

T.C.
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ

DENİZ ORTAMI MANYETOTELLÜRİK
VERİLERİNİN ÇAPRAZ-TÜREV YÖNTEMİ İLE
İKİ BOYUTLU TERS ÇÖZÜMÜ

Tuğrul KONUK

Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tezin Sunulduğu Tarih: 06/02/2012

Tez Danışmanı:

Yrd. Doç. Dr. Emin Uğur Uluggerli

ÇANAKKALE

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

TUĞRUL KONUK tarafından **YRD. DOÇ. DR. EMİN UĞUR ULUGERGERLİ** yönetiminde hazırlanan “**DENİZ ORTAMI MANYETOTELLÜRİK VERİLERİNİN ÇAPRAZ-TÜREV YÖNTEMİ İLE İKİ BOYUTLU TERS ÇÖZÜMÜ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Yrd.Doç. Dr. Emin Uğur Ulugерgerli

Danışman

Doç. Dr. Aydın Büyüksaraç

Jüri Üyesi

Yrd. Doç. Dr. İbrahim Türkyılmaz

Jüri Üyesi

Sıra No :

Tez Savunma Tarihi: 06/02/2012

Prof. Dr. İsmet Kaya

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

İNTİHAL (AŞIRMA) BEYAN SAYFASI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belirttiğimi beyan ederim.

Tuğrul KONUK

TEŞEKKÜR

Bu tezin gerçekleŐtirilmesinde, çalıŐmam boyunca benden bir an olsun yardımlarını esirgemeyen saygı değer danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Emin Uğur ULUGERGERLİ, alıŐma sÜresince tÜm zorlukları benimle göğüsleyen Őebnem GüneŐ ve hayatımın her evresinde bana destek olan değerli aileme sonsuz teŐekkürlerimi sunarım.

Tuğrul KONUK

SİMGELER VE KISALTMALAR

\vec{E}	Elektrik Alan Şiddeti (V/m)
\vec{H}	Manyetik Alan Şiddeti (A/m)
μ	Manyetik geçirgenlik
σ	Öziletkenlik ($\mu\text{S/m}$)
ρ	Özdirenç (ohm.m)
f	Frekans (Hertz)
Z_{xy}, Z_{yx}	Empedans (ohm)
$\nabla, \nabla \cdot$	Gradient ve diverjans operatörü (Nabla İşleci)
MT	Manyetotellürük
TE	Transverse Electric
TM	Transverse Magnetic
2B	İki boyutlu
SF	Sonlu Farklar
SE	Sonlu Elemanlar
CG	Eşlenik Türev (Conjugate Gradient)
LU	LU ayrışımı (LU Decomposition)
MS	En Küçük Destek (Minimum Support) Durağanlaştırıcısı
MGS	En Küçük Türev Desteği (Minimum Gradient Support) Durağanlaştırıcısı

ÖZET

DENİZ ORTAMI MANYETOTELLÜRİK VERİLERİNİN ÇAPRAZ-TÜREV YÖNTEMİ İLE İKİ BOYUTLU TERS ÇÖZÜMÜ

Tuğrul KONUK

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi

Danışman :Yrd. Doç. Dr. Emin Uğur Ulugergerli

06/02/2012 , 62

Manyetotellürik yöntem, yer içinin yapısının incelenmesinde en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Yöntemin kolay uygulanabilirliği, son yıllarda deniz ortamında yapılan çalışmalarda da kullanılmasını yaygınlaştırmıştır. Manyetotellürik verilerin 2B ters çözümü kötü durumludur ve düzgünleştiricili yöntemler kullanılarak çözülebilir. Bu çalışmada manyetotellürik verilerin 2B ters çözümü için bir algoritma geliştirilmiştir.

Manyetotellürik yöntemde ölçülen büyüklükler, denizel ve karasal ortamlar için farklı karakterdedir. Deniz ve karasal ortam için MT tepkileri hesaplanmış ve iki durum arasındaki farklılığın sebepleri belirlenmiştir. Manyetotellürik tepkiyi etkileyen topoğrafya ve kıyı etkisi gibi faktörler açıklanmıştır. Denizel ortamın, veri üzerindeki etkisini gösterebilmek amacıyla, ters çözüm işlemine batimetrinin dahil edilmesi gerektiği gösterilmiştir.

Doğrusal olmayan ters çözüm probleminde eşlenik türev (CG) algoritması kullanılmıştır. Geliştirilen algoritmada, farklı durağanlaştırıcı tanımlarının manyetotellürik yöntemin ters çözümünde kullanılabilirlikleri karşılaştırılmıştır.

Manyetotellürik verilerin ters çözümü için birleşik ters çözüm algoritması geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritmada, aynı jeoloji için farklı sonuçlar üretebilen TE ve TM modu verileri, iki farklı yöntem verisi olarak kabul edilip, birleşik ters çözüm işlemine sokulmuşlardır. Uygulanan birleşik ters çözüm işleminin temelinde, bu iki veri tipini sağlayan yer modellerinin geometrik olarak benzer olması kuralı yatmaktadır. Bu benzerliği sağlamak amacıyla birleşik ters çözüm algoritmasında çapraz-türev yöntemi kullanılmıştır.

Geliştirilen algoritma, yapay veriler üzerinde denenmiş ve manyetotellürik 2B ters çözümde kullanılabilir olduğu gösterilmiştir. Sonuçlar ayrıca, TE ve TM modu verilerinin, çapraz türev yöntemiyle birleşik ters çözüme sokulduğunda, ayrı ayrı sokuldukları duruma göre birbirlerine daha çok benzeyen modeller ürettiği ve yeraltının yorumlanması aşamasında faydalı yapısal bilgiler sağladığı gösterilmiştir.

Anahtar sözcükler: İki boyutlu ters çözüm, birleşik ters çözüm, çapraz-türev, cross-gradient, manyetotellürik, denizel ortam, eşlenik türev, durağanlaştırıcı

ABSTRACT

TWO DIMENSIONAL INVERSION OF MARINE MAGNETOTELLURICS DATA USING CROSS-GRADIENT CONSTRAINTS

Tugrul KONUK

Çanakkale Onsekiz Mart University

Graduate School

Geophysical Engineering Thesis, Master of Science

Advisor : Assist. Prof. Dr. Emin Ugur Ulugergerli

06/02/2012 , 62

Magnetotelluric (MT) method is one of the most famous methods in the investigation of subsurface structures. Because it is easy to implement, it has also become widely used in marine environment surveys. Two dimensional inversion of magnetotellurics data is ill-posed thus can be solved with regularization methods. In this study, an algorithm for two-dimensional magnetotelluric inversion has been developed.

The data in MT sounding can be different for marine and land environment. Responses for both cases has been calculated and the reasons for the differences has been discussed. The topographic and coast effects on data has been identified.

Conjugate gradient algorithm is used for the non-linear inverse problem. In algorithm, different stabilizers were compared due to their usefulness in 2D inversion of MT data.

A joint inversion algorithm has been developed for the inversion of magnetotellurics data. Developed algorithm acts TE and TM mode data as collected from different methods and uses for joint inversion. The joint inversion procedure uses the rule of geometrical similarity between earth models obtained from both TE and TM mode inversion. In order to provide this similarity rule, cross-gradient constraint is used in joint inversion procedure.

Developed algorithm has been tested on sythetic models and it is shown that algorithm is usefull for two-dimensional inversion of magnetotelluric data. Results also showed that, joint-inversion process with cross-gradient constraints can provide more similar earth models for TE and TM modes. The results from cross – gradient inversion could provide usefull information when interpretating the subsurface.

Keywords: Two dimensional inversion, joint inversion, cross-gradient, magnetotelluric, gravity, conjugate gradient, stabilizer

İÇERİK	Sayfa
TEZ SINAVI SONUÇ FORMU	ii
İNTİHA (AŞIRMA) BEYAN SAYFASI	iii
TEŞEKKÜR	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	v
ÖZET	vi
ABSTRACT	ii
BÖLÜM - 1 GİRİŞ	1
BÖLÜM – 2 ONCEKİ ÇALIŞMALAR	3
BÖLÜM – 3 MATERYAL VE YÖNTEM	5
3.1. Manyetotellürik Yöntemde 2B Modelleme	5
3.1.1. Temel Denklemler	5
3.1.2. Sonlu Farklar Yöntemi	7
3.1.2.1. TE Modu İçin Sonlu Farklar Denklemi	9
3.1.2.2. TM Modu İçin Sonlu Farklar Denklemi	11
3.1.3. Sınır Koşulları	12
3.1.4. Global Dizeyin Elde Edilmesi ve Çözümü	13
3.1.5. Jeolojik Doğrultuya Dik Alanların Hesaplanması	15
3.1.6. MT Düz Çözümde Denizel Ortam	16
3.1.7. Algoritmanın Denetlenmesi	21
3.1.7.1. Vadi Modeli	21
3.1.7.2. Santos Havzası, Brezilya	23
3.2. Genel Ters Çözüm Kuramı.....	24
3.2.1. Genelleştirilmiş Algoritma.....	25
3.2.1.1. Durağanlaştırıcıların Tanımlanması	26
3.2.1.2 MISFIT ve Karekök (RMS) Hata.....	27
3.2.2. Birleşik Ters Çözüm	28
3.2.2.1. Jeofizik Verilerin Çapraz - Türev Yöntemi İle Birleşik Ters Çözümü	30
3.3. Manyetotellürik Verilerinin 2B Ters Çözümü	35
3.3.1. Ters Çözüm Algoritması	35
3.3.2. Genel Fonksiyonelin Eşlenik Türev İle Çözümü	36
3.3.3. Duyarlılık (Jacobian) Dizeyinin Hesaplanması	38
3.3.4. Deniz Ortamı MT Verilerinin 2B Ters Çözümü	42

BÖLÜM – 4 ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	44
4.1. Yapay Veri Uygulaması – 1	44
4.2. Yapay Veri Uygulaması – 2	47
4.3. Çapraz - Türev	49
4.3.1. Birleşik Ters Çözüm Uygulaması.....	50
BÖLÜM – 5 SONUÇ VE ÖNERİLER	56
KAYNAKLAR	
ÖZGEÇMİŞ	

BÖLÜM 1**GİRİŞ**

Manyetotellürik yöntemin temelleri, ilk olarak 1950’li yıllarda birbirinden bağımsız iki farklı bilim adamı Tikhonov (1950) ve Cagniard (1953) tarafından geliştirilmeye başlanmıştır. Yöntem kullanılan frekans aralığına bağlı olarak, birkaç yüz metreden, kilometrelerce derinliğe kadar yeriçinin elektriksel yapısını incelememizi sağlar. Yöntemin, yeriçinin kabuk yapısının incelenmesi, fay yapılarının belirlenmesi, jeotermal çalışmalar ve petrol aramaları gibi geniş bir uygulama alanı vardır.

Manyetotellürik yöntem, gelişen hassas ölçü ve veri-işlem teknikleri ile birlikte, petrol ve doğalgaz kaynaklarının aranmasında, sismik kalitenin iyi olmadığı bölgelerde de kullanılmaktadır. Yöntemin denizel ortamlarda da kolaylıkla uygulanabilmesi, son yıllarda özellikle yapay kaynaklı uygulamalarının (CSAMT) popülerliğini artırmıştır.

MT verilerinin yorumlanması için ters çözüm teknikleri kullanılır. Üç boyutlu ters çözümün günümüz bilgisayarlarıyla bile çok fazla zaman gerektiren bir işlem olmasından dolayı, MT verilerinin yorumlanması için günümüzde iki-boyutlu (2B) ters çözüm yaygın olarak kullanılır. Bu çalışmanın amacı MT verilerinin iki boyutlu ters çözümünü yapan ve TE ve TM modlarının ayrı ayrı ters çözüm sonucundan elde edilen yer modellerinin geometrik olarak benzerliklerini düzenleyen çapraz – türev yöntemini kullanan bir birleşik ters çözüm algoritması geliştirmektir. Geliştirilen algoritma 3B uygulamalara kolaylıkla genişletilebilir.

MT yöntemde ters çözüm problemi doğrusal değildir ve kötü durumludur. Farklı bir şekilde ifade edecek olursak, veri ile model parametreleri arasındaki ilişki doğrusal değildir ve aynı veriyi sağlayan sonsuz sayıda model bulunabilir. Bu nedenle MT verilerin ters çözümü doğrusallaştırılmış ve yinelemeli olarak yapılır (Rodi ve Mackie, 2001).

Ters çözüm algoritması, matematiksel modelin tepkisinin (kuramsal verinin) hesaplandığı düz çözüm (modelleme) işlemi, model parametrelerindeki değişimin, veriyi ne kadar değiştirdiğini gösteren duyarlılık (Jacobian, Sensitivity) düzeyinin hesaplanması ve parametrik fonksiyonelin çözümü olmak üzere üç ana gruba ayrılır. Düzgünleştirme kuramına göre parametrik fonksiyonel;

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

şeklinde ifade edilebilir (Candansayar, 2002). Burada $\varphi(m,d)$, α ve $S(m)$ parametreleri sırasıyla “MISFIT” fonksiyoneli, düzgünleştirici parametresi ve durağanlaştırıcıyı ifade eder. Denklem (1.1)’de $S(m) = \|m,m\|_{L_2}$ alınır ve minimize edilirse, sönümlü en küçük kareler (damped least squares) çözümü elde edilir. Aynı denklemde $S(m)$, yani durağanlaştırıcı, ters çözüm işlemine jeolojik yapıyla ilgili bir ön-bilgiyi (priori information) dahil etmek için bir araç olarak düşünülebilir ve değişik ifadelerine göre ters çözüm işleminden elde edilecek modelin özellikleri belirlenebilir. Örneğin durağanlaştırıcı olarak $S(m) = \|\nabla^2 m\|_{L_2}$ seçilirse, “OCCAM” çözümü seçilmiş olur ve daha yumuşak değişim sunan yer modelleri elde edilir. Bu iki yöntem, MT verilerinin 2B ters çözümünde en çok kullanılan yöntemlerdir (Jupp ve Vozoff, 1977; Sasaki, 1989; Madden ve Mackie, 1989; deGroot-Hedlin ve Constable, 1990; Smith ve Booker, 1991; Uchida, 1993; deLugao ve ark., 1997; Smith ve ark., 1999; Siripunvaraporn ve Egbert, 2000; Rodi ve Mackie, 2001).

MT yöntemde kuramsal verinin hesaplanması için genel olarak sonlu farklar veya sonlu elemanlar yöntemi kullanılır. Ters çözümden elde edilecek modelin güvenilirliğini etkileyen en önemli etkenden birisi, kuramsal verinin doğru bir şekilde hesaplanması, yani doğru çalışan bir düz çözüm algoritmasıdır. Bu çalışmada sonlu farklar yöntemi kullanılarak yapılan modelleme çalışması Bölüm 3’ te anlatılacaktır. Bu bölümde, düz çözüm algoritmasında kullanılan yöntem ve bağıntılar açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde genel olarak MT yöntemin 2B düz ve ters çözüm işlemlerinde uygulanan yöntemler anlatılacaktır. Duyarlılık düzeyinin hesaplanması, düzgünleştirici parametresinin seçimi ve durağanlaştırıcı kavramları detaylı olarak anlatılacaktır. TE ve TM modu verilerinin birleşik ters çözüm algoritması da bu bölümde anlatılacaktır. Birleşik ters çözüm algoritmasında kullanılan çapraz - türev yöntemi detaylı bir biçimde ele alınacaktır.

Dördüncü bölümde ise çapraz-türev algoritması ile elde edilen sonuçlar sunulacak ve geliştirilen algoritma ile, TE ve TM modu verilerinin çapraz türev yöntemi ile birleşik ters çözümünün, tek başına kullanıldıkları durumdan daha iyi sonuç verdiği gösterilecektir.

Beşinci bölümde ise bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

BÖLÜM 2

ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Manyetotellürik yöntemte düz ve ters çözüm ile ilgili birçok algoritma geliştirilmiştir. Üç boyutlu algoritmaların çok fazla hesaplama zamanı gerektirmesi ve MT çalışmalarının çoğunun tek bir profil üzerinde ölçü alınarak gerçekleştirilmesi nedeniyle MT yöntem için birçok 2B ters ve düz çözüm algoritması geliştirilmiştir.

Geliştirilen düz çözüm algoritmalarında sayısal çözüm yöntemi olarak genel olarak sonlu farklar ve sonlu elemanlar yöntemleri kullanılmıştır (Jones ve Price, 1970; Rijo, 1977; Wannamaker ve ark., 1986; Smith ve Booker, 1991; deLugao ve ark., 1997). Geliştirilen algoritmalar, sonlu farklar ve sonlu elemanlar yönteminin çok karmaşık yer yapılarının bulunduğu durumlar dışında hemen hemen aynı olduğunu göstermiştir.

Sonlu elemanlar yöntemi ile yazılan algoritmalar sonlu farklar algoritmalarına göre daha karmaşıktır. Genel dizey denkleminin çözümünün sonlu elemanlar yöntemi ile daha karışık olması ve sonlu farklar yöntemiyle yazılan algoritmaların daha hızlı çalışması nedeniyle, bu çalışmada manyetotellürik yöntemde 2B modelleme için sonlu farklar yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca daha önce yapılan çalışmalar sonlu elemanlar ve sonlu farklar yöntemlerinin birbirlerine çok yakın duyarlılıklarının olduğunu göstermiştir (Rodi, 1976).

Manyetotellürik verilerin 2B ters çözümü için de birçok algoritma geliştirilmiştir (deGroot-Hedlin ve Constable, 1990; Ogawa ve Uchida, 1996; Siripunvaraporn ve Egbert, 2000; Rodi ve Mackie, 2001). Birçok üç boyutlu modelleme ve ters çözüm algoritması bulunmasına rağmen (Mackie ve Madden, 1993; Newman ve Hoversten, 2000; Sasaki, 2001), üç boyutlu ters çözüm algoritmaları çok fazla hesaplama zamanı gerektirir. Bu sebeple MT verilerinin yorumlanmasında 2B ters çözüm daha yaygın olarak kullanılır.

Jupp ve Vozoff (1977) MT yöntemde 2B ters çözümü için sönümlü en küçük kareler yöntemini kullanmıştır. deGroot-Hedlin ve Constable (1990), Smith ve Booker (1991) ise MT verilerinin iki boyutlu ters çözümünde OCCAM durağanlaştırıcısını kullanmışlardır. Uchida (1993), yuvarlatılmış en küçük kareler çözümünde ABIC (Akaike's Bayesian Information Criterion) en küçüklemesini kullanmıştır (Candansayar, 2002). MT yöntemde Tikhonov düzgünleyicisi kullanarak ters çözüm işlemini ise Rodi (1989), deLugao ve ark. (1997), Siripunvaraporn ve Egbert (2000), Rodi ve Mackie (2001) yapmıştır.

Çapraz – Türev yöntemini jeofizik verilerin ters çözümünde ilk olarak Gallardo ve Meju (2003) kullanmıştır. Gallardo ve Meju (2003), Doğru akım özdirenç ve sismik kırılma verilerini birleşik ters çözüm işlemine sokmuşlardır. Gallardo (2004), manyetotellürik ve sismik kırılma verilerinin birleşik ters çözümü için çapraz-türev yöntemini kullanan bir algoritma geliştirmiştir.

Bu çalışmada ise, MT yöntemde TE ve TM modu verilerini, iki farklı yöntem verisi olarak kabul eden ve çapraz-türev yöntemi kullanarak bu iki veri grubunu birleşik ters çözüm işlemine sokan bir algoritma geliştirilmiştir.

BÖLÜM 3

MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Manyetotellürik Yöntemde 2B Modelleme

Modelleme, bir jeolojik yer modelinin, matematiksel bir bağıntı yardımıyla, jeofiziksel tepkisinin hesaplanması olarak ifade edilebilir. Modelleme işlemi 2B olarak yapıldığında, model parametrelerinin iki ekseninde değiştiği (x,z) ve bu iki eksenin oluşturduğu düzleme dik olan eksen boyunca ise değişmediği kabul edilir.

Manyetotellürik yöntemde, 2B karmaşık yer modelleri için analitik çözüm bulunmadığından, sayısal yöntemler kullanılır. En çok kullanılan yöntemler sonlu elemanlar ve sonlu farklar yöntemleridir. Bu yöntemlerin dışında integral eşitlikleri yöntemi de kullanılabilir ancak bu yöntem karmaşık yer yapılarının bulunduğu durumlarda iyi sonuç vermemektedir.

Sayısal yöntemlerin duyarlılığı, ağın kalitesine ve jeolojik doğrultuya dik olan alanların doğru hesaplanabilmesine bağlıdır (Rodi, 1976). Kullanılan sonlu farklar ağındaki hücre boyutları, elde edilecek sonuçları doğrudan etkiler. Ağ boyutlarının daha iyi seçilmesi konusunda önerilen teknikler için Weaver (1994)'e bakılabilir. Yöntemin duyarlılığını etkileyen diğer bir etken olan jeolojik doğrultuya dik olan alanların doğru bir şekilde hesaplanabilmesi için, yüzeye yakın düğüm noktaları arasındaki düşey mesafelerin çok büyük seçilmemesi gerekir. Bu çalışmada, jeolojik doğrultuya dik alanları daha hassas bir şekilde hesaplayabilmek amacıyla, üç noktalı parabol yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yöntem, geleneksel (doğrusal) yöntemden daha iyi sonuç vermektedir (Weaver, 1994).

Bu çalışmanın amacı bir ters çözüm algoritması geliştirmektir. Doğru sonuç veren bir ters çözüm algoritmasının başarısını etkileyen en önemli etkenlerden birisi, duyarlı sonuç veren bir düz çözüm algoritmasıdır. Bu amaçla, yukarıda değinilen hususlara dikkat edilerek hem kara, hem de deniz ortamındaki modellerin jeofiziksel tepkisini duyarlı bir şekilde hesaplayabilen bir düz çözüm algoritması geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritmada topoğrafya etkisi de hesaplanabilmektedir.

3.1.1. Temel Denklemler

Manyetotellürik yöntemde temel denklemler, frekans ortamında verilen Maxwell denklemleridir. Maxwell denklemleri, düzlem dalga için aşağıdaki şekilde verilir:

$$\vec{\nabla}_x \vec{E} = -i\omega\mu\vec{H} \quad (3.1)$$

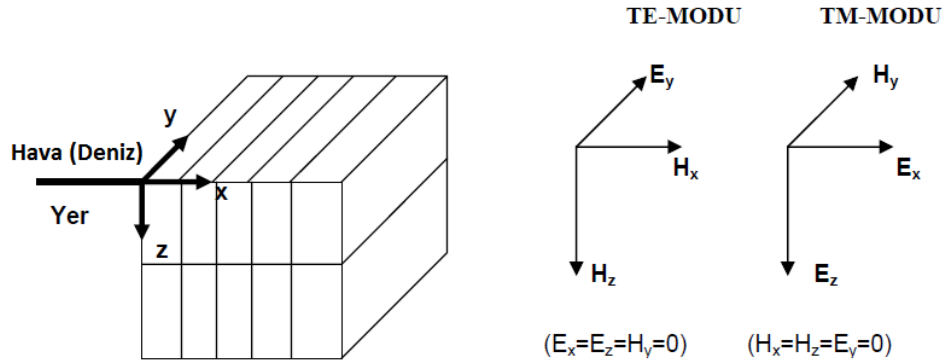
$$\vec{\nabla}_x \vec{H} = \sigma\vec{E} \quad (3.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (3.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (3.4)$$

Burada, ∇ 2B gradienti göstermektedir. Ayrıca, \vec{E} , elektrik alan şiddetini (V/m), \vec{H} , manyetik alan şiddetini (V/m), μ boşluğun manyetik geçirgenliği ($4\pi \times 10^{-7}$ H / m), σ öziletkenlik ($\mu\text{S/m}$) ve ω ise açısal frekanstır.

Yeriçinin 2B olması durumunda, MT yöntemde birbirinden bağımsız iki farklı mod vardır (Şekil 1). Bunlar, elektrik alanın jeolojik doğrultuya paralel olduğu TE modu (Transverse Electric) ve manyetik alanın jeolojik doğrultuya paralel olduğu TM modudur (Transverse Magnetic). Burada “Transverse” düşey eksene göre durumu tanımlamaktadır.



Şekil 1. Manyetotellürik yöntemde 2B model ve mod kavramı.

Denklem (3.1) ve (3.2)'nin dönelleri (rotasyonelleri) alınıp gerekli düzenlemeler yapılırsa, TE ve TM modları için birbirine benzer iki denklem elde edilir. Bu iki denklem genel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir (Rijo, 1977):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{k} \frac{\partial f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{k} \frac{\partial f}{\partial z} \right) = pf \quad (3.5)$$

Burada f , k , ve p TE modu için sırasıyla; $f = E_y$, $p = \sigma$, $k = i\omega\mu$ iken TM modu için ise; $f = H_y$, $p = i\omega\mu$, $k = \sigma$ değerlerini alır.

Denklem (3.5) f için çözülürse, jeolojik doğrultuya dik alanlar f nin x ve z yönündeki türevlerinden aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = -k\alpha \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial f}{\partial z} = -k\beta \quad (3.7)$$

Burada α ve β TE modu için sırasıyla; $\alpha = H_z$, $\beta = -H_x$ ve TM modu için ise; $\alpha = -E_z$, $\beta = E_x$ değerlerini alır. TE ve TM modu için empedans bağıntısı ise izleyen şekilde verilebilir:

$$Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y} = \frac{\beta}{f} \quad (3.8)$$

$$Z_{yx} = \frac{E_y}{H_x} = -\frac{f}{\beta} \quad (3.9)$$

Empedanslar hesaplandıktan sonra, görünür öz direnç ve empedans fazı izleyen bağıntılar kullanılarak hesaplanır:

$$\rho_a = \frac{1}{\omega\mu} |Z_{ij}|^2 \quad \text{ve} \quad \phi = \arg \tan \left(\frac{\text{Im}(Z_{ij})}{\text{Re}(Z_{ij})} \right) \quad (3.10)$$

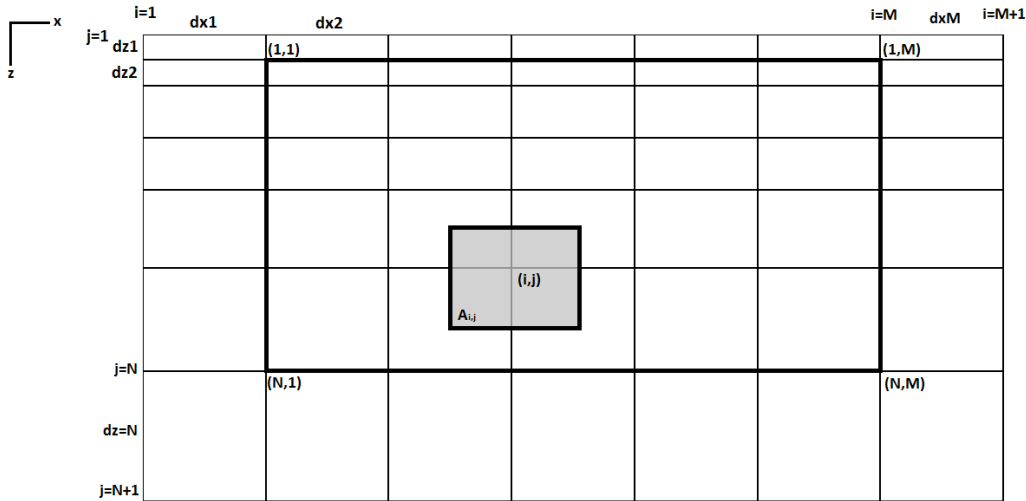
Burada Re ve Im , karmaşık bir sayının gerçel ve sanal bileşenlerini ifade etmektedir.

3.1.2. Sonlu Farklar Yöntemi

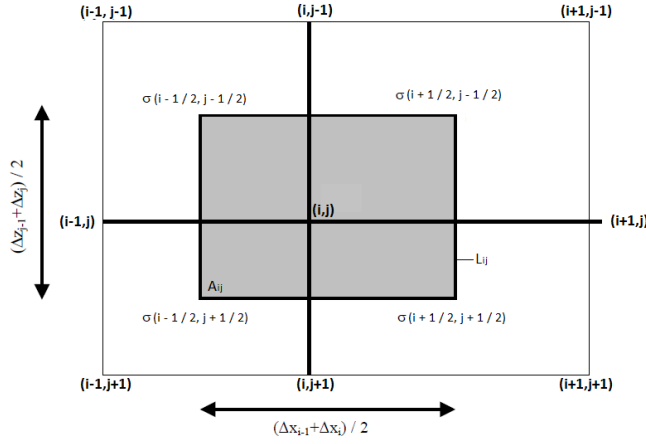
Manyetotellürik yöntemde, 2B karmaşık yer modelleri için (3.5) denkleminin analitik çözümü yoktur. Bu sebeple sayısal çözüm yöntemleri kullanılır. Sonlu farklar yöntemi MT yöntemin 2B modellemesi amacıyla birçok çalışmada kullanılmıştır.

Bu yöntemle denklem (3.5) in çözülebilmesi için, önce yer altı Şekil 2'deki gibi dikdörtgen bloklara ayrılarak çözüm bölgesi tanımlanır. Yöntemin doğru sonuç vermesi

için yatay ve düşey yöndeki hücre boyutları çok önemlidir. Düğüm noktalarındaki bilinmeyen değerleri hesaplayabilmek için (TE modunda elektrik alanlar, TM modunda manyetik alanlar), her düğüm noktası için sonlu fark denklemleri çıkartılır. Daha sonra sonlu farklar ağının sınırlarında kalan düğüm noktaları için sınır koşulları uygulanır. Hesaplanan sınır değerleri kullanılarak kaynak dizeyi hesaplanır. Tüm düğüm noktalarını birbirine bağlamak amacıyla, bütün noktalardan elde edilen sonlu farklar denklemleri, tek bir dizey denklemi olarak ifade edilir, yani global dizey elde edilir. Kaynak dizeyi ile, global dizey, birlikte, genel dizey denklemi olarak adlandırılır ve bu denklemin çözümünden TE ya da TM modu için her düğüm noktasında jeolojik doğrultuya paralel olan elektrik veya manyetik değerleri hesaplanır (E_y , H_y). Daha sonra bu elektrik ve manyetik alan değerleri çözümü yapılan moda göre (TE veya TM) denklem (3.6) ve (3.7) de yerlerine konularak, yeryüzünde, istasyonların bulunduğu düğüm noktalarında jeolojik doğrultuya dik olan alan değerleri hesaplanır (H_x , E_x). Her istasyon noktasındaki birbirine dik elektrik ve manyetik alan değerlerinin oranından (E_y/H_x veya E_x/H_y) manyetotellürik empedans hesaplanır. Empedans karmaşık bir sayıdır. Bu değer kullanılarak MT yöntemde ölçülen iki temel büyüklük olan görünür özdirenç ve empedans fazı, denklem (3.10)' da görüldüğü gibi hesaplanır.



Şekil 2. Sonlu Farklar model ağı. Koyu renkli dikdörtgen içerisinde kalan düğüm noktaları bilinmeyen değerleri, dikdörtgenin dışındaki noktalar sınır değerlerini göstermektedir.



Şekil 3. Ağ içindeki herhangi bir ΔA_{ij} dikdörtgeninin içindeki bir düğüm noktası ve komşu düğüm noktaları.

3.1.2.1. TE Modu İçin Sonlu Farklar Denklemi

Denklem (3.5), TE modu için yazılırsa;

$$(\nabla_x \nabla_x E_{ij})_y dx_i dz_j = -i\omega\mu_0 E_y \quad (3.11)$$

elde edilir. Denklem (3.11)'un , Şekil 2'deki ΔA_{ij} dikdörtgeninin alanı içinde integrali alınır;

$$\iint_{\Delta A_{ij}} (\nabla \cdot \nabla E_{ij}) dx_i dz_j = - \iint_{\Delta A_{ij}} (i\omega\mu_0 \sigma_{ij} E_{ij}) dx_i dz_j \quad (3.12)$$

olur. Eşitliğin sol tarafına Green Teoremi uygulanırsa, dikdörtgenin çevresi etrafında çizgi integrali aşağıdaki gibi olur.

$$\iint_{\Delta A_{ij}} (\nabla \cdot \nabla E_{ij}) dx_i dz_j = \int_{L_{ij}} \frac{\partial E_{ij}}{\partial \eta} dl \quad (3.13)$$

Burada η , A 'nın kenarlarında, dışa doğru birim normal vektördür. Bu denklem Weaver (1994) tarafından çözülmüştür. Denklem, dikdörtgenin alanını çevreleyen L_{ij} sınırları

boyunca merkezi farklar kullanılarak

$$\oint_{L_{ij}} \frac{\partial E_{ij}}{\partial \eta} dl \approx \frac{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i}{2} \left[\frac{E_{i,j+1} - E_{ij}}{\Delta z_j} - \frac{E_{ij} - E_{i,j-1}}{\Delta z_{j-1}} \right] + \frac{\Delta z_{j-1} + \Delta z_j}{2} \left[\frac{E_{i+1,j} - E_{ij}}{\Delta x_i} - \frac{E_{ij} - E_{i-1,j}}{\Delta x_{i-1}} \right] \quad (3.14)$$

şeklinde ifade edilebilir. Aynı şekilde, denklemin sağ tarafının integrali ise aşağıdaki şekilde alınabilir (Weaver, 1994);

$$i\omega\mu \iint_{\Delta A_{ij}} (\sigma_{ij} E_{ij}) dx_i dz_j = i\omega\mu E_{ij} \iint_{\Delta A_{ij}} \sigma_{ij} dx_i dz_j \approx i\omega\mu \tilde{\sigma}_{ij} E_{ij} \quad (3.15)$$

Burada, $\tilde{\sigma}_{ij}$ (i,j) düğüm noktasındaki ağırlıklı ortalama iletkenliktir ve izleyen şekilde tanımlanır;

$$\tilde{\sigma} = \frac{\Delta x_i \Delta z_{j-1}}{4} \sigma_{i,j-1} + \frac{\Delta x_i \Delta z_j}{4} \sigma_{ij} + \frac{\Delta x_{i-1} \Delta z_j}{4} \sigma_{i-1,j} + \frac{\Delta x_{i-1} \Delta z_{j-1}}{4} \sigma_{i-1,j-1} \quad (3.16)$$

Denklem (3.15) ve (3.16) kullanılarak denklem (3.5)'in TE modu için sonlu farklar ile çözümü aşağıdaki gibi verilir;

$$\frac{\Delta z_{j-1} + \Delta z_j}{2\Delta x_i} E_{i+1,j} + \frac{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i}{2\Delta z_j} E_{i,j+1} + \frac{\Delta z_{j-1} + \Delta z_j}{2\Delta x_{i-1}} E_{i-1,j} + \frac{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i}{2\Delta z_{j-1}} E_{i,j-1} = \left[\frac{\Delta z_{j-1} + \Delta z_j}{2\Delta x_i} + \frac{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i}{2\Delta z_j} + \frac{\Delta z_{j-1} + \Delta z_j}{2\Delta x_{i-1}} + \frac{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i}{2\Delta z_{j-1}} \right] E_{ij} \quad (3.17)$$

3.1.2.2. TM Modu İçin Sonlu Farklar Denklemi

Denklem (3.5) TM modu için yazılırsa;

$$(\nabla_x \rho \nabla_x H)_y = \nabla \cdot \rho \nabla H_y = -i\omega \mu H_y \quad (3.18)$$

elde edilir. Denklem (3.18)'in, Şekil 2'deki $\Delta A_{i,j}$ dikdörtgeninin alanı için integrali alınır;

$$\iint_{\Delta A_{i,j}} (\nabla \cdot \rho_{i,j} \nabla H_{i,j}) dx_i dz_j = - \iint_{\Delta A_{i,j}} (i\omega \mu H_{i,j}) dx_i dz_j \quad (3.19)$$

olur. Eşitliğin sol tarafına Green Teoremi uygulanırsa alan integralinden, çizgi integraline geçilebilir.

$$\iint_{\Delta A_{i,j}} (\nabla \cdot \rho_{i,j} \nabla H_{i,j}) dx_i dz_j = \int_{L_{i,j}} \rho_{i,j} \frac{\partial H_{i,j}}{\partial \eta} dl \quad (3.20)$$

Denklemin $\Delta A_{i,j}$ dikdörtgeninin sınırları etrafındaki çözümü aranır ve (3.20) denkleminde öz direnç değerleri ($\rho_{i,j}$) dikdörtgenin çevresi boyunca değişmektedir. Bu nedenle dikdörtgenin her bir kenarı için uygun bir değer kullanılmalıdır. Her kenar, dört adet etkin öz direnç değeriyle bağlantılıdır. Bu öz direnç değerleri aşağıdaki şekilde tanımlanabilirler (Weaver, 1994);

$$\begin{aligned} \tilde{\rho}_{i+1,j} &= \frac{\Delta z_{j-1} \rho_{i,j-1} + \Delta z_j \rho_{i,j}}{2\Delta x_i} \\ \tilde{\rho}_{i,j+1} &= \frac{\Delta x_{i-1} \rho_{i-1,j} + \Delta x_i \rho_{i,j}}{2\Delta z_j} \\ \tilde{\rho}_{i-1,j} &= \frac{\Delta z_{j-1} \rho_{i-1,j-1} + \Delta z_j \rho_{i-1,j}}{2\Delta x_{i-1}} \\ \tilde{\rho}_{i,j-1} &= \frac{\Delta x_{i-1} \rho_{i-1,j-1} + \Delta x_i \rho_{i,j-1}}{2\Delta z_{j-1}} \end{aligned} \quad (3.21)$$

Denklemin sağ tarafı işe aşağıdaki şekilde verilebilir;

$$i\omega\mu \iint_{\Delta A_{ij}} H_{ij} dx_i dz_j = i\omega\mu H_{ij} \frac{(\Delta x_{i-1} + \Delta x_i)(\Delta z_{j-1} + \Delta z_j)}{4} \quad (3.22)$$

(3.21) ve (3.22)'deki denklemler kullanılarak TM modu için sonlu farklar çözümü aşağıdaki gibi verilebilir;

$$\begin{aligned} & \tilde{\rho}_{i+1,j} H_{i+1,j} + \tilde{\rho}_{i,j+1} H_{i,j+1} + \tilde{\rho}_{i-1,j} H_{i-1,j} + \tilde{\rho}_{i,j-1} H_{i,j-1} \\ & = \left[\tilde{\rho}_{i+1,j} + \tilde{\rho}_{i,j+1} + \tilde{\rho}_{i-1,j} + \tilde{\rho}_{i,j-1} - i\omega\mu \frac{(\Delta x_{i-1} + \Delta x_i)(\Delta z_{j-1} + \Delta z_j)}{4} \right] H_{ij} \end{aligned} \quad (3.23)$$

3.1.3. Sınır Koşulları

Sonlu farklar ağının sınırlarında kalan düğüm noktalarındaki elektrik ve manyetik alanlar, Jonas ve Price (1970)'nin önerdiği yöntem kullanılarak hesaplanmıştır. Sonlu farklar ağının sağ ve sol sınırları, 2B yapılardan uzak yani ortamın tabakalı (1B) sayılabileceği mesafeye kadar uzatılır. Böylelikle sınırlardaki düğüm noktaları, ağın orta kısımlarındaki 2B yapılardan etkilenmeyecek kadar uzaklaştırılmış olur ve böylece bu noktalarda E ve H alanlar, 1B ortam için hesaplanabilir.

Bu yönetime göre Şekil 2'de koyu renkli dikdörtgenin dışında kalan sınırlardaki düğüm noktalarında E ve H alanlar tabakalı (1B) yer modeli için hesaplanmıştır.

Ağın üst kısmında kalan düğüm noktalarında alan değerleri sabit alınır. Bu değerler sağ ve sol köşedeki alan değerlerinin aritmetik ortalamasından hesaplanır.

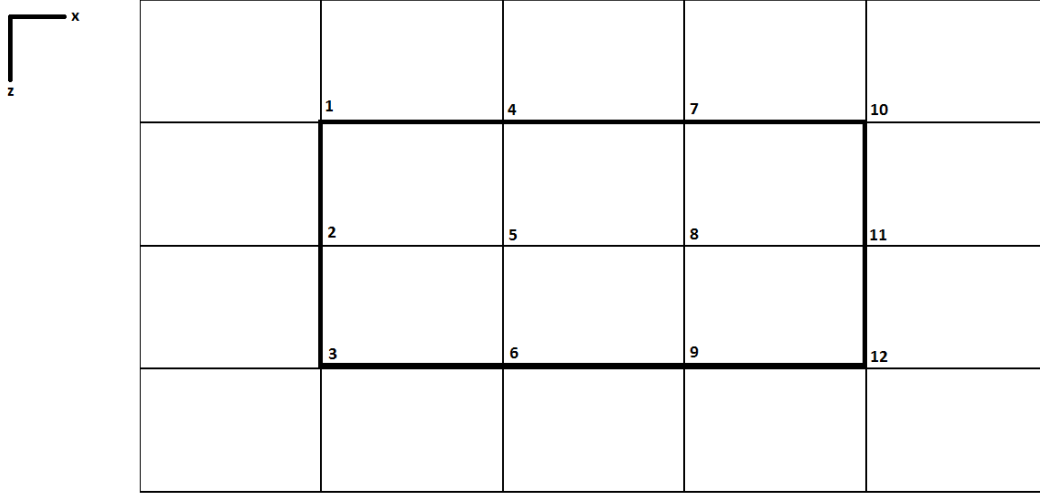
Ağın alt kısmında kalan düğüm noktalarındaki alan değerleri de, aynı şekilde sabit olarak alınır. Bu noktaların değerleri de sağ ve sol alt köşede 1B çözümden elde edilen alan değerlerinin aritmetik ortalamasından hesaplanmıştır.

Sınırlarda alan değerleri hesaplandığı için, bu noktaların genel dizey denklemine koymaya gerek yoktur. Sınırlardaki bilinen alan değerleri, ileriki bölümde anlatılacağı gibi ait oldukları noktada hesaplanan sonlu farklar katsayılarıyla çarpılarak kaynak dizeyini oluşturur.

3.1.4. Global Dizeyin Elde Edilmesi ve Çözümü

Sonlu farklar yöntemi ile Şekil 2’deki gibi bir ağ üzerinde çözüm elde edebilmek için, her nokta için hesaplanan sonlu farklar denklemlerinin ortak bir dizeyde birleştirilmesi gerekir. Bu dizey, global dizey olarak adlandırılır. Global dizeyin elde edilmesinden sonra sonlu farklar yöntemi için bir doğrusal denklem sistemi elde edilir.

Global dizey oluşturulurken, her nokta ve çevresindeki dört noktanın ilişkisi kullanılır. Bu durumu açıklamak için Şekil 4’teki gibi bir temsili ağ göz önüne alalım.



Şekil 4. X yönünde 4 ve Z yönünde 3, toplam $3 \times 4 = 12$ düğüm noktasından oluşan sonlu farklar ağı.

Koyu renkli dikdörtgenin içerisinde kalan düğüm noktalarını, global dizeye yerleştirirken, dizeyin her satırında, bir düğüm noktasının diğer noktalarla olan ilişkisi bulunur. Bu sebeple global dizeyin boyutu MN düğüm noktası sayısı olmak üzere $MN \times MN$ kadar olacaktır. Herhangi bir düğüm noktası için hesaplanan sonlu farklar denklemi ve sağ, sol alt ve üst tarafında olan düğüm noktalarıyla ilgili katsayıları yerlerine konur ve o satırdaki diğer bütün değerler sıfır olur. Buradan görülmektedir ki global dizeyin sadece 5 köşegeni sıfırdan farklıdır. Bu durum Şekil 5’te de görülebilmektedir. Burada C_p , C_b , C_t , C_l , ve C_r , sırasıyla merkez, alt, üst, sol ve sağ taraftaki düğüm noktalarının konumları ile ilgili, hücre boyutlarına ve iletkenlik değerlerine bağlı bilinen sabit katsayılardır. Örneğin TE modu için

$$C_{p(1)} = \frac{(\Delta z_1 + \Delta z_2)}{2\Delta x_2} + \frac{(\Delta x_1 + \Delta x_2)}{2\Delta z_2} + \frac{(\Delta z_1 + \Delta z_2)}{2\Delta x_1} + \frac{(\Delta x_1 + \Delta x_2)}{2\Delta z_1} - i\omega\mu\tilde{\sigma}_{1,1} \quad (3.24)$$

şeklinde yazılabilir.

Bu katsayılar, global düzeyde, sonlu farklar ağındaki konumlarına göre yer alırlar. Yani düzeyin, sol üst köşedeki elemanın diğer düğüm noktalarıyla olan ilişkisini açıklayan ilk satırına bakarsak, sırasıyla her düğüm noktasının, bu köşe noktasıyla olan ilişkisini görebiliriz. Örneğin Şekil 4'teki ikinci nokta, 1 numaralı bu köşe numarasının altında yer aldığı için, ilgili elemana C_b (alt) katsayısı gelmiştir.

Ayrıca şekildeki eşitliğin sağ tarafında bulunan değerler ise sınır koşullarından hesaplanan kaynak değerleridir. Sınırlarda, daha önce 1B çözümden elde edilen değerler, ilgili katsayılarla çarpılarak kaynak düzeyindeki yerlerine konulur.

$$\begin{bmatrix} C_{p(1)} & C_b(1) & 0 & C_r(1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{t(2)} & C_p(2) & C_b(2) & 0 & C_r(2) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{t(3)} & C_p(3) & 0 & 0 & C_r(3) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{l(4)} & 0 & 0 & C_p(4) & C_b(4) & 0 & C_r(4) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{l(5)} & 0 & C_{t(5)} & C_p(5) & C_b(5) & 0 & C_r(5) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{l(6)} & 0 & C_{t(6)} & C_p(6) & 0 & 0 & C_r(6) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{l(7)} & 0 & 0 & C_p(7) & C_b(7) & 0 & C_r(7) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{l(8)} & 0 & C_{t(8)} & C_p(8) & C_b(8) & 0 & C_r(8) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{l(9)} & 0 & C_{t(9)} & C_p(9) & 0 & 0 & C_r(9) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{l(10)} & 0 & 0 & C_p(10) & C_b(10) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{l(11)} & 0 & C_{t(11)} & C_p(11) & C_b(11) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{l(12)} & 0 & C_{t(12)} & C_p(12) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \\ X_7 \\ X_8 \\ X_9 \\ X_{10} \\ X_{11} \\ X_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ 0 \\ b_6 \\ b_7 \\ 0 \\ b_9 \\ b_{10} \\ b_{11} \\ b_{12} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Şekil 5. Genel düzey denklemi.

Denklem (3.25), aşağıdaki formda yazılabilir.

$$Ax=b \quad (3.26)$$

Burada A, $MN \times MN$ boyutunda katsayı matrisi, x, $MN \times 1$ boyutunda bilinmeyen alan değerlerini içeren sütun yöney, b ise $MN \times 1$ boyutlu, sıfırdan farklı değerleri sınır

değerlerinden hesaplanan sütun yöneydir.

Denklem (3.26), doğrusal bir denklem sistemidir ve doğrudan veya yinelemeli yöntemler kullanılarak çözülebilir. Bu çalışmada denklem “LU decomposition” yöntemi ile çözülmüştür. Ayrıca sparse aritmetiği kullanılmıştır yani dizeyin sadece sıfırdan farklı olan elemanları hafızada tutulmuştur.

3.1.5. Jeolojik Doğrultuya Dik Alanların Hesaplanması

MT yöntemde düz çözüm algoritmasının doğru sonuç vermesini etkileyen en önemli etkenlerden birisi, jeoelektrik uzanımın doğrultusuna dik olan alanların hassas bir şekilde hesaplanmasıdır. Genel olarak türevler merkezi fark operatörleri kullanılarak hesaplanmaktadır.

Bu çalışmada jeolojik doğrultuya dik olan alanlar hesaplanırken Weaver (1994)’in önerdiği yöntem kullanılmıştır. Weaver, elektromanyetik alan fonksiyonlarını, aşağı ve yukarı Taylor serisine açmıştır ve üçüncü dereceden türevleri ihmal etmiştir. Böylece bir noktadaki türev değeri, ona komşu olan iki farklı noktanın değerleriyle birlikte toplam üç noktanın değeri kullanılarak hesaplanır. Bu yöntem, iki noktalı türev hesaplama yöntemlerinden daha hassas sonuç vermektedir.

TE modu için üç nokta kullanılarak hesaplanan türev bağıntısı aşağıdaki şekilde verilebilir;

$$H_x(i,1) \approx -\frac{i}{\omega\mu} \left[\frac{2\Delta z_1 + \Delta z_2}{\Delta z_1(\Delta z_1 + \Delta z_2)} E_{i,1} - \frac{\Delta z_1 + \Delta z_2}{\Delta z_1 \Delta z_2} E_{i,2} + \frac{\Delta z_1}{\Delta z_2(\Delta z_1 + \Delta z_2)} E_{i,3} \right] \quad (3.27)$$

$$H_z(i,1) \approx \frac{i}{\omega\mu} \left[\frac{\Delta x_i}{\Delta x_{i-1}(\Delta x_i + \Delta x_{i-1})} E_{i-1,1} - \frac{\Delta x_i + \Delta x_{i-1}}{\Delta x_i \Delta x_{i-1}} E_{i,1} + \frac{\Delta x_{i-1}}{\Delta x_i(\Delta x_i + \Delta x_{i-1})} E_{i+1,1} \right] \quad (3.28)$$

Aynı şekilde TM modu için ise aşağıdaki şekilde verilebilir.

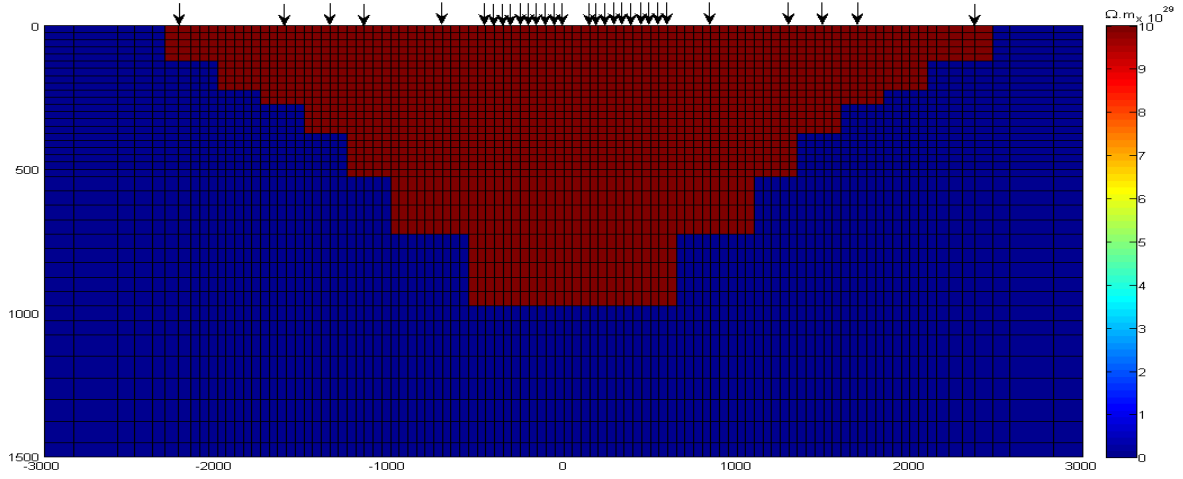
$$E_x(i,1) \approx -\frac{\Delta x_{i-1} \sigma_{i-1,1} + \Delta x_i \sigma_{i,1}}{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i} \left[\frac{2\Delta z_1 + \Delta z_2}{\Delta z_1(\Delta z_1 + \Delta z_2)} H_{i,1} - \frac{\Delta z_1 + \Delta z_2}{\Delta z_1 \Delta z_2} H_{i,2} + \frac{\Delta z_1}{\Delta z_2(\Delta z_1 + \Delta z_2)} H_{i,3} \right] \quad (3.29)$$

3.1.6. MT Düz Çözümde Denizel Ortam

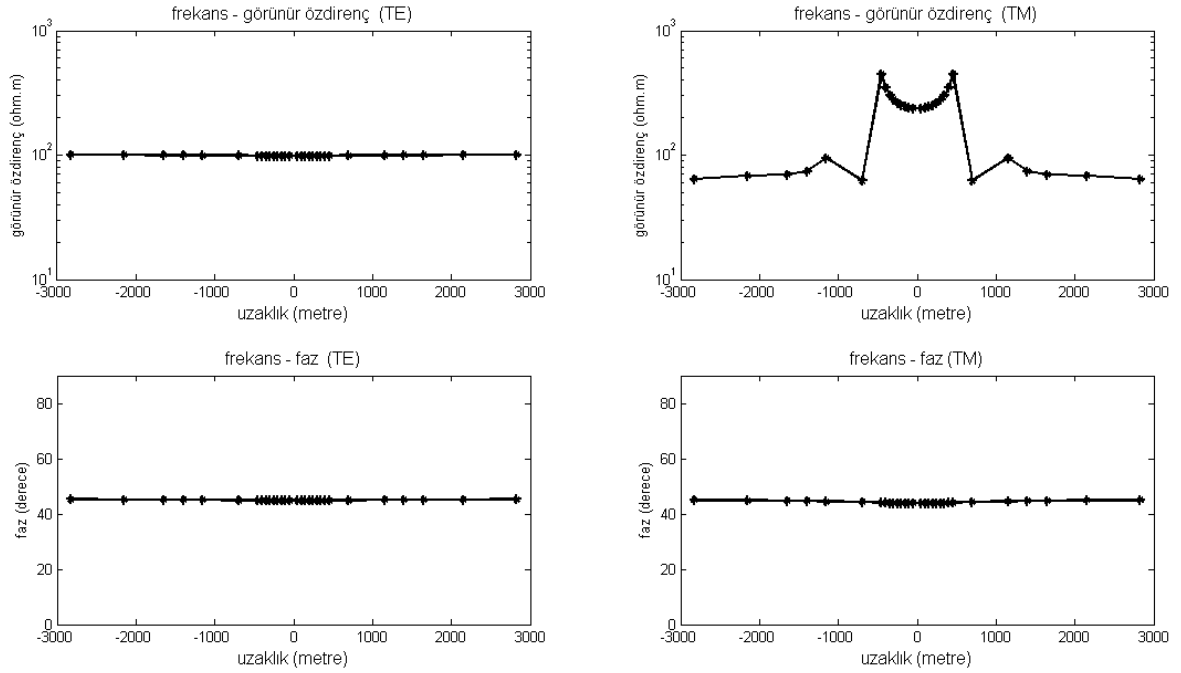
Manyetotellürik yöntem yerinin incelenmesinde, kıtasal alanlarda uygulanabildiği gibi, denizel ortamlarda da uygulanabilmektedir. Uygulanan yöntem aynı olmasına rağmen, deniz ve kara ortamlarından elde edilecek veriler (elektrik ve manyetik alan) birbirinden çok farklı özellikler gösterebilir. Topoğrafyanın ve deniz tabanının düz olduğu durumlarda, iki ortamdaki MT tepkileri (E ve H alan) benzer olsa da, deniz tabanının (batimetri) düz olmaması, deniz suyunun iletkenliğinin yüksek olması ve kıyı bölgelerinin etkisi, MT yöntem için deniz ve karasal ortamlarda elde edilecek tepkilerin birbirinden farklı özellikler göstermesini sağlayabilir.

Karasal ortamdaki MT çalışmalarından elde edilen MT yöntem tepkileri incelendiğinde, manyetik alan hava tabakasındaki yansımalar yüzünden bastırılır ve çok büyük mesafeler için bile çok az değişim göstermektedir. Yani manyetik alan yeraltındaki yapılar hakkında çok fazla bilgi içermemektedir. Özetlemek gerekirse; karasal ortamda manyetik alanı ölçmek, kaynak alanını ölçmeye eşdeğerdir. Bu nedenle ileride de değinileceği gibi, manyetik alanın jeolojik doğrultuya dik yani topoğrafyaya paralel olduğu TE modunda, manyetik alan, topoğrafyadaki değişimlerden çok fazla etkilenmeyeceği için, bu etkiler TE moduna da çok az görülür. Diğer yandan elektrik alan ise yeraltı yapıları ve özdirenç süreksizliklerinden etkilenir ve MT yöntemde karasal alandaki uygulamalarda yapısal bilgiyi verir. Bu sebeple TM modunda elektrik alan topoğrafya değişimlerinden etkilenecektir ve topoğrafya etkisi TM modunda daha belirgin bir şekilde görülür.

TE ve TM modlarının karasal ortamdaki topoğrafya değişimlerine olan duyarlılığını incelemek için Şekil 6'daki model kullanılarak TE ve TM modları için görünür özdirenç ve faz değerleri hesaplanmıştır. Şekil 7'de verilen sonuçlara bakıldığında, yukarıda anlatıldığı gibi, ölçülen manyetik alanın topoğrafyaya paralel olmasından dolayı TE modunun topoğrafya değişiminden etkilenmediği ve TM modunun ise topoğrafyaya paralel elektrik alanın değişiminden dolayı yükseklik değişimlerine duyarlı olduğu görülmektedir.



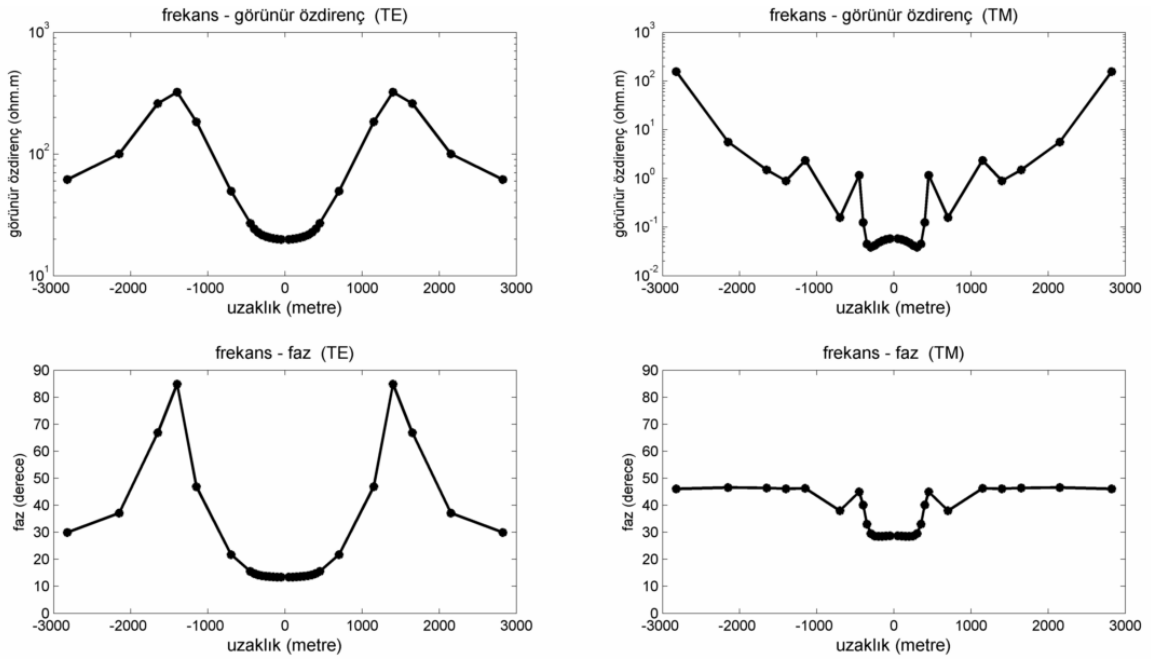
Şekil 6. Trapezoidal vadi modeli (Eksenler metredir).



Şekil 7. Şekil 6'da verilen model için hesaplanan TE ve TM modu tepkileri.

Denizel ortam için MT tepkileri (E ve H alan) incelendiğinde ise elektrik ve manyetik alanın, karasal ortama göre farklı karakterlerde davrandığı görülür. Deniz suyunun çok iletken olması, yüksek frekansları içeren kaynak alanlarını sönmeler. Bu sebeple elektrik alanların büyük çoğunluğu deniz tabakasında bastırılır. Denizel ortamda, kıtasal ortamın aksine, manyetik alan yeraltı yapıları ve iletkenlik değişimleri hakkında

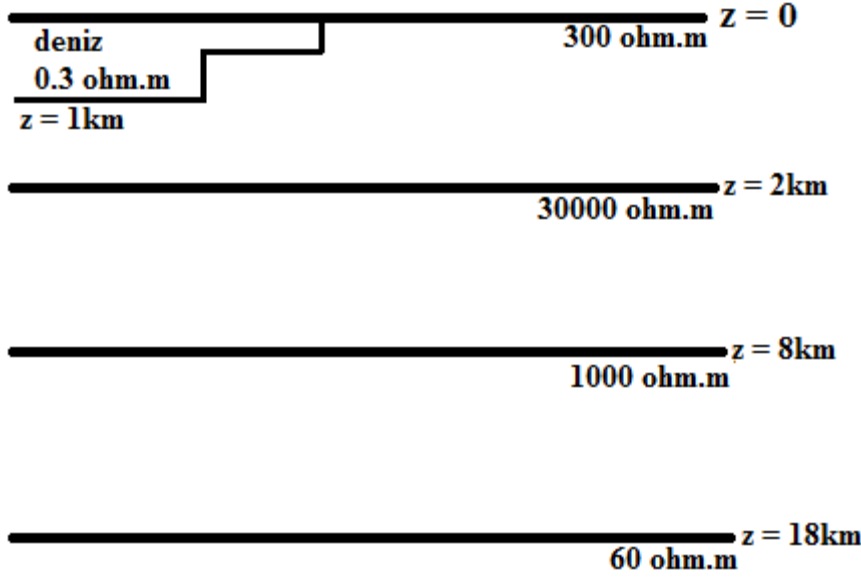
elektrik alana göre daha fazla bilgi içerir. Yani denizel ortamda elektrik alanı ölçmek, kaynak alanını ölçmek gibidir. Manyetik alanın öz direnç değişimlerine duyarlı olması sonucu, kıtasal ortamın aksine TE modu, batimetrimin değişimine duyarlıdır. Bunu göstermek amacıyla Şekil 6'daki model kullanılmıştır. Ancak bu sefer hava tabakasının yerine düşük öz dirençli su tabakası konulmuştur. Şekil 8'deki sonuçlara bakılırsa, iletken su tabakasının varlığıyla birlikte TE modu batimetrideki yükseklik değişimlerine duyarlı olmuştur.



Şekil 8. Şekil 6' daki modelde hava tabakası yerine iletken (0.3 mS) su tabakasının ekenmesiyle oluşan model için hesaplanan TE ve TM tepkileri.

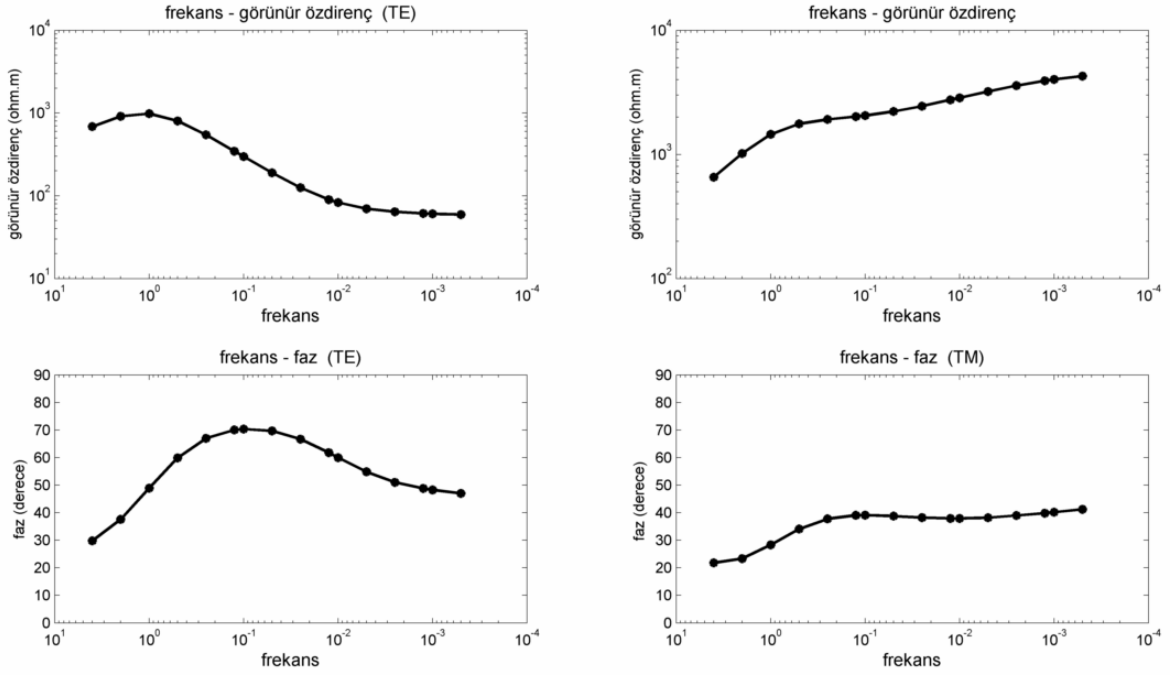
Kıtasal ve okyanusal ortamlardaki MT tepkilerini farklılaştıran diğer bir etki de kıyı etkisidir. Elektromanyetik alanlar, okyanus – kıyı sınırı tarafından etkilenirler. Bu etkiyi ilk olarak Parkinson (1962) ve Schmucker (1963) tanımlamıştır. Parkinson ve Schmucker, okyanus kıyılarına yakın bölgelerinde kayıt edilen düşey manyetik alandaki anomalilerin, kıyıya paralel olarak ilerleyen elektrik akımları olduğunu belirlemişlerdir. Kıyı etkisi, TE ve TM modları tepkilerini önemli oranda değiştirir. Ayrıca deniz tabakasının etkisi kıyıda, denize yakın çalışmalarda da görülür. Bunu göstermek amacıyla Şekil 9'da görülen yer modeli için manyetotellürik tepki hesaplanmıştır. Modelde görülen deniz tabakasına bir adet yakın ve bir adet de uzak konumda bulunan istasyondan alınan ölçülerle görünür

özdirenç ve faz hesaplanmıştır.

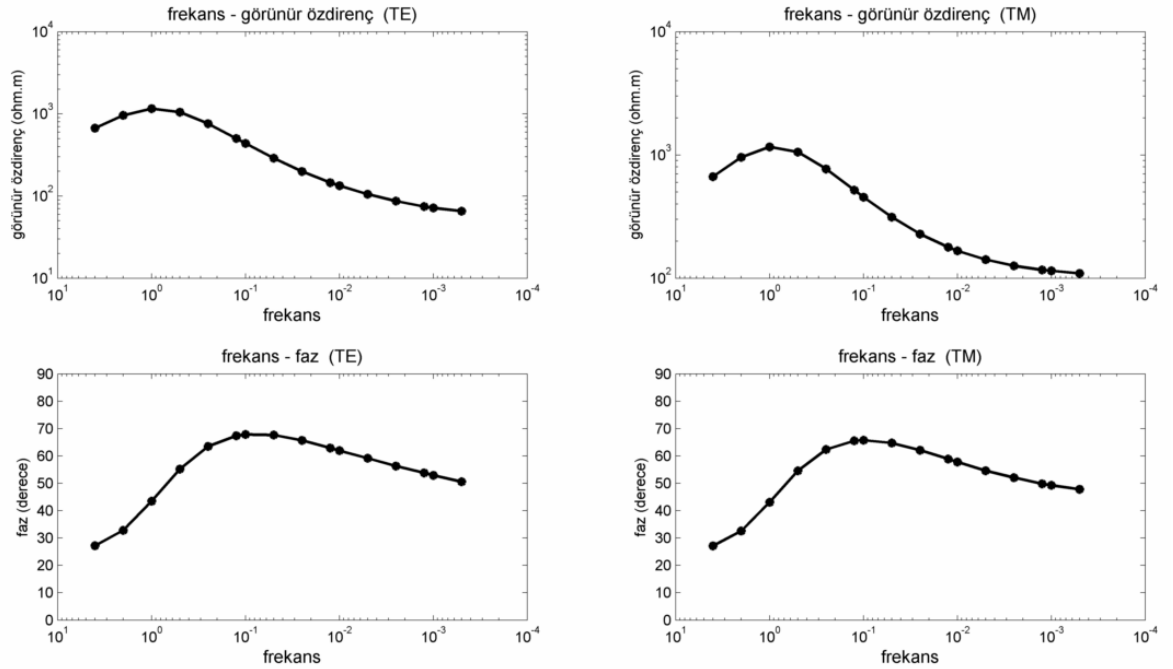


Şekil 9. Temsili 2B yer modeli. Kıyı etkisini göstermek amacıyla deniz tabakasına yakın ve uzak noktadaki iki farklı istasyonda MT tepkisi hesaplanmıştır. Yakın olan istasyon verileri deniz tabakasından etkilenmektedir.

Şekil 10'da, deniz tabakasına yakın olan istasyonda hesaplanan değerler görülmektedir. TM modu sonuçlarına bakılırsa, mevcut frekansların yüksek özdirençli (30000 ohm.m) tabakanın altından bilgi almak için yetersiz kaldığı görülmektedir. Bu tipik bir iletken deniz tabakası etkisidir. Kıyı bölgelerinden uzaklaştıkça bu etki azalır. Şekil 11'de, aynı model için bu sefer kıyıdan uzakta bulunan bir istasyon için hesaplama yapılmıştır. Sonuçlar göstermektedir ki, kıyıdan uzak bölgelerde, iletken deniz tabakasının etkisi görülmemektedir. Kullanılan frekanslar aynı olmasına rağmen, uzaktaki istasyonda yüksek özdirençli tabakanın altından da bilgi alınabilmiştir.



Şekil 10. Şekil 9’da görülen model için MT tepkisi. Değerler, denize yakın bölgelerdeki istasyona aittir. Özellikle TM modunda denizin etkisi görülmektedir.



Şekil 11. Kıyıdan uzak bölgedeki istasyon için hesaplanan değerler. Deniz etkisinin, yakındaki istasyona oranla azaldığı görülebilir.

Yukarıda görüldüğü gibi manyetotellürik yöntemde okyanusal ve kıtasal ortamlar birbirinden çok farklı sonuçlar ortaya çıkarabilir. Kıtasal bir model tepkisi hesaplanırken, TM modu için, sınır koşullarından dolayı manyetik alan yeryüzünde sabit alınır. Ancak denizel ortam için böyle bir şey söz konusu değildir. Manyetik alan jeolojik doğrultuya dik olan eksen boyunca değişkendir ve iletkenlik sınırlarından etkilenir.

3.1.7. Algoritmanın Denetlenmesi

MT yöntemde 2B düz çözüm problemi için geliştirilen algoritma, doğru sonuç verdiği bilinen ve Rijo'nun 1977 yılında geliştirdiği bir algoritma (FEM2D) ile karşılaştırılmıştır.

Vadi modelinde, model tepkisi hem geliştirilen algoritma ile hem de FEM2D isimli algoritma ile hesaplanmıştır. Model ile ilgili ayrıntılar ve sonuçlar izleyen bölümde verilecektir.

Düz çözüm algoritması için yapılan ikinci deneme ise gerçek bir yer modeli üzerinde yapılmıştır. Brezilyadaki Santos Havzası, bölgedeki sismik veriler ve daha önce yapılan çalışmalar kullanılarak modellenmeye çalışılmıştır (Fontes ve ark., 2009). Buradaki çalışmalar petrol arama amaçlıdır. Geliştirilen algoritma ile petrol bulundurması olası bölgenin varlığında ve yokluğunda model tepkileri hesaplanmış ve bu bölgenin varlığının elde edilen veriyi etkileyip etkilemediği belirlenerek, manyetotellürik yöntemin böyle bir çalışmaya duyarlı olduğu ve benzer çalışmalarda kullanılabilir olduğu gösterilmek istenmiştir.

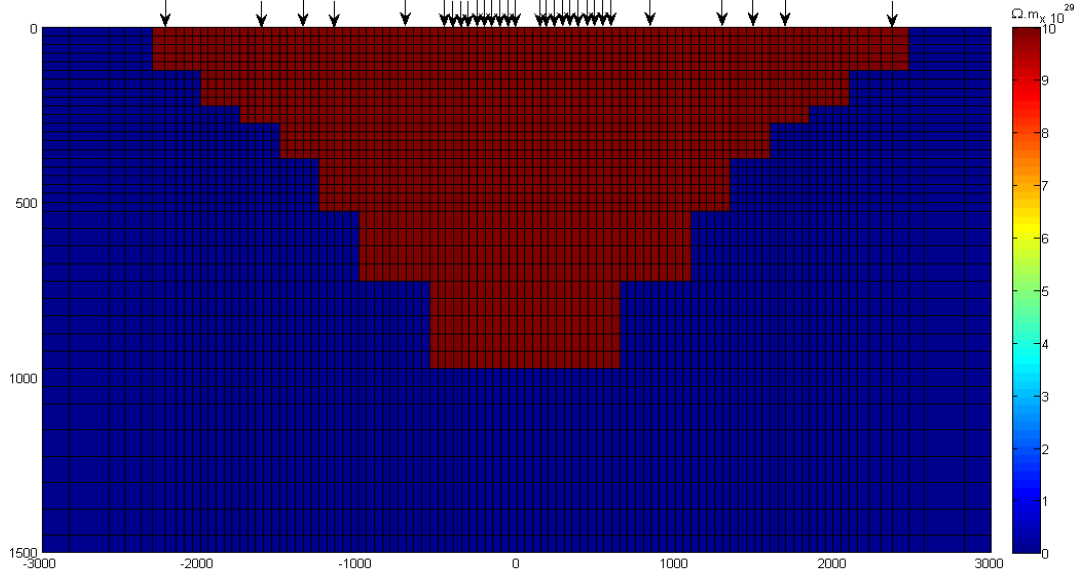
3.1.7.1. Vadi Modeli

Bu modelde topografya olarak vadi modeli seçilmiştir (Şekil 12). Vadinin derinliği merkezde 1 km, genişliği 4,5 km ve yer yapısının özdirenci 100 ohm-m dir. Vadi modeli, x- yönünde farklı genişliklerdeki 110 hücreyle ve z- yönünde ise farklı yüksekliklerdeki 82 hücreyle tanımlanmıştır. TE modunda, ağın üst kısmına 8 adet hava tabakası eklenmiştir ve havanın özdirenci 10^{30} ohm-m olarak alınmıştır. Model tepkileri 2 Hz. ve 0,01 Hz. olmak üzere iki farklı frekans için hesaplanmıştır. Bu model için hesaplama zamanı, 2 Ghz işlemcili ve 2 GB bellek yüklü bir bilgisayarda her frekans için TE modunda 0,8 saniye, TM modunda ise yaklaşık 0,75 saniyedir.

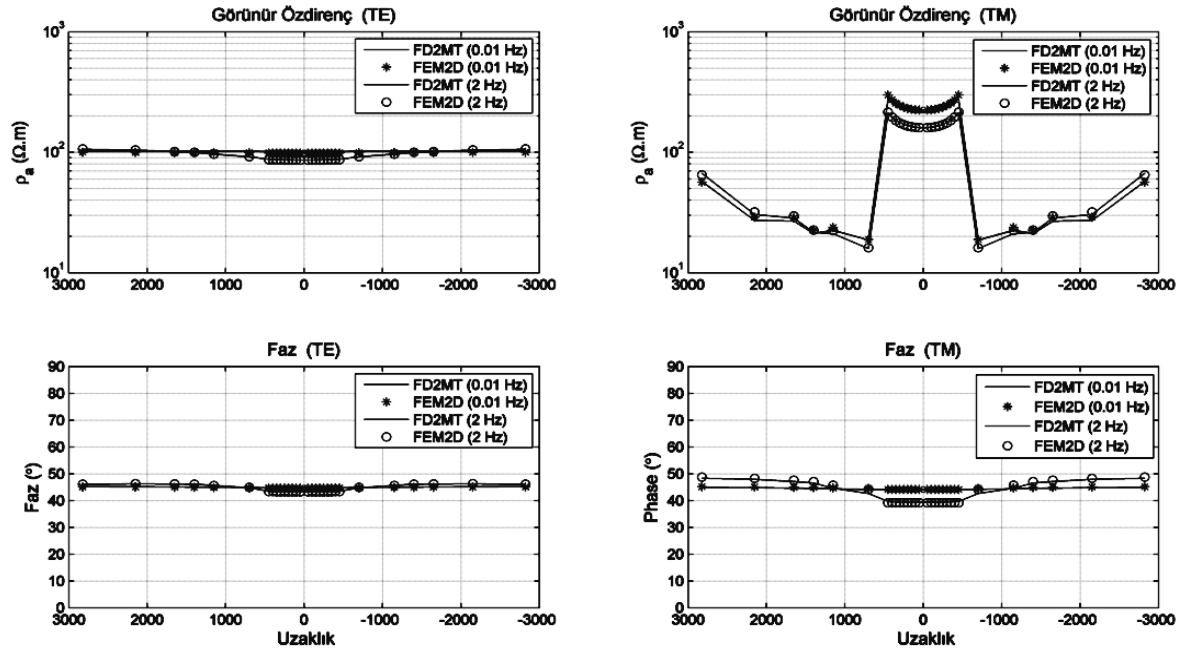
Şekil 13'teki 2 Hz için sonuçlara bakılırsa; TE modu için görünür özdirenç değerleri, vadinin orta kısımlarına doğru Rijo'nun programı (FEM2D) ile uyumlu bir şekilde azalım göstermektedir. TM modu için görünür özdirenç ise vadinin eğimli bölgelerinde değişkendir.

0,01 Hz frekansında ise, TE modunda, bu frekans için vadinin etkisi görülmemektedir. Bunun sebebi frekansın çok düşük olmasıdır.

TM modu için ise, 2 Hz frekansında görünür öz direnç değerleri vadinin yamaçlarında FEM2D programı ile uyumlu olacak şekilde daha düşüktür. Sonuçlar 0,01 Hz frekansı için de FEM2D ile uyum içerisinde.



Şekil 12. Vadi modeli (eksenler metredir).

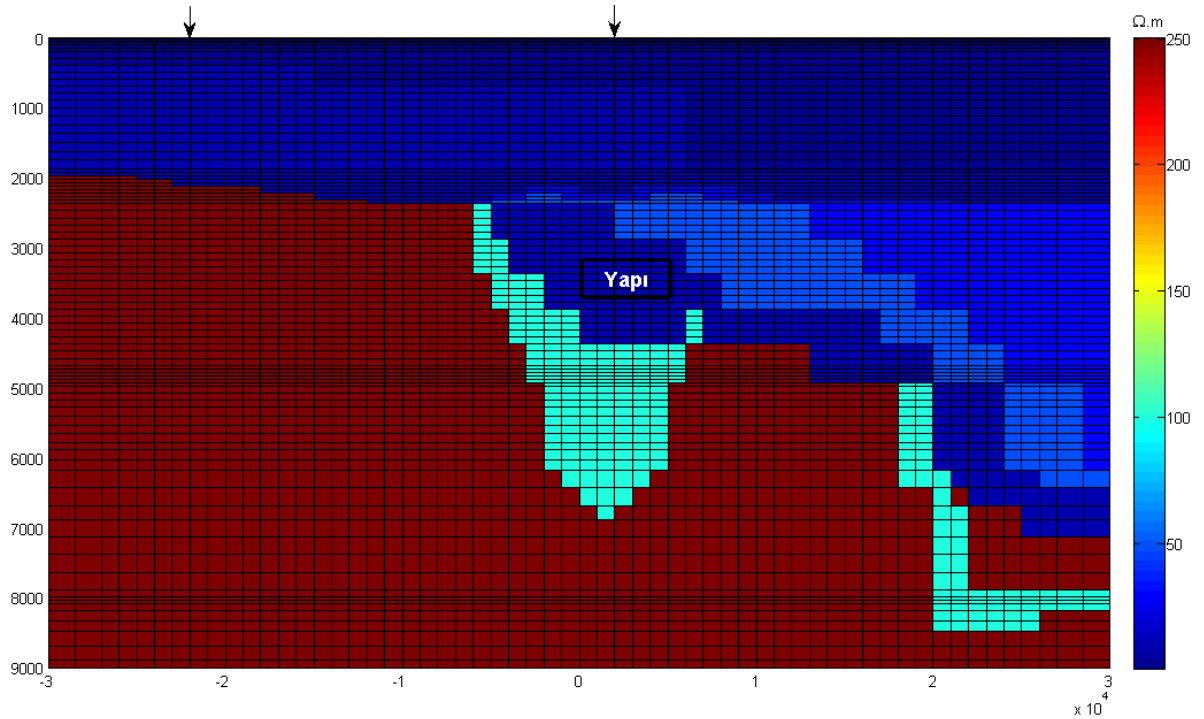


Şekil 13. Vadi modeli için TE ve TM modu model tepkileri.

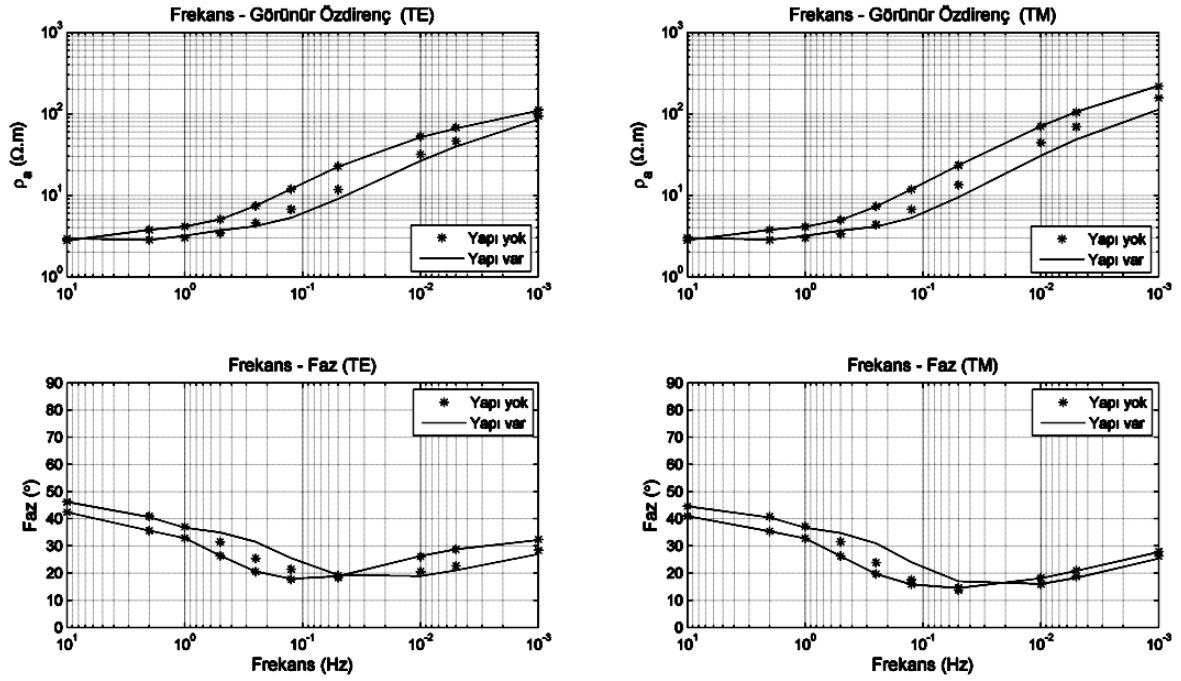
3.1.7.2. Santos Havzası, Brezilya

Gerçeğe daha yakın arazi koşullarını sağlayabilmek amacıyla, bu modelde Santos Havzası, Brezilya (Fontes ve ark., 2009) modellenmeye çalışılmıştır. Bu modeldeki asıl amaç; Şekil 14'te 'Yapı' olarak gösterilen ve petrol barındıran şeyl/karbonat bölgesinin elde edilecek MT tepkisine etkisini belirlemektir. Bu amaçla 10 Hz ile 0,001 Hz arasında değişen 10 farklı frekans kullanılarak TE ve TM modları için modelin tepkisi hesaplanmıştır. Bir tanesi hedef yapıdan uzak bir bölgede ve bir tanesi de yapının üzerine denk gelen iki farklı istasyondan elde edilen değerler karşılaştırılmış, ayrıca aynı modelden 'Yapı' ile gösterilen şeyl/karbonat zonu çıkarılarak, bu zonun olması ya da olmaması durumunda elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Şeyl/karbonat bölgesinin MT yönteminde elde edilen sonuçlara etkisi gözlenmiştir.

Şekil 15'teki sonuçlarda görüldüğü üzere, şeyl/karbonat bölgesinin varlığı 1 Hz ile 0,1 Hz frekansları arasında kalan veriyi değiştirmektedir. Deniz ortamında yapılan MT yöntemi, şeyl/karbonat zonunun etkisine duyarlıdır (Konuk ve Uluggerli, 2010).



Şekil 14. Santos Havzası, Brezilya (Eksenler metredir).



Şekil 15. Santos Havzası için TE ve TM modu sonuçları.

3.2. Genel Ters Çözüm Kuramı

Manyetotellürük verilerin yorumlanmasında 2B ters çözüm yaygın olarak kullanılır. MT yöntemde ters çözüm problemi, birçok jeofizik yöntemde olduğu gibi kötü durumudur (ill posed) ve doğrusal değildir. Bu nedenle MT verilerinin ters çözümünde genellikle yinelemeli ve doğrusallaştırılmış yöntemler kullanılır (Rodi ve Mackie, 2001). Bu yöntemlerin temelinde araziden alınan verinin, hesaplanan kuramsal modelin jeofizik tepkisiyle karşılaştırılması yatar. Ters çözüm işlemine bir ön kestirim modeli ile başlanır ve matematiksel bağıntılar yardımıyla bu modelin jeofizik tepkisi hesaplanır. Bu işlem düz çözüm ya da modelleme olarak adlandırılır. Ölçülen veri ile hesaplanan veri arasındaki benzerlik/çakışmazlık istenilen düzeye gelene kadar her yinelemede başlangıç modeli değiştirilip yeni model parametreleri hesaplanır.

Yinelemeli – doğrusallaştırılmış yöntemlerde ön kestirim modelinin seçimi, bundan sonraki yinelemelerde, yeni kuramsal modeller bu başlangıç modelinin çevresinde aranacağı için önemli ve zor bir işlemdir. Kötü bir başlangıç modelinin seçimi yerel minimumlara yakalanma riskini artırır ve bu durumda ölçülen veri ile kuramla veri arasındaki uyum, istenilen düzeyde olmayacaktır. Bu zorluğun üstesinden gelebilmek için, başlangıç parametresine ve verinin model parametrelerine göre kısmi türevlerine bağımlı

olmayan global yöntemler kullanılabilir. Ancak bu yöntem, çok fazla yineleme adımı gerektirdiğinden, bilgisayar teknolojisi açısından pahalı bir yöntemdir ve bu olumsuzluğu, global yöntemlerin uygulanabilirliğini kısıtlar.

Ters çözüm işleminde karşılaşılan problemlerden birisi de, çözümün tek olmamasıdır (non - unique). Yani, aynı veriyi sağlayan sonsuz sayıda model vardır. Ters çözüm sonucu elde edilen modellerin gerçek yer yapısını temsil edip etmediği, deneyim ve çalışma alanı ile ilgili elde edilen diğer bilgilerden faydalanılarak belirlenebilir.

Kötü durumlu problemlerin sayısal çözümünü ilk olarak Rus matematikçi Tikhonov (1977) ele almıştır. Tikhonov, kötü durumlu bir problemin, iyi durumlu birkaç problemin birleşiminden oluştuğunu öne sürmüştü ve bu problemlerin çözümü için düzgünleştirme kuramını önermiştir (Tikhonov, 1977).

3.2.1. Genelleştirilmiş Algoritma

Ters çözüm algoritmalarında, düzgünleştirme kuramına göre kullanılan parametrik fonksiyon aşağıdaki gibi verilebilir;

$$P(m,d)=\varphi(m,d)+\alpha S(m) \quad (3.30)$$

Burada ilk terim ölçülen veri ile kuramsal veri arasındaki çakışmazlık ölçütünü tanımlayan ‘MISFIT’ fonksiyoneli, α düzgünleştirici parametresi ve S ise durağanlaştırıcı (Stabilizer) olarak tanımlanır. Misfit fonksiyoneli;

$$\varphi(m,d)=\|W_d d - W_d f(m)\|^2 \quad (3.31)$$

şeklinde verilebilir. Burada d, ölçülen veri (MT için görünür öz direnç ve faz), f(m), düz çözüm sonucunda elde edilen kuramsal veri, m model parametreleri, f(m) düz çözüm operatörü ve W_d ise veri ağırlık dizeyidir.

Denklem (3.30)’daki durağanlaştırıcı fonksiyoneli ise aşağıdaki şekilde verilebilir;

$$S_w(m)=W_m^2 S(m) \quad (3.32)$$

Burada W_m parametre ağırlık dizeyidir. Veri ve parametre dizeyleri hakkında daha fazla bilgi için Zhdanov (2002)’ye bakılabilir.

Ağırlık dizeylerinin de parametrik fonksiyonelde kullanımıyla

$$P(m,d)=\phi_w(m,d)+\alpha S_w(m)=\|W_d(f(m)-d)\|^2 +\alpha\|W_m(m-m_{apr})\|^2 \quad (3.33)$$

Burada m_{apr} aynı bölgede diğer yöntemlerden elde edilen bir ön kestirim modelidir . Bu fonksiyonelin, bilinmeyen parametrelere göre kısmi türevlerinin alınıp sıfıra eşitlenmesi ile parametre değişim yöneyini içeren yöneyin çözümü aşağıdaki şekilde verilir;

$$\Delta m=(A^T W_d^2 A+\alpha W_m^2)^{-1}(A^T W_d^2 \Delta d+\alpha W_m^2 m_{apr}) \quad (3.34)$$

Bu denklem, en-küçük kareler probleminin ağırlıklı doğrusallaştırılmış çözümüdür ve karışık tanımlı problemler için geçerlidir (Menke, 1984; Candansayar, 2002).

3.2.1.1. Durağanlaştırıcıların Tanımlanması

Durağanlaştırıcı fonksiyoneli için birçok tanım bulunur. Denklem (3.32)'deki $S(m)$ yerine farklı fonksiyonlar kullanılarak, ters çözüm işleminde, modellerin istenilen özellikler dahilinde aranması sağlanabilir. Örneğin, durağanlaştırıcı olarak Occam dizeyi kullanılırsa daha yumuşak modeller elde edilir ya da en küçük destek kullanıldığında ise daha keskin sınırlar barındıran bir model elde edilebilir.

Durağanlaştırıcı fonksiyoneli tanımlarından birisi, model parametrelerinin normudur.

$$S_{L_2} = \|m\|^2 = (m,m) \quad (3.35)$$

Model parametrelerinin türevlerinin normu kullanılarak, en büyük yumuşaklık durağanlaştırıcısı tanımlanabilir;

$$S_{\max_sm}(m)=\|\nabla m\|^2 =(\nabla m,\nabla m) \quad (3.36)$$

Model parametrelerinin Laplacian'larının en küçük normu olan OCCAM durağanlaştırıcısı aşağıdaki şekilde verilebilir.

$$S_{\text{OCCAM}}(m) = \|\nabla^2 m\|^2 = (\nabla^2 m, \nabla^2 m) \quad (3.37)$$

Bu durağanlaştırıcının kullanılması ile daha yumuşak geçişli modeller elde edilmesi sağlanır. Keskin öz direnç sınırlarının bulunmak istendiği durumda bu durağanlaştırıcı iyi sonuç vermemektedir.

Daha keskin sınırlar elde edilmek istenen durumlarda en küçük destek (MS) durağanlaştırıcısı kullanılabilir (Last ve Kubik, 1983).

$$S_{\text{MS}}(m) = \int_v \frac{m^2}{m + \beta^2} dv \quad (3.38)$$

Burada β küçük bir sayıdır.

Ters çözüm sonucunda daha keskin sonuçlar elde edebilmek için MS fonksiyonelinin yeniden düzenlenmiş versiyonu olan en küçük türev desteği (MGS) durağanlaştırıcısı kullanılabilir.

$$S_{\text{MGS}} = \int_v \frac{\nabla m \cdot \nabla m}{\nabla m \cdot \nabla m + \varepsilon^2} dv \quad (3.39)$$

Bu durağanlaştırıcı kullanılarak yapılan ters çözüm işleminde, daha keskin sınırlara sahip modeller elde edilir. Bu yüzden MGS durağanlaştırıcısının kullanıldığı ters çözüm işlemine odaklanmış ters çözüm denir (Portniaguine ve Zhdanov, 1999).

Bu çalışmada, L_2 normu, OCCAM, MS ve MGS durağanlaştırıcıları için ters çözüm sonuçları incelenmiştir.

3.2.1.2. MISFIT ve Karekök (RMS) Hata

Ters çözüm algoritmasında kullanılan koşullardan biri de ölçülen veri ile kuramsal veri arasındaki çakışmazlık ölçütüdür. Bu iki şekilde tanımlanır. MISFIT ve Karekök Hata (RMS) tanımları aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\text{MISFIT} = \frac{\left(\sum_{i=1}^N (d^{\circ} - d^k)^2 \right)^{1/2}}{\sum_{i=1}^N (d^{\circ})^2}, \quad \text{RMS} = \left(\sum_{i=1}^N (d^{\circ} - d^k)^2 \right)^{1/2} / N \quad (3.40)$$

Burada d° ölçülen veri, d^k kuramsal veri ve N ise veri sayısını göstermektedir.

3.2. Birleşik Ters Çözüm

Jeofizikte çok boyutlu ters çözüm problemleri genellikle az-tanımlıdır. Yani model ağında hesaplanması gereken model parametrelerinin sayısı, arazide ölçülen veri sayısından daha fazladır. Bu durum ters çözüm işlemindeki en büyük problemlerden biri olan tek olmama sorununu ortaya çıkarır. Kuramsal olarak veri sayısının fazla olması, jeofizik modellerdeki bu belirsizliği azaltmaktadır. Ancak ölçülen fiziksel alanların doğrusal olmayan davranışları, veri sayısının fazla olmasının getireceği faydaları sınırlar. Bu sebeple, çok fazla veri toplamak yerine, tek olmama sorunu, aynı bölgede edinilen bir ön bilginin (piori information) probleme dahil edilmesi ya da farklı jeofizik yöntemlerden elde edilen verilerin birlikte yorumlanması ve ters çözüm sırasında aranan modelin belli sınırlar dahilinde değişmesi sağlanarak azaltılabilir. Aynı bölgede farklı iki jeofizik yöntem verileri kullanılarak yapılan bu ters çözüm işlemine birleşik ters çözüm denir.

Farklı fiziksel parametrelere duyarlı birden fazla jeofizik yöntem verilerinin birlikte kullanıldığı birleşik ters çözüm işlemiyle ilgili bir çok çalışma yapılmıştır (Vozzof ve Jupp, 1975; Haber ve Oldenburg, 1997; Gallardo-Delgado ve ark., 2003; Gallardo ve Meju, 2004; Candansayar ve Tezkan, 2006). Bu çalışmalardaki birleşik ters çözüm algoritmalarında, iki farklı fiziksel parametreye duyarlı olan veri grupları arasında bazı ortak özellikler olduğu varsayılır ve ters çözüm işleminde elde edilecek modeller, bu ortak özellikleri sağlayacak şekilde sınırlanır. Bu özellikler, petrofiziksel ve yapısal benzerlikler olarak iki gruba ayrılabilir.

Petrofiziksel ortak özelliklerin kullanıldığı birleşik ters çözüm algoritmalarında, kullanılan iki farklı jeofizik yöntem verilerinin arasında teorik ya da deneysel bir ilişki olması gerekir. Bu ilişkiye örnek olarak özdirenç ve sismik dalga hızlarının, boşluğun bir fonksiyonu olması, P ve S dalgalarının ilk varışları arasındaki birleşik ters çözüm işleminin V_p/V_s oranına bağlı olması ya da sismik dalga hızları ile yoğunluk arasındaki akustik empedans bağıntısı verilebilir. Ters çözüm sonucu iki yöntem için elde edilecek modeller, belirlenen bu özellikler bakımından birbirlerine benzer olacaktır. Ancak iki fiziksel

parametre arasındaki benzerliğin doğru bir şekilde belirlenmesi gerekir. Bu aşamadaki ufak bir hata, ters çözüm işlemi sonucunda çok yanıltıcı modeller elde edilmesine sebep olabilir.

Birleşik ters çözüm algoritmalarında elde edilecek iki modelin benzerliğini denetleyen diğer yöntem ise, iki modelin yapısal (geometrik) olarak benzerliğini denetleyen yöntemlerdir. Bu yöntemlerde iki model arasındaki uyum, fiziksel parametrelerin yeraltındaki dağılımlarına bakılarak yorumlanır. Bu yöntemin zorluğu da, bu yapısal benzerliklerin matematiksel olarak belirlenmesinde ve Denklem (3.30)' da verilen parametrik fonksiyonelde ifade edilmesinde ortaya çıkar.

Ters çözüm modellerinin benzer olmasını sağlamak için kullanılan yöntemlerden en basit olanı, sınırları tam olarak belirlenmiş birkaç yapı bloğundan oluşan modeller kullanmaktır. Ancak bu işlem çok doğru bir ön bilginin varlığını gerektirir. Birçok durumda bu ön bilgi bulunmamaktadır. Diğer bir yöntem de ters çözümde konumları sabit ve kendi içerisinde homojen yapılar kullanıp, bu yapıların fiziksel parametrelerini değiştirmektir. Ancak bu yöntem de sadece yeraltını doğru bir şekilde ifade eden ve çok sayıda blok kullanıldığında ve doğru geometrik konumlar belirlendiğinde düzgün bir şekilde çalışır (Gallardo, 2004).

Yapısal benzerlikler kullanılan algoritmalarda, uygun koşullar ve başlangıç modelleri belirlendiğinde (doğru bir ön-bilginin varlığında) iyi sonuçlar vermiştir. Ancak bu modellerin güvenilirliği konusunda bazı sorunlar vardır; bütün jeofizik modellerdeki sınır ve fiziksel parametrelerin değişimlerinin gerçekten konumsal olarak birbirleriyle uyum içinde olup olmadığı ve yapılar arasındaki sınırların ve farklılıkların bütün jeofiziksel yöntemlerle belirlenebilecek kadar büyük olup olmadığının bilinmemesi.

Bu soruların çözümü için, bu çalışmada, ters çözüm işleminde elde edilen iki modelin yapısal olarak benzer olmasını sağlayan ve bu sınırlamayı yaparken parametrelerin genliklerini kullanmayıp, geometrik dağılımlarını denetleyen ve kullanılan yöntemlerden bir tanesi, herhangi bir iletkenlik sınırına duyarlı olsa bile, doğru sonuç veren çapraz – türev tekniği kullanılmıştır.

Bu çalışmada ayrıca, MT yöntemde TE ve TM modları karmaşık yer modelleri için, aynı fiziksel parametreye duyarlı olmalarına rağmen (öziletkenlik, öz direnç), aynı bölgede alınan ölçülerde farklı sonuçlar verdiklerinden, iki farklı yöntem olarak düşünülmüştür. Ölçülen verilerdeki bu farklılık aynı bölge için TE ve TM modları ters çözüm işlemi sonucunda iki farklı modelin elde edilmesine sebep olabilir. Aynı yapı üzerindeki bu iki yöntem verilerinin yapısal olarak benzer modeller üretmesini sağlayabilmek için çapraz

türev tekniği kullanılarak ters çözüm işlemine sokulmuşlardır. Elde edilen ters çözüm modelleri ve iki model arasındaki yapısal benzerliği gösteren çapraz türev fonksiyonu incelenerek, hangi yapıların her iki veriyi de sağladığı belirlenip, yer yapısı hakkında daha doğru yorumlar yapılabilir.

3.2.1 Jeofizik Verilerin Çapraz-Türev Yöntemi İle Birleşik Ters Çözümü

Çapraz türev algoritmasının kullanıldığı birleşik ters çözüm işleminde, elde edilen modellerdeki geometrik benzerlikler, fiziksel parametrelerin yeraltındaki dağılımlarına bakılarak yapılabilir. Bu aşamada parametrelerin sayısal değerleri önemli değildir (Haber ve Oldenburg, 1997; Gallardo ve Meju, 2004). Bu benzerliklerin ifade edilebilmesi amacıyla kullanılan ve iki yöntemin model parametrelerinin türevlerini barındıran skaler çapraz-türev fonksiyonu aşağıdaki şekilde tanımlanabilir;

$$\vec{t}(x,z)=\nabla m_{TE}(x,z) \times \nabla m_{TM}(x,z) \quad (3.41)$$

Burada m_{TE} ve m_{TM} , TE ve TM modelleri için özdirençlerin logaritmasıdır. Çapraz türev fonksiyonu modellerin benzer olmasını denetler. Kuramsal olarak çapraz-türev fonksiyonunun sıfır olduğu durumda iki model arasındaki benzerlik sağlanmış olur. Bu sebeple algoritmanın çalışması için $t(m) = 0$ koşulunun sağlanması gerekir.

Çapraz türev fonksiyonunda, parametrelerin türevlerini hesaplayabilmek için, Şekil 16'da görüldüğü gibi model ağında üç hücreli türev şeması kullanılmıştır (Gallardo ve Meju, 2003). Şekildeki koyu renkle gösterilen hücreler, ağ içinde herhangi bir hücre için türev değerlerinin hesaplanmasında kullanılır. İki boyutlu durumda çapraz türev fonksiyonunu x ve z bileşenleri ortadan kalkar. Bu sebeple çapraz türev fonksiyonunun y bileşeni;

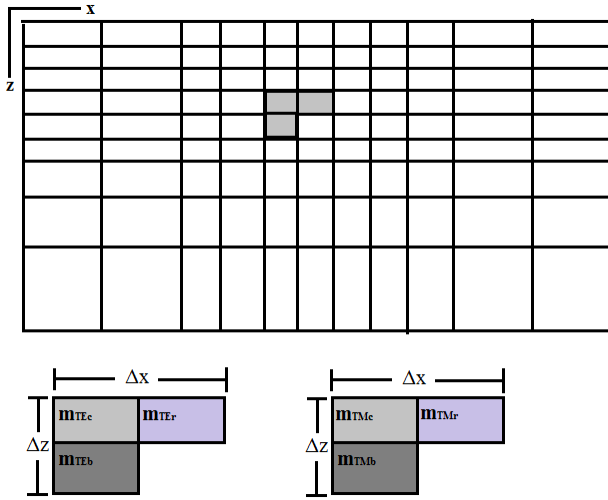
$$t(x,z)=\left(\frac{\partial m_{TE}(x,z)}{\partial z}\right)\left(\frac{\partial m_{TM}(x,z)}{\partial x}\right)-\left(\frac{\partial m_{TE}(x,z)}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial m_{TM}(x,z)}{\partial z}\right) \quad (3.42)$$

Denklem (3.42)'deki türev değerleri, Şekil 16'da görüldüğü gibi ileri farklar kullanılarak hesaplanmıştır (Gallardo ve Meju, 2003).

$$t \cong \frac{4}{\Delta x \Delta z} (m_{TEc}(m_{TMb}-m_{TMr})+m_{TEr}(m_{TMc}-m_{TMb})+m_{TEb}(m_{TMr}-m_{TMc})) \quad (3.43)$$

Burada c, r ve b , sırasıyla Şekil 16’ da aşağı taraftaki temsili üç hücreli gösterimde merkez, sağ ve alt konumlarını belirtir.

Çapraz türev algoritması, $t(x,z)=0$ olduğu durumda doğru sonuç vermektedir. Bu koşulun sağlanabilmesi için iki yöntemden elde edilen modellerdeki yapısal değişiklikler, genliklerine bakılmaksızın aynı ya da ters yönde olmalıdır. Jeolojik olarak açıklamak gerekirse: modelde bir sınır varsa, bu sınırdaki fiziksel parametre değişimleri, değişimin sayısal değerine bakılmaksızın her iki yöntemde de benzer yönde değişmelidir. Yöntemin bir diğer avantajı da, modellerden birisinin parametrelerinin türevleri, modelin bazı yerlerinde kaybolursa dahi, çapraz türev için istenen koşul sağlanacaktır. Yani bir sınırdaki parametre değişimine sadece bir yöntem duyarlı olsa bile, program çalışmaya devam edecektir. Bu özellik, yöntemin kapsama alanı farklı olan yöntemlerde de kullanılabilirliğini sağlar.



Şekil 16. Temsili 2B model ağı. Model parametrelerinin türevlerini hesaplamak için model ağının her yerinde üç hücreli türev şeması kullanılmıştır (Gallardo ve Meju, 2003).

Çapraz türev algoritmasında, elde edilen benzer modellerden beklenen diğer bir özellik ise arazide ölçülen veriyi istenilen oranda sağlamalarıdır. Bu koşulu denetlemek amacıyla Denklem (3.40)’ta verilen karekök hata terimi kullanılmıştır. Denklem (3.40) kullanılarak TE ve TM kuramsal verilerinin, ölçülen veri ile çakışmazlık ölçütü aşağıdaki şekilde verilir.

$$\varphi(m_{TE}, m_{TM}) = n_{d_{TE}} (rms_{TE})^2 + n_{d_{TM}} (rms_{TM})^2 \quad (3.44)$$

Burada $n_{d_{TE}}$ ve $n_{d_{TM}}$ TE ve TM modları için veri sayısıdır.

Klasik düzgünleştiricili ters çözüm algoritmaları, ölçülen ve hesaplanan verinin farklarının en küçük kareler yöntemi ile minimize edilmesi işlemini ve durağanlaştırıcı fonksiyoneli barındırır. Bu sebeple çapraz – türev algoritmasında kullanılan parametrik fonksiyonel aşağıdaki şekilde belirlenmiştir.

$$\begin{aligned} \varphi(m_{TE}, m_{TM}) = & [d_{TE} - f_{TE}(m_{TE})]^T C_{TE}^{-1} [d_{TE} - f_{TE}(m_{TE})] \\ & + [d_{TM} - f_{TM}(m_{TM})]^T C_{TM}^{-1} [d_{TM} - f_{TM}(m_{TM})] \\ & + \alpha_{TE}^2 m_{TE}^T D^T D m_{TE} + \alpha_{TM}^2 m_{TM}^T D^T D m_{TM} \\ & + \begin{bmatrix} m_{TE} - m_{R_{TE}} \\ m_{TM} - m_{R_{TM}} \end{bmatrix}^T C_{RR} \begin{bmatrix} m_{TE} - m_{R_{TE}} \\ m_{TM} - m_{R_{TM}} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.45)$$

Burada, d_{TE} ve d_{TM} , TE ve TM modu için ölçülen veri, m_{TE} ve m_{TM} , TE ve TM modu için model parametrelerinin logaritması, f_{TE} ve f_{TM} , düz çözüm operatörleri, D , yumuşatma dizeyi (OCCAM), α_{TE} ve α_{TM} modelin yumuşaklığını denetleyen parametreler, C_{TE} ve C_{TM} , TE ve TM modu verilerinin kovaryans matrisi, m_R ler se, kovaryans matrisi C_{RR} olan ön bilgidir.

Denklem (3.43)' teki fonksiyonel doğrusal değildir. Bu sebeple doğrusallaştırılıp, yinelemeli bir şekilde çözülmelidir. Çapraz türev fonksiyoneli, Taylor serisine açılıp yüksek dereceden türevleri ihmal edilerek aşağıdaki şekilde doğrusallaştırılabilir.

$$t(m_{TE}, m_{TM}) \cong t(m_{0TE}, m_{0TM}) + B \begin{pmatrix} m_{TE} - m_{0TE} \\ m_{TM} - m_{0TM} \end{pmatrix} \quad (3.46)$$

Denklem (3.46)'ya bakılırsa bir referans modele ihtiyaç vardır. Bu parametreler yerine model parametrelerinin bir önceki iterasyondaki değerleri kullanılabilir. Burada B , t' nin model parametrelerine göre kısmi türevlerini içeren dizeydir. Bu dizey çapraz türev fonksiyonunun, Şekil 16' da görülen her parametreye göre kısmi türevi alınarak izleyen

şekilde hesaplanır.

$$\begin{aligned} \frac{\partial t}{\partial m_{TEc}} &\cong \frac{4}{\Delta x \Delta z} (m_{TMb} - m_{TMr}), & \frac{\partial t}{\partial m_{TMc}} &\cong \frac{4}{\Delta x \Delta z} (m_{TEr} - m_{TEb}) \\ \frac{\partial t}{\partial m_{TEr}} &\cong \frac{4}{\Delta x \Delta z} (m_{TMc} - m_{TMb}), & \frac{\partial t}{\partial m_{TMr}} &\cong \frac{4}{\Delta x \Delta z} (m_{TEb} - m_{TEc}) \\ \frac{\partial t}{\partial m_{TEb}} &\cong \frac{4}{\Delta x \Delta z} (m_{TMr} - m_{TMc}), & \frac{\partial t}{\partial m_{TMb}} &\cong \frac{4}{\Delta x \Delta z} (m_{TEc} - m_{TEr}) \end{aligned} \quad (3.47)$$

Denklem (3.46) ve (3.47) kullanılarak, parametrik fonksiyonelin doğrusallaştırılmış hali aşağıdaki şekilde verilir.

$$\begin{aligned} \varphi(m_{TE}, m_{TM}) &= \frac{1}{\beta^2} [d_{TE} - f_{TE}(m_{0TE}) - J_{TE}(m_{TE} - m_{0TE})]^T C_{TE}^{-1} \\ &\quad [d_{TE} - f_{TE}(m_{0TE}) - J_{TE}(m_{TE} - m_{0TE})] \\ &\quad + \frac{1}{\beta^2} [d_{TM} - f_{TM}(m_{0TM}) - J_{TM}(m_{TM} - m_{0TM})]^T C_{TM}^{-1} \\ &\quad [d_{TM} - f_{TM}(m_{0TM}) - J_{TM}(m_{TM} - m_{0TM})] \\ &\quad + \alpha_{TE}^2 m_{TE}^T D^T D m_{TE} + \alpha_{TM}^2 m_{TM}^T D^T D m_{TM} \\ &\quad + \begin{bmatrix} m_{TE} - m_{R_{TE}} \\ m_{TM} - m_{R_{TM}} \end{bmatrix}^T C_{RR}^{-1} \begin{bmatrix} m_{TE} - m_{R_{TE}} \\ m_{TM} - m_{R_{TM}} \end{bmatrix} = \min. \end{aligned} \quad (3.48)$$

$$\Lambda = (BN_1^{-1} B^T)(BN_1^{-1} n_2 - Bm_0 + t_0) \quad t(m_{0TE}, m_{0TM}) + B \begin{pmatrix} m_{TE} - m_{0TE} \\ m_{TM} - m_{0TM} \end{pmatrix} = 0$$

Denklem (3.48)' deki parametreler matris formunda izleyen şekilde yazılabilir.

$$m = \begin{bmatrix} m_{TE} \\ m_{TM} \end{bmatrix}, \quad m = \begin{bmatrix} m_{0TE} \\ m_{0TM} \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

Gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$\Lambda=(BN_1^{-1}B^T)(BN_1^{-1}n_2-Bm_0+t_0) \quad (3.50)$$

$$m=N_1^{-1}n_2-N_1^{-1}B^T\Lambda \quad (3.51)$$

Burada,

$$N_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{\beta^2} J_{TE}^T C_{TE}^{-1} J_{TE} + \alpha_{TE}^2 D^T D + C_{RR_{TE}}^{-1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\beta^2} J_{TM}^T C_{TM}^{-1} J_{TM} + \alpha_{TM}^2 D^T D + C_{RR_{TM}}^{-1} \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

$$n_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{\beta^2} J_{TE}^T C_{TE}^{-1} \{d_{TE} - f_{TE}(m_{0TE}) + J_{TE} m_{0TE}\} + C_{RR_{TE}}^{-1} m_{R_{TE}} \\ \frac{1}{\beta^2} J_{TM}^T C_{TM}^{-1} \{d_{TM} - f_{TM}(m_{0TM}) + J_{TM} m_{0TM}\} + C_{RR_{TM}}^{-1} m_{R_{TM}} \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

Denklem (3.51)' deki ilk terim düzgünleştirilmiş en küçük kareler çözümü ve ikinci terim ise çapraz türev fonksiyonunun, parametrik fonksiyonele olan katkısıdır.

Yinelemeli algoritmada, bir ön kestirim modeli için başlanır (m_0) ve her iterasyonda model parametreleri güncellenir. Algoritma iki aşamadan oluşmaktadır. Ana iterasyonlarda ölçülen veri ile kuramsal verinin çakışmazlık ölçütü denetlenirken, ara iterasyonlarda ise modellerin benzer olması için sıfır ya da sıfıra yakın bir değer alması gereken çapraz türev fonksiyonunun bu koşulu sağlayıp sağlamadığı denetlenir. Bu koşul ard arda gelen iki iterasyonda bulunan modellerin birbirlerine ne kadar yakın olduklarının denetlendiği ve aşağıda gösterilen bağıntıyla sağlanır.

$$conv = 100 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \frac{(m_i - m_{0i})^2}{m_{0i}^2 + \varepsilon}}{n}} \quad (3.54)$$

Burada, ε sıfıra bölmeyi engelleyen küçük bir sayıdır.

3.3. Manyetotellürik Verilerinin 2B Ters Çözümü

Manyetotellürik yöntemde 2B ters çözüm problemi doğrusal değildir ve kötü durumludur. Kötü durumlu problemler fiziksel ve matematiksel olarak anlamlıdır ve çözülebilirler. Kötü durumlu problemlerin çözümü ile ilgili ilk defa Tikhonov (1977) çalışmıştır. Tikhonov'un kötü durumlu problemlerin çözümü için önerdiği yöntem baz alınarak düzgünleştiricili ters çözüm yöntemleri geliştirilmiştir.

3.3.1. Ters Çözüm Algoritması

Manyetotellürik yöntemde 2B ters çözüm probleminin çözümü amacıyla geliştirilen algoritma Denklem (3.30)'da verilen parametrik fonksiyonelin en küçüklenmesine dayanır. Denklem (3.30)'daki parametrik fonksiyonel genel olarak;

$$P(m,d)=\varphi(m,d)+\alpha S(m) \quad (3.55)$$

olarak verilir. Aşağıdaki gibi tanımlanmış bir durağanlaştırıcı kullanıldığında aşağıdaki şekli alır.

$$P(m,d)=\|W_d d - W_d f(m)\|^2 + \alpha \|W_m m - W_m m_{apr}\|^2 \quad (3.56)$$

Burada ilk terim ölçülen veri ile her iterasyonda bulunan ters çözüm modelinden elde edilen kuramsal verinin çakışmazlık ölçütüdür (MISFIT). Bu çakışmazlığı hesaplamak için Denklem (3.40)'da verilen bağıntılar kullanılmıştır. Ölçülen veri ile kuramsal veri arasında istenilen ölçüde çakışma sağlandığında, ters çözüm işleminden yeraltını temsil eden bir model elde edildiği kabul edilir. Bu çakışma ölçütünün karekök hata değeri için 1' in altına inmemesi sağlanır. Çünkü gerçek veri her zaman gürültü barındırır ve çakışmazlık çok küçük olduğunda kuramsal veri gürültü ile çakıştırılmaya çalışılacaktır.

Parametrik fonksiyoneldeki α değeri ise düzgünleştirici parametresidir. Bu parametre MISFIT fonksiyoneli ile durağanlaştırıcı arasındaki bağlantıyı kurar. Kötü durumlu problemlerin çözümünde bu parametrenin seçimi çok önemlidir. Bu parametrenin çok küçük olması durumunda, parametrik fonksiyoneli ile misfit fonksiyoneli Denklem (3.30) da görüldüğü gib birbirlerine eşit olur. Düzgünleştirici parametresinin çok büyük seçilmesi durumunda ise, ön kestirim modeline çok yakın modeller elde edilecektir. Bu çalışmada düzgünleştirici parametresi aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$\alpha = \frac{\|J\Delta p - (d - f(m))\|^2}{\|W_m(m - m_0)\|^2} \quad (3.57)$$

Burada J, kısmi türevleri içeren duyarlılık dizeyi (Jacobian), d, ölçülen veri, Δp , parametre güncelleme vektörünü göstermektedir.

3.3.2. Genel Fonksiyonelin Eşlenik Türev İle Çözümü

Doğrusal olmayan yöntemlerin ters çözümünde kısmi türevler içeren dizeyin hesaplanmasına ihtiyaç vardır. Bu dizeyin boyutu 2B çalışmalarda dahi büyüktür. Kısmi türevler dizeyinin boyutu (istasyon sayısı x frekans sayısı) x (parametre sayısı) kadar olacaktır. Bu kısım algoritmanın en çok zaman harcayan kısmıdır. Kısmi türevler dizeyinin hesaplanması, karşılıklık (reciprocity) ilkesine dayanan yöntemlerin kullanımıyla bile zaman gerektiren bir işlemdir. MT yöntemde ters çözüm işleminin yapılabilmesi için bu dizeyin tersinin alınması gerekir. Ters çözüm algoritmasının daha hızlı çalışmasını sağlamak için kullanılacak yöntemlerden bir tanesi olarak eşlenik türev yöntemi kullanılabilir. Bu amaçla ters çözüm algoritmasındaki her yinelemede, parametre güncelleme vektörünü elde edebilmek için, ilgili eşitlikler eşlenik türev yöntemi kullanılarak çözülür. Böylece, her iterasyonda, büyük boyutlu olan ve hesaplaması zaman alan kısmi türevler dizeyinin tersi alınma işleminden kaçınılmış olur.

Doğrusal olmayan problemlerin çözümü için eşlenik türev yöntemi kullanılan ters algoritmalarında iki aşamalı minimize etme işlemi bulunur. Dış (ana) döngü, doğrusal olmayan eşitliklerin çözümü için gerekli olan döngüdür ve ölçülen veri ile kuramsal veri arasındaki çakışmazlığı denetler. İç döngü ise eşlenik türev için gerekli olan döngüdür ve her yineleme için parametre güncelleme yöneyini elde etmek amacıyla kullanılır.

Eşlenik türev yöntemi MT 2B ters çözüm probleminde birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır (Mackie ve Madden, 1993; deLugo ve ark., 1999; Rodi ve Mackie, 2000; Zhdanov ve Hursan, 2000). Bu çalışmada kullanılan eşlenik türev algoritması Şekil 17'de görülmektedir (Mackie, 1991).

Şekilde R_{dd} ve R_{mm} , veri ve parametre ağırlık dizeyleridir. Eşlenik türev için yapılan iterasyonlarda, parametre güncelleme vektörünün bütün değerleri sıfır olarak belirlenir ve yinelemelere başlanır. Her ana yineleme için belirlenen sayıda yineleme yapıldıktan sonra parametreler güncellenir ve güncellenen modelin kuramsal tepkisinin, ölçülen veriye

istenilen ölçüde benzeyip benzemediği kontrol edilir. İstenilen çakışma sağlandıysa, ters çözüm işlemi sonlandırılır ve model kabul edilebilir olarak varsayılır. İstenilen çakışma sağlanmazsa, yeni ana iterasyona geçilir. Parametre güncelleme vektörü tekrar sıfırlanır ve bütün bu işlemler tekrar yapılır.

Döngü k=1, maksimum iterasyon	<u>DOĞRUSAL OLMAYAN TERS ÇÖZÜM</u>
$g(m_k)$	model tepkisi (kuramsal veri)
$d-g(m_k)$	gözlenen – hesaplanan veri
$m_0 - m_k$	model parametrelerinin farkı
$b = J^T R_{dd}^{-1} (d - g(m_k) + R_{mm}^{-1} (m_0 - m_k))$	
$\Delta\sigma_0 = 0; r_0 = b;$	eşlenik türev algoritmasının başlangıcı
Döngü i=1, max CG iterasyonu	<u>EŞLENİK TÜREV (CG)</u>
$\beta_i = r_{i-1}^T r_{i-1} / r_{i-2}^T r_{i-2}$	$\beta_0 = 0;$
$p_i = r_{i-1} + \beta_i p_{i-1}$	$(p_1 = r_0)$ arama yönünü güncelle
$Bp_i = [J^T R_{dd}^{-1} J + R_{mm}^{-1}] p_i$	
$\alpha_i = r_{i-1}^T r_{i-1} / p_i^T Bp_i$	arama yönü boyunca adım uzunluğu
$\Delta\sigma_i = \Delta\sigma_{i-1} + \alpha_i p_i$	parametre güncelleme vektörü
$r_i = r_{i-1} - \alpha_i Bp_i$	
Eşlenik türev (CG) iterasyonlarının sonu	
$\sigma_{k+1} = \sigma_k + \Delta\sigma$	model parametrelerini güncelle
Ana iterasyonun sonu (doğrusal olmayan ters çözüm)	

Şekil 17. Eşlenik türev algoritması (Mackie, 1991).

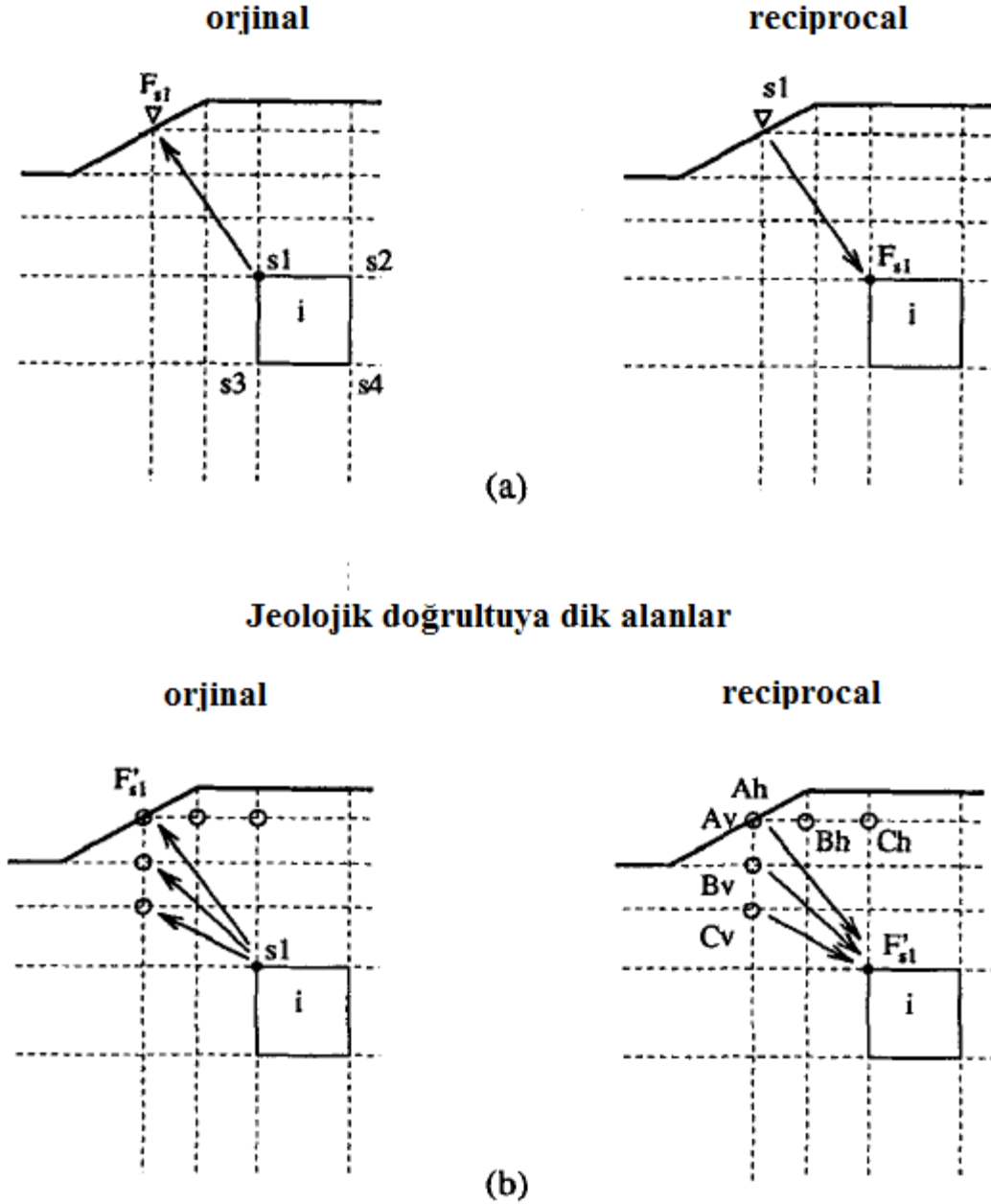
3.3.3. Duyarlılık (Jacobian) Dizeyinin Hesaplanması

Doğrusal olmayan problemlerin çözümü için kısmi türevleri içeren duyarlılık dizeyinin (Jacobian) hesaplanması gerekir. Bu dizeyin hesaplanması aşaması, ters çözüm algoritmalarının en çok zaman gerektiren kısmıdır. Jacobian dizeyinin hesaplanması için genel olarak duyarlılık denklemi ve birleştirilmiş denklem olmak üzere iki farklı yöntem önerilmiştir.

Duyarlılık denklemi yaklaşımı, MT verilerin ters çözümü için ilk olarak Rodi (1976), Jupp ve Vozoff (1977) ve Oristaglio ve Worthington (1980) tarafından önerilmiştir. Duyarlılık denklemi yaklaşımı kullanılarak Jacobian dizeyini hesaplamak için model parametrelerinin sayısı kadar düz çözüm yapmak gerekir. MT ters çözümde parametre sayısı, veri sayısından fazla olduğu için ve çoğu durumda çok fazla sayıda model parametresiyle çalışmak zorunda kalındığı için bu yöntem çok kullanışlı değildir.

İkinci yaklaşımda birleştirilmiş denklem çözülür. Bu yaklaşımda elektromanyetik yöntemdeki karşılık (reciprocity) ilkesinden yararlanılır. Kısmi türevlerin hesaplanması, karşılık ilkesinin uygulanması ile hızlandırılabilir (Rodi, 1976; Mackie ve Madden, 1993; McGillivray ve ark., 1994; deLugao ve Wannamaker, 1996). Karşılık ilkesine göre, çok sayıda parametre için kısmi türevler içeren dizeyi hesaplamak için çözülmesi gereken denklemler, sadece yeryüzündeki alıcı noktalarında kaynak tanımları yaparak ifade edilebilir. Karşılık ilkesinin model üzerindeki gösterimi Şekil 18’de görülmektedir (deLugao ve Wannamaker, 1996).

Bu çalışmada, düz çözüm işleminde genel dizey denkleminin çözümünden elektrik ve manyetik alan değerleri hesaplanır. Bu alanların türevlerini hesaplamak için, istasyonlarının bulunduğu noktalara birim kaynak konularak her istasyon noktası için çözülür. Bu çözümden her düğüm noktası için değerler elde edilir. Elektrik ve manyetik alanın her hücrenin parametresine göre (iletkenlik) türevini hesaplamak için hücrenin dört köşesindeki değerler toplanır ve istasyon noktasında, genel dizey denkleminde elde edilen elektrik ve manyetik alanlarla çarpılır. Jeolojik doğrultuya dik olan alanların hesaplanması amacıyla, düz çözüm sırasında, paralel alanların türev değerlerini kullanmak için hesaplanan parabol katsayıları kullanılmıştır. Yine, her istasyon noktasına bu parabol katsayıları koyularak bir çözüm yapılır. Bu çözümden elde edilen değerler, her parametrenin dört köşesinde toplanır ve jeolojik doğrultuya dik olan alanların her model parametresine göre türevi elde edilmiş olur.



Şekil 18. Karşıtlık ilkesinin gösterimi. a) Jeolojik doğrultuya paralel alanları hesaplanması için orijinal ve karşıt (reciprocal) durum. b) Jeolojik doğrultuya dik alanların hesaplanması için orijinal ve reciprocal durum. A, B ve C türevlerin hesaplanması için kullanılan parabol katsayılarıdır (deLugao ve Wannamaker, 1996).

MT yönteminde model parametreleri, her hücrenin iletkenlik veya öz direnç değerleridir ($\sigma(f)$ veya $\rho(f)$). MT yönteminde arazide ölçülen veriler ise görünür öz direnç

($\rho(f)$) ve empedans fazıdır ($\Phi(f)$). Bu sebeple duyarlılık düzeyi, görünür öz direnç ve empedans fazının, model hücrelerinin iletkenlik veya öz direnç değerlerine göre kısmi türevlerini içerir.

Denklem (3.8) ve (3.9) kullanılırsa ve denklem (3.10)'da gösterilen görünür öz direnç ve faz bağıntılarının iletkenliğe göre türevleri alınır;

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

ve (3.58)

$$\frac{\partial f_{ij}}{\partial \sigma} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\text{Im}(Z_{ij})}{\text{Re}(Z_{ij})} \right)^2} \left(\frac{\partial \text{Im}(Z_{ij})}{\partial \sigma} \text{Re}(Z_{ij}) - \text{Im}(Z_{ij}) \frac{\partial \text{Re}(Z_{ij})}{\partial \sigma} \right) \frac{1}{(\text{Re}(Z_{ij}))^2}$$

Burada ij , TE ve TM moduna göre yx ve xy dir ve * karmaşık bir sayının kompleks eşleniğidir. Denklem (3.58)'de verilen empedansın türevi aşağıdaki şekilde hesaplanır.

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

ve (3.59)

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

Yukarıdaki türev değerlerini elde edebilmek için jeolojik doğrultuya paralel ve dik olan elektrik ve manyetik alanların türev değerlerinin hesaplanması gerekir.

Kısmi türevler düzeyi, her bir model parametresindeki ufak değişimlerin, elde edilecek veriyi ne kadar değiştirdiğini gösterir. Şekil 18'de görüldüğü gibi, hücrenin dört

köşesindeki düğüm noktalarına kaynak (s1,s2,s3 ve s4) terimi yerleştiriliğinde ve her nokta için ayrı ayrı çözüldüğünde, yüzeydeki istasyon noktasında elde edilecek elektrik ve manyetik alan değer için duyarlılık terimleri F'_j ($j=1,..,4$) olur. İstasyon noktalarında elektrik ve manyetik alanların türev değerlerini elde edebilmek için hücrenin dört köşesine yerleştirilen kaynak terimlerinden hesaplanan bu duyarlılık terimleri toplanır. Şekil 18'de görüldüğü gibi, karşıtlık ilkesine göre, s1,s2,s3 ve s4 noktalarına kaynak terimleri konulduğunda istasyon noktalarında elde edilen değerler ile istasyon konumlarına birim kaynak koyularak yapılan çözümde s1,s2,s3 ve s4 noktalarında elde edilecek büyüklükler aynıdır. Bu durumu açıklamak için sadece s1 noktasını düşünürsek, istasyon noktasına birim kaynak konulduğunda s1 noktasında elde edilecek değer;

$$G_1 = F'_{s_1} / s_1 \quad (3.60)$$

olur. Şekil 18'deki hücre parametresinin etrafındaki noktalara kaynak terimi konulduğunda, istasyon noktasında elde edilecek jeolojik doğrultuya paralel elektrik ve manyetik alanların, bu hücrenin iletkenlik değerine göre türev değeri aşağıdaki şekilde verilir.

$$F' = \sum_{j=1} G_j s_j \quad (3.61)$$

Jeolojik doğrultuya paralel alanların kısmi türevleri hesaplandıktan sonra, jeolojik doğrultuya dik olan alanların da kısmi türevlerinin hesaplanması gerekir. TE modu için bu değerler;

$$\frac{\partial H_x}{\partial \sigma} = -\frac{1}{i\omega\mu} \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial E_y}{\partial \sigma} \quad (3.62)$$

ve

$$\frac{\partial H_z}{\partial \sigma} = \frac{1}{i\omega\mu} \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial E_y}{\partial \sigma} \quad (3.63)$$

bağıntılarıyla hesaplanır. Benzer şekilde TM modu için;

$$\frac{\partial E_x}{\partial \rho} = \frac{1}{\rho} E_x - \rho \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial H_y}{\partial \rho} \quad (3.64)$$

ve

$$\frac{\partial E_z}{\partial \rho} = \frac{1}{\rho} E_z + \rho \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial H_y}{\partial \rho} \quad (3.65)$$

eşitlikleri kullanılır.

MT yöntemde TE modu için tanımlanan parametre iletkenlik (σ), TM modu için ise öz dirençtir (ρ). Bu sebeple TE modunda iletkenliğe, TM modunda ise öz dirence göre kısmi türevler hesaplanır. Bu iki modun birlikte kullanılacağı ters çözüm problemleri için, kısmi türevler, tek bir fiziksel parametreye göre hesaplanmalıdır. Sayısal durağanlığı sağlamak amacıyla MT yöntemde ters çözüm probleminde logaritmik uzayda çözüm aranır. Bu amaçla aşağıdaki bağıntı kullanılır.

$$P = \log \rho = -\log \sigma \quad (3.66)$$

TE ve TM modu için hesaplanan kısmi türev değerlerini aynı parametre cinsinden yazabilmek için ise aşağıdaki bağıntı kullanılabilir.

$$\frac{\partial}{\partial P} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} = -\frac{1}{\sigma} \frac{\partial}{\partial \sigma} \quad (3.67)$$

3.3.4. Deniz Ortamı MT Verilerinin 2B Ters Çözümü

Manyetotellürik yöntemde deniz ortamı verileri daha önceki bölümlerde de incelendiği gibi karasal ortamda alınan verilerden farklılık gösterir. Deniz suyunun iletken yapısı, deniz tabanı topoğrafyası ve kıyı etkisi, ölçülen elektrik ve manyetik alan değerlerini etkiler ve karasal ortamda ölçülen değerlere göre farklı karakterde olmalarını

sağlar. Bu farklılık, TE ve TM modlarının tipik özelliklerini değiştirir. Karasal ortamda TE modu topoğrafyadaki değişimlere tepki vermezken, denizel ortamda durum farklıdır. Karasal ortamda yapısal bilgiyi elektrik alan barındırırken, denizel ortamda ise bu durum tam tersidir.

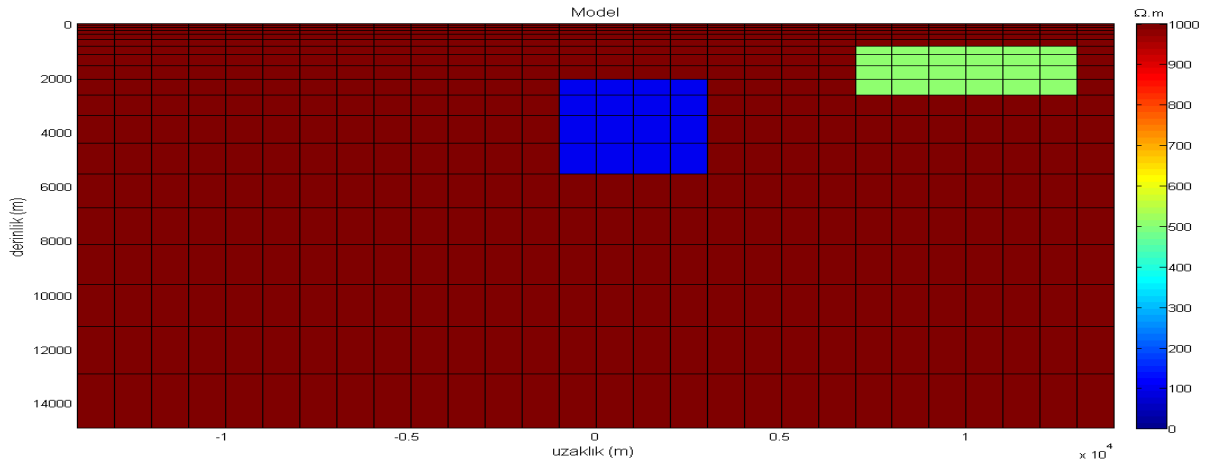
Denizel ve karasal ortam için elektrik ve manyetik alandaki farklılıklar, deniz ortamı için yapılan ters çözüm işleminde batimetrimin dahil edilmesini zorunlu kılar. Bu sebeple, okyanusta alınan ölçülerde, batimetri çalışmaları da yapılmalı ve deniz tabanı topoğrafyası doğru bir şekilde belirlenmelidir. Deniz tabanı topoğrafyasının dahil edilmediği durumlarda, denizel ortamda toplanan veri tamamen temsil edilemeyecek ve ters çözüm sonucunda istenen yer modelleri elde edilemeyecektir. Bu çalışmada, deniz tabakası ters çözüm işlemine sabit parametre olarak dahil etmiştir. Yani, deniz tabakası için bir iletkenlik değeri belirlenmiş ve ters çözüm işlemi sırasında bu değer sabit kalması sağlanmıştır. Böylece deniz tabanı doğru bir şekilde tanımlanmış olup, düz çözüm aşamalarında üretilen kuramsal veride etkilerinin görülmesi sağlanmıştır.

BÖLÜM 4

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Yapay Veri Uygulaması – 1

Ters çözüm algoritmasını denetlemek amacıyla, ilk olarak Şekil 19’da görülen ve 1000 ohm.m öz dirençli homojen ortam içerisinde gömülü 100 ohm.m ve 500 ohm.m’lik iki yapı bulunan model kullanılmıştır. Bu model için TE ve TM modu model tepkisi hesaplanmış ve hesaplanan bu veriler, ters çözüm işleminde arazi verisi olarak kullanılmıştır. Modelde yatay hücre kalınlıkları 1 km olarak sabit alınmıştır ve hücrelerin boyutları derinlikle birlikte artmaktadır. Yapay sonsuz sınırlar elde edebilmek amacıyla, ters çözüm modeli, sağ, sol ve aşağıya doğru artan bloka boyutları ile uzatılmış ve TE modu için hava tabakası eklenmiştir. Modelin tepkisini hesaplamak amacıyla 19 farklı frekans (1024 Hz- 0.001 Hz) ve 27 farklı istasyonda hesaplama yapılmıştır.

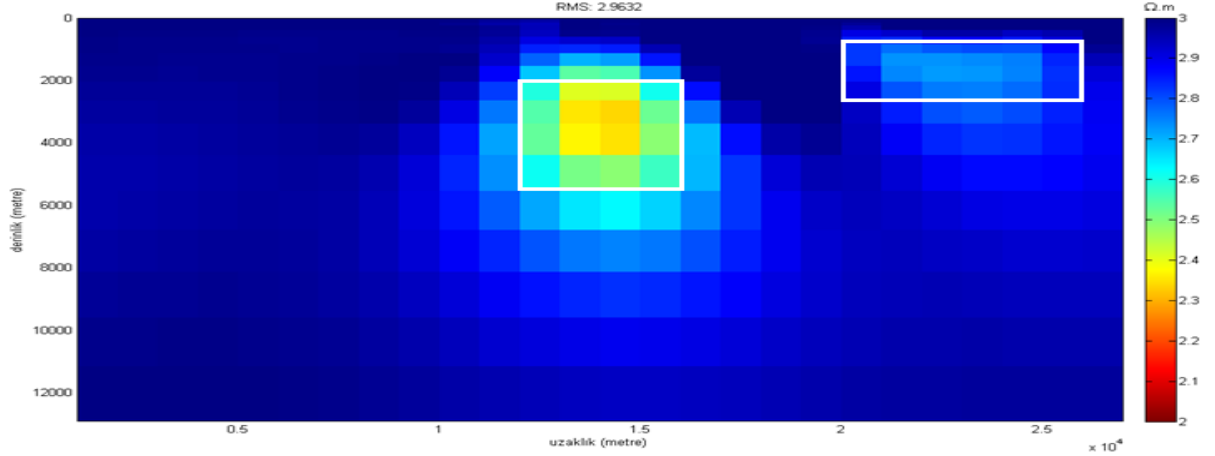


Şekil 19. Yapay veri uygulaması için kullanılan yer modeli.

Ters çözüm algoritmalarının doğru çalışmasını etkileyen en önemli faktörlerden birisi olan durağanlaştırıcı fonksiyonunun incelenmesi amacıyla, OCCAM, En küçük destek (MS), En küçük türev desteği (MGS) ve L_2 normu olmak üzere toplam 4 farklı durağanlaştırıcı fonksiyonu kullanılmış ve sonuçlar incelenmiştir.

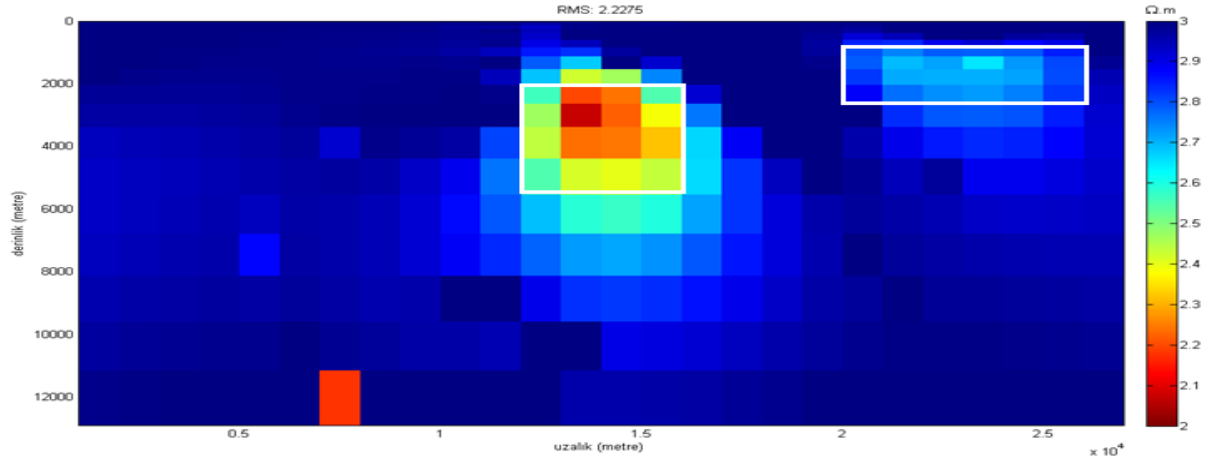
OCCAM durağanlaştırıcı yumuşak öz direnç sınırları olan modeller elde etmemizi sağlar. Şekil 20’de OCCAM durağanlaştırıcısı kullanılarak elde edilmiş ters çözüm modeli görülmektedir. Bu durağanlaştırıcının kullanıldığı ters çözüm algoritmaları diğer

durağanlaştırıcılara göre daha yavaş çalışacaktır. Bunun sebebi kısmi türevler içeren dizeyin altına eklenen OCCAM dizeyinin, bu dizeyin (Jacobian) boyutunu iki katına çıkarmasıdır. Ayrıca bu durağanlaştırıcının kullanıldığı durumda daha yüksek çakışmazlık değeri elde edilmiştir. Keskin özdirenç sınırlarının elde edilmek istendiği durumlarda OCCAM durağanlaştırıcısı iyi bir seçim olmayacaktır.



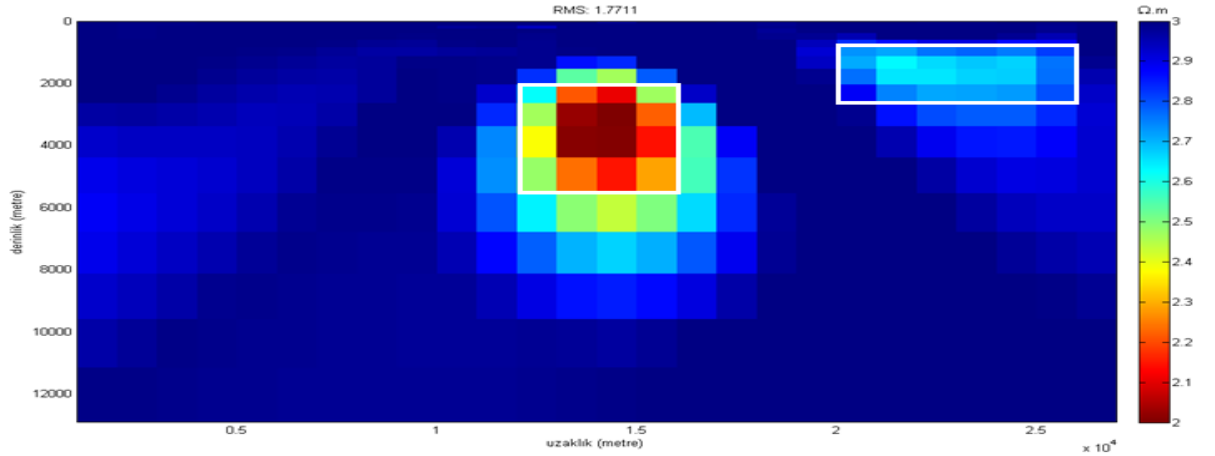
Şekil 20. OCCAM durağanlaştırıcısı kullanılan ters çözüm sonucu.

Şekil 21’de en küçük türev desteği durağanlaştırıcısı kullanıldığı takdirde elde edilen sonuçlar görülmektedir. Bu durağanlaştırıcı, daha keskin sınırlar elde etmek için kullanılır. Ancak durağanlaştırıcının sayısal türevlerden elde edilmesinden dolayı, çok farklı özdirenç değeri olan iki farklı bloğun bulunduğu bölgelerde, bu durağanlaştırıcı için çok büyük değerler elde edilecektir. Sonuçlar incelendiğinde MGS durağanlaştırıcısının kullanıldığı durumda elde edilen modelde, olmaması gereken hayali yapıların oluştuğu görülmektedir. Daha karmaşık ve büyük özdirenç değişimlerini barındıran modellerin çözümünde bu hayali yapıların sayısı artacaktır ve doğru bir ters çözüm modeli elde edilemeyecektir. Sonuçlar, MGS durağanlaştırıcısının MT verilerinin ters çözümünde kullanılması açısından uygun olmadığını göstermektedir.



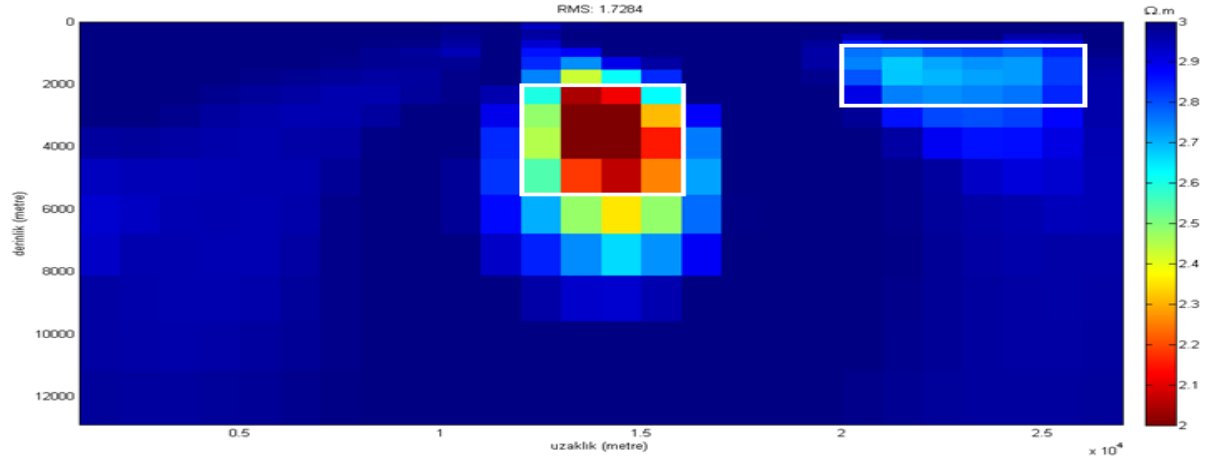
Şekil 21. MGS durağanlaştırıcısı kullanılarak elde edilen ters çözüm modeli.

MS durağanlaştırıcısı kullanılarak elde edilen ters çözüm modeli Şekil 22’de görülmektedir. Sonuçlara bakıldığında bu durağanlaştırıcının MT verilerinin ters çözümünde kullanılmak için uygun olduğu görülmektedir.



Şekil 22. MS durağanlaştırıcısı kullanılarak elde edilen ters çözüm modeli.

Şekil 23’teki L_2 normu için elde edilen sonuçlara bakılırsa, Bu durağanlaştırıcı kullanılarak elde edilen ters çözüm modelinin, MS durağanlaştırıcısı kullanılarak elde edilen model ile benzer olduğu görülmektedir. MT verilerinin ters çözümü için L_2 durağanlaştırıcısı kullanılabilir.

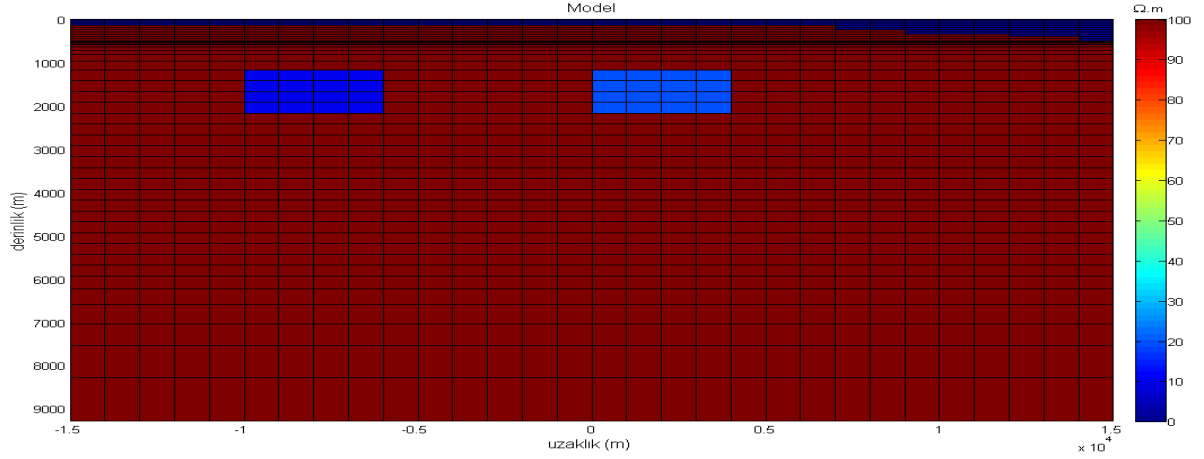


Şekil 23. L_2 normu kullanıldığında elde edilen ters çözüm modeli.

4.2. Yapay Veri Uygulaması - 2

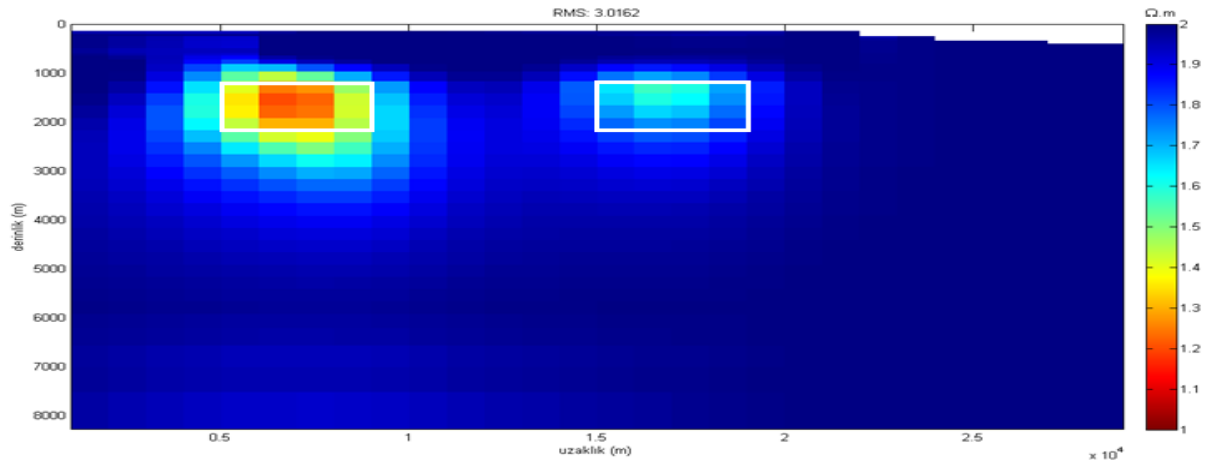
Deniz ortamı manyetotellürik verilerinin ters çözümü, karadaki durumdan farklıdır. Deniz tabanı topoğrafyasının ve kıyı etkisinin ölçülen büyüklükler üzerinden büyük etkisi vardır. Bu sebeple deniz ortamı verileri ters çözüm işlemine sokulurken, iletken deniz tabakası da mutlaka dahil edilmelidir.

Geliştirilen algoritmanın denizel ortamda da çalıştığını göstermek amacıyla Şekil 24’teki model kullanılmıştır. Modelde deniz tabakasının derinliği 200 m ile 1000 m arasında değişmektedir ve öz direnci 0.33 ohm.m olarak alınmıştır. Bu değer ters çözüm işlemi boyunca sabit tutulacaktır ve kuramsal verinin deniz tabakasının etkisini de barındırmasını sağlayacaktır. Deniz tabakasının altında 100 ohm.m.’lik homojen yapının içerisinde 10 ohm.m ve 20 ohm.m.’lik iki adet gömülü yapı bulunmaktadır. Model tepkisini hesaplayabilmek amacıyla 10–0001 Hz. arasında değişen toplam 15 frekansta ve 20 istasyonda hesaplama yapılmıştır.



Şekil 24. Yapay veri uygulaması için kullanılan model. Deniz tabakasının kalınlığı (mavi) 200m ile 1000m arasında değişmektedir ve öz direnci 0.33 ohm.m'dir.

Şekil 25'te elde edilen ters çözüm modeli görülebilir. Şekile bakıldığında her iki yapının da belirgin bir şekilde modelde yer aldığı görülebilir. RMS değeri, teorik veri ile yapılan bir çalışma için büyük gibi görünse de, ters çözüm işlemi 10 iterasyon ile sınırlandırıldığı için bu değerdedir. Daha fazla iterasyon yaptırılarak ölçülen veri ile kuramsal veri arasında daha iyi bir çakışma sağlanabilir.



Şekil 25. Denizel ortam için elde edilen ters çözüm modeli.

MT alanların denizel ortamdaki davranışları daha önceki bölümlerde incelenmiştir. Şekil 24'teki model için MT tepkisi hesaplanırken, deniz tabakasının yüksek frekansları soğurmasından dolayı çok düşük frekanslar kullanılmıştır. Kullanılacak frekans aralığının seçiminde deniz tabakasının altındaki birimin iletkenlik değeri en önemli etkenlerden birisidir. Genelde bu birimler deniz suyunun iletkenliğine yakın değerlere sahip (yaklaşık 1 ohm.m) birimlerdir. Bu sebeple, böyle birimlerin varlığında daha alçak frekanslar kullanılmalıdır. Bu çalışmada kullanılan 10 Hz. frekansı, deniz ortamındaki bir çalışma için çok fazla olabilir ancak deniz tabakasının altındaki birimin yüksek öz dirençli olması, bu frekansı da kullanılabilir kılar.

4.3. Çapraz Türev

MT yöntemde TE ve TM modu verileri farklı karakterdedir. Manyetik alanın karasal ortamdaki çalışmalarda yeraltının iletkenlik dağılımı ile ilgili bilgi içermemesi, TE ve TM modlarında elektrik ve manyetik alanın farklı yönlerde olması bu farklılığın temel sebeplerindendir.

TE ve TM modları tepkileri arasındaki bu farklılık, bu iki mod verisini farklı iki jeofizik yöntem verisi gibi kullanma olanağı verir. Yeraltının karmaşık olduğu durumlarda, her iki mod verisi de kullanılmalıdır. Bu çalışmada, her iki mod verisini farklı yöntem verisi olarak farzedip, birleşik ters çözüm işlemine sokan ve iki yöntemden elde edilecek ters çözüm modellerinin geometrik olarak birbirlerine benzer olmasını sağlayan çapraz türev algoritması geliştirilmiştir.

Veri aynı doğrultuda alındığı zaman, her iki mod için elde edilecek ters çözüm modelleri de aynı olmalıdır. Fakat TE ve TM modları tepkilerindeki teorik farklılıklar, bu iki moddan elde edilen ters çözüm modellerinin çok farklı olmasına sebep olur. Herhangi bir mod, bir öz direnç sınırına tepki verirken, diğeri o sınıra duyarlı olmayabilir. Bu fark her iki mod için elektrik ve manyetik alanların yönlerinin farklı olmasından kaynaklanır.

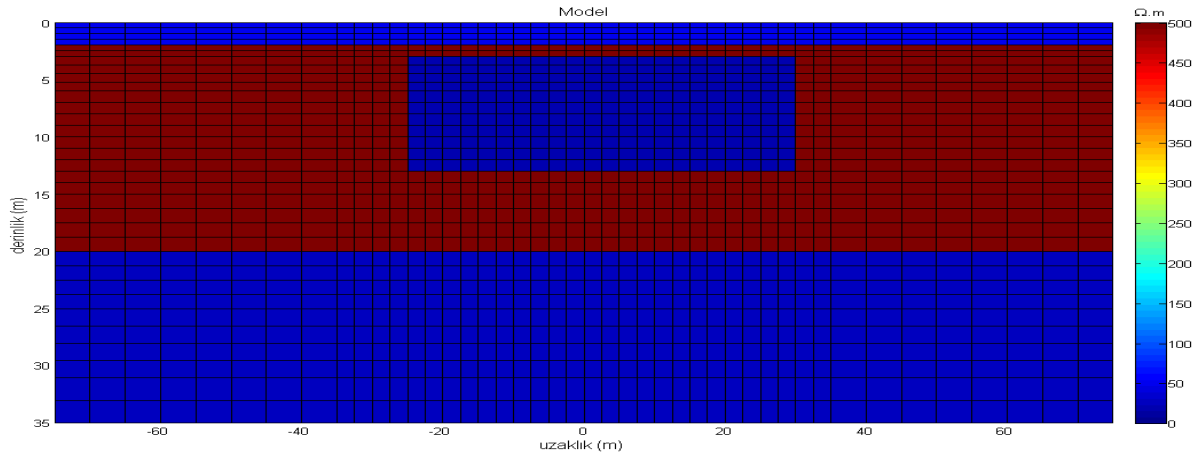
Ters çözümden elde edilecek modelin güvenilirliğini artırmak için ve ters çözüm işleminin en büyük problemlerinden olan tek olmama sorununu azaltmak için, bu iki veri tipinden (TE ve TM) elde edilen ters çözüm modellerinin bir kriter ile birbirlerine benzer olmaları sağlanmalıdır. Bu benzerlik iki şekilde olur; Petrofiziksel özellikler bakımından ve yapısal olarak. Petrofiziksel özelliklerin benzer olması kriterinin kullanılabilmesi için güvenilir bir ön-bilgiye ihtiyaç vardır. Bu benzerli kriteri oluşturulurken yapılacak en ufak hata, ters çözüm işlemi sonucuna çok büyük oranda etki eder. Bu sebeple bu çalışmada,

yapısal benzerlikleri denetleyen çapraz türev yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem kullanılarak elde edilen ters çözüm modelleri, ayrı ayrı ters çözüm işleminden elde edilen modellere göre daha gerçekçi ve birbirlerine daha benzer olacaktır.

4.3.1. Birleşik Ters Çözüm Uygulaması

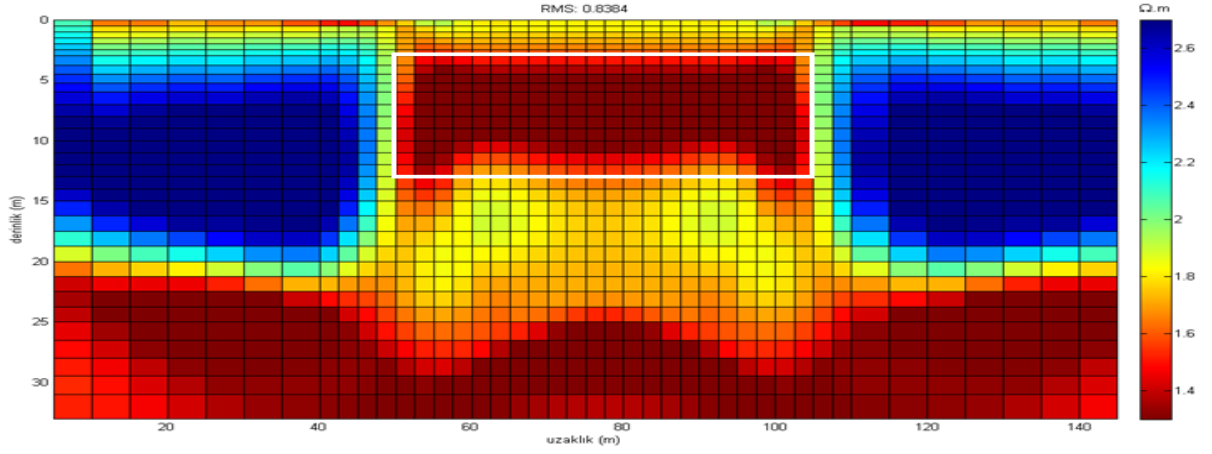
Bu uygulamada TE ve TM modu verileri, iki ayrı yöntem verisi gibi düşünülerek birleşik ters çözüm işlemine sokulmuşlardır. TE ve TM modu için arazi verisini hesaplayabilmek için Şekil 26’da görülen model kullanılmıştır. Modelde radyomanyetotellürik frekansları kullanılmıştır. Önce 50 ohm.m özdirençli bir tabakanın altında, 500 ohm.m özdirençli kalın bir tabaka bulunmaktadır. Bu birimin içinde 20 ohm.m özdirençli gömülü bir yapı bulunmaktadır. En altta ise 25 ohm.m lik tabaka bulunmaktadır.

Model tepkisini hesaplayabilmek için 4 farklı frekansta ve 39 istasyon noktasında hesaplama yapılmıştır. Ters çözüm işlemi önce TE ve TM modu için ayrı ayrı yapılmış ve elde edilen modeller için çapraz – türev fonksiyonu hesaplanmıştır. Çapraz türev fonksiyonunun davranışı ve özellikleri ile ilgili konulara önceki bölümlerde değinilmiştir.



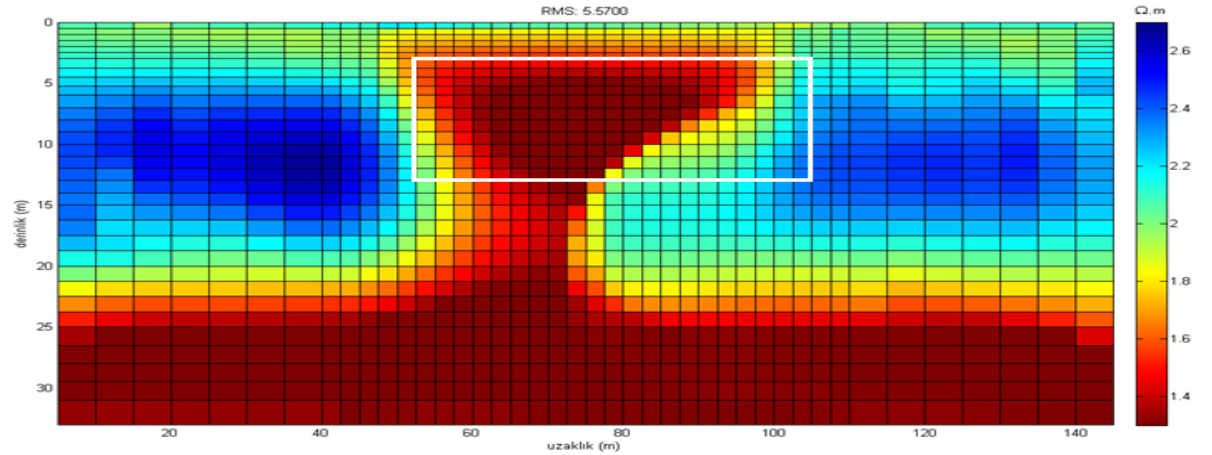
Şekil 26. Çapraz – Türev uygulaması için kullanılan yer modeli.

Şekil 27’de TE modu için ters çözüm sonucu görülmektedir. Modelin TE modu çözümü kabul edilebilir bir model sunmaktadır. Toplam 10 yinelemede RMS=0.8384 değerine ulaşmıştır. RMS değerinin genelde 1’den düşük olmaması istenir. Çünkü arazi verisi gerçekte her zaman bir miktar gürültü barındırır ve RMS değeri çok düşük olursa, aşırı çakışma yani gürültüye çakıştırma sorunu ortaya çıkar. Bu çalışma kuramsal bir çalışma olduğu için ve veriler gürültü içermediği için RMS değerinin 1 den küçük değerler almasına izin verilmiştir.



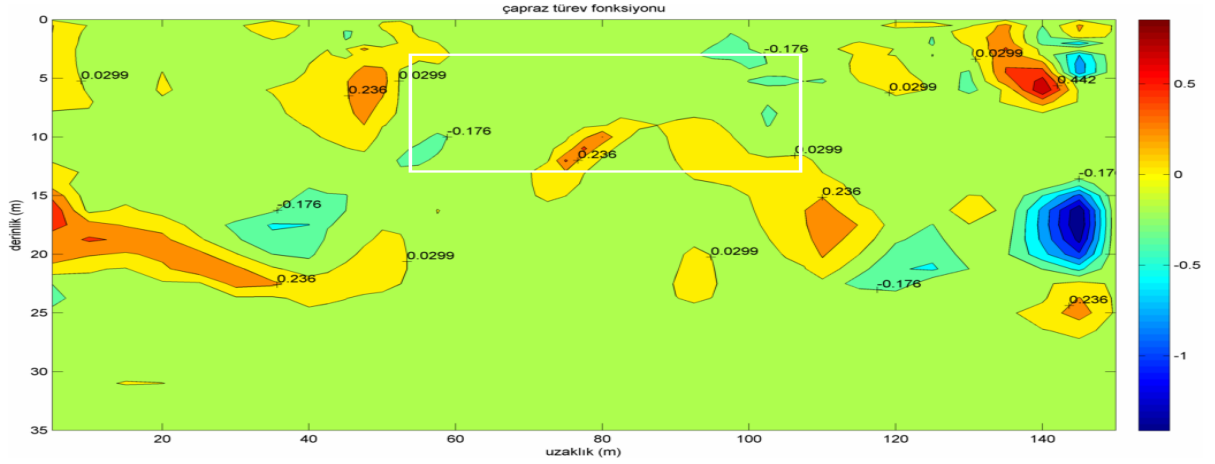
Şekil 27. Sadece TE modu için ters çözüm sonucu.

Şekil 28’de ise sadece TM modu için ters çözüm sonucu görülmektedir. Bu model için TM modunda RMS değeri 5.57 den aşağı düşürememiştir. 500 ohm.m özdirençli blokun içerisinde gömülü olan 20 ohm.m özdirençli yapının şekli, TE modundan elde edilen şekilden farklıdır. Modelin daha karmaşık olduğu durumlarda bu farkın da artabilir ve farklı yer modelleri elde edilebilir.



Şekil 28. Sadece TM modu için ters çözüm sonucu.

TE ve TM modundan elde edilen ters çözüm modelleri incelenirse, 500 ohm.m lik bloğun içerisindeki 20 ohm.m lik yapısının şeklinde bir farklılık görülmektedir TE ve TM modları ayrı ayrı ters çözüm işlemlerinden elde edilen modeller için çapraz-türev fonksiyonu Şekil 29’da verilmiştir.

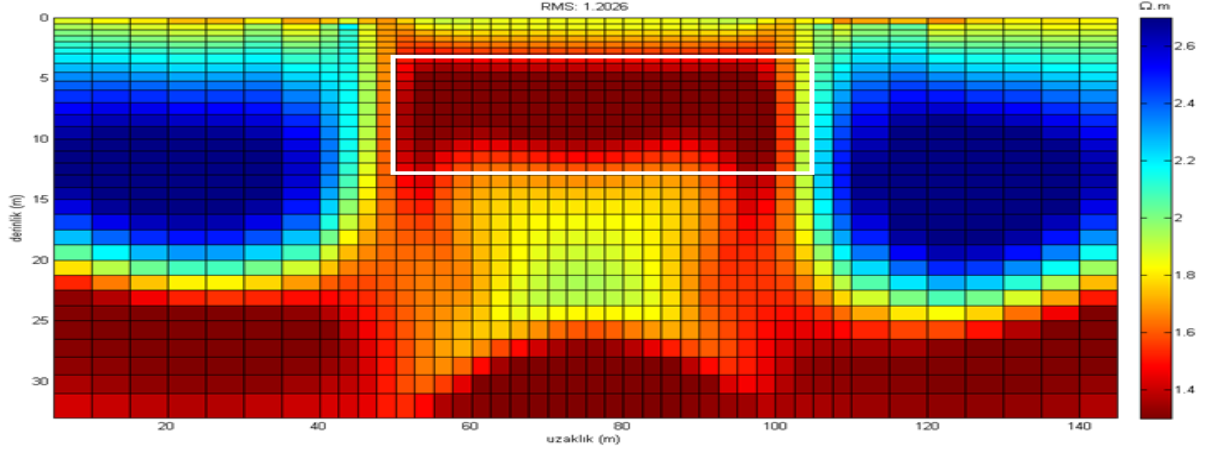


Şekil 29. TE ve TM modlarından elde edilen ters çözüm modelleri için çapraz türev fonksiyonu.

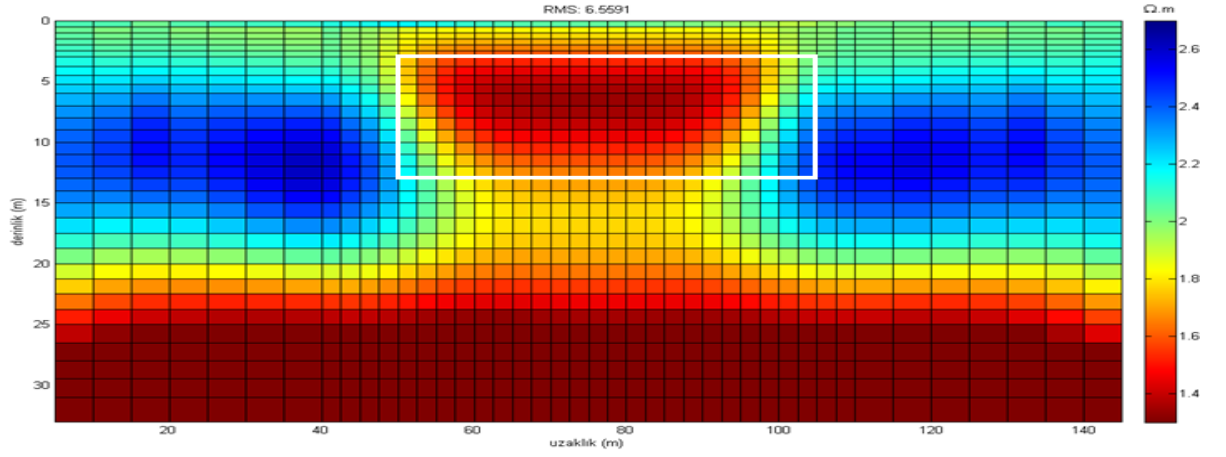
Çapraz türev fonksiyonunun değerlerinin sınıf ya da sıfıra çok yakın olması istenir. Şekil 29 incelenirse iki moddan ayrı ayrı elde edilen modeller için çapraz türev fonksiyonunun değerleri sıfırdan farklıdır ve bazı bölgelerde bu farklılığın genliği 1 değerini bile geçmiştir.

TE ve TM modunun farklı sonuç verdiği bölgelerde çapraz türev yöntemi kullanılabilir. Çapraz türev algoritmasında, iki moddan bir tanesi herhangi bir öz direnç sınırına duyarlı olsa bile program çalışmaya devam edecektir. Bu nedenle, çapraz türev algoritması ile tek başına TE veya TM modu çözümlerinde göremediğimiz yapıları belirleme şansı vardır. Şekil 30 ve Şekil 31’de TE ve TM modu için birleşik ters çözüm sonuçları verilmiştir.

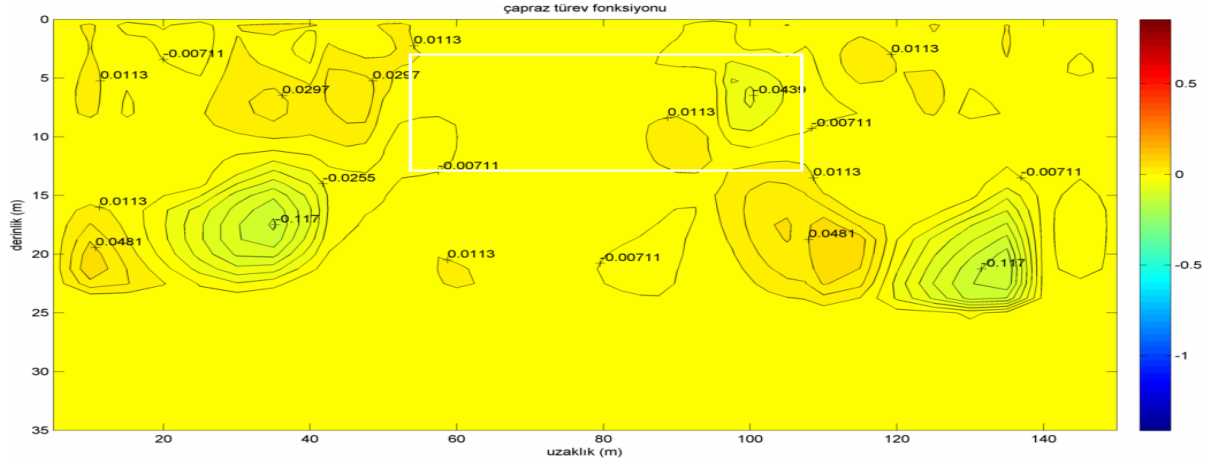
Sonuçlar incelendiğinde 20 ohm.m’lik yapının geometrisi, TE ve TM modlarından elde edilen modeldekilere göre daha benzerdir. TM modunda meydana gelen simetrisinin bozulması, çapraz türev yöntemi kullanıldığında kısmen giderilmiştir. Birleşik ters çözümden elde edilen modeller için çapraz türev fonksiyonu Şekil 32’de görülmektedir. Şekil incelendiğinde, bu fonksiyonun değerlerinin, sadece TE ve TM modlarından elde edilen modeller arasındaki çapraz türev fonksiyonunun değerlerinden daha küçük olduğu görülebilir. Bu durum çapraz türev yöntemi ile elde edilen iki ters çözüm modeli arasındaki yapısal benzerliğin daha fazla olduğunu göstermektedir.



Şekil 30. TE modu için birleşik ters çözüm sonucu.

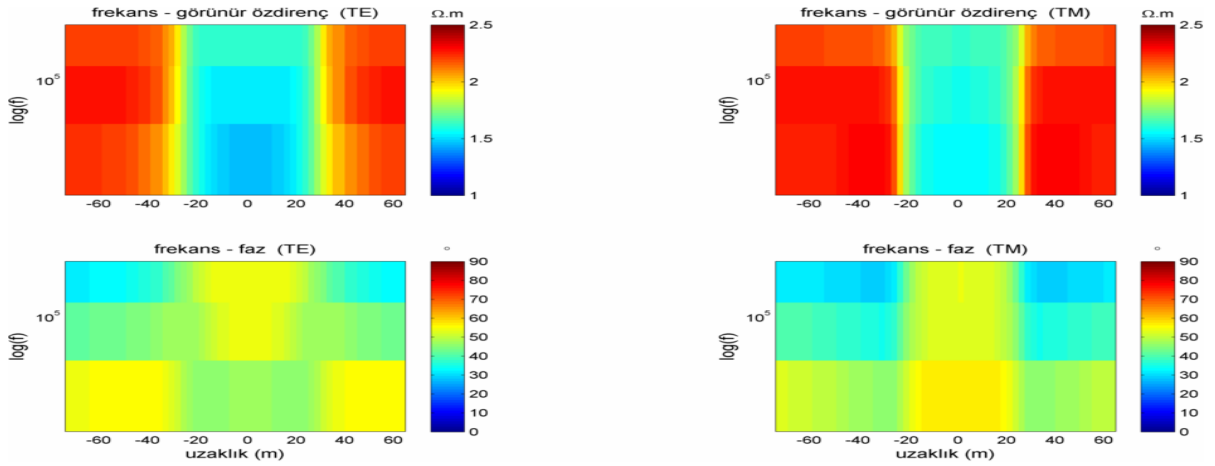


Şekil 31. TM modu için birleşik ters çözüm sonucu. Beyaz dikdörtgenin çevrelediği bölgede bulunan yapı, çapraz türev yöntemi kullanılarak geometrik olarak gerçeğe daha yakın bir şekilde elde edilmiştir.

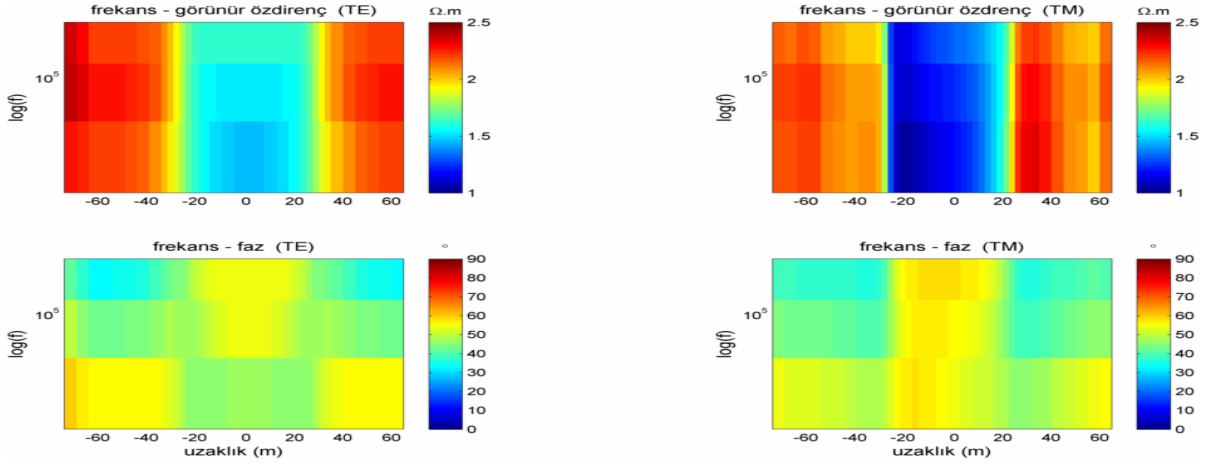


Şekil 32. Birleşik ters çözüm sonucu elde edilen modeller için çapraz türev fonksiyonu.

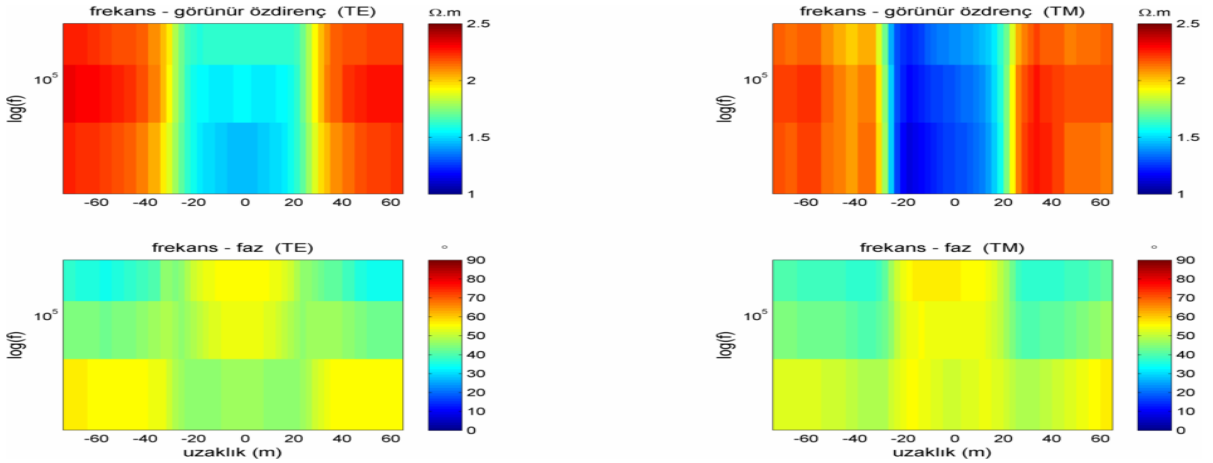
Şekil 33'te denetlenen yer modeli için hesaplanan kuramsal veri görülmektedir. Şekil 34 ve Şekil 35'te ise sırasıyla sadece TE ve TM modlarının ters çözüm modellerinin ve birleşik ters çözüm işleminden elde edilen TE ve TM modu modellerinin ürettiği ölçülen veriler görülmektedir.



Şekil 33. 2B yer modeli için elde edilen kuramsal veri.



Şekil 34. Sadece TE modu ve sadece TM modu için yapılan ters çözüm modellerinin kuramsal tepkisi.



Şekil 35. TE ve TM modu verilerinin birleşik ters çözümü sonucunda elde edilen modellerin kuramsal tepkisi.

Şekil 34 incelendiğinde, sadece TE modu için elde edilen ters çözüm modelinin jeofizik tepkisi, Şekil 35'te gösterilerin arazi verisiyle uyum içerisindedir. Ancak TM modu için özellikle ters çözüm modelinden elde edilen faz verisi ile gerçek modelden elde edilen faz verisi arasında büyük oranda bir fark vardır. Şekil 35'teki birleşik ters çözüm sonucu hesaplanan kuramsal TM modu faz verilerine bakıldığında ise arazi verisiyle daha iyi bir uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

Çapraz türev algoritması için denenen model basit bir modeldir. Daha karmaşık öz direnç dağılımları için TE ve TM modundan elde edilecek ters çözüm modelleri,

birbirlerinden daha farklı olacaktır. Bu gibi durumlarda, çapraz türev yöntemi ortak bir model sağlayıp, yerelektrik yapısının yorumlanması aşamasında güvenilir modeller sağlayabilir.

BÖLÜM 5 SONUÇ VE ÖNERİLER

Manyetotellürik verilerin iki boyutlu ters çözümü için bir algoritma geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritma hem kara hem de denizel ortam verileri için kullanılabilir. Sonuçlar, ters çözüm işlemine, topoğrafyanın etkisinin katılması gerektiğini ve özellikle denizel ortam verilerinin ters çözüm işleminde, deniz topoğrafyasının düz olmadığı durumlarda, iletken deniz tabakasının da modellenmesinin gerektiğini göstermiştir.

TE ve TM modu verileri aynı jeolojik birimler üzerindeki çalışmalarda farklılık gösterir. Ayrıca, kıtasal ve denizel ortam için elektrik ve manyetik alanlar farklı özellikler göstereceği için, bu iki modun tipik özellikleri de değişecektir. Karasal ortamda yer yapısı ile ilgili bilgiyi elektrik alan verirken, denizel ortamda bu bilgi manyetik alanda yoğunlaşmaktadır. Yine karasal ortamda, yeraltındaki iletkenlik değişimlerine duyarlı olan manyetik alan, denizel ortamda tam tersi özellik gösterir. Bu durum, karasal ortamda topoğrafik değişimlere duyarlı olmayan TE modunun bu karakteristik özelliğini değiştirir. Okyanusal ortamda, manyetik alan, deniz tabanı topoğrafyasına paralel olduğundan dolayı TE modu tepkisi, deniz tabanındaki yükseklik değişimlerine duyarlıdır. Bu sebeple, doğru bir yer modeli elde edebilmek için, deniz tabakasının MT yöntem verilerine bu etkisi de belirlenmelidir ve deniz suyu tabakası ters çözüm işlemine katılmalıdır.

Ters çözüm işleminin doğru sonuç vermesini etkileyen en önemli faktörlerden birisi de, durağanlaştırıcı fonksiyoneldir. OCCAM, L_2 norm, MS ve MGS durağanlaştırıcıları incelenmiş ve MT verilerin 2B ters çözümü için en uygun durağanlaştırıcıların L_2 ve MS olduğu sonucuna varılmıştır. Occam durağanlaştırıcısı kullanıldığında, yumuşak sınırlı yer modelleri elde edilir. Keskin öz direnç sınırlarının olduğu bölgelerde bu durağanlaştırıcının kullanılması, bu sınırlara olan hassasiyeti azaltacak ve istenmeyen sonuçlar doğuracaktır. MGS ise, ters çözüm modelinde beklenmedik yapıların ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Bu durağanlaştırıcı MT verilerin ters çözümü için uygun değildir. MT verilerin ters çözümü için en iyi sonuçları, birbirine yakın sonuçlar veren MS ve L_2 normu durağanlaştırıcıları vermiştir.

TE ve TM modunun farklı jeofizik tepkiler ürettiği bölgelerde, bu iki yöntem verilerinden elde edilen ters çözüm modelleri de farklı olur. İki modu kullanıp tek bir yer

modeli elde edilebilir ama ters çözümün doğası gereği, aynı veriyi sağlayacak sonsuz yer modeli vardır. Bu belirsizliği bir ölçüde gidermek amacı ile, yeraltını geometrik olarak daha iyi şekilde tanımlayan yer modellerinin elde edilmesini sağlayan ve yer yapısının incelenmesi aşamasında, yeraltı iletkenlik sınırlarının geometrik konumları hakkında önemli bilgi veren çapraz-türev tekniği uygulanmıştır. Çapraz türev yöntemi herhangi iki farklı jeofizik yöntem verisi için kullanılabilir. Bu çalışmada, TE ve TM modu verileri çapraz-türev algoritması kullanılarak birleşik ters çözüm işlemine sokulmuş, ve tek modla yapılan ters çözüm işleminden elde edilen modellere göre daha gerçekçi yer modelleri elde edilmiştir.

Çapraz türev yöntemi, bu çalışmada olduğu gibi iki boyutlu verilerin ters çözümünde kullanılabilirdiği gibi, bu kullanım alanı üç boyutlu verilere de genişletilebilir. Bu yöntem kullanılarak, aynı bölgede ölçülen iki farklı fiziksel büyüklük, birleşik ters işlemine sokularak, geometrik olarak birbirine benzeyen ve daha gerçekçi yer modelleri elde edilebilir.

KAYNAKLAR

- Cagniard L., 1953. Basic Theory of The Magneto-Telluric Methods of Geophysical Prospecting, *Geophysics*, 18: 605-635.
- Candansayar M.E., 2002. Sönümlü En-Küçük Kareler ve Eşlenik Türev Algoritmalarının Ardışık Kullanımı ile Manyetotellürik Verilerin Düzgünleştiricili İki-Boyutlu Ters Çözümü. Doktora Tezi. Ankara Üniversitesi, Türkiye.
- Candansayar M.E. ve Tezkan B., 2006. A Comparison of Different Radiomagnetotelluric Data Inversion Methods for Buried Waste Sites. *Journal of Applied Geophysics*, 58: 218-231.
- de Groot-Hedlin C. ve Constable S., 1990. Occam's Inversion to Generate Smooth, Two-Dimensional Models From Magnetotelluric Data. *Geophysics*, 55: 1613-1624.
- de Lugao P.P., Portniaguine O. ve Zhdanov M.S., 1997. Fast and Stable Two-Dimensional Inversion of Magnetotellurics Data. *J. Geomag. Geoelectr.*, 49: 1469-1497.
- de Lugao P.P. ve Wannamaker P.E., 1996. Research Note: Calculating The Two-Dimensional Magnetotelluric Jacobian in Finite Elements Using Reciprocity. *Geophys. J. Int.*, 127: 806-810.
- Fontes S.L., de Lugao P.P., Meju M.A., Pinto V.R., Flexor J.M., Ulugergerli E.U., La Terra E.F., Gallardo L.A. ve Rijo L., 2009. Marine Magnetotelluric (MMT) Mapping of Basement and Salt Bodies in Santos Basin of Brazil. *First Break*, 27: 39-43.
- Gallardo L.A., 2004. Joint Two-Dimensional Inversion of Geoelectromagnetic and Seismic Refraction Data With Cross-Gradients Constraint. PhD Dissertation (Doktora Tezi). Lancaster University, UK.
- Gallardo L.A. ve Meju M.A., 2003. Characterization of Heterogeneous Near-Surface Materials by Joint 2D Inversion of DC Resistivity and Seismic Data, *Geophys. Res. Lett.*, 30(13): 1658.
- Gallardo-Delgado L.A., Perez-Flores M.A., ve Gomez-Trevino E., 2003. A Versatile Algorithm for Joint 3-D Inversion of Gravity and Magnetic Data. *Geophysics*, 68: 949-959.
- Gallardo L.A., ve Meju M.A., 2004. Joint Two-Dimensional DC Resistivity and Seismic Travel Time Inversion With Cross-Gradients Constraints. *J. Geophys. Res.*, 109:

B03311.

- Haber E. ve Oldenburg D., 1997. Joint Inversion: A Structural Approach. *Inverse Problems* 13: 63-77.
- Jones F.W. ve 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. ve Vozoff K., 1975. Stable Iterative Methods for The Inversion of Geophysical Data, *Geophys, J.R.ast. Soc.* 42, 957-976.
- Jupp D.B.L. ve Vozoff K., 1977. Two-Dimensional Magnetotelluric Inversion. *Geophys, J.R.ast. Soc.*, 50: 333-352.
- Konuk T. ve Ulugergerli E. U., 2010. Two Dimensional Modeling of Marine Magnetotellurics Data Using Finite Differences, *20th Electromagnetic Induction Workshop*, Giza, Mısır.
- Last B.J. ve Kubik K., 1983. Compact Gravity Inversion. *Geophysics*, 48: 713-721.
- Mackie R.L., 1991. Three-Dimensional Magnetotelluric Modeling and Inversion With Applications To The California Basin and Range Province. Phd. Dissertation (Doktora Tezi). Massachusetts Institute Of Technology, USA.
- Mackie R. L. ve Madden T. R., 1993. Three-Dimensional Magnetotelluric Modelling and Inversion Using Conjugate Gradients. *Geophys. J. Int.*, 115: 215–219.
- Madden T.R. ve Mackie R.L., 1989. 3D Magnetotelluric Modelling and Inversion Proc. *IEEE*, 77: 318–32.
- McGillivray P.R., Oldenburg D.W., Ellis R.G. ve Habashy T.M., 1994. Calculation of Sensitivities For The Frequency-Domain Electromagnetic Problem. *Geophys. J. Int.* 116: 1-4.
- Meju M.A., Gallardo L.A., ve Mohamed A.K., 2003. Evidence For Correlation of Electrical Resistivity and Seismic Velocity in Heterogeneous Near-Surface Materials, *Geophys. Res. Lett.*, 30(7): 1373.
- Menke W., 1984. *Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory*, Academic Press Inc., San Diego. 289 p.
- Newman G.A. ve Hoversten G.M., 2000. Three-Dimensional Magnetotelluric Inversion Using Non-Linear Conjugate Gradients. *Geophys. J. Int.*, 140: 410-424.
- Ogawa Y. ve Uchida A., 1996. A Two-Dimensional Magnetotelluric Inversion Assuming Gaussian Static Shift. *Geophys. J. Int.*, 126: 69-76.

- Oristaglio M.I. ve Worthington M.H., 1980. Inversion of Surface and Borehole Electromagnetic Data for Two-Dimensional Electrical Conductivity Models. *Geophysical Prospecting*, 28: 633-657.
- Parkinson W.D., 1962. The Influence of Continents and Oceans On Geomagnetic Variations, *Geophys. J.*, 6: 441-449.
- Portniaguine O. ve Zhdanov M.S., 1999. Focusing Geophysical Inversion Images. *Geophysics*, 64: 874-887.
- Rijo L., 1977. Modeling of Electric and Electromagnetic Data. Phd. Dissertation (Doktora Tezi). University 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. Phd. Dissrtation (Doktora Tezi). Pennsylvania State University.
- Rodi W. ve Mackie R.L., 2001. Nonlinear Conjugate Gradients Algorithm For 2-D Magnetotelluric Inversion, *Geophysics*, 66: 174-187.
- 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.
- Schmucker U., 1963. Anomalies of Geomagnetic Variations in The Southwestern United States. *J. Geomag. Geoelectr.*, 15: 193-221.
- Siripunvaraporn W. ve Egbert, G., 2000. An Efficient Data-Subspace Inversion Method For 2D Magnetotelluric Data. *Geophysics*, 65(3): 791-803.
- Smith J.T. ve 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. ve Morrison F., 1999. Sharp Boundary Inversion of 2D Magnetotelluric Data. *Geophysical Prospecting*, 47: 469-486.
- 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. ve Arsenin V.Y., 1977. *Solution of Ill-Posed Problems*. V.H. Winston and Sons, New York. 277 p.
- Uchida T., 1993. Smooth 2-D Inversion For Magnetotelluric Data Based On Statistical

- Criterion ABIC. *J. Geomag. Geoelectr.*, 45: 841-858.
- Wannamaker P.E., Stodt J.A. ve Rijo L., 1986. Two-Dimensional Topographic Responses in Magnetotellurics Modelled Using Finite Elements. *Geophysics*, 11: 2131-2144.
- Weaver J.T., 1994. *Mathematical Methods For Geo-Electromagnetic Induction*. Research Studies Press Ltd., Taunton, Somerset, İngiltere. 326 p.
- Zhdanov M S., 2002. *Geophysical Inverse Theory and Regularization Problems*. Elsevier, Amsterdam. 635 p.
- Zhdanov M.S. ve Hursan G., 2000. 3D Electromagnetic Inversion Based on Quasi Analytical Approximation. *Inverse Problems*, 16: 1297–1322.

ŞEKİLLER

Sayfa No

Şekil 1. Manyetotellürik yöntemde 2B model ve mod kavramı.....	6
Şekil 2. Sonlu Farklar model ağı.....	8
Şekil 3. Ağ içindeki herhangi bir ΔA_{ij} dikdörtgeninin içindeki bir düğüm noktası ve komşu düğüm noktaları.....	9
Şekil 4. x yönünde 4 ve z yönünde 3, toplam $3 \times 4 = 12$ düğüm noktasından oluşan sonlu farklar ağı.....	13
Şekil 5. Genel dizey denklemi.....	14
Şekil 6 Trapezoidal vadi modeli.....	17
Şekil 7. Şekil 6' da verilen model için hesaplanan TE ve TM modu tepkileri.....	17
Şekil 8. Şekil 6' daki modelde hava tabakası yerine iletken (0.3 mS) su tabakasının ekenmesiyle oluşan model için hesaplanan TE ve TM tepkileri.....	18
Şekil 9. Temsili 2B yer modeli.....	19
Şekil 10. Şekil 9' da görülen model için MT tepkisi.....	20
Şekil 11. Kıyıdan uzak bölgedeki istasyon için hesaplanan değerler.....	20
Şekil 12. Vadi modeli.....	22
Şekil 13. Vadi modeli için TE ve TM modu model tepkileri.....	22
Şekil 14. Santos Havzası, Brezilya.....	23
Şekil 15. Santos Havzası için TE ve TM modu sonuçları.....	24
Şekil 16. Temsili 2B model ağı.....	31
Şekil 17. Eşlenik türev algoritması.....	37
Şekil 18. Karşıtlık ilkesinin gösterimi.....	39
Şekil 19. Yapay veri uygulaması için kullanılan yer modeli.....	44
Şekil 20. OCCAM durağanlaştırıcısı kullanılan ters çözüm sonucu.....	45
Şekil 21. MGS durağanlaştırıcısı kullanılarak elde edilen ters çözüm modeli.....	46
Şekil 22. MS durağanlaştırıcısı kullanılarak elde edilen ters çözüm modeli.....	46
Şekil 23. L_2 normu kullanıldığında elde edilen ters çözüm modeli.....	47
Şekil 24. Yapay veri uygulaması için kullanılan model.....	48
Şekil 25. Denizel ortam için elde edilen ters çözüm modeli.....	48
Şekil 26. Çapraz – Türev uygulaması için kullanılan yer modeli.....	50
Şekil 27. Sadece TE modu için ters çözüm sonucu.....	51
Şekil 28. Sadece TM modu için ters çözüm sonucu.....	51

Şekil 29. TE ve TM modlarından elde edilen ters çözüm modelleri için çapraz türev fonksiyonu.....	52
Şekil 30. TE modu için birleşik ters çözüm sonucu.....	53
Şekil 31. TM modu için birleşik ters çözüm sonucu.....	53
Şekil 32. Birleşik ters çözüm sonucu elde edilen modeller için çapraz türev fonksiyonu.....	54
Şekil 33. 2B yer modeli için elde edilen kuramsal veri.....	54
Şekil 34. Sadece TE modu ve sadece TM modu için yapılan ters çözüm modellerinin kuramsal tepkisi.....	55
Şekil 35. TE ve TM modu verilerinin birleşik ters çözümü sonucunda elde edilen modellerin kuramsal tepkisi.....	55

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER:

Adı Soyadı: Tuğrul Konuk
Doğum Yeri: İzmir
Doğum Tarihi: 26/09/1986
Medeni Hali: Bekar
Yabancı Dili: İngilizce, Slav (giriş)

EĞİTİM DURUMU:

Yüksek Lisans: Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, 2012
Lisans: Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, 2009

İLETİŞİM:

e-mail: ertkonuk@gmail.com