

FB

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

120 981

**SÖNÜMLÜ EN-KÜÇÜK KARELER VE EŞLENİK TÜREV
ALGORİTMALARININ ARDIŞIK KULLANIMI İLE
MANYETOTELLÜRİK VERİLERİN DÜZGÜNLEŞTİRİCİLİK
İKİ-BOYUTLU TERS ÇÖZÜMÜ**

120981

ÖZET

M. Emin CANDANSAYAR

JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

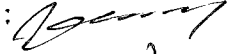
ANKARA

2002

Her hakkı saklıdır

Prof. Dr. Ahmet T. BAŞOKUR danışmanlığında, M. Emin CANDANSAYAR tarafından hazırlanan bu çalışma 13/ 06 / 2002 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı' nda Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Turan KAYIRAN

İmza : 

Prof. Dr. Ahmet T. BAŞOKUR

İmza : 

Prof. Dr. Faruk ÖZEK

İmza : F. Özek .

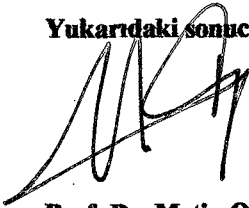
Prof. Dr. Fatma ERDOĞAN

İmza : 

Doç. Dr. Coşkun SARI

İmza : Coşkun Sarı

Yukarıdaki sonucu Onaylarım



Prof. Dr. Metin OLGUN

Enstitü Müdürü

ÖZET

Doktora Tezi

SÖNÜMLÜ EN-KÜÇÜK KARELER VE EŞLENİK TÜREV ALGORİTMALARININ ARDIŞIK KULLANIMI İLE MANYETOTELLÜRİK VERİLERİN DÜZGÜNLEŞTİRİCİLİ İKİ- BOYUTLU TERS ÇÖZÜMÜ.

M. Emin CANDANSAYAR

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ahmet T. BAŞOKUR

Yeriçinin üç-boyutlu incelenmesinde, günümüzde en çok Manyetotellürik (MT) verilerin 2-B ters çözümünü kullanılmaktadır. MT ters çözüm problemi kötü-tanımlıdır ve düzgünleştiricili yöntemlerle çözülür. Bu çalışmada, yeni bir 2-B MT ters çözüm algoritması geliştirilmiştir. Algoritmanın düz çözüm bölümünde sonlu-farklar tekniği kullanılmıştır. Genel dizey denkleminin çözümünde “sparse” dizey aritmetiğinden yararlanılmış ve bu dizey denklemini “alt-üst ayrışımı” yöntemi ile çözülmüştür.

Doğrusal olmayan ters çözüm problemlerinde başlıca iki düzgünleştiricili ters çözüm algoritması kullanılmaktadır. Bunlar, parametrik fonksiyonelin tekil değer ayrışımı ile en küçük-kareler (LS_SVD) çözüm algoritması ve eşlenik türev (CG) algoritmasıdır. Geliştirilen programda, her iki algortimada kullanılmıştır. Düzgünleştiricili ters çözümde birçok durağanlaştırıcı önerilmiştir. MT ters çözüm algortimalarında en çok kullanılanları; model parametrelerinin L2-norm’ u ve Laplacian’ ıdır (OCCAM ters çözümü).

L2-norm, OCCAM, “minimum support”, “minimum gradient support” ve “first-order minimum entropy” durağanlaştırıcıların birbirlerine göre kullanılabilirliği, geliştirilen programda LS_SVD ve CG algoritmaları ile incelenmiştir. Ayrıca, LS_SVD ve CG algoritmalarının çözüm güçleri de karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

2-B MT ters çözümde LS_SVD ve CG algoritmalarının ardarda kullanımı önerilmiş ve bu algoritma LSSVD_CG olarak isimlendirilmiştir. Önerilen bu yeni algoritma ile Mackie et al. (1997)’ in NLCG isimli algoritmasının ters çözüm sonuçları karşılaştırılmıştır. LSSVD_CG algoritmasının, diğer

algoritmalarından daha iyi sonuç verdiği, ayrıca L2-norm ve “minimum support” durağanlaştırıcılarının diğerlerinden daha kullanışlı olduğu yapay ve arazi verileri kullanılarak gösterilmiştir.

Otomatik ağ düzenleyen yeni bir algoritma da geliştirilmiştir. Bu algoritma, model ağındaki blok sayısı ve boyutlarını hesaplamak için ölçülen görünür öz dirençleri ve etkin derinlik kavramını kullanmaktadır. Geliştirilen program, 2-B MT ters çözümü için kullanışlıdır.

2002, 132 sayfa

Anahtar Kelimeler :

İki-boyutlu düzgünleştiricili ters çözüm, Manyetotellürik, eşlenik türev, tekil değer ayrışımı, durağanlaştırıcı

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

REGULARIZED TWO-DIMENSIONAL INVERSION OF MAGNETOTELLURIC DATA BY SEQUENTIAL USE OF DAMPED LEAST-SQUARES AND CONJUGATE GRADIENT ALGORITHMS

M. Emin CANDANSAYAR

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Geophysical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ahmet T. BAŞOKUR

Two-dimensional (2-D) inversion can still lead to good magnetotelluric (MT) interpretation over three-dimensional geological settings. MT inverse problem is nonlinear and it is generally solved by using regularization methods. A new regularized 2-D MT inversion algorithm is developed. In this thesis, finite difference technique is used for the forward modeling while sparse matrix arithmetic is employed for solving the governing matrix equation which is solved by using LU decomposition.

Mainly two regularized inversion algorithms, least-squares solution of parametric functional with singular value decomposition (LS_SVD) and Conjugate Gradient (CG), are used in nonlinear inverse problems. The developed code uses both algorithms. The Jacobian matrix is calculated from the reciprocity theorem. A variety of stabilizers have been suggested for regularized inversions. In the literature, L2-norm and Laplacian of model parameters (OCCAM inversion) are used mainly in public domain MT inversion algorithms.

Usefulness of the stabilizers such as L2-norm, OCCAM, minimum support, minimum gradient support, first-order minimum entropy stabilizer, are examined by using the developed codes of LS_SVD and CG algorithms. In addition, the solution powers of these inversion algorithms are also compared in view of the solved model resolution.

Sequential use of LS_SVD and CG algorithm, named LSSVD_CG, is proposed for 2-D MT inversion. Inversion result of this new algorithm and

NLCG, written by Mackie et al. (1997) are also compared. Comparison with synthetic and field data results indicated that the algorithm, LSSVD_CG, gives better results than that from the other algorithms and it is found that L2-norm and minimum support stabilizer are superior to the other stabilizers.

A new automatic mesh design code is also developed. The algorithms use apparent resistivity and penetration depth concept for finding number of block and block dimensions of the model mesh. It is a versatile tool for the 2-D MT inversion code.

2002, 132 pages

Key Words : Two-dimensional regularized inversion, Magnetotelluric, conjugate gradient, singular value decomposition, stabilizer

TEŞEKKÜR

Başta, yüksek lisans tez danışmanlığımı da yapan, danışmanım Prof. Dr. Ahmet T. Başokur' a teşekkürlerimi sunarım. Kendisinden, sadece bu tez çalışmam konusunda değil, aynı zamanda bilimsel araştırma ve bilim adamı olma konusunda da çok şey öğrendim. Tez izleme komitemde bulunan değerli hocam Prof. Dr. Turan Kayıran, tez çalışmam sırasında takıldığım her konuda özellikle İngilizce terimlerin Türkçe karşılıklarını bulmamda çok yardımcı oldu. Kendisi, üniversite akademik hayatıma başladığımdan bu yana, bir bilim adamının ne kadar mütevazı ve düşünceli olabileceğini göstermiştir. Kendilerine teşekkürlerimi sunarım. Tez izleme komitemde bulunan Prof. Dr. Faruk Özek' e, değerli katkıları ve özellikle terim karmaşaları konusunda önerileri için teşekkür ederim. Ayrıca tez jürimde bulunan Prof. Dr. Fatma Erdoğan ve Doç. Dr. Coşkun Sarı' ya, yaptıkları olumlu eleştiri ve katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Dr. Emin U. Uluggergerli ile tezim hakkında yaptığımız tartışmalar, bu çalışmanın olgunlaşmasında çok etkili olmuştur. Bir doktora öğrencisi, bazı durumlarda umutsuzluğa ve moral bozukluğuna kapılabilir. Kendisi bu durumlarda her zaman yanımda olmuş ve beni dinlemiştir. Bölüm hocalarımdan sayın Doç. Dr. Altan Necioğlu, tez çalışmama odaklanmama ve çalışmalarımın bunaldığım anlarda yanımda olmuş ve moral vermiştir. Özellikle geç saatlere kadar çalıştığım günlerde, beni yalnız bırakmamış ve yol arkadaşım olmuştur. Cemal Kaya, Y. Lisans ve Doktora öğrenciliğim döneminde sürekli bilimsel konularda tartıştığım ve tecrübelerinden yararlandığım meslektaşımıdır. Hepsine çok teşekkür ederim. Ayrıca diğer mesai arkadaşlarımdan, bana tez çalışmam sırasında gösterdikleri hoşgörü için teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasında geliştirilen algoritmanın bir kısmı, Amerika' da, Utah Üniversitesi bünyesindeki CEMI (Consortium for Electromagnetic Modeling and Inversion) grubunda bulunduğum sırada yazılmıştır. Oradaki çalışmalarım sırasında değerli katkı ve önerilerinden dolayı Prof. M.S. Zhdanov ve Dr. N.G. Golubev' e teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak aileme, bana verdikleri manevi ve maddi destekleri için sonsuz teşekkür ederim.

M. Emin CANDANSAYAR
Ankara, Haziran 2002

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
SİMGELER DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. MANYETOTELLÜRİK YÖNTEMDE İKİ-BOYUTLU MODELLEME	4
2.1. Giriş	4
2.2. Temel Denklemler	7
2.3. Sonlu Farklar ile 2-B Modelleme	10
2.3.1. Çözüm bölgesinin tanımlanması ve sonlu farklar ağı' nın elde edilmesi	11
2.3.2. Sonlu farklar ile genel denklemlerin çözümü	13
2.3.2.a. TE-Modu için sonlu farklar denklemi	13
2.3.2.b. TM-Modu için sonlu farklar denklemi	15
2.3.3. Sınır koşulları	16
2.3.4. Genel düzey denkleminin elde edilmesi ve çözümü.....	17
2.3.5. Jeolojik doğrultuya dik alanların hesaplanması	20
2.4. Programın Test Edilmesi.....	21
2.5. Otomatik Ağ Tasarımı.....	23
2.5.1. Algoritma.....	29
2.6. Bölümün Sonuçları ve Tartışma.....	31
3. MANYETOTELLÜRİK VERİLERİN İKİ-BOYUTLU TERS ÇÖZÜMÜ	33
3.1. Giriş.....	33
3.2. Ters Çözüm.....	35
3.2.1. Sönümlü en küçük kareler yöntemi.....	37
3.2.2. Yuvarlatılmış en-küçük kareler (YEKK).....	39
3.2.3. Tikhonov Düzgünleyicisi.....	41
3.3. Ters Çözüm Algoritmalarının Genel Gösterimi	42
3.4. Ağırlıklı Ters Çözüm.....	43
3.5. Farklı Durağanlaştırıcı Tanımları.....	46
3.5.1. Durağanlaştırıcı fonksiyonlarının, hemen hemen-ikinci dereceden bağımlı (pseudo-quadratic) fonksiyonlar biçiminde gösterimi.....	50
3.6. Düzgünleyici Parametresi- α ' nın Seçimi.....	52
3.7. Genel Fonksiyonelin Çözümü	53
3.7.1. Doğrusal olmayan problemlerin LSSVD ile ters çözümü	54
3.7.2. Doğrusal olmayan problemlerin CG Yöntemi ile Ters	

Çözümü	56
3.7.3. Doğrusal olmayan problemlerin ağırlık verilmiş parametreler ile yeniden-ağırlık verilmiş düzgünleyicili CG yöntemi ile çözümü	59
3.8. Kısmi Türevler içeren Dizeyin (Jacobian) Hesaplanması.....	62
3.9. Logaritmik Uzayda Ters Çözüm	68
3.10. Çakışmazlık Ölçütü (MISFTT) ve Karekök hata (RMS)	69
3.11. Bölümün Sonuçları ve Tartışma.....	69
4. MT VERİLERİNİN CG ve LS_SVD ALGORİTMALARI İLE 2-B TERS ÇÖZÜMÜ.....	71
4.1. Algoritma.....	74
4.2. Yapay Veri.....	74
4.3. Yapay Veri Uygulaması-1.....	75
4.3.1. MT verilerinin CG yöntemi ile 2-B ters çözümünde farklı durağanlaştırıcıların kullanılması.....	75
4.3.2. MT verilerinin LSSVD algoritması ile ters çözümünde farklı durağanlaştırıcıların kullanılması.....	80
4.3.3. CG ve LSSVD algoritmalarının karşılaştırılması	84
4.3.4. LSSVD ve CG algoritmaları ile ardışık ters çözüm	86
4.3.5.. Birinci Model için ters çözüm sonuçlarının tartışılması	86
4.4. Yapay Veri Uygulaması-2	88
4.4.1. MT verilerinin CG ve LSSVD algoritmaları ile 2-B ters çözümünde farklı durağanlaştırıcıların kullanılması	89
4.4.2. LSSVD ve CG algoritmalarının ardışık ters çözümü	96
4.4.3. Büyük model ağı için COPROD2S-1 verisinin ters çözümü	97
4.5. Bölümün Sonuçları ve Tartışma	97
5. ARAZİ VERİSİ UYGULAMASI	99
5.1. Arazinin Genel Jeolojisi	99
5.2. MT Ölçüsü ve Veri Analizi	99
5.2.1. Veri Toplama	101
5.2.2. Empedans Verilerinin Analizi (Ayrıştırma ve Sabit Kayma)	101
5.3. Arazi verilerinin 2-B Ters Çözümü	106
6. SONUÇLAR	111
KAYNAKLAR	115
EKLER	129
EK 1. Tabakalı Ortam için Düzlem Dalga Alanları (E ve H) Hesabı	129
EK 2. İngilizce Terimlerin Türkçe Karşılıkları	131

SİMGELER DİZİNİ

CG	Eşlenik Türev (Conjugate Gradient)
SVD	Tekil değer ayrışımı (Singular Value Decomposition)
LU	Alt-Üst ayrışım (LU Decomposition)
LS_SVD	Tekil değer ayrışımı ile en-küçük kareler çözümü (Least Squares solution with Singular Value Decomposition)
L2-norm	Model parametrelerinin L2-normu
MS	“Minimum Support” durağanlaştırıcısı
MGS	“Minimum Gradient Support” durağanlaştırıcısı
MinEnt-1	“First order minimum entropy” durağanlaştırıcısı
$\vec{E}$	Elektrik Alan Şiddeti (V/m)
$\vec{H}$	Manyetik Alan Şiddeti (A/m)
μ	Manyetik Geçirgenlik (H/m)
σ	Öziletkenlik
ρ	Özdirenç
f	Frekans (Hertz)
Z_{xy}, Z_{yx}	Empedans
$\nabla, \nabla \cdot$	Gradient ve diverjans operatörü
x, y, z	Kartezyen koordinatlar

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Manyetotellürik' de TE ve TM modu.....	8
Şekil 2.2. MT yönteminde, 2-B modellemeye izlenecek adımları gösteren akış şeması.	9
Şekil 2.3. (a) Model ağı. Ağ içindeki hücreler ve düğüm noktaları, sırası ile, yukarıdan-aşağıya ve soldan-sağa doğru numaralanmıştır. (b) Ağ içerisindeki herhangi bir (i, j) düğüm noktası ve komşu düğüm noktaları.....	11
Şekil 2.4. x-yönünde $M=4$ ve z-yönünde $N=3$ olmak üzere $NM=N \times M=12$ düğüm noktasından oluşan ağ. Düğüm noktaları yukarıdan-aşağıya ve soldan-sağa doğru numaralandırılmıştır.....	17
Şekil 2.5. (a) TE modu için SF- ve SE- yöntemi ile hesaplanan görünür öz direnç ve faz eğrileri, TM-modu için analitik, SF- ve SE-yöntemi ile hesaplanan görünür öz direnç ve faz eğrileri. Burada çemberler bu çalışmada geliştirilen programın çözümünü, yıldızlar PW2D isimli programın çözümünü, ve sürekli eğri ise analitik çözümü göstermektedir.(b) COMMEMI 2D-0 modeli.....	21
Şekil 2.6. Üç tabakalı yer-elektrik modeli.....	23
Şekil 2.7. S1 ölçü noktasında, TE- ve TM- modu için GÖ ve faz eğrileri	24
Şekil 2.8. S2 ölçü noktasında, TE- ve TM- modu için GÖ ve faz eğrileri.....	25
Şekil 2.9. S3 ölçü noktasında, TE- ve TM- modu için GÖ ve faz eğrileri.....	26
Şekil 4.1. TE-modu verilerinin L2-norm, MS, MGS, MinEnt-1, OCCAM durağanlaştırmaları için CG yöntemi ile ters çözüm sonuçları.....	76
Şekil 4.2. TM-modu verilerinin L2-norm, MS, MGS, MinEnt-1, OCCAM durağanlaştırmaları için CG yöntemi ile ters çözüm sonuçları.....	78
Şekil 4.3. TE- ve TM-modu verilerinin L2-norm, MS, MGS, MinEnt-1, OCCAM durağanlaştırmaları için CG yöntemi ile birleşik ters çözüm sonuçları.....	79
Şekil 4.4. TE-modu verilerinin L2-norm, MS, MGS, MinEnt-1, OCCAM durağanlaştırmaları için LSSVD ile ters çözüm sonuçları.....	81
Şekil 4.5. TM-modu verilerinin L2-norm, MS, MGS, MinEnt-1, OCCAM durağanlaştırmaları için LSSVD ile ters çözüm sonuçları.....	82

Şekil 4.6. TE ve TM-modu verilerinin L2-norm, MS, MGS, MinEnt-1, OCCAM durağanlaştırıcıları için LSSVD ile ters çözüm sonuçları.....	83
Şekil 4.7. (a) L2-norm durağanlaştırıcısı için CG algoritması ile elde edilen model, (b) LSSVD_CG algoritması ile elde edilen model ve (c) gerçek model.....	87
Şekil 4.8. PW2D programı ile hesaplanan GÖ ve faz yapma-kesitleri (ölçülen olarak alınmış) ile, L2-norm durağanlaştırıcısına göre CG ile yapılan ters çözüm sonucu kuramsal GÖ ve faz yapma kesitleri.....	88
Şekil 4.9. COPROD2S-1 veri kümesinin hesaplanmasında kullanılan model (Varentsov' dan alınmıştır).....	90
Şekil 4.10. TE-modu verilerinin CG ile MGS ve MinEnt-1 durağanlaştırıcıları ters çözümü sonucu bulunan modeller	92
Şekil 4.11. TE-modu verilerinin CG ile L2-norm, MS ve OCCAM durağanlaştırıcıları ters çözümü sonucu bulunan modeller (özdirençlerin logaritmaları çizilmiştir.).....	92
Şekil 4.12. TM-modu verilerinin CG ile L2-norm, MS ve OCCAM durağanlaştırıcıları ters çözümü sonucu bulunan modeller (özdirençlerin logaritmaları çizilmiştir).....	94
Şekil 4.13. L2 ve MS durağanlaştırıcılarının CG ve LSSVD çözümleri (özdirençlerin logaritmaları çizilmiştir).....	96
Şekil 4.14. a) LSSVD_CG algoritması ile elde edilen model. (b) Mackie et al.' un (1997) NLCG isimli algoritmalarının çözümü (özdirençlerin logaritmaları çizilmiştir).....	97
Şekil 4.15. 127x27 boyutundaki model ağı için L2-norm durağanlaştırıcısı kullanarak CG algoritması ile elde edilen model.....	98
Şekil 5.1. Kastamonu- Çankırı bölgesinin jeoloji haritası (MTA' nın hazırladığı 1:500000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritasından alınmıştır.). Harita üzerinde yaklaşık olarak ölçü hattı ve ölçü noktaları ile KAF' nın hattı kestiği yer gösterilmiştir.	101
Şekil 5. 2. Sabit kayma ve saçılmaya neden olan yapılar (Livelbrooks et al. 1996 dan alınmıştır).....	103
Şekil 5.3. 24 numaralı istasyon için ölçülen GÖ ve empedans faz ile birlikte, bu verilerin frekans bağımsız (a) ve frekans bağımlı GB ayrıştırması ile elde edilen değerler.	105
Şekil 5.4. 29 numaralı istasyon için ölçülen GÖ ve empedans faz ile birlikte, bu verilerin frekans bağımsız (a) ve frekans bağımlı GB ayrıştırması ile elde edilen değerler.....	106

Şekil 5.5. Arazi verilerinin, L2-norm ve MS durağanlaştırıcıları ile CG ve LSSVD algoritmalarının ters çözümünden elde edilen modeller.	110
Şekil 5.6. Arazi verilerinin, LSSVD_CG ve NLCG (düz ve topoğrafyayı katarak) algoritmaları ile ters çözümünden elde edilen modeller.....	111

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. COMMEMI 2D-0 modeli için kullanılan ağ parametreleri	20
Çizelge 2.2. Şekil 2.6' daki model için kullanılan birinci ağ.....	26
Çizelge 2.3. 2-B MT ters çözüm programında giriş olarak okunan temsili bir veri dosyası.....	28
Çizelge 2.4. VBAD programı ile ele edilen ağ parametreleri.....	29
Çizelge 4.1. Son yıllarda MT verilerinin 2-B ters çözümünde kullanılan algoritmalar.....	72
Çizelge 4.2. Model-1 için kullanılan frekans sayısı, frekans değerleri, ağ parametreleri ve istasyon sayısı.....	75
Çizelge 4.3.a. TE-modu verilerinin farklı durağanlaştırıcılar ile CG algoritması kullanarak ters çözümünde; yineleme sayısı, MISFIT ve hesaplama zamanları.....	76
Çizelge 4.3.b. TM-modu verilerinin farklı durağanlaştırıcılar ile CG algoritması kullanarak ters çözümünde; yineleme sayısı, MISFIT ve hesaplama zamanları.....	78
Çizelge 4.3.c. TE- ve TM-modu verilerinin farklı durağanlaştırıcılar ile CG algoritması kullanarak birleşik ters çözümünde; yineleme sayısı, MISFIT ve hesaplama zamanları.....	79
Çizelge 4.4.a. TE-modu verilerinin LSSVD kullanarak farklı durağanlaştırıcılar ile ters çözümünde; yineleme sayısı, MISFIT ve hesaplama zamanları.....	81
Çizelge 4.4.b. TM-modu verilerinin LSSVD kullanarak farklı durağanlaştırıcılar ile ters çözümünde; yineleme sayısı, MISFIT ve hesaplama zamanları.....	82
Çizelge 4.4.c. TE- ve TM-modu verilerinin LSSVD kullanarak farklı durağanlaştırıcılar ile birleşik ters çözümünde; yineleme sayısı, MISFIT ve hesaplama zamanları.....	83
Çizelge 4.5.a. TE-modu verilerinin LSSVD ve CG kullanarak farklı durağanlaştırıcılar ile ters çözümünde; yineleme sayısı, MISFIT ve hesaplama zamanları.....	84
Çizelge 4.5.b. TM-modu verilerinin LSSVD ve CG kullanarak farklı durağanlaştırıcılar ile ters çözümünde; yineleme sayısı, MISFIT ve hesaplama zamanları.....	85
Çizelge 4.5.c. TE- ve TM-modu verilerinin LSSVD ve CG kullanarak farklı durağanlaştırıcılar ile birleşik ters çözümünde; yineleme sayısı, MISFIT ve hesaplama zamanları.....	85
Çizelge 4.6. COPROD2S-1 veri kümesini kullanarak, VBAD programı ile elde edilen model ağı.....	90

Çizelge 4.7a. COPROD2s-1, TE-modu verilerinin CG kullanarak farklı durağanlaştırmalar ile ters çözümünde; yineleme sayısı, MISFIT ve hesaplama zamanları.....	91
Çizelge 4.7b. COPROD2s-1, TM-modu verilerinin CG kullanarak farklı durağanlaştırmalar ile ters çözümünde; yineleme sayısı, MISFIT ve hesaplama zamanları.....	93
Çizelge 4.8. COPROD2S-1, TE- ve TM-modu verilerinin CG ve SVD kullanarak farklı durağanlaştırmalar ile ters çözümünde; yineleme sayısı, MISFIT ve hesaplama zamanları.....	97
Çizelge 5.1. L2-norm ve MS durağanlaştırmaları için TE- ve TM-modu verilerinin birleşik ters çözümünde her algoritma için yineleme sayısı, MISFIT ve RMS değerleri. NLCG algoritması için OCCAM durağanlaştırmacı düz ve eğimli topoğrafyalı model ağı için kullanılmıştır.....	109

1. GİRİŞ

Manyetotellürik (MT) yöntemin kuramını birbirinden bağımsız olarak, iki bilim adamı olan Rus Tikhonov (1950) ve Fransız Cagniard (1953) tanıtmışlardır. Kullanılan frekans aralığına bağlı olarak yöntem, birkaç yüz metreden, kilometrelerce derinliğe kadar yeriçinin öz direnç yapısını incelememizi sağlamaktadır. Yöntemin araştırma derinliğinin büyük olmasından dolayı, yeriçinin kabuk yapısı, okyanusal ve kıtasal kabuk arasındaki süreksizliklerin incelenmesi, kabuk ve manto girişimlerinin ayrıtışının incelenmesi, fay yapılarının belirlenmesi gibi geniş bir uygulama alanı vardır.

Bazalt gibi volkanik birimlerle örtülü alanlarda, bu birimlerin çok yüksek hızda olmasından dolayı altındaki birimler ile ilgili bilgi sismik kayıtlarda görülmemektedir. Bu nedenle, son yıllarda bu tip alanlarda petrol ve doğalgaz kaynaklarının aranmasında MT yöntemi geniş kapsamlı olarak kullanılmaktadır (Christopherson, 1991; Beamish ve Travassos, 1992; Morrison ve diğ., 1996; Nagy, 1996; Mitsuhata ve diğ., 1999; Corcione ve Seriani, 2000). Ülkemizde de, Güneydoğu Anadolu bölgesinde benzer sorunlar görülmekte ve sismik ölçü yanında MT ölçüleri de alınmaktadır.

Günümüzde, MT verilerinin yorumlanmasında çoğunlukla 2-B ters çözümünden yararlanılmaktadır. Bu tez çalışmasının amacı MT verilerinin 2-B ters çözümünü yapan yeni bir algoritma geliştirmektir. Bu algoritma geliştirilirken, önceden yazılmış algoritmaların eksik tarafları gözönünde bulundurulmuştur.

MT yöntemde ters çözüm problemi, doğrusal-değildir (non-linear) ve kötü-durumludur (ill-conditioned). Bu nedenle MT verilerinin ters çözümü genellikle doğrusallaştırılmış-yinelemeli (DY) (linearized-iterated) yapılır (Sen ve Stoffa, 1995, Rodi ve Mackie 2001). Ters çözüm algoritmalarında düzgünleştirme (regularization) kuramına göre kullanılan parametrik fonksiyonelin genel ifadesi;

$$P(m,d) = \phi(m,d) + \alpha S(m) \quad (1.1)$$

şeklinde verilebilir. Burada ilk terim “MISFIT” fonksiyoneli, α , düzgünleştirici parametresi (regularized parameter) ve $S(m)$ ise durağanlaştırıcı (stabilizer) olarak tanımlanır.

Denklem (1.1)' de $S(m) = \|(m, m)\|_{L_2}$ alınır ve en küçüklenirse, fonksiyonelin “sönümlü en-küçük kareler” (dumped least-squares) çözümü elde edilir. Aynı denklemde $S(m) = \|\nabla^2 m\|_{L_2}$ (sayısal Laplacian operatorü) alınırsa, “OCCAM” çözümü elde edilir. Bu iki ters çözüm yöntemi, MT verilerinin 2-B ters çözümünde kullanılan başlıca yöntemlerdir (bkz. Jupp ve Vozoff 1977, Sasaki 1989, Rodi 1989, Madden ve Mackie 1989, deGroot-Hedlin ve Constable 1990, Smith ve Booker 1991, Zhang ve Hobbs 1992, Uchida 1993, deLugao ve diğ. 1997, Smith ve diğ. 1999, Gupta ve diğ. 1999, Siripunvaraporn ve Egbert 2000, Rodi ve Mackie 2001).

Ters çözüm algoritması aşağıda verilen üç ana bölümden oluşur:

- i- Kuramsal verilerin hesaplanması (düz çözüm)
- ii- Duyarlılık düzeyinin (Jacobian, Sensitivity) hesaplanması
- iii- Parametrik fonksiyonelin çözümü.

2-B MT düz çözümde, genel olarak sonlu elemanlar veya sonlu farklar yöntemi ile kuramsal veriler hesaplanır. Bu konu Bölüm 2' de anlatılmıştır. Bu bölümde geliştirilen düz çözüm algoritmasında kullanılan yöntem ve bağıntılar açıklanmıştır. Ayrıca, çözümü çok etkileyen “ağ tasarımı” irdelenmiştir. Ağ tasarımı yapan yeni bir algoritma geliştirilmiştir.

Duyarlılık düzeyinin hesabı üçüncü bölümde anlatılmıştır. Bu bölümde şimdiye kadar kullanılmış ters çözüm algoritmalarının, (1.1) denklemi ile verilen parametrik fonksiyonelden türetildiği gösterilmiştir. Ayrıca, MT verilerinin ters çözümünde kullanılması için önerilen “minimum support” (bkz. Mehanec ve diğ. 1998, Mehanec ve Zhdanov 2002, Zhdanov ve Hursan 2000, Zhdanov ve Tartaras 2002) ve “first-order minimum entropy” (Novel at al. 1999) durağanlaştırmaları ile yeni tanımlanmış “minimum gradient support” (Portniguine ve Zhdanov 1999) durağanlaştırmaları verilmiştir. Bu durağanlaştırmalar ile yukarda anlatılan klasik yöntemlerin MT verilerinin 2-B ters çözümünde birbirine göre nasıl sonuç verdikleri geliştirilen bilgisayar programı ile incelenmiştir. Önerilen durağanlaştırmalar arasında kullanışlı olanı belirlenmeye çalışılmıştır.

Ters çözüm işlemi genel olarak tekil değer ayrışımı ile en küçük-kareler çözümü (least-squares solution with singular value decomposition- LSSVD) veya “eşlenik türev” (conjugate gradient-CG) yöntemi kullanılarak yapılır. Geliştirilen algoritma, her iki yöntem için de çözüm bulmaktadır. Bu iki yöntemin çözüm güçleri birbirine göre karşılaştırılmıştır. Bu konu üçüncü bölümde açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde ise, geliştirilen bilgisayar programının kullanılabilirliği sentetik veriler ile gösterilmiştir. Bu bölümde, farklı durağanlaştırıcı tamamlarının birbirine göre nasıl sonuç verdiği LSSVD ve CG algoritmaları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, LSSVD ve CG algoritmalarının birarada kullanıldığı LSSVD_CG olarak isimlendirilen yeni bir ters çözüm algoritması önerilmiştir. Bu algoritmanın, Mackie ve diğ. (1997)' nin NLCG isimli algoritması, LSSVD ve CG algoritmalarından daha iyi sonuç verdiği gösterilmiştir.

Beşinci bölümde ise geliştirilen ters çözüm algoritmasının, arazi verilerinin yorumlanmasında kullanılabilirliği gösterilmiştir. Bu bölümde arazi verisi olarak MTA tarafından ölçülen Kastamonu-Çankırı arasında bir doğrultu boyunca ölçülmüş 15 istasyondaki MT verileri kullanılmıştır. Dördüncü bölümde sentetik verilerin ters çözümünde en iyi sonuç veren durağanlaştırıcılar için CG ve LSSVD, LSSVD_CG ve NLCG algoritmalarının çözümleri verilmiştir.

Altıncı bölümde ise bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

2. MANYETOTELLÜRİK YÖNTEMDE İKİ-BOYUTLU MODELLEME

2.1. Giriş

Manyetotellürik (MT) yöntemde, iki-boyutlu (2-B) modellerin analitik çözümü karmaşık modeller için olası olmadığından sayısal yöntemler kullanılır. Günümüzde, Sonlu Elemanlar (SE) (Finite Element) ve Sonlu Farklar (SF) (Finite Difference) en çok kullanılan sayısal çözüm yöntemleridir. İntegral denklemi yöntemi ise yerelektrik modellerinin çok karmaşık olması, özellikle süreksizliklerin yanal yönde sınırlara kadar uzanması nedeni ile pek kullanılmamaktadır (Zhdanov ve diğ. 1997).

MT yönteminde SF ile 2-B modelleme ilk olarak Jones ve Price (1970), Jones ve Pascoe (1971), Pascoe ve Jones (1972), Cerv ve Praus (1972) tarafından yapılmıştır. Günümüzde ise bu yöntem kullanılarak yazılan ve doğruluğu kabul edilen program Brewitt-Taylor ve Weaver (1976) tarafından geliştirilmiştir. Yine bu araştırmacılar dışında aynı 2-B modelleme bağlantıları kullanılarak, farklı ters çözüm algoritmaları yazılmıştır (Smith ve Booker 1991, DeLugao ve diğ. 1997). Apprea ve diğ. (1997) ise ağ (mesh) içinde üçgen elemanlar için SF yaklaşımını kullanmışlardır. Uygulamalarında, sonuçlarının SE yönteminin sonuçlarına yakın olduğunu göstermişlerdir.

MT yönteminde SE ile 2-B modelleme ilk olarak Coggon (1971), Silvester ve Haslam (1972), Rodi (1976) ve Rijo (1977) tarafından yapılmıştır. Günümüzde ise bu yöntem kullanılarak yazılan ve doğruluğu kabul edilen program Wannamaker ve diğ. (1986, 1987) tarafından geliştirilmiştir.

Genel denklemin SE yöntemi ile çözümü karmaşıktır. Buna karşın, karmaşık modellerin ve topoğrafyanın etkisinin hesaplanmasında SF yöntemine göre daha kullanışlıdır. Diğer taraftan, SF yaklaşımı ile problemin çözümü ve bilgisayar programının yazılması daha kolaydır. SF ile yazılmış algoritmalar, SE ile yazılmış algoritmalarından daha hızlı çalışır. Ayrıca, SF ve SE ile yazılan 2-B MT modelleme programları hemen hemen aynı duyarlılıkta sonuç vermektedir (Rodi 1976, Zhdanov ve diğ. 1997, Apprea ve diğ. 1997). Yukarıdaki nedenlerden dolayı, MT yönteminde 2-B modelleme konusunda yazılan programların çoğunda SF yöntemi kullanılmaktadır.

Zhdanov ve diğ. (1997) SE, SF ve integral denklemi yöntemleri ile yazılmış farklı modelleme programlarını COMMEMI (COMparison of Modeling Methods for Electromagnetic Induction) projesi kapsamında incelemiştir.

Çalışmaları sonucunda, yazılacak yeni bir modelleme programının öncekilerden daha hızlı çalışması, duyarlı ve kolay kullanılabilir olması gerektiğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada geliştirilen 2-B MT modelleme programında bu kriterler gözönünde tutulmuştur.

Bu çalışmada amaç yeni bir ters çözüm algoritması geliştirmektir. Ters çözüm algoritmasının doğru ve hızlı çalışmasında en önemli etkenlerden birisi, düz çözüm (forward modeling) bölümünün duyarlı sonuç vermesidir. Geliştirilen algorithmada SF sayısal çözüm yöntemi kullanılmıştır. Modellemede, genel düzey denkleminin çözümü en çok zaman alan bölümdür. Bu çalışmada genel düzey denkleminin çözümünde "sparse" düzey aritmetiği kullanılmıştır. "Sparse" aritmetikte, sadece düzeydeki band değerleri ve bunların satır ve sütun numaraları bellekte tutulmaktadır. Bu nedenle, genel düzey denkleminin çözümü daha hızlı olmakta ve dolayısı ile program daha hızlı çalışmaktadır.

Sayısal yöntemlerin duyarlılığı, kullanılan ağı (mesh) kalitesine ve jeolojik doğrultuya dik alanların hesaplanmasına bağlıdır (Rodi 1976). Yüze yakın düğüm noktaları arasındaki düşey yöndeki uzaklığın büyük olması, düşey yöndeki türev ile hesaplanan jeolojik doğrultuya dik alanların (auxiliary field) (H_x ve H_y , veya E_x) hatalı hesaplanmasına neden olur. Bu çalışmada Wannamaker ve diğ. (1984) ve Weaver' ın (1994) tavsiyeleri doğrultusunda otomatik ağ düzenleyen yeni bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Geliştirilen program, kullanıcıdan gelen ağ düzenleme hatalarını yok etmektedir. Ayrıca jeolojik doğrultuya dik alanlar ise üç nokta kullanılarak hesaplanmıştır (bkz. Weaver 1994). Bu yöntemin, iki nokta kullanarak uygulanan geleneksel yöntemden daha kullanışlı olduğu bilinmektedir (Weaver 1994).

2-B MT modelleme programlarının hepsi FORTRAN dilinde yazılmıştır. Bu nedenle, geliştirilen algorithmalarda en büyük fiziksel boyutların, her farklı model için değiştirilmesi ve programın yeniden derlenmesi gerekmektedir. Geliştirdiğimiz bilgisayar programı MATLAB dilinde yazılmıştır. MATLAB, C++ dilinden türetilen dördüncü kuşak bir programlama dilidir ve bu dilde yazılan program içinde en büyük fiziksel boyutları tanımlama zorunluluğu C++' daki gibi yoktur. Bu nedenle kullanıcı, her farklı model için program derlemek zorunda değildir. Eğer program tek duyarlıklılı yazılmış ise sayısal yuvarlatma hatası (round-off error) önemli bir problem olabilir. Bu nedenle geliştirilen programda çift duyarlılık (double precision) kullanılmıştır.

Sonuç olarak, hızlı çalışan, kolay kullanılabilir yeni bir modelleme programı geliştirilmiştir. Geliştirilen programın doğruluğu, COMMEMI modelleri için test edilmiştir. Burada sadece bu modellerden 2D-0 isimli olanı için geliştirilen programın sonucu, analitik çözüm (Weaver ve diğ. 1985, 1986) ve SE ile çözüm (Wannamaker ve diğ. 1987) sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Alt bölümlerde ilk olarak 2-B MT modellemede kullanılan temel denklemler verilmiştir. Daha sonra sonlu farklar ile modellemede kullanılan adımlar anlatılmıştır. TE ve TM modu için genel denklemin sonlu farklar ile çözümü ve kullanılan sınır koşulları açıklanmıştır. Jeolojik doğrultuya dik alanların hesabı verildikten sonra programın test sonuçları gösterilmiştir. Son olarak ise otomatik ağ tasarımı ve bu bölümün sonuçları anlatılmıştır.

2.2. Temel Denklemler

MT yönteminde temel denklemler, frekans ortamında verilen Maxwell denklemleridir. Maxwell denklemleri frekans ortamında, düzlem dalga için aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\nabla \times \vec{E} = -i\omega\mu\vec{H}, \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma\vec{E}, \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0, \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0. \quad (2.4)$$

Burada, ∇ 2-B gradienti göstermektedir. Burada $\vec{E}$, elektrik alan şiddeti (V/m), $\vec{H}$, manyetik alan şiddeti (A/m), μ , manyetik geçirgenlik ve σ , iletkenliktir. σ 'nın tersi öz direnç ρ (Ohm-m) olarak bilinir. Burada yer değiştirme akımı, "quasi-static" yaklaşımdan dolayı ihmal edilmiştir. Ayrıca μ , boşluğun manyetik geçirgenliğine ($\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m) eşit alınmıştır. ε ise çok alçak frekans kullanıldığından ($f < 10^5$) ihmal edilmiştir (boşluğun dielektrik sabiti, $\varepsilon_0 = 8.87 \times 10^{-12}$ F/m dir).

Eğer σ , μ_0 ve ε_0 parametrelerinin değişimi y-ekseninden bağımsız ise, birbirinden farklı iki elektromanyetik mod vardır. Bunlar TE-modu (TE-Transverse Electric veya E-paralel) ve TM-modu (TM-Transverse Magnetic veya H-paralel) (Şekil 2.1). Bu durumda, sınır koşullarında y-ekseninden

bağımsız olmalıdır. TE modunda E_y bileşeni, jeolojik doğrultuya paraleldir. TM modunda ise, H_y bileşeni jeolojik doğrultuya paraleldir.

TE-modu için, eğer (2.1) bağıntısının rotasyoneli alınır ve $\vec{\nabla} \times \vec{H}$ yerine, (2.2) denklemindeki eşdeğeri konursa, elektrik alan için denklem aşağıdaki formda verilebilir;

$$(\nabla \times \nabla \times \vec{E})_y = \nabla \cdot \nabla E_y = \nabla^2 E_y = \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} = -i\omega\sigma\mu_0 E_y. \quad (2.5a)$$

Burada ∇^2 2-B Laplacian' i göstermektedir. Jeolojik doğrultuya dik (auxiliary) manyetik alan bileşenleri ise aşağıdaki bağıntılarla hesaplanır

$$\frac{\partial E_y}{\partial z} = -i\omega\mu_0 H_x, \quad (2.5b)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = i\omega\mu_0 H_z. \quad (2.5c)$$

Benzer şekilde TM-modu için, (2.2) denkleminin rotasyoneli alınır ve $\nabla \times E$ yerine (2.1) denklemindeki eşdeğeri yerine konursa,

$$(\nabla \times \rho \nabla \times \vec{H})_y = \nabla \cdot \rho \nabla H_y = \rho \nabla^2 H_y + \nabla \rho \cdot \nabla H_y \quad (2.6a)$$

$$= \rho \left(\frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_y}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{\partial H_y}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial z} \frac{\partial H_y}{\partial z} = -i\omega\mu_0 H_y$$

bağıntısı elde edilir. TM-modu için jeolojik doğrultuya dik elektrik alanlar ise

$$\frac{\partial H_y}{\partial z} = \sigma E_x, \quad (2.6b)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} = -\sigma E_z \quad (2.6c)$$

bağıntıları ile hesaplanır. Genel olarak MT verisi görünür öz direnç ve empedans fazı büyüklükleri ile sunulur. TE- ve TM-modu için empedans bağıntıları sırasıyla

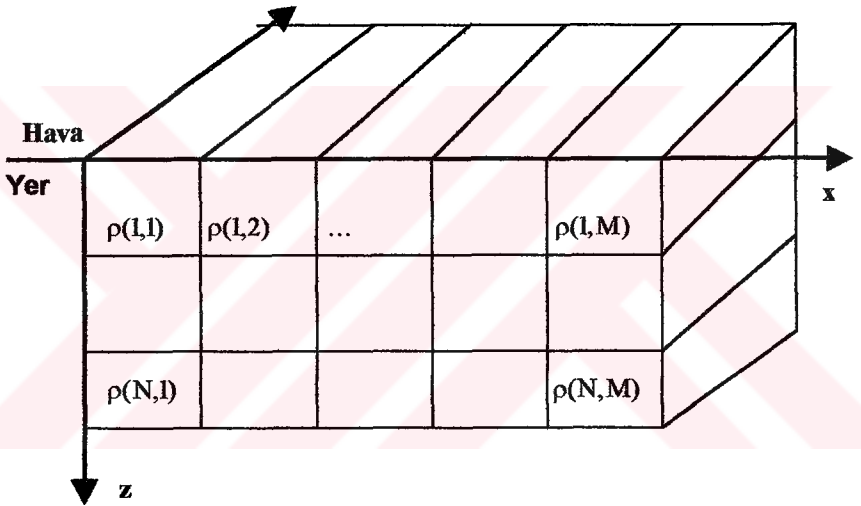
$$Z_{yx} = \frac{E_y}{H_x} \quad \text{ve} \quad Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y} \quad (2.7)$$

şeklindeir. Görünür özdirenc ve empedans fazı ise

$$\rho_a = \frac{1}{w\mu_0} |Z_{ij}|^2 \quad \text{ve} \quad \phi = \argtan\left(\frac{\text{sanal}(Z_{ij})}{\text{gerçel}(Z_{ij})}\right) \quad (2.8)$$

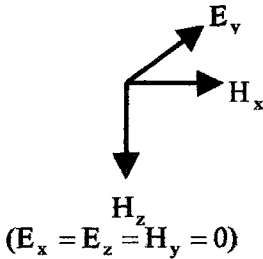
bağıntıları ile hesaplanır. Burada ij TE-modu için yx' i ve TM-modu için ise xy' yi ifade eder.

(a)

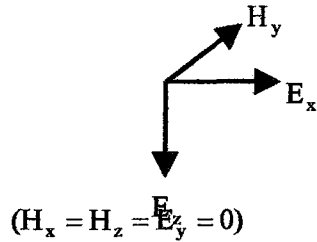


(b)

TE-MODU



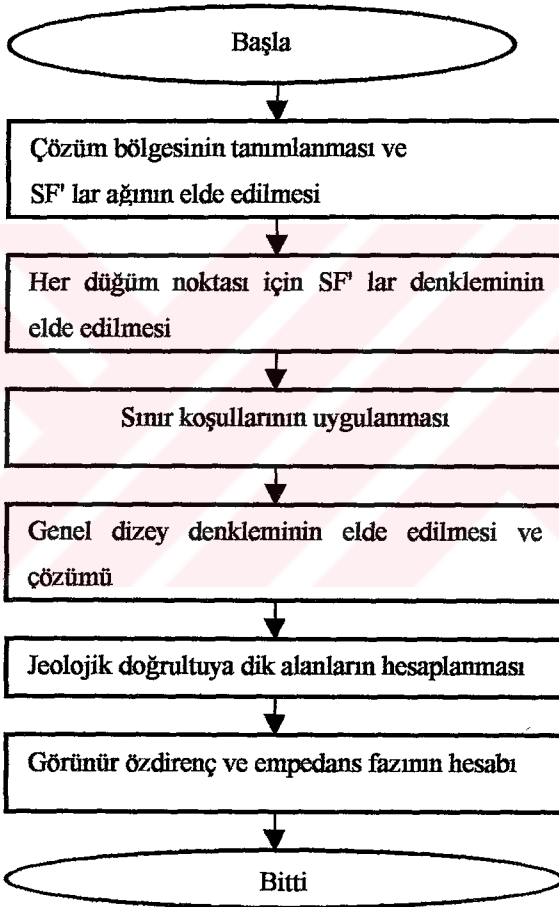
TM-MODU



Şekil 2.1. Manyetotellirik' de TE ve TM modu.

2.3. Sonlu Farklar ile 2-B Modelleme

Denklem (2.5a) ve (2.6a)'nın SF yöntemi ile çözümünde izlenecek adımlar, Şekil 2.2' deki akış şemasında görülmektedir. Bu adımlar izleyen alt başlıklarda açıklanmaktadır.



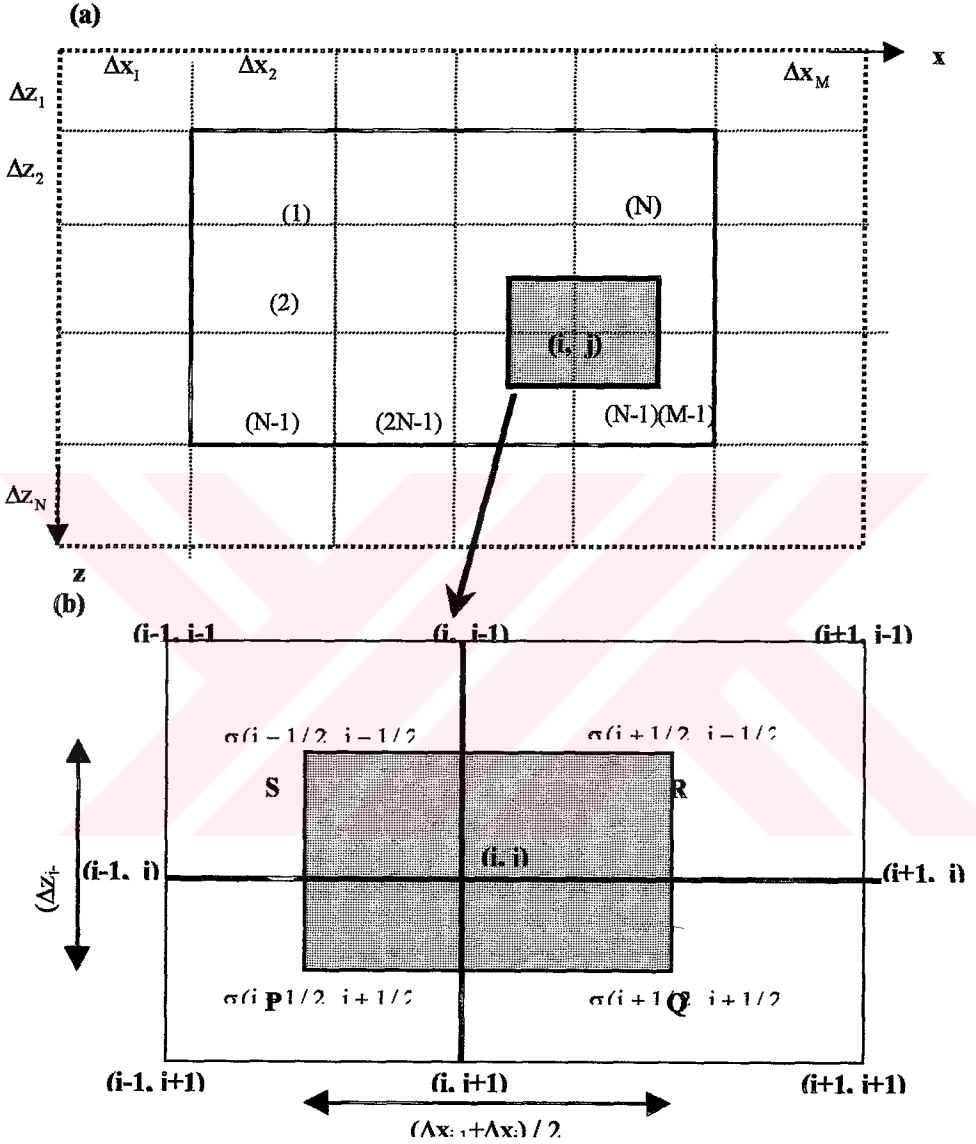
Şekil 2.2. MT yönteminde, 2-B modellemede izlenecek adımları gösteren akış şeması.

2.3.1. Çözüm bölgesinin tanımlanması ve sonlu farklar ağının elde edilmesi

2-B modellemede, ilk olarak çözüm bölgesi tanımlanır. Bu alan kendi içinde ayrıklaştırılır. SF ağının düzenlenmesi, algoritmanın doğru çalışmasında en önemli etkenlerdendir. Şimdiye kadar yazılmış bilgisayar programlarında genel olarak ağ düzenlenmesi, kullanıcıya bırakılmıştır. Bu nedenle kullanıcıdan gelen hatalar, programın yanlış sonuç vermesine neden olabilir. Bu sorunu gidermek için, bu tez çalışmasında otomatik ağ düzenleyen bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Geliştirilen programda etkin derinlik (ED) (penetration depth) kavramı kullanılmıştır. Ayrıca, Wannamaker ve diğ.(1985) ve Weaver'ın (1994) önerileri de gözönünde bulundurulmuştur. Bu programın kullanılabilirliği ilerdeki bölümde anlatılacaktır. Ağ dizaynında dikkat edilmesi gereken başlıca kriterler aşağıdaki gibi sıralanabilir (Weaver 1994)

- I- Farklı öz dirençli iki yapı arasındaki uzaklık, düşey yada yatay yönde ED' nin iki katı kadar olmalıdır. İki yapı arasında kalan düğüm noktalarının birbirine göre uzaklıkları, ED' in 1/4' ünden fazla olmamalıdır. Bu uzaklık, öz dirençli farklı iki yapı sınırında daha az olmalıdır.
- II- İlk ve son düşey grid, kendisine en yakın öz direnç sınırından en az ED' in üç katı kadar uzaklıkta olmalıdır. Burada, ED, en büyük öz direnç değerli 1-B yapının derinliği olarak alınmıştır. Örneğin bu öz direnç değeri, $x = -\infty$ ' da ilk sütundaki bloklar arasında en yüksek öz dirençli blok, $x = \infty$ ' da ise son sütundaki bloklar arasında en yüksek öz dirençli blok değeridir.
- III- Öz direnç sınırına yakın yerde, komşu düğüm noktaları arasındaki uzaklık yaklaşık eşit olmalıdır. Bu süreksizliğin iki tarafında ise eşit olmalıdır. Model içinde, düğüm noktaları arasındaki uzaklıklar küçük aralıklarla artırılmalı yada azaltılmalıdır. Ardarda gelen düğüm noktaları arasındaki komşu uzaklıklar arasındaki fark, küçük olan aralığın iki katından az olmalıdır.

Yukarıda sıralanan kriterler gözönüne alınarak elde edilen ağ içindeki gridler ve düğüm noktaları sırasıyla numaralandırılır. Bunu göstermek için Şekil 2.3' deki gibi temsili bir SF' lar ağı ele alınsın. Burada, modellenecek alanın ayrıklaştırılmasında xz-düzlemi kullanılmıştır. Grid noktaları x-yönünde $x = x_i$ ($i = 1, 2, \dots, M$) şeklinde, z-yönünde ise $z = z_j$ ($j = 1, 2, \dots, N$) şeklinde



Şekil 2.3. (a) Model ağı. Ağ içindeki hücreler ve düğüm noktaları, sırası ile, yukarıdan-aşağıya ve soldan-sağa doğru numaralanmıştır. (b) Ağ içerisindeki herhangi bir (i, j) düğüm noktası ve komşu düğüm noktaları.

numaralandırılmıştır. Gridler (x_i, z_j) noktalarında kesişmektedir. Toplam $M \times N$ adet düğüm noktasında E- ve H-alan değerleri hesaplanacaktır.

Ağ sınırlarına birer hücre eklenmiştir ve son düğüm noktaları sınır koşullarının uygulanacağı yerlerdir. Bu noktalardaki elektrik ve manyetik alan değerleri, sınır koşullarından hesaplanacak ve genel düzey denkleminde kaynakla ilgili sütun vektörünün sıfırdan farklı elemanlarını oluşturacaktır.

2.3.2. Sonlu farklar ile genel denklemlerin çözümü

Öziletkenliğin (veya öz direncin) süresiz olması durumunda, (2.5a) ve (2.6a) denklemlerinde, E ve H alanlarının ikinci türevi süresiz olabilir ve Laplacian terimi iyi tanımlanamayabilir. Ayrıca, TM-modu için (2.6a) denkleminde öz dirençlerin türevi doğrudan denkleme katıldığından, bu denklemin çözümü zordur. Bu problemi çözmek için, her düğüm noktası etrafında dikdörtgen bir alan için, her iki diferansiyel denklemin de integrali alınabilir (Zhdanov ve diğ. 1982, Aprea ve diğ. 1990, Weaver 1994, Aprea ve diğ. 1997).

Herhangi bir dikdörtgen alan içindeki bir (i, j) düğüm noktasını ele alalım (Şekil 2.3b). Bu noktanın komşu düğüm noktaları $(i-1, j), (i+1, j), (i, j-1), (i, j+1)$ sırasıyla $\Delta x_{i-1}, \Delta x_i, \Delta z_{j-1}, \Delta z_j$ mesafeleri kadar (i, j) noktasından uzakta olsun. Aynı zamanda, (i, j) noktası farklı öziletkenliklerdeki $\sigma(i-1/2, j-1/2), \sigma(i+1/2, j-1/2), \sigma(i-1/2, j+1/2), \sigma(i+1/2, j+1/2)$ dört dikdörtgen alan ile çevrili olsun. Bu nokta için TE- ve TM-modu çözümleri aşağıda verilmektedir.

2.3.2.a. TE-modu için sonlu farklar denklemi

TE-modu için, (2.5a) denkleminin integrali PQRS alanı için alınırsa ve bu denklemin sol tarafına Green teoremi uygulanırsa, dikdörtgen alan etrafındaki çizgi integrali aşağıdaki gibi verilebilir:

$$\int_A (\nabla \cdot \nabla E_y) dA = \int \frac{\partial E_y}{\partial \hat{n}} dl = - \left(\int_{PQ} + \int_{RS} \right) \frac{\partial E_y}{\partial z} dx + \left(\int_{SP} + \int_{QR} \right) \frac{\partial E_y}{\partial x} dz. \quad (2.9)$$

Burada A, kenarları (i, j) ile ona komşu düğüm noktalarını birleştiren gridlerin orta noktalarının oluşturduğu dikdörtgenin (PQRS) alanı ve $\hat{n}$, A' nin kenarlarında, dışa doğru birim normal vektördür. Bu denklemi çözerken, dikdörtgen üzerinde $E_y = E(i, j)$ olarak alınmıştır. Dikdörtgen üzerinde her kenarın türevi, merkezi-türetme formülü ile hesaplanmıştır. Örneğin; $\overline{SP}$ ve $\overline{PQ}$ kenarları boyunca

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} \approx \frac{E(i+1, j) - E(i, j)}{\Delta x_i} \quad \text{ve} \quad \frac{\partial E_y}{\partial z} \approx \frac{E(i, j+1) - E(i, j)}{\Delta z_j}$$

yazılabilir. Buna göre tüm kenarlar için merkezi-türetme operatörü ile türevler alınırsa (2.9) denklemi aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\begin{aligned} \int \frac{\partial E_y}{\partial \hat{n}} dl \approx & \frac{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i}{2} \left[\frac{E(i, j+1) - E(i, j)}{\Delta z_j} - \frac{E(i, j) - E(i, j-1)}{\Delta z_{j-1}} \right] \\ & + \frac{\Delta z_{j-1} + \Delta z_j}{2} \left[\frac{E(i+1, j) - E(i, j)}{\Delta x_i} - \frac{E(i, j) - E(i-1, j)}{\Delta x_{i-1}} \right] \end{aligned} \quad (2.10)$$

Denklem (2.5a)'nın sağ tarafının integrali aşağıdaki gibi alınabilir (Weaver, 1994);

$$i\omega\mu_0 \int_A E(i, j) \sigma(i, j) dA = i\omega\mu_0 E(i, j) \int_A \sigma(i, j) dA \approx i\omega\mu_0 \tilde{\sigma}(i, j) E(i, j) \quad (2.11a)$$

Burada, $\tilde{\sigma}(i, j)$, (i, j) düğüm noktasındaki ağırlıklı ortalama iletkenliktir (weighted average conductivity) (Weaver 1994, Apprea ve diğ. 1997) ve aşağıdaki gibi tanımlanır;

$$\begin{aligned} \tilde{\sigma}(i, j) = & \frac{\Delta x_i \Delta z_{j-1}}{4} \sigma(i+1/2, j-1/2) + \frac{\Delta x_i \Delta z_j}{4} \sigma(i+1/2, j+1/2) \\ & + \frac{\Delta x_{i-1} \Delta z_j}{4} \sigma(i-1/2, j+1/2) + \frac{\Delta x_{i-1} \Delta z_{j-1}}{4} \sigma(i-1/2, j-1/2). \end{aligned} \quad (2.11b)$$

Denklem (2.10) ve (2.11) kullanılarak, TE-modu için (2.5a) bağıntısının sonlu farklar ile çözümü aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\begin{aligned}
 & \frac{(\Delta z_{j-1} + \Delta z_j)}{2\Delta x_i} E(i+1, j) + \frac{(\Delta x_{i-1} + \Delta x_i)}{2\Delta z_j} E(i, j+1) + \\
 & \frac{(\Delta z_{j-1} + \Delta z_j)}{2\Delta x_{i-1}} E(i-1, j) + \frac{(\Delta x_{i-1} + \Delta x_i)}{2\Delta z_{j-1}} E(i, j-1) \\
 & = \left[\frac{(\Delta z_{j-1} + \Delta z_j)}{2\Delta x_i} + \frac{(\Delta x_{i-1} + \Delta x_i)}{2\Delta z_j} + \frac{(\Delta z_{j-1} + \Delta z_j)}{2\Delta x_{i-1}} + \frac{(\Delta x_{i-1} + \Delta x_i)}{2\Delta z_{j-1}} - iw\mu_0 \tilde{\sigma}(i, j) \right] E(i, j).
 \end{aligned} \tag{2.12}$$

2.3.2.b. TM-modu için sonlu farklar denklemi

Denklem (2.6a), TE-modunda kullanılan yaklaşımla çözülebilir. Bu denklemin sağ tarafının integrali alınırsa,

$$\begin{aligned}
 -iw\mu_0 \int_A H(i, j) dA &= iw\mu_0 H(i, j) \sum_{i=1}^4 A_i = \\
 iw\mu_0 H(i, j) & \frac{(\Delta x_{i-1} + \Delta x_i)(\Delta z_{j-1} + \Delta z_j)}{4}
 \end{aligned} \tag{2.13}$$

elde edilir. Burada, $H(i, j)$, (i, j) noktasındaki H_y değeridir. Denklemin sol tarafına Green teoremi uygulanırsa,

$$\begin{aligned}
 \int_A (\nabla \cdot \rho \nabla H_y) dA &= \int \rho \frac{\partial H_y}{\partial \hat{n}} dl = \\
 - \left(\int_{PQ} + \int_{RS} \right) \rho \frac{\partial H_y}{\partial z} dx &+ \left(\int_{SP} + \int_{QR} \right) \rho \frac{\partial H_y}{\partial x} dz
 \end{aligned} \tag{2.14}$$

bulunur. Son denklemde, ρ , çizgi integrali boyunca değişmektedir. Bu nedenle her parça boyunca uygun bir değer kullanılması gereklidir (Şekil 2.3b). Örneğin, PQRS ile çevrili A- alanının $\overline{SP}$ kenarı boyunca,

$$\int_{SP} \rho \frac{\partial H_y}{\partial x} dz \approx \left(\frac{\Delta z_{j-1}}{2} \rho(i+1/2, j-1/2) + \frac{\Delta z_j}{2} \rho(i+1/2, j+1/2) \right) \frac{H(i+1, j) - H(i, j)}{\Delta x_i}$$

yazılabilir. Burada öz dirençler için kullanılan simgeler, iletkenlik için kullanılanlarla aynıdır. Sonuç olarak, her kenar aşağıdaki gibi tanımlanan dört etkili öz dirence (effective resistivities) bağlıdır (Weaver, 1994; Apprea ve diğ., 1997):

$$\begin{aligned} \tilde{\rho}(i+1, j) &= \frac{\Delta z_{j-1} \rho(i+1/2, j-1/2) + \Delta z_j \rho(i+1/2, j+1/2)}{2\Delta x_i}, \\ \tilde{\rho}(i, j+1) &= \frac{\Delta x_{i-1} \rho(i-1/2, j+1/2) + \Delta x_i \rho(i+1/2, j+1/2)}{2\Delta z_j}, \\ \tilde{\rho}(i-1, j) &= \frac{\Delta z_{j-1} \rho(i-1/2, j-1/2) + \Delta z_j \rho(i-1/2, j+1/2)}{2\Delta x_{i-1}}, \\ \tilde{\rho}(i, j-1) &= \frac{\Delta x_{i-1} \rho(i-1/2, j-1/2) + \Delta x_i \rho(i+1/2, j-1/2)}{2\Delta z_{j-1}}. \end{aligned} \quad (2.15)$$

SF yaklaşımı ile elde edilen (2.13), (2.14) ve (2.15) denklemleri kullanılırsa, TM-modu için (2.6a) denkleminin sonlu farklar ile çözümü aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\begin{aligned} &\tilde{\rho}(i+1, j)H(i+1, j) + \tilde{\rho}(i, j+1)H(i, j+1) + \\ &\quad \tilde{\rho}(i-1, j)H(i-1, j) + \tilde{\rho}(i, j-1)H(i, j-1) \\ &= [\tilde{\rho}(i+1, j) + \tilde{\rho}(i, j+1) + \tilde{\rho}(i-1, j) + \\ &\quad \tilde{\rho}(i, j-1) - i\omega\mu_0 \frac{(\Delta x_{i-1} + \Delta x_i)(\Delta z_{j-1} + \Delta z_j)}{4}] H(i, j). \end{aligned} \quad (2.16)$$

2.3.3. Sınır koşulları

Ağın kenarlarında E- veya H- alanının çözümü için çeşitli yöntemler önerilmiştir. Weaver ve Brewitt-Taylor (1978) kenarlarda asimtotik sınır koşulunu ve yüzeyde integral sınır koşulunu kullanmışlardır. İntegral sınır koşulu sayesinde, TE-modunda yukarıya fazladan blok konulmamaktadır.

Bu işlem, ağın daha küçük olmasını sağlamaktadır. Fakat, bu sınır koşulunun kullanılması durumunda, genel düzey denklemindeki katsayı düzeyi band özelliğini yitirmektedir (Weaver, 1994). Bu durumda ise genel düzey denkleminin çözümü daha fazla zaman almaktadır. Yazılan modelleme programının ters çözüm algoritması içinde kullanılacağı düşünülürse, bu sınır koşulu programı çok yavaşlatacaktır.

Jones ve Price (1970), DeLugao ve diğ. (1997) izleyen sınır koşulunu kullanmışlardır. Kenarlarda, E- ve H-alanı tabakalı ortam (1-B) için hesaplanmıştır (bakınız Ek-A). Üst ve alt sınırlarda ise E- ve H-alanı değerleri sabit alınmıştır. Bu sabit değerler, sol ve sağ üst köşedeki düğüm noktalarının 1-B çözümlerinin aritmetik ortalamasından hesaplanmıştır. Bu nedenle ağın sol ve sağ kenarları, E- ve H-alanı sıfıra çok yakın bir değer alacak şekilde uzatılmıştır.

Rijo (1977) aynı sınır koşulunu SE ile modellemede kullanmış, fakat alt sınırdaki TE- ve TM- modu için, E- ve H-alanını sıfır kabul etmiştir. Bu tez çalışmasında geliştirilen programda da ilk olarak Jones ve Price' ın (1970) önerdiği sınır koşulu kullanılmıştır. Şekil 2.3a gözönüne alınırsa tüm sınırlarda E- ve H- alanı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

Sol ve sağ kenarlarda bulunan $(1, 1)$, $(2, 1)$, ..., $(N, 1)$, $(1, M)$, $(2, M)$, ..., (N, M) no' lu düğüm noktalarının sırasıyla solunda ve sağında kalan düğüm noktalarındaki E- ve H-alanları 1-B tabakalı yer modeli için hesaplanır. $(1, 1)$, $(1, 2)$..., $(1, M)$ numaralı düğüm noktalarının üstünde kalan düğüm noktalarındaki alan değerleri sabit alınır. Bu sabit değer ilk satırda, sol ve sağ üst köşedeki düğüm noktalarında 1-B model için hesaplanan alan değerlerinin aritmetik ortalamasıdır.

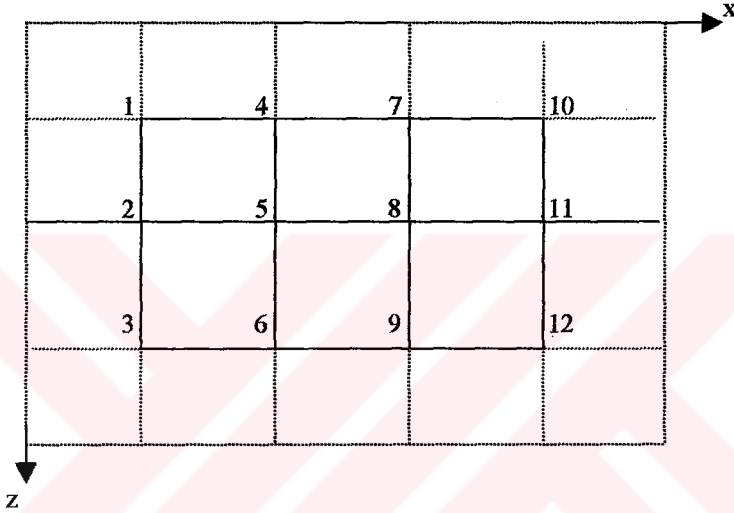
Benzer şekilde $(N, 1)$, $(N, 2)$..., (N, M) numaralı blokların altında kalan düğüm noktalarındaki alan değerleri de sabit alınır. Bu sabit değer ise son satırda, sol ve sağ alt köşedeki düğüm noktalarında 1-B model için hesaplanan alan değerlerinin aritmetik ortalamasıdır.

Sınırlarda bulunan düğüm noktalarında yukarıda anlatıldığı gibi hesaplanan E_y - (veya H_y -) alanı değerleri sonraki adımda anlatılacak olan genel düzey denkleminin kaynakla ilgili sütun vektörüne yerleştirilir.

2.3.4. Genel düzey denkleminin elde edilmesi ve çözümü

Bu bölümde, temsili bir ağ olarak Şekil 2.4 gözönünde tutulur ise, bu ağ üzerinde her bir düğüm noktasının SF' lar ile çözümü sonucu doğrusal bir denklem elde edilir. Bu denklem TE-modu için (2.12) ve TM modu için

(2.16) bağıntılarıdır. Elde edilen bu doğrusal denklemlerde, çözümü aranan düğüm noktası ve ona komşu dört düğüm noktasındaki alan (TE-modu için E_y - ve TM-modu için H_y -alanı) değerleri bilinmemektedir. Tüm düğüm noktaları için elde edilen bu doğrusal denklemler birleştirilerek genel düzey denklemi elde edilir. Örneğin, Şekil 2.4' deki gibi x-yönünde $M=4$ ve z-yönünde $N=3$ olmak üzere toplam $NM=N \times M=12$ düğüm noktasından oluşan bir ağ için genel düzey denklemi aşağıdaki gibidir.



Şekil 2.4. x-yönünde $M=4$ ve z-yönünde $N=3$ olmak üzere $NM=N \times M=12$ düğüm noktasından oluşan ağ. Düğüm noktaları yukarıdan-aşağıya ve soldan-sağa doğru numaralandırılmıştır.

$$\begin{bmatrix}
 K_{1,1} & K_{1,2} & 0 & K_{1,4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 K_{2,1} & K_{2,2} & K_{2,3} & 0 & K_{2,5} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & K_{3,2} & K_{3,3} & 0 & 0 & K_{3,6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 K_{4,1} & 0 & 0 & K_{4,4} & K_{4,5} & 0 & K_{4,7} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & K_{5,2} & 0 & K_{5,4} & K_{5,5} & K_{5,6} & 0 & K_{5,8} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & K_{6,3} & 0 & K_{6,5} & K_{6,6} & 0 & 0 & K_{6,9} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & K_{7,4} & 0 & 0 & K_{7,7} & K_{7,8} & 0 & K_{7,10} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & K_{8,5} & 0 & K_{8,7} & K_{8,8} & K_{8,9} & 0 & K_{8,11} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{9,6} & 0 & K_{9,8} & K_{9,9} & 0 & K_{9,12} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{10,7} & 0 & 0 & K_{10,10} & K_{10,11} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{11,8} & 0 & K_{11,10} & K_{11,11} & K_{11,12} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{12,9} & 0 & K_{12,11} & K_{12,12}
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 x_1 \\
 x_2 \\
 x_3 \\
 x_4 \\
 x_5 \\
 x_6 \\
 x_7 \\
 x_8 \\
 x_9 \\
 x_{10} \\
 x_{11} \\
 x_{12}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 b_1 \\
 b_2 \\
 b_3 \\
 b_4 \\
 0 \\
 b_6 \\
 b_7 \\
 0 \\
 b_9 \\
 b_{10} \\
 b_{11} \\
 b_{12}
 \end{bmatrix}
 \quad (2.17a)$$

Burada K_{ij} değerleri, $\Delta x, \Delta z$ ve σ değerlerine bağlı bilinen sabit katsayılardır. Örneğin TE-modu için K_{11}

$$K_{11} = \frac{(\Delta z_1 + \Delta z_2)}{2\Delta x_2} + \frac{(\Delta x_1 + \Delta x_2)}{2\Delta z_2} + \frac{(\Delta z_1 + \Delta z_2)}{2\Delta x_1} + \frac{(\Delta x_1 + \Delta x_2)}{2\Delta z_1} - iw\mu_0 \tilde{\sigma}(1, 1)$$

şeklinde yazılabilir. Denklem (2.17a) dizey denklemi aşağıdaki formda yazılabilir.

$$A \cdot x = b \quad (2.17b)$$

Burada A , $NM \times NM$ boyutlu katsayı dizeyi (coefficient matrix), x , $NM \times 1$ boyutlu bilinmeyen alan değerlerini (E_y veya H_y) içeren sütun vektör ve b , ise $NM \times 1$ boyutlu sıfırdan farklı değerleri sınır koşullarından hesaplanan sütun vektördür.

A dizeyi, beş köşegenden oluşan band bir dizeydir. Ana köşegene (diagonal) son köşegen, ağ sırasıyla yukardan-aşağıya ve soldan-sağa doğru numaralandırıldığından, N kadar uzaklıktadır. Ağ sırasıyla soldan-sağa ve yukardan-aşağıya doğru numaralandırılıyorsa, son köşegen M kadar uzakta olacaktı. Her satırdaki ana köşegen üzerindeki değerler, diğer köşegenlerdeki değerlerden büyüktür. Ana köşegen değerleri karmaşık (complex), diğer köşegenlerin değerleri gerçeldir (real). TM modu için tüm köşegen değerleri özdirence bağlıdır.

Denklem (2.17) doğrusal bir dizey denklemdir ve doğrudan (direct) veya yinelemeli (iterative) yöntemler ile çözülür. Doğrudan yöntemler, daha dıyarlı ve etkili sonuç vermektedir (Varentsov ve Golubev, 1985; Cerv ve Segeth, 1982). Doğrudan yöntemlere örnek olarak "Gaussian symmetrical decomposition" (Cerv ve Segeth, 1982), blok eliminasyon (block elimination) (Samarsky ve Nikolaev, 1977; Varentsov ve Golubev, 1982), Gaussian eliminasyon (Wannamaker ve diğ., 1987) verilebilir. Yinelemeli yöntemlere örnek olarak Gauss-Seidel (Weaver, 1994) verilebilir. Yinelemeli yöntemlerin grubuna giren over-relaxation yöntemlerinin kullanılmasındaki zorlukları Müller ve Losecke (1975) göstermiştir. Meijerink ve Van der Vorst (1981), doğrudan ve yinelemeli yöntemleri birleştirmişlerdir. Bu yöntem ile doğrusal sistemlerin çözümü hızlı olmakta fakat sonucun doğruluğu her zaman garanti edilememektedir.

Bu çalışmada (2.17) denkleminin çözümünde "sparse" dizey aritmetiği kullanılmıştır. Denklem sistemi "LU decomposition" (Dongarra, J.J. ve diğ. 1979) yöntemi ile çözülmüştür. Sparse aritmetikte, dizeyde sadece sıfırdan farklı değerler ve bu değerlerin satır ve sütun değerleri hafızada tutulmakta, hesaplama işlemi ise sadece bu değerler kullanılarak yapılmaktadır. Böylece, program gereksiz olan sıfır değerleri ile işlem yapmamakta ayrıca, "sparse" dizey hafızada daha az yer tuttuğundan çözüm daha hızlı bulunmaktadır.

2.3.5. Jeolojik doğrultuya dik alanların hesaplanması

Jeolojik doğrultuya dik alanların doğru hesaplanması, algoritmanın duyarlı sonuç vermesinde en önemli etkenlerdendir (Rodi, 1976). Genel olarak türevler, merkezi türetme operatörüne göre hesaplanmaktadır. Merkezi türetme operatörleri ise fonksiyonun Taylor serisine açılmasından elde edilmektedir. Weaver(1994), elektromanyetik alan fonksiyonlarının aşağı ve yukarı Taylor serisine uzanımlarını alarak, üçüncü dereceden türevleri ihmal etmiştir. Böylece bir noktadaki E- veya H-alanının türevini, o nokta ile birlikte ona komşu iki noktayı kullanarak hesaplamıştır. Bu şekilde hesaplanan türevler, iki nokta kullanılarak hesaplanan türevlerden daha hassas sonuç vermektedir. Bu çalışmada da anlatılan bu yaklaşım kullanılmıştır.

TE-modu için jeolojiye dik manyetik alanlar, H_z ve H_x aşağıdaki denklemlerle hesaplanır (Weaver, 1994,P.184-Denklem 5.107-108):

$$H_z(i, 1) = \frac{i}{w} \left[\frac{\Delta x_i}{\Delta x_{i-1}(\Delta x_i + \Delta x_{i-1})} E_y(i+1, 1) - \frac{(\Delta x_i - \Delta x_{i-1})}{\Delta x_i \Delta x_{i-1}} E_y(i, 1) - \frac{\Delta x_{i-1}}{\Delta x_i(\Delta x_i + \Delta x_{i-1})} E_y(i+1, 1) \right] \quad (2.18)$$

$$H_x(i, 1) = -\frac{i}{w} \left[\frac{2\Delta z_1 + \Delta z_2}{\Delta z_1(\Delta z_2 + \Delta z_1)} E_y(i, 1) - \frac{(\Delta z_2 + \Delta z_1)}{\Delta z_1 \Delta z_2} E_y(i, 2) + \frac{\Delta z_1}{\Delta z_2(\Delta z_2 + \Delta z_1)} E_y(i, 3) \right] \quad (2.19)$$

Yeryüzünde, TM-modunda E-alanının sadece x-yönündeki bileşeni ölçülür. Bu nedenle sadece jeoloji'ye dik elektrik alan olan E_x aşağıdaki gibi verilmiştir (bakınız: Weaver, 1994, sayfa 188):

$$\frac{E_x(i^-, 1)}{\rho(i-1/2, 3/2)} = \frac{E_x(i^+, 1)}{\rho(i+1/2, 3/2)} = \frac{H'_y(i, 1)}{\mu_0} \quad (2.20)$$

Burada

$$H'_y(i, 1) = \left[-\frac{2\Delta z_1 + \Delta z_2}{\Delta z_1(\Delta z_2 + \Delta z_1)} H_y(0) + \frac{(\Delta z_2 + \Delta z_1)}{\Delta z_1 \Delta z_2} H_y(i, 1) - \frac{\Delta z_1}{\Delta z_2(\Delta z_2 + \Delta z_1)} H_y(i, 2) \right] \quad (2.21)$$

ve $H_y(0)$, yeryüzündeki sabit manyetik alan değeridir. Jeolojiye dik doğrultudaki E- ve H- alan bileşenleri hesaplandıktan sonra (2.7) ve (2.8) denklemleri kullanılarak görünür öz direnç ve faz değerleri hesaplanır.

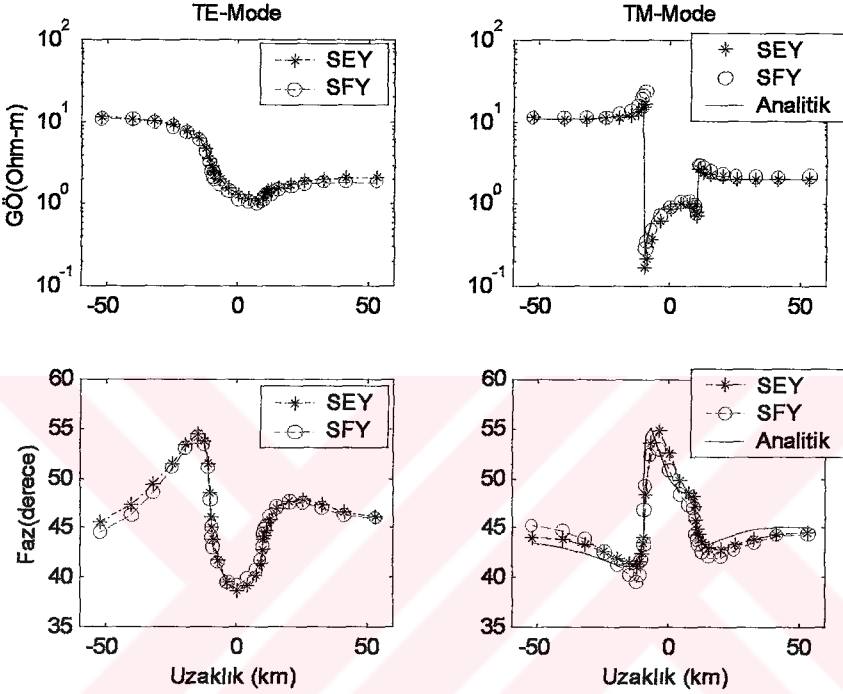
2.4. Programın Test Edilmesi

Bu çalışmada geliştirilen program, COMMEMI projesinde kullanılan 2D-0, 2D-1, 2D-2 modelleri için test edilmiş ve doğruluğu gösterilmiştir. Burada sadece 2D-0 nolu model için, analitik (Weaver ve diğ., 1985, 1986) çözüm ve Wannamaker ve diğ. (1986) tarafından SE ile yazılmış PW2D isimli programın çözümü ile karşılaştırması verilmiştir. Çözüm 0.0025 Hz frekansı için bulunmuştur. Model ile TE- ve TM-modu için öz direnç ve faz değerleri Şekil 2.5' de görülmektedir. Burada görüldüğü gibi, geliştirilen modelleme programının çözümü analitik ve SE ile elde edilen çözümlerle uyum içindedir. SE ve SF ile modelin çözümünde Wannamaker ve diğ. (1987)' nin kullandığı ağ parametreleri kullanılmıştır (Çizelge 2.1). TE modu için, sadece yarı analitik (semi-analytic) çözüm olduğundan, burada sadece SF ve SE ile çözümü verilmiştir. Ayrıca, hesaplama süresi açısından da program, PW2D isimli programdan daha hızlı çalışmaktadır. Örneğin Çizelge 2.1' deki ağ parametreleri ile altı frekans için TM- ve TE-modu düz çözüm sonuçları SF algoritması ile toplam 2.64 sn' de bulunmuştur.

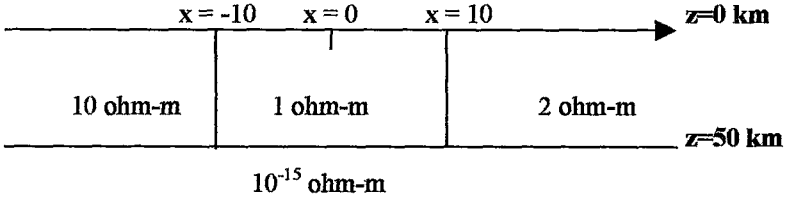
Çizelge 2.1. COMMEMI 2D-0 modeli için kullanılan ağ parametreleri

(a) x-yönünde blok sayısı ve blok kalınlıkları 36															
300000	100000	30000	15000	12000	9000	7000	5000	5000	2500	1500	750	250	250	750	2500
5000	5000	7000	9000	12000	15000	30000	100000	300000							
(b) z-yönünde blok sayısı ve blok kalınlıkları 16															
750	1250	2000	3000	5000	13500	13500	5000	3000	2000	1000	1000	5000	15000	45000	150000

(a)



(b)



Şekil 2.5. (a) TE modu için SF- ve SE- yöntemi ile hesaplanan görünür öz direnç ve faz eğrileri, TM-modu için analitik, SF- ve SE-yöntemi ile hesaplanan görünür öz direnç ve faz eğrileri. Burada çemberler bu çalışmada geliştirilen programın çözümünü, yıldızlar PW2D isimli programın çözümünü, ve sürekli eğri ise analitik çözümü göstermektedir. (b) COMMEMI 2D-0 modeli.

PW2D programı ile düz çözüm sonucu ise yaklaşık 5 sn de elde edilmiştir. Her iki program da MMX-233 işlemci bulunan PC' de çalıştırılmıştır. Burada frekans sayısının artması durumunda iki program arasındaki hız farkının üstel olarak büyüyeceği açıktır. Sonuç olarak, bu tez çalışmasında

geliştirilen düz çözüm algoritması, Wannamaker ve diğ.' nin (1987) PW2D isimli programından daha hızlı çalışmaktadır.

PW2D isimli program, ticari bir yazılım olan Geotools paket programında kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında yazılmış program geniş bir kitlenin kullanıldığı programdan daha hızlı çalışmaktadır.

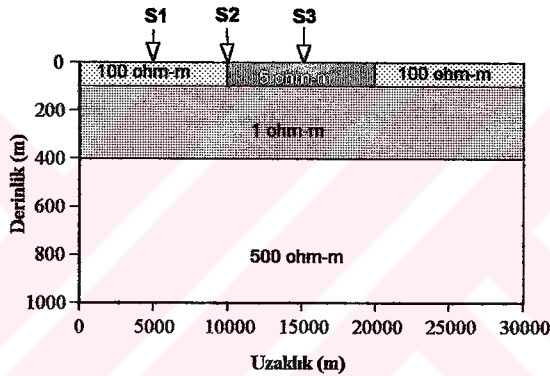
2.5. Otomatik Ağ Tasarımı

2-B ters çözüm veri işleminde, çözümün güvenilirliği ölçülen veri ile kullanılan ağın uygunluğuna bağlıdır. Ağ düzenlemesi eldeki ön bilgiye ve kullanıcının deneyimine bağlıdır. Günümüzde, MT verilerinin 2B ters çözümünü yapan programlarda ağ düzenlemesi kullanıcıya bırakılmıştır (OCCAM (deGroot-Hedlin ve Constable, 1990), RRI (Smith ve Booker, 1991), NLCG (Mackie ve diğ., 1997; Rodi ve Mackie 2001)). Bu işlem ise zaman alıcıdır. Ayrıca kullanıcıya bağlı yanılmalara (user-related error) neden olmaktadır. Örneğin, yüzeye yakın blok kalınlıklarının gereğinden büyük verilmesi, düz çözüm algoritmasının yanlış çalışmasına neden olmaktadır. Ağda kullanılan grid boyutları, arazide kullanılan frekans değerlerine bağlıdır. Çünkü, sayısal çözüm yönteminin genel olarak geçerli olabilmesi için grid hücrelerinin boyutları araştırma derinliğine (skin depth) göre küçük olmalıdır (Weaver, 1994). Bu nedenlerden dolayı ağ düzenlemesinde uzman olmayanların da kullanabileceği bir ters çözüm programının otomatik ağ düzenleyen bölümü de içermesi gerekmektedir. Otomatik ağ düzenlemesi, hem zaman kazandırıcı hem de kullanıcıdan gelecek hataları giderecek bir işlemdir.

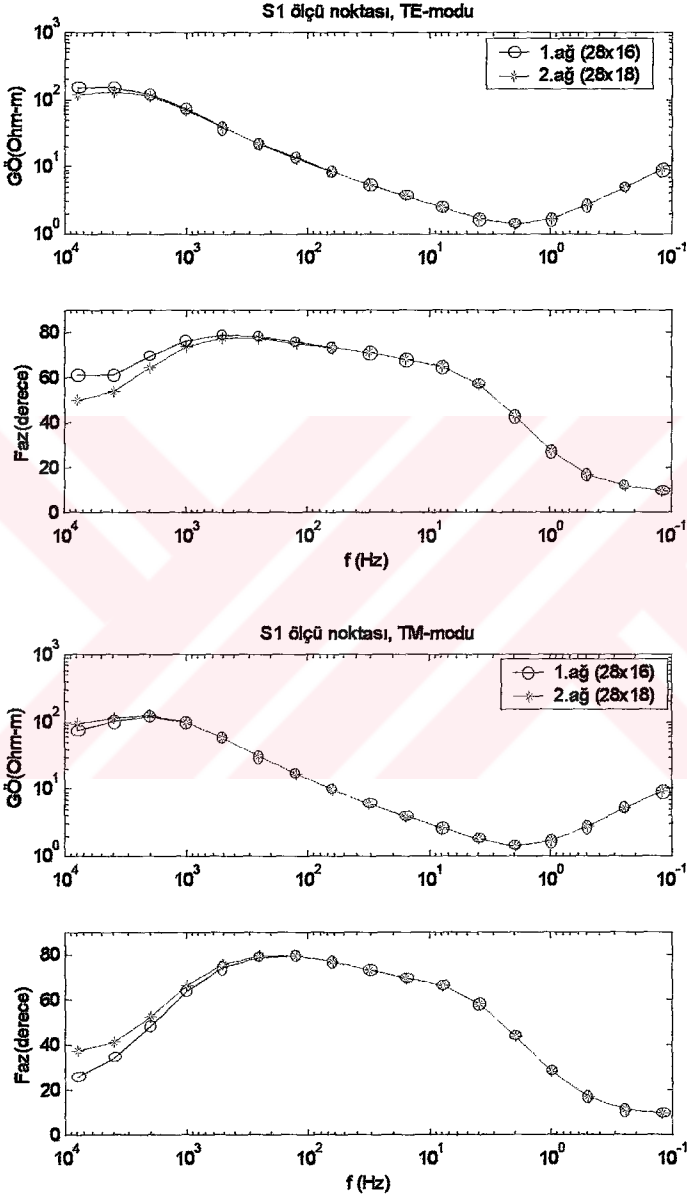
Etkin Derinlik (ED) (penetration depth) ve Niblett-Bostick dönüşümü (NBD, Niblett ve Say-Wittgenstein, 1960; Bostick 1977; Jones, 1983) gibi basit veri işlem tekniklerinden ağ düzenlemesinde yararlanılabilir. ED ve NBD, MT verilerinin hızlı yorumlanmasında kolay ve etkili yöntemlerdir. Bir profil boyunca ölçülmüş GÖ değerlerinden yararlanarak, tüm istasyonlardaki bütün frekans değerleri için ED ve NBD' leri uygulanabilir ve bu değerler kullanılarak yerinin basit bir elektrik kesiti çıkarılabilir. Burada ED ve nüfus derinliği (ND) (Skin depth) tanımları arasındaki farklılık belirtilmelidir. ED tanımında, EM dalganın sönümlenme faktörü $\frac{1}{2}$, AD tanımında ise $1/e$ katıdır (Jones, 1983). Sonuç olarak, ters çözüm yaklaşımı, ED' in altındaki yer-elektrik yapıyı bulamayacaktır. Çünkü bu derinliğin altında EM dalga çok fazla sönümlenecektir. Bundan dolayı burada, ağ düzenlemesinde ED tanımından yararlanılmıştır.

hesaplanan eğri daha durağandır. Her iki ağ arasındaki tek fark ilk tabakayı ve gömülü yapıyı oluşturan blok sayısıdır. Fakat birinci ağ ile hesaplanan verilerden elde edilen eğrilerdeki sıçramalar, ters çözümde belirti (anomaly) olarak değerlendirilebilir ve gerçekte olmayan bir yapı bulunabilir. İkinci ağ daha durağan sonuç vermesine rağmen, bu ağda da genişlik ve kalınlıklar arasında oranlarda yanlışlık olduğu gözönünde bulundurulmalıdır.

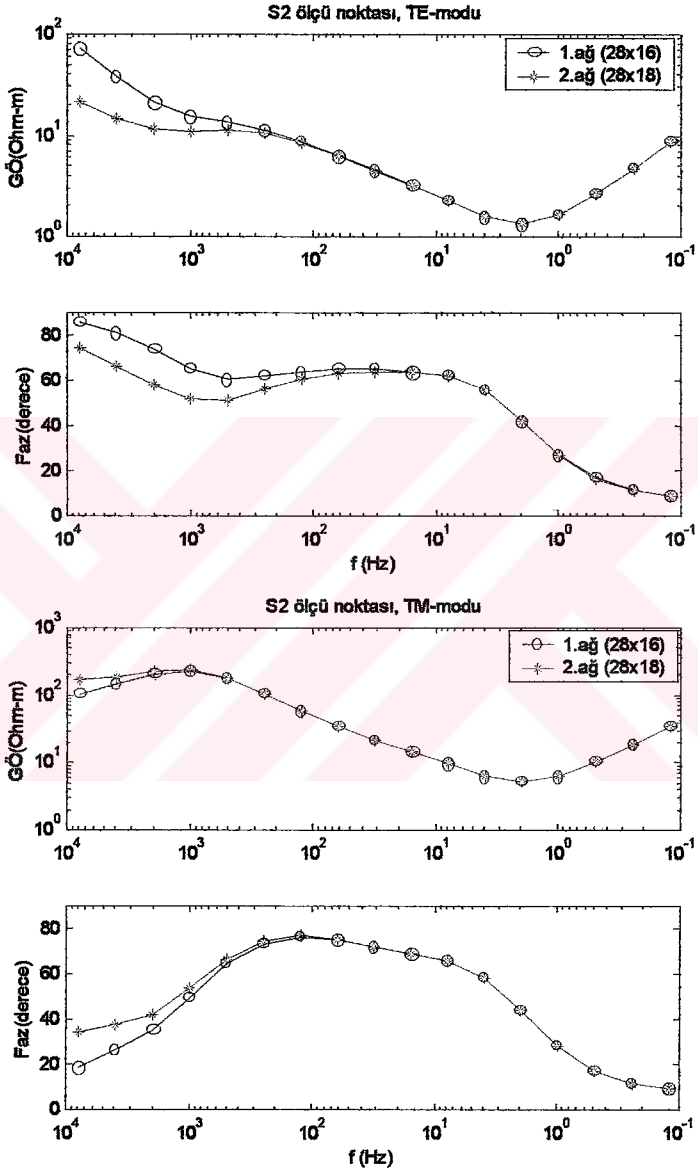
Veriye bağlı ağ düzenlemesi (VBAD) (data dependent mesh design) ile bu problemin üstesinden gelinebilir. Arazide bir profil boyunca birden fazla istasyonda ölçülen veriler kullanılarak, uygun (optimum) bir ağ, ters çözümde kullanılmak üzere düzenlenebilir. ED kavramından yararlanarak izleyen algoritma geliştirilmiştir.



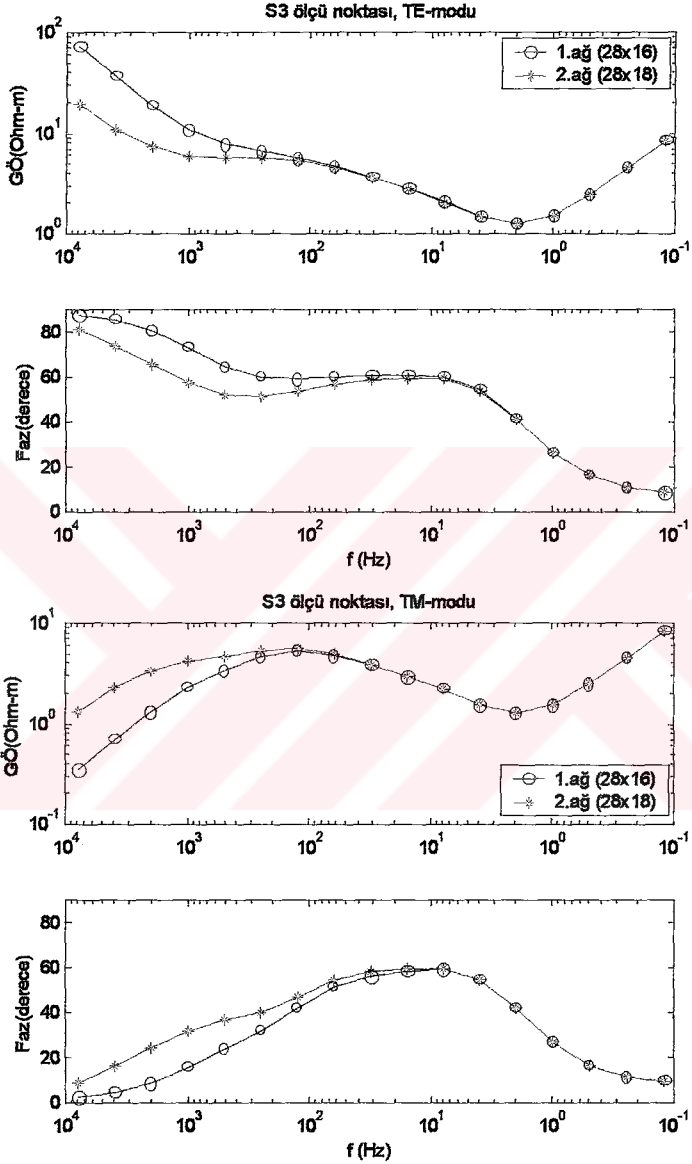
Şekil 2.6. Üç tabakalı yer-elektrik modeli.



Şekil 2.7. S1 ölçü noktasında, TE- ve TM- modu için GÖ ve faz eğrileri.



Şekil 2.8. S2 ölçü noktasında, TE- ve TM- modu için GÖ ve faz eğrileri.



Şekil 2.9. S3 ölçü noktasında, TE- ve TM- modu için $G\ddot{O}$ ve faz eğrileri.

2.5.1. Algoritma

Ters çözüm algoritmasında kullanılan giriş verisi dosyası, VBAD programı tarafından da okunabilir. Çizelge 2.3' deki gibi bir giriş verisi geliştirilmiş olan program ile okunabilir (burada bütün verilerin birimi metredir). Bu veri dosyası kullanılarak izleyen algoritma VBAD için önerilmiştir (Ulugergerli ve Candansayar 2002).

- 1 Profil verilerini oku.
- 2 Her istasyon için, görünür özdirenç ve frekansa bağlı, en küçük ED' leri hesapla.
- 3 İkinci adımda hesaplanan ED değerlerinin en büyük ve en küçük olanını at. Kalanların aritmetik ortalamasını hesapla ve bulunan değeri 6' ya bölerek en küçük kalınlık olarak al.
- 4 Her istasyon için en büyük ED' leri hesapla.
- 5 Dördüncü adımda hesaplanan ED değerlerin en büyük ve en küçük olanını at. Kalanların aritmetik ortalamasını hesapla ve en büyük kalınlık olarak al.
- 6 En büyük kalınlık ve en küçük kalınlık arasındaki blok kalınlıklarını hesapla.
- 7 İstasyonlar arasındaki topoğrafik kot farkını hesapla ve gerekli ise en küçük kalınlık değerini yeniden düzenle.
- 8 İstasyonlar arasındaki uzaklıkları hesapla. Kullanılacak en küçük derinliğe ve istasyonlar arasındaki uzaklıklara bağlı olarak, yanal yönde kullanılacak blok sayısı ve kalınlıkları hesapla.
- 9 Ağ parametrelerini ve ters çözümde sabit tutulacak blok numaralarını dosyaya yaz.

Algoritma tarafından belirlenen blokların özdirençleri genellikle ters çözüm algortimalarında aynı alınır (tek düze model). Geliştirilen program, bu çalışmada geliştirilen 2B MT ters çözüm programı, rund2dinv_nlcg (Mackie ve diğ. 1997) ve Uchida ve Ogawa' nin (1993) programları için giriş dosyası oluşturmaktadır. Fakat giriş ve çıkış dosyaları kolayca her türlü dosya formatına dönüştürülebilir.

Önceki model için hesaplanan sentetik veri kullanılarak, VBAD algoritması ile 89x31 adet blokdan oluşan ağ elde edilmiştir (Çizelge 2.4). Bu ağ, sentetik veriyi elde etmek için oluşturulan modelden (28x24 blok) büyüktür. Geliştirilen algoritmanın ters çözüm için büyük bir ağ oluşturduğu düşünülebilir. Fakat gerçek hayatta, araştırılan yer-elektrik yapı bilinmemektedir. Bundan dolayı, VBAD algoritması, ters çözüm

algoritmasının çözebileceği optimum büyüklükte hücrelerden oluşan ağ oluşturmuştur.

Çizelge 2.3. 2-B MT ters çözüm programında giriş olarak okunan temsili bir veri dosyası.

```
Title          ! project or profile title
2              ! number of station
5              !# of frequencies in following station
0 1 1          ! x ,z, external factor for static shift
.10 10 1 45 1  !frequency, apparent resistivity, error Phase of impedance,
error
1.0 20 1 40 1
10 30 1 35 1
100 10 1 30 1
100 1.0 1 35 1
4              !# of frequencies in following station
10 1 1         ! x ,z, external factor for static shift
.10 10 1 45 1
1.0 20 1 40 1
10 30 1 35 1
100 10 1 30 1
```

Çizelge 2.4. VBAD programı ile ele edilen ağ parametreleri.

a) x-yönünde(81 adet) blok kalınlıkları

```
1216418. 243284. 48657. 9731. 1946. 487. 162. 168. 503. 168.
162. 168. 503. 168. 162. 168. 503. 168. 162. 168.
503. 168. 162. 168. 503. 168. 162. 168. 503. 168.
162. 168. 503. 168. 162. 168. 503. 168. 162. 168.
503. 168. 162. 168. 503. 168. 162. 168. 503. 168.
162. 168. 503. 168. 162. 168. 503. 168. 162. 168.
503. 168. 162. 487. 1946. 9731. 48657. 243284. 1216418.
```

b) z-yönünde(31 adet) blok kalınlıkları

```
11. 13. 15. 17. 20. 20. 20. 20. 20. 20. 20. 20. 21. 21. 21. 21.
22. 22. 22. 22. 22. 23. 23. 23. 23. 23. 70. 210. 629. 1887. 9433.
```

2.6. Bölümün Sonuçları ve Tartışma

Bu tez çalışmasında, SF yöntemi ile 2-B modelleme çözüm algoritmasının, SE' lar ile çözüm bulan algoritmalarından daha hızlı olduğu gösterilmiştir. Çözüm gücünün ise hemen hemen her iki yöntemde de aynı olduğu gösterilmiştir.

MT yönteminde 2-B modelleme yaparken en önemli nokta ağ düzenlemesidir. Pratikte kullanılan algoritmaların çoğunda ağ düzenlemesi kullanıcıya bırakılmıştır. Ağ düzenlemesinde deneyimli olmayan bir kullanıcının yanlış hesaba neden olabilecek ağ düzenleyebileceği gösterilmiştir. Daha sonra ölçülen GÖ değerleri ve etkin derinlik kavramlarından yararlanarak otomatik ağ düzenleyen bir algoritma tanıtılmıştır. Bu algoritma ile kullanıcıdan gelen hatalar (user-related error) elimine edilmiştir.

Modelleme, bir ters çözüm algoritmasının doğru çalışmasında en önemli bölümdür. MT verilerinin 2-B ters çözümü ise uzun zaman almaktadır. En çok zaman alan bölüm ise düz çözüm algortimasında genel dizey denkleminin çözümü ve kısmi türevler dizeyinin (Jacobian matrix) hesaplanmasıdır. Bunun için dizey denkleminin çözümünde kullanılacak yöntem önemlidir. Şu anda kullanılan hızlı ve duyarlı yöntem "sparse dizey" ler içinde kullanılabilen "LU decomposition" yöntemidir. Diğer bir yöntem ise eşlenik türev yöntemidir.

Sonuç olarak 2-B modellemede araştırılacak konular daha duyarlı sonuç elde etmek için yeni ağ düzenleme yöntemlerinin ve genel dizey denkleminin hızlı ve duyarlı çözümünü bulan algoritmaların bulunmasıdır. Bu tez çalışmasında da bu iki konuda gelişme sağlanmıştır.

3. MANYETOTELLÜRİK VERİLERİN İKİ-BOYUTLU TERS ÇÖZÜM

3.1. Giriş

Jeofizik yöntemlerin çoğunda olduğu gibi MT' de de ters çözüm problemi doğrusal değildir ve kötü-durumludur (ill-posed). Bu nedenle, MT verilerinin ters çözümünde çoğunlukla “Yinelemeli-Doğrusallaştırılmış” (YD) (iterated-linearized) yöntemler kullanılır (Rodi ve Mackie, 2001). Yani model bağıntısı, bir ön-kestirim modeli için hesaplanan model cevabı için Taylor serisine açılarak, ikinci ve daha yüksek dereceden türev içeren terimler ihmal edilir. Elde edilen doğrusallaştırılmış ters çözüm problemi çözümlür. Çözüm sonucu, yeni ön-kestirim modeli olarak alınır ve aynı işlem tekrarlanır.

MT verilerinin ters çözümünde genel olarak kullanılan üç tip YD ters çözüm tekniği vardır. Bunlar, Levenberg-Marquardt veya “ridge-regression” olarak da bilinen sönümlü en-küçük kareler (SEKK) (damped least-squares), yuvarlatılmış sönümlü en-küçük kareler (YSEKK) (OCCAM-Smoothness Constraint inversion) ve Tikhonov düzgünleyicisi (Tikhonov regularization) yöntemleridir. Ters çözüm işleminde verilerin parametrelere göre kısmi türevlerini içeren dizeyin devriği ile kendisinin çarpımı sonucu, çoğunlukla tekil değerler içeren bir dizey elde edilir. Yukardaki ters çözüm teknikleri arasındaki tek fark, tekil değerler içeren bu dizeyin tersini bulabilmek için bu dizeye eklenen terimin farklı olmasıdır. Örneğin SEKK tekniğinde, bir sönüm faktörü (damping factor) kullanılır. YSEKK yönteminde ise bir yuvarlatma dizeyi (smoothing matrix) kullanılır. Tikhonov düzgünleyicisi yönteminde ise sönüm faktörüne benzeyen bir durağanlaştırıcı parametre ile bir durağanlaştırıcı kullanılır.

MT verilerinin bir-boyutlu (1-B), iki-boyutlu (2-B) ve üç-boyutlu (3-B) ters çözümü konusunda yapılan çalışmalar izleyen şekilde özetlenebilir. 1-B yer modeli için Jupp ve Vozoff (1975a,b) SEKK yöntemini kullanmıştır. Constable ve diğ. (1987) ve Smith ve Booker (1988) ise YSEKK kullanmışlardır.

Jupp ve Vozoff (1977), Zhang ve Hobbs (1992) SEKK yöntemini 2-B yer elektrik modelinin çözümünde kullanmışlardır. Gupta ve diğ. (1999) ise uygulamalarında ters çözüme Hessian dizeyini de katmışlardır. Sasaki (1989) YSEKK ile MT ve doğru akım öz direnç verilerinin 2-B birleşik ters çözümünü yapmıştır. deGroot-Hedlin ve Constable (1990), Smith ve Booker (1991) YSEKK ile MT verilerinin 2B ters çözümünü yapmıştır. Uchida

(1993, 1997) YSEKK ters çözümünde ABIC (Akaike's Bayesian Information Criterion) en küçüklemesini kullanmıştır. 2-B yer modelinin Tikhonov düzünleyicisi yöntemi ile ters çözümünü ise Madden ve Mackie (1989), Rodi (1989), deLugao ve diğ. (1997), Sipirunvaraporn ve Egbert (2000), Rodi ve Mackie (2001) yapmıştır.

Mackie ve Madden (1993) 3-B yer elektrik modeli için ters çözümü Newton (1995) ve Newton ve Alumbaugh' nun (1997) "crosswell EM veri" için uyguladıkları SEKK yöntemini kullanarak yapmışlardır. Fakat, 3B EM verilerinin ters çözüm algoritmaları ile çözülmesi çok zaman alıcı ve zahmetlidir. Bunun yerine daha çok "quasi-analytic" ve "quasi-linear" ters çözüm algoritmaları kullanılmaktadır (Zhdanov ve Fang 1996, Haber ve diğ. 1999a ve 1999b, Alumbaugh 2000, Alumbaugh ve Newman 2000, Zhdanov ve diğ. 2000, Zhdanov ve Hursan 2000).

Genel olarak kullanılan tüm doğrusallaştırılmış ters çözüm algortimalarında, durağanlaştırıcı (stabilizer) olarak, Tikhonov doğrusallaştırma algoritmasında model parametrelerinin (deLugao ve diğ. 1997, Mackie ve diğ. 1997) veya YSEKK' lerde olduğu gibi parametrelerin Laplacian' lerinin minimum normu (Constable ve diğ. 1987, Smith ve Booker 1988, Zhdanov ve Fang 1996) kullanılmıştır. MT yöntemi dışında gravite ve manyetik verilerinin ters çözümü için önerilen "Minimum Support (MS)" (Last ve Kubik, 1993) ve "Minimum Gradient Support (MGS)" (Portniguanni ve Zhdanov 1999) durağanlaştırıcılarının, MT verilerinin 2-B ters çözümünde ne kadar iyi sonuç vereceği bilinmemektedir. Ramos ve diğ. (1999)' un önerdiği "first order minimum entropy" (MinEnt-1)) durağanlaştırıcısının çözüm gücü ise diğer durağanlaştırıcıları ile karşılaştırılmamıştır. Yine, bu durağanlaştırıcıların birbirine göre farklılıkları doğrusal olmayan problemlerin ters çözümü için, tam olarak bilinmemektedir. Bu çalışmada genel olarak önceden önerilen ve kullanılan durağanlaştırıcılar ile yeni önerilmiş fakat MT verilerinin ters çözümünde kullanılmamış durağanlaştırıcıların çözüm güçleri araştırılmıştır. Sonuçta, MT verilerinin 2B ters çözümünde kullanılacak en uygun durağanlaştırıcı belirlenmiştir.

Ters çözüm algoritmalarının en çok zaman alan bölümü duyarlılık (sensitivity) düzeyi olarak da bilinen ve ölçülen verilerin bilinmeyen parametrelere göre kısmi türevlerini içeren "Jacobian" düzeyinin hesaplanması ve parametre fonksiyonelinin (parametrik functional) çözümüdür. İlk ters çözüm algoritmalarında daha çok en-küçük karelerin tekil değer ayrışımı ile (least-squares solution with singular value decomposition- LSSVD) çözümü kullanılmaktaydı (Jupp ve Vozoff 1977,

Constable ve diğ. , 1987, 1990). Günümüzde daha çok düzey denkleminin tersini almadan çözüm bulan “eşlenik türev” (conjugate gradient - CG) algoritması kullanılmaktadır. Rodi ve Mackie (2001), doğrusal olmayan CG (non-linear conjugate gradient- NLCG) çözüm yönteminin, Gauss-Newton yineleme tekniğinden daha iyi sonuç verdiğini göstermişlerdir. Fakat, LSSVD algoritması ile CG algoritmaları birbirlerine göre çözüm gücü açısından karşılaştırılmamıştır.

Bu bölümde önce genel olarak ters çözüm problemi tanıtılacaktır. Daha sonra, düzgünleştiricili ters çözüm teknikleri genel tanımdan elde edilecek ve birbirlerine göre farklılıkları gösterilecektir. Düzgünleştiricili ters çözüm algoritmalarında, diğer jeofizik yöntemlerin ters çözüm probleminde kullanılan durağanlaştırıcılar da tanıtılacaktır. Daha sonra ters çözümde tanımlanan parametre fonksiyonelinin CG ve LSSVD algoritmaları ile çözümü anlatılacaktır.

3.2. Ters Çözüm

Jeofizik veri işleminde kullanılan geleneksel yaklaşım, tanımlanan farklı jeolojik modeller için kuramsal jeofizik verileri hesaplamak ve ölçülen veri ile karşılaştırmaktır. Bir jeolojik modeli tanımlayan model parametrelerinden, jeofizik veriyi hesaplama işlemine düz çözüm (forward modelling) denir. Düz çözüm problemi genel olarak tektir (unique). Başka bir deyişle, farklı modeller aynı kuramsal veriyi üretmemektedir.

Jeofizik araştırmanın son aşaması, jeofizik veriden jeolojik yapıyı belirlemektir. Yeriçi karmaşık olduğundan bu işlem zordur. Genel olarak, ölçülen jeofizik veriden fiziksel parametrelerin hesaplanması işlemi ters çözüm (inversion, inverse modeling) olarak tanımlanır. Düz ve ters çözüm yapabilmek için, jeofizik veri ile jeolojik modeli tanımlayan fiziksel parametreleri ilişkilendiren bir model bağıntısına gereksinim vardır.

Düz ve ters çözümü daha açık göstermek için aşağıdaki bağıntıyı ele alalım:

$$d = f(m) \quad (3.1)$$

Burada, m model parametrelerini, f düz çözüm operatörünü ve d ise veri' yi ifade etmektedir. Denklem (3.1)' den d' yi hesaplama işlemi düz çözümdür. Bu denklemden m

$$m = f^{-1}(d) \quad (3.2)$$

ile çözülebilir ve bu işlem ters çözüm olarak tanımlanır. Elektromanyetik alan denklemlerinin (3.2) ile çözümünü “inverse scattering problem” olarak bilinir (Tarantola 1987).

Ters çözüm probleminde üç önemli sorun ile karşılaşılır. Bunlar, problemin çözümünün olması, varlığı, tamlığı ve durağanlığıdır.

Fiziksel görüşe göre, yerinin jeolojik yapısı incelendiğinden, bir çözümde edilebilir. Matematiksel görüşe göre ise, ölçülen veri ile uyuşan tek bir sayısal model yoktur (Tarantola 1987, Zhdanov 1993, Haber 1996, Hansen 2001).

Çözümün tam olmaması (non-uniqueness) aşağıdaki eşitlik ile gösterilebilir:

$$f(m_1, s_1) = f(m_2, s_2) = d_0.$$

Burada birbirinden farklı m_1 ve m_2 modelleri ve s_1 ve s_2 kaynakları tanımlanmıştır. Eğer her iki model içinde aynı d_0 verisi elde ediliyorsa, bu veri ile bu iki modeli birbirinden ayırmak mümkün değildir. Yani çözüm tek değildir.

Son sorun durağanlık ise, ters çözüm kuramında önemli bir sorundur. Gerçekte, jeofizik veri her zaman gürültü (δd) içermektedir. Örneğin iki farklı model m_1 ve m_2 ile bunlardan iki farklı veri d_1 ve d_2 'yi oluşturan s_1 ve s_2 kaynakları olsun. Bu şematik olarak aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$f(m_1, s_1) = d_1 \quad \text{ve} \quad f(m_2, s_2) = d_2.$$

Bu iki model ve kaynak birbirinden çok farklı iken veriler arasındaki fark hata seviyesinde olabilir

$$\|\delta m\| = \|m_1 - m_2\| \gg C, \quad \|\delta s\| = \|s_1 - s_2\| \gg C,$$

$$\|\delta d\| = \|d_1 - d_2\| \ll \varepsilon, \quad C \gg \varepsilon$$

burada $\|\dots\|$ normu veya modeller ve veriler arasındaki farklılığı göstermektedir. Burada da, her iki modeli ölçülen veri ile ayırt etmek olanaksızdır ve bu nedenle problem durağan değildir denir.

Ünlü fransız matematikçi Hadamart (1923), yukarda verilen üç sorunun cevabının olumlu olması durumunda, matematiksel problemin bir bağıntı ile tanımlanabileceğini savunmuştur. Başka bir deyişle eğer problemin çözümü varsa (existence), tek bir çözüm varsa (uniqueness) ve çözüm durağansa (stable), matematik problem iyi-durumludur (well-posed). Çözüm yoksa veya çözüm tek değilse (nonunique) yada verideki küçük değişimler, çok farklı modellerin bulunmasına neden oluyorsa (unstable), problem kötü-durumludur (ill-posed). Hadamard'a (1923) göre kötü-durumlu problemler fiziksel veya matematiksel olarak anlamlı değildir.

Hadamart (1923), kötü-durumlu problemlerin sayısal çözümünü ele almamış ve kötü-durumluluğun yanlış fiziksel gösterimden kaynaklandığını savunmuştur. Fakat, matematiksel fizik ve doğal bilimlerin çoğunda olduğu gibi, jeofizik problemlerin büyük çoğunluğu da kötü-durumludur ve bir çözüm bulunabilir. Ne yazık ki bu görüşü yanlıştır. Kötü-durumlu problemler fiziksel ve matematiksel olarak anlamlıdır ve çözülebilirler (Tarantola 1987). Bu problemlerin sayısal çözümünü ilk ele alan, Rus matematikçi Tikhonov olmuştur. Tikhonov kötü-durumlu bir problemin, iyi-tanımlı birkaç problemin birleştirilmesinden oluştuğu esasına dayanan, düzgünleştirme kuramını (regularization theory) tanıtmıştır.

3.2.1. Sönümlü En Küçük Kareler Yöntemi

Jeofizik problemler genel olarak doğrusal değildir ve arazide ölçülen veri her zaman bir gürültü içerdiğinden, ölçülen ve kuramsal verinin tam olarak çakışması istenmez. Ölçülen verinin kalitesi oranında çakışma olması istenir. Bu nedenle bir hata (e) her zaman vardır. d , ayrı noktalarda farklı frekanslar için ölçülmüş verileri içeren ($N \times 1$) boyutlu sütun vektör (MT için görünür öz direnç ve empedans fazı), f , düz çözüm operatörü ve m ise model parametrelerini içeren (2-B MT problemi için blok öz dirençleri) ($M \times 1$) boyutlu sütun vektör olsun. Ölçülen veriler ile, kuramsal olarak hesaplanan veriler arasındaki farkı 'hata' olarak aşağıdaki gibi tanımlayabiliriz

$$e = d - f(m) . \quad (3.3)$$

Bu denklemden model parametrelerinin çözümünü bulabilmek için, model fonksiyonu gerçek modele çok yakın önkestirim modeli (m^0) için Taylor serisine açılarak aşağıdaki gibi doğrusallaştırılabilir

$$f(\mathbf{m}) = f(\mathbf{m}^0) + \left\{ \sum_{j=1}^M \frac{\partial f(\mathbf{m}^0)}{\partial m_j} \right\}_{\mathbf{m}=\mathbf{m}^0} (\mathbf{m} - \mathbf{m}^0) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f(\mathbf{m}^0)}{\partial \mathbf{m}^2} (\mathbf{m} - \mathbf{m}^0)^2 + \dots (3.4)$$

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

$$\Delta \mathbf{d} = \mathbf{d} - f(\mathbf{m}^0), \quad \mathbf{A} = \left\{ \sum_{j=1}^M \frac{\partial f(\mathbf{m}^0)}{\partial m_j} \right\}_{\mathbf{m}=\mathbf{m}^0} \quad \text{ve} \quad \Delta \mathbf{m} = \mathbf{m} - \mathbf{m}^0$$

kısaltmaları kullanılarak (3.4) denklemi, (3.3) denkleminde yerine konursa

$$\mathbf{e} = \mathbf{d} - f(\mathbf{m}) = \Delta \mathbf{d} - \mathbf{A} \Delta \mathbf{m} \quad (3.5)$$

elde edilir. Bu denklemde, $\Delta \mathbf{d}$ ölçülen ve kuramsal veriler arasındaki farkı içeren sütun vektör, $\Delta \mathbf{m}$ model parametreleri ile önkestirim parametreleri arasındaki farkları içeren ve bilinmeyen parametreleri değiştirim (düzeltme) vektörü ve $\mathbf{A}$ ise "Jacobian" veya duyarlılık olarak isimlendirilen ve verinin önkestirim parametrelerine göre kısmi türevlerini içeren $(N \times M)$ boyutlu dizeydir. $\mathbf{A}$ dizeyi, parametrelerin değişiminden herbir verinin ne oranda etkilendiğini verir.

Denklem (3.5)' den $\Delta \mathbf{m}$ ' nin çözümünün bulunmasında, ölçülen ve kuramsal verilerin aralarındaki farklılığı (mesafeyi) veren ve aşağıdaki gibi tanımlanan MISFIT fonksiyoneli kullanılır

$$\phi(\mathbf{m}, \mathbf{d}) = \|\mathbf{d} - f(\mathbf{m})\|^2 = \|\Delta \mathbf{d} - \mathbf{A} \Delta \mathbf{m}\|^2 = \mathbf{e}^T \mathbf{e} . \quad (3.6)$$

Bu tür problemlerin çözümünde kullanılan genel yöntem (3.6) denkleminin, $\Delta \mathbf{m}$ ' ye göre türevini sıfıra eşitlemektir

$$\partial \phi(\mathbf{m}, \mathbf{d}) = \delta(\mathbf{e}^T \mathbf{e}) = \partial [(\Delta \mathbf{d} - \mathbf{A} \Delta \mathbf{m})^T (\Delta \mathbf{d} - \mathbf{A} \Delta \mathbf{m})] = 0 . \quad (3.7)$$

Burada " ∂ " türev operatörüdür. Sadeleştirmeler sonucu (3.7) denkleminin $\Delta \mathbf{m}$ ' nin çözümü

$$\Delta \mathbf{m} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \Delta \mathbf{d} \quad (3.8)$$

şeklinde elde edilir. Bu çözüm, doğrusal olmayan problemlerin Gauss-Newton veya en-küçük kareler (non-linear least-squares) çözümü olarak bilinir. Doğrusal olmayan problemlerin çözümü genel olarak yinelemeli (iterative) yapılır. Yinelemeli çözümde bir ön-kestirim modeli (a priori model) ile işleme başlanır. Bu model için (3.8) denkleminin çözümünden model parametrelerine yaklaştırma değeri bulunur aşağıdaki gibi önkestirim modeline eklenir:

$$\mathbf{m}_{i+1} = \mathbf{m}_i + \Delta \mathbf{m}_i .$$

Denklem (3.8)' de $(\mathbf{A}^T \mathbf{A})'$ nın tekil değerler içermesinden dolayı tersi alınamayabilir. Bu dizeyin tekilliğini yok etmek için $(\mathbf{A}^T \mathbf{A})$ dizey çarpımının köşegen değerlerine, sönüm faktörü (λ) (damping factor-Lagrange Multiplier) olarak bilinen bir gerçel sayı eklenir:

$$\Delta \mathbf{m} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{A}^T \Delta \mathbf{d} . \quad (3.9)$$

Bu denklem ise doğrusal olmayan problemlerin Levenberg-Marquard (ridge-regression) (Levenberg 1944, Marquardt 1963,1970) veya SEKK çözümü olarak bilinir. Sönüm faktörünün belirlenmesi ile ilgili birçok yöntem önerilmiştir (Jupp ve Vozoff 1975, Meju 1994, Oristaglio ve Worthington 1980). Bu yöntem hakkında daha geniş bilgi için Lines ve Treitel (1984), Menke(1989), Dimri(1992) ve Meju' ya (1994) bakılabilir.

3.2.2. Yuvarlatılmış En-Küçük Kareler (YEKK)

Denklem (3.6)' nın çözümünde diğer önerilen yöntem "OCCAM" olarak da bilinen YEKK yöntemidir. Bu yöntemi ilk öneren ve 1-B MT ve doğru akım öz direnç verilerine uygulayan Constable ve diğ. (1987) olmuştur. Yöntem, elektrik ve elektromanyetik verilerin 2- ve 3-B ters çözümünde çeşitli araştırmacılar tarafından kullanılmıştır (Sasaki 1989, deGroot ve Constable 1990, Smith ve Booker 1991, Zhdanov ve Fang 1996). Bu yöntemde aşağıdaki gibi tanımlanan fonksiyonel en küçüklenmeye çalışılır

$$P(\lambda, \mathbf{m}) = \phi(\mathbf{m}, \mathbf{d}) + \lambda \|\nabla \mathbf{m} \cdot \nabla \mathbf{m}\|^2 = \|\mathbf{f}(\mathbf{m}) - \mathbf{d}\|^2 + \lambda \|\nabla^2 \mathbf{m}\|^2 . \quad (3.10)$$

Burada $\phi(\mathbf{m}, \mathbf{d})$, MISFIT, λ sönüm faktörü ve ∇^2 Laplacian operatörüdür. Bu denklemde parametrelerin Laplacian' lerini açıklamak için 2-B bir

model ele alalım. Bu model üzerinde herhangi bir blok parametresi, m_j ve bunun sol, sağ, üst ve altındaki dört blok parametreleri ise sırasıyla m_j^{sol} , $m_j^{\text{sağ}}$, $m_j^{\text{üst}}$ ve m_j^{alt} olsun. Bu m_j parametresi etrafındaki özdeşleşmelerin kabaca değişimi aşağıdaki gibi verilebilir:

$$\tilde{m}_j = \alpha_j (\partial m_j^{\text{sol}} + \partial m_j^{\text{sağ}} - 4\partial m_j + \partial m_j^{\text{üst}} + \partial m_j^{\text{alt}}). \quad (3.11)$$

Burada, α_j gradyen çarpanıdır (gradien amplifying factor) ve ampirik olarak hesaplanır. Parantez içindeki terim ise 2-B Laplacian' ın ayrık 5-noktalı yaklaşımıdır ve sürekli fonksiyonun kabalık (roughness) özelliğini göstermektedir (Sasaki 1989). Denklem (3.11) düzey formunda aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\partial \tilde{m} = C \partial m. \quad (3.12)$$

Burada C ($M \times M$) boyutunda, değerleri α_j , $4\alpha_j$ veya 0 olan kare dizeydir ve “roughening operator” olarak bilinir. Bu durumda (3.10) denklemini, (3.12) denkleminde kullanılır ve bunun parametrelere göre türevi alınarak sıfıra eşitlenirse, parametreleri düzeltme vektörü aşağıdaki gibi bulunur:

$$\Delta m = (A^T A + \lambda C^T C)^{-1} A^T \Delta d. \quad (3.13)$$

OCCAM ters çözümü ile yuvarlatılmış bir model elde edilir. Fakat, yöntem bazı durumlarda gereksiz olarak ayrımlılığı azaltmakta ve beklenmeyen hatalara neden olmaktadır (Ramos ve diğ. 1999, Zhdanov 2002).

C dizeyi ikinci dereceden türev operatörü (2-B Laplacian) olmasına karşın, operatör değerleri bloğun düşey ve yatay yöndeki boyutlarına bağlı olarak ölçeklenmiştir. Eğer blok dikdörtgen ve x -yönündeki boyutu z -yönündeki boyutundan büyükse ($dx > dz$), bu blok' un üst ve altındaki bloklarla olan ilişkisi, sol ve sağındaki bloklarla olan ilişkisinden daha sıkı olacaktır (Uchida 1993). Bu çalışmada C dizeyi aşağıdaki gibi alınmıştır:

$$C = \begin{bmatrix} c_{01} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \dots 0 & c_{14} & 0 & 0 & 0 & \dots 0 \\ c_{22} & c_{02} & c_{23} & 0 & 0 \dots 0 & 0 & c_{24} & 0 & 0 & \dots 0 \\ 0 & c_{32} & c_{03} & c_{33} & 0 \dots 0 & 0 & 0 & c_{34} & 0 & \dots 0 \\ c_{41} & 0 & c_{42} & c_{04} & c_{43} & 0 & 0 & 0 & c_{44} & \dots 0 \\ \vdots & & & & \ddots & & & & & \\ \vdots & & & & & \ddots & & & & \\ 0 & & & & & c_{M1} & 0 \dots 0 & c_{M2} & c_{0M} & \dots 0 \end{bmatrix}_{M \times M}$$

Burada, dx ve dz i- ninci blok' un x- ve z-yönündeki boyutları olmak üzere:

$$c_{11} = c_{14} = \frac{dx}{2(dx + dz)} \quad \text{ve} \quad c_{12} = c_{13} = \frac{dz}{2(dx + dz)}$$

dir (Uchida 1993). Ana köşegen değerleri ise her satırda sıfırdan farklı değerlerin toplamının eksi işaretlisine eşittir ve aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$c_{0i} = -(c_{i1} + c_{i2} + c_{i3} + c_{i4}) .$$

M adet blokdan oluşan bir model için C dizeyinin boyutu $M \times M$ ' dir.

2.2.3. Tikhonov Düzgünleyicisi

Doğrusal olmayan problemlerin en-küçük kareler ile çözümü, MISFIT fonksiyonelinin en küçüklenmesi ile elde edilmektedir (denklem (3.8)). Fakat bu çözüm genelde ölçülen verideki küçük değişimlerden çok fazla etkilenmektedir. Yani kötü-durumlu problemlerin durağan-olmama özelliğinden dolayı, bu çözüm her zaman doğru sonucu vermemektedir. Özellikle, $(A^T A)$ matrisinin tekil olması, gerçekçi olmayan sonuçların bulunmasına neden olmaktadır.

Yukardaki nedenlerden dolayı kötü-durumlu problemlerin çözümünde MISFIT fonksiyoneli yerine Tikhonov (Tikhonov ve Arsenin 1977) aşağıdaki fonksiyoneli önermiştir

$$P^\alpha(m, d) = \phi(m, d) + \alpha S(m) . \quad (3.14)$$

Burada $P^\alpha(\mathbf{m}, \mathbf{d})$, Tikhonov parametrik fonksiyoneli olarak da bilinen genel fonksiyoneli (global objective functional), $\phi(\mathbf{m}, \mathbf{d})$, MISFIT fonksiyoneli, $S(\mathbf{m})$, durağanlaştırıcı fonksiyoneli (stabilizing functional) veya model fonksiyoneli (model objective functional) ve α ise düzgünleyici parametresi (regularization parameter) veya "penalty parameter" olarak da bilinen gerçel bir sayıdır. Yöntemin temel felsefesi, tek bir kötü-durumlu problem yerine bunu temsil eden birden fazla iyi-tanımlı problemin çözümünü aramaktır.

α ve $S(\mathbf{m})$ 'nin farklı tanımları ilerdeki bölümde anlatılacaktır. Burada aşağıdaki gibi durağanlaştırıcı fonksiyoneli ele alınsın:

$$P^\alpha(\mathbf{m}, \mathbf{d}) = \phi(\mathbf{m}, \mathbf{d}) + \alpha \|\mathbf{m} - \mathbf{m}_{\text{apr}}\|^2. \quad (3.15)$$

Burada, $\mathbf{m}$, model parametrelerini, $\mathbf{m}_{\text{apr}}$ aynı arazideki diğer jeofizik ve jeolojik çalışmalardan elde edilen bilgilere göre elde edilmiş bir önkestirim (a priori) modelini göstermektedir. Denklem (3.15)'in en-küçüklenmesi ile parametre değiştirim vektörü aşağıdaki gibi çözülür:

$$\Delta \mathbf{m} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \alpha \mathbf{I})^{-1} (\mathbf{A}^T \Delta \mathbf{d} + \alpha \mathbf{m}_{\text{apr}}). \quad (3.16)$$

3.3. Ters Çözüm Algoritmalarının Genel Gösterimi

Şimdiye kadar anlatılan üç ters çözüm algoritmasının genel formu

$$P^\alpha(\mathbf{m}, \mathbf{d}) = \phi(\mathbf{m}, \mathbf{d}) + \alpha S(\mathbf{m}) = \|\mathbf{f}(\mathbf{m}) - \mathbf{d}\|^2 + \alpha S(\mathbf{m}) \quad (3.17)$$

şeklinde dir. Bu fonksiyonelde eğer $\alpha = \lambda$ ve $S(\mathbf{m}) = \|\mathbf{m}\|^2$ alınırsa ve en küçüklenirse (minimization), denklem (3.9) ile verilen SEKK çözümü elde edilir. Aslında Tikhonov düzgünleyicisi ile SEKK yöntemlerinin çözümü eşdeğerdir (Dimri 1992). Aynı şekilde $\alpha = \lambda$ ve $S(\mathbf{m}) = \|\nabla^2 \mathbf{m}\|^2$ alınırsa denklem (3.11) ile verilen Occam ters çözümü elde edilir. Yine bu denklemde $S(\mathbf{m})$ fonksiyonelinin farklı tanımları için farklı ters çözüm algoritmaları elde edilir. Bu gelecek bölümlerde gösterilecektir.

Önceki bölümlerde anlatılan algoritmalarda genel amaç, kötü-durumlu problemin çözümünde tekil değerleri içeren dizeyin tersinin alınabilmesidir. Bu amaç için, bu dizeyin köşegen değerlerine bir katsayı eklenmektedir. Eklenen bu terim problemin çözümünü düzenleyecektir (durağanlaştıracak). Bu üç yöntemde temelde doğrusallaştırılmış ters çözüm yöntemleridir (linearized solution methods). Fonksiyonelin genel formu konusunda Farquharson ve Oldenburg (1998), Haber (1997), Haber ve diğ. (1999)' e bakılabilir. Sasaki (2001), genel fonksiyoneli, MISFIT ile "OCCAM" ve L2-norm durağanlaştırıcılarının toplamını genel fonksiyonel olarak tanımlamıştır.

Genel olarak bu algoritmalarındaki sorunlardan birisi SEKK ve YSEKK yöntemindeki λ ve Tikhonov düzgünleyicisindeki α olarak verilen gerçel sayının belirlenmesidir. Diğer bir sorun ise denklemlerin çözümünde kullanılacak algoritmadır. LSSVD ve CG kullanılan başlıca algoritmalaradır. Bu konular ilerdeki bölümlerde anlatılacaktır.

3.4. Ağırlıklı Ters Çözüm

Pratikte, bazı ölçü değerleri diğerlerine göre daha az gürültülü olabilir. Yine bazı parametrelerin çözümü veriye çok duyarlı olmasına karşın diğerleri daha az duyarlı olabilir. Bu durumda MISFIT fonksiyoneline ağırlık vermek gerekir. Bu aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$\phi(\mathbf{m}) = \|\mathbf{W}_d \mathbf{f}(\mathbf{m}) - \mathbf{W}_d \mathbf{d}\|_D^2. \quad (3.18)$$

Burada $\mathbf{W}_d$, (NxN) boyutlu veri ağırlık dizeydir (data weighting matrix). Genel olarak verideki hata oranı bilindiğinde, her veri için ağırlık verilebilir. Verilerdeki hataların birbirinden bağımsız olduğu varsayılarak, ölçülen verinin hata tahminlerinin tersi $\mathbf{W}_d$ ' nin köşegen değerleri olarak alınabilir (Sasaki 1989).

Model parametreleri ağırlık dizeyi olarak, veri değişiminin (∂d) parametre değişimine (∂m) oranı olarak tanımlanan toplam duyarlılık (integrated sensitivity) kullanılabilir (Dimitriev 1990, Zhdanov 2002). Verinin toplam değişimi,

$$\|\delta d\| = \sqrt{\sum_i (\partial d_i)^2} = \sqrt{\sum_i (A_{ik})^2} \partial m_k$$

ile verilir. Buradan toplam duyarlılık S_k

$$S_k = \frac{\|\partial d\|}{\partial m_k} = \sqrt{\sum_i (A_{ik})^2}$$

ile hesaplanır. burada A_{ik} , kısmi türevler dizeyinin elemanlarıdır. S_k 'nın parametre numarasının k ' ya bağlı olduğu görülmektedir. Farklı parametrelere göre verinin duyarlılığı farklı olacaktır. Çünkü, ölçü sırasında farklı parametrelerin ölçüye etkisi farklı orandadır. Elemanları S_k dan oluşan köşegen dizey, toplam duyarlılık dizeyi olarak (integrated sensitivity matrix) tanımlanır ve aşağıdaki gibi verilir (Zhdanov 2002):

$$S = \text{diag}(A^T A). \quad (3.19)$$

Burada, S dizeyinin, A dizeyinin sütun elemanlarının normundan oluştuğu görülmektedir. Buna göre W_m ;

$$W_m = \text{diag}(A^T A) = \text{diag}\left(\sqrt{\sum_i (A_{ik})^2}\right) = S. \quad (3.20)$$

Bu durumda durağanlaştırıcı fonksiyoneli aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$S_w(m) = W_m^2 S(m). \quad (3.21)$$

Benzer yaklaşım kullanılarak, veri ağırlık dizeyi W_d ,

$$W_d = \text{diag}(AA^T) = \text{diag}\left(\sqrt{\sum_k (A_{ik})^2}\right) \quad (3.22)$$

ile verilir. Ölçü hatası ξ_i ve ölçülen veri d_i^0 olmak üzere $(1 + d_i^0 / \xi_i), 1/\log(\xi_i), 1/\log(\xi_i)^2, 1/\xi_i, 1/\xi_i^2$ tanımları da W_d olarak kullanılmaktadır. Örneğin ilk tanımlamayı Ulugergerli (1998) kullanmıştır. Bu çalışmada ise dördüncü tanımlama kullanılmıştır.

W_d ve W_m ağırlık dizeyleri veriyi normalize edecek ve ters çözüm yönteminde ayrımlılığı artıracaktır. Ağırlık dizeyleri genel fonksiyonelde kullanılırsa

$$P_w^\alpha(m, d) = \phi_w(m, d) + \alpha S_w(m) = \|W_d(f(m) - d)\|_D^2 + \alpha \|W_m(m - m_{apr})\|^2 \quad (3.23)$$

elde edilir. Bu fonksiyonelin bilinmeyen parametrelere göre kısmi türevinin alınıp sıfıra eşitlenmesi ile (en küçüklenmesi ile) Δm parametrelere yaklaştırma değerlerini içeren vektörün çözümü

$$\Delta m = (A^T W_d^2 A + \alpha W_m^2)^{-1} (A^T W_d \Delta d + \alpha W_m^2 m_{apr}) \quad (3.24)$$

şeklinde bulunur. Bu denklem, en-küçük kareler probleminin ağırlıklı doğrusallaştırılmış çözümü olarak bilinir ve karışık tanımlı problemler için geçerlidir (Menke 1984).

Diğer bir çözüm tekniği "Bayes" tekniğidir (the maximum a posteriori estimation method) (Tarantola 1987). Yöntemin temeli olasılık teorisine dayanmaktadır. Yöntem olasılık yoğunluk fonksiyonelinin (probability density function) en büyüklenmesi ile çözümü araştırır. Bu yönetime göre Δm 'nin çözümü

$$\Delta m = (A^T \sigma_d^{-1} A + \sigma_m^{-1})^{-1} (A^T \sigma_d^{-1} \Delta d + \sigma_m^{-1} \Delta m_{apr}) \quad (3.25)$$

bağıntısı ile hesaplanır (Tarantola 1987). Burada σ_d veri "covariance" ve σ_m parametre "covariance" dizeyi olarak tanımlanır ve aşağıdaki gibi verilir:

$$\begin{aligned} \sigma_d &= [\text{cov}(d_i, d_j)] \\ \text{ve} \\ \sigma_m &= [\text{cov}(m_i, m_j)]. \end{aligned} \quad (3.26)$$

Denklem (3.25) ile (3.24) karşılaştırılacak olursa,

$$\sigma_m^{-1} = \alpha W_m^2 \quad \text{ve} \quad \sigma_d^{-1} = W_d^2$$

olduğu görülür. Burada σ_m^{-1} nin durağanlaştırıcı parametresi gibi davrandığı görülmektedir.

Eğer ölçülen verinin birbiri ile ilişkili olmadığı (uncorrelated) ve eşit uyumsuzlukta olduğu kabul edilirse

$$\sigma_d = \sigma_d^2 \mathbf{I}$$

yazılabilir. Aynı şekilde modelin “bir ilk uyumsuzluğu” (a priori covariance) içinde kabul edilirse

$$\sigma_m = \sigma_m^2 \mathbf{I}$$

yazılabilir. Son iki eşitlik denklem (3.25)' de yerine konursa

$$\Delta \mathbf{m} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + k \mathbf{I})^{-1} (\mathbf{A}^T \Delta \mathbf{d} + k \mathbf{m}_{apr}) \quad (3.27)$$

elde edilir (Zhang ve Hobbs 1992, Zhdanov 2002). Burada k,

$$k = \frac{\sigma_d^2}{\sigma_m^2} \quad (3.28)$$

eşitliği ile hesaplanır ve doğrusallaştırıcı parametresinin yaptığı işi yapar.

Denklem (3.27)' ye göre, σ_m^2 -model parametreleri uyumsuzluğunun büyük olması, durağanlaştırıcı parametresinin küçük olmasını göstermektedir. Bunun anlamı, durağanlaştırıcı olmadan (α ' nın sifıra yakın veya sıfır olması durumunda), ters problemin çözümündeki belirsizlik büyük olacaktır. Fakat durağanlaştırıcı olması durumunda bu belirsizlik azalacaktır. Bu son formül, durağanlaştırmada olasılık ve gerçekçi yaklaşımların birbiriyle yakın ilişkili olduğunu göstermektedir (Zhdanov 2002).

3.5. Farklı Durağanlaştırıcı Tanımları

Durağanlaştırıcı fonksiyonelinin (stabilizing functional-stabilizer) asıl rolü, ters çözüm problemine uygun yaklaşık model sınıflarını (gruplarını) seçmektir. Durağanlaştırıcı olarak çeşitli tanımlar vardır. Bunlardan birisi, en-küçük kareler kriterine dayalı, model parametrelerinin normudur

$$S_{L_2}(\mathbf{m}) = \|\mathbf{m}\|^2 = (\mathbf{m}, \mathbf{m}) = \min. \quad (3.29)$$

Denklem (3.21) yerine aşağıdaki gibi verilen "quadratic" fonksiyonel de kullanılabilir:

$$S_w(\mathbf{m}) = \|\mathbf{W}_m \mathbf{m}\|^2 = (\mathbf{W}_m \mathbf{m}, \mathbf{W}_m \mathbf{m})_{L_2} = \min. \quad (3.30)$$

Burada, $\mathbf{W}_m$ parametrelere verilecek ağırlık bilgisini içeren ağırlık dizeyidir.

Diğer bir durağanlaştırıcı, model ve bir önkestirim modeli ($\mathbf{m}_{apr}$) arasındaki farkın minimum normudur:

$$S_{L_2apr}(\mathbf{m}) = \|\mathbf{m} - \mathbf{m}_{apr}\|^2 = \min. \quad (3.31)$$

Model parametrelerinin gradientlerinin ($\nabla \mathbf{m}$) normu ile aşağıdaki gibi tanımlanan "maximum smoothness -Max_Sm) durağanlaştırıcısı elde edilebilir:

$$S_{max_sm}(\mathbf{m}) = \|\nabla \mathbf{m}\|^2 = (\nabla \mathbf{m}, \nabla \mathbf{m}) = \min. \quad (3.32)$$

YSEKK ters çözümü yönteminde kullanılan ve model parametrelerinin Laplacian' larının ($\nabla^2 \mathbf{m}$) en küçük normu olan durağanlaştırıcı

$$S_{OCCAM}(\mathbf{m}) = \|\nabla^2 \mathbf{m}\|^2 = (\nabla^2 \mathbf{m}, \nabla^2 \mathbf{m}) = \min \quad (3.33)$$

ile verilir. Bu durağanlaştırıcı yuvarlatılmış bir model elde etmemizi sağlar.

Rudin ve diğ. (1992), model parametrelerinin L_1 normu olan, gürültülü ve saçılmış yapıların bulunmasında kullanılacak toplam-değişim (total variation-TV) durağanlaştırıcısını tanımlamışlardır:

$$S_{TV}(\mathbf{m}) = \|\nabla \mathbf{m}\|_{L_1} = \int_V |\nabla \mathbf{m}(\mathbf{r})| dv = \min. \quad (3.34)$$

Bu durağanlaştırıcıda, model parametreleri dağılımının bir aralıkta değişmesi istenir (ayrıntı için Giusti' ye (1984) bakınız). Fakat, sıfır

noktasında bu fonksiyonelin türevi alınamaz. Bu zorluğu aşmak için Acar ve Vogel (1994) TV fonksiyonelinin aşağıdaki gibi yeniden düzenlemiştir:

$$S_{\text{PTV}}(\mathbf{m}) = \sqrt{\|\nabla \mathbf{m}\|_{L_1}^2 + \beta^2} = \int_V \sqrt{|\nabla \mathbf{m}(\mathbf{r})|^2 + \beta^2} d\mathbf{v} = \min. \quad (3.35)$$

Burada β küçük bir sayıdır. Bu fonksiyonelin kazancı (advantage), model parametreleri fonksiyoneli sürekli olmak zorunda değildir. Fakat biraz yuvarlatılmış olmalıdır (Vogel ve Oman 1995). TV durağanlaştırıcısı, süreksizlik olan noktalarda saçılmalar yaratmayacaktır. Bu nedenle, keskin sınırlardaki saçılmalar yok olacak ve iletkenlik sınırları korunmuş olacaktır (Portniguanni ve Zhdanov 1999). Aynı zamanda, bu durağanlaştırıcı parametrelerin süreksiz olduğu sınırlarda, değişim aralığını sınırlayacağından, denklem (3.33) ile verilen $\max_sm$ durağanlaştırıcısından daha iyi sonuç verecektir (Zhdanov 2002).

$S_{\text{TV}}(\mathbf{m})$ ve $S_{\text{PTV}}(\mathbf{m})$ durağanlaştırıcıları, model parametreleri değişimi sınırlarını daraltacak davranışta olduklarından, bu durağanlaştırıcılar ile hala yuvarlatılmış bir model elde edilecektir (Portniguanni ve Zhdanov 1999, Zhdanov 2002). Yinede bu yuvarlatılmış sonuç denklem (3.31) ve (3.32) ile verilen geleneksel durağanlaştırıcıların verdiği yuvarlatılmış sonuçlardan daha iyidir.

Bu yuvarlatma etkisini azaltan ve "minimum support" (MS) ismi verilen durağanlaştırıcı

$$s_{\text{MS}}(\mathbf{m}) = J_{\beta}(\mathbf{m}) = \int_V \frac{m^2}{m + \beta^2} d\mathbf{v}. \quad (3.36)$$

ile verilmektedir (Last ve Kubik,1983). Burada β çok küçük bir sayıdır. Araştırmacılar, bu durağanlaştırıcıyı yoğunlaştırılmış (compact) gravite ters çözümünde kullanmıştır. Zhdanov ve Hursan (2000) ise elektromanyetik verilerin 3-B ters çözümünde ve Mehanee ve diğ. (1998) ise aynı yaklaşımı MT verilerinin 2-B ters çözümünde kullanmıştır.

Portniaguine ve Zhdanov(1999), MS durağanlaştırıcısının Tikhonov kriterlerini sağladığını göstermiştir. Araştırmacılar, bu durağanlaştırıcıyı yeniden düzenleyerek

$$S_{MGS}(m) = J_{\beta}(m) = \int_v \frac{\nabla m \cdot \nabla m}{\nabla m \cdot \nabla m + \varepsilon^2} dv. \quad (3.37)$$

şeklinde, "minimum gradient support (MGS)" ismini verdikleri yeni bir durağanlaştırıcı tanımlamışlardır. Bu durağanlaştırıcı, ters çözüm sonucu modelin daha keskin sınırlar ile odaklanmış olarak bulunmasını sağlamaktadır (Portniaguine ve Zhdanov, 1999). Araştırmacılar, MGS ismini verdikleri durağanlaştırıcı ile parametrik fonsiyonel'in en küçüklenmesi ile yapılan ters çözümü "odaklanmış ters çözüm" (focusing inversion images) olarak isimlendirmişlerdir.

Keskin sınırlar veren diğer bir durağanlaştırıcı ise "entropy" kuramını kullanarak elde edilen ve aşağıdaki gibi tanımlanan birinci-dereceden en küçüklenen "entropy" (the minimum first-order entropy (MinEnt-1)) durağanlaştırıcısıdır (Ramos ve diğ. , 1999):

$$\begin{aligned} S_{MinEnt-1}(m) &= - \sum_{i=1}^{M-1} \frac{|\nabla m_i| + \zeta}{q} \log \left(\frac{|\nabla m_i| + \zeta}{q} \right) \\ &= - \sum_{i=1}^{M-1} \left[\frac{|\nabla m_{i+1} - m_i| + \zeta}{\sum_{i=1}^{n-1} (|\nabla m_{i+1} - m_i| + \zeta)} \cdot \log \left(\frac{|\nabla m_{i+1} - m_i| + \zeta}{\sum_{i=1}^{n-1} (|\nabla m_{i+1} - m_i| + \zeta)} \right) \right] \end{aligned} \quad (3.38)$$

burada

$$q = \sum_{i=1}^{M-1} (|\nabla m_i| + \zeta)$$

dır. Yukarda, ζ çok küçük pozitif değerli bir gerçel sayıdır (örneğin $\zeta = 10^{-15}$) ve M ise model parametresi sayısıdır. Bu durağanlaştırıcı ile parametrik fonsiyonelin çözümü ise, "minimum first-order entropy (MinEnt-1) regularization" (Ramos ve diğ. , 1999) olarak isimlendirilmiştir.

Ramos ve diğ. (1999) MinEnt-1 durağanlaştırıcısını MT verilerin 2-B ters çözümü probleminde kullanmışlardır. Çalışmalarında sadece yapay veri ile bir örnek göstermişlerdir. Fakat örneklerinde model ağında, blokların boyutları eşit alınmıştır. Diğer taraftan, durağanlaştırıcılarının çözüm gücünü diğerleri ile de karşılaştırmamışlardır.

Bu çalışmada, model parametrelerinin L2-normu, OCCAM, MS, MGS ve MinEnt-1 durağanlaştırıcıları için genel fonksiyonelin ters çözümü sonuçları incelenecektir.

3.5.1. Durağanlaştırıcı fonksiyonellerinin, hemen hemen-ikinci dereceden bağımlı (pseudo-quadratic) fonksiyoneller biçiminde gösterimi

Yukarda anlatılan tüm durağanlaştırıcı fonksiyonelleri, model parametrelerinin hemen hemen-ikinci dereceden bağımlı fonksiyoneli biçiminde yazılabilir (Portniguianni ve Zhdanov 1999, Zhdanov ve Hursan 2000, Zhdanov 2002). Denklem (3.23)' ün parametrelerinin "pseudo-quadratic" formda yazılımı

$$S_{L_2, \text{apx}}(\mathbf{m}) = \|\mathbf{W}_e \mathbf{W}_m (\mathbf{m} - \mathbf{m}_{\text{apx}})\|^2 = (\mathbf{W}_e \mathbf{W}_m (\mathbf{m} - \mathbf{m}_{\text{apx}}), \mathbf{W}_e \mathbf{W}_m (\mathbf{m} - \mathbf{m}_{\text{apx}})) = \min \quad (3.39)$$

şeklindeir. Eğer $\mathbf{W}_e$, model parametrelerine bağılı değil ise denklem (3.23) gibi en küçük norm ve denklem (3.24) gibi en büyük yuvarlatma durağanlaştırıcıları gibi, ikinci-dereceden bağılı (quadratic) fonksiyoneller elde edilebilir. Genel olarak, denklem (3.36) ve (3.37) de olduğu gibi $\mathbf{W}_e$ doğrusal değildir. Bu durumda denklem (3.39) ile ifade edilen fonksiyonel ikinci-dereceden değildir. Bu nedenle doğrusal olmayan durağanlaştırıcıların ikinci-dereceden formu hemen hemen ikinci-dereceden bağımlı fonksiyonel olarak isimlendirilmiştir (Zhdanov 2002). Fakat fonksiyonelin bu formda gösterilmesi, doğrusallaştırılmış problemin basit olmasını ve farklı durağanlaştırıcıların kolayca algoritmaya eklenmesini sağlamaktadır.

Örneğin, en büyük yuvarlatma durağanlaştırıcısı, (3.39) denklemine

$$\mathbf{W}_e = \mathbf{w}_e^{\max_sm} = \frac{\nabla \mathbf{m}}{[\mathbf{m}^2 + \mathbf{c}^2]^{1/2}} \quad (3.40)$$

operatörünün eklenmesi ile elde edilir. Burada $\mathbf{m}_{\text{apx}} = 0$ ve $\mathbf{c} \rightarrow 0$ dır.

$S_{\text{PTV}}(\mathbf{m})$ durağanlaştırıcı fonksiyoneli, $\mathbf{m}_{\text{apx}} = 0$ olması ve

$$\mathbf{W}_e = \mathbf{w}_e^{\text{PTV}} = \frac{(|\nabla \mathbf{m}|^2 + \beta^2)^{1/4}}{[\mathbf{m}^2 + \mathbf{c}^2]^{1/2}} \quad (3.41)$$

olması durumunda (3.39) denkleminde eşittir.

$S_{MS}(m)$ durağanlaştırmacı fonksiyoneli için (3.39) denklemindeki W_e aşağıdaki gibi verilebilir:

$$W_e = w_e^{MS} = \frac{1}{[(m + m_{apr})^2 + \beta^2]^{1/2}}. \quad (3.42)$$

$S_{MGS}(m)$ durağanlaştırmacı fonksiyoneli için ise (3.39) denklemindeki W_e aşağıdaki gibi verilebilir:

$$W_e = w_e^{MGS} = \frac{\nabla m}{[(\nabla m \cdot \nabla m + \beta^2)^{1/2} (m^2 + e^2)^{1/2}}. \quad (3.43)$$

Son olarak $S_{MinEnt-1}(m)$ durağanlaştırmacı fonksiyoneli için ise

$$W_e = w_e^{MinEnt-1}(m) = - \left(\frac{|\nabla m| + \zeta}{q} \log \left(\frac{|\nabla m| + \zeta}{q} \right) \right)^{1/2} \frac{1}{m^2 + \zeta} \quad (3.44)$$

şeklinde verilir. Durağanlaştırmacı fonksiyonelinin (3.39) denklemindeki gibi hemen hemen ikinci dereceden formda yazılması durumunda, denklem (3.23) ile verilen parametrik fonksiyonel aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$P_w^\alpha(m) = \phi_w(W_d d) + \alpha W_m^2 W_e^2 \|m - m_{apr}\|^2. \quad (3.45)$$

Burada W_e doğrusallaştırıcıya bağlı değişkenler içeren dizey ve W_m ise parametrelere bağlı ağırlık dizeyidir. Her iki dizey de köşegendir. Son denklemde verilen fonksiyonelin, Tikhonov düzgünleyicisinden tek farkı, durağanlaştırmacının bir operatör ile çarpılmasıdır.

Buradan, durağanlaştırmacı fonksiyonellerinin birbirinden farklı, model parametreleri sınıfına farklı şartların konmasıdır. "maximum smoothness" veya OCCAM durağanlaştırmacıları, model parametreleri dağılımının yuvarlatılmış çözümünü verirken, MS ve MGS durağanlaştırmacıları keskin sınırların olduğu bir model dağılımı vermektedir. Sonuç olarak, farklı durağanlaştırmacıların seçilmesi, ters çözümün farklı sonuç vermesine neden

olacaktır. Diğer bir deyişle, durağanlaştırıcı fonksiyoneli, ters problem çözümüne istenen özellikte bir ön bilgiyi katmamızı sağlayacaktır.

3.6. Düzgünleyici Parametresi- α 'nın Seçimi

Düzgünleştirici parametresi α , MISFIT fonksiyoneli ile durağanlaştırıcı arasındaki geçişi sağlar. Aslında bu parametre, küçük tekil değerlerle ilgili tekil vektörleri sönmölemektedir. Yani problem kötü-durumlu olma özelliğinden çıkarılmaktadır. Gürültülü bir verinin, doğrusal olmayan çözümünde, fiziksel olarak anlamlı bir modelin bulunabilmesi için bu parametrenin seçimi çok önemlidir (Newman ve Hoversten 2000, Cheng ve Yammomoto 2000). α 'nın çok küçük seçilmesi durumunda, parametrik fonksiyonel $P^\alpha(m,d)$, MISFIT fonksiyoneline eşit olur. Bu durumda düzgünleştirme olmaz. Yani, MISFIT çok küçük olmasına rağmen fiziksel olarak anlamlı olmayan bir model elde edilebilir. Eğer α çok büyük seçilirse, $P^\alpha(m)$ 'nın en küçüklenmesi durağanlaştırıcının en küçüklenmesine eşit olur. Bu durumda çözüm ön modele yakın bulunmaya zorlanır. Yani, MISFIT çok büyük olur ve böylece bulunan model ölçülen veriden bağımsız olur. Bu nedenlerden dolayı α 'nın seçimi önemli bir sorundur. Bu konuda temel koşullar Tikhonov ve Arsenin (1977) tarafından verilmiştir.

α 'nın seçiminde önerilen birçok yöntem vardır (Engl ve diğ. 1996, Urmanov ve diğ. 2002). Bunlardan birisi, L-eğrisi (L-curve) yöntemidir (Hansen, 2001). Fakat bu yöntem zaman alıcıdır. Genel olarak α 'nın seçiminde belirlenmiş bir en iyi yöntem yoktur.

Süreklilik yada "cooling" yaklaşımı, α 'nın seçiminde iyi sonuç vermektedir (Constable ve diğ. , 1987; deGroot-Hedlin ve Constable, 1990; Asher ve diğ. , 1995; Newman, 1995; Newman ve Alumbaugh 1997; Smith ve diğ. 1999). Bu yaklaşımda temel fikir, α 'nın başta büyük seçilmesi ve her yinelemede küçültülerek çözüme ulaşılmasıdır. Bu yaklaşım fiziksel olarak olası olmayan modellerin bulunmasını önlemektedir. Newman ve Alumbaugh (1997) yukarıda sözü edilen yaklaşım ile α 'nın ilk değerini izleyen şekilde hesaplamaktadır. Her yinelemede, $(A^T A)$ dizey çarpımındaki en büyük tekil değer, dizeyin satırlarının toplamı en büyük olan değer olarak alınır (r_{top}). Sonra her yinelemede α aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\alpha_i = \frac{r_{top}}{2^{i-1}} . \quad (3.46)$$

Burada i- yineleme numarasıdır.

Bu çalışmada ise yine yukardakine benzer bir yol izlenmiştir. Her yinelemede, MISFIT ve parametre fonksiyonellerinin oranlarından α 'nın ilk değeri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$\alpha = \frac{\phi(m, d)}{S(m)} = \frac{\|W_d(f(m_i) - d)\|_{L_2}^2}{\|W_m W_{e_i}(m_i - m_{apr})\|_{L_2}^2} . \quad (3.47)$$

Burada, W_{e_i} i-ninci yineleme için hesaplanan W_e değeridir. Eğer i-ninci yinelemede yukardaki denklem ile bulunan α değeri bir önceki yinelemede kullanılandan büyük ise ($\alpha_i > \alpha_{i-1}$), bu durumda α

$$\alpha_i = \alpha_{i-1} * 0.9$$

bağıntısı ile hesaplanmıştır.

3.7. Genel Fonksiyonelin Çözümü

Doğrusal olmayan problemlerin çözümü yinelemeli (iterative) yapılır. Başlangıçta "bir ilk model" (a priori model) seçilir. Bu model için, denklem (3.46) ile verilen genel fonksiyonelin çözümünden, model parametrelerini (m) düzeltme değerlerini içeren model vektörü (Δm) elde edilebilir. Bu vektör değerleri, model parametre değerlerine eklenir. Elde edilen yeni model parametreleri için genel fonksiyonelin yeniden çözümünden yeni Δm hesaplanır. Bu işleme belli koşullar sağlanana kadar devam edilir. Bu koşullardan birisi ölçülen ve kuramsal değerler ile hesaplanan MISFIT değerinin belli bir değerin altına düşmesidir. Diğer ise yineleme sayısının belirlenen en büyük yinelemeye eşit olmasıdır. Diğer bir şart ise ardışık yinelemelerde MISFIT' in çok fazla değişmemesidir. Bu şartlardan birisi sağlandığında yinelemeye son verilir ve bulunan model parametreleri çözüm olarak alınır.

Genel fonksiyonelin çözümünde iki farklı yöntem vardır. Bunlardan birisi, fonksiyonelin en küçüklenmesi ile çözümü bulmaktır. Yani, bilinmeyen

parametrelere göre kısmi türevlerinin alınıp sıfıra eşitlenmesidir. Bunun sonucunda denklem (3.46) elde edilir. Bu denklemin çözümünde genel olarak tekil değer ayrışımından' dan (SVD) yararlanılır.

Diğer tip çözüm yöntemleri ise en-dik iniş (steepest-descent), Newton, CG gibi "gradient" tipi yöntemlerdir. Bunlar arasında en çok tercih edilen CG yöntemidir.

3.7.1. Doğrusal olmayan problemlerin LSSVD ile ters çözümü

SVD genel olarak bir dizeyi, üç dizeye parçalayan bir yöntemdir. Bir kare veya dikdörtgen dizeyin doğrudan tersini bulmakta SVD'den yararlanılır. Bu yöntem SEKK ters çözüm algoritmalarında çok tercih edilmektedir. Elektrik ve Elektromanyetik verilerin SEKK ile 1-B ve 2-B ters çözümünde birçok araştırmacı SVD' den yararlanmıştır (Örn. Inman 1975, Jupp ve Vozof 1975, Jupp ve Vozoff 1977, Smith ve Booker 1991, Ulugergerli 1998, Meju ve diğ. 1999, Zhang ve Hobbs 1992).

Denklem (3.24) ün SVD ile ifadesi izleyen şekilde elde edilir. MT problemi için N adet veri ve M adet parametre için (NxM) boyutlu, verinin parametrelere göre kısmi türevlerini içeren A dizeyinin SVD ile ifadesi

$$\mathbf{A} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{V}^T \quad (3.48)$$

şeklinde dir. Burada U, NxM boyutlu veri özyöne ylerini (data eigenvalues) içeren dizey, V, MxM boyutlu parametre özyöne ylerini (parameter eigenvalues) içeren dizey ve S ise MxN boyutlu, tekil değ erleri (eigenvalues) içeren köş egen dizeydir. S dizeyinde tekil değ erler büyükten kü çü ğ e doğru sıralıdır ($\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_N \geq 0$). İspatlanması zor olan ş u genelleme verilebilir, büyük tekil değ erler dura ğ an tekil vektörlerle ($\mathbf{v}_i \in \mathbf{V}$), kü ç ü k tekil değ erler ise saç ılı mış tekil vektörlerle ($\mathbf{v}_i \in \mathbf{V}$) iliş kilidir (Haber 1997). Bu özellik ters çözüm probleminde çok önemlidir.

Genel fonksiyonel olarak verilen (3.18) denkleminin en kü ç ü k lenmesi ile bulunan denklem (3.24)' ün SVD ile ifadesi

$$\Delta \mathbf{m} = \mathbf{V} \left[\frac{\lambda_i}{\lambda_i^2 + \alpha w_{m(i)}} \right] \mathbf{U}^T \Delta \mathbf{d} \quad (3.49)$$

şeklinde verilebilir. Burada Tikhonov parametresi α' 'nın, tekil vektörlerle ilişkili olan çok küçük tekil değerleri sönümlediği görülmektedir. Bu işlem ters çözüm problemlerinin durağanlaştırılmasının temelidir.

Bu tez çalışmasında (3.24) denkleminin SVD ile çözümü için aşağıdaki algoritma kullanılmış ve LSSVD olarak isimlendirilmiştir. Algoritmada, sönüm faktörü, Meju (1994)' nun "line search" yöntemi ile hesaplanmıştır.

- 1 OKU itmax, mismin, m_0 , W_d , d
- 2 Dön $i=1$, itmax
- 3 Hesapla A , W_m , W_{et} , $W_{me}=W_m * W_{et}$, $\Delta d = d - f(m_0)$
- 4 $MISFIT = \left(\sum_{i=1}^N (d_i - d_i^{kur})^2 \right)^{1/2} / \left(\sum_{i=1}^N d_i^2 \right)^{1/2}$
- 5 $[U, S, V] = SVD(W_d A)$
- 6 $\lambda = \text{diag}(S)$
- 7 Dön $k=1, 10$, $B_k = [(100 * \lambda_N - \lambda_1 + (\lambda_1 - \lambda_N) * k^2) / 99]^2$, döngü sonu k
- 8 Dön $J=1, 10$
- 9 $\Delta m = V \cdot \text{diag} \left[\frac{S_k}{S_k^2 + B_j W_{me(i)}} \right] U^T \Delta d$
- 10 $Mtop=2$,
- 11 Eğer $\Delta m > 4$, $\Delta m = 4$, veya $\Delta m < -4$, $\Delta m = -4$
- 12 Eğer $Mtop = (\text{norm}(\Delta m) / M)^{1/2} > 1$ ise $\Delta m = \Delta m * 0.9$, 11' e git
- 13 $m_{yeni} = m_{i-1} + (\Delta m / \max(\text{abs}(\Delta m)))$;
- 14 Hesapla $d^{kur-yeni} = f(m_{yeni})$,
- 15 Hesapla $MISFIT_{yeni}$
- 16 Eğer $MISFIT_{yeni} \leq MISFIT$, $m_i = m_{yeni}$, 19' a git
- 17 Döngü sonu J
- 18 Yaz 'Model iyileştirilemiyor', 21' e git
- 19 Eğer $MISFIT_{yeni} \leq mismin$ 21' e git
- 20 Döngü sonu I
- 21 Dur

3.7.2. Doğrusal olmayan problemlerin CG Yöntemi ile Ters Çözümü

CG yöntemi büyük boyutlu doğrusal problemlerin çözümünde kullanılan yinelemeli bir yöntemdir. Genel olarak sonlu farklar ve sonlu elemanlar yöntemleri ile diferansiyel denklemlerinin çözümünde doğrusal bir düzey denklem sistemi elde edilir. Bu denklem sisteminde katsayı dizeyi simetrik,

band ve kare bir dizeydir. CG yöntemi ile bu doğrusal denklem sisteminin çözümünde, bu katsayı dizeyinin tersini almak gerekmemektedir. Bu nedenle yöntem, SVD ile dizeyin tersinin alınması ile çözümün bulunması gibi doğrusal yöntemlerden daha hızlıdır. Yöntemin hızlı olması ve genel olarak çözümü doğru vermesi nedeni ile, çok sayıda veri ile yine çok sayıda parametrenin çözümünün arandığı doğrusal olmayan problemlerin ters çözümünde de tercih edilmektedir.

CG yöntemini Steifel (1952) önermiştir. Reid (1971) yöntemi, büyük "sparse" dizeler içeren doğrusal problemlerin yinelemeli çözümünde kullanmıştır. Doğrusal olmayan problemlerin çözümünde yöntemin kullanılması Flecher ve Reeves (1964) tarafından önerilmiştir. Yöntemde, adımın boyunun seçimi ile ilgili yöntemler Gilbert ve Nocedal (1992) tarafından tartışılmıştır. CG yöntemi ile ilgili ayrıntılı bilgi için Golub ve O'Leary (1989), Shewchuk (1994), Tarantola (1987) ve Zhdanov' un (1993) çalışmalarına bakılabilir.

Elektrik ve EM verilerin 2-B ve 3-B ters çözümünde CG yöntemi birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır (Mackie ve Madden 1993, DeLugao ve diğ. 1997, Rodi ve Mackie 2001, Zhdanov ve Hursan 2000, Zhdanov ve Tartaras 2002). Burada yöntem hakkında kısa bir özet verilecektir. Daha sonra bu çalışmada geliştirilen programda kullanılan CG algoritması anlatılacaktır.

Doğrusal olmayan bir problemin ağırlıklı düzgünlenmiş çözümü için denklem (3.46) ile verilen parametrik fonksiyonel tanımlanmıştır. Bu fonksiyonel yeniden yazılır ise,

$$P_w(\mathbf{m}) = \phi_w(\mathbf{m}, \mathbf{d}) + \alpha S_w(\mathbf{m}) = \|\mathbf{W}_d \mathbf{f}(\mathbf{m}) - \mathbf{W}_d \mathbf{d}\|_D^2 + \alpha \|\mathbf{W}_m \mathbf{W}_e \mathbf{m} - \mathbf{W}_m \mathbf{W}_e \mathbf{m}_{apr}\|^2$$

$$= (\mathbf{W}_d \mathbf{f}(\mathbf{m}) - \mathbf{W}_d \mathbf{d})^T (\mathbf{W}_d \mathbf{f}(\mathbf{m}) - \mathbf{W}_d \mathbf{d}) + \alpha (\mathbf{W}_m \mathbf{W}_e (\mathbf{m} - \mathbf{m}_{apr}))^T (\mathbf{W}_m \mathbf{W}_e (\mathbf{m} - \mathbf{m}_{apr})).$$

(3.50)

elde edilir. Burada "T", bir dizeyin devriği (transpose) anlamındadır. $\mathbf{W}_d$, $\mathbf{W}_m$ ve $\mathbf{W}_e$ nin tanımları bölüm (3.2) de verilmiştir. Burada amaç, (3.50) denkleminde $\mathbf{m}$ parametrelerinin çözümünü bulmaktır. Çözümü bulmak için bu denklemin en küçüklenmesi gerekmektedir. CG yöntemi ile bu denklemin çözümü izleyen şekilde yapılır (Zhdanov 1993).

CG yöntemi, CG yönünün ($\tilde{\mathbf{I}}(\mathbf{m}_n)$) ardı ardına aranması esasına dayanır:

$$\mathbf{m}_{n+1} = \mathbf{m}_n + \delta \mathbf{m} = \mathbf{m}_n - k_n \tilde{\mathbf{l}}(\mathbf{m}_n). \quad (3.51)$$

$\tilde{\mathbf{l}}(\mathbf{m}_n)$ nin seçimi izleyen şekildedir. Başlangıç değeri olarak, aşağıdaki gibi verilen en-dik iniş (steepest ascent) yönü ($\mathbf{l}(\mathbf{m}_n)$), $\tilde{\mathbf{l}}(\mathbf{m}_n)$ olarak seçilir:

$$\tilde{\mathbf{l}}(\mathbf{m}_0) = \mathbf{l}(\mathbf{m}_0) = \mathbf{A}_{\mathbf{m}_0}^T \mathbf{W}_d^2 (\mathbf{f}(\mathbf{m}_0) - \mathbf{d}) + \alpha \mathbf{W}_m^2 \mathbf{W}_{e_0}^2 (\mathbf{m}_0 - \mathbf{m}_{apr}). \quad (3.52)$$

Burada $\mathbf{A}_{\mathbf{m}_0}$, önkestim modeli ($\mathbf{m}_0$) için "Jacobian" dizeyidir. $\mathbf{W}_{e_0}$, önkestim modeli için hesaplanan $\mathbf{W}_e$ değerleridir ve farklı durağanlaştırıcı için farklı değerler almaktadır (bkz. Bölüm 3.5.1).

İkinci adımda, azalma yönü (direction of ascent), bu adımdaki durağanlaştırılmış en-dik iniş yönü ile bir önceki adımdaki azalma yönünün ($\tilde{\mathbf{l}}(\mathbf{m}_0)$) doğrusal birleşimi olarak alınır:

$$\tilde{\mathbf{l}}(\mathbf{m}_1) = \mathbf{l}(\mathbf{m}_1) + \beta_1 \tilde{\mathbf{l}}(\mathbf{m}_0).$$

(n+1) inci adımda:

$$\tilde{\mathbf{l}}(\mathbf{m}_{n+1}) = \mathbf{l}(\mathbf{m}_{n+1}) + \beta_{n+1} \tilde{\mathbf{l}}(\mathbf{m}_n). \quad (3.53)$$

Burada, durağanlaştırılmış en-dik iniş yönü aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır:

$$\mathbf{l}(\mathbf{m}_n) = \mathbf{A}_{\mathbf{m}_n}^T \mathbf{W}_d^2 (\mathbf{f}(\mathbf{m}_n) - \mathbf{d}) + \alpha \mathbf{W}_m^2 \mathbf{W}_{e_n}^2 (\mathbf{m}_n - \mathbf{m}_{apr}). \quad (3.54)$$

Burada $\mathbf{A}_{\mathbf{m}_n}$, n-ninci yineleme için hesaplanan "Jacobian" dizeydir. $\mathbf{W}_{e_n}$ ise n-ninci yinelemedeki $\mathbf{W}_e$ değeridir. Yinelemenin boyu olan k_n , doğrusal çizgi yaklaşım (linear line search) kullanarak

$$k_n = \frac{\tilde{\mathbf{l}}^T(\mathbf{m}_n) \mathbf{l}(\mathbf{m}_n)}{\left\| \mathbf{W}_d \mathbf{A}_{m_n} \tilde{\mathbf{l}}(\mathbf{m}_n) \right\|^2 + \alpha \left\| \mathbf{W}_m \mathbf{W}_e \tilde{\mathbf{l}}(\mathbf{m}_n) \right\|^2} \quad (3.55)$$

$$= \frac{\tilde{\mathbf{l}}^T(\mathbf{m}_n) \mathbf{l}(\mathbf{m}_n)}{\tilde{\mathbf{l}}^T(\mathbf{m}_n) (\mathbf{A}_{m_n}^T \mathbf{W}_d^2 \mathbf{A}_{m_n} + \alpha \mathbf{W}_m^2 \mathbf{W}_e^2) \tilde{\mathbf{l}}(\mathbf{m}_n)}$$

bağıntısı ile hesaplanabilir ve değeri pozitif gerçel bir sayıdır. Parabolik yaklaşım ile de adım büyüklüğü hesaplanabilir (Fletcher 1981).

CG yönteminde, ardarda gelen yön vektörlerinin ($\tilde{\mathbf{l}}(\mathbf{m}_{n+1})$ ve $\tilde{\mathbf{l}}(\mathbf{m}_n)$) "conjugated" olması gerekmektedir. Bu koşulun yerine getirilebilmesi için eşlenik katsayısı (conjugate coefficient) olarak bilinen β_{n+1} katsayısının

$$\beta_{n+1} = \frac{\left\| \mathbf{l}(\mathbf{m}_{n+1}) \right\|^2}{\left\| \mathbf{l}(\mathbf{m}_n) \right\|^2} \quad (3.56)$$

bağıntısı ile hesaplanması gerekmektedir (Tarantola 1987). Denklem (3.51), (3.54) ve (3.55) kullanılarak $\mathbf{m}$ vektörü yinelemeli olarak hesaplanabilir. Yukarda anlatılan yöntem ile çözüm algoritması aşağıdaki gibi verilebilir:

Dön $n = 0$, itmax

$$\mathbf{r}_n = \mathbf{f}(\mathbf{m}_n) - \mathbf{d}$$

$$\mathbf{l}_n^{\alpha_n} = \mathbf{l}^{\alpha_n}(\mathbf{m}_n) = \mathbf{A}_{m_n}^T \mathbf{W}_d^2 \mathbf{r}_n + \alpha_n \mathbf{W}_m^2 \mathbf{W}_e^2 (\mathbf{m}_n - \mathbf{m}_{apr})$$

$$\beta_{n+1} = \left\| \mathbf{l}_n^{\alpha_n} \right\|^2 / \left\| \mathbf{l}_{n-1}^{\alpha_{n-1}} \right\|^2, \quad \tilde{\mathbf{l}}_n^{\alpha_n} = \mathbf{l}_n^{\alpha_n} + \beta_n^{\alpha_n} \tilde{\mathbf{l}}_{n-1}^{\alpha_{n-1}}, \quad \tilde{\mathbf{l}}_0^{\alpha_0} = \mathbf{l}_0^{\alpha_0}$$

$$k_n^{\alpha_n} = \left(\tilde{\mathbf{l}}_n^{\alpha_n T} \mathbf{l}_n^{\alpha_n} \right) / \left[\tilde{\mathbf{l}}_n^{\alpha_n T} (\mathbf{A}_{m_n}^T \mathbf{W}_d^2 \mathbf{A}_{m_n} + \alpha \mathbf{W}_m^2 \mathbf{W}_e^2) \tilde{\mathbf{l}}_n^{\alpha_n} \right]$$

$$\mathbf{m}_{n+1} = \mathbf{m}_n - k_n^{\alpha_n} \tilde{\mathbf{l}}_n^{\alpha_n}(\mathbf{m}_n)$$

$$\text{if } \phi(\mathbf{m}_n) = \left\| \mathbf{r}_n \right\|^2 \leq \varepsilon_0 \quad \text{dur}$$

döngü sonu n

dur

Burada itmax, en büyük yineleme sayısı, ε_0 , kabul edilebilir en küçük MISFIT değeri ve α_n ise o yineleme için hesaplanan durağanlaştırma parametresidir. Bu yöntem, problemlerin, "yeniden ağırlık verilmiş

doğrusallaştırılmış CG" yöntemi olarak bilinmektedir (Portniaguine ve Zhdanov 1999). Çünkü her yinelemede, W_e yeniden hesaplanmaktadır.

CG yönteminde, bir çizgi boyunca değil bir düzlem boyunca çözüme gidilmektedir. Böylece, bölgesel MISFIT fonksiyonelinin küçük bölgesel "minimum" değerlerden kaçınılmış olur ve çözüm doğrudan "genel minimum"'u hızlı bir şekilde bulur (Zhdanov 2002).

3.7.3. Doğrusal olmayan problemlerin ağırlık verilmiş parametreler ile yeniden-ağırlık verilmiş düzgünleştiricili CG yöntemi ile çözümü

Denklem (3.50), ağırlık verilmiş parametreler için yeniden düzenlenebilir. Parametrelere ağırlık aşağıdaki gibi verilebilir:

$$m^w = W_e W_m m.$$

Benzer şekilde ağırlık verilmiş veriler

$$d^w = W_d d$$

şeklinde tanımlanabilir. Düz çözüm operatörü ağırlık verilmiş veri ve parametreler için

$$d^w = f_w(m^w) = W_d f(W_m^{-1} W_e^{-1} m^w)$$

ile verilebilir. Eski ve yeni düz çözüm operatörleri ($f(m)$ ve $f_w(m)$) ile yeni "Jacobian" dizeyi (A_w) arasındaki ilişki

$$\delta f_w(m^w) = A_w \delta m^w = W_d \delta f(W_m^{-1} W_e^{-1} m^w)$$

ile verilir. Burada,

$$A_w = W_d A W_m^{-1} W_e^{-1} \quad (3.57)$$

eşitliği geçerlidir. Yukardaki eşitlikler kullanılarak (3.50) fonksiyoneli

$$P(m^w) = (f_w(m^w) - d^w)^T (f_w(m^w) - d^w) + \alpha (m^w - m_{apr}^w)^T (m^w - m_{apr}^w) = \min. \quad (3.58)$$

şeklinde yazılabilir. Son denkleme göre bilinmeyen parametreler, ağırlık verilmiş model parametreleridir. Bu denklemin çözümünden bulunan $\mathbf{m}^w$ değerlerinden parametreler

$$\mathbf{m} = \mathbf{W}_m^{-1} \mathbf{W}_e \mathbf{m}^w \quad (3.59)$$

bağıntısı ile hesaplanır. Sayısal denemeler, (3.58) denkleminin yinelemeli çözümünün, (3.50) denkleminin yinelemeli çözümünden daha hızlı sonucu bulduğunu göstermiştir (Hursan 2001).

Denklemler (3.57)'nin, yeniden-ağırlık verilmiş durağanlaştırılmış CG (re-weighted regularized CG-RCG) yöntemi ile çözümü izleyen şekilde yapılır (Zhdanov ve Hursan 2000). Yöntem, parametrik fonksiyonelin en küçüklenmesinde, RCG yönünün $(\tilde{\mathbf{l}}_w^a(\mathbf{m}_n^w))$ ardarda aranması temeline dayalıdır:

$$\mathbf{m}_{n+1}^w = \mathbf{m}_n^w + \delta \mathbf{m}^w = \mathbf{m}_n^w - \mathbf{k}_n^a \tilde{\mathbf{l}}_w^a(\mathbf{m}_n^w). \quad (3.60)$$

Burada ilerleme yönü büyüklüğü doğrusal yaklaşım kullanarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\mathbf{k}_n^a = \frac{\tilde{\mathbf{l}}_w^{aT}(\mathbf{m}_n^w) \mathbf{l}_w^a(\mathbf{m}_n^w)}{\tilde{\mathbf{l}}_w^{aT}(\mathbf{m}_n^w) (\mathbf{A}_{w_n}^T \mathbf{W}_d^2 \mathbf{A}_{w_n} + \alpha \mathbf{I}) \tilde{\mathbf{l}}_w^a(\mathbf{m}_n^w)}. \quad (3.61)$$

Burada $\mathbf{A}_{w_n}$, $\mathbf{W}_d \mathbf{f}(\mathbf{W}_m^{-1} \mathbf{W}_{e_n}^{-1} \mathbf{m}^w)$ operatörünün kısmi türev değerlerini içeren dizeydir. Bu dizey

$$\mathbf{A}_{w_n} = \mathbf{W}_d \mathbf{A}_n \mathbf{W}_m^{-1} \mathbf{W}_{e_n}$$

şeklinde hesaplanır.

$\tilde{\mathbf{l}}_w^a(\mathbf{m}_0^w)$ nin seçimi durağanlaştırılmış CG yönteminde olduğu gibi hesaplanmaktadır. Başlangıç değeri olarak, aşağıdaki gibi verilen en-dik iniş (steepest ascent) yönü $(\mathbf{l}_w^a(\mathbf{m}_0^w))$, CG yönü $(\tilde{\mathbf{l}}_w^a(\mathbf{m}_0^w))$ olarak seçilir.

$$\tilde{\mathbf{l}}_w^a(\mathbf{m}_0^w) = \mathbf{l}_w^a(\mathbf{m}_0^w) = \mathbf{W}_{e_0}^{-1} \mathbf{W}_m^{-1} \mathbf{A}_0^T \mathbf{W}_d (\mathbf{f}_w(\mathbf{m}_0^w) - \mathbf{d}^w) + \alpha (\mathbf{m}_0^w - \mathbf{m}_{apr}^w) \quad (3.62)$$

burada $\mathbf{A}_0$, önktesitirim modeli ($\mathbf{m}_0$) için "Jacobian" dizeydir. $\mathbf{W}_e$ ise farklı durağanlaştırıcı için farklı değerler almaktadır.

(n+1) inci adımda, azalma yönü (direction of ascent), bu adımdaki durağanlaştırılmış en-dik iniş yönü ile bir önceki adımdaki azalma yönünün doğrusal birleşimi olarak alınır:

$$\tilde{\mathbf{l}}_w^a(\mathbf{m}_{n+1}^w) = \mathbf{l}_w^a(\mathbf{m}_{n+1}^w) + \beta_{n+1}^w \tilde{\mathbf{l}}_w^a(\mathbf{m}_n^w). \quad (3.63)$$

Burada, yeniden ağırlık verilmiş RCG yöntemi için, durağanlaştırılmış en-dik iniş yönü aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır

$$\mathbf{l}_w^a(\mathbf{m}_n^w) = \mathbf{W}_{e_n}^{-1} \mathbf{W}_m^{-1} \mathbf{A}_n^T \mathbf{W}_d (\mathbf{f}_w(\mathbf{m}_n^w) - \mathbf{d}^w) + \alpha(\mathbf{m}_n^w - \mathbf{m}_{apr}^w). \quad (3.64)$$

CG yönteminde, ardarda gelen yön vektörlerinin ($\tilde{\mathbf{l}}(\mathbf{m}_{n+1})$ ve $\tilde{\mathbf{l}}(\mathbf{m}_n)$) "conjugated" olması gerekmektedir (Tarantola 1987). Bu koşulun yerine getirilebilmesi için β_{n+1} katsayısının

$$\beta_{n+1} = \frac{\|\mathbf{l}_w^a(\mathbf{m}_n)\|^2}{\|\mathbf{l}_w^a(\mathbf{m}_{n-1})\|^2} \quad (3.65)$$

bağıntısı ile hesaplanması gerekmektedir.

Burada her adımda, model parametreleri ağırlık verilmiş parametrelerden yeniden elde edilmelidir. Örneğin n-ninci adımda $\mathbf{m}$,

$$\mathbf{m}_n = \mathbf{W}_m^{-1} \mathbf{W}_{e_n} \mathbf{m}_n^w \quad (3.66)$$

ile hesaplanır. Bu tür yineleme tekniğinin çözüme yaklaştığının kanıtı, Eckhart' ın (1980) çalışmasında bulunabilir. Yukarda anlatılan yineleme işlemi, MISFIT' in verilen değere ulaşması durumunda sonuçlandırılır.

Yöntem aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Dön n = 0, itmax

$$\mathbf{r}_n^w = \mathbf{f}_w(\mathbf{m}_n^w) - \mathbf{d}^w = \mathbf{W}_d \mathbf{f}(\mathbf{W}_n^{-1} \mathbf{W}_{e_n}^{-1} \mathbf{m}_n^{w1}) - \mathbf{W}_d \mathbf{d}$$

$$\mathbf{l}_{wn}^{\alpha_n} = \mathbf{l}_w^{\alpha}(\mathbf{m}_n^w) = \mathbf{A}_{w_n}^T \mathbf{r}_n^w + \alpha_n (\mathbf{m}_n^w - \mathbf{m}_{apr}^w)$$

$$\beta_n^{\alpha_n} = \frac{\|\mathbf{l}_{wn}^{\alpha_n}\|^2}{\|\mathbf{l}_{w(n-1)}^{\alpha_{n-1}}\|^2}, \quad \tilde{\mathbf{l}}_{wn}^{\alpha_n} = \mathbf{l}_{wn}^{\alpha_n} + \beta_n^{\alpha_n} \tilde{\mathbf{l}}_{w(n-1)}^{\alpha_{n-1}}, \quad \tilde{\mathbf{l}}_{w0}^{\alpha_0} = \mathbf{l}_{w0}^{\alpha_0}$$

$$\mathbf{k}_n^{\alpha_n} = \left(\tilde{\mathbf{l}}_{wn}^{\alpha_n T} \mathbf{l}_{wn}^{\alpha_n} \right) / \left[\tilde{\mathbf{l}}_{wn}^{\alpha_n T} (\mathbf{A}_{w_n}^T \mathbf{A}_{w_n} + \alpha \mathbf{I}) \tilde{\mathbf{l}}_{wn}^{\alpha_n} \right]$$

$$\mathbf{m}_{n+1}^w = \mathbf{m}_n^w - \mathbf{k}_n^{\alpha_n} \tilde{\mathbf{l}}_{wn}^{\alpha_n}(\mathbf{m}_n), \quad \mathbf{m}_{n+1} = \mathbf{W}_m^{-1} \mathbf{W}_{e_n}^{-1} \mathbf{m}_n^w$$

if $\phi(\mathbf{m}_n) = \|\mathbf{r}_n\|^2 \leq \varepsilon_0$ **dur**

döngü sonu n

dur

(3.67)

Burada α ve $\mathbf{W}_e$ değerleri 5-10 yinelemede bir değiştirilmektedir. Böylece α 'nın çok küçük değerler alması önlenmektedir. Tez çalışmasında yukardaki algoritma kullanılmıştır ve CG olarak isimlendirilmiştir.

3.8. Kısmi Türevler İçeren Dizeyin Hesaplanması

MT verilerinin 2-B ters çözümünde en zaman alıcı ve doğru çözüme ulaşılmasında en önemli bölümlerden birisi kısmi türevleri içeren "Jacobian" dizeyin hesaplanmasıdır. Bu konuda kullanılan genel yöntemler ve öneriler konusunda McGillivray ve diğ. (1994) bakılabilir. Kısmi türevler dizeyinin elde edilmesi konusunda kullanılan iki yaklaşım: duyarlılık denklemi (sensitivity-equation) ve birleştirilmiş-denklemler (adjoint-equation) yaklaşımlarıdır (McGillivray ve diğ. 1994).

Duyarlılık-denklemleri yaklaşımında, başlangıç denkleminin model parametrelerine göre türevi alınır. Elde edilen sınır-değerli denklemler çözülür. Bu yöntemde parametre sayısı kadar sınır-değerli problemin çözülmesi gerekmektedir. Yöntemi MT verilerinin 2-B ters çözümü için ilk önerenler Rodi(1976) ile Jupp ve Vozoff (1977) olmuştur. EM yöntemlerde genel olarak parametre sayısı, veri sayısından fazla olduğundan, bu yöntem kullanışlı değildir.

İkinci yaklaşımda ise, birleştirilmiş-denklemler çözülür. Çözüm sonucu elde edilen elektrik (veya manyetik) alanların toplanması ile kısmi türevler elde edilir. Bu yaklaşımda ise veri sayısı kadar birleştirilmiş-denklemlerin çözümü aranır. Bu yaklaşımda temel olarak, EM yöntemdeki karşılıklık (reciprocity) ilkesinden yararlanılır. MT verilerinin 2-B ters çözüm probleminde genel

olarak, parametre sayısı veri sayısından fazla olduğundan, bu yaklaşım ilkinde göre daha hızlı ve etkilidir. Elektrik ve EM verilerin ters çözümünde bu yaklaşım birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır (Rodi 1976, Parasnis 1988, Sasaki 1989, Mackie ve Madden 1993, McGillivray ve diğ. 1994, deLugao ve Wannamaker 1996, deLugao ve diğ. 1997, Rodi ve Mackie 2001).

Bu çalışmada da karşılıklı ilkesini kullanan ikinci yaklaşım kullanılmıştır. EM yöntemde karşılıklı ilkesine göre, alıcı ve vericinin yerleri değiştirildiğinde ölçülen büyüklük aynıdır. Uygulamamızda, genel dizey denkleminin çözümünden elektrik (veya manyetik) alan değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra genel dizey denkleminde, kaynakla ilgili vektöre, alıcı noktası için birim değer konarak denklem yeniden çözülmüştür. Bu çözümden her parametre için dört düğüm noktasındaki değerlerin toplamı alınarak, alan değerleri için parametreye göre kısmi türevler hesaplanmıştır. Süreksizlik düzlemine dik alan değerleri için türev değerleri ise kaynak vektörüne parabol katsayıları konarak hesaplanmıştır. Görünür öz direnç ve faz için kısmi türevler ise süreksizlik düzlemine paralel ve dik alan değerlerinin türev değerlerinden hesaplanmıştır. Yukarıda anlatıldığı gibi hesaplanan türev değerleri ile iki düz çözüm sonucundan hesaplanan türevler karşılaştırılmıştır.

MT yönteminde ölçülen veriler, $\rho_a(f)$ ve $\phi(f)$ olarak sunulur. MT verilerinin 2-B ters çözümünde tanımlanan model parametreleri ise, her bloğa ait öz direnç veya iletkenlik (ρ_i veya σ_i) değerleridir. Kısmi türevleri içeren dizeyin elemanları, $\rho_a(f)$ ve $\phi(f)$ ' nin bu parametrelere göre türevinden oluşmaktadır.

$\rho_a(f)$ ve $\phi(f)$ ' nin iletkenliğe göre kısmi türevleri, denklem (2.7) ve (2.8) kullanılarak aşağıdaki gibi verilir.

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial \sigma} = \frac{2}{\omega \mu} \left(\frac{\partial Z_{ij}}{\partial \sigma} Z_{ij}^* + \frac{\partial Z_{ij}^*}{\partial \sigma} Z_{ij} \right)$$

ve

$$(3.68)$$

$$\frac{\partial \phi_{ij}}{\partial \sigma} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\text{Sana}(Z_{ij})}{\text{Gerçel}(Z_{ij})} \right)^2} \left(\frac{\partial \text{Sana}(Z_{ij})}{\partial \sigma} \text{Gerçel}(Z_{ij}) - \text{Sana}(Z_{ij}) \frac{\partial \text{Gerçel}(Z_{ij})}{\partial \sigma} \right) \frac{1}{(\text{Gerçel}(Z_{ij}))^2}$$

Burada ij TE modu için yx' i, TM modu için ise xy' yi ve "*" ise bir karmaşık sayının eşleniğidir (complex conjugate). Son iki denklemde verilen empedans' ın parametreye göre türevi

$$\frac{\partial Z_{yx}}{\partial \sigma} = \frac{1}{H_x^2} \left(\frac{\partial E_y}{\partial \sigma} H_x - \frac{\partial H_x}{\partial \sigma} E_y \right)$$

ve

$$\frac{\partial Z_{xy}}{\partial \sigma} = \frac{1}{H_y^2} \left(\frac{\partial E_x}{\partial \sigma} H_y - \frac{\partial H_y}{\partial \sigma} E_x \right) \quad (3.69)$$

bağıntıları ile hesaplanır. Yukarda verilen MT fonksiyonlarının türevlerini elde etmek için, önce elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin jeolojik doğrultuya dik ve paralel bileşenlerinin parametrelere göre kısmi türevlerini hesaplamak gerekmektedir.

Başlangıçta jeolojik doğrultuya dik elektrik ve manyetik alanların (E_y, H_y) kısmi türevleri, sonlu farklar denklemine "variational operator" (δ) uygulanarak hesaplanır. TE-modu için (2.12) denkleme "variational operator" uygulanarak aşağıdaki denklem elde edilir

$$q_0 \delta E(i, j) = \frac{(\Delta z_{j-1} + \Delta z_j)}{2 \Delta x_i} \delta E(i+1, j) + \frac{(\Delta x_{i-1} + \Delta x_i)}{2 \Delta z_j} \delta E(i, j+1) \\ + \frac{(\Delta z_{j-1} + \Delta z_j)}{2 \Delta x_{i-1}} \delta E(i-1, j) + \frac{(\Delta x_{i-1} + \Delta x_i)}{2 \Delta z_{j-1}} \delta E(i, j-1) + i \omega \mu_0 \delta \tilde{\sigma}(i, j) E(i, j).$$

(3.70)

Burada

$$q_0 = \frac{(\Delta z_{j-1} + \Delta z_j)}{2\Delta x_i} + \frac{(\Delta x_{i-1} + \Delta x_i)}{2\Delta z_j} + \frac{(\Delta z_{j-1} + \Delta z_j)}{2\Delta x_{i-1}} + \frac{(\Delta x_{i-1} + \Delta x_i)}{2\Delta z_{j-1}}$$

dır. TM-modu için ise türevler özdirence göre aşağıdaki gibi alınır

$$\begin{aligned} s_0 \delta H(i, j) = & -\delta s_0 H(i, j) \\ & + [\tilde{\rho}(i+1, j) \delta H(i+1, j) + \tilde{\rho}(i, j+1) \delta H(i, j+1) + \tilde{\rho}(i-1, j) \delta H(i-1, j) + \tilde{\rho}(i, j-1) \delta H(i, j-1)] \\ & + [\delta \tilde{\rho}(i+1, j) H(i+1, j) + \delta \tilde{\rho}(i, j+1) H(i, j+1) + \delta \tilde{\rho}(i-1, j) H(i-1, j) + \delta \tilde{\rho}(i, j-1) H(i, j-1)]. \end{aligned} \quad (3.71)$$

Burada s_0 aşağıdaki gibi tanımlanmıştır

$$s_0 = \left[\tilde{\rho}(i+1, j) + \tilde{\rho}(i, j+1) + \tilde{\rho}(i-1, j) + \tilde{\rho}(i, j-1) - i\omega\mu_0 \frac{(\Delta x_{i-1} + \Delta x_i)(\Delta z_{j-1} + \Delta z_j)}{4} \right]$$

Denklem (3.70) ve (3.71), denklem (2.17) gibi dizey denklemleri formunda yazılabilir. Fakat burada, sağ taraftaki sütun vektörün değerleri farklıdır.

TE-modu için bu denklem

$$\mathbf{A} \cdot \delta \mathbf{E} = \mathbf{R}(\delta \sigma) \quad (3.72)$$

ile verilir. Burada $\mathbf{R}(\delta \sigma)$ sütun vektörünün elemanları

$$R_{ij}(\delta \sigma) = i\omega\mu_0 E(i, j) \delta \tilde{\sigma}(i, j) \frac{(\Delta x_{i-1} + \Delta x_i)(\Delta z_{j-1} + \Delta z_j)}{4} \quad (3.73)$$

dır. TM-modu için ise bu denklem

$$\mathbf{A} \cdot \delta \mathbf{H} = \mathbf{R}(\delta \rho) \quad (3.74)$$

ile verilir. Burada $\mathbf{R}(\delta \rho)$ sütun vektörünün elemanları

$$R_{i,j}(\delta\rho) = -\delta s_0 H(i,j) \cdot (1/iw\mu_0) + (1/iw\mu_0) [\delta\tilde{\rho}(i+1,j)H(i+1,j) + \delta\tilde{\rho}(i,j+1)H(i,j+1) + \delta\tilde{\rho}(i-1,j)H(i-1,j) + \delta\tilde{\rho}(i,j-1)H(i,j-1)] \quad (3.75)$$

dir.

Denklem (3.72) ve (3.74)' deki A dizeyinin "LU decomposition" yöntemine göre tersi zaten düz çözüm sırasında hesaplanmıştır. Bu denklemlerden δE ve δH değerleri, modeldeki bütün $\delta\sigma_{ij}$ veya $\delta\rho_{ij}$ değerleri için kolayca elde edilebilir.

Genel "variational" hesabına göre

$$\delta A x = A(x + \delta x) - A(x) \approx \text{Fre}_x(\delta x) = \delta A(x, \delta x)$$

eşitliği yazılabilir. Bizim durumumuzda,

$$\delta E = \text{Fre}_\sigma \delta \sigma \quad (3.76)$$

ve

$$\delta H = \text{Fre}_\rho \delta \rho \quad (3.77)$$

dur. Burada $\delta\sigma$ ve $\delta\rho$ model parametrelerinin küçük salınım (perturbed) değerlerini içeren dizeyin sütun vektörleridir. Bundan dolayı, kısmi türevler dizeyinin kolon değerlerini hesaplamak için, denklem (3.76)' da sadece türevi alınacak parametre σ_{ij} ile ilişkili olan satır değerleri sıfırdan farklı olmalı, onun dışındaki değerler sıfır olmalıdır. Aynı şekilde TM- modu için ise denklem (3.77)' de sadece türevi alınacak parametre ρ_{ij} ile ilişkili olan satır değerleri sıfırdan farklı olmalıdır.

Şimdiye kadar anlatılan adımlar, deGroot-Hedlin ve Constable(1990)' ın OCCAM ters çözüm kodunda kullanılan yöntemdir. Bu yöntemde, genel dizey denkleminin ve bunun tersinin, tanımlanan model parametresi kadar çözülmesi gerekmektedir. (3.72) ve (3.74) denklemlerinde, parametrelerin küçük salınım değerlerini (perturbation) içeren RHS vektöründe, her terim hücre (veya parametrenin) çevresindeki her düğüm noktasındaki bir kaynak olarak düşünülebilir. Karşılığa (reciprocity) göre (Rodi 1976), ağ içinde bir düğüm noktasına yerleştirilen bir birim kaynak, ilgilenilen bir alıcının yeri ile yer değiştirebilir. Bu durumda

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{G} = U(1) \quad (3.78)$$

şeklinde tanımlanan denklem sisteminin, ağ üzerindeki tüm düğüm noktalarının cevabını içeren ve bu birim kaynaktan elde edilen $\mathbf{G}$ vektörü çözülebilir. Burada $U(1)$, sadece kaynakla ilgili satırda bir değeri olan diğer tüm noktalarda sıfır değeri olan sütun vektördür.

Düğüm noktalarında, bütün parametreler ile ilgili kısmi türev değerlerini elde etmek için, sadece çözülen $\mathbf{G}$ vektörünü hücre parametreleri ile çarpmak yeterlidir. TE-modu için, bu işlem

$$\delta \mathbf{E} = \mathbf{G} \cdot \mathbf{R}_{ij}(\delta \sigma) \quad (3.79)$$

şeklinde, TM-modunda ise

$$\delta \mathbf{H} = \mathbf{G} \cdot \mathbf{R}_{ij}(\delta \rho) \quad (3.80)$$

ile hesaplanır.

Yukarıdaki gibi jeolojik doğrultuya dik alanlar hesaplandıktan sonra, jeolojik doğrultuya paralel alan değerleri izleyen şekilde hesaplanır. TE-modu için (2.5b) ve (2.5c) denklemlerinin $\delta \sigma$ 'ya göre türevleri

$$\frac{\partial H_x}{\partial \sigma} = -\frac{1}{i\omega\mu_0} \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial E_y}{\partial \sigma} \quad (3.81)$$

ve

$$\frac{\partial H_z}{\partial \sigma} = \frac{1}{i\omega\mu_0} \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial E_y}{\partial \sigma} \quad (3.82)$$

şeklinde hesaplanır. TM-modu için ise denklem (2.6b) ve (2.6c)'nin $\delta \rho$ 'ya göre türevleri ise aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\frac{\partial E_x}{\partial \rho} = \frac{1}{\rho} E_x - \rho \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial H_y}{\partial \rho} \quad (3.83)$$

ve

$$\frac{\partial E_z}{\partial \rho} = \frac{1}{\rho} E_z + \rho \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial H_y}{\partial \rho} \quad (3.84)$$

Denklem (3.72) ve (3.74)' de yapıldığı gibi, alıcının olduğu yere birim değer koymak yerine, (3.81), (3.82), (3.83) ve (3.84) denklemlerindeki yaklaşımlarda kullanılan sonlu farklar sabitleri ile ilgili ağırlık değerleri, sonlu farklar yaklaşımında kullanılan alanların yerlerine konabilir. Sonuçta yine bir **G** vektörü elde edilecektir. Bu vektörün elemanları, ağ üzerindeki tüm düğüm noktalarından etkilenen bir alıcıdaki türev değerlerini verecektir. Elde edilen **G** vektörü, denklem (3.79) ve (3.80)' deki gibi hücre parametreleri ile çarpılır.

3.9. Logaritmik Uzayda Ters Çözüm

Genel olarak ölçülen GÖ değerleri çok geniş bir aralıkta değişmektedir. Faz değerleri ise radyan cinsinden hesaplandığında (0, pi/2) aralığında değişmektedir. Ters çözümde hesaplanan parametreler (özdirençler) ise GÖ değerleri gibi geniş aralıkta değişmektedir. Bu nedenle, faz değerlerinin parametrelere göre kısmi türevleri, GÖ değerlerinin parametrelere göre kısmi türevlerinden çok küçük olmaktadır. Bu durumda, ters çözümde daha çok GÖ değerleri baskın olmaktadır. Gill ve diğ.' a (1981) göre çözüm bölgesi içinde veri ve parametrelerin benzer sınırlar arasında olması gerekmektedir. Veri ve parametrelerin benzer sınırlarda olmasını sağlamak için GÖ ve özdirençlerin logaritmaları alınmıştır. Bu durumda GÖ ve faza göre kısmi türevler aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\frac{\partial \log \rho_a}{\partial \log m} = \frac{m}{\rho_a} \frac{\partial \rho_a}{\partial m}$$

ve

$$(3.85)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \log m} = m \frac{\partial \rho_a}{\partial m}$$

“Jacobian” dizeyin elemanları yukardaki gibi kullanılırsa, ters çözüm sonucu parametrenin logaritması bulunur. Parametrenin kendisi ise

$$m = \exp(\log m) \quad (3.86)$$

bağıntısı ile hesaplanır. Geliştirilen ters çözüm algoritmasında yukardaki yaklaşım kullanılmıştır. Hesaplamalarda faz değeri ise “radian” cinsinden alınmıştır.

3.10. Çakışmazlık Ölçütü (MISFIT) ve Karekök Hata (RMS)

Ters çözüm algoritmasında kullanılan koşullardan birisi de ölçülen ve kuramsal verinin birbirine yakınlığının ölçüsüdür. Bu iki şekilde tanımlanır. Bu tanımlamalar aşağıdaki gibi hesaplanan MISFIT ve karekök hatadır (Root mean square error-RMS)

$$\text{MISFIT} = \frac{\left(\sum_{i=1}^{\text{ND}} (d^{\circ} - d^k)^2 \right)^{1/2}}{\left(\sum_{i=1}^{\text{ND}} (d^{\circ})^2 \right)^{1/2}}, \quad \text{RMS} = \left(\sum_{i=1}^{\text{ND}} (d^{\circ} - d^k)^2 \right)^{1/2} / \text{ND}$$

Burada d° , ölçülen verileri, d^k ise kuramsal verileri ifade etmektedir.

3.11. Bölümün Sonuçları ve Tartışma

Bu bölümde, MT verilerinin 2-B ters çözümünde kullanılan ters çözüm algoritmaları tanıtılmıştır. Bu algoritmaların aslında tek bir fonksiyonelden türetilbileceği gösterilmiştir.

Geliştirilmiş olan tüm algoritmalar arasındaki farklılığın, kullanılan durağanlaştırıcı olduğu gösterilmiştir. Bu algoritmalar arasındaki diğer farklılıklar ise; kuramsal verilerin hesaplanmasında kullanılan sayısal çözüm yöntemi, duyarlılık dizeyi hesaplama yöntemi ve genel fonksiyoneli çözüm yöntemidir. Bu farklılıklar ters çözüm algoritmasının hızını etkileyen en önemli etkenlerdir. Geliştirilen algoritmanın hızlı çalışması için, düz çözümde ve duyarlılık dizeyi hesabında sonlu elemanlara göre hızlı çözüm bulan sonlu farklar yöntemi kullanılmıştır. Düz çözümde elde edilen genel düzey denkleminde “sparse” düzey aritmetiği ile LU-decomposition yöntemi kullanılmıştır. Böylece çözüm algoritması hızlanmıştır. Aynı düzey denkleminde, duyarlılık dizeyi hesabında da yararlanıldığı için ters çözüm algoritması daha hızlı çalışmaktadır.

MT verilerinin 2-B ters çözümünde, görünür öz direnç (GÖ) çok geniş aralıkta değişirken, faz $(0, \pi/2)$ arasında değişmektedir. Bu durumda GÖ değerlerinin parametreye göre kısmi türevleri, fazın parametreye göre kısmi türevlerinden çok büyük olacaktır. Dolayısıyla, çözüm bulunurken GÖ değerleri baskın olacaktır. Çözümün durağan olabilmesi için, yani GÖ ve fazın eşit oranda çözümü etkileyebilmesi için, algoritmada GÖ ve model parametrelerinin logaritması ve fazın ise radyan cinsinden değeri

kullanılmalıdır. Diğer önemli konu ise veri ve parametre ağırlık düzeyleridir. Bu iki düzey de ters çözüm algoritmasının durağan olmasını sağlayacaktır.

Bu tez çalışmasında geliştirilen bilgisayar programında bu konular gözönünde bulundurulmuştur. Bu program ile, farklı durağanlaştırıcı tanımlarının ve çözücülerin birbirine göre farklılıkları incelenerek en uygun algoritma elde edilmiştir. Bu konu sonraki bölümlerde yapay veri ve arazi verisi uygulaması ile verilmiştir.

4. MT VERİLERİNİN CG ve LSSVD ALGORİTMALARI İLE 2-B TERS ÇÖZÜMÜ

Birinci bölümde, problem ortaya konarak, bu problemin çözümü için yapılanların özeti verilmiştir. İkinci bölümde ise MT yönteminde sonlu farklar ile 2-B modelleme anlatılarak geliştirilen düz çözüm algoritmasının çalışılabilirliği gösterilmiştir. Ayrıca ağ tasarımı konusunda yeni bir algoritma tanıtılmıştır. Üçüncü bölümde ise doğrusal olmayan problemlerin ters çözümü anlatılmıştır. Ayrıca, MT verilerinin 2-B ters çözümünde kullanılan algoritmalar tanıtılarak, bu algoritmaların genel olarak tek bir fonksiyonelden türetildiği gösterilmiştir. Bu bölümde ise geliştirilen 2-B MT ters çözüm algoritması tanıtılacaktır.

MT verilerinin 2-B ters çözüm algoritmaları üç şekilde sınıflandırılabilir. Birinci tip sınıflama, parametrik fonksiyonelde kullanılan durağanlaştırıcı tipine göre yapılabilir. Burada, örneğin; durağanlaştırıcı olarak model parametrelerinin L2-normu kullanılıyorsa SEKK ters çözümü (Jupp ve Vozoff 1977), model parametrelerinin Laplacian'ı durağanlaştırıcı olarak kullanılıyorsa OCCAM ters çözümü olarak isimlendirmektedir (Sasaki 1989; DeGrooth-Hedlin ve Constable 1990).

İkinci tip sınıflandırma ise parametrik fonksiyonelin çözümünde kullanılan çözücüye (solver) göre yapılabilir. MT verilerinin ters çözümünde, fonksiyonel iki şekilde çözülmektedir. Birinci yol, bu fonksiyonelin yinelemeli en-küçük karelerle çözümünün SVD kullanarak yapılmasıdır (Jupp ve Vozoff 1977; DeGrooth-Hedlin ve Constable 1990). Fakat bu yöntemde duyarlılık düzeyinin tersi alınmakta ve düzeylerle işlem yapılmaktadır. Bu nedenle, çözüm aranırken her yinelemede düzeylerin bellekte tutulması gerekmektedir. Bu ise yüksek kapasiteli bilgisayar hafızasını gerektirmektedir. İkinci yol ise Gradient tipi yöntemlerdir (Newton, Steepest Descent, CG). Bunlardan en çok kullanılan, diğerlerine göre hızlı çalışan ve daha iyi sonuç veren CG yöntemidir (Mackie ve diğ. 1997; DeLugao ve diğ. 1997; Rodi ve Mackie 2001; Zhdanov ve Hursan 2000). Bu yöntemde, vektörlerle işlem yapılmaktadır ve düzey tersi alınmamaktadır. CG yönteminde, her yinelemede vektör değerleri hafızada tutulduğundan daha az bilgisayar hafızasına gereksinim vardır.

CG yönteminde düzey tersi alınmaması ve vektörlerle işlem yapılmasına karşın, LSSVD kullanarak yapılan EKK çözümünde ise düzey tersi alındığından ve düzeylerle işlemler yapıldığından, son yıllarda genel görüş olarak CG yöntemi tercih edilmektedir. CG yönteminin tercih edilmesinin başka bir sebebi ise, çözüm algoritmasının daha kısa olmasıdır.

Bu iki tip sınıflandırma dışında tutulan başka algoritmalarda vardır. Duyarlılık düzeyi hesabı 2-B ters çözüm algoritmasında en çok zaman alan bölümdür (yaklaşık %75) (Jupp ve Vozoff, 1977). Bu düzeyin hesaplanması hızlı olursa, ters çözüm algoritmasında büyük oranda hızlanır. Bu amaç için Smith ve Booker (1991), homojen veya 1-B yer modeli için duyarlılık düzeyini hesaplanmasını ve 2-B ters çözümde bu düzeyi kullanılmasını önermişler ve algoritmalarını “rapid relaxation inversion (RRI)” olarak isimlendirmişlerdir. Yine buna benzer algoritmalar; Oldenburg ve Ellis (1991)’ in “approximate inverse mapping (AIM)” ve Smith ve diğ. (1999)’ un “sharp inversion” algoritmaları verilebilir. Bu grup algoritmalar hızlı çalışmaktadır. Fakat, karmaşık modeller için gerçek çözümü vermemektedirler (Siripunvaraporn ve Egbert 2000). Yine Siripunvaraporn ve Egbert (2000) ise parametre sayısının, veri sayısından çok büyük olduğu durumlar için OCCAM ters çözüm algoritmasını hızlandıran ve daha iyi sonuç veren “reduced based OCCAM (REBOCC)” algoritmasını tanıtmışlardır.

Günümüzde MT verilerinin 2-B ters çözümünde kullanılan algoritmalar, bu algoritmalarda kullanılan düz çözüm yöntemi, duyarlılık düzeyi hesabı yöntemi durağanlaştırıcı ve kullanılan ters çözüm yöntemi Çizelge 4.1’ de verilmektedir. Bu Çizelgeye göre, günümüzde kullanılan algoritmaların çoğunda; düz çözüm’ de SF’ lar, ters çözümde ise CG yöntemleri kullanılmaktadır. Yine bu algoritmalarda durağanlaştırıcı olarak OCCAM durağanlaştırıcısı kullanılmaktadır. Ayrıca bu algoritmaların hepsi FORTRAN programlama dilinde yazılmıştır. Bu ters çözüm algoritmaları, çözüm güçleri açısından birbirleri ile karşılaştırılmışlardır. Örneğin; Siripunvaraporn ve Egbert (2000) algoritmalarını OCCAM, NLCG ve RRI ile karşılaştırmışlardır. OCCAM ters çözüm algoritmasının diğerlerinden yavaş olduğu gösterilmiştir. Fakat bu algoritmalar, OCCAM algoritmasının düz çözüm bölümünde SE yöntemi kullanılırken, diğerlerinde SF yöntemi kullanılmaktadır. REBOCC, NLCG ve RRI algoritmalarında duyarlılık düzeyi hesabında karşılıklı (reciprocity) ilkesi kullanılmış, fakat OCCAM algoritmasında kullanılmamıştır. Sadece bu iki sebepten dolayı OCCAM algoritması zaten diğer algoritmalara göre yavaş çalışmaktadır. NLCG algoritmasında CG yöntemi kullanılırken, OCCAM ve RRI algoritmalarında LSSVD ters çözüm yöntemi kullanılmıştır. Yapılan karşılaştırmalarda bu kriterler gözönünde bulundurulmamıştır.

Genel olarak, iki ters çözüm algoritmasını karşılaştırırken, bu algoritmalar, kuramsal veriyi hesaplama yöntemi ve duyarlılık düzeyi hesaplama yönteminin aynı olması gerekir. Aynı amaç için iki farklı kişinin yazdığı algoritmalar, kullanılan çözüm yöntemleri aynı olsa bile birbirinden farklı

sonuç verebilirler. Bu nedenle, iki durağanlaştırıcının çözüm gücü karşılaştırılacaksa, diğer bölümlerin aynı olması gerekir.

Çizelge 4.1. Son yıllarda MT verilerinin 2-B ters çözümünde kullanılan algoritmalar

Algoritmanın İsmi	Yazarlar	Kullanılan Düz Çözüm Yöntemi	Kullanılan Ters çözüm algortması	Kullanılan Durağanlaştırtıcı
NLCG	Mackie (1997) ve Rodi ve Mackie(2001)	“Transmission-network analogy” ile SF	CG	OCCAM
RRI	Smith ve Booker (1991)	SF	LSSVD	OCCAM
OCCAM	DeGrootHedlin ve Constable (1990)	SE	LSSVD	OCCAM
REBOCC	Siripunvaraporn ve Egbert (2000)	SF	CG	OCCAM
MT2DINV	DeLugao ve diğ. (1997) Mehanee ve diğ. (1998)	SF	CG	L2-norm ve MS

Bu çalışmada, MT verilerinin 2-B ters çözümü için yeni bir algoritma geliştirilmiştir. Algoritma, dördüncü kuşak bir dil olan MATLAB’ da yazılmıştır. Geliştirilen algoritmada, farklı durağanlaştırıcılar için ters çözüm yapılabilir. Yine ters çözüm algoritmasında ise isteğe bağlı CG veya LSSVD ters çözüm yöntemleri kullanılabilir.

Yukarıda yapılan iki farklı sınıflandırmada, ilk grup sınıflandırmaya göre en çok kullanılan durağanlaştırıcı model parametrelerinin Laplacian’ leridir. Bundan başka, L2-norm, MS, MinEnt-1 durağanlaştırıcıları da MT verilerinin 2-B ters çözümünde önerilmiştir. Yine MGS durağanlaştırıcısı gravite ve manyetik verilerin ters çözümünde kullanılmıştır. MT verilerinin 2-B ters çözümünde, bu durağanlaştırıcıların birbirine göre nasıl sonuç vereceği konusunda bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu çalışmada, MT verilerinin 2-B ters çözümünde; L2-norm, OCCAM, MS, MGS, MinEnt-1 durağanlaştırıcılarının sonuçları karşılaştırılmıştır. MGS durağanlaştırıcısı ilk kez bu çalışmada MT verilerinin ters çözümünde kullanılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda en iyi sonuç veren durağanlaştırıcı belirlenmiştir.

Çözücü (solver) olarak SVD ile EKK (LSSVD) çözümü ile CG algoritmaları, hız ve çözüm güçleri açısından birbirine göre karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak hızlı çalışan ve doğru sonuç veren bir ters çözüm algoritması geliştirilmiştir.

Ayrıca, farklı bir çözüm yöntemi olarak bu çalışmada LSSVD ve CG yöntemlerinin birlikte kullanımı önerilmiştir. Ters çözüme önce LSSVD ile başlanacak, bu algoritma artık MISFIT' i küçültemediği durumda CG yöntemi ile ters çözüme devam edecektir. Bu algoritma, tek tek çözümlerden daha hızlı çalışmakta ve daha iyi sonuç vermektedir.

4.1. Algoritma

Geliştirilen algoritmada, kuramsal veriler SF yöntemi ile hesaplanmıştır. Duyarlılık düzeyinin hesaplanmasında ise karşıtlık prensibinden yararlanılmıştır. Bunlar hakkında ayrıntılı bilgi bölüm 2 ve 3' de verilmiştir. Ters çözüm algoritmasında, faz radyan cinsinden alınmıştır. Duyarlılık düzeyi hesabında ise GÖ ve parametrelerin doğal logaritması kullanılmıştır. Ayrıca, veri ve parametre vektörlerine isteğe bağlı ağırlık verilebilmektedir.

Ters çözüm algoritması, isteğe göre CG veya LSSVD ile çözüm bulabilmektedir. Her iki ters çözüm algoritması da, L2-norm, MS, MGS, MinEnt-1 ve OCCAM durağanlaştırıcıları için çalıştırılabilir.

Algoritmada yine isteğe göre, sadece öz direnç, faz veya her iki tür veriyi kullanarak ters çözüm yapılabilir. Aynı şekilde, sadece TE-modu, TM-modu veya her iki modun verileri ters çözümde kullanılabilir.

Ters çözüm sonucu hesaplanan model doğrudan grafik olarak ekranda görülebilmektedir. Ayrıca parametre değerleri ile diğer ters çözüm parametreleri, "ASCII" formatındaki dosyalara yazılmaktadır.

4.2. Yapay Veri

İki farklı model için hesaplanmış TE ve TM modu yapay verileri ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Birinci yapay veri Wannamaker ve diğerleri' nin (1987), PW2D isimli programı kullanılarak hesaplanmıştır.

Varentsov tarafından hazırlanan COPROD2S-1 isimli veri kümesi, ikinci yapay veri olarak kullanılmıştır (bkz. MTNET-
“<http://www.cg.nrcan.gc.ca/mtnet/mtnet.html>). Verilere hata eklenmemiştir.

4.3. Yapay Veri Uygulaması-1

Birinci yapay veri Şekil 4.1’ de görülen model için hesaplanmıştır. Bu model için kullanılan model ağı bilgileri, istasyon sayısı, frekans sayısı ve frekans değerleri Çizelge 4.2’ de verilmiştir. Model ağında, sol, sağ ve aşağılara doğru gidildikçe blok boyutları büyümektedir. Ters çözümde aynı model ağı kullanılmıştır. TE- ve TM-modu verilerinin ayrı ayrı ve birlikte ters çözümleri yapılmıştır. Tüm durağanlaştırıcılar için yapılan ters çözümlerde, en büyük yineleme 10, en küçük MISFIT 0.0003 alınmıştır.

Çizelge 4.2. Model-1 için kullanılan frekans sayısı, frekans değerleri, ağ parametreleri ve istasyon sayısı

in 33
jo

17 %-- frekans sayısı
8192. 4096. 2048. 1024. 512. 256. 128. 64. 32. 16. 8. 4. 2. 1 0.5 0.25 0.125
29 %--x-yönündeki blok sayısı
5000 2500 1000 1000 500 250 250 500 500 500 250 250 500 1000 1000
1000 500 250 250 500 500 500 250 250 500 1000 1000 2500 5000 %- dx
değerleri

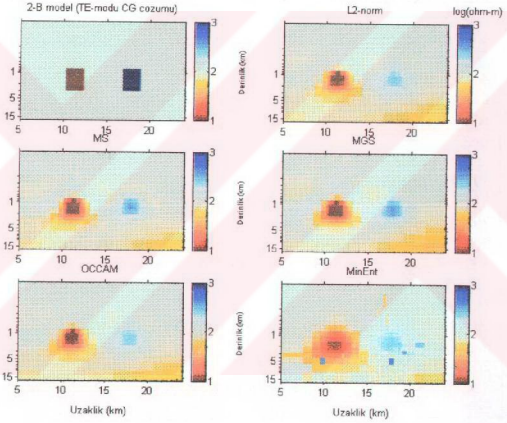
16 %--z-yönündeki blok sayısı
20 40 40 100 100 250 250 250 500 500 500 500 1000 2000 4000 8000 %--
dz değerleri

26 %-- istasyon sayısı
3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28

4.3.1. MT verilerinin CG yöntemi ile 2-B ters çözümünde farklı durağanlaştırıcıların kullanılması

TE-modu verileri ile yapılan ters çözüm sonuçları Şekil 4.1' de görülmektedir. Her durağanlaştırıcı için yapılan ters çözüm sonucunda; yinleme sayısı, MISFIT ve "CPU" zamanı Çizelge 4.3a' da görülmektedir. MinEnt-1 durağanlaştırıcısı ile çözümde, gerçekte olmayan küçük belirtiler görülmektedir. İletken cisim olduğundan büyük bulunmuş, yalıtkan cisim

ise tam olarak bulunamamıştır. Diğer durağanlaştırıcılar ile yapılan ters çözüm sonucunda elde edilen modellerde, genel olarak iletken cisim belirlenebilmektedir. Yalıtkan cisim ise tam olarak ayırt edilememektedir. Yalıtkan cismin bulunamamasının nedeni; TE-modu verilerinin bu cisme duyarlı olmamasıdır. MS ve MGS durağanlaştırıcılarının çözümleri, diğerlerine göre daha iyi sonuç vermiştir. Yine bu iki durağanlaştırıcı ile yapılan ters çözüm, yineleme sayısı aynı olmasına rağmen daha kısa sürmüştür. MS durağanlaştırıcısı ile yapılan ters çözümde, MISFIT en küçük bulunmuştur. OCCAM algoritması ise en yavaş çalışan algoritmadır.



Şekil 4.1. TE-modu verilerinin L2-norm, MS, MGS, MinEnt-1, OCCAM durağanlaştırıcıları için CG yöntemi ile ters çözüm sonuçları.

TM-modu verileri ile yapılan ters çözüm sonuçları Şekil 4.2’ de görülmektedir. Her durağanlaştırıcı için yapılan ters çözüm sonucunda; yineleme sayısı, MISFIT ve “CPU” zamanı Çizelge 4.3b’ de verilmiştir. TE-modu verilerinin ters çözümünde olduğu gibi, burada da MinEnt-1

durağanlaştırıcısı ile çözümde, gerçekte olmayan küçük belirtiler görülmektedir. İletken ve yalıtkan cisim olduğundan büyük bulunmuştur. Diğer durağanlaştırıcılar ile yapılan ters çözüm sonucunda elde edilen modellerde, genel olarak her iki cisim de belirlenebilmektedir. MS ve MGS durağanlaştırıcılarının çözümleri, diğerlerine göre daha iyi sonuç vermiştir. En hızlı algoritma ise L2-norm durağanlaştırıcısı ile yapılan ters çözüm algoritmasıdır. OCCAM durağanlaştırıcısı ile yapılan ters çözümde, MISFIT en küçük bulunmuş fakat en uzun zamanda çözümü bulmuştur. MGS algoritması ise beş yinelemeden sonra, MISFIT' i küçültemediğinden, ters çözüm işlemini bitirmiştir.

Çizelge 4.3.a. TE-modu verilerinin farklı durağanlaştırıcılar ile CG algoritması kullanarak ters çözümünde; yineleme sayısı, MISFIT ve hesaplama zamanları.

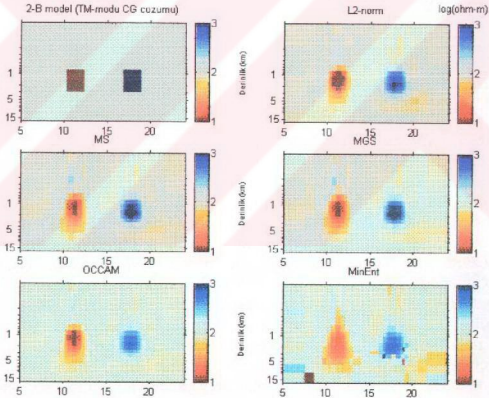
TE (CG)			
Durağanlaştırıcı	Yineleme Sayısı	MISFIT (%)	Hesaplama Zamanı (sn)
L2-Norm	10	0.980	230
MS	10	0.900	227
MGS	10	1.340	227
MinEnt-1	10	2.740	302
OCCAM	10	0.990	456

TE- ve TM-modu verilerinin birleşik ters çözümü sonuçları Şekil 4.3' de görülmektedir. Her durağanlaştırıcı için yapılan ters çözüm sonucunda; yineleme sayısı, MISFIT ve "CPU" zamanı Çizelge 4.3c' de verilmiştir. Birleşik ters çözümde, veri sayısı, TE- veya TM-modu verilerinin ayrı ayrı ters çözümünde kullanılanın iki katı olduğundan, algoritma daha yavaş çalışmaktadır. Birleşik ters çözüm sonuçları, TM-modu verilerinin ters çözüm sonuçlarına benzemektedir. Fakat TM-modu verilerinin ters çözümünde homojen ortamın öz direnci gerçek modeldekine daha yakın bulunmuştur. Diğer taraftan, iletken cisim birleşik ters çözümde daha belirgin bulunmuştur. Burada, MinEnt-1 durağanlaştırıcısı ile çözüm, aynı durağanlaştırıcının tek mod veri ile ters çözümünden daha iyi sonuç vermiştir. Fakat, yine de iletken ve yalıtkan cisim olduğundan büyük bulunmuş. Diğer durağanlaştırıcılar ile yapılan ters çözüm sonucunda elde edilen modellerde, genel olarak her iki cisim de belirlenebilmektedir. MS ve OCCAM durağanlaştırıcılarının çözümleri, diğerlerine göre daha iyi sonuç vermiştir. En hızlı algoritma ise L2-norm durağanlaştırıcısı ile yapılan ters çözüm algoritmasıdır. L2-norm ve OCCAM durağanlaştırıcıları ile yapılan ters çözümlerde, MISFIT birbirine yakın ve diğerlerinden küçük

bulunmuştur. Fakat OCCAM algoritması en uzun zamanda sonuca ulaşmıştır. MinEnt-1 durağanlaştırıcısı ile ters çözümde, dördüncü yinelemeden sonra, MISFIT küçültülemediğinden, ters çözüm algoritması durmuştur.

Çizelge 4.3.b. TM-modu verilerinin farklı durağanlaştırıcılar ile CG algoritması kullanarak ters çözümünde; yineleme sayısı, MISFIT ve hesaplama zamanları.

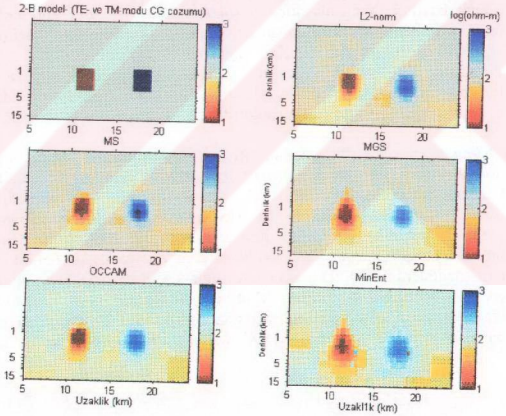
TM (CG)			
Durağanlaştırıcı	Yineleme Sayısı	MISFIT (%)	Hesaplama Zamanı (sn)
L2-Norm	10	1.130	366
MS	10	1.340	416
MGS	5	1.790	193
MinEnt-1	10	2.470	515
OCCAM	10	0.780	595



Şekil 4.2. TM-modu verilerinin L2-norm, MS, MGS, MinEnt-1, OCCAM durağanlaştırıcıları için CG yöntemi ile ters çözüm sonuçları.

Çizelge 4.3.c. TE- ve TM-modu verilerinin farklı durağanlaştırmacılar ile CG algoritması kullanarak birleşik ters çözümünde; yineleme sayısı, MISFIT ve hesaplama zamanları.

TE&TM (CG)			
Durağanlaştırmacı	Yineleme Sayısı	MISFIT (%)	Hesaplama Zamanı (sn)
L2-Norm	10	1.270	1153
MS	10	1.380	1128
MGS	10	1.790	1136
MinEnt	4	2.720	718
OCCAM	10	1.280	1632



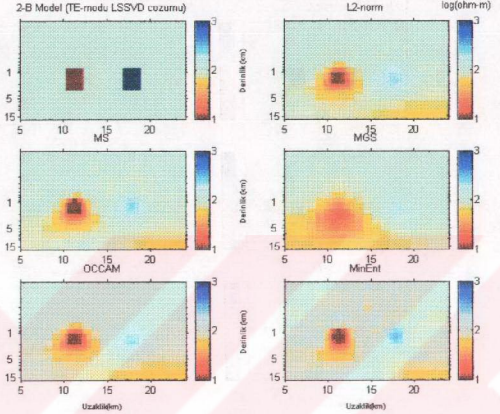
Şekil 4.3. TE- ve TM-modu verilerinin L2-norm, MS, MGS, MinEnt-1, OCCAM durağanlaştırmacıları için CG yöntemi ile birleşik ters çözüm sonuçları.

4.3.2. MT verilerinin LSSVD algoritması ile ters çözümünde farklı durağanlaştırıcıların kullanılması

Bu bölümde de, CG çözümünde kullanılan durağanlaştırıcılar ile yapılan LSSVD ters çözüm sonuçları karşılaştırılacaktır.

TE-modu verilerinin ile yapılan ters çözüm sonuçları Şekil 4.4' de görülmektedir. Her durağanlaştırıcı için yapılan ters çözüm sonucunda; yineleme sayısı, MISFIT ve "CPU" zamanı Çizelge 4.4a' da verilmiştir. MinEnt-1 durağanlaştırıcısı ile çözümde, iletken cisim olduğundan biraz büyük bulunmuştur, yalıtkan cisim ise tam olarak bulunamamıştır. Diğer durağanlaştırıcılar ile yapılan ters çözüm sonucunda elde edilen modellerde, genel olarak iletken cisim belirlenebilmektedir. Yalıtkan cisim ise tam olarak ayırt edilememektedir. MS ve MGS durağanlaştırıcılarının çözümleri birbirine benzemektedir. Diğer taraftan, L2-norm ve OCCAM durağanlaştırıcılarının ters çözüm sonuçları da benzerdir. Fakat, genel olarak bu dört durağanlaştırıcının sonuçları da aynı gibi görülmektedir. MinEnt-1 hariç, diğer durağanlaştırıcılar ile yapılan ters çözümlerde, MISFIT' i küçültemediğinden, beş yineleme sonunda ters çözüm algoritması durmuştur. L2-norm, MS ve MGS algoritmaları yaklaşık eşit zamanda, birbirine yakın MISFIT değerleri ile çözümü bulmuştur. OCCAM algoritması ise en yavaş çalışan algoritmadır.

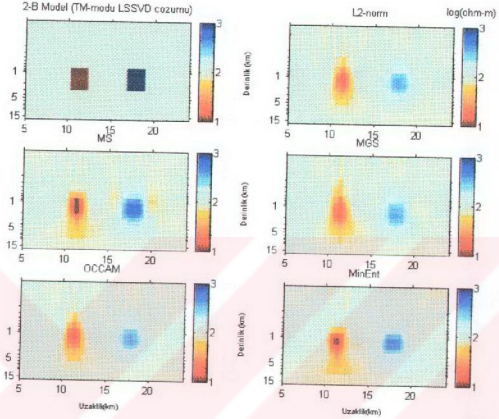
TM-modu verileri ile yapılan ters çözüm sonuçları Şekil 4.5' de görülmektedir. Her durağanlaştırıcı için yapılan ters çözüm sonucunda; yineleme sayısı, MISFIT ve "CPU" zamanı Çizelge 4.4b' da verilmiştir. İletken ve yalıtkan cisim en iyi MS durağanlaştırıcısı ile yapılan ters çözümde bulunmuştur. Diğer durağanlaştırıcıların ters çözüm sonuçları birbirine benzemektedir. MinEnt-1 hariç, diğer durağanlaştırıcılar ile yapılan ters çözümlerde, MISFIT' i küçültemediğinden, iki yineleme sonunda ters çözüm algoritması durmuştur. MinEnt-1 durağanlaştırıcısı ise yine aynı sebepten fakat dört yineleme sonunda durmuştur. Yineleme sayısı eşit durağanlaştırıcılar arasında, OCCAM algoritması en yavaş çalışan algoritmadır.



Şekil 4.4. TE-modu verilerinin L2-norm, MS, MGS, MinEnt-1, OCCAM durağanlaştırıcıları için LSSVD ile ters çözüm sonuçları.

Çizelge 4.4.a. TE-modu verilerinin LSSVD kullanarak farklı durağanlaştırıcılar ile ters çözümünde; yineleme sayısı, MISFIT ve hesaplama zamanları.

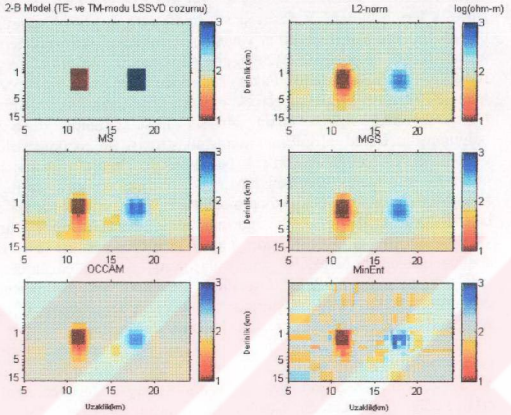
TE (LSSVD)			
Durağanlaştırıcı	Yineleme Sayısı	MISFIT (%)	Hesaplama Zamanı (sn)
L2-Norm	5	1.26	114
MS	5	1.35	116
MGS	5	1.23-1.35	116
MinEnt-1	3	2.00	82
OCCAM	5	1.26	149



Şekil 4.5. TM-modu verilerinin L2-norm, MS, MGS, MinEnt-1, OCCAM durağanlaştırıcıları için LSSVD ile ters çözüm sonuçları.

Çizelge 4.4.b. TM-modu verilerinin LSSVD kullanarak farklı durağanlaştırıcılar ile ters çözümünde; yineleme sayısı, MISFIT ve hesaplama zamanları.

TM (LSSVD)			
Durağanlaştırıcı	Yineleme Sayısı	MISFIT (%)	Hesaplama Zamanı (sn)
L2-Norm	2	2.40	102
MS	2	2.63	101
MGS	2	2.63	100
MinEnt-1	4	4.00	174
OCCAM	2	2.41	120



şekil 4.6. TE ve TM-modu verilerinin L2-norm, MS, MGS, MinEnt-1, OCCAM durağanlaştırıcıları için LSSVD ile birleşik ters çözümleri.

Çizelge 4.4.c. TE- ve TM-modu verilerinin LSSVD kullanarak farklı durağanlaştırıcılar ile birleşik ters çözümünde; yineleme sayısı, MISFIT ve hesaplama zamanları.

TE&TM (LSSVD)			
Durağanlaştırıcı	Yineleme Sayısı	MISFIT (%)	Hesaplama Zamanı (sn)
L2-Norm	3	1.64	275
MS	3	1.65	254
MGS	3	1.65	255
MinEnt	5	3.00	368
OCCAM	3	1.65	279

TE- ve TM-modu verilerinin birleşik ters çözümü sonuçları şekil 4.6' da görölmektedir. Her durağanlaştırıcı için yapılan ters çözüm sonucunda;

yineleme sayısı, MISFIT ve "CPU" zamanı Çizelge 4.4c' de verilmiştir. Birleşik ters çözümde, veri sayısı ve dolayısıyla duyarlılık düzeyi iki kat büyüdüğünden, algoritma daha yavaş çalışmaktadır. Birleşik ters çözüm sonuçları CG çözümünde olduğu gibi, TM-modu verilerinin ters çözüm sonuçlarına benzemektedir. Fakat TM-modu verilerinin ters çözümünde homojen ortamın özdirenci gerçek modeldekine daha yakın bulunmuştur. Diğer taraftan, iletken cisim birleşik ters çözümde daha belirgin bulunmuştur. Burada, MinEnt-1 durağanlaştırıcısı ile çözümde, iletken ve yalıtkan cisim olduğundan küçük bulunmuştur. Bunun yanında, homojen ortam ise tam olarak bulunamamıştır. Diğer durağanlaştırıcılar ile yapılan ters çözüm sonucunda elde edilen modellerde, genel olarak her iki cisim de belirlenebilmektedir. En hızlı algoritma ise L2-norm durağanlaştırıcısı ile yapılan ters çözüm algoritmasıdır. OCCAM algoritması en uzun zamanda sonuca ulaşmıştır. MinEnt-1 durağanlaştırıcısı ile ters çözümde, beşinci yinelemeden sonra, MISFIT' i küçültemediğinden, ters çözüm algoritması durmuştur. Diğer durağanlaştırıcılar ile yapılan ters çözümde ise, aynı sebepten üçüncü yineleme sonunda algoritma durmuştur.

Genel olarak, parametrik fonksiyonelin LSSVD kullanarak, yinelemeli olarak yapılan EKK çözümünde, farklı durağanlaştırıcıların çözümü çok da etkilemediği görülmektedir. Çözüm algoritmasını daha çok sönüm faktörü etkilemektedir.

4.3.3. CG ve LSSVD algoritmalarının karşılaştırılması

Bu bölümde, CG ve LSSVD ile yapılan ters çözüm sonuçları karşılaştırılacaktır. Her durağanlaştırıcı için yapılan ters çözüm sonucunda; yineleme sayısı, MISFIT ve "CPU" zamanı Çizelge 4.5a,b ve c' de verilmiştir. LSSVD ve CG algoritmalarının, tüm durağanlaştırıcılar için ters çözümünde en büyük yineleme sayısı 10 alınmıştır. CG algoritmasının, tüm durağanlaştırıcılar için ters çözümünde, algoritma en büyük yineleme sayısına kadar devam etmiştir. LSSVD ile çözümde ise, MinEnt-1 hariç, diğer durağanlaştırıcılar ile yapılan ters çözümlerde, MISFIT iyileştirilemediğinden, TE-modunda beş, TM-modunda iki, ve birleşik ters çözümde üç yineleme sonunda ters çözüm algoritması durmuştur. Buradan CG algoritmasının daha durağan çalıştığı söylenebilir.

Fakat hız açısından karşılaştırıldığında 1 yineleme için, l2-norm' u durağanlaştırıcı olarak kullanıldığında, CG algoritması 72.9 saniyede çözümü bulmakta, LSSVD algoritması ise 16.1 saniyede çözümü bulmaktadır. LSSVD algoritması daha hızlı çözüme yaklaşmasına rağmen, "local minimum" a takıldığından, belirli yinelemeden sonra algoritma

durmaktadır. Bu sonuca göre, yeni bir algoritma önerilmiştir. Bu algoritma sonraki bölümde verilmektedir.

Çizelge 4.5.a. TE-modu verilerinin LSSVD ve CG kullanarak farklı durağanlaştırmalar ile ters çözümünde; yineleme sayısı, MISFIT ve hesaplama zamanları.

TE						
Durağanlaştırıcı	Yineleme Sayısı		MISFIT (%)		Hesaplama Zamanı (sn)	
	CG	LSSVD	CG	LSSVD	CG	LSSVD
L2-Norm	10	5	0.98	1.26	230	114
MS	10	5	0.90	1.35	227	116
MGS	10	5	1.34	1.23	227	116
MinEnt	10	3	2.74	2.00	302	82
OCCAM	10	5	0.99	1.26	456	149

Çizelge 4.5.b. TM-modu verilerinin LSSVD ve CG kullanarak farklı durağanlaştırmalar ile ters çözümünde; yineleme sayısı, MISFIT ve hesaplama zamanları.

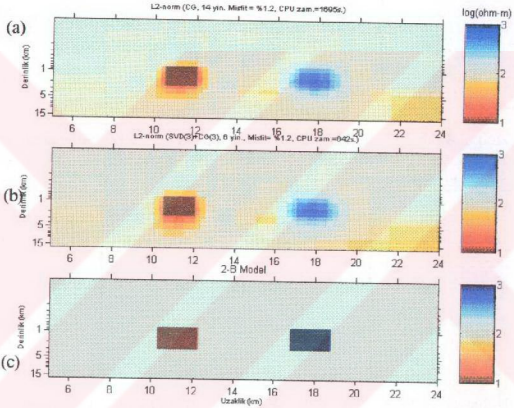
TM						
Durağanlaştırıcı	Yineleme Sayısı		MISFIT (%)		Hesaplama Zamanı (sn)	
	CG	LSSVD	CG	LSSVD	CG	LSSVD
L2-Norm	10	2	1.13	2.40	366	102
MS	10	2	1.34	2.63	416	101
MGS	5	2	1.65	2.63	193	100
MinEnt-1	10	4	2.47	4.00	515	144
OCCAM	10	2	0.78	2.41	595	120

Çizelge 4.5.c. TE- ve TM-modu verilerinin LSSVD ve CG kullanarak farklı durağanlaştırmalar ile birleşik ters çözümünde; yineleme sayısı, MISFIT ve hesaplama zamanları.

TE&TM						
Durağanlaştırıcı	Yineleme Sayısı		MISFIT (%)		Hesaplama Zamanı (sn)	
	CG	LSSVD	CG	LSSVD	CG	LSSVD
L2-Norm	10	3	1.27	1.64	1153	273
MS	10	3	1.38	1.65	1128	254
MGS	10	3	1.79	1.65	1136	255
MinEnt	4	5	2.72	3.00	718	368
OCCAM	10	3	1.28	1.65	1632	279

4.3.4. LSSVD ve CG algoritmaları ile ardışık ters çözüm

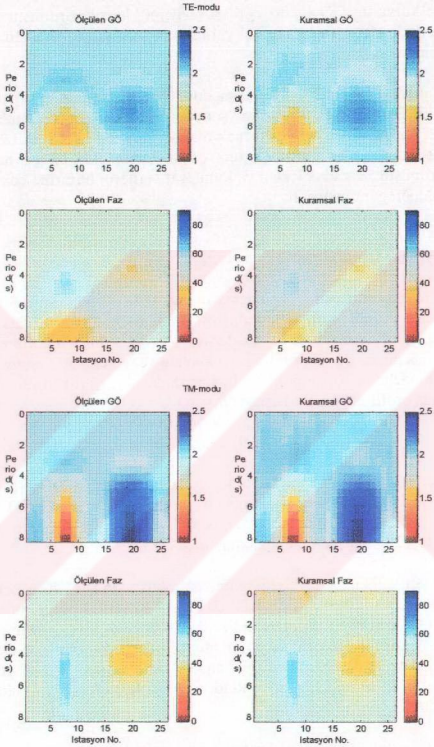
Bu algoritma, LSSVD ile çözüme başlar. LSSVD ile az sayıda yineleme ile hızlı bir şekilde MISFIT küçültülür. Bu algoritmanın MISFIT' i küçültemediği durumda ise CG algoritması ile ters çözüme devam edilir. Böylece modele ait ayrıntılar daha belirgin hale getirilir. Her iki çözüm algoritmasını ardışık olarak kullanan bu yeni algoritma LSSVD_CG olarak isimlendirilmiştir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7. (a) L2-norm durağanlaştırıcısı için CG algoritması ile elde edilen model, (b) LSSVD_CG algoritması ile elde edilen model ve (c) gerçek model.

4.3.5. Birinci model için ters çözüm sonuçlarının tartışılması

Bir ters çözüm sonucunun doğruluğu incelenirken, sadece MISFIT' in küçük olmasına bakılarak karar verilemez. Bunun için her istasyon için ölçülen ve kuramsal verilerin uyumlu olup olmadığına da bakmak gerekir. Bu uygulamada yapılan tüm ters çözüm sonuçlarında;



Şekil 4.8. PW2D programı ile hesaplanan GÖ ve faz yapma-kesitleri (ölçülen olarak alınmış) ile, L2-norm durağanlaştırıcısına göre CG ile yapılan ters çözüm sonucu kuramsal GÖ ve faz yapma kesitleri.

ölçülen ve kuramsal GÖ ve faz eğrileri çizilerek, karşılaştırılmıştır. Genel olarak hepsinde ölçülen ve kuramsal verilerin benzediği gözlenmiştir. Fakat burada sunulmamışlardır.

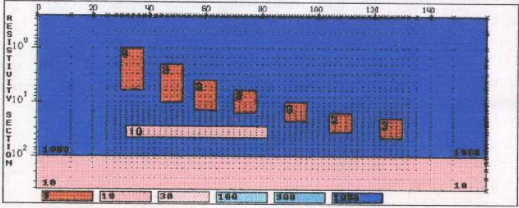
Ters çözümde kullanılan TE- ve TM-modu GÖ ve faz yapma-kesitleri Şekil 4.8' da verilmiştir. Ters çözüm sonucu bulunan model kullanarak hesaplanan kuramsal verilere bir örnek olarak; yine aynı şekilde, L2-norm durağanlaştırıcısı ile CG yöntemi ters çözümünden elde edilen modelin cevabı verilmiştir. Burada ölçülen ve kuramsal verilerin birbirine çok yakın değerler olduğu görülmektedir.

4.4. Yapay Veri Uygulaması-2

Ters çözüm algoritmasının denenmesi için ikinci veri kümesi olarak COPROD2S-1 isimli veri kullanılmıştır. Bu veriler, 1998 yılında Prof. Varentsov tarafından, farklı kişilerin ters çözüm algoritmalarını karşılaştırmak amacı ile "INV2D_FF" (Golubev ve Varentsov) isimli sonuç farklar ile modelleme yapan program ile hazırlanmıştır. Veri kümesi 160 km uzunluğunda profil boyunca 61 istasyon için ($X = 0, 12, 20, 25, 28, 30, 32, 34, 36, 38, 40, 42, 44, 46, 48, 50, 52, 54, 56, 58, 60, 62, 64, 66, 68, 70, 72, 74, 76, 78, 80, 82, 84, 86, 88, 90, 92, 94, 96, 98, 100, 102, 104, 106, 108, 110, 112, 114, 116, 118, 120, 122, 124, 126, 128, 130, 132, 135, 140, 148, 160$ km) hesaplanmıştır. Tüm istasyonlar düz bir topoğrafya üzerinde kabul edilmiştir. Veriler dört logaritmik dönem uzunluğunda $f = 0.5, 0.2, 0.1, 0.05, 0.02, 0.01, 0.005, 0.002, 0.001, 0.0005, 0.0002, 0.0001$ Hz değerleri olmak üzere toplam 12 frekans için hesaplanmıştır.

Gerçek model hakkında bir bilgi elimizde olmadığından, önce sentetik veriler kullanılarak, ayrıntısı Bölüm 2' de anlatılan VBAD programı ile iki model ağı elde edilmiştir. Bunlardan ilki 73×20 adet bloktan oluşmaktadır (Çizelge 4.6). Diğer ağ ise sadece programın büyük model için de çalıştığını göstermek amacı ile düzenlenmiştir. Bu ağda x-yönünde her istasyon arasına iki blok olacak şekilde 127, ve z-yönünde 30 olmak üzere 127×30 bloktan oluşmaktadır.

Ters çözüm sonuçlarını karşılaştırmak için gerçek model Prof. Varentsov' dan istenmiştir ve sadece görüntüsü alınmıştır. Fakat model ağı bilgileri elde edilememiştir. Gerçek model, ters çözüm sonuçlarının başarısını ölçmek için Şekil 4.9' da verilmiştir.



Şekil 4.9. COPROD2S-1 veri kümesinin hesaplanmasında kullanılan model (Varentsov' dan alınmıştır).

Çizelge 4.6. COPROD2S-1 veri kümesini kullanarak, VBAD programı ile elde edilen model ağı.

x-yönünde blok sayısı= 73 ve dx-değerleri

100000	30000	12000	12000	12000	12000	12000	12000	10000	6500	4000
2500	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
2000	2000	2500	4000	6500	10000	12000	12000	12000	12000	12000
12000	30000	100000								

z-yönünde blok sayısı= 20 ve dz-değerleri

100.	300.	1000.	3190.	3509.	3544.	3579.	3615.	3651.	3688.	3724.	3762.
6338.	10002.	10000.	20000.	20000.	40100.	100000	250000				

İstasyon sayısı = 61 ve konumları

7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	
56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67													

4.4.1. MT verilerinin CG ve LSSVD algoritmaları ile 2-B ters çözümünde farklı durağanlaştırıcıların kullanılması

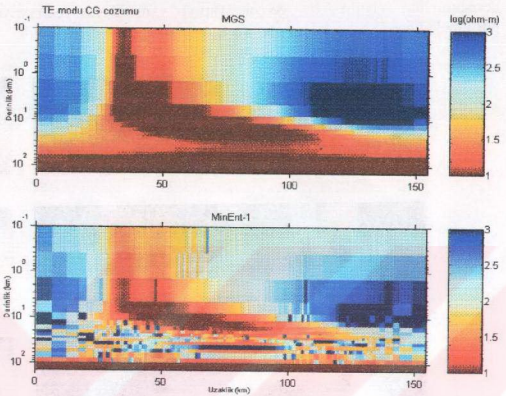
Burada, ilk ağ kullanılarak yapılan ters çözümleri tartışılacaktır. TE-modu verileri ile yapılan ters çözümlerde, ön-kestirim modeli 100ohm-m özdirençli homojen ortam alınmıştır. Her durağanlaştırıcı için yapılan ters çözümlerde; yineleme sayısı, MISFIT ve "CPU" zamanı Çizelge 4.7a' da görülmektedir. MinEnt-1 durağanlaştırıcısı ile çözümde, gerçekte olmayan

küçük belirtiler bulunmuştur. MGS durağanlaştırıcısı ise MISFIT' i 15 yineleme sonucu ancak %15' e düşürebilmiştir (Şekil 4.10). Bu sonuçlar ve ilk model ile tezde sunulmayan diğer test sonuçlarına göre MinEnt-1 ve MGS durağanlaştırıcılarının 2-B MT ters çözüm algoritmasında iyi sonuç vermediği görülmektedir. Bu nedenle bundan sonraki denemelerde bu iki durağanlaştırıcı ile yapılan ters çözüm sonuçları verilmeyecektir.

Çizelge 4.7a. COPROD2s-1, TE-modu verilerinin CG kullanarak farklı durağanlaştırıcılar ile ters çözümünde; yineleme sayısı, MISFIT ve hesaplama zamanları.

TE-modu, CG çözümü			
Durağanlaştırıcı	Yineleme Sayısı	MISFIT (%)	Hesaplama Zamanı (sn)
L2-norm	15	3.73	7099
MS	15	2.23	7081
MGS	15	15.0	7111
ME	8	3.71	4389
OCCAM	15	11.3	16618

L2-norm, MS ve OCCAM durağanlaştırıcıları ile yapılan ters çözüm sonuçları ise Şekil 4.11' de görülmektedir. Her üç ters çözüm sonucundada, gerçek modeldeki iki tabaka ayırdedilebilmektedir. Yine ilk tabaka içinde bulunan iletken cisimler tek bir yapı gibi görülmektedirler. L2 ve OCCAM durağanlaştırıcılarının çözümleri birbirine benzemekle beraber, L2-norm durağanlaştırıcısı kısmen daha iyi sonuç vermektedir. Diğer taraftan OCCAM durağanlaştırıcısı ile yapılan ters çözüm diğerlerine göre çok uzun zaman



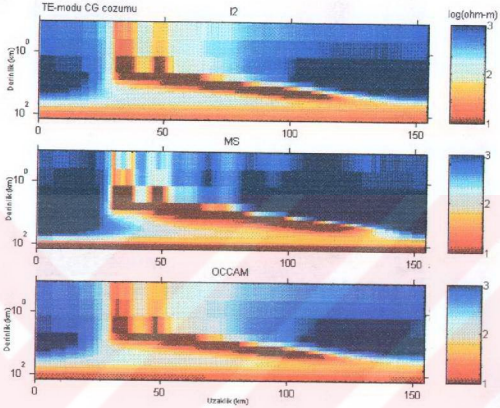
Şekil 4.10. TE-modu verilerinin CG ile MGS ve MinEnt-1 durağanlaştırıcıları ters çözümü sonucu bulunan modeller.

almaktadır. MS durağanlaştırıcısı ile yapılan ters çözümde, MISFIT en küçük bulunmuştur. Ayrıca ilk iki iletken yapı bu durağanlaştırıcı ile elde edilen modelde diğerlerine göre daha iyi ayırt edilebilmektedir.

TM-modu verileri ile yapılan ters çözümde; yineleme sayısı, MISFIT ve "CPU" zamanı Çizelge 4.8a' da görülmektedir. Burada her üç durağanlaştırıcı için yapılan ters çözümde birbirine benzer modeller bulunmuştur (Şekil 4.12). Modellerde, ilk tabakadaki iletken yapılar görülmemektedir. Aynı TM-modu verisinin Mackie ve diğ. (1997) un bilgisayar programında da benzer model ağı kullanılarak ters çözümü yapılmış ve benzer sonuç elde edilmiştir. Buradan, TM-modu verisinde, bu iletken cisimleri çözecek bilgi olmadığı sonucuna varılmıştır.

TE-modu verilerinin ters çözümünde iki tabaka ve ilk tabakadaki 3 ohm-m özdirençli yapılar bulunurken. Bu yapıların altındaki 10 ohm-m özdirençli yapı tam olarak bulunamamıştır. TM-modu verilerinin ters çözümünden ise sadece iki tabaka hakkında bilgi elde edilebilmiştir. Tek bir MT modu

verisinin ters çözümünün gerçek yapıyı yansıtmada yetersiz olduğu görülmektedir.



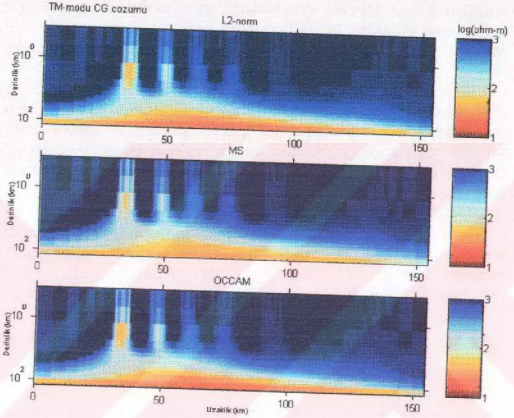
Şekil 4.11. TE-modu verilerinin CG ile L2-norm, MS ve OCCAM durağanlaştırıcıları ters çözümü sonucu bulunan modeller. (Özdirençlerin logaritmaları çizilmiştir.)

Çizelge 4.7b. COPROD2s-1, TM-modu verilerinin CG kullanarak L2-norm, MS, OCCAM durağanlaştırıcıları ile ters çözümünde; yineleme sayısı, MISFIT ve hesaplama zamanları.

TM-modu, CG çözümü			
Durağanlaştırıcı	Yineleme Sayısı	MISFIT (%)	Hesaplama Zamanı (sn)
L2-norm	15	5.26	16311
MS	15	5.86	16412
OCCAM	15	5.27	37446

İlk modelde ve bu modelde, L2-norm ve OCCAM ters çözümleri sonucu aynı sayıda yineleme ve birbirine yakın MISFIT değeri ile, benzer modeller elde edilmiştir. Fakat OCCAM ters çözümü, L2-norm ters çözümünden daha fazla zaman gerektirmektedir. Model boyutlarının artması sonucu, OCCAM

ters çözümü için gerekli zaman üstel olarak artmaktadır. Bunun sebebi, duyarlılık düzeyine, “Laplacian operatörünün” eklenmesidir. Bu nedenle, TE ve TM modu verilerinin birleşik ters çözümünde OCCAM durağanlaştırıcısı denenmemiştir.



Şekil 4.12. TM-modu verilerinin CG ile L2-norm, MS ve OCCAM durağanlaştırıcıları ters çözümü sonucu bulunan modeller. (özdirençlerin logaritmaları çizilmiştir.)

TE- ve TM-modu verilerinin birleşik ters çözümü için VBAD programı ile iki yeni ağ düzenlenmiştir. Bu ağlardan birincisinin x-yönündeki blok sayısı, her istasyon arasına bir blok olacak şekilde alınmıştır. Düşey yönde blok genişlikleri ve sayısı ise ilk blok ile aynı alınmıştır. Elde edilen 73x20 adet blokdan oluşan ilk ağ için L2-norm ve MS durağanlaştırıcıları için ters çözümü CG ve LSSVD algoritmaları ile yapılmıştır (Şekil 4.13). Tüm ters çözümler için yineleme sayısı, MISFIT ve hesaplama süreleri Çizelge 4.8’ de görülmektedir. CG algoritması kullanarak yapılan ters çözümlerde, MISFIT yaklaşık 300 yinelemeden sonra %5’ in altına düşmüştür. LSSVD algoritması ise 45 yinelemeden sonra MISFIT’ i %5’ in altına düşürmüştür.

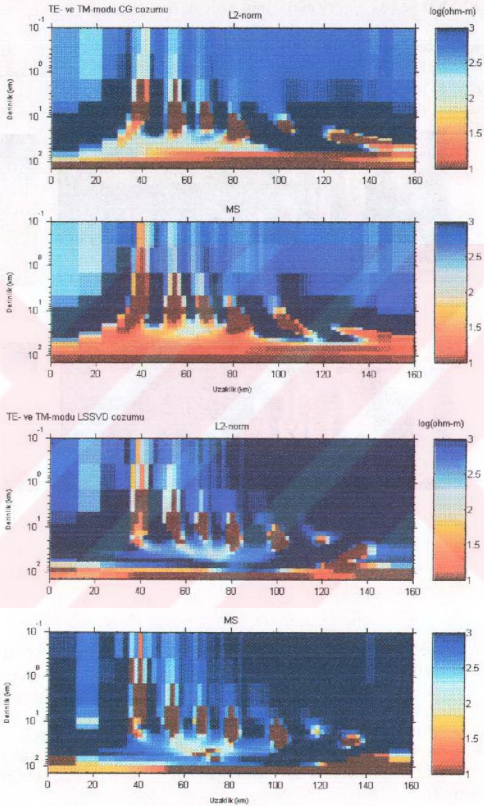
Tüm durağanlaştırmacılar için, MISFIT=%65 ile ters çözüme başlanmıştır. CG algoritması yaklaşık 5 yineleme sonunda MISFIT' i %20' nin altına düşürmektedir. Fakat sonraki yinelemelerde çok yavaş şekilde bu değer düşmektedir. Bu nedenle, CG algoritması için yapılan ters çözümlerde L2-norm durağanlaştırmacıları için ters çözüm işlemi 285 yineleme sonunda, MS durağanlaştırmacıları için ise 350 yineleme sonunda durdurulmuştur. Yineleme sayısı artırıldığında, MS-durağanlaştırmacıları ile yapılan ters çözüm de MISFIT' i %5' in altına düşürebilir. Fakat bu daha fazla zaman gerektirir.

CG algoritması ile L2-norm ve MS durağanlaştırmacıları için yapılan ters çözümlerde iki tabaka belirlenebilmektedir (Şekil 4.14). Fakat, MS durağanlaştırmacıları kullanarak elde edilen model, iki tabaka arayüzeyini MISFIT' in büyük olmasından dolayı belirgin olarak bulamamıştır. İlk tabakaya gömülü 3 ohm-m özdirençli yapılardan beş tanesi bulunmuş, son ikisi ise tek bir yapı gibi elde edilmiştir.

L2-norm ve MS durağanlaştırmacıları için LSSVD algoritmasının çözümü sonucu bulunan modeller gerçek modele daha yakın elde edilmiştir. Her iki durağanlaştırmacı çözümlerinde de iki tabaka arayüzeyi ve 3 ohm-m özdirençli yedi gömülü cisim bulunmuştur. MS- durağanlaştırmacıları için elde edilen modelde, gömülü cisimler ile altta kalan tabaka arasındaki 10 ohm-m özdirençli yapıda kısmen bulunmuştur. Ayrıca bu durağanlaştırmacı ile elde edilen modelde profilin 125. km' sindeki yapı daha iyi ayırt edilebilmektedir.

Çizelge 4.8. COPROD2S-1, TE- ve TM-modu verilerinin CG ve SVD kullanarak farklı durağanlaştırmacılar ile ters çözümünde; yineleme sayısı, MISFIT ve hesaplama zamanları.

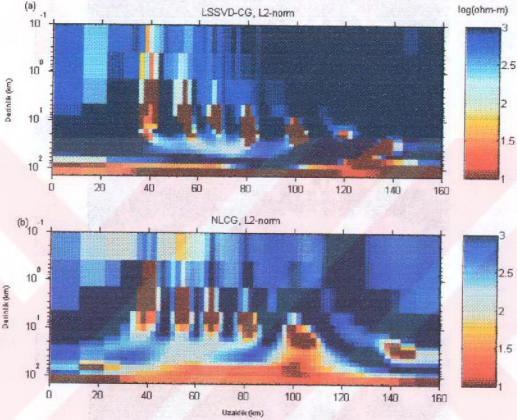
TE&TM-modu, CG ve LSSVD çözümü						
Durağanlaştırmacı	Yineleme Sayısı		MISFIT (%) RMS (%)		Hesaplama Zamanı (sn)	
	CG	SVD	CG	SVD	CG	SVD
L2-norm	285	45	4.70 0.30	4.22 0.28	87444	39553
MS	350	45	8.40 0.54	4.24 0.29	114947	41450
L2-norm LSSVD_CG Çözüm	45 SVD + 40 CG		3.2 0.21		39553+13318= 52871	
OCCAM- NLCG (Mackie ve diğ. 1997)	100		RMS=0.65			



Şekil 4.13. L2 ve MS durağanlaştırıcılarının CG ve LSSVD çözümleri (özdirençlerin logaritmaları çizilmiştir).

4.4.2. LSSVD ve CG algoritmalarının ardışık ters çözümü

Şekil 4.15a' da, bu tez çalışmasında geliştirilen LSSVD_CG algoritması ile $RMS=0.21$ hata ile elde edilen model ve Şekil 4.15b' de ise, Mackie ve diğ. (1997) 'un NLCG isimli



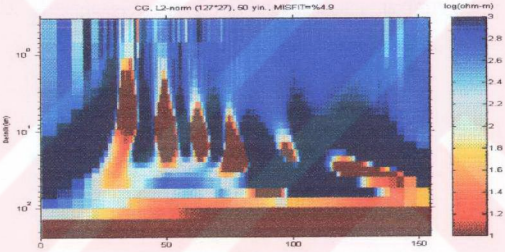
Şekil 4.14. a) LSSVD_CG algoritması ile elde edilen model. (b) Mackie ve diğ. 'un (1997) NLCG isimli algoritmalarının çözümü (özdirençlerin logaritmaları çizilmiştir).

algoritmalarından $RMS=0.65$ hata ile elde edilen model görülmektedir. Her iki ters çözümde de yukarıda sözü edilen ilk model ağı kullanılmıştır. En küçük RMS değeri önerilen algortima ile elde edilmiştir (Çizelge 4.8). LSSVD_CG algoritması ile elde edilen modelin, gerçek modele, NLCG isimli algortima ile elde edilen modelden daha yakın olduğu görülmektedir. Bu örnek, tez çalışmasında geliştirilen algoritmanın, çok yaygın olarak kullanılan NLCG isimli ters çözüm algoritmasından daha iyi sonuç verdiğini göstermektedir.

4.4.3. Büyük model ağı için COPROD2S-1 verisinin ters çözümü

Gerçek modele bakıldığında 1 km derinlikte soldan ilk yapının üst derinliği görülmektedir. Fakat ilk model ağında, 1 km derinlikten düşey yönde bir sınır yoktur. Bu nedenle bu yapının derinliğinin hiçbir durumda doğru bulunamayacağı açıktır. Buna benzer örnekler aynı model için verilebilir. Benzer şekilde, arazi verilerini yorumlarken yerindeki yapıların yatay ve düşey yöndeki sınırları bilinmemektedir. Bu nedenle model ağı düzenlerken dikkatli olunmalıdır.

Bu tezde geliştirilen VBAD algoritması ile 127x27 adet blokdan oluşan yeni bir ağ düzenlenmiştir. Bu model ağı için, L2-norm durağanlaştırıcısı ile CG çözümü verilmiştir (Şekil 4.16). Burada daha çok blok kullanıldığından gömülü yapıların sınırları gerçeğe daha yakın bulunmuştur. Fakat model ağının büyük olması çözüm süresini üstel olarak artırmaktadır.



Şekil 4.15. 127x27 boyutundaki model ağı için L2-norm durağanlaştırıcısı kullanarak CG algoritması ile elde edilen model.

4.5. Bölümün Sonuçları ve Tartışma

Bu bölümde L2-norm, MS, MGS, MinEnt-1 ve OCCAM durağanlaştırıcıları birbirine göre çözüm güçleri, yapay verinin 2-B ters çözümü ile karşılaştırılmıştır. Sonuçta MGS ve MinEnt-1 durağanlaştırıcılarının gerçekte olmayan yapıların bulunmasına neden olduğu gösterilmiştir. OCCAM durağanlatırıcısı ile ters çözümün ise L2-norm durağanlaştırıcısı çözümüne benzer sonuç vermesine karşın, çok yavaş olduğu gösterilmiştir.

Karşılaştırma işlemi CG ve LSSVD algoritmaları kullanılarak yapılmıştır. Bu iki algoritma da, süre ve çözüm gücü açısından birbiri ile karşılaştırılmış ve LSSVD algoritmasının daha az yineleme sonucunda çözüme ulaştığı gösterilmiştir.

MT verilerinin 2-B ters çözümü için yeni bir algoritma önerilmiştir. Bu algorithmada, LSSVD ile çözüme başlanacak ve hızlı bir şekilde MISFIT küçültülecektir. Bu algoritmanın artık MISFIT' i küçültemediği durumda CG algoritması ile çözüme devam edilecek. Bu yeni algoritma LSSVD_CG olarak isimlendirilmiştir. Geliştirilen bu algoritmanın, LSSVD ve CG algoritmalarının yalnız kullanıldığı durumdan daha iyi çözüm bulduğu gösterilmiştir. Ayrıca, önerilen algoritmanın günümüzde yaygın olarak kullanılan NLCG algoritmasından daha iyi sonuç verdiği gösterilmiştir.

Geliştirilen algoritmanın karmaşık modeller için iyi sonuç verdiği COPROD2S-1 veri kümesi kullanılarak gösterilmiştir. Ayrıca, yine bu tezde önerilen VBAD algoritmasının kullanışlı olduğu gösterilmiştir.

5. ARAZİ VERİSİ UYGULAMASI

Bu tez çalışmasında geliştirilen 2-B MT ters çözüm programının, arazi verilerinin yorumlanmasında nasıl sonuç verdiğinin araştırılması gerekmektedir.

Günümüzde 3-B veri toplamak çok yüksek maliyet gerektirmektedir. Bu verilerin 3-B ters çözüm ve modelleme ile yorumlanması için ise çok yüksek kapasiteli bilgisayarlara ihtiyaç vardır. Hızlı çözüm bulan algoritmalar geliştirilmektedir (Newman ve Alumbaugh 1997, 1999, Zhdanov ve diğ. 1997, 1999). Fakat bu algoritmalar basit modeller için denenmişlerdir. Bu nedenlerden dolayı, hala 3-B yeriçinin araştırılmasında büyük oranda 2-B MT modelleme ve ters çözümünden yararlanılmaktadır (Wannamaker 1999). Ülkemizde ise MTA' nın (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü) bir bölümünü de üniversitemizle yürüttüğü "Türkiye' nin yerkabuğu yapısının araştırılması projesi" kapsamında, Türkiye' yi Kuzey-Güney yönünde kesen birbirine paralel profillerde ölçülmüş MT verileri bulunmaktadır. Geliştirilen program bu büyük veri bankasının yorumunda kullanılabilir.

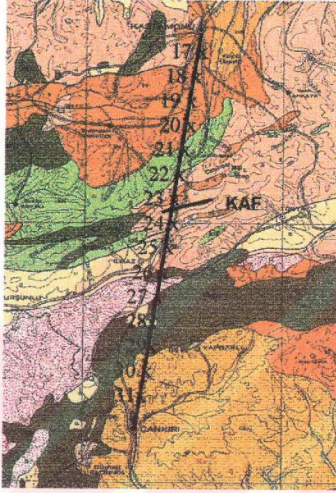
Programın test edilmesi amacıyla, MTA tarafından yukarıda sözü edilen proje kapsamında Kastamonu-Çankırı arasında kalan hat boyunca ölçülmüş bir veri grubu kullanılmıştır. Bu ölçü hattı Kuzey Anadolu Fayı (KAF)' nı kesmektedir. Bu verilerin yorumu ile bölgenin genel tektonik ve jeolojik yapısı ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır.

5.1. Arazinin Genel Jeolojisi

Kastamonu' dan, Çankırıya doğru uzanan MT profili genel olarak Eosen-Oligosen yaşlı ve Kretase yaşlı filiş ve ardından Metamorfik bir seriyi kesmektedir. Bu serinin devamında Mesozoik yaşlı Ofiyolitli bir birim ve Volkanik sedimanları geçmektedir. Profil, Çankırı' da Jipsli fasiyesler üstünde son bulmaktadır (bkz. Şekil 5.1).

5.2. MT Ölçüsü ve Veri Analizi

MT verileri olarak, MTA tarafından ölçülen, Kastamonu-Çankırı arasında kalan 17-31 numaralı istasyonlar arasındaki toplam 15 istasyon kullanılmıştır. Bu profilin 24 numaralı istasyonu, Şaroğlu ve diğ. (1992)' nin Türkiye Diri Fay haritasına göre, yaklaşık olarak KAF zonunun üstündedir (bkz. Şekil 5.1).



Açıklama

ev-el	Eosen- Oligosen filiş
kr- krf	Kretase filiş
krü-mr	Metamorfik seri ayrılmamış (mermer, kristalize kalker ve dolomit.
Mof	Mesozoik ofiyolitli seri
α	Andezit, Spilit, Porfirit
olmj	Oligosen, Miyosen jipsli fasiyes

Şekil 5.1. Kastamonu- Çankırı bölgesinin jeoloji haritası (MTA' nın hazırladığı 1:500000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritasından alınmıştır.). Harita üzerinde yaklaşık olarak ölçü hattı ve ölçü noktaları ile KAF' nın hattı kestiği yer gösterilmiştir.

MT verilerinin 2-B yorumlanmasına geçmeden önce bir dizi veri analizinden geçirilmesi gerekmektedir (bkz. Livelbrooks ve diğ. 1996, Chouteau ve diğ. 1997, Mickus 1999).

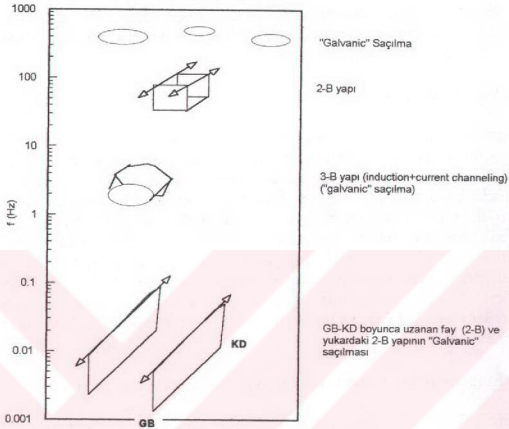
5.2.1. Veri Toplama

MT verileri, birbirine dik iki elektrik alan (E_x , E_y) ve üç manyetik alan (H_x , H_y , H_z) olarak ölçülür. Elektrik alanların ölçülmesinde polarize olmayan potlar kullanılır. Manyetik alanlar ise bobinler aracılığı ile ölçülür. Bu çalışmada kullanılan MT verileri Phoenix firmasına ait olan V5- ölçü sistemi ile toplanmıştır. Zaman serisi verilerinden, FFT ile elektrik ve manyetik alanların frekans bölgesinde değerleri elde edilir. Ölçülen arazi verilerinden 320Hz – 0.0005Hz aralığında toplam 40 frekans için E- ve H- alan değerleri elde edilmiştir. Genel olarak her istasyon için bu alan değerleri “EDI” formatında dosyalara yazılır. Uygulamada tüm istasyonlarda son beş frekans için ölçülen değerler çok gürültülü olduğundan kullanılmamıştır.

5.2.2. Empedans Verilerinin Analizi (Ayrıştırma ve Sabit Kayma)

Frekans bölgesindeki elektrik ve manyetik alan değerleri kullanılarak Bölüm 2’ de verilen (2.7) denklemi ile empedans değerleri hesaplanır. Empedans değerlerinin yorumunda iki problemi gözönünde bulundurmak gerekir. Bunlardan birincisi, empedans tensörünün 3-boyutluluğu, diğeri ise “sabit kayma (SK)” (Static Shift) etkisidir (Şekil 5.2). 2-B yoruma geçmeden önce bu iki etkinin veriden giderilmesi gerekmektedir.

Genel olarak empedans tensörü istendiği gibi ideal 2-B değildir. Yani, empedans tensörünü döndürerek Z_{xx} ve Z_{yy} değerlerini sıfır yapan bir koordinat absisi yoktur (Groom ve Bailey 1989). Bunun sebebi; 1-B veya 2-B durumda veri hatası, “3-B induction”, 1-B veya 2-B lu “induction” ın frekansdan bağımsız “galvanic akım” (current channeling) ile birleşmesi olabilir. Elektrik yükleri, yüzeye yakın 3-B yapılar etrafında toplandığında, elektrik alanda saçılmalar meydana gelir. Bu yükler “galvanic” elektrik alan oluşturur ve bu alan iletken yapı içinden ve yalıtkan yapı etrafında kanalize (channels) olur. Galvanic akım veya “Current channeling” konusunda yapılmış birçok tanımlama vardır (Berdichevsk ve Dimitriev, 1976, Jones 1983, Jiracek 1990).



Şekil 5. 2. Sabit kayma ve saçılmaya neden olan yapılar (Livelbrooks ve diğ. 1996 dan alınmıştır)

Ayrıştırma (decomposition) problemi olarak ele alınan konu; ölçülen empedansa, büyük ölçekte 1-B veya 2-B yapı içindeki küçük boyutlu 3-B yapının oluşturduğu elektrik akımlarının neden olduğu “galvanik saçılmalar”dır. Bu konu birçok araştırmacı tarafından ele alınmıştır (Bahr 1988, Groom ve Bailey 1989, 1991, Groom ve Bahr 1992, Groom ve diğ. 1993, Smith 1997, Ledo ve diğ. 1998, McNeice ve Jones 2001). Ayrıştırma probleminde en çok kullanılan yöntem Groom ve Bailey (1989)’ in yaklaşımıdır.

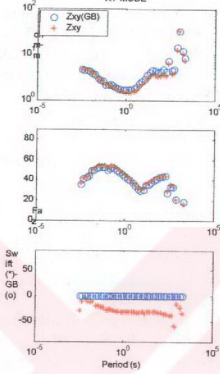
Uygulamamızda, küçük ölçekli 3-B yapıların etkisini empedans tensöründen çıkarmak ve TE- ve TM-modu empedanslarını elde etmek için Groom ve Bailey (1989)’ in yaklaşımı kullanılmıştır. Ölçü hattının geçtiği alanın genel jeoloji haritasına bakıldığında, jeolojik doğrultuların (KAF’ ı gibi) genellikle doğu-batı doğrultusunda uzandığı görülmektedir. Bu nedenle “ayrıştırma analizi” frekans bağımsız olarak, tüm frekanslarda 0° alınarak yapılmıştır. Tüm istasyonlar için yapılan ayrıştırma analizi sonunda, önemli bir saçılma

probleminin olmadığı görülmüştür. Bunu göstermek için burada sadece faya yakın 24 numaralı istasyon ile uzakta olan 29 numaralı istasyonlar verilmiştir (Şekil 5.3 ve 5.4). Tüm şekillerde ilk satırda XY- ve YX-modu için GÖ eğrileri, ikinci satırda aynı modlar için empedans faz değerleri, üçüncü satırda ise Swift (* semboller) ve GB (o semboller) den hesaplanan asal eksenlere döndürme açılarının grafikleri görülmektedir. Şekil 5.3a ve 5.4a' da, empedans değerlerinin sabit 0° döndürülerek GB (Groom-Bailey) ayrıştırma analizi sonucu, Şekil 5.3b ve 5.4b' de ise frekans bağımlı döndürülmüş ve GB ayrıştırması yapılmış empedanslardan hesaplanan GÖ ve empedans faz eğrileri görülmektedir

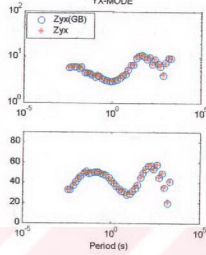
Ayrıştırma işleminden sonra elde edilen empedans tensöründe Z_{xy} ve Z_{yx} değerleri, TE-modu ve TM-modu empedans değerleri olarak alınır. Fakat hangisinin TE, hangisinin TM-modu olduğuna karar verebilmek için arazide ölçü hattının genel jeolojiye göre durumu ile "empedans strike" ve "tipper strike" eğrilerinin davranışına bakılır. Uygulamamızda, ölçü alımı sırasında E_x ve H_x alanları K-G yönünde, E_y ve H_y alanları ise D-B doğrultusunda ölçülmüştür. Jeolojik doğrultu genel olarak D-B doğrultusu boyunca uzandığından, burada Z_{yx} TE-modu empedansı, Z_{xy} ise TM-modu empedansı olarak alınmıştır.

TE- ve TM-modu empedansları belirlendikten sonra, ikinci sorun olan SK etkisinin giderilmesi gerekmektedir. SK kavramı ilk olarak Berdichevsky ve Dimitriev (1976) tarafından ortaya atılmıştır. Derinliği, nüfus derinliği'nden (penetration depth) sığ olan, küçük ölçekli 3-B yapıların etkisinden dolayı bir istasyon için tüm ölçü frekanslarındaki GÖ değerleri ile çizilen eğrinin şeklini değiştirmeden aşağı veya yukarı kaymasına neden olur. GÖ eğrisindeki bu etki SK etkisi olarak bilinir. Bu etkinin faz eğrisinde gözlenmediği kabul edilir (Jones 1983). SK etkisi gerçekte olmayan öz direnç veya derinlikteki yapıların bulunmasına neden olur. Bu etkinin giderilmesi için önerilen birçok yöntem vardır (Bostic 1986, Jones 1988; Kaufman 1988, Capuano ve diğ. 1988, Jiracek 1990, Pellerin ve Hohmann 1990, Vozoff 1991, Smith 1997, Ledo ve diğ. 1998, Berdichevsky ve diğ. 1998, Macnac ve diğ. 1998, Chakridi ve diğ. 1992, DeGroot-Hedlin 1991). Fakat bu yöntemler her tür jeolojide iyi sonuç vermemektedir (Groom ve Bahr 1992).

(a)

İstasyon No: 24 (Sabit açıya dönd.)
XY-MODE

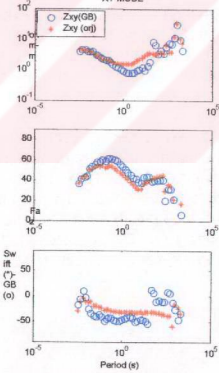
YX-MODE



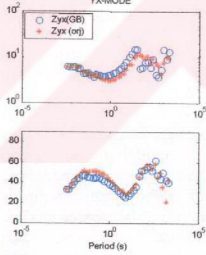
(b)

İstasyon No: 24 (Frekans bağımlı rot. ve orj. ven)

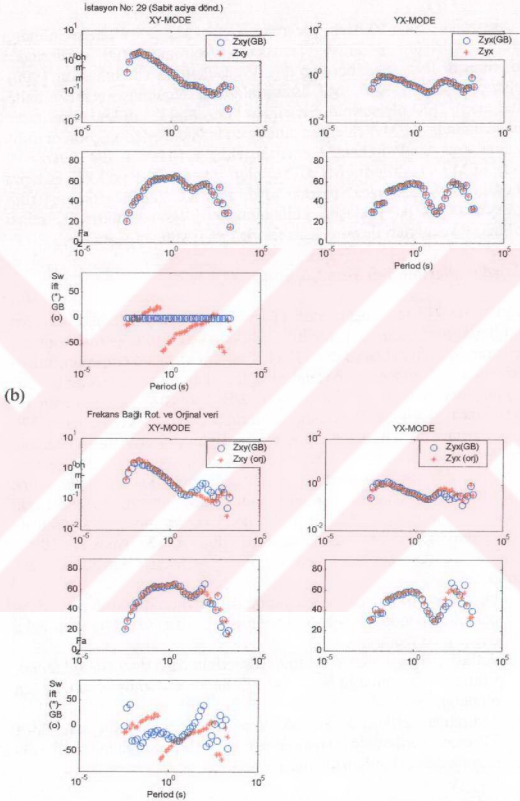
XY-MODE



YX-MODE



Şekil 5.3. 24 numaralı istasyon için ölçülen GÖ ve empedans faz ile birlikte, bu verilerin frekans bağımsız (a) ve frekans bağımlı (b) GB ayrıştırması ile elde edilen değerler.



Şekil 5.4. 29 numaralı istasyon için ölçülen GÖ ve empedans faz ile birlikte, bu verilerin frekans bağımsız (a) ve frekans bağımlı (b) GB ayrıştırması ile elde edilen değerler.

Bu çalışmada, SK etkisini gidermek için MT ölçülerinin alındığı istasyonlarda ölçülmüş TEM (Transient Electromagnetic) verilerinden yararlanılmıştır (bkz. Sternberg ve diğ. 1988, Pellerin ve Hohmann 1990). Sternberg ve diğ. (1988). MT istasyonlarında ölçülmüş merkezi halka (central loop) TEM ölçülerinin, SK etkisini düzeltmek için kullanmışlardır. Uygulamalarında, TEM ölçülerinin alındığı zaman değerlerini, etkin derinlik kavramını kullanarak frekans'a çevirmişlerdir ($f(\text{Hz}) = 194 / t(\text{ms})$). Böylece TEM GÖ eğrilerini MT GÖ eğrileri ile çizmişler ve MT eğrilerini TEM eğrileri ile karşılaştıracak şekilde kaydırarak SK etkisini gidermişlerdir. Bu çalışmada da bu yaklaşım kullanılmıştır. Ters çözümde SK etkisi giderilmiş GÖ değerleri ile empedans faz değerleri kullanılmıştır.

5.3. Arazi verilerinin 2-B Ters Çözümü

MT verilerinin 2-B ters çözümünde TE- ve TM-modu verilerinin ayrı ayrı veya birleşik ters çözümü yapılabilir. Bu konuda farklı görüşler ortaya atılmaktadır. Wannamaker ve diğ. (1984, 1989), TM-mode empedansının 3-B etkilerden, TE-mode empedansına göre daha az etkilendiğini öne sürmüştür. Yine Mackie ve diğ. (1988), 3-B düzensiz yapıları kesen bir profil boyunca ölçülmüş TM-modu verilerinin 2-B ters çözümünün, TE-modu verilerinininkine göre daha iyi sonuç verdiğini göstermiştir. Yukardaki görüşün tam tersi olan görüşü: TM-modu verilerinin büyük ölçekli yapıları çözemediğini, TE-modu verilerinin çözdiğünü Banks ve diğ. (1996) öne sürmüştür. Bu çalışmacılar kaynak gösterilerek, farklı araştırmacılar birleşik ters çözüm yerine sadece TM- veya TE-modu verilerinin ters çözümü ile yoruma gitmişlerdir (örn. Chouteau ve diğ. 1997, Mickus 1999). Berdichevsk ve diğ. (1996, 1998) ise bu genellemeyi düzeltmişlerdir. Araştırmacılar,

- i- yüzeye yakın küçük ölçekli yapılardan TM-modu verilerinin daha çok etkilendiğini, TE-modu verilerinin ise derindeki yapılara daha duyarlı olduğunu
- ii- iletken 3-B yapılarda TM-modu verilerinin daha durağan olduğunu, yalıtkan 3-B yapılar üzerinde ise TE-modu verilerinin daha durağan olduğunu
- iii- TM-modu verilerinde SK etkisinin çok fazla görüldüğünü, fakat TE-modu verilerinde bu etkinin neredeyse hiç olmadığını 2-B ve 3-B modellemeyi kullanarak göstermişlerdir.

Araştırmacılar, çalışmalarında "tecthonosphere" i (sediman örtü, kabuk ve üst manto) temsil eden 2-B ve 3-B modeller ile TE- ve TM-modu verilerinin davranışlarını incelemişler ve her iki mode verisinde birbirini tamamlayıcı

özellikle olduğunu göstermişlerdir. Çalışmalarında, TM-modu verilerinin sediman örtü ve yalıtkan litosferin öz direncini çözerken, TE-modu verilerinin ise iletken litosferin iletken bölümü ile astenosferi çözdüğünü göstermişlerdir. Sonuç olarak ise "bimodel" ters çözümü önermişlerdir. Bu çözümde, önce TE-modu verilerinin 2-B ters çözümü yapılmakta, sonra bulunan model ön-kestirim modeli alınarak TM-modu verilerinin ters çözümü yapılmaktadır. Fakat bu tekniğin de her durumda çalışmadığını söylemektedirler.

Bu çalışmada TE- ve TM-modu verilerinin birleşik ters çözümü L2-norm ve MS durağanlaştırıcıları için yapılmıştır. Her iki durağanlaştırıcı ile parametrik fonksiyoneli CG ve LSSVD algoritmaları ile çözümleri ile elde edilmiştir (Şekil 5.5). Ayrıca bu tez çalışmasında önerilen LSSVD_CG algoritması ve Mackie ve diğ.' un (1997) NLCG isimli algoritmalarını kullanarak da aynı verinin ters çözümü yapılmıştır (Şekil 5.6).

Tüm ters çözüm algoritmaları için toplam yineleme sayısı, RMS ve MISFIT değerleri Çizelge 5.1' de görülmektedir. CG, LSSVD ve LSSVD_CG algoritmaları ile ters çözümde MISFIT=%57 ile NLCG algoritması ile ise RMS=12.57 ile ters çözüme başlanmıştır. Tüm ters çözümlerde başlangıç modeli olarak 50 ohm-m öz dirençli homojen ortam alınmıştır ve ters çözüm işlemi, tüm algoritmalarda model iyileştirilemediği için durmuştur. Model ağı, VBAD algoritması ile 41x35 boyutunda elde edilmiştir. Tüm ters çözümlerde aynı model ağı kullanılmıştır. Sadece NLCG algoritmasında, topoğrafya farkını hesaba katarak elde edilen model ağı için düşey yöndeki bloklar biraz farklı alınmıştır (Şekil 5.7).

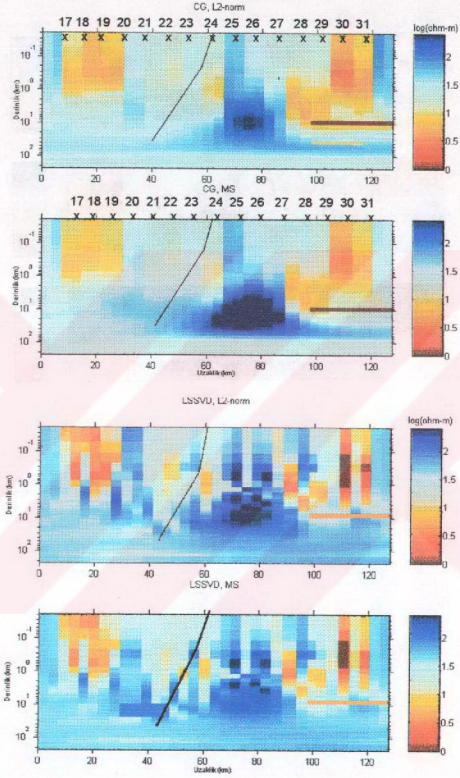
CG algoritması ile bulunan modellerde genel olarak öz direnç değişimlerinin yumuşak olduğu görülmektedir. Öz direnç sınırları daha keskin görülmektedir. Tüm modellerde, 21 ve 28 numaralı istasyonlar arasında, yaklaşık 1km derinde yüksek öz dirençli bir yapı görülmektedir. KAF' ının yaklaşık 24 numaralı istasyonun altından geçtiği bilinmektedir. Olası fayın geçtiği yerler, tüm modellerde çizilmiştir. Bu yapı SVD çözümlerinde daha belirgin görülmektedir. Mackie at al. (1997)' un NLCG algoritmasının çözümü de, CG algoritmasının çözümlerine benzemektedir. Yine aynı algoritmanın topoğrafyayı hesaba katarak bulduğu çözümünde, çok farklı olmadığı görülmektedir. Fakat fay yapısını en iyi LSSVD_CG algoritmasının çözümünde görülmektedir. Bu modelde, yüksek öz dirençli yapının, 10-15 km derinliklerde faydan dolayı iki parçaya ayrıldığı gözlenmektedir. Gerçekte, Çizelge 5.1' de en küçük MISFIT hatası ile çözüm bulan algoritmanın LSSVD_CG olduğu da görülmektedir (bkz. Şekil 5.6). Şekil 5.1' deki jeoloji haritası ile bu son modeli karşılaştırılırsa ; 17-21

numaralı istasyonların altındaki iletken yapı filiş birimleri ile, 22-25 numaralı istasyonlar arasında 1 km derine kadar inen yapı metamorfik seri ile, 26-27 numaralı istasyonların altındaki düşük öz dirençli yapı ofiyolitli birimlerle, 28-29 numaralı istasyonların altındaki yüksek öz dirençli yapı volkanik seri ile ve 30-31 numaralı istasyonların altındaki yapı ise jipsli birimlerle ilişkilendirilebilir.

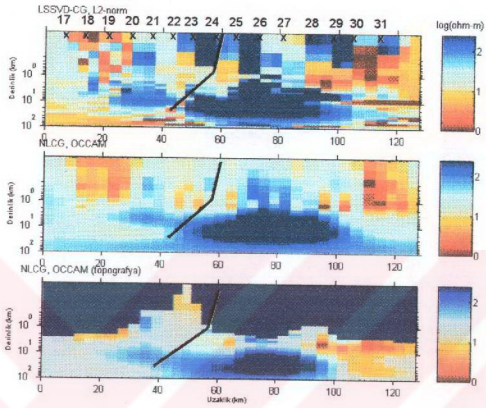
Bu arazi uygulaması, geliştirilen algoritmanın kullanılabilirliğini göstermek için verilmiştir. Daha ayrıntılı jeolojik yorum yapabilmek için daha ayrıntılı çalışılması gerekmektedir. Sonuçta, geliştirilen algoritma ile genel jeolojik yapının ortaya çıkarıldığı görülmektedir.

Cizelge 5.1. L2-norm ve MS durağanlaştırıcıları için TE- ve TM-modu verilerinin birleşik ters çözümünde her algoritma için yineleme sayısı, MISFIT ve RMS değerleri. NLCG algoritması için OCCAM durağanlaştırıcısı kullanılmıştır düz ve eğimli topoğrafyalı model ağı kullanılmıştır.

	LSSVD		CG		LSSVD_CG	NLCG (OCCAM)	
	L2	MS	L2	MS	L2	Düz	Top
Yineleme Sayısı	17	16	20	21	17+10=27	24	18
MISFIT (%)	24.7	25.2	22.2	22.1	16.62	-	-
RMS (%)	1.21	1.24	1.06	1.06	0.79	5.62	5.77



Şekil 5.5. Arazi verilerinin, L2-norm ve MS durağanlaştırıcıları ile CG ve LSSVD algoritmalarının ters çözümünden elde edilen modeller.



Şekil 5.6. Arazi verilerinin, LSSVD_CG ve NLCG (düz ve topoğrafyayı katarak) algoritmaları ile ters çözümünden elde edilen modeller.

6. SONUÇLAR

Genel olarak 2-B MT ters çözüm algoritmaları iki sınıfta toplanabilir. Birinci tür sınıflama, ters çözüm algoritmasında kullanılan durağanlaştırıcıya göre, ikinci tip sınıflama ise parametrik fonksiyoneli çözmede kullanılan yöntemle göre yapılabilir. Bu tez çalışmasında MT verilerinin 2-B ters çözümü için yeni bir algoritma geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yeni algoritma, iki tip sınıflamaya giren tüm algoritmaları içermektedir. Farklı durağanlaştırıcıların veya farklı çözüm yöntemlerinin sonuçlarını adil biçimde karşılaştırabilmek için, kullanılan algoritmalarda diğer bölümlerin aynı olması gerekir. Farklı durağanlaştırıcı ve ters çözüm algoritmalarının birbirine göre çözüm güçleri geliştirilen program ile karşılaştırılmıştır. Her iki tip sınıflamaya giren algoritmaların çözüm güçleri incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

L2-norm ve OCCAM en çok kullanılan durağanlaştırıcılardır. Bunlardan başka MS durağanlaştırıcısını Zhdanov ve diğ. (2001, 2002) EM verilerinin ters çözümünde kullanmaktadırlar. MinEnt-1 durağanlaştırıcısını ise Ramos ve diğ. (1999) önermişlerdir. Çalışmalarında bu durağanlaştırıcının MT verilerinin 2-B ters çözümünde kullanabileceğini savunmuşlardır. Ayrıca Portniguine ve Zhdanov (1999) ise MGS durağanlaştırıcısını MS (Last ve Kubik 1983) durağanlaştırıcısından elde etmişler ve her iki durağanlaştırıcı ile yapılan ters çözümü ise "Focusing Inversion" olarak isimlendirmişlerdir. Mehance ve diğ. (1998) MS durağanlaştırıcısının L2-norm durağanlaştırıcısından daha iyi olduğunu savunmuştur. MGS durağanlaştırıcısı ise elektromanyetik verilerin ters çözümünde ilk kez bu çalışmada denenmiştir. Bu çalışmada sentetik veri için yapılan karşılaştırmalar sonucunda, durağanlaştırıcılar ile ilgili şu sonuçlar elde edilmiştir:

- 1- OCCAM durağanlaştırıcısı ile ters çözüm, diğerlerine göre yavaş çalışmaktadır. Bunun ana sebebi, sayısal "Laplacian" operatörünün duyarlılık düzeyine eklenmesidir. Bu nedenle duyarlılık düzeyinin boyutu iki katı olmakta ve bu büyük düzey ile işlem yapmak hesaplama süresini üstel olarak artırmaktadır. Bu durağanlaştırıcı ile bulunan model daha yuvarlatılmış olması ile birlikte, L2-norm durağanlaştırıcısından çok farklı sonuç vermemektedir.
- 2- Ramos ve diğ.' un (1999) önerdiği MinEnt-1 durağanlaştırıcısı, basit model için diğer durağanlaştırıcılar gibi iyi sonuç vermektedir. Fakat, karmaşık modeller için ise gerçek modelde olmayan farklı yapıların bulunmasına neden olmaktadır. Bu durağanlaştırıcı, sayısal türev ve bu türevin logaritmasının çarpımından elde edilmektedir. Özdirenc değeri çok farklı iki blok sınırında, bu durağanlaştırıcı için çok büyük değerler

hesaplanacaktır. Bu değer duyarlılık düzeyine eklendiğinden algoritmanın yanlış özdirençler bulmasına neden olacaktır. Bu çalışma, Ramos ve diğ.' un savunduğunun tersine, MinEnt-1 durağanlaştıracısının EM verilerin ters çözümünde kullanılamayacağını göstermiştir.

- 3- MGS durağanlaştıracısı, MinEnt-1 durağanlaştıracısındaki benzer nedenlerden dolayı iyi sonuç vermemektedir. Bu durağanlaştıracıda sayısal türevlerden elde edilmektedir. Portniguine(1999) bu durağanlaştıracının EM verilerine de uygulanabileceğini savunmuş fakat çalışmasında bir uygulama örneği vermemiştir. Bu çalışmada, bu durağanlaştıracının da EM verilerinin ters çözümünde iyi sonuç vermediği gösterilmiştir.
- 4- Last ve Kubik' in (1983) önerdiği MS durağanlaştıracısı ise L2-norm durağanlaştıracısına benzer sonuçlar vermektedir. Hız açısından da çok farkları yoktur. Bu durağanlaştıracı bazı durumlarda L2-norm durağanlaştıracısından biraz daha iyi sonuç vermektedir.
- 5- Temelde MS, MGS ve MinEnt-1 durağanlaştıracıları, ters çözüm algoritmasında parametre ağırlık düzeyi olarak kullanılmaktadırlar. Bu ağırlık düzeyleri arasında sadece MS durağanlaştıracısının kullanılabileceği görülmektedir. OCCAM durağanlaştıracısı ise biraz farklı şekilde algoritmaya katılmaktadır. Aslında, OCCAM ve L2-norm veya MS durağanlaştıracısı birlikte aynı ters çözüm algoritmasında kullanılabilir. Bu, çalışmada denenmiştir. Fakat sonuçların verilebilmesi için daha ayrıntılı ayrı bir çalışma gerekmektedir.

İkinci tip sınıflandırma, parametrik fonksiyoneli çözmeye kullanılan algoritmadır. LSSVD ve CG olmak üzere başlıca iki algoritma kullanılmaktadır. Bu iki algoritmanın çözüm güçleri incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. CG algoritması, LSSVD algoritmasına göre daha hızlı çalışmaktadır. Buna karşın, LSSVD algoritması MISFIT' i daha az yinelemeye küçültmektedir. Bu durum karmaşık modellerde daha iyi gözlenmektedir.

Çözüm algoritmalarının birbirine göre çözüm güçlerinin karşılaştırılmasından elde edilen sonuçlara göre yeni bir algoritma önerilmiştir. Bu algoritma LSSVD ile çözüme başlamakta ve MISFIT' i hızlıca düşürmektedir. Algoritmanın, MISFIT' i iyileştiremediği durumda ise, CG algoritması ile çözüme devam edilmektedir. Her iki algoritmayı ardışık olarak kullanan yeni algoritma LSSVD_CG olarak isimlendirilmiştir. SVD çözümü, belli bir MISFIT' den sonra çözüme devam edememektedir. Bunun sebebi, A düzeyinin tekil olması ve bu tekil düzeyin tersinin alınmasıdır. Tekil olma sorunu her zaman sönüm faktörü ekleyerek

halledilememektedir. Çünkü tüm köşegenler aynı sayı ile toplanmaktadır. Diğer bir yol belli bir değerin altındaki tekil değerleri almamaktır (truncated SVD). Bu durumda bilgi kaybına neden olabilmektedir. Önerilen LSSVD_CG algoritması ise çözüme CG ile devam ettiğinde MISFIT küçülmeye devam etmektedir. Çünkü CG çözümünde tekil duyarlılık düzeyinin tersi alınmamaktadır.

Yapay veri ve arazi verisi ile yapılan karşılaştırmalar sonucu önerilen bu yeni algoritmanın daha iyi sonuç verdiği gösterilmiştir. Ayrıca, Mackie ve diğ.' un (1997) NLCG isimli algoritması ile de bu tez çalışmasında geliştirilen algoritmalar karşılaştırılmış ve LSSVD_CG isimli algoritmanın diğer üç algoritmadan daha iyi sonuç verdiği gösterilmiştir.

Geliştirilen algoritmanın arazi verisi içinde kullanışlı olduğunu göstermek için Kastamonu-Çankırı arasında kalan hat boyunca 15 istasyonda ölçülmüş MT verileri kullanılmıştır. Bu verilerin yorumu sonucu KAF zonunun geçtiği yer en küçük MISFIT değeri ile en iyi LSSVD_CG algoritmasının çözümünde görülmektedir. Diğer algoritmalar ile elde edilen modellerde bu fay çok da belirgin olarak ayırtedilememektedir. Ayrıca fliş, metamorfik seri ve jipsli fasiyesler en iyi LSSVD_CG algoritması ile elde edilen modelde görülmemektedir. Bu arazi verisi uygulaması da, geliştirilen algoritmanın günümüzde kullanılan algoritmalarından iyi sonuç verdiğini göstermiştir.

Ters çözüm algoritmalarında kullanılması için, kullanıcı hatasını azaltan veriye bağlı ağ tasarımı yapan, VBAD isimli bir algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritmanın kullanılabilirliği yapay veri ve arazi verisinin ters çözümünde gösterilmiştir. Bu algoritmayı tanıtan bir makalemiz yayınlanmıştır.

Tez çalışmasında geliştirilen program, dördüncü kuşak bir dil olan MATLAB' de yazılmıştır. MATLAB' de bir programın sonucunu doğrudan grafik olarak görmek çok kolaydır. Geliştirilen algoritmanın sonuçları grafik olarak elde edilebilmektedir. Bu ise kullanıcıya kolaylık sağlamaktadır. Fakat hız açısından, orta seviyeli bir dil olan C veya C++ ile karşılaştırıldığında yavaş kalmaktadır. Diğer taraftan, MATLAB' da yazılan bir program, kolayca C veya C++ koduna dönüştürülmektedir. Bu çalışmada geliştirilen program C++'a çevrilerek bağımsız çalışabilir (executable) programın elde edilmesi ileriki çalışma olarak düşünülmektedir. Bu tez çalışmasında geliştirilen algoritmada, hesaba topoğrafyanın etkisi katılmamaktadır. Yine, ileriki çalışma olarak, bu algoritma topoğrafyayı da katarak hesap yapacak şekilde yeniden düzenlenecektir.

KAYNAKLAR

- Acar, R., and Vogel, C.R., 1994, Analysis of total variation penalty methods: Inverse Problems, 10, 1217-1229.
- Alumbaugh D.L. 2000. Linearized and nonlinear parameter variance estimation for two-dimensional electromagnetic induction inversion. Inverse Problems 16 (2000) 1323-1341.
- Alumbaugh D L and Newman G A 2000. Image appraisal for 2D and 3D electromagnetic inversion. Geophysics at press
- Aprea, C., Booker, J.R. and Smith J.,T. 1990. Accurate finite difference approximations for discrete boundaries with arbitrary geometry. Unpublished poster presentation, 10th Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth, Working Group 1-2, International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Ensenada, Mexico.
- Aprea, C., Booker, J.R. and Smith T. 1997. The forward problem of electromagnetic induction: accurate finite-difference approximations for two-dimensional discrete boundaries with arbitrary geometry. Geophys. J. Int., 129, 29-40.
- Ascher U, Mattheij R and Russell R 1995 Numerical Solution of Boundary Value Problems for Ordinary Differential Equations (Philadelphia: SIAM).
- Bahr, K., 1988, Interpretation of the magnetotelluric impedance tensor; regional induction and local telluric distortion. Journal of Geophysics, 62, 119-127
- Banks, R.I., Livelybrooks, D., Jones, P. and Longstaff, R. 1996. Causes of high crustal conductivity beneath the Iapetus suture zone in Great Britain, Geophys. J. Int., 124, 433-455.
- Beamish D. and Travassos J. M. 1992. A study of static shift removal from magnetotelluric data. Journal of Applied Geophysics, 29, 157-178.
- Berdichevsky, M.N., Dmitriev, V.I. 1976. Distortion of magnetic and electrical fields by near-surface lateral inhomogeneities. Acta Geodaet. Geophys. Et Montanist. Acad. Hung. Tođus 11(3-4), 447-483.

- Berdichevsky, M.N., Dmitriev and Kuznetsov V.A. 1996. Bimodal two-dimensional interpretation of magnetotelluric sounding. *Physics of the Solid Earth*, 31(10), 821-837.
- Berdichevsky, M.N., Dmitriev, V.I., Pozdnjakova, E.E., 1998. On two-dimensional interpretation of magnetotelluric soundings. *Geophys. J. Int.*, 133, 585-606.
- Berdichevsky, M.N. and Zhdanov, M.S., 1984. *Advanced Theory of Deep Geomagnetic Sounding*, Elsevier, Amsterdam.
- Bostick, F.X., 1977, A simple almost exact method of MT analysis. *Workshop on Electrical Methods in Geothermal Exploration*, U.S. Geol. Sur. Contract. No. 14080001-8-359.
- Bostic, F.X., 1986. Electromagnetic array profiling (EMAP), in *Proc. 56th Ann. Int. SEG Meeting*, Houston, TX.
- Brewitt-Taylor, C.,R. and Weaver, J.,T., 1976. On the finite difference solution of two-dimensional induction problems. *Geophys. J.R. astr. Soc.*, 47; 375-396.
- Cagniard, L., 1953, Basic theory of the magneto-telluric methods of geophysical prospecting, *Geophysics*, V.18, P. 605-635.
- Capuano, P. , Gasparini, P. and Zerilli, A., 1988.Improvement of MT soundings through combination with TDEM soundings. 10th Geophysical Convention of Turkey – Ankara, April 4-8.
- Cerv, V and Praus, O., 1972. MT field of H-polarization in models with dipping interfaces. *Stud.Geophys.Geod.* 16; 285-296.
- Cerv, V. and Segeth, K., 1982. A comparison of accuracy of finite-difference solution of boundary-value problem for the Helmholtz equation obtained by direct and iterative methods. *Appl. Math.* 27(5); 375-390.
- Chave A.D. and Smith, J.T., 1994. On electric and magnetic galvanic distortion tensor decompositions, *J. geophys. Res.*, 99, B3, 4669-4682.
- Cheng J. and Yamamoto M. 2000. One new strategy for a priori choice of regularizing parameters in Tikhonov's regularization (LETTER TO THE EDITOR) *Inverse Problems* 16, L31-L38.
- Christopherson K.R. 1991. Applications of magnetotellurics to petroleum exploration in Papua New Guinea.: A model for frontier areas. *Geophysics: The leading Edge of Exploration* 10(4), 21-27.

- Chouteau, M., Zhang, P., Dion, D.J., Giroux, B., Morin, R., Krivochieva, S. 1997. Delinating mineralization and imaging the regional structure with MT in the region of Chibougamau (Canada). *Geophysics*, 62, 730-748.
- Coggon, J.H., 1971. Electromagnetic and electrical modeling by the finite-element method. *Geophysics* 36; 132-155.
- Constable, S.C., Parker, R.C., and Constable, G.G., 1987, Occam' s inversion: A practical algorithm for generating smooth models from EM sounding data. *Geophysics*, 52, 289-300.
- Corcione, J.M. and Seriani, G., 2000. An electromagnetic modeling tool for the detecting of hydrocarbons in the subsoil. *Geophysical Prospecting*, 48, 231-256.
- DeGroot-Hedlin, C. and Constable, S., 1990 Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, 55, 1613-1624.
- DeGroot-Hedlin, C., 1991. Short note: Removal of static shift in two dimensions by regularized inversion. *Geophysics*, 56, 2102-2106,
- DeLugão P.B, Portniaguine O., and Zhdanov M.S. 1997. Fast and stable two-dimensional Inversion of magnetotellurics data. *J. Geomag. Geoelectr.* 49, 1469-1497.
- DeLugão P.B and Wannamaker P.E. 1996. Research Note: Calculating the two-dimensional magnetotelluric Jacobian in finite elements using reciprocity. *Geophys. J. Int.* 127, 806-810.
- Dimri V. 1992. Deconvolution and inverse theory. Elsevier, Amsterdam-London.
- Dimitriev, V. I., Editor in chief, 1990. Computational mathematics and techniques in exploration geophysics: Nedra, Moscow, 498 pp.
- Dongarra, J.J., J.R. Bunch, C.B. Moler, and G.W. Stewart 1979. LINPACK, Users' Guide, SIAM, Philadelphia.
- HW, Kunisch Kand Neubauer A1989 Convergence rates for Tikhonov regularization of nonlinear ill-posed problems *Inverse Problems* 5 523-40.
- Eckhart, U., 1980. Weber' s problem and Weiszfeld' s algorithm in general spaces. *Math. Programming*, 18, 186-196.

- Engl H. W., Hanke M. and Neubauer A. 1996. Regularization of inverse problems (Dordrecht:Kluwer).
- Farquharson C.G. and Oldenburg D.W. 1998. Non-linear inversion using general measures of data misfit and model structure. *Geophys. J. Int.*, 134, 213-227.
- Fletcher R. and C. M. Reeves 1964. Function Minimization by Conjugate Gradients, *Computer Journal* 7, 149-154.
- Fletcher, R., 1981, Practical methods of optimization: Wiley and Sons.
- Fletcher R. 1980. Practical Optimization Methods. Vol. 1, Unconstrained Optimization, Wiley, Chichester.
- Gilbert J.C. and Jorge Nocedal 1992. Global Convergence Properties of Conjugate Gradient Methods for Optimization, *SIAM Journal on Optimization* 2, no. 1, 21-42.
- Gill, P.E., Murray, W., and Wright, M.H., 1981. Practical optimization: Academy Press, Inc.
- Giusti, E. 1984. Minimal surfaces and functions of bounded variations. Birkhauser-Verlag.
- Groom, R.W. and Bahr, K., 1992. Corrections for near surface effects: decomposition of the magnetotelluric impedance tensor and scaling corrections for regional resistivities: a tutorial. *Survey in Geophysics*, 13, 341-379.
- Groom G.W., Bailey R.C. 1989. Decomposition of magnetotelluric impedance tensors in the presence of local three-dimensional galvanic distortion, *J. Geophys. Res.* 94, 1913-1925.
- Groom, R.W., Bailey, R.C., 1991. Analytic investigations of the effects of near-surface three-dimensional galvanic scatterers on MT tensor decomposition. *Geophysics* 56 (4), 496- 518.
- Groom R.W., Kurtz R.D., Jones A.G., Boerner D.E. 1993. A quantitative methodology to extract regional magnetotelluric impedances and determine the dimension of the conductivity structure, *Geophys. J. Int.* 115, 1095-1118.
- Golub G.H. and Dianne P. O'Leary 1989. Some History of the Conjugate Gradient and Lanczos Algorithms:1948-1976, *SIAM Review* 31, no. 1, 50-102.

- Gupta P.K. Niwas S., Rastogi A 1999. EM2INV- A finite difference based algorithm for two-dimensional inversion of geoelectromagnetic data. Proc. Indian Acad. Sci. (Earth Planet Sci.) 108 (4), 233-253.
- Hansen P.C. 2001. Regularization Tools A Matlab Package for Analysis and Solution of Discrete Ill-Posed Problems, Version 3.1 for Matlab 6.0, Report. (accepted <http://www.imm.dtu.dk/~pch>).
- Haber, E. 1997. Numerical strategies for the solution of inverse problems. PhD Thesis, University of British Columbia.
- Haber, E., Ascher, U. and Oldenburg, D., 1999a. Inversion of 3D electromagnetic data 2nd Int. Symp. on 3D Electromagnetics (Salt Lake City) pp 162-6
- Haber, E., Ascher, U. and Oldenburg, D., 1999b. On optimization techniques for solving nonlinear inverse problems. Inverse Problems, 16, 1263-1280.
- Hadamard, J. 1923. Lectures on Cauchy' s problem in linear partial differential equations. Yale University Press, New Haven.
- Hursan G. 2001. Rapid frequency domain three-dimensional electromagnetic forward modeling and inversion. Ph.D. thesis, University of Utah.
- Inman, J.R., 1975, Resistivity inversion with ridge regression, Geophys. Prosp., 40, 789-817
- Jiracek, G.R., 1990. Near-surface and topographic distortion in electromagnetic induction. Surveys in Geophysics, 11 (2/3), 163-204
- Jones A.G. 1983. The problem of 'current channeling': a critical review, Geophys. Surv. 6, 79-122.
- Jones A.G. 1983. On the equivalence of the "Niblett" and Bostick" transformation in the magneto telluric method. Journal of Geophysics, 53; 72-73.
- Jones, A.G., 1988. Static shift or magnetotelluric data and its removal in a sedimentary basin environment. Geophysics, 53, 967-978.
- Jones, F.W. and Pascoe, L.J., 1971. A general computer program to determine the perturbations of alternating electric currents in a two-dimensional model of a region of uniform conductivity with an embedded inhomogeneity. Geophys. J.R. astr. Soc., 24; 3-30.

- Jones, F.W. and Price, A.T., 1970. The perturbations of alternating geomagnetic fields by three-dimensional conductivity inhomogeneities. *Geophys. J.R. astr. Soc.*, 20; 317-334.
- Jupp, D.B.L and Vozoff, K., 1975a. Stable iterative methods for the inversion of geophysical data, *Geophys, J.R.ast. Soc.* 42, 957-976.
- Jupp, D.B.L and Vozoff, K., 1975b. Joint inversion of geophysical data. *Geophys, J.R.astr. Soc.* 42, 977-991.
- Jupp, D.B.L and Vozoff, K., 1977. Two-dimensional magnetotelluric inversion, *Geophys, J.R.ast. Soc.* 50, 333-352.
- Kaufman, A.A., 1988. Reduction of the geological noise in magnetotelluric sounding. *Geoexploration*, 25, 145-161.
- Last, B.J., and Kubik, K., 1983. Compact gravity inversion. *Geophysics*, 48,713-721.
- Ledo, J, Queralt, P. and Pous J. 1998. Effects of galvanic distortion on magnetotelluric data over a three-dimensional region structure. *Geophysical Journal International*, 132, 295-301.
- Levenberg, K., 1944. A method for the solution of certain nonlinear problems in least squares. *Quart.Appl.Math.*,2, 164-168.
- Lines, L.R. and Treitel, S., 1984. Tutorial: A review of least squares inversion and its application to geophysical problems. *Geophysical Prospecting*, 32, 159-186.
- Livelybrooks, D., Mareschal, M., Blais, E. and Smith, J.T. 1996. Magnetotelluric delineation of the Trillabelle massive sulfide body in Sudbury, Ontario. *Geophysics*,61 (4), 971-986.
- Mackie R.L., Bennet, B.R. and Madden T.R. 1988. Long-period magnetotelluric measurements near the central California coast, *Geophys. J. Int.*, 95, 181-194.
- Mackie, R.L., Rieven S., and Rodi, W. 1997. Users manual and software documentation two dimensional inversion for magnetotelluric data: M.I.T. Earth Resources Lab. Report.
- Mackie R.L., Livelybrooks D.W., Madden T.R., Larsen J.C. 1997. A magnetotelluric investigation of the San Andreas Fault at Carrizo Plain, California, *Geophys. Res. Lett.* 24, 1847-1850.

- Mackie R. L. and Madden T. R. 1993. Three-dimensional magnetotelluric modelling and inversion using conjugate gradients *Geophys. J. Int.* 115 215–29
- Macnae, J. Lay L. and Weston L. 1998. Measurement of static shift in MT and CSAMT surveys. *Exploration Geophysics*, 29, 494–498.
- Madden, T.R. and Swift, C.M., 1969. Magnetotelluric studies of the electrical conductivity structure of the crust and upper mantle, in *The Earth's Crust and Upper Mantle*. (Edited by P.J.Hart) A.G.U. Monograph 13, 469–479.
- Madden T R and Mackie R L 1989. 3D magnetotelluric modelling and inversion *Proc. IEEE* 77 318–32
- Marquardt, D.W., 1963. An algorithm for least squares estimation of non-linear parameters, *J. Soc. Indst. Apply. Math.*, 11,431–441.
- Marquardt, D.W., 1970. Generalized inverses, ridge regression, biased linear estimation and non linear estimation. *Technometrics*, 12, 591–612.
- McGillivray, P.R., Oldenburg, D.W., Ellis, R.G., Habashy, T.M., 1994. Calculation of sensitivities for the frequency-domain electromagnetic problem. *Geophys. J. Int.* 116, 1–4.
- McNeice G., Jones A.G. 2001. Multisite, multifrequency tensor decomposition of magnetotelluric data, *Geophysics* 66, 158–173.
- Meijerink, J.A., Van der Vorst, H.A., 1981. Guidelines for the usage of incomplete decomposition in solving practical problems. *J. Comput. Phys.* 44, 134–155.
- Meju, M.A., 1994, *Geophysical Data Analysis: Understanding Inverse Problem Theory and Practice*, SEG Course Notes Series 6.
- Meju, A.M., Fontes, S.L., Oliveira, M.F.B., Lima, J.P.R., Ulugergerli, E.U., and Carrasquilla, A., 1999. Regional aquifer mapping using combined VES-TEM-AMT/EMAP methods in the semi- arid eastern margin of Parnaiba Basin, Brazil. *Geophysics* .
- Mehanee S, Golubev N and Zhdanov M S 1998 Weighted regularized inversion of magnetotelluric data *Expanded Abstracts SEG 68th Annual Meeting (New Orleans)* pp 481–4
- Mehanee S. and Zhdanov M.S. 2002. Two-diemsional magnetotelluric inversion of blocky geoelectrical structures. *Jour. Of Geophysical Research*, 107 (B4), 10.1029/2001B000191.

- Menke, W., 1984. *Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory*, Academic Press.
- Müller, W., Losecke, W., 1975. Acceleration convergence techniques and grid spacing problem in two-dimensional magnetotelluric modelling. *Geophys. J.R. Astron. Soc.* 41, 185-191.
- Mickus, K.L. 1999. Magnetotelluric observations in the western Ouachita Mountains, southeastern Oklahoma. *Geophysics*, 64, 1680-1688.
- Mitsuhata, Y, Matsuo, K., and Minegishi, M. 1999. Magnetotelluric survey for exploration of a volcanic-rock reservoir in the Yurihara oil and gas field, Japan. *Geophysical Prospecting*, 47, 195-218.
- Morrison, H.F., Shoham, Y., Hoversten G.M and Torres-Verdin C., 1996. Electromagnetic mapping of electrical conductivity beneath the Columbia basalts. *Geophysical Prospecting*, 44, 963-986.
- Nagy, Z. 1996. Advances in the combined interpretation of seismics with magnetotellurics. *Geophysical Prospecting*, 44, 963-986.
- Newman G. A. and Hoversten G.M. 2000a. Three-dimensional magnetotelluric inversion using non-linear conjugate gradients. *Geophys. J. Int.* 140. 410-424.
- Newman G. A. and Hoversten G.M. 2000b. Solution strategies for two- and three-dimensional electromagnetic inverse problem. *Inverse Problems*, 16, 1357-1375.
- Newman G. A. and Alumbaugh D L 1999 Electromagnetic modelling and inversion on massively parallel computers *Three Dimensional Electromagnetics* (Tulsa, OK: Society of Exploration Geophysicists) pp 299-321
- Newman G. A. and Alumbaugh D L 1997 Three-dimensional massively parallel electromagnetic inversion-I. Theory *Geophys. J. Int.* 128 345-54
- Newman G A and Alumbaugh D L 1995. Frequency-domain modelling of airborne electromagnetic responses using staggered finite differences *Geophys. Prospect.* 43 1021-42
- Niblett, E.R. and Sayn-Wittgenstein, C. 1960. Variation of electrical conductivity with depth by the magnetotelluric method. *Geophysics* 25, 998-1008.

- Ogawa Y. 1997. Two-dimensional inversion of Papua New Guinea Magnetotelluric Dataset assuming static shift as a gaussian distortion. *J. Geomag. Geoelectr.*, 49, 857-867.
- Ogawa Y. and Uchida A. 1996. A two-dimensional magnetotelluric inversion assuming Gaussian static shift. *Geophys. J. Int.*, 126, 69-76.
- Oristaglio, M.I. and Worthington, M.H. 1980. Inversion of surface and borehole electromagnetic data for two-dimensional electrical conductivity models. *Geophysical Prospecting*, 28, 633-657.
- Oldenburg D.W. and Ellis, R.G., 1991. Inversion of geophysical data using an approximate inverse mapping. *Geophys. J. Int.*, 105, 325-353.
- Parasnis, D. S., 1988. Reciprocity theorems in geoelectric and geoelectromagnetic work, *Geoexploration*, 25, 3, 177-198.
- Pascoe, L.J., Jones, F.W., 1972. Boundary conditions and calculations and calculation of surface values for the general two-dimensional electromagnetic modeling. *Geophys.J.R. Astron. Soc.* 27, 179-193.
- Pellerin, L. and Hohman, G.W., 1990 Transient electromagnetic inversion: a remedy for magnetotelluric static shift. *Geophysics*, 55, 1242-1250.
- Poll H.E., Weaver J.T. and Jones A.G. 1989. Calculations of voltages for magnetotelluric modelling of a region with near-surface inhomogeneities. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 53, 289-297.
- Portniaguine, O. and Zhdanov M.S., 1999. Focusing geophysical inversion images. *Geophysics*, 64, P.874-887.
- Portniaguine, O. 1999. Image focusing and data compression in the solution of geophysical inverse problems. Ph.D. thesis, University of Utah, USA.
- Ramos F.M., Campos Velho H.F., Carvalho J.C., and Ferreira N.J., 1999. Novel approaches to entropic regularization. *Inverse Problems*, 15, 1139-1148.
- Reid, J.K. 1971. On the method of conjugate gradients for the solution of large sparse systems of linear equations, *Large Sparse sets of linear equations* (London and New York), (John K. Reid, ed.), Academic Press, London and New York, 231-254.
- Rijo, L. 1977. Modeling of electric and electromagnetic data. Ph.D. Thesis, Univ. of Utah, USA.

- Rodi, W.L., 1976. A technique for improving the accuracy of finite element solutions for magnetotelluric data. *Geophys. J.R. astr. Soc.*, 44; 483-506.
- Rodi, W.L., 1989. Regularization and Backus-Gilbert estimation in nonlinear inverse problems: Application to magnetotellurics and surface waves: Ph.D. thesis, Pennsylvania State Univ.
- Rodi W., Mackie R.L. 2001. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion, *Geophysics* 66, 174-187.
- Rudin, L.I., Osher, S., and Fatemi, E. 1992. Nonlinear total variation based noise removal algorithms: *Physica D*, 60, 259-268.
- Samarsky, A.A., Nikolaev, E.S., 1977. *Metody resheniya setochnyh uravneniy*. M.: Nauka, 592 pp.
- Sasaki, Y., 1989. Two dimensional joint inversion of magnetotelluric and dipole-dipole resistivity data, *Geophysics* 54, 254-262.
- Sasaki, Y., 2001. Full 3-D inversion of electromagnetic data on PC. *Journal of Applied Geophysics*, 46, 45-54.
- Sen, M. and Stoffa, P.L. 1995. *Global optimization methods in geophysical inversion*. Elsevier, Amsterdam-New York-Tokyo.
- Shewchuk J.R. 1994. An Introduction to the Conjugate Gradient Method without the Agonizing Pain, Edition 1, School of Computer Science Carnegie Mellon University Pittsburgh, PA 15213 (Research Note) (WARP.CS.CMU.EDU (IP address 128.2.209.103) under the filename quake-papers/painless-conjugate-gradient.ps)
- Siripunvaraporn, W. and Egbert, G., 2000. An efficient data-subspace inversion method for 2-D magnetotelluric data. *Geophysics*, 65(3), 791-803.
- Smith, J.T., 1997. Estimating galvanic-distortion magnetic fields in magnetotellurics. *Geophysical Journal International*, 130, 65-72.
- Smith, J.T., and Booker, J.R., 1988. Magnetotelluric inversion with minimum structure. *Geophysics*, 53, 1565-1576.
- Smith, J.T., and Booker, J.R., 1991. Rapid inversion of two- and three-dimensional magnetotelluric data: *J. Geophys. Res.*, 96, 3905-3922.

- Smith, T., Hoversten, M., Gasperikova, E. and Morrison, F. 1999. Sharp boundary inversion of 2D magnetotelluric data. *Geophysical Prospecting*, 47, 469-486.
- Silvester, P., Haslam, C.R.S., 1972. Magnetotelluric modeling by the finite element method. *Geophysical Prospecting*, 20, 872-891.
- Sternberg, B.K., Washburne J.C., Pellerin L. 1988. Correction for the static shift in magnetotellurics using transient electromagnetic soundings, *Geophysics* 53 1459-1468.
- Stiefel, E. " Über einige Methoden der Relaxationsrechnung, *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Physik* 3 (1952), no. 1, 1-33.
- Şaroğlu, F., Emre, Ö. ve Kuşçu, İ. 1992. Türkiye diri kırık haritası. MTA, Ankara.
- Tarantola, A. 1987. *Inverse Problem Theory* (Amsterdam: Elsevier).
- Tikhonov, A.N., 1950. On determining electrical characteristics of the deep layers of the earth's crust. *Dokl. Akad. Nauk.*, 73, 295-297.
- Tikhonov, A.N, and Arsenin, V.Y., 1977, *Solution of ill-posed problems*: V.H. Winston and Sons.
- Uchida, T., 1993. Smooth 2-D inversion for magnetotelluric data based on statistical criterion ABIC. *J. Geomag. Geoelectr.*, 45, 841-858.
- Uchida, T., 1997. 2-D inversion of Papua New Guinea magnetotelluric data with smoothness regularization. *J. Geomag. Geoelectr.*, 45, 841-858.
- Uchida, T. and Ogawa Y. 1993. Development of fortran code for two-dimensional Magnetotelluric inversion with smoothness constraint. Geological survey of Japan open-file report, No.205, 115p.
- Ulugergerli, E.U., 1998. Development and application of 2D magnetotelluric inversion in complex domain. Ph.D. Thesis, Leicester Univ.(İngiltere)
- Ulugergerli, E.U., and Candansayar, M.E., 2002, Automated mesh design for two dimensional magnetotelluric interpretation codes. *The Journal of the Balkan Geophysical Society*, Vol. 5, No. 1, 7-14.7
- Unsworth M.J., Egbert G.D., Booker J.R. 1999. High-resolution electromagnetic imaging of the San Andreas Fault in Central California, *J. Geophys. Res.* 104 1131-1150.
- Urmanov, A.M., Gribok, A.V., Bozdogan, H., Hines, J.W. and Uhrig R.E., 2002. Information complexity-based regularization parameter

- selection for solution of ill conditioned inverse problems (Letters for Editor). *Inverse Problems*, 18, L1-L9.
- Xiong, Z., 1992, EM modeling of three-dimensional structures by the method of system iteration using integral equations: *Geophysics*, 57, 1556-1561.
- Xiong, Z. and Kirsch, A., 1992, Three-dimensional earth conductivity inversion: *J. Comp. Appl. Math.*, 42, 109-121.
- Vozoff, K., 1991. The magnetotelluric method, in *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics-Applications*, Vol. 2, SEG, Tulsa.
- Vozoff K. 1991. The magnetotelluric methods, in: M.N. Nabighian (Ed.), *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, vol. 2 Applications, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK, 641-711.
- Varentsov, I.M., Golubev, N.G., 1982. Pryamye i iterazionnye metody resheniya lineynyh sistem v dvumernykh zadachah modelirovaniya elektromagnitnykh poley. *Matematicheskie metody v geoelektrike*. M.: izmiran, pp. 27-46.
- Varentsov, I.M., Golubev, N.G., 1985. Konechno-raznostnaya tehnologiya resheniya dvumernykh pryamykh zadach geoelektrika v klasse regionalnykh modeley. *Elektromagnitnye zondirovaniya Zemli*. M.: izmiran, pp. 23-29.
- Varentsov I.V., 1998. 2D synthetic data sets (COPROD-2S) to study MT inversion techniques XIV Workshop on EM induction in the Earth (Abstracts). Sinaia, Romania.
- Vogel, C. R. and Oman, M. E. 1998. A fast, robust total-variation based reconstruction of noisy, blurred images *IEEE Trans. Image Processing* 7 813-24
- Wannamaker, P.E., 1983. Three-dimensional magnetotelluric interpretation. Ph.D. Thesis, University of Utah, USA, p.211-212.
- Wannamaker, P.E., Hohman, G. W. and Ward S.H., 1984. Magnetotelluric responses of three-dimensional bodies in layered earth. *Geophysics*, 49, 1517-1533.
- Wannamaker, P.E., Stodt, J.A. and Rijo, L., 1985. PW2D Finite Element program for solution of Magnetotelluric responses of two-dimensional earth resistivity structure. User Documentation. Earth Science Laboratory, Univ. of Utah Research Institute, SLC, Utah.

- Wannamaker, P.E., Stodt, J.A. and Rijo, L., 1986. Two-dimensional topographic responses in magnetotellurics modelled using finite elements. *Geophysics*, 11, 2131-2144.
- Wannamaker, P.E., Stodt, J.A. and Rijo, L., 1987. A stable finite element solution for two-dimensional magnetotelluric modeling. *Geophys. J.R. astr. Soc.*, 88; 277-296.
- Wannamaker P.E., Hohmann G.W., Ward S.H. 1984. Magnetotelluric responses of three-dimensional bodies in layered earths, *Geophysics* 49, 1517-1533.
- Wannamaker, P.E., Booker, J.R., Jones, A.G., Chave, A.D., Filloux, J.H., Waff, H.S. and Law, L.K., 1989. Resistivity cross-section through the Juan de Fuca subduction system and its tectonic implication, *J. geophys. Res.*, 94, 14 127-14 144.
- Wannamaker P.E. 1999. Affordable magnetotellurics: interpretation in natural environments. Three-dimensional electromagnetics. Edited by M.Oristaglio and B. Spies, P.349-374
- Ward,S.H., 1967. Electromagnetic theory for geophysical application, In *Mining Geophysics*, v. II: SEG, Tulsa, p.10-196.
- Weaver, J.T., 1994. Mathematical methods for Geo-electromagnetic induction. Research Studies Press Ltd., Taunton, Somerset, England.
- Weaver J.T. and Brewitt-Taylor C.R., 1978. Improved boundary conditions for the numerical solution of E-polarization problems in geomagnetic induction. *Geophys. J.R. astr. Soc.*, 54; 309-317.
- Weaver J.T., LeQuang, B.V. and Fischer, G., 1985. A comparison of analytical and numerical results for a two-dimensional control model in electromagnetic induction-I. B-polarization calculations. *Geophys.J.R. astr. Soc.* 82; 263-278.
- Weaver J.T., LeQuang, B.V. and Fischer, G., 1986. A comparison of analytical and numerical results for a 2-D control model in electromagnetic induction-II. E-polarization calculations. *Geophys.J.R. astr. Soc.* 87; 917-948.
- Zhang, A.J. and Hobbs, B.A. 1992. Model formulation and model smoothing for 2-D magnetotelluric inversion. *Geophysical Journal International*, 108, 507-516.
- Zhdanov, M.S., 1993, Tutorial: Regularization in Inversion Theory: Colorado School of Mines.

- Zhdanov M S. 2002. Geophysical Inverse Theory and Regularization Problems, Elsevier, Amsterdam.
- Zhdanov, M.S., Golubev, N.G., Spichak, V.V. and Varentsov Iv.M., 1982. The construction of effective methods for electromagnetic modelling. Geophys. J.R. astr. Soc., 68; 589-607.
- Zhdanov, M.S., Varentsov I.M, Weaver, J.T., Golubev, N.G. and Krylov, V.A. 1997. Methods for modelling electromagnetic fields Results from COMMEMI-the international project on the comparison of modelling methods for electromagnetic induction. J. of Applied Geophysics, 37; 133-271.
- Zhdanov, M.S. and Fang, S., 1996, 3-D quasi linear electromagnetic inversion. Radio Science, 31, 741-753.
- Zhdanov, M. S. and Fang, S. 1999 3D electromagnetic inversion based on the quasi-linear approximation Three Dimensional Electromagnetics (Tulsa, OK: Society of Exploration Geophysicists) pp 233-55.
- Zhdanov, M. S. and Hursan, G. 2000. 3D electromagnetic inversion based on quasi-analytical approximation Inverse Problems 16 (2000) 1297-1322.
- Zhdanov, M. S. and Tartaras, S. 2002. Three-dimensional inversion of multitransmitter electromagnetic data based on the localized quasi-linear approximation. Geopgys. J. Int., 148, 506-519.

EK 1

Tabakalı Ortam için Düzlem Dalga Alanları (E ve H) Hesabı

Yeryüzünden yeriğine yayılan düzlem dalga için 'j' tabakasındaki elektrik alan değeri

$$\vec{E}_j(z) = \vec{E}_j^+ \left[e^{-ik_j(z-d_j)} + R_j e^{+ik_j(z-d_j)} \right], \quad (A-1)$$

ile hesaplanır (Wannamaker 1983). Havada E-alanı değeri

$$\vec{E}_0(z) = \vec{E}_0^+ \left[e^{-ik_0 z} + R_0 e^{+ik_0 z} \right], \quad (A-2)$$

ve yeryüzünde

$$\vec{E}_n(z) = \vec{E}_n^+ e^{-ik_n(z-d_{n-1})}, \quad (A-3)$$

dir. 'j' ninci tabakanın tabanından, aşağı ve yukarı doğru hareket eden dalganın genliğine bağlı yansımaya katsayıları (Ward, 1967, p.117)

$$R_j = \frac{Z_j - \hat{Z}_{j+1}}{Z_j + \hat{Z}_{j+1}}, \quad (A-4)$$

bağıntısı ile verilir. Burada $Z_j = \frac{w\mu_j}{k_j}$ dir ve aşağıdaki gibi tekrar yazılırsa

$$\hat{Z}_j = Z_j \frac{\hat{Z}_{j+1} + Z_j \tanh(ik_j h_j)}{Z_j + \hat{Z}_{j+1} \tanh(ik_j h_j)}. \quad (A-5)$$

elde edilir. J-ninci tabakanın kalınlığı, h_j ' dir.

Yeryüzünde elektrik alan

$$\vec{E}_0(0) = \vec{E}_0^+ [1 + R_0]. \quad (A-6)$$

ile verilir. Burada tangential $\vec{E}$ -alanı arayüzeylerde sürekli olacaktır. Buradan,

$$\vec{E}_1(0) = \vec{E}_1^+ \left[e^{+ik_1 d_1} + R_1 e^{-ik_1 d_1} \right] = \vec{E}_0(0), \quad (A-7)$$

olarak bulunabilir. Çünkü

$$\vec{E}_1^+ = \frac{\vec{E}_0^+ [(1., 0.) + R_0] e^{-ik_z h_1}}{[(1., 0.) + R_1] e^{-2ik_z h_1}}, \quad (A-8)$$

dir. Burada d_1 yerine h_1 kullanılmıştır. Burada,

$$\vec{E}_1^+ = \frac{\vec{E}_{1-1}^+ [(1., 0.) + R_{1-1}] e^{-ik_z h_1}}{[(1., 0.) + R_1] e^{-2ik_z h_1}} \quad (A-9)$$

ve

$$\vec{E}_n^+ = \vec{E}_{n-1}^+ [(1., 0.) + R_{n-1}] \quad (A-10)$$

Algoritmada, $\vec{E}_0^+ = (1., 0.)$ olarak alınmıştır.

Maxwell denklemlerinden, manyetik alanlar

$$\vec{H}_j(z) = \frac{k_j}{w\mu_j} (\hat{k} \times \vec{E}_j^+) [e^{-ik_j(z-d_j)} - R_j e^{+ik_j(z-d_j)}] \quad (A-11)$$

ve

$$\vec{H}_n(z) = \frac{k_n}{w\mu_n} (\hat{k} \times \vec{E}_n^+) e^{-ik_n z} \quad (A-12)$$

olarak bulunur. Burada k , z -yönündeki birim vektördür.

Ek 2. İngilizce Terimlerin Türkçe Karşılıkları

<u>İngilizce</u>	<u>Türkçe</u>
Adjoint-equation	Birleştirilmiş-denklemler
Conjugate Gradient	Eşlenik türev
Damping factor	Sönüm Faktörü
(Lagrange Multiplier)	
Damped least-squares	Sönümlü en-küçük kareler
Decomposition	Ayrışma
Forward Modeling	Düz Çözüm
Global objective functional	Genel fonksiyonel
Ill-posed	Kötü-durumlu
Inversion	Ters Çözüm
Jacobian Matrix	Verilerin parametrelere göre kısmi türevlerini içeren dizey
Mesh	Ağ
Model objective functional	Model fonksiyoneli
Nonlinear	Doğrusal olmayan
Nonunique	Tek çözümün olmaması
Node	Düğüm Noktası
Reciprocity	Karşılıklık
Regularization parameter	Düzgünleyici parametresi
(penalty parameter)	
pseudo-quadratic	hemen hemen-ikinci dereceden bağımlı
Sensitivity-equation	Duyarlılık denklemi
Singular Value Decomposition	Tekil değer ayrışımı
Static Shift	Sabit Kayma
Uniqueness	Tek çözümün olması

ÖZGEÇMİŞ

Elbistan’ da, 1973 yılında doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Ankara’ da tamamladı. 1990 yılında girdiği Ankara Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği bölümünden, Haziran 1994’ de mezun oldu. Aynı üniversiteden, 1997 yılında “Doğru Akım Öz direnç Yönteminde modelleme ve 2-B sığ yapıların aranmasında elektrod dizilimlerinin ayrımlılıklarının karşılaştırılması” isimli tezi ile yüksek lisansını tamamladı.

2000 yılında, Amerika’ daki Utah Üniversitesi bünyesinde bulunan, Prof. M.S. Zhdanov başkanlığındaki CEMI (Consortium for Electromagnetic Modeling and Inversion) grubu’ nda , doktora konusunda dokuz aylık bir çalışma yaptı.

Kendisi, 1995 yılından bu yana, Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği bölümünde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.