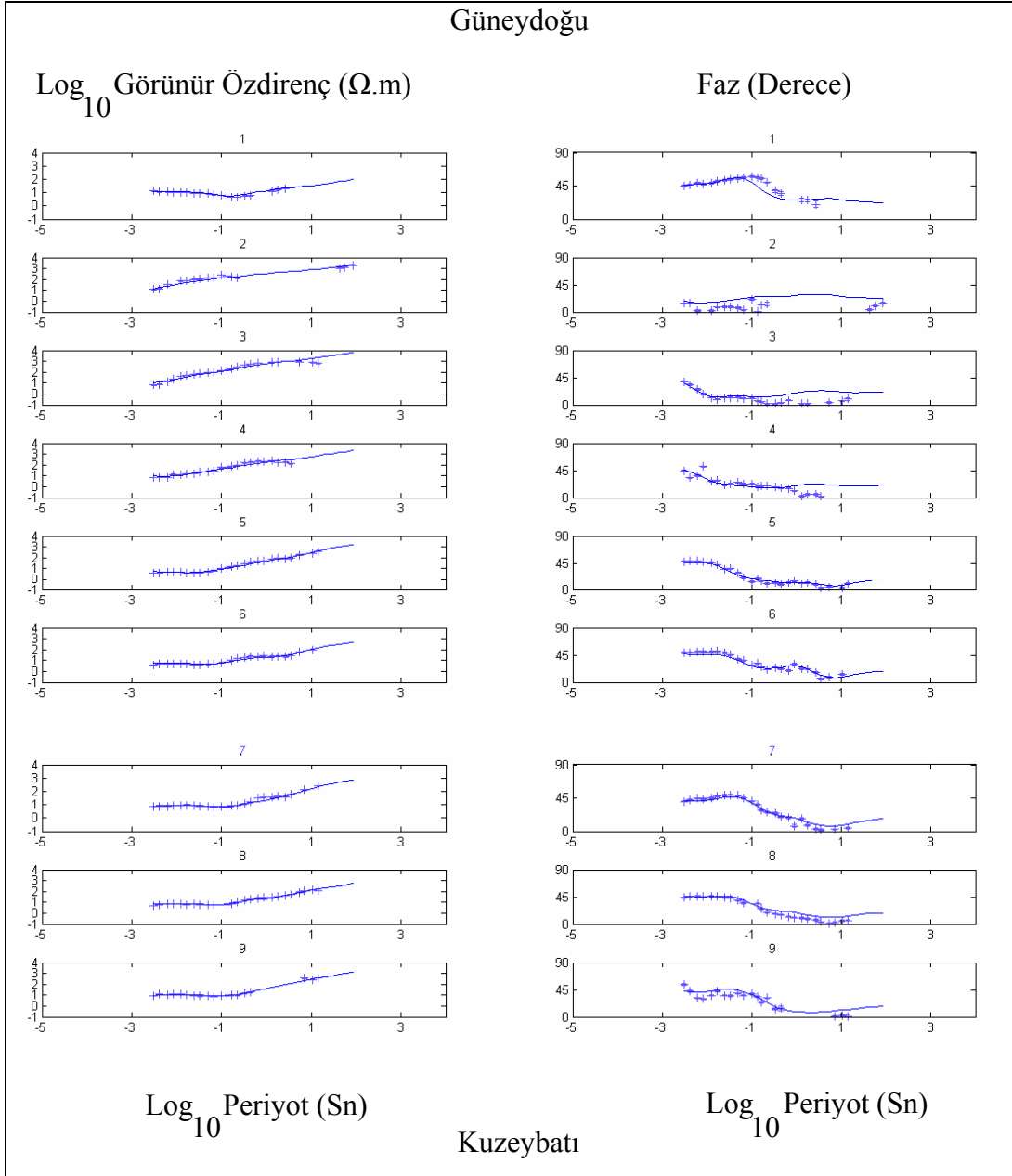
Şekil 4.53: Bileşik durum ikinci ters çözüm modelinde, B-Pol durumuna ait ölçümler (artılar) ve Şekil 4.49’da görülen başlangıç modeliyle gerçekleştirilen ters çözümü sonucunda hesaplanan değerlerin (düz çizgiler) her istasyon için, log.periyota karşı grafiği (sağ sütun görünür özdirençleri, sol sütun fazları içermektedir)



Şekil 4.54: Bileşik durum için Şekil 4.49’da görülen başlangıç modeliyle gerçekleştirilen ters çözümü sonucunda elde edilen modelin E-Pol durumuna ait ölçülen (altta) ve hesaplanan (üstte) görünür öz dirençlerin, log.frekans karşı grafiği



Şekil 4.55: Bileşik durum Şekil 4.49’da görülen başlangıç modeliyle gerçekleştirilen ters çözümü sonucunda elde edilen modelin E-Pol durumuna ait ölçülen (altta) ve hesaplanan (üstte) fazların, log.frekans karşı grafiği



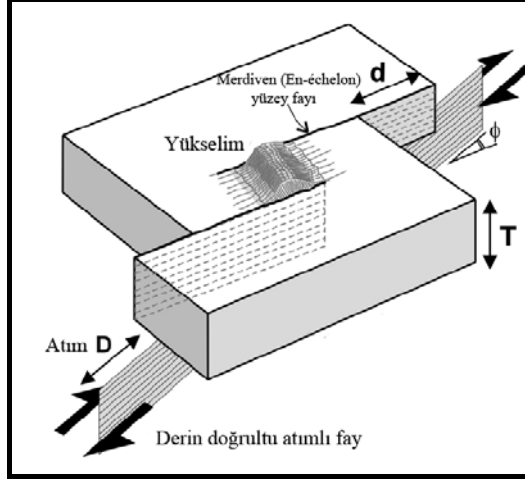
Şekil 4.56: Bileşik durum için ikinci ters çözüm modelinde, E-Pol durumuna ait ölçümler (artılar) ve Şekil 4.49'da görülen başlangıç modeliyle gerçekleştirilen ters çözümü sonucunda hesaplanan değerlerin (düz çizgiler) her istasyon için, log.periyota karşı grafiği (sağ sütun görünür öz dirençleri, sol sütun fazları içermektedir)

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Çalışma çerçevesinde, Çatalca ve civarındaki yapıların incelenmesi için 9 istasyonluk, yaklaşık 30 km uzunluğunda bir profil üzerinde Manyetotelürük (MT) yöntemle ölçüler alınmıştır. Bu ölçümlerden yerel jeolojik doğrultular (Bölüm 4.3.) ve ters çözüm işlemleriyle, yeraltına ait öz direnç kesitleri elde edilmiştir (Bölüm 4.4.). Bu bölümde, elde edilen veriler irdelenip sonuçlar listelenecektir.

- Öncelikle yapı doğrultusunu veren bazı denemelerin sonuçlarından söz etmek yerinde olacaktır. Dört yöntemle elde edilen açıların (Şekil 4.7), özellikle Çok istasyon-Çok frekans yöntemiyle (Şekil 4.7-d) elde edilen doğrultu açısının (K26B) olduğu tespit edilmiştir. Bu tespit ettiğimiz açıya göre jeolojik yapı doğrultusu, Çatalca Fayı ile aynı doğrultudadır. Ölçme hattı boyunca bütün istasyonlar ve frekanslar için ortalama belirlenen doğrultu açısının (K26B) bölgedeki en önemli yapı olan Çatalca Fayı'nın doğrultusunda olması, Çatalca Fayı dışında bölgesel jeolojinin oldukça sade olduğunun bir işaretidir. MT verinin (Şekil 4.2, Şekil 4.3) ve üzerindeki işlemler sonrası elde edilen görüntülerin (Şekil 4.21, Şekil 4.32, Şekil 4.50) de bu sadeliği ifade ettikleri izlenmiştir. Ancak tüm verilerin fay civarında gösterdiği düzensizliklerin bir benzeri, farklı istasyon ve farklı frekans için yapılan doğrultu açısı incelemelerinde de ortaya çıkmaktadır. Tek istasyon-Tek frekans açı incelemeleri (Şekil 4.7-a), elde edilen jeolojik doğrultu açılarının Çatalca Fayı'na yakın istasyonlarda derine indikçe saat yönünde dönmeye başladığını göstermektedir. Bu istasyonlar için dönmenin miktarı 1000 Hz'den 1 Hz'e kadar olan frekans aralığı için yaklaşık ortalama saat yönünde $\sim 25^\circ$ 'dir (ortalama $\sim K40^\circ B$ 'dan $\sim K15^\circ B$ 'ya). 1 Hz'den sonra ise dönme yön değiştirerek saat yönünün tersinde gerçekleşmektedir. Bu değişim, 1-0.1 Hz aralığında ortalama olarak yaklaşık saat yönünün tersine $\sim 35^\circ$ ve 1-0.001 Hz aralığında $\sim 30^\circ$ olarak gözlenmektedir. Bu durum faylanma etkisiyle kayaç özelliklerinde oluşan değişimlerden kaynaklanan yön bağımlılık (anizotropi) etkisine bağlı olarak gerçekleşmiş olabilir. Yüzeyde ve yüzeye yakın bölgelerde yaklaşık KB-GD yönündeki hakim jeolojik yapı doğrultusu, derinde yaklaşık olarak Doğu-Batı yönüne evrilmiş de olabilir. Durum, gerçekten jeolojik yapı doğrultu değişiminden kaynaklanıyorsa, aralı aşmalı fayların, daha derinde yer alan ana bir fayın denetimi ile, doğrultusu ana fayın atım yönüne ve miktarına göre farklılık

gösterecek biçimde oluştuğunu öne süren jeolojik varsayım (Angelier v.d., 2004) Çatalca Fayı için de geçerli olabilir.



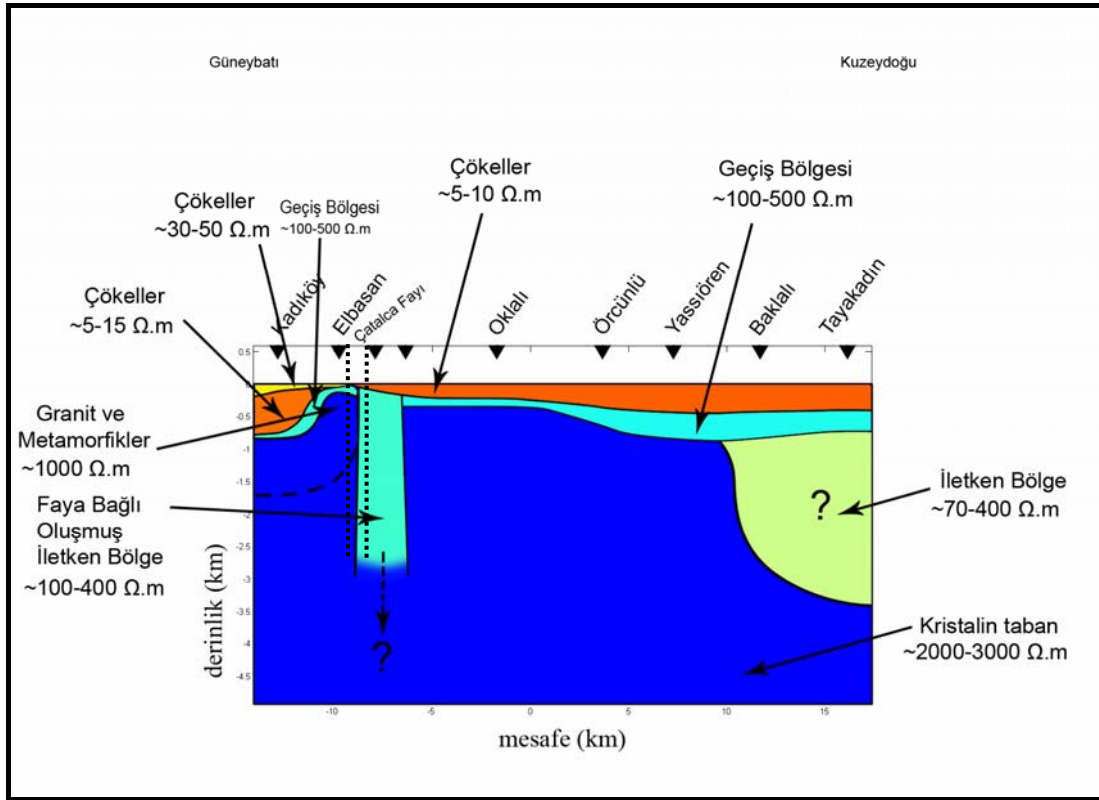
Şekil 5.1: Aralı aşmalı fay modeli (Angelier ve diğ. 2004)

Ancak bulunan açılardaki değişime neden olabilecek başka bir ihtimalden de söz etmek mümkündür. Bu derinlikte jeolojik farklılıkların yok olup ortamın daha homojen davranışlar göstermeye başlaması, bu gözlemin başka bir nedeni olabilir. Bu durumda herhangi bir açı veriyi iki boyutlu olarak sağlayacağı için programın işleyişi nedeniyle, bu açı değerleri, jeolojik yapıların altındaki derinliklere gittikçe Doğu-Batı ve Kuzey-Güney doğrultuya yakınsar nitelikte ortaya çıkmış olabilir. Dolayısıyla doğrultu açılarında düşük frekansla görünen değişim her zaman gerçek bir yapısal doğrultu açısını temsil etmiyor olabilir.

- Ters çözüm işlemleri sonucunda B-Pol, E-Pol ve Bileşik (E-Pol + B-Pol) durumlar için öz direnç derinlik yapı kesitlerine ulaşılmıştır.

Çalışmalarımızda ters çözüm için iki farklı tipte başlangıç modeli seçilmiştir. Seçilen ilk başlangıç modeli 100 $\Omega.m$ yarı sonsuz ortam (Şekil 4.7), ikinci başlangıç modeli ise aşağıda belirtilen nedenlerle, öz direnci derine doğru artan ve derine doğru yaklaşık yatay katmanlardan oluşan bir modeldir (Şekil 4.20, Şekil 4.31, Şekil 4.49).

Archie (1942) formülü ile gözeneklilik hesapları yapılırken deniz suyu öz direnci ($0.3 \Omega.m$) kullanılmış, genelde yuvarlak gözeneklere sahip çökel birimler için “m” sayısı (3.3), 1; yuvarlak gözeneklerden ziyade kırıklar içeren metamorfik ve kristalin birimler için 2 alınmıştır. Ancak Archie (1942) formülüyle elde edilen değerler yüzeye yakın bölgeler için daha doğruyken derinlerde artan basınç nedeniyle, gerçek gözeneklilik, formülden elde edilen değerlerden farklılık gösterecektir.



Şekil 5.2: Ters çözüm sonuçlarından elde edilen yeraltı modeli

i) E-Pol modeli için elde edilen ters çözüm kesiti, öz direnç değişimlerine karşı daha az duyarlı görünmektedir. Bunun nedeni, Ting ve Hohmann (1984) tarafından belirtildiği ve Şekil 3.7’de tanımlandığı gibi, jeolojik yapıların uzun ekseninin uzaması sonucunda E-Pol tepkisinin yapıya gittikçe duyarsızlaşması olmalıdır. Bir başka deyişle E-Pol tepkileri 2-B yapılara daha az duyarlıdır. Görünür öz direnç ve faz verilerinin andıran kesitlerinden de (Şekil 4.2, Şekil 4.3) görülebileceği gibi, ortam Çatalca Fayından uzak bölgelerde bir boyutluya yakın bir görünür öz direnç değişimi sunmaktadır. E-Pol modelleri (Şekil 4.25, Şekil 4.32) faydan uzak bölgelerdeki havzayı örten çökellerin kalınlığının belirlenmesinde yararlı olabilir. Ancak 2B düşey süreksizliklerin

görüntülenmesi için E-Pol modeli duyarsızdır. Bu durumda tartışmalarımız B-Pol ve bileşik durum modelleri (Şekil 4.10, Şekil 4.21, Şekil 4.36, Şekil 4.50) üzerine sürecektir.

ii) 100 $\Omega.m$ yarı sonsuz ortam (Şekil 4.7) için ters çözüm sonucu elde edilen B-Pol modelinde (Şekil 4.10) Çatalca Fayı açıkça belirmiş; bunun dışında, MT hattın merkezinde; Örcünlü istasyonu ve modelin en kuzeydoğusundaki Tayakadın istasyonunun altında, çökel örtü haricinde, daha derinde yer alan iletken yapılar belirlenmiştir. Bu iletkenler, yüzey jeolojisiyle denetlenmesi mümkün olmayan derinliklerdedir. Özellikle Örcünlü bölgesinde, Parkinson yöneylerinde (Şekil 4.4) ve görünür öz direnç andıran kesitlerinde (Şekil 4.2, Şekil 4.3) kuvvetli olmasa da bu iletkene karşılık gelebilecek belirtiler olmasına rağmen, bunların ters çözümün ürettiği yalancı yapılar olması olasılığı göz ardı edilmemiştir. Bu iletkenler teker teker yalıtkan ile kapatılarak yeni model tepkileri üretilmiş bu çalışma sonucunda Örcünlü istasyonunun altındaki iletkene, modelin duyarsız olduğu belirlenmiştir. Özellikle bileşik durum çözümlerinde (Şekil 4.36, Şekil 4.50) Örcünlü istasyonu altındaki iletkeninin belirmemiş olması da (bu bölgenin yalıtkan olarak elde edilmesi) bu sonucu desteklemekte ve bu iletkenin gerçekte var olmadığı görüşünü kuvvetlendirmektedir. Kesitte görülen iletkenlerin kapatılmasıyla elde edilen model tepkileri de göz önüne alınarak, iletkenlerin yer aldığı derinlikleri örtecek biçimde yalıtkan katmanların bulunduğu modeller üretilmiş ve bunlar başlangıç modeli olarak ters çözüme sunulmuştur (Şekil 4.20, Şekil 4.31, Şekil 4.49). Sonuçta ise Örcünlü istasyonu altındaki iletken bölge, B-Pol için ters çözümde de yalıtkan olarak elde edilmiştir.

iii) Öz direnç sınırları tanımlanmış başlangıç modeli (Şekil 4.20) için elde edilen B-pol ters çözüm model görüntüsünün (Şekil 4.21), hem 100 $\Omega.m$ yarı sonsuz ortam, hem de öz direnç sınırları tanımlanmış başlangıç modeli için elde edilen bileşik durum sonuç modellerine (Şekil 4.36, Şekil 4.50) çok benzer özellikte olduğu gözlenmiştir. Bu modeller arasında bir seçim yapmak, bu nedenle aslında büyük bir fark oluşturmaz ancak bileşik durum modelleri yerine öz direnç sınırları tanımlanmış başlangıç modeli (Şekil 4.20) için elde edilen B-Pol (Şekil 4.21) modelinin seçilmesi uygun görülmüştür. Bunun başlıca nedeni, çalışmamızın temelde bir fay araştırması olmasıdır. Bu nedenle düşey sınırları daha net belirlediği bilinen B-Pol sonuç modeli seçilmiş ve Şekil 5.2'deki yorum buna dayandırılmıştır

iv) Bulguları değerlendirecek olursak Şekil 1.1'deki Jeoloji haritası MT hattın Güney doğusunda daha fazla sayıda ve çeşitte birimin var olduğunu göstermekte ve bunlar arasındaki düşey sınırları tanımlamaktadır. MT modellerde de bu bölgede yüzeye yakın bölgelerde daha detaylı ve farklı öz direnç bölgeleri jeoloji ile örtüşecek biçimde belirmiştir.

v) Hem bileşik durum hem de B-Pol tepkileri, ters çözüme ister $100 \Omega.m$ yarı sonsuz ortamla, ister önceden öz direnç sınırları tanımlanmış başlangıç modeli ile başlayalım, Tayakadın istasyonunun altında 0.8-3.3 km arasındaki derinliklerde bir iletken sınırının varlığını ortaya koymuştur (Şekil 4.10, Şekil 4.21, Şekil 4.32, Şekil 4.50). Model duyarlılık denemelerimiz de Tayakadın istasyonu altındaki iletkene modelimizin görece olarak duyarlı olduğunu ortaya koymuştur. Bu birime Archie (1942) formülünü uygulayacak olursak birimin gözenekliliğini (porozitesini) yaklaşık %10 olarak elde ederiz.

vi) Elde edilen kesit boyunca iletken çökel katmanlar altında, yalıtkan ve kristalin taban ($\sim 1000-3000 \Omega.m$) yer almaktadır. Bölgedeki Tersiyer çökeller altında yer alan bu kristalin taban Çağlayan ve diğ. (1988) ile Turgut ve Eseller (2000) tarafından da tarif edilmiştir. Archie (1942) kanununa göre bu birimin gözeneklilik değeri %0.1 e yakın olmalıdır.

vii) MT Kesitin Çatalca Fayı'nın kuzeydoğusunda (Çatalca Fayı-Tayakadın arasında), 700 metreye kadar inen, yüksek iletkenlik değerlerine sahip ($\sim 5-10 \Omega.m$) çökel kalınlığı gözlenmiştir. Bu birimin gözenekliliği Archie (1942) kanunundan yaklaşık olarak %30 olarak elde edilmiştir.

viii) Çatalca Fayı'nın güneybatısında ise çökellerin iletkenlik değerlerinde farklılıklar gözlenmiştir. Bu bölgede üst üste gelmiş farklı iletkenlik değerine sahip iki çökel katmanı gözlenmektedir. Üstte kalan birim yaklaşık $\sim 30-50 \Omega.m$ iletkenliğiyle fayın kuzeydoğusundaki çökel birimlerinden daha yalıtıcıdır ve gözenekliliği (porozitesi), Archie (1942) kanununa göre yaklaşık %8'dir. Bunun sebebi, bu bölgede yüzeyi kaplayan nispeten geçirimsizliği düşük birimlerin (MTA,2004), suyun, kendi içine

nüfuzuna izin vermeyerek sığ derinliklerde iletkenlik değerlerinin düşmesine izin vermemesi olabilir. Bu düşük iletkenliğe sahip çökellerin altında daha yüksek iletkenlik değerlerine sahip ($\sim 5\text{-}15 \Omega\cdot\text{m}$) ve Archie (1942) kanununa göre yaklaşık %22 gözeneklilik değerine sahip ikinci bir çökel birimi mevcuttur. Aniden derinleşen bu çökel birimin, Elbasan ile Kadıköy arasında bir faya bağlı geliştiği düşünülmüştür. Doust ve Arıkan (1974) ile Kasar ve Okay (1994) çalışmalarında bu bölge civarında taban metamorfiklerinin birkaç kilometre derinde yer aldığını öne sürmüştür. Çatalca Fayı'nın güneybatısında çökel birimlerin çalışma alanı içinde yer alan bölümü yaklaşık 800 m derinliğe kadar inmektedir ve muhtemelen profilin daha batısında derinliği artmaya devam etmektedir.

ix) Çatalca Fayı'nın altında ve batısında gözlenen yüksek öz dirençli ($\sim 1000 \Omega\cdot\text{m}$) bölge, yüzeyde de kendini gösteren granitik ve metamorfik birimleri temsil etmektedir. Archie (1942) kanununa göre bu birimin gözeneklilik değeri %5 e yakın olmalıdır.

x) Çatalca Fayı'na komşu çevre birimlerine göre yüksek iletkenlikli ($100 \Omega\cdot\text{m}$) dar ve derin bir iletken bölge, kendini Çatalca Fayı'nın altında derine doğru göstermektedir. Faylar, pek çok zaman, civarındaki birimlerde kırıklara ve breşleşmeye neden oldukları için bu bölgelere nüfuz eden su miktarını arttırırlar ve fay bölgeleri çevresinde iletken yapılar meydana getirirler (Unsworth ve diğ., 1997). Bu iletken bölge Çatalca Fayı'nın etkisiyle artan su miktarı sonucunda meydana gelmiş bir iletken görünümündedir. Veri eksikliği ve çözünürlüğün düşük olması nedeniyle bu bölgenin yanal sınırları tam elde edilememiş, bu bölge muhtemelen olduğundan daha geniş alana yayılmış olarak kesitlere yansımıştır. Bu kırıklı birimin gözeneklilik (porozite) değeri ise Archie (1942) kanunundan yaklaşık %13 olarak elde edilmiştir.

xi) Çalışma alanı içinde, Çatalca Fayı doğusunda yer aldığı düşünülen (Okay ve diğ., 1994) Batı Karadeniz Fayı'na (BKF) ilişkin başka belirtiler olup olmadığı profil kuzeydoğuya doğru uzatılarak izlenmelidir. Ancak Yassıören, Baklalı arasında yer alan düşey iletken yalıtkan sınırı bu bakımdan ilgi çekicidir. Bu bölge, olası bir suture izlerini taşıyor olabilir.

xii) Profilin en batısında çökel kalınlığının ani yükselimini sağlayan bir fayın, profilin en doğusunda ise bir suture sınırının varlığından bahsedilebilir. Bu bölgelerin daha net ortaya çıkarılabilmesi için iki yönde de profil uzatılarak daha sık istasyon aralıklarıyla ölçüler alınmalıdır. Ayrıca yine önemli bir yapı olan Çatalca Fayı'nın ve bu fayın etkisiyle oluşan diğer özdirenç değişimlerinin daha net izlenebilmesi için bu bölge civarındaki istasyon aralıklarının ve veri kalitesinin artırılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- AKAIKE, H., 1980: Likelihood and Bayes procedure, in Bernardo, J. M., deGroot, M.H., Lindley, D. V., and Smith, A. F. ed., *Bayesian statistics*, University Press, Valencia, Spain, 143-166
- ANGELIER, J., BERGERAT, F., BELLOU, M., 2004 Co-seismic strike-slip fault displacement determined from push-up structures: the Selsund Fault case, South Iceland, *Journal of Structural Geology* 26 (4): 709-724 2004
- ARCHIE, G.E., 1942, The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers*, 146, 54–62
- BAHR K. 1998, Interpretation of the magnetotelluric impedance tensor: Regional induction and local telluric distortion. *Journal of Geophysics*, 62:119–127.
- BAŞOKUR A.T., 2005, *Doğrusal ve doğrusal olmayan problemlerin ters-çözümü*, TMMOB Jeofizik Mühendisleri Odası Eğitim Yayınları, No.4, Kızılay, Ankara, ISBN: 975-395-505-7
- BERDICHEVSKY, M.N., 1999. Marginal notes on magnetotellurics. *Surv. Geophys.* 20, 341–375
- CAGNIARD, L., 1953, Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting, *Geophysics*, 18, 605-635
- CALDWELL, T.G., BIBBY, H.M., BROWN, C., 2004. The magnetotelluric phase tensor, *Geophys. J. Int.*, 158, 457–469
- CHAVE, A. D., SMITH, T. J., 1994, On electric and magnetic galvanic distortion tensor decompositions, *J. Geophys. Res.*, 99, 4669–4682
- CONSTABLE, S. C., PARKER, R. L., CONSTABLE, C. G., 1987, Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from EM sounding data: *Geophysics*, 52, 289–300
- ÇAĞLAYAN, A.M., ŞENGÜN, M., YURTSEVER, A., 1988, Main Fault Systems Shaping the Istranca Masif, Turkey, *J. Pure. App. Sci, Ser A. Geosci*, 21 145-154
- DACHEV H.R., 1988, Structure of the Earth's crust in Bulgaria. *Technika, Sofia* ,p. 334 In Bulgarian
- DE GROOT-HEDLIN, C., CONSTABLE, S., 1990, Occam's inversion to generate smooth two-dimensional models from magnetotelluric data, *Geophysics*, 55, 1613-1624

- DOUST, H., ARIKAN, Y., 1974, The geology of the Thrace Basin, *Proc 2nd, Petroleum Congress of Turkey*, pp. 227-248
- ELMAS, A., YIĞITBAŞ, E., 2001, Ophiolite emplacement by strike-slip tectonics between the Pontide Zone and the Sakarya Zone in northwestern Anatolia, Turkey, *International Journal of Earth Sciences*, v. 90, no. 2, p. 257-269
- GAMBLE, T.D., GOUBAU, W.M., CLARKE, J., 1979, Magnetotellurics with a remote magnetic reference, *Geophysics*, v. 44, no. 1, p. 53-68
- GOLDSTEIN, M.A., 1979, STRANGWAY, D.W.; Audio frequency magnetotellurics with a grounded electric dipole source, *Geophysics*, v.40, no. 4, p 669-683
- GÖKAŞAN, E., GAZIOĞLU, C., ALPAR, B., YÜCEL, Z.Y., ERSOY, Ş., GÜNDOĞDU, O., YALTIRAK, C., TOK, B., 2002, Evidence of NW extension of the North Anatolian Fault Zone in the Marmara Sea; a new interpretation of the Marmara Sea (İzmit) earthquake on 17 August 1999, *Geo-Marine Letters*, 21, 183-199
- GRIFFITHS, D. J., 1998. *Introduction to Electrodynamics*. Prentice-Hall International (UK) Limited, London, ISBN. 0-13-805326-X, 576 pp
- GROOM, R.W., BAILEY, R.C., 1989. Decomposition of magnetotelluric impedance tensor in the presence of local three-dimensional galvanic distortion. *J. geophys. Res.* 1321913–1925
- GÖRÜR, N., TÜYSÜZ, O., 1997, Petroleum geology of the southern continental margin of the Black Sea, *Regional and petroleum geology of the Black Sea and surrounding region: AAPG Memoir 68*, p. 241-254
- GÜRER A., 1995, “Manyetotellürik tepkilerdeki topoğrafik etkilerin düzeltilmesi ve Batı Anadolu verilerine uygulanması”, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- HYNDMAN, R.D., SHEARER, P.M.; 1988, Water in the lower continental crust: modeling magnetotelluric and seismic reflection results, *J. Geophys. Int.* 98, 343-365
- JIRACEK, G.R., HAAK, V., OLSEN, K.H. 1995. Practical magnetotellurics in a continental rift environment. In: Continental Rifts: Evolution, Structure, Tectonics. *Developments in Geotectonics* No. 25. Elsevier Science Publishing Co.
- JONES, A.G., 1992, Electrical conductivity of the continental lower crust, in Continental Lower Crust, *Developments in Geotectonics* 23, pp. 81-144, Elsevier

- JONES, A. G., GROOM, R. G., 1993, Strike angle determination from the magnetotelluric impedance tensor in the presence of noise and local distortion: Rotate at your peril!: *Geophys. J. Internat.*, 113, 524–534
- JACKSON, J. D., 1962, *Classical Electrodynamics*, John Wiley and Sons, New York, ISBN: 0471431311
- KASAR, S. ve OKAY, A.I., 1992, Silivri-Kıyıköy-İstanbul Boğazı arasındaki alanın jeolojisi, *TPAO Arama Grubu Raporu*, No. 3119
- KAUFMANN, A., KELLER, G. V., 1981, *The Magnetotelluric Sounding Method*, Elsevier-Amsterdam, Oxford-New York, 591 pp.
- KLEIN, J., LAJOIE, J., 1980, Electromagnetic Prospecting for Minerals, *Practical Geophysics for the Exploration Geologist*, Northwest Mining Association, Spokane, WA, pp 239-290
- KORAL, H., 1998, Progressive Mid-Tertiary Geometry of a Major Crustal Fault in the Southeastern Strandjha Masif, *12th International Petroleum Congress and Exhibition of Turkey*, pg 15-30
- McNEICE, G.W., JONES A.G., 2001, Multisite, multifrequency tensor decomposition of magnetotelluric data. *Geophysics*, 66, 158-173
- MTA, 2004; İstanbul Metropolü Batısındaki (Küçükçekmece-Silivri-Çatalca Yöresi) Kentsel Gelişme Alanlarının Yer Bilim Verileri, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, ISBN: 975-6595-89-2
- NABIGHIAN, M. S. ed., 1987; *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*; Vol 1-Theory; Society of Exploration Geophysics; Tulsa-Oklahoma. ISBN: 0931830-46-x (Series 1); 0-931830-51-6 (Volume 3)
- NIKISHIN, A., KOROTAEV M., ERSHOV A., BRUNET M., 2003, “The Black Sea Basin: Tectonic History and Neogene–Quaternary Rapid Subsidence Modeling,” *Sedimentary Geol.* 156, 149–168
- OGAWA, Y., 2002, On Two-Dimensional Inversion of Magnetotelluric Data, *Surveys in Geophysics*, Volume 23, Numbers 2-3, March 2002 , pp. 251-273(23)
- OGAWA, Y., UCHIDA, T., 1996, A two-dimensional magnetotelluric inversion assuming Gaussian static shift, *Geophys. J. Int.*, 126, 69–76
- OKAY, A.I., ŞENGÖR, A.M.C., GÖRÜR, N., 1994, Kinematic history of the opening of the Black Sea and its effect on the surrounding regions: *Geology*, v.22, p. 267-270
- PHOENIX GEOPHYSICS, 2005, *V5 System 2000 MTU/MTU-A User Guide*

- RITTER, O., HOFFMANN-ROTHER, A., BEDROSIAN, P. A., WECKMANN, U., HAAK, V., 2005, Electrical conductivity images of active and fossil fault zones, High Strain Zones: Structure and Physical Properties, *The Geological Society*, 165-186
- SIMPSON, F., BAHR, K., 2005. *Practical Magnetotellurics*. Cambridge University Press, Cambridge, 254 pp.; ISBN: 0521 81727 7
- SWIFT, C., 1967, *A magnetotelluric investigation of an electrical conductivity anomaly in the southwestern United States*. PhD thesis, M.I.T. Cambridge, MA.
- TIKHONOV, A.N., 1950. On determining electrical characteristics of the deep layers of the Earth's crust, *Doklady*, 73, 295–297
- TING, S.C., HOHMANN G.W., 1981, Integral equation modelling of three-dimensional magnetotelluric response. *Geophysics* 46 (1981), pp. 182–197
- TURGUT, S., ESELLER, G., 2000, Sequence stratigraphy, tectonics and depositional history in eastern Thrace Basin, NW Turkey, *Marine and Petroleum Geology*, 61-100
- UCHIDA, T., 1993, Smooth 2-D inversion for magnetotelluric data based on statistical criterion ABIC: *Journal of Geomagnetism and Geo-electricity*, 45, 841–858
- UNSWORTH, M.J., MALIN, P.E., EGBERT, G.D., BOOKER, J.R., 1997, Internal Structure of the San Andreas fault at Parkfield, California, *Geology*, 25, 359-362
- YALTIRAK, C., 2002, Tectonic Evolution of the Marmara Sea and its Surroundings. *Mar. Geol.* 190, 1/2, 493-530(SCI)
- VOZOFF, K., 1972, The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins, *Geophysics*, 37, No.1, p. 98-141
- VOZOFF, K., 1991, The Magnetotelluric Method, Chapter 8, in Nabighian, M.N., ed., *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, v. 2; Application, Parts A and B, *Society of Exploration Geophysicists, Investigations in Geophysics* No. 3, p. 641-712
- YILMAZ, Y., TÜYSÜZ, O., YİĞİTBAŞ, E., GENÇ, Ş.C., ŞENGÖR, A.M.C., 1997, Geology and tectonic evolution of the Pontides, Regional and petroleum geology of the Black Sea and surrounding region *AMER. ASSOC. PETR. GEOL. MEMOIR* 68, p.183-226

EKLER

EK A. ELEKTROMANYETİK DALGA DENKLEMİNİN ELDE EDİLMESİ

Elektromanyetik teori Maxwell'in elektrik ve manyetik olayları tarif eden Gauss, Ampere ve Faraday'ın ortaya koyduğu kanunları bir araya getirmesiyle ortaya çıkmıştır.

Maxwell denklemleri:

1)Faraday yasası

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{d\mathbf{B}}{dt}$$

2) Ampere yasasının geliştirilmiş hali

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \varepsilon \frac{d\mathbf{E}}{dt}$$

3a ve 3b) Gauss yasası

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho'}{\varepsilon}$$

Birinci denklem (1) zamanla değişen manyetik alanın elektrik alan meydana getireceğini, ikinci denklem (2) ise zamanla değişen elektrik alanın da manyetik alan meydana getireceğini gösterir. Üçüncü denklem (3a) manyetik alanın kaynaksız bir alan olduğunu gösterirken dördüncü denklem (3b) elektrik alanın kaynağının yük olduğunu ve büyüklüğünün ortamın dielektrik katsayısına bağlı olduğunu ortaya koyar.

Bunlardan yola çıkarak elektromanyetik dalga denklemi aşağıdaki gibi çıkarılabilir;

a) Elektrik alan için dalga denklemi:

Elektrik ve manyetik alanlar için dalga denklemleri bu alanların laplasyeni ifadesiyle gösterilir ve hesaplanır. Öncelikle Maxwell denklemlerinden yola çıkarak elektrik alanın rotasyonelinin rotasyonelini hesaplırsak;

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = \nabla \times \left(-\frac{d\mathbf{B}}{dt} \right)$$

Yöney (vektör) cebirine göre rotasyonelin rotasyoneli ifadesi;

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = -\nabla^2 \mathbf{A}$$

dir. Bu nedenle

$$-\nabla^2 \mathbf{E} = -\frac{d}{dt} (\nabla \times \mathbf{B})$$

olur. $\nabla \times \mathbf{B}$ ifadesinin yerine Ampere yasası konursa

$$-\nabla^2 \mathbf{E} = -\frac{d}{dt} \left(\mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon \frac{d\mathbf{E}}{dt} \right)$$

elde edilir.

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

olduğundan

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \frac{d}{dt} \left(\mu_0 \sigma \mathbf{E} + \mu_0 \epsilon \frac{d\mathbf{E}}{dt} \right)$$

olur. Böylelikle elektrik alan için dalga denklemi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu_0 \sigma \frac{d\mathbf{E}}{dt} + \mu_0 \epsilon \frac{d^2 \mathbf{E}}{dt^2}$$

b) Manyetik alan için dalga denklemi

Elektrik alan için gerçekleştirdiğimiz işlemlerin aynılarını manyetik alan için tekrarlırsak;

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{B}) = \nabla \times \left(\mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \varepsilon \frac{d\mathbf{E}}{dt} \right)$$

$$-\nabla^2 \mathbf{B} = \nabla \times \left(\mu_0 \sigma \mathbf{E} + \mu_0 \varepsilon \frac{d\mathbf{E}}{dt} \right)$$

$$-\nabla^2 \mathbf{B} = \mu_0 \sigma \nabla \times \mathbf{E} + \mu_0 \varepsilon \frac{d}{dt} \nabla \times \mathbf{E}$$

$\nabla \times \mathbf{E}$ ifadesi yerine Faraday yasası konulursa;

$$-\nabla^2 \mathbf{B} = \mu_0 \sigma \left(-\frac{d\mathbf{B}}{dt} \right) + \mu_0 \varepsilon \frac{d}{dt} \left(-\frac{d\mathbf{B}}{dt} \right)$$

elde edilir. Böylelikle manyetik alan için dalga denklemi de aşağıdaki gibi çıkarılmış olunur.

$$\nabla^2 \mathbf{B} = \mu_0 \sigma \frac{d\mathbf{B}}{dt} + \mu_0 \varepsilon \frac{d^2 \mathbf{B}}{dt^2}$$

EK B. MAXWELL DENKLEMLERİNDE B-POL VE E-POL DURUM AYRIMI

Maxwell denklemleri önceki bölümde gösterilenden farklı olarak aşağıdaki gibi de gösterilebilir;

$$\text{Faraday yasası: } \nabla \times \mathbf{E} = i\omega\mu\mathbf{H}$$

$$\text{Ampere yasası: } \nabla \times \mathbf{H} = \sigma\mathbf{E}$$

$$\text{Gauss yasası: } \nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad \text{ve} \quad \nabla \cdot \mathbf{H} = 0$$

İlk denklem olan $\mathbf{E}$ 'nin rotasyoneli ifadesini dizey (matris) şeklinde yazarsak;

$$i\omega\mu\mathbf{H} = \begin{bmatrix} i & j & k \\ \frac{d}{dx} & \frac{d}{dy} & \frac{d}{dz} \\ \mathbf{E}_x & \mathbf{E}_y & \mathbf{E}_z \end{bmatrix} = i \frac{d}{dy} \mathbf{E}_z + k \frac{d}{dx} \mathbf{E}_y + j \frac{d}{dz} \mathbf{E}_x - k \frac{d}{dy} \mathbf{E}_x - i \frac{d}{dz} \mathbf{E}_y - j \frac{d}{dx} \mathbf{E}_z$$

elde ederiz. Bunu düzenlediğimizde ise aşağıdaki görünümü alır;

$$= \underbrace{i \left(\frac{d\mathbf{E}_z}{dy} - \frac{d\mathbf{E}_y}{dz} \right)}_{i\omega\mu\mathbf{H}_x} + \underbrace{j \left(\frac{d\mathbf{E}_x}{dz} - \frac{d\mathbf{E}_z}{dx} \right)}_{i\omega\mu\mathbf{H}_y} + \underbrace{k \left(\frac{d\mathbf{E}_y}{dx} - \frac{d\mathbf{E}_x}{dy} \right)}_{i\omega\mu\mathbf{H}_z}$$

Yukarıdaki ifadede geçen terimler sırası ile x,y ve z elektrik alan bileşenlerine karşılık gelmektedir,

$$i\omega\mu\mathbf{H}_x = \frac{d\mathbf{E}_z}{dy} - \frac{d\mathbf{E}_y}{dz}$$

$$i\omega\mu\mathbf{H}_y = \frac{d\mathbf{E}_x}{dz} - \frac{d\mathbf{E}_z}{dx}$$

$$i\omega\mu\mathbf{H}_z = \frac{d\mathbf{E}_y}{dx} - \frac{d\mathbf{E}_x}{dy}$$

Benzer şekilde bir işlemi ikinci denklem olan $\mathbf{H}$ 'nin rotasyoneli için yapsaydık yine benzer bir sonuç elde edecektik;

$$\sigma \mathbf{E}_x = \frac{d\mathbf{H}_z}{dy} - \frac{d\mathbf{H}_y}{dz}$$

$$\sigma \mathbf{E}_y = \frac{d\mathbf{H}_x}{dz} - \frac{d\mathbf{H}_z}{dx}$$

$$\sigma \mathbf{E}_z = \frac{d\mathbf{H}_y}{dx} - \frac{d\mathbf{H}_x}{dy}$$

Önceki bölümlerde değinildiği gibi B-Pol ve E-Pol durumlarının içeriği farklıdır; B-Pol durumu $\mathbf{H}_y$, $\mathbf{E}_x$ ve $\mathbf{E}_z$ alan bileşenlerini kapsar, E-Pol durumu ise $\mathbf{E}_y$, $\mathbf{H}_x$ ve $\mathbf{H}_z$ alan bileşenlerini kapsar. Bu nedenle denklemde olan farklı bileşenler varsa denklemden çıkarılmalıdır, çünkü 0'a eşittirler. Bu işlemleri de gerçekleştirdikten sonra B-Pol durumu ve E-Pol durumu bileşenlerine göre elde edilen denklemler birbirinden ayrılırsa, E Kutuplanması (E-Pol) durumu için Maxwell denklemleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\sigma \mathbf{E}_x = \frac{d\mathbf{H}_z}{dy} - \frac{d\mathbf{H}_y}{dz}$$

$$i\omega\mu\mathbf{H}_y = \frac{d\mathbf{E}_x}{dz}$$

$$\sigma \mathbf{E}_z = -\frac{d\mathbf{H}_x}{dy}$$

B Kutuplanması (B-Pol) durumu için Maxwell denklemleri ise aşağıdaki gibi elde edilir;

$$i\omega\mu\mathbf{H}_x = \frac{d\mathbf{E}_z}{dy} - \frac{d\mathbf{E}_y}{dz}$$

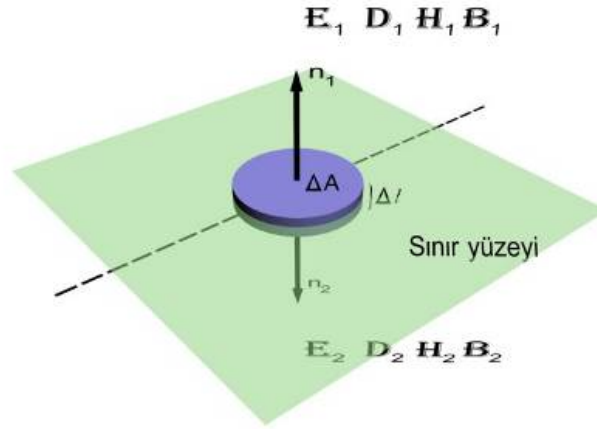
$$\sigma \mathbf{E}_y = \frac{d\mathbf{H}_x}{dz}$$

$$i\omega\mu\mathbf{H}_z = -\frac{d\mathbf{E}_x}{dy}$$

EK C. ELEKTROMANYETİK SINIR ŞARTLARININ BELİRLENMESİ

$\mathbf{H}_1$ ve $\mathbf{H}_2$ sınırın iki yanındaki manyetik alan, $\mathbf{B}_1$ ve $\mathbf{B}_2$ sınırın iki yanındaki manyetik akı değerleridir. Ayrıca sınırın iki yanındaki elektrik alanlar $\mathbf{E}_1$ ve $\mathbf{E}_2$, manyetik akılar ise $\mathbf{D}_1$ ve $\mathbf{D}_2$ sembolleri ile gösterilmektedir. Yüzey alanı ΔA , uzunluğu Δl , kalınlığı Δh olmak üzere bir Gauss kutusu (Gaussian pillbox) için normal ve teğetsel bileşenler aşağıdaki gibi verilebilir (Nabighian, 1987; Griffith, 1998 ve Jackson, 1962'den derlenmiştir).

a) Normal bileşenler:



Gauss kutusu için normal bileşenler (Nabighian, 1987'den yeniden çizildi)

i) Manyetik akının normal bileşenleri için:

Gauss yasasının integral formundan yola çıkarsak;

$$d(\mathbf{B}_1 \mathbf{n}_1 + \mathbf{B}_2 \mathbf{n}_2) \Delta A + \underbrace{\text{yanlardan kaynaklanan terim}}_{\approx 0} \approx 0$$

ΔA ifadesi 0'a yakınsarken,

$$(\mathbf{B}_1 \mathbf{n}_1 + \mathbf{B}_2 \mathbf{n}_2) = 0$$

elde edilir. Buna göre sınırın iki yanındaki manyetik alanların büyüklüğü eşit olmalıdır.

$$n_1 = -n_2 = n$$

$$n(\mathbf{B}_1 - \mathbf{B}_2) = 0$$

Bu son ifadeye göre, $\mathbf{B}$, gauss kutusunun iki tarafında normal bileşeni için aynı değere sahiptir yani süreklidir.

ii) Yer değiştirme akımlarının normal bileşeni için;

Yine Gauss kanununun integral biçimindeki ifadesinden yola çıkarak manyetik akı için yaptığımız işlemlerin aynısını yer değiştirme akımları için de gerçekleştirelim (Nabighian, 1987; Griffith, 1998 ve Jackson, 1962'den derlenmiştir);

Gauss kanununa göre yer değiştirme akımlarıyla yük arasındaki ilişki

$$\int_S \mathbf{D} da = \int_V q dv$$

şeklindedir. İntegrali açacak olursak,

$$\int_S \mathbf{D} da = \mathbf{D}_1 n \Delta a + \mathbf{D}_2 (-n) \Delta a = \mathbf{D}_1 n \Delta a - \mathbf{D}_2 n \Delta a$$

şeklindedir.

$$\mathbf{D}_1 n \Delta a - \mathbf{D}_2 n \Delta a = q \Delta a$$

olacaktır, dolayısıyla ifade, $q=0$ iken

$$\mathbf{D}_1 = \mathbf{D}_2$$

şeklindedir.

Buna göre, eğer yüzeyde hiç serbest yük yoksa yer değiştirme akımları süreklilik kazanır. Fakat yeraltında süreksizlikler ve bu süreksizlikler çevresinde yük yığılması meydana geldiğinden elektrik alanın normal bileşeni süreksiz olarak ele alınır.

Ayrıca ikinci ortam iletkense,

$$\mathbf{D}_2 = 0 \text{ ve } \mathbf{D}_1 - \mathbf{D}_2 = q$$

olduğundan

$$\mathbf{D}_1 = q$$

bulunur.

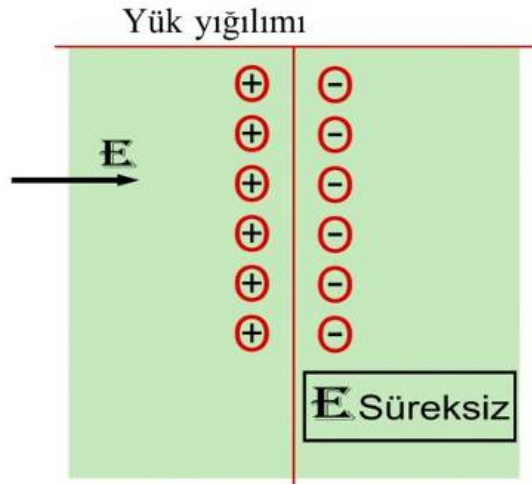
Birinci ortam serbest uzay ise

$$\mathbf{D}_1 = \mathbf{E}\epsilon_0$$

dır. Buradan da elektrik alanı çekilecek olursa;

$$\mathbf{E}_1 = \frac{q}{\epsilon_0}$$

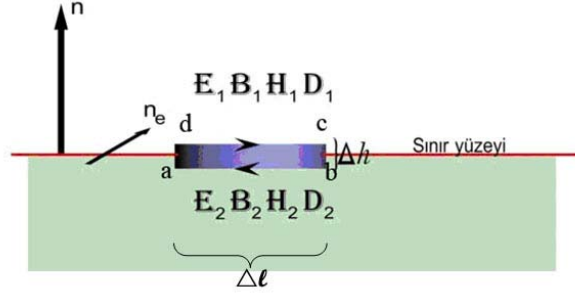
yani elektrik alanın kaynağının yük olduğunu gösteren ifade elde edilir.



Elektrik alanın normal bileşeni (Nabighian, 1987'den yeniden çizildi)

b) Teğetsel bileşenler:

(Nabighian, 1987; Griffith, 1998 ve Jackson, 1962'den derlenmiştir).



Gauss kutusu için teğetsel bileşenler (Nabighian, 1987'den yeniden çizildi)

i) Manyetik alanın teğetsel bileşenleri için;

Ampere kanunundan yola çıkılacak olursa,

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = \int_s \mathbf{J} d\mathbf{a} + \int_s \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} d\mathbf{a}$$

İntegralin ilk ifadesini açarsak;

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = \int_a^b \mathbf{H}_1 d\mathbf{l} + \int_c^d \mathbf{H}_2 d\mathbf{l} = \mathbf{H}_1 \Delta l + \mathbf{H}_2 (-\Delta l)$$

elde edilir. İntegralin diğer tarafındaki ifadelere bakarsak;

yer değiştirme akısı, $\int_s \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} d\mathbf{s}$; ve akım yoğunluğu, $\int_s \mathbf{J} d\mathbf{s}$, ifadeleri sifıra yakınsar.

Bu nedenle;

$$\mathbf{H}_1 \Delta l + \mathbf{H}_2 (-\Delta l) = 0$$

$$\mathbf{H}_1 = \mathbf{H}_2$$

bulunur. Yani manyetik alanın teğetsel bileşeni süreklidir.

ii) Elektrik alanın teğetsel bileşeni için

$\mathbf{E}$ alanı, korunan (konservatif) bir alan olduğu için,

$$\oint_C \mathbf{E} d\mathbf{l} = 0$$

geçerlidir. İntegrali açacak olursak;

$$\oint_C \mathbf{E} d\mathbf{l} = \mathbf{E}_1 \Delta l + \mathbf{E}_2 (-\Delta l)$$

$$\mathbf{E}_1 - \mathbf{E}_2 = 0$$

elde edilir. Bu ifadeye göre elektrik alanın teğetsel bileşenleri süreklidir.

ÖZGEÇMİŞ

Gökhan Karcıoğlu 1983 yılında İstanbul’da doğdu. Bakırköy Mustafa Necati İlkokulu ve Ataköy Medeni Berk İlkokulu’nda ilk eğitimini bitirerek, Ataköy Medeni Berk Ortaokulu’nda ortaokulu okudu ve Ataköy Cumhuriyet Lisesi’nde orta öğrenimi tamamladı. 2000-2001 öğretim yılında İstanbul Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Bölümüne girdi ve buradan 2004-2005 öğretim yılı bahar döneminin sonunda mezun oldu. 2005-2006 öğretim yılında İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü’nde Jeofizik Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda yüksek lisans eğitime başladı ve eğitimi devam ederken 2006 yılı sonunda İstanbul Üniversitesi’nde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı.