

MANYETOTELLÜRİK YÖNTEMİNDE
FREKANS DÜZGÜNLEŞTİRİLMİŞ EMPEDANS
AYRIŞTIRMA ANALİZİ

ÖZCAN ÖZYILDIRIM

YÜKSEK LİSANS TEZİ
JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
2010

CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MANYETOTELLÜRİK YÖNTEMİNDE FREKANS
DÜZGÜNLEŞTİRİLMİŞ EMPEDANS AYRIŞTIRMA ANALİZİ

ÖZCAN ÖZYILDIRIM

YÜKSEK LİSANS TEZİ

JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
YRD. DOÇ. DR. CEMAL KAYA

SİVAS
2010

Bu alışma Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanmış ve jürimiz tarafından Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan Doç. Dr. Funda BİLİM

Üye Doç. Dr. M. Emin CANDANSAYAR

Üye (Danışman) Yrd. Doç. Dr. Cemal KAYA

ONAY

Bu tez çalışması 23.07.2010 tarihinde Enstitü Yönetim Kurulu tarafından belirlenen ve yukarıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Sezai ELAGÖZ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Bu tez Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 24.09.2008 tarihli ve 7 sayılı toplantısında kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu adlı yönergeye göre hazırlanmıştır.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iii
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜRLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
SİMGELER DİZİNİ	ix
1 GİRİŞ	1
2 MANYETOTELLÜRİK(MT) YÖNTEMİ.....	3
2.1 Yöntemin Kaynağı	3
2.2 Ölçü alım Tekniği	4
2.3 Ölçülen Büyüklükler	6
3 GROOM-BAILEY(GB) AYRIŞTIRMA ANALİZİ	12
3.1 Bozunma Modeli.....	12
3.2 Bozunma Tensörünün kullanılabilirliği	15
3.3 Empedans Tensörünün Ayrıştırılması	18
4 FREKANS DÜZGÜNLEŞTİRİLMİŞ EMPEDANSIN ÇOK NOKTA ÇOK FREKANS AYRIŞTIRMASI.....	21
4.1 FNI Tensörü Kullanılarak Ayrıştırma Düz Çözümü	22
4.2 Kısmi Türevler Dizeyi	24
4.3 Ters Çözüm.....	27
5 YAPAY VERİ UYGULAMASI	30
5.1 Model-1	30
5.2 Model-2	32
5.3 Model-3	34
6 GERÇEK VERİ UYGULAMASI	36
6.1 Tek İstasyon Verisinin Ayrıştırılması.....	36
6.2 Çok Verinin Ayrıştırılması	39
7 SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	43
KAYNAKLAR	44
ÖZGEÇMİŞ	45
EKLER	
EK-1 Model-1 için FNI Ayrıştırma Programı Sonuçları.....	46
EK-2 Model-2 için FNI Ayrıştırma Programı Sonuçları.....	48
EK-3 Model-3 için FNI Ayrıştırma Programı Sonuçları.....	50
EK-4 Cagniard Özdirenç Bağlantısı	52
EK-5 12 İstasyonda Ölçülen Verilerin FNI Ayrıştırma Programı Sonuçları.....	55

EK-6 Gerçek Bozunma Parametreleri, FNI Ayrıştırma ve Strike Ayrıştırma Programının Sonuçlarının Karşılaştırması.....	57
--	----

ÖZET

MANYETOTELLÜRİK YÖNTEMİNDE FREKANS DÜZGÜNLEŞTİRİLMİŞ EMPEDANS AYRIŞTIRMA ANALİZİ

Özcan ÖZYILDIRIM

Yüksek Lisans Tezi, Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Cemal KAYA

2010, 57 sayfa

Bu çalışmada, Manyetotellürik(MT) yöntemi verilerini ayırtırmak için kullanılan daha önceki yöntemlerden yararlanılarak, çok istasyon çok frekans ayırtırması yapan program yapılmıştır. Programda geleneksel empedans yerine, ilk olarak Başokur' un (1994) ortaya attığı frekans düzgünleştirici empedans kullanılmış ve daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Tez kapsamında üç yapay modele ve bir gerçek veri kümesine yer verilmiştir. Ayırtırma yöntemlerinin en önemli parametresi doğrultu açısı olduğu için seçilen modeller sadece doğrultu açısını içermektedir. Bu sayede doğrultu açısının hassas bulunduğu gösterilmektedir. Bunun için 45 derece doğrultulu ve 0 derece doğrultulu iki model, düz çözüm yapılarak 'edi' dosyaları elde edilmiştir. Daha sonra bu dosyalar kullanılarak ayırtırma işlemi yapılmıştır. Bunun yanı sıra, McNeice ve Jones' in (2001) kullandıkları modelden elde edilen empedanslar, onların da uyguladıkları bozunma matrisleriyle çarpılarak bozulmuştur. Bozunmuş veriler, gerçek bozunma parametreleriyle ve McNeice ve Jones' in (2001) sonuçlarıyla karşılaştırılmak amacıyla, FNI ayırtırma programında ayırtırılmıştır. Denemelere ek olarak gerçek verilerde kullanılmıştır. 12 adet MT verisi kullanılarak Groom ve Bailey' in ayırtırma analizi ile karşılaştırılmıştır.

Denemeler sonucunda McNeice ve Jones' in (2001) programında, 2-B empedans köşegen elemanlarının ön kestiriminde, eksikler olduğu görülmüştür. Bu eksikler, göz önünde bulundurularak FNI ayırtırma programında giderilmiştir. İki programın sonuçları karşılaştırıldığında FNI ayırtırma programının doğruya daha yaklaştığı görülmüştür. Programda, sönümlü en küçük kareler sönüm katsayısının ve hata

ölçütünün uygun seçimi oldukça önemlidir. Hata değeri $0.1e-10$ dan küçük olduğunda gerçek parametre değerlerinin aynısı bulunabilmekte ve bu hataya sadece 10 yinelemede ulaşılabilir.

Anahtar kelimeler: Manyetotellirik, Tensör Analizi, Ayırıştırma, Empedans, Doğrultu

ABSTRACT

FREQUENCY-NORMALIZED IMPEDANCE TENSOR DECOMPOSITION ANALYSIS ON MAGNETOTELLURIC METHOD

Özcan ÖZYILDIRIM

Master of Science Thesis, Department of Geophysics Engineering

Supervisor: Asist. Prof. Dr. Cemal KAYA

2010, 57 pages

In this study, benefited from former methods which was used for decomposing Magnetotelluric(MT) data and multi-side multi-frequency decomposition method was suggested. In this algorithm, Frequency Normalized Impedance (FNI) was used instead of traditional impedance which had been suggested by Basokur(1994) and was obtained better results.

In this thesis, three synthetic models and one real data set are used. Because strike angle is the most important parameter of decomposition methods, models include only strike angle. Therefore it was shown that strike angle had been found sensitively. For this aim, forward responses were calculated and obtained 'edi' files using resistivity models which have 45 and 0 degree strike angles. Decomposition analysis was then performed using these files. Besides this, impedances, which obtained from model of McNeice and Jones (2001) used, were distorted by multiplying with distortion matrices which also used by them. Distorted data were decomposed by FNI decomposition program to compare with program results of McNeice and Jones (2001) and real parameter values. In addition to real data were used also in experiment. Results of FNI decomposition program compared with results of Groom and Bailey' s program using 12 real MT data.

As a result of experiment, it was found that McNeice and Jones (2001)'s program has some deficiencies at estimation of diagonal elements of 2-D impedances. These deficiencies were eliminated in FNI decomposition program. When results of two program are compared, it was found that FNI decomposition program is more accurately. Right selection of damped least squares coefficient and right selection of

rms is very important in program. Actual values of parameters can be find when the rms is less than $0.1e-10$ and this rms value can be find only at 10 iterations.

Key words: Magnetotelluric, Tensor Analysis, Decomposition, Impedance, Strike

TEŐEKKÖRLER

Daniőmanım Yrd. Doç. Dr. Cemal KAYA' ya tez boyunca yaptığı katkılardan dolayı teőekkür ederim.

Çalışma boyunca bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren Doç. Dr. Mehmet Emin CANDANSAYAR' a müteőekkürüm.

Tezim süresince bilgisayar, çalışma ortamı gibi imkanlarından yararlandığım Ankara Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği bölüm başkanlığına ve Cumhuriyet Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği bölüm başkanlığına teőekkür ederim.

106G043 No' lu TÜBİTAK projesi çalışma arkadaşlarıma ve özellikle Ankara Üniversitesi Doktora öğrencileri İsmail DEMİRÇİ ve Erhan ERDOĞAN' a teőekkür ederim.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Güneşten gelen yüklü parçacıklar ile yer manyetik alanının etkileşimi.....	3
Şekil 2.2 MT yönteminde kullanılan aletler	5
Şekil 2.3 “+” şeklinde ölçü alma düzeni.....	5
Şekil 2.4 “L” şeklinde ölçü alma düzeni.....	6
Şekil 2.5 Zaman Serileri	6
Şekil 2.6 Fourier dönüşümü ile elde edilen E_x, E_y, H_x, H_y, H_z (Örnekleme:4096 Veri penceresi: Hann)	7
Şekil 2.7 Empedans genlik ve fazı.....	7
Şekil 2.8 Görünür özdirenç genlik ve fazı	9
Şekil 2.9 TE ve TM modu gösterimi(Kaya C.,2002).....	10
Şekil 3.1 Yapay bozunma modeli	13
Şekil 3.2 Birim vektörler topluluğu ile (a) Splitting tensörü uygulamadan önceki ve (b) Splitting tensörü uygulama sonrası, değişimler. X eksenini yukarı, Y sağa doğru.	17
Şekil 3.3 Birim vektörler topluluğu ile (a) Shear tensörü uygulamadan önceki ve (b) Shear tensörü uygulama sonrası, değişimler. X eksenini yukarı, Y sağa doğru.....	18
Şekil 5.1 Model-1’ in üstten görünümü	31
Şekil 5.2 Ön-kestirim parametreleri.....	31
Şekil 5.3 Model-2’ in üstten görünümü	33
Şekil 5.4 Ön kestirim parametreleri	33
Şekil 5.5 Model-3’ ün kesit şeklinde görünümü	35
Şekil 5.6 Ön kestirim parametreleri	35
Şekil 6.1 a) 105G145 No’ lu TÜBİTAK projesi kapsamında MT istasyonlarının yerleri, b) Tez kapsamında kullanılan 12 MT istasyonunun yeri.....	36
Şekil 6.2 1064 numaralı istasyon MT verisinin 78 frekansta GB ayrıştırma analizi sonucu bulunan doğrultu açılarının sütun grafik ile gösterilmesi ve FNI ayrıştırmasında bulunan doğrultu açısının izdüşümü.	38
Şekil 6.3 1064 numaralı istasyon MT verisinin 78 frekansta GB ayrıştırma analizi sonucu bulunan doğrultu açılarının gül diyagramında gösterilmesi ve FNI ayrıştırmasında bulunan doğrultu açısının izdüşümü.	38
Şekil 6.4 1064 numaralı istasyon MT verisinin, FNI ve GB analizi ile ayrıştırılması sonucu elde edilen görünür özdirenç eğrilerinin karşılaştırması.	39
Şekil 6.5 12 istasyon 50 frekansta GB ayrıştırma analizi sonucu bulunan doğrultu açılarının sütun grafik ile gösterilmesi ve FNI ayrıştırmasında bulunan doğrultu açısının izdüşümü.	40
Şekil 6.6 12 istasyon 50 frekansta GB ayrıştırma analizi sonucu bulunan doğrultu açılarının gül diyagramında gösterilmesi ve FNI ayrıştırmasında bulunan doğrultu açısının izdüşümü.	40
Şekil 6.7 1067 numaralı istasyon MT verisinin, çoklu FNI ve GB analizi ile ayrıştırılması sonucu elde edilen görünür özdirenç eğrilerinin karşılaştırması.	41
Şekil 6.8 1068 numaralı istasyon MT verisinin, çoklu FNI ve GB analizi ile ayrıştırılması sonucu elde edilen görünür özdirenç eğrilerinin karşılaştırması.	41
Şekil 6.9 1071 numaralı istasyon MT verisinin, çoklu FNI ve GB analizi ile ayrıştırılması sonucu elde edilen görünür özdirenç eğrilerinin karşılaştırması.	42
Şekil 6.10 1075 numaralı istasyon MT verisinin, çoklu FNI ve GB analizi ile ayrıştırılması sonucu elde edilen görünür özdirenç eğrilerinin karşılaştırması.	42

SİMGELER DİZİNİ

a, b	2-B empedansın köşegen elemanları
$a(\cdot), A(\cdot)$	Kısmi Türevler dizeyi
a_0, a_1, a_2, a_3	Çarpım katsayıları
a_r, b_r	2-B empedansın köşegen elemanlarının gerçel kısımları
a_s, b_s	2-B empedansın köşegen elemanlarının sanal kısımları
A	Anizotropi (Splittin) tensörü
C	Bozunma tensörü
$C1, C2, C3, C4$	Bozunma tensörünün elemanları
χ	Çakışma ölçütü
χ_{ig}	Geçici çakışma ölçütü
d	Veri farkları dizeyi
dd	Geçici veri farkları dizeyi
dp	Parametre farkları dizeyi
e	Shear
e_r	Bölgesel elektrik alan
E	Elektrik alan
E_x	Elektrik alan x bileşeni
E_y	Elektrik alan y bileşeni
E_z	Elektrik alan z bileşeni
ϵ	Sönüm katsayısı
f	Frekans
h_r	Bölgesel manyetik alan
F	Frekans düzgünleştirilmiş empedans tensörü
$F_{xx}, F_{xy}, F_{yx}, F_{yy}$	Frekans düzgünleştirilmiş empedans tensörü elemanları
Y_r	Frekans düzgünleştirilmiş empedans fonksiyonu gerçel kısmı
Y_s	Frekans düzgünleştirilmiş empedans fonksiyonu sanal kısmı
F_{2B}	2 boyutlu Frekans düzgünleştirilmiş empedans tensörü
F_{3B}	3 boyutlu Frekans düzgünleştirilmiş empedans tensörü
F_k	Kuramsal veri
g	Sayısal değişken
h_r	Bölgesel manyetik alan
H	Manyetik alan
H_x	Manyetik alan x bileşeni
H_y	Manyetik alan y bileşeni
H_z	Manyetik alan z bileşeni
I	Birim dizey
N	İstasyon sayısı
$N1, N2, N3$	Normalleştirme faktörleri
P	Parametre dizeyi
$P0$	Ön-kestirim parametreleri dizeyi
Q, R	Döndürme dizeyleri
Q^T, R^T	Döndürme dizeylerinin transpozu
s	Anizotropi

S	Shear tensörü
t	Twist
T	Twist tensörü
W	Ağırlık dizeyi
w	Açısal frekans
w_1, w_2	Ağırlık dizeyinin elemanları
Z	Empedans tensörü
$Z_{XY} Z_{XX} Z_{YY} Z_{YX}$	Empedans tensörünün elemanları
Z_{3B}	3 boyutlu empedans tensörü
Z_{2B}	2 boyutlu empedans tensörü
Z_m	Ölçülen empedans
$\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3$	Pauli Spin matrisleri
σ, δ	Toplam katsayıları
θ	Doğrultu açısı
θ_e	Shear açısı
θ_t	Twist açısı
μ	Manyetik geçirgenlik
Φ	Faz
Φ_X	Faz x bileşeni
Φ_Y	Faz y bileşeni
ρ	Özdirenç
ρ_a	Görünür özdirenç

1 GİRİŞ

Manyetotellürik (MT) yöntem, ilk olarak Tikhonov (1950) ve Cagniard (1953) tarafından ortaya atılmıştır. Yöntemin doğal kaynaklı bir yöntem olması bir çok avantajların yanında dezavantajları da beraberinde getirmektedir. Düşük frekanslarda veriler elde edilebildiği için, sismolojiden sonra en derin araştırma derinliğine sahip jeofizik yöntemdir. Yerin doğal elektrik ve manyetik alan değişimlerinden yer içinin elektrik özelliklerinin bulunabileceği prensibine dayanmaktadır. MT yönteminin dezavantajı olarak doğal kaynaklı yöntem olması nedeniyle verilerin gürültülerden çok etkilenmesi verilebilir.

Manyetotellürik(MT) verilerin yorumlanması, incelenen alanın bir boyutlu (1-B) veya iki boyutlu (2-B) olması durumunda kolaydır. İdeal 2-B durumda tensörün köşegen elemanları sıfırdır. Uygulamada ölçülen empedans tensörü nadiren 2-B ideal empedans tensörü formuna uymaktadır. Bu uyumsuzluk, 1-B ve 2-B indüksiyondaki veri hataları ile yerel frekans bağımsız tellürik bozulmaların toplamından oluşmaktadır. Sonuçta yer altı 2-B olmasına karşın, ölçülen empedans tensörü, bu bozunmalar nedeniyle 3-B davranış göstermektedir. Bu yüzden ölçülen veriler ile anlamlı 2-B yorum yapılamaz. Elektrik alanı bozan galvanik akımların sebebi, bölgesel ölçekte yaklaşık 2-B olan iletken yapıların içerisindeki 3-B küçük ölçekli yapılardır. Eğer ortam bölgesel ölçekte 3-B ise, bozunma kavramı gereksiz olur. Çünkü 3-B ters çözümde bozucu küçük ölçekli yapılar ifade edilebilmektedir.

MT yönteminde yorumu zorlaştıran bu bozunmaların üstesinden gelebilmek için ayrıştırma yöntemleri, birçok araştırmacı tarafından irdelenmiştir. Groom and Bailey (1989), 3-boyutlu empedans matrisini sabit kayma (statik shift) (g) ile distorsiyon matrisi, shear ve twist matrislerine bölerek incelemişlerdir. Caldwell ve diğ. (2004), ayrıştırma işlemini empedans tensörü yerine faz tensöründe incelemişlerdir. Latorraca ve diğ. (1986), empedansı tanımlayan 8 parametreyi bulmak için tekil değer ayrışımını kullanmışlardır. McNeice ve Jones (2001), Groom ve Bailey' in (1989), Empedans tanımından yararlanarak, 'Twist' ve 'Shear' açılarının istasyon bağımlı, frekans bağımsız olduğunu ve tüm istasyonlar için bir tane 'Strike' açısı bulunabileceğini varsaymış, böylece 2-B empedans değerini elde etmiştir.

Bu çalışmada ise McNeice and Jones' in (2001) teorik bilgileri ışığında 'MATLAB' programlama dili kullanılarak, ayrıştırma analizi programı geliştirilmiştir.

Bu programda geleneksel empedans yerine Frekans Düzgünleştirici Empedans (Frequency-Normalized Impedance(FNI)) bağıntısı (Basokur, 1994) kullanılmıştır.

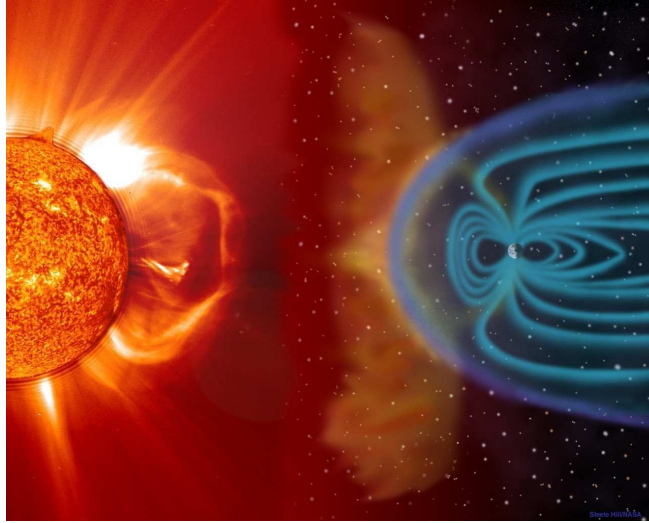
Geliştirilen program yapay ve gerçek veri ile denenmiştir. Bunun yanı sıra diğer ayrıştırma analizi yöntemleri ile karşılaştırmalar yapılmış, programın kullanılabilirliği gösterilmiştir.

2 MANYETOTELLÜRİK(MT) YÖNTEMİ

2.1 Yöntemin Kaynağı

Yer manyetik alanındaki değişimlerin kaynağı atmosferde, iyonosferde ve manyetosferde olan olaylardır. Yerin manyetik alanının zamanla değişimi sürekli olarak gözlemlendiğinde çok uzun periyotlardan kısa periyotlara kadar oldukça geniş bir spektrumda olaylar ile karşılaşılır. Kaynağı manyetosfer ve iyonosfer içindeki yüklü parçacıkların titreşimleri olan bu manyetik değişimler ve bunlara bağlı olarak yerküre katmanları içinde indüklenen elektrik akımları yerin doğal elektromanyetik alanını oluşturur. Bu doğal elektromanyetik alan, MT yönteminin kaynağıdır.

Yer manyetik alanın değişimi frekansın bir fonksiyonu olarak incelenirse, en zayıf değişim 1 Hz civarında görülür. Bunun nedeni iyonosfer ve manyetosferde oluşan 1 Hz'in üzerindeki değişimler yere ulaşmadan iyonosfer içinde soğurulmasıdır. 1 Hz'in altındaki EM dalga ise güneşten gelen yükler ile manyetosfer sınırındaki girişimlerden oluşur ve astenosfer içinde yayılırlar (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Güneşten gelen yüklü parçacıklar ile yer manyetik alanının etkileşimi (www.nasa.gov.tr)

Arazide MT düzeneğinin kurulacağı yerin gürültülerden dolayı özenle seçilmesi gerekmektedir. Çünkü yakındaki bir elektromanyetik verici, yerin doğal elektromanyetik alanını olumsuz yönde etkileyebilir. Bu durum MT verilerini de olumsuz yönde etkilemektedir. Gürültünün fazla olduğu bu tür durumlarda, dipol

aralıklarının küçük seçilmesi toplanan verinin daha iyi olmasına yardım etmektedir. Bunun yanı sıra bazı dönemlerde, güneşten gelen elektromanyetik sinyalin az olmasından dolayı, ölçü düzeneği yeri seçimi çok iyi olsa bile, veri toplayamama gibi durumlarla da karşılaşabiliriz. Bu durumda ise dipol aralıklarının büyük seçilmesi veya MT aletinden elektrik ve manyetik alan genliğinin artırılması yararlı olmaktadır.

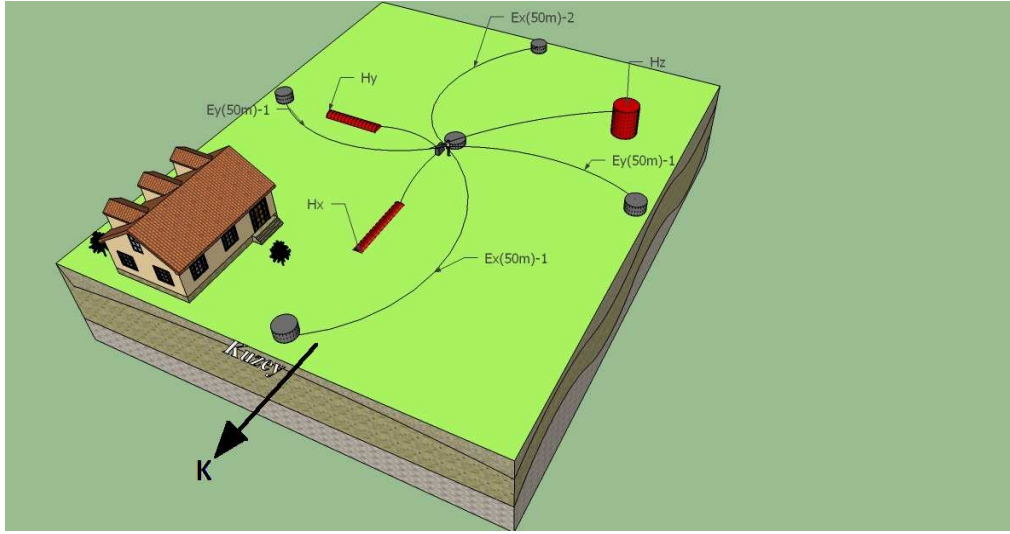
2.2 Ölçü alım Tekniği

MT yönteminde ölçü alımı zamana karşı alındığı için, daha derin bilgi edinebilmek için daha fazla zamana ihtiyaç vardır. Örneğin kabuk çalışmalarında ortalama 48 saat ölçü sahasında ölçü alınmalıdır. Eğer daha sığ bir çalışma yapılıyorsa bu ölçü süresi kısaltılabilir.

MT yönteminde genelde iki türlü ölçüm düzeneği kullanılmaktadır. Bunlar “+” veya “L” şeklindedir. “+” şeklinde arazi düzeneği şekil 2.3’ de ve “L” şeklinde arazi düzeneği şekil 2.4’ de verilmektedir. Burada manyetik alan ölçümleri için 3 tane indüksiyon tipi manyetometre kullanılmaktadır(Şekil 2.2). Bu manyetometreler aletin kalibrasyonu ve arazi çalışmasının belli bir mantığa oturtulması amacıyla sabit bir durumda varsayılabilir. Örneğin, H_x bileşenini ölçen manyetometre tüm ölçülerde ölçü noktasının kuzeyine yerleştirilebilir, H_y bileşeni ölçen de buna orantılı olarak doğuya, H_z bileşeni ölçen ise kuzey batıya yerleştirilerek dik konuma getirilir(Şekil 2.2). Fakat arazi şartlarının uygun olmadığı durumlarda farklı konumlara yerleştirilmesi olasıdır. Elektrik alan ölçümleri için ise polarize olmayan 4 adet pot kullanılmaktadır(Şekil 2.2). Yine aynı sebepten dolayı E_x bileşeni ölçen iki pot kuzey-güney, E_y bileşenini ölçen potlar ise doğu-batı şeklinde yerleştirilebilir(Şekil 2.3 ve Şekil 2.4). Beşinci pot ise, genelde merkez noktaya alete topraklama olması amacıyla yerleştirilmektedir. Böylece manyetik alanın 3 bileşeni ve elektrik alanın 2 bileşeni ölçülmüş olur. Elektrik alanın üçüncü bileşeni olan E_z , bilimsel araştırmalar amacıyla yeraltına bir dipol oluşturacak şekilde sondaj ile yerleştirilerek ölçülebilmektedir. Ama uygulamada E_z bileşeni ölçümleri yapılmamaktadır.

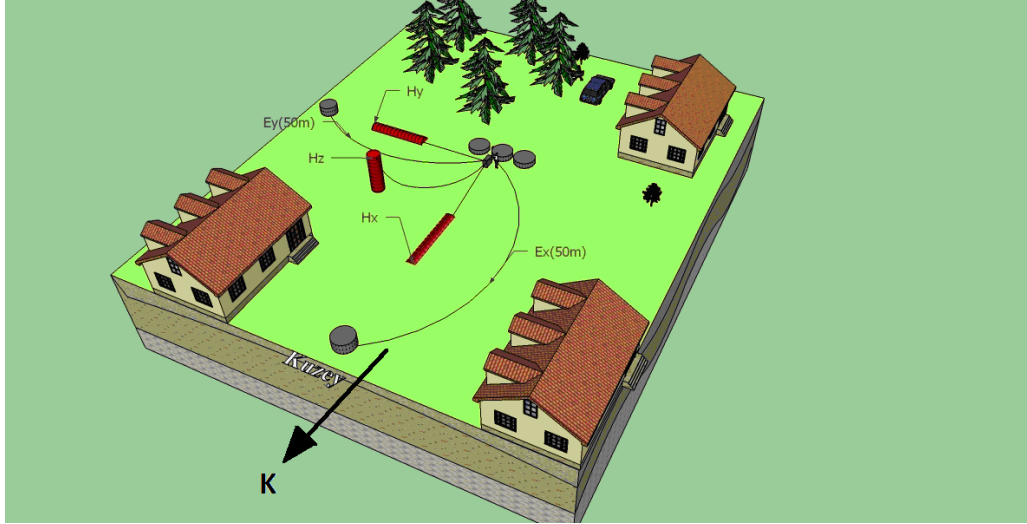


Şekil 2.2 MT yönteminde kullanılan aletler



Şekil 2.3 “+” şeklinde ölçü alma düzeni

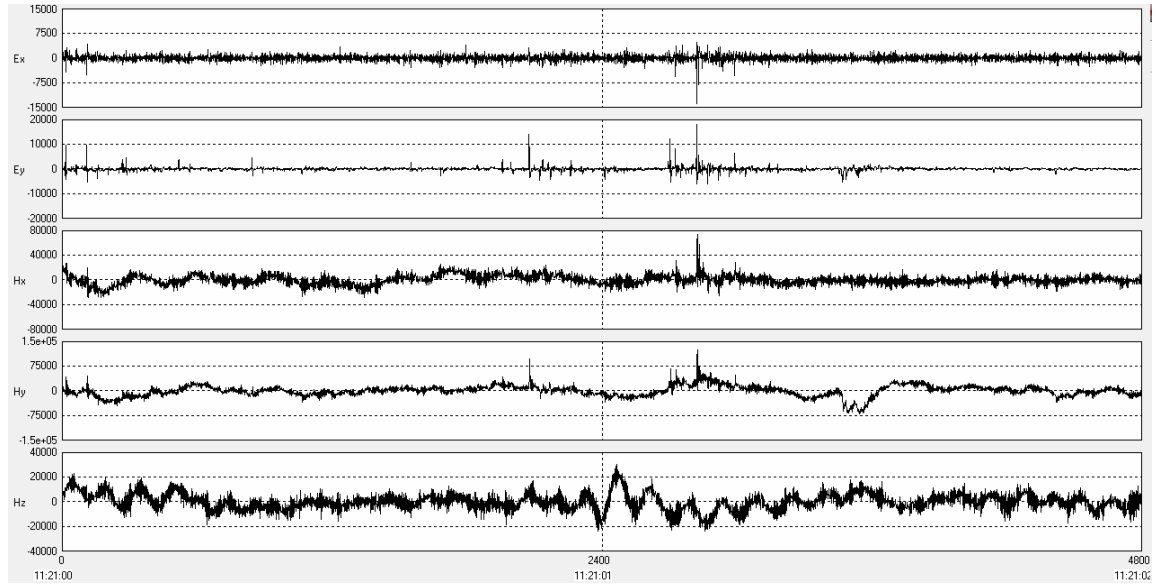
Ayrıştırma analizi yöntemlerine giriş açısından, önceki bölümde dipol aralıklarının hangi durumlarda azaltılıp, hangi durumlarda artırılacağına değinilmişti. Dipol aralıklarının artırılması veya azaltılması veride de bazı değışimlere neden olmaktadır. Bu değışimler arazide yapılan denemelerle kanıtlanmış ve veride statik kayma gibi bir etki yarattığı görülmüştür. Yani dipol aralıkları ne olursa olsun statik kayma düzeltmesi ile bu durum da düzeltilebilir. Manyetik alan ölçümleri yapan bobinler, birbirine tam olarak dik olması gerekmektedir. Birbirine dik olmama durumu veride ciddi değışiklere neden olup verinin karakterini değıştirmekte ve yanlış yorumlamaya yol açmaktadır. Bunun yanı sıra bobinler, birbirinden olabilecek en uzak noktalara koyulmaya çalışılmalıdır. Bobinler birbirine dik durumdayken her iki bobin de aynı oranda çevrilmesi ölçü alımı açısından önemsizdir. Çünkü veri işleme aşamasında bobin yönleri aynı oranda döndürülmektedir.



Şekil 2.4 "L" şeklinde ölçü alma düzeni

2.3 Ölçülen Büyüklükler

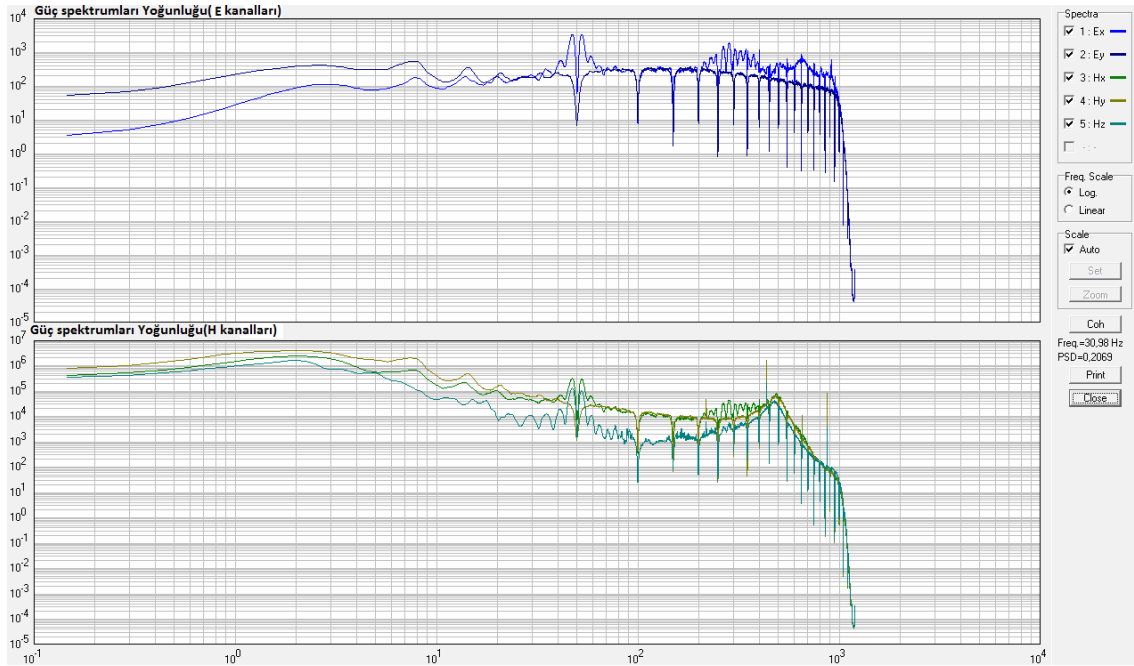
MT yönteminde yer yüzeyinde belirlenen gözlem noktalarında Elektrik alanın E_x , E_y ve manyetik alanın H_x , H_y , H_z bileşenleri zaman ortamında ölçülür. Şekil 2.5' de Arazide alınmış bir MT ölçümünün zaman serisi gösterimi sunulmuştur.



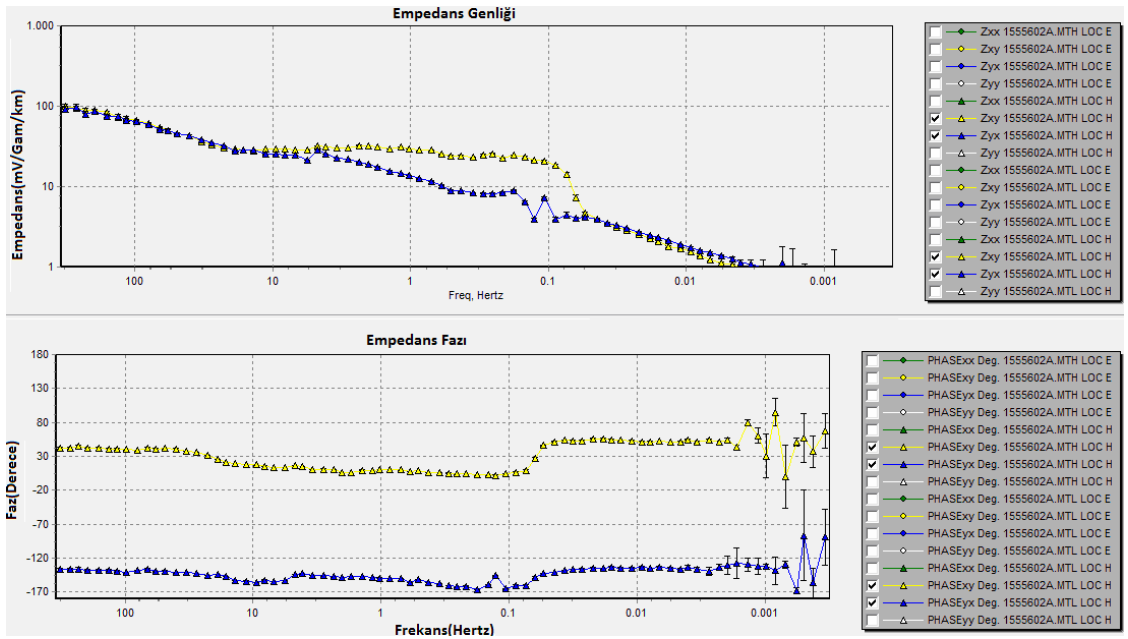
Şekil 2.5 Zaman Serileri

Bu verilerin zaman ortamında veri işlem yapmak oldukça zordur. Bu yüzden fourier dönüşümleri alınarak frekans ortamına dönüştürülür(Şekil 2.6). Burada manyetik ve elektrik alanların birbirine dik bileşenleri kullanılarak(E_x, H_y , veya E_y, H_x) yer yüzeyinde etkin empedans $Z(\omega)$ hesaplanır. Şekil 2.7' de, Şekil 2.5' de gösterilen

verinin fourier dönüşümü alınmış, empedans faz ve empedans genlik değerleri gösterilmektedir.



Şekil 2.6 Fourier dönüşümü ile elde edilen E_x, E_y, H_x, H_y, H_z (Örnekleme:4096 Veri penceresi: Hann)



Şekil 2.7 Empedans genlik ve fazı

Yukarıda şekillerle anlatılan, frekans ortamı veri analizi yapmak için şu yol izlenmektedir;

Elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin ayrık fourier dönüşümü alınır. $x(n\Delta t)$ şeklindeki bir ayrık verinin fourier dönüşümü,

$$x(f) = \frac{1}{n} \sum_{n=0}^{n-1} x(n\Delta t) e^{-i2\pi f_n \Delta t} \quad n=0,1,2, \dots, N-1 \quad [2.1]$$

şeklinde tanımlanır. $X(t)$ dizisinin fourier dönüşümü olan $X(f)$ 'nin genlik ve faz spektrumu aşağıdaki gibidir.

$$|X(f)| = \left[(X_g(f))^2 + (X_s(f))^2 \right]^{1/2} \quad [2.2]$$

$$\phi(f) = \arctan \left[-X_s(f) / X_g(f) \right] \quad [2.3]$$

Elektrik ve manyetik alan, her frekanstaki genlik ve faz değerleri biçiminde yazılabilir,

$$X(f) = |X(f)| e^{i\phi_x(f)} \quad [2.4]$$

Yukarıda anlatılanlara benzer olarak elektrik alan ve manyetik alanın Fourier dönüşümü alınırsa,

$$E_x(f) = |E_x(f)| e^{i\phi_x(f)} \quad [2.5]$$

$$H_y(f) = |H_y(f)| e^{i\phi_y(f)} \quad [2.6]$$

şeklinde olur. Empedans değeri elektrik alanın manyetik alana oranından,

$$Z_{xy}(f) = E_x(f) / H_y(f) = |E_x(f)| / |H_y(f)| e^{i(\phi_x(f) - \phi_y(f))} \quad [2.7]$$

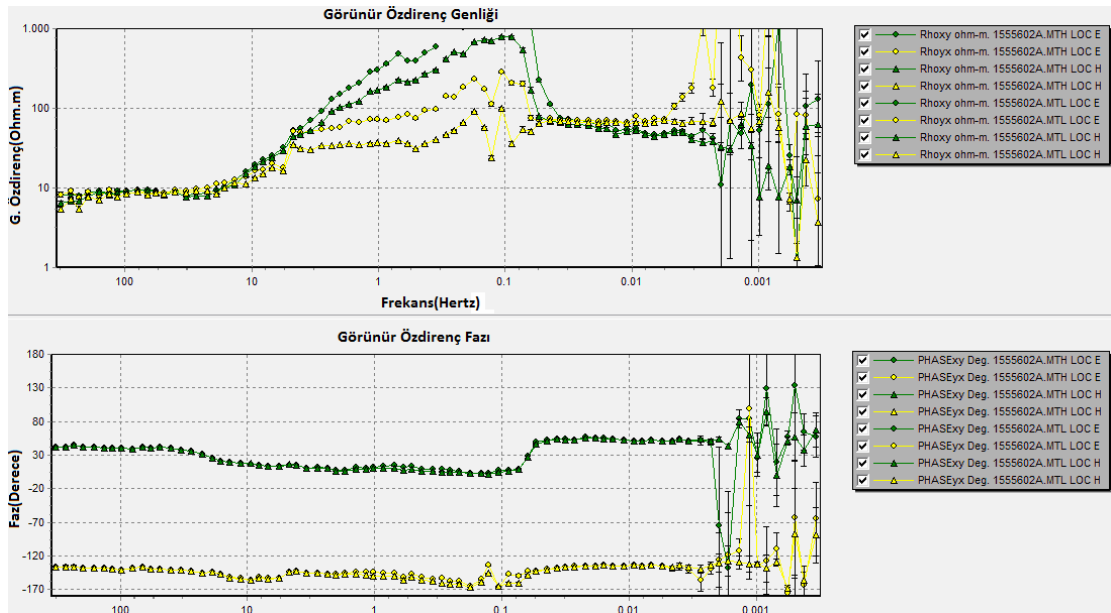
olarak bulunur. Empedans gerçel ve sanal bölümü olan kompleks bir sayıdır. Empedansın genliği,

$$|Z_{xy}(f)| = \frac{E_x(f)}{H_y(f)} \quad [2.8]$$

ve empedansın fazı,

$$\phi_{xy}(f) = \phi_x(f) - \phi_y(f) \quad [2.9]$$

olarak bulunur. Empedansın genliği bulunduktan sonra ilerde bağıntısı çıkarılacak olan Cagniard eşitliğinden (EK-4) yerine konarak frekansın veya periyodun fonksiyonu olarak görünür özdirenç eğrisi elde edilir. Manyetotellürik verilerinin veri işlemi aşamasında, bu dönüşüm kullanılarak görünür özdirenç değerleri elde edilmektedir. Şekil 2.7’ de gösterilen empedans genlik ve fazı, Cagniard bağıntısı kullanılarak görünür özdirenç genliği ve fazı şeklinde sunulmuştur.



Şekil 2.8 Görünür özdirenç genlik ve fazı

Uygulamada veriler sadece bu işlemlerden geçmemekle birlikte, bunun yanında bazı veri düzeltme işlemleri yapılmaktadır. Arazide toplanan, zaman serisi şeklindeki veriler, önceki bölümlerde anlatıldığı gibi frekansın bir fonksiyonu olan görünür özdirenç ve faz haline geldikten sonra, her frekanstaki veriler tek tek ele alınarak düzeltme yapılmaktadır. Bunun nedeni; verideki ölçü alım zamanı süresince ölçü alanındaki ısı değişimi, insan, hayvan, elektrik kaçağı gibi etkenlerden etkilenmiş bazı frekanslardaki bozunmuş verileri atmaktır. Daha sonra bu veriler, “edi” uzantılı olarak

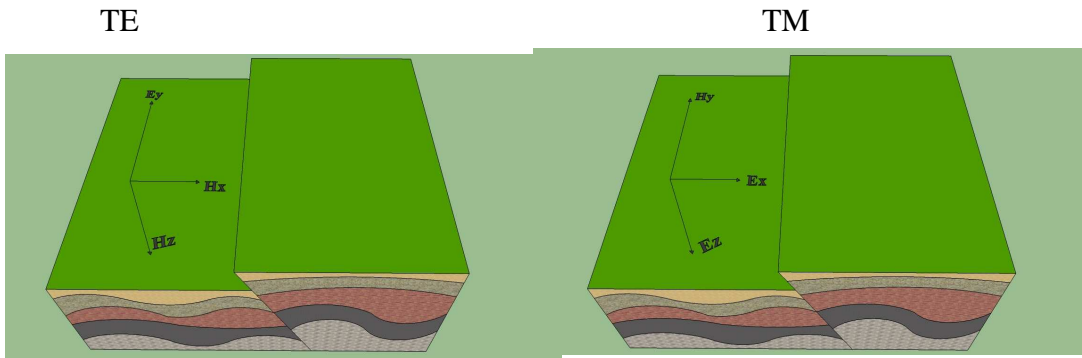
kaydedilir ve yorumlanmaya hazır hale gelmiş olur. Bu tezin konusu olan ayrıştırma işlemi ise, bu aşamadan sonra uygulanabilmektedir.

2.3.1 Empedans Tensörü

Önceki kısımlarda bahsi geçen empedans, elektrik alan ve manyetik alan değerleri ilişkileri, dizey denklemleri ile ifade edilebilir.

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} \quad [2.10]$$

2-B durum için elektrik alanın iletkenlik doğrultusuna (jeolojik doğrultuya) paralel (TE) ve manyetik alanın jeolojik doğrultuya paralel (TM) olduğu iki modda çözüm yapılabilir. TE modu için manyetik alanın y bileşeni ile elektrik alanın x ve z bileşeni, TM modu için ise manyetik alanın x ve z bileşeni, elektrik alanın ise y bileşeni sıfır kabul edilir.



Şekil 2.9 TE ve TM modu gösterimi(Kaya C.,2002).

Tanımlanan bu empedans tensörü elemanları, ortamın boyutluluğuna göre değişmektedir. Örneğin 1-B ortamda empedans,

$$Z_{xx} = Z_{yy} = 0 \text{ ve } Z_{xy} = Z_{yx} \neq 0 \quad [2.11]$$

koşullarını sağlar. 2-B ortamda empedans,

$$Z_{xx} = Z_{yy} = 0 \text{ ve } Z_{xy} \neq Z_{yx} \quad [2.12]$$

$Z_{xx} \neq Z_{yy} \neq 0$ olduğunda ölçümün yapı doğrultusunda olmadığı düşünülür. Buradan,
 $Z_{xx} = Z_{yy} = 0$ olduğu yön bulunabilir. 3-B ortamda empedans ise,

$$Z_{xx} \neq Z_{yy} \neq Z_{xy} \neq Z_{yx} \neq 0 \quad [2.13]$$

koşulunu sağlar.

3 GROOM-BAILEY(GB) AYRIŞTIRMA ANALİZİ

Günümüzde MT ayrıştırma teknikleri içerisinde en ilgi çekici olan Groom ve Bailey(1989)' nin geliştirmiş olduğu tekniktir. Bu teknik ile indükleme asal eksenleri (jeolojik doğrultu) ve durağan kayma (statik shift) etkisi haricinde iki asal empedans değeri doğru olarak elde edilebilir. Bunun yanı sıra kısmi olarak tellürik bozulma etkisini tanımlayan iki parametre (Twist ve Shear) elde edilebilir.

3.1 Bozunma Modeli

Yeraltının 2-B iletkenlik yapısına ve az indükleme yapan 3-B yapılara sahip olduğu varsayılır. Eğer bölgesel ölçekte yeraltı 2-B iletkenlik yapısına sahipse, manyetotellürik yöntem elektrik alanı aşağıdaki gibi tanımlamaktadır.

$$e = Z_{2B} h_r = \begin{bmatrix} 0 & a \\ -b & 0 \end{bmatrix} h_r \quad [3.1]$$

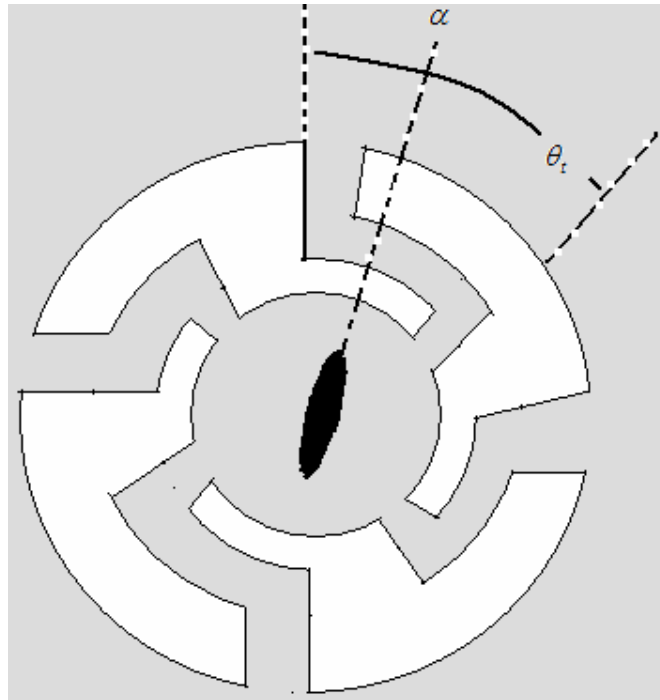
Burada a ve b bölgesel ölçekteki 2-B yapılar için elde edilen empedansın köşegen elemanlarıdır. Ölçülen e ve h alanlarının bölgesel değerleri yerel değişimlerden(etkilerden) dolayı bozulabilir. Elektrik alan küçük ölçekli iletken yapıların sınırlarında toplanan yerel yükler nedeniyle çok fazla bozulabilir. Manyetik alan tellürik akım yoğunluğunun ağırlıklı uzaysal ortalaması tanımlamasındaki gibi elektrik alandan daha az bozucu etkilerden etkilenir. Böylece $h = h_r$ olarak tanımlanır. Bu varsayım birçok araştırmacı tarafından kabul görmüştür (bkz. Dmitriev ve Berdichevsky(1979), Wannamaker ve diğ.(1984b) ve Groom(1988)). Ölçülen elektrik alanı, bölgesel elektrik alan(e_r), ve bozunma tensörü (c) ile ilişkilendirilmiştir. Bozunma tensörü (c), galvanik bozunmanın yokluğunda özdeş tensör haline gelir. Bahr' a (1988) göre

$$e = C e_r = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 \\ C_3 & C_4 \end{bmatrix} e_r \quad [3.2]$$

Bozunma yapılarının burada indükleyen olarak varsayılmasından dolayı, C tensörünün tüm elemanları gerçel olarak varsayılmaktadır. Böylece 4 gerçel parametre, bozunmayı tanımlamak için gereklidir. Bu fiziksel model, Dmitriev ve Berdichevsky' in (1976) homojen olmayan 3-B yüzeyler için verdiği model II ile uymaktadır. Burada C,

$$C = \begin{bmatrix} F_x^{(x)} & F_x^{(y)} \\ F_y^{(x)} & F_y^{(y)} \end{bmatrix} \quad [3.3]$$

Bu durumun geçerliliği çok geniş bir yazar kitlesi tarafından tartışılmıştır. Bu 4 parametre, en genel bozunmayı açıklamak için gereklidir. Şekil 3.1'de bu gerekliliği kanıtlayan uydurma model gösterilmektedir. Orta iletkenlikteki benekli tabaka, yalıtkan alt tabakanın(beyaz) üstünde gösterilmektedir. Benekli tabakanın merkezinde, eliptik ve yüksek iletken tabaka bulunmaktadır(siyah). Buna görsel bir örnek verecek olursak bataklık diyebiliriz. Ölçümler bu bataklığın merkezinde yapılmıştır. Bölgesel tellürik akımlar, ilk olarak θ_i açısı kadar bir yandan diğer tarafa doğru sapmıştır. Eliptik bataklığın uzama yapan kısmı asal eksenlere paralel olarak ve α doğrultusuna dik olarak anizotropiye yönelmektedir. Bu çevrimin açıklanması, bozunma işlemleriyle açıklanır.



Şekil 3.1 Yapay bozunma modeli
(Groom ve Bailey, 1989)

$$e = C e_r = Q \Lambda Q^T T e_r \quad [3.4]$$

açık biçimde yazılırsa,

$$C = \begin{pmatrix} \cos \theta_a & -\sin \theta_a \\ \sin \theta_a & \cos \theta_a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_a & \sin \theta_a \\ -\sin \theta_a & \cos \theta_a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_t & -\sin \theta_t \\ \sin \theta_t & \cos \theta_t \end{pmatrix} \quad [3.5]$$

Burada T, Twist, Q ve Q^T , bataklığın asal eksenlerini döndüren değişkendir. Bataklığın iletkenlik karşıtlığı ve uzaması tarafından meydana gelen, anizotropiyi zorla benimsetir. Bağlantıda görüldüğü gibi 4 gerçel parametre olan θ_a , θ_t , λ_1 ve λ_2 in gereklidir.

C' in (3.5) denklemindeki açılımı bilgi içermesine rağmen, gerçek verilerin açıklanmasında kullanışlı değildir. Çünkü ölçülen empedans tensöründen 4 parametrenin hiç biri çok iyi bir şekilde bulunamaz. Bahr' ın (1988) genel galvanik tellürik bozulmalar bölümünde ve Zhang ve diğ.' in (1987) 2-B galvanik bozunma bölümünde gösterilenler, 2-B empedans bilgilerini bulmak için ve C' in elemanlarını çözmek için gereksizdir. Bu gereksizliğe rağmen, empedans tensörünün açık bir şekilde ayrıştırılması aranmaktadır. Empedans tensöründeki belirli veya belirsiz kısımların açık olarak ayrılması için, C' in belirsizliğinde, e' i nicel olarak tanımlamak gereklidir.

$$e = Z_m h \quad [3.6]$$

ile verilebilir. Burada Z_m , ölçülen empedans tensörüdür. Bölgesel veya asal eksen sisteminde ölçülen empedans tensörü (3.1) ve (3.2) bağıntıları kullanılarak,

$$Z_m = C Z_{2B} \quad [3.7]$$

veya ölçüm ekseni sisteminde,

$$Z_m = R C Z_{2B} R^T \quad [3.8]$$

olur. Burada C bozunma tensörüdür. R ise döndürme matrisi olarak isimlendirilir. Vektörleri bölgesel asal eksen sisteminden θ açısı kadar ölçüm eksen sistemine döndürür. (3.8) nolu denkleme bakıldığında ölçülen empedans tensörü yeraltındaki

fiziksel modeli açıklar fakat bu çarpımdan parametreler tekil olarak ifade edilemez. Bunun nedeni 9 gerçel parametreye ihtiyacımız olmasıdır. Bu parametreler sırasıyla R matrisi içindeki döndürme açısı, 4 gerçel bozunma tensörü elemanı, 2 karmaşık asal empedans değeridir. Ayırıştırma doğasındaki durağansızlık problemi aşağıdaki fikir ile tamamen açıklanmıştır. Dönüşüne göre

$$Z_{2B}' = WZ_{2B} = \begin{pmatrix} w_1 & 0 \\ 0 & w_2 \end{pmatrix} Z_{2B} \quad [3.9]$$

Ve

$$C' = CW^{-1} \quad [3.10]$$

burada w_1 ve w_2 , sıfırdan farklı rasgele gerçel sayılardır. Yeni formül aşağıdaki gibi olur.

$$Z_m = RC'Z_{2B}'R^T \quad [3.11]$$

olarak kabul edilir ve (3.8) kadar Z_m' e çakışmaktadır. Çünkü hala C gerçel ve Z_{2B}' , 2-B ideal formdadır. Yani w, köşegen matrisinin varlığı tekil olmama sorununu ortaya koyar. Böylece (3.8), empedans tensörü ayırıştırılmasının temelini oluşturmaktadır.

3.2 Bozunma Tensörünün kullanılabilirliği

Bu kısımda ayırıştırma analizinin temelini oluşturan C tensörünün çarpanlarına ayrılması gösterilmektedir. Spitz' in (1985) örneklerine göre, Pauli Spin matrisleri, ayırıştırma işlemine uygulanacak şekilde tekrar düzenlenmiştir.

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad [3.12.a]$$

$$\Sigma_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad [3.12.b]$$

$$\Sigma_2 = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad [3.12.c]$$

$$\Sigma_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \quad [3.12.d]$$

M, ikinci mertebeden tensör ise, matrisler aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$M = a_0 I + a_1 \Sigma_1 + a_2 \Sigma_2 + a_3 \Sigma_3 \quad [3.13]$$

$$C = gTSA \quad [3.14]$$

g, sayısal değişken ve T, S, A tensör çarpanlarıdır.

$$T = N_2 (I + t \Sigma_2) \quad [3.15.a]$$

$$S = N_1 (I + e \Sigma_1) \quad [3.15.b]$$

$$A = N_3 (I + s \Sigma_3) \quad [3.15.c]$$

Bu formüller SVD değildir. Fiziksel yorumları izleyen kısımlarda açıklanacaktır. Normalleştirme faktörü (N_i), T, S, A' nın izotropik olarak kutuplaşmış rastgele elektrik alan uygulandığında gücünü korumasından dolayı tanımlanmıştır.

$$N_1 = 1/\sqrt{1+e^2} \quad [3.16.a]$$

$$N_2 = 1/\sqrt{1+t^2} \quad [3.16.b]$$

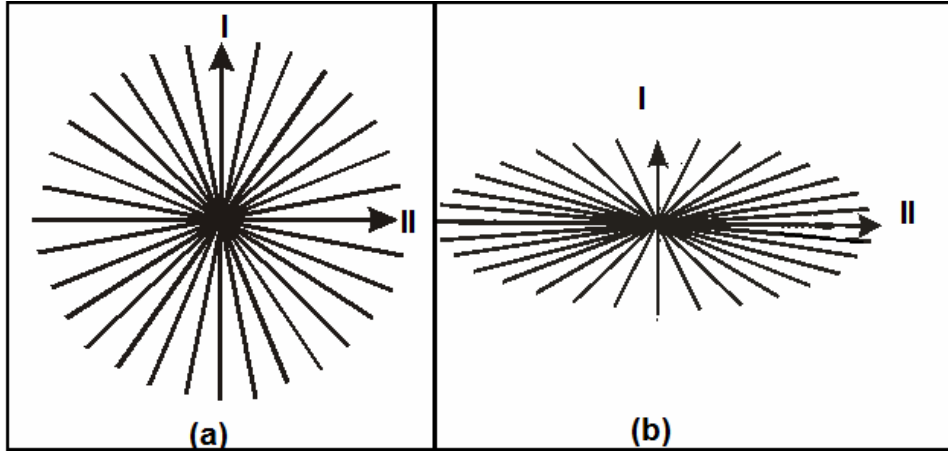
$$N_3 = 1/\sqrt{1+s^2} \quad [3.16.c]$$

T matrisi, bu normalleştirme ile normal dönme matrisine dönüşür. Normalleştirmenin amacı, T, S ve A' nın elemanlarının hesaplamalar sırasında sınırlı kalmasını garantilemektir. “Anizotropi” veya “Splittin” tensörü,

$$A = N_3 (I + s \Sigma_3) = N_3 \begin{pmatrix} 1+s & 0 \\ 0 & 1-s \end{pmatrix} \quad [3.17]$$

İki alan bileşenini basit olarak gerer. Bölgesel kaynaklı indüksiyonla elde edilen empedans tensörünün içinde var olan anizotropiye eklenir. Bu bozucu anizotropi, indüktif anizotropiden deneysel metodlar haricinde ayırd edilemez. Fakat Z_2 ' in içindeki anizotropinin, bağımsız olarak bilinmesi durumunda, varlığı hakkında yorum yapılabilir. Fiziksel olarak A tensörü varlığını açıklamamız mümkündür (Şekil 3.2). Anizotropi tensörünün etkisi birim vektörler üzerinde pozitif s değeri için gösterilmiştir.

Her iki asal eksen boyunca uzanan elektrik alanının yöneliminin değişmemesi dikkat çekmektedir.



Şekil 3.2 Birim vektörler topluluğu ile (a) Splitting tensörü uygulamadan önceki ve (b) Splitting tensörü uygulama sonrası, değişimler. X eksenini yukarı, Y sağa doğru. (Groom ve Bailey, 1989)

“Shear” tensörü(Deformasyon teorisi için analogi tarafından isimlendirilmiştir),

$$S = N_1(I + e\Sigma_1) = N_1 \begin{pmatrix} 1 & e \\ e & 1 \end{pmatrix} \quad [3.18]$$

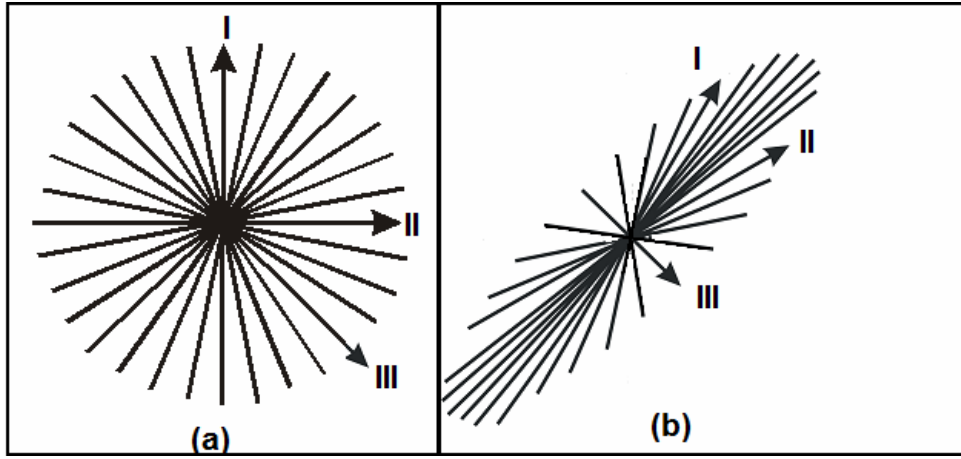
Bölgesel indüktif asal eksenleri ikiye bölen anizotropiyi açıklar. Şekil (3.3)' de Shear tensörünün etkisi, birim vektörler üzerinde pozitif shear(e) değeri için gösterilmiştir. Asal eksene uyan vektörler için, maksimum açısal değişiklikleri meydana getirmesi dikkat çekmektedir. X eksenindeki (koordinat sisteminin tersi sistem(y,x)) bir $\tan^{-1}(e)$ açısı tarafından saat yönünde döndürüldüğü, ve benzer olarak, y eksenindeki vektörlerin aynı açı ile saat yönü tersine döndüğü görülmektedir. Bu nedenle Shear(e), Shear açısı $\theta_e = \tan^{-1}(e)$, olarak ifade edilmesi yararlı olur.

“Twist” tensörünün etkisi,

$$T = N_2(I + t\Sigma_2) = N_2 \begin{pmatrix} 1 & -t \\ t & 1 \end{pmatrix} \quad [3.19]$$

Elektrik alan vektörlerini saat yönünde $\tan^{-1}(t)$ açısı ile döndürür. Twist(t), twist açısını ($\theta_e = \tan^{-1}(e)$) tanımlar.

Sonuç olarak g, elektrik alanın ölçeklenmesinin tanımlar. T, S ve A normalleştirilmiş ve elde edilen değerler C' den bir sayısal etken (g) kadar farklı olacağı için g kullanışlıdır diyebiliriz. Ne g, nede A tensörü, Z_{2B} tensöründen, $Z'_{2B} = gAZ_{2B}$ bağıntısı ideal 2-B empedans tensörüne eşit gerçeklikte olduğu sürece, tanımlanamaz. Bundan dolayı burada Z'_{2B} ' i bulmaya çalışırız. Burada gA etkisini statik shift etkisi olarak yorumlayabiliriz. Bunun üstesinden gelmek için birçok araştırmacı genelde daha sık çalışmalarda kullanılan (TEM) yöntemini önermektedir.



Şekil 3.3 Birim vektörler topluluğu ile (a) Shear tensörü uygulamadan önceki ve (b) Shear tensörü uygulama sonrası, değişimler. X eksenini yukarı, Y sağa doğru. (Groom ve Bailey, 1989)

3.3 Empedans Tensörünün Ayrıştırılması

Bahsi geçmiş bozunma tensörü ayrıştırma eşitlik (3.14), (3.8) eşitliğinde yerine konursa,

$$Z_m = g R T S A Z_{2B} R^T, \quad [3.20]$$

sonucuna ulaşılır. Burada gA, önceki kısımda bahsi geçen nedenlerden dolayı yok varsayılabilir,

$$Z_m = R T S Z_{2B} R^T. \quad [3.21]$$

Eşitlik (3.20)'de 7 tane gerçel parametre olduğu görülmektedir. Bunlardan ilk dördü, 2-B empedans tensörü içerisinde tanımlanan a(büyük asal empedans değeri) ve b(küçük asal empedans değeri)' nin gerçel ve sanal bölümüdür. Azimut açısı θ , Shear açısı $\theta_e = \tan^{-1}(e)$ ve Twist açısı $\theta_t = \tan^{-1}(t)$ ' de diğer üç parametreyi ifade etmektedir. Ölçülen veriden, bu parametreleri hesaplamak için, bu parametrelerin, açıkça ayrıştırma dışında, veriyle ilişkilendirilmesi gerekmektedir. Z_m , geleneksel olarak, toplam katsayısı α_i ile temsil edilmektedir.

$$Z_m = \frac{1}{2}(a_0 I + a_1 \Sigma_1 + a_2 \Sigma_2 + a_3 \Sigma_3), \quad [3.22]$$

ve,

$$a_0 = Z_{xx} + Z_{yy} \quad [3.23.a]$$

$$a_1 = Z_{xy} + Z_{yx} \quad [3.23.b]$$

$$a_2 = Z_{yx} - Z_{xy} \quad [3.23.c]$$

$$a_3 = Z_{xx} - Z_{yy} \quad [3.23.d]$$

Eğer eşitlik (3.20)' de ki ayrıştırma sonuçları, dış çarpım ise, Sonuca ulaşabilmek için bazı cebirsel işlemlerden sonra, aşağıdaki doğrusal olmayan denklemleri üretir,

$$a_0 = t\sigma + e\delta \quad [3.24.a]$$

$$a_1 = (\delta - et\sigma)\cos 2\theta - (t\delta + e\sigma)\sin 2\theta \quad [3.24.b]$$

$$a_2 = -\sigma + et\delta \quad [3.24.c]$$

$$a_3 = -(t\delta + e\sigma)\cos 2\theta - (\delta - et\sigma)\sin 2\theta \quad [3.24.d]$$

geleneksel tanımlamada,

$$\sigma = a + b \text{ ve } \delta = a - b, \quad [3.25]$$

gibi asal empedansların farkları veya toplamı kullanılır. Bu durumda bazı belirsizliklerin olması mümkündür.

Burada görülüyor ki, ayrıştırma işleminin bir düz çözümü vardır. Buradan yola çıkarak izleyen eşitlikte ki gibi hata enerjisini en küçükleyen bir ters çözüm algoritması yazmamız, yani çözümün en küçük kareler yöntemi ile bulunabilmesi olasıdır.

$$\mathcal{E}^2 = \frac{\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 |\hat{Z}_{ij} - Z_{ij}|^2}{\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 |Z_{ij}|^2} \quad [3.26]$$

Burada \hat{Z}_{ij} modellenen empedans tensörü ve Z_{ij} ölçülen empedans tensörüdür. Bu problemin çözümünde en küçük kareler yöntemi kullanılmıştır. Groom ve Bailey(1989) yazdıkları programlarda Levenberg-Marquardt (sönümlü en-küçük kareler) yöntemini kullanmışlardır.

Groom ve Bailey(1989) bu çalışmalar sırasında N adet frekans değeri için 7N, 6N+1, 4N+3 adet bilinmeyen parametrenin elde edilmesi üzerinde durmuştur. 7N kısıtlamasında her bir frekansta tüm parametreler elde edilmektedir, 6N+1 kısıtlamasında azimut açısı sabitlenerek çözüm aranmakta ve son olarak 4N+3 kısıtlamasında ise tüm frekanslar için Twist, Shear ve azimut açısı sabit olarak hesaplanmaktadır.

4 FREKANS DÜZGÜNLEŞTİRİLMİŞ EMPEDANSIN ÇOK NOKTA ÇOK FREKANS AYRIŞTIRMASI

Frekans düzgünleştirici empedans(Frequency-normalized empedance(FNI)) , ilk olarak Başokur (1994) tarafından ortaya atılmış, empedansı frekansa göre normalleştirmek için tanımlanmıştır(Basokur, 1994). FNI aşağıdaki bağıntı ile tanımlanır.

$$F = Z/(i\omega\mu)^{1/2} \quad [4.1]$$

Burada ω , açısal frekans, μ , manyetik geçirgenlik ve F ise Frekans düzgünleştirici empedans(Frequency-normalized empedance(FNI)) olarak tanımlanmaktadır. FNI ile Cagniard' ın (1953) görünür öz direç bağıntısı F_r , FNI gerçel kısmı ve F_s , FNI sanal kısmı olmak üzere izleyen şekilde ifade edilmektedir.

$$\rho_a = Y_r^2 + Y_s^2 \quad [4.2]$$

Bu bilgiler ışığında Eşitlik (2.10), FNI içerecek biçimde yazılırsa 3-B FNI bağıntısı,

$$F_{xx} \neq F_{yy} \neq F_{xy} \neq F_{yx} \neq 0 \text{ olmak üzere,}$$

$$F = \begin{vmatrix} F_{xx} & F_{xy} \\ F_{yx} & F_{yy} \end{vmatrix} \quad [4.3]$$

elde edilir. Benzer şekilde bütün eşitlikler FNI cinsinden yazılabilir. (3.1) ve (3.2) eşitlikleri sırasıyla yazılırsa,

$$e = F_{2B} h_r = \begin{bmatrix} 0 & a \\ -b & 0 \end{bmatrix} h_r \quad [4.4]$$

$$e = C e_r = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 \\ C_3 & C_4 \end{bmatrix} e_r \quad [4.5]$$

$$F_m = C F_{2B} \quad [4.6]$$

elde edilir. Üçüncü bölümdeki tüm işlemler, FNI için de sırasıyla yapılırsa sonuçta

$$F_m = R C' F'_{2B} R^T \quad [4.7]$$

denklemleri bulunur. FNI, Pauli Spin matrisleri ile ifade edilirse,

$$F_m = \frac{1}{2} (a_0 I + a_1 \Sigma_1 + a_2 \Sigma_2 + a_3 \Sigma_3), \quad [4.8]$$

ve,

$$a_0 = F_{xx} + F_{yy} \quad [4.9.a]$$

$$a_1 = F_{xy} + F_{yx} \quad [4.9.b]$$

$$a_2 = F_{yx} - F_{xy} \quad [4.9.c]$$

$$a_3 = F_{xx} - F_{yy} \quad [4.9.d]$$

Burada işlemlerin tekrar FNI cinsinden yazılmasının sebebi, FNI için düz çözüm eşitliğini çıkarmaktır.

4.1 FNI Tensörü Kullanılarak Ayırıştırma Düz Çözümü

Eşitlik (4.3)' de verilen FNI matrisinin elemanlarını ($F_{xx}, F_{xy}, F_{yx}, F_{yy}$), bozunma parametreleri olan a, b, e, t, θ ile ifade ederek, Problem için düz çözüm bağıntısı bulunmuş olur. Bunun için, öncelikle eşitlik (3.24)' de verilen eşitlikler, (4.8) eşitliğinde yerlerine konursa izleyen şekilde ifade edilir.

$$F_m = \frac{1}{2} \left(\begin{aligned} & (t\sigma + e\delta) I + ((\delta - et\sigma) \cos 2\theta - (t\delta + e\sigma) \sin 2\theta) \Sigma_1 \\ & + (-\sigma + et\delta) \Sigma_2 + (-(t\delta + e\sigma) \cos 2\theta - (\delta - et\sigma) \sin 2\theta) \Sigma_3 \end{aligned} \right) \quad [4.10]$$

Elde edilen bu eşitlikte, Eşitlik (3.12)' de ifade edilmiş olan Pauli Spin matrisleri ve eşitlik (3.25) de verilen 2-B empedans köşegen elemanları tanımlaması, (4.10) eşitliğinde yerlerine konursa denklem izleyen şekilde yazılır.

$$F_m = \frac{1}{2} \left[\begin{array}{c} \left(\begin{array}{cc} t(a+b)+e(a-b) & 0 \\ 0 & t(a+b)+e(a-b) \end{array} \right) + \left(\begin{array}{cc} 0 & a+b-et(a-b) \\ et(a-b)-a-b & 0 \end{array} \right) + \\ \left(\begin{array}{cc} 0 & (a-b-et(a+b))\cos 2\theta - (t(a-b)+e(a+b))\sin 2\theta \\ ((a-b-et(a+b))\cos 2\theta - (t(a-b)+e(a+b))\sin 2\theta & 0 \end{array} \right) \\ + \left(\begin{array}{cc} -(t(a-b)+e(a+b))\cos 2\theta - (a-b-et(a+b))\sin 2\theta & 0 \\ 0 & (t(a-b)+e(a+b))\cos 2\theta + (a-b-et(a+b))\sin 2\theta \end{array} \right) \end{array} \right] \quad [4.11]$$

Burada, (4.3) eşitliği, denklemin kapalı yazımı olduğuna göre, (4.11) eşitliğinde gerekli toplama işlemleri yapılır ve FNI empedansının elemanlarının parametreler cinsinden açık şekilde yazılımı bulunabilir. 2x2 boyutlarındaki FNI empedans matrisinin elemanları sırasıyla,

$$F_{xx} = t(a+b)+e(a-b) - (t(a-b)+e(a+b))\cos 2\theta - (a-b-et(a+b))\sin 2\theta \quad [4.12]$$

olur ve içler dışlar çarpımı ile,

$$F_{xx} = ta + tb + ea - eb - ta \cos 2\theta + tb \cos 2\theta - ea \cos 2\theta - eb \cos 2\theta - a \sin 2\theta + b \sin 2\theta + eta \sin 2\theta + etb \sin 2\theta \quad [4.13]$$

elde edilir. Benzer şekilde diğer Empedans elemanları da,

$$F_{xy} = a + b - eta + etb + a \cos 2\theta - b \cos 2\theta - eta \cos 2\theta - etb \cos 2\theta - ta \sin 2\theta + tb \sin 2\theta - ea \sin 2\theta - eb \sin 2\theta \quad [4.14]$$

$$F_{yx} = eta - etb - a - b + a \cos 2\theta - b \cos 2\theta - eta \cos 2\theta - etb \cos 2\theta - ta \sin 2\theta + tb \sin 2\theta - ea \sin 2\theta - eb \sin 2\theta \quad [4.15]$$

$$F_{yy} = ta + tb + ea - eb + ta \cos 2\theta - tb \cos 2\theta + ea \cos 2\theta + eb \cos 2\theta + a \sin 2\theta - b \sin 2\theta - eta \sin 2\theta - etb \sin 2\theta \quad [4.16]$$

olarak bulunur. Burada dikkat edilmesi gereken durum, hem 2-B, hem de 3-B empedans elemanlarının gerçel ve sanal kısımlarının hesabıdır.

$$a = a_R + ia_S \quad [4.17.a]$$

$$b = b_R + ib_S \quad [4.17.b]$$

(4.17) eşitlikleri, bahsi geçen empedans elemanları denklemlerinde (3.13, 3.14, 3.15, 3.16) yerlerine konulduğu zaman, empedans elemanlarının gerçel kısımlarını elde etmek için, bu denklemlerde a yerine a_R (2-B empedans köşegen(1. satır, 2.sütun) elemanının gerçel kısmı) ve b yerine b_R (2-B empedans köşegen(2. satır, 1.sütun) elemanının gerçel kısmı) konulmasının yeterlidir. Benzer biçimde empedansın sanal kısımlarını elde etmek için, a_S ve b_S kullanılır.

4.2 Kısmi Türevler Dizeyi

Ters çözüm işleminin yapılabilmesi için kısmi türevler dizeyini, sayısal olarak veya analitik olarak hesaplayabiliriz. McNeice and Jones' in (2001) geliştirmiş oldukları, genişletilmiş Groom-Bailey (GB) analizine benzer şekilde burada da S, manyetotellürik nokta sayısı, N, her noktadaki frekans sayısı olmak üzere, $(S \times N \times 8)$ adet veri seti varsayılmıştır. Buradaki "8" çarpanı empedansın 4 bileşeninin sanal ve gerçel değerlerini ifade etmektedir. Buna karşılık $S \times (N \times 4 + 2) + 1$ bilinmeyen parametre vardır. Burada ise $S \times N \times 4$ adet parametre, 2-B empedansın(Eşitlik 4.4) köşegen elemanlarının(a ve b) sanal ve gerçel değerlerini ifade etmektedir. $(S \times 2)$ adet parametre, tellürik bozunmalar olan twist(t) ve shear(s) açılarını ve 1 adet parametre de doğrultu açısını(strike) ifade etmektedir. Twist ve shear açıları, Her noktada değişmekte, fakat bir noktadaki bütün frekanslarda aynı varsayılmıştır.

Bu bilgiler ışığında kısmi türevler dizeyi $(S \times N \times 8) \times (S \times (N \times 4 + 2) + 1)$ boyutlarında bir dizeyi ifade eder. Burada tümevarım yaparak analitik olarak 8 adet verinin(3-B bozunmuş FNI sanal ve gerçel elemanları), 7 adet parametreye göre türevini alabiliriz. Buradan 56 adet türev denklemi sırası ile çözülebilir. Bu denklemler FNI' ın parametreler ile ilişkisini ortaya koyduğundan, Matrisin diğer elemanları sıfıra eşitlenmektedir.

FNI ilk elemanının(F_{xx}) gerçel ve sanal kısmının, parametrelere göre türevi eşitlik (4.13)' den,

$$\frac{\partial F_{xx_R}}{\partial a_R} = \frac{\partial F_{xx_S}}{\partial a_S} = t + e - t \cos 2\theta - e \cos 2\theta - \sin 2\theta + et \sin 2\theta \quad [4.18.a]$$

$$\frac{\partial F_{xx_R}}{\partial b_R} = \frac{\partial F_{xx_S}}{\partial b_S} = t - e + t \cos 2\theta - e \cos 2\theta + \sin 2\theta + et \sin 2\theta \quad [4.18.b]$$

$$\frac{\partial F_{xx_R}}{\partial b_S} = \frac{\partial F_{xx_R}}{\partial a_S} = \frac{\partial F_{xx_S}}{\partial b_R} = \frac{\partial F_{xx_S}}{\partial a_R} = 0 \quad [4.18.c]$$

$$\frac{\partial F_{xx_R}}{\partial t} = a_R + b_R - a_R \cos 2\theta + b_R \cos 2\theta + ea_R \sin 2\theta + eb_R \sin 2\theta \quad [4.18.d]$$

$$\frac{\partial F_{xx_R}}{\partial e} = a_R - b_R - a_R \cos 2\theta + b_R \cos 2\theta + ta_R \sin 2\theta + tb_R \sin 2\theta \quad [4.18.e]$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_{xx_R}}{\partial \theta} &= 2ta_R \sin 2\theta - 2tb_R \sin 2\theta + 2ea_R \sin 2\theta + 2eb_R \sin 2\theta \\ &\quad - 2a_R \cos 2\theta + 2b_R \cos 2\theta + 2eta_R \cos 2\theta + 2etb_R \cos 2\theta \end{aligned} \quad [4.18.f]$$

$$\frac{\partial F_{xx_S}}{\partial t} = a_S + b_S - a_S \cos 2\theta + b_S \cos 2\theta + ea_S \sin 2\theta + eb_S \sin 2\theta \quad [4.18.g]$$

$$\frac{\partial F_{xx_S}}{\partial e} = a_S - b_S - a_S \cos 2\theta + b_S \cos 2\theta + ta_S \sin 2\theta + tb_S \sin 2\theta \quad [4.18.h]$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_{xx_S}}{\partial \theta} &= 2ta_S \sin 2\theta - 2tb_S \sin 2\theta + 2ea_S \sin 2\theta + 2eb_S \sin 2\theta \\ &\quad - 2a_S \cos 2\theta + 2b_S \cos 2\theta + 2eta_S \cos 2\theta + 2etb_S \cos 2\theta \end{aligned} \quad [4.18.i]$$

elde edilir. Benzer şekilde FNI dizeyinin diğer elemanlarının (F_{xy}, F_{yx}, F_{yy}) gerçel ve sanal kısımlarının parametrelere göre türevi de sırası ile (4.14), (4.15), (4.16) eşitliklerinden yararlanarak, (4.19), (4.20), (4.21) eşitliklerinde izleyen şekilde ilk olarak bu çalışma kapsamında verilmiştir.

$$\frac{\partial F_{xy_R}}{\partial a_R} = \frac{\partial F_{xy_S}}{\partial a_S} = 1 - et + \cos 2\theta - et \cos 2\theta - t \sin 2\theta + e \sin 2\theta \quad [4.19.a]$$

$$\frac{\partial F_{xy_R}}{\partial b_R} = \frac{\partial F_{xy_S}}{\partial b_S} = 1 + et - \cos 2\theta - et \cos 2\theta + t \sin 2\theta - e \sin 2\theta \quad [4.19.b]$$

$$\frac{\partial F_{xy_R}}{\partial b_S} = \frac{\partial F_{xy_R}}{\partial a_S} = \frac{\partial F_{xy_S}}{\partial b_R} = \frac{\partial F_{xy_S}}{\partial a_R} = 0 \quad [4.19.c]$$

$$\frac{\partial F_{xy_R}}{\partial t} = -ea_R + eb_R - ea_R \cos 2\theta - eb_R \cos 2\theta - a_R \sin 2\theta + b_R \sin 2\theta \quad [4.19.d]$$

$$\frac{\partial F_{xy_R}}{\partial e} = -ta_R + tb_R - ta_R \cos 2\theta - tb_R \cos 2\theta - a_R \sin 2\theta - b_R \sin 2\theta \quad [4.19.e]$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_{xy_R}}{\partial \theta} &= -2a_R \sin 2\theta + 2b_R \sin 2\theta + 2eta_R \sin 2\theta + 2etb_R \sin 2\theta \\ &\quad - 2ta_R \cos 2\theta + 2tb_R \cos 2\theta - 2ea_R \cos 2\theta - 2eb_R \cos 2\theta \end{aligned} \quad [4.19.f]$$

$$\frac{\partial F_{xy_S}}{\partial t} = -ea_S + eb_S - ea_S \cos 2\theta - eb_S \cos 2\theta - a_S \sin 2\theta + b_S \sin 2\theta \quad [4.19.g]$$

$$\frac{\partial F_{xy_S}}{\partial e} = -ta_S + tb_S - ta_S \cos 2\theta - tb_S \cos 2\theta - a_S \sin 2\theta - b_S \sin 2\theta \quad [4.19.h]$$

$$\frac{\partial F^{xy_S}}{\partial \theta} = -2a_S \sin 2\theta + 2b_S \sin 2\theta + 2eta_S \sin 2\theta + 2etb_S \sin 2\theta - 2ta_S \cos 2\theta + 2tb_S \cos 2\theta - 2ea_S \cos 2\theta - 2eb_S \cos 2\theta \quad [4.19.i]$$

$$\frac{\partial F^{yx_R}}{\partial a_R} = \frac{\partial F^{yx_S}}{\partial a_S} = et - 1 + \cos 2\theta - et \cos 2\theta - t \sin 2\theta - e \sin 2\theta \quad [4.20.a]$$

$$\frac{\partial F^{yx_R}}{\partial b_R} = \frac{\partial F^{yx_S}}{\partial b_S} = -et - 1 - \cos 2\theta - et \cos 2\theta + t \sin 2\theta - e \sin 2\theta \quad [4.20.b]$$

$$\frac{\partial F^{yx_R}}{\partial b_S} = \frac{\partial F^{yx_R}}{\partial a_S} = \frac{\partial F^{yx_S}}{\partial b_R} = \frac{\partial F^{yx_S}}{\partial a_R} = 0 \quad [4.20.c]$$

$$\frac{\partial F^{yx_R}}{\partial t} = ea_R - eb_R - ea_R \cos 2\theta - eb_R \cos 2\theta - a_R \sin 2\theta + b_R \sin 2\theta \quad [4.20.d]$$

$$\frac{\partial F^{yx_R}}{\partial e} = ta_R - tb_R - ta_R \cos 2\theta - tb_R \cos 2\theta - a_R \sin 2\theta - b_R \sin 2\theta \quad [4.20.e]$$

$$\frac{\partial F^{yx_R}}{\partial \theta} = -2a_R \sin 2\theta + 2b_R \sin 2\theta + 2eta_R \sin 2\theta + 2etb_R \sin 2\theta - 2ta_R \cos 2\theta + 2tb_R \cos 2\theta - 2ea_R \cos 2\theta - 2eb_R \cos 2\theta \quad [4.20.f]$$

$$\frac{\partial F^{yx_S}}{\partial t} = ea_S - eb_S - ea_S \cos 2\theta - eb_S \cos 2\theta - a_S \sin 2\theta + b_S \sin 2\theta \quad [4.20.g]$$

$$\frac{\partial F^{yx_S}}{\partial e} = ta_S - tb_S - ta_S \cos 2\theta - tb_S \cos 2\theta - a_S \sin 2\theta - b_S \sin 2\theta \quad [4.20.h]$$

$$\frac{\partial F^{yx_S}}{\partial \theta} = -2a_S \sin 2\theta + 2b_S \sin 2\theta + 2eta_S \sin 2\theta + 2etb_S \sin 2\theta - 2ta_S \cos 2\theta + 2tb_S \cos 2\theta - 2ea_S \cos 2\theta - 2eb_S \cos 2\theta \quad [4.20.i]$$

$$\frac{\partial F^{yy_R}}{\partial a_R} = \frac{\partial F^{yy_S}}{\partial a_S} = t + e + t \cos 2\theta + e \cos 2\theta + \sin 2\theta - et \sin 2\theta \quad [4.21.a]$$

$$\frac{\partial F^{yy_R}}{\partial b_R} = \frac{\partial F^{yy_S}}{\partial b_S} = t - e - t \cos 2\theta + e \cos 2\theta - \sin 2\theta - et \sin 2\theta \quad [4.21.b]$$

$$\frac{\partial F^{yy_R}}{\partial b_S} = \frac{\partial F^{yy_R}}{\partial a_S} = \frac{\partial F^{yy_S}}{\partial b_R} = \frac{\partial F^{yy_S}}{\partial a_R} = 0 \quad [4.21.c]$$

$$\frac{\partial F^{yy_R}}{\partial t} = a_R + b_R + a_R \cos 2\theta - b_R \cos 2\theta - ea_R \sin 2\theta - eb_R \sin 2\theta \quad [4.21.d]$$

$$\frac{\partial F^{yy_R}}{\partial e} = a_R - b_R + a_R \cos 2\theta + b_R \cos 2\theta - ta_R \sin 2\theta - tb_R \sin 2\theta \quad [4.21.e]$$

$$\frac{\partial F^{yy_R}}{\partial \theta} = -2ta_R \sin 2\theta + 2tb_R \sin 2\theta - 2ea_R \sin 2\theta - 2eb_R \sin 2\theta + 2a_R \cos 2\theta - 2b_R \cos 2\theta - 2eta_R \cos 2\theta - 2etb_R \cos 2\theta \quad [4.21.f]$$

$$\frac{\partial F^{yy_S}}{\partial t} = a_S + b_S + a_S \cos 2\theta - b_S \cos 2\theta - ea_S \sin 2\theta - eb_S \sin 2\theta \quad [4.21.g]$$

$$\frac{\partial F^{yy_S}}{\partial e} = a_S - b_S + a_S \cos 2\theta + b_S \cos 2\theta - ta_S \sin 2\theta - tb_S \sin 2\theta \quad [4.21.h]$$

$$\frac{\partial F_{yy_s}}{\partial \theta} = -2ta_s \sin 2\theta + 2tb_s \sin 2\theta - 2ea_s \sin 2\theta - 2eb_s \sin 2\theta + 2a_s \cos 2\theta - 2b_s \cos 2\theta - 2eta_s \cos 2\theta - 2etb_s \cos 2\theta \quad [4.21.i]$$

4.3 Ters Çözüm

FNI ayrıştırma işleminde, ters çözüm yaparak bozunma parametrelerini bulabilmemiz için gerekli olan düz çözüm ve kısmi türevler dizeyi hesabı önceki kısımlarda anlatılmıştır. Bu çalışma kapsamında ise MATLAB programlama dilinde sönümlü en küçük kareler algoritması ile hazırlanan programın Başokur' da (2002) anlatılan teorik bilgilerin, bu probleme uyarlanması izleyen şekilde maddeler halinde gösterilmiştir.

'Edi' dosyalarının okutulması ve FNI' ın elde edilmesi:

S, MT istasyon sayısı, N her istasyondaki frekans sayısı olmak üzere $S \times N \times 8$ adet veri okunur. Bunlar önceki kısımlarda anlatıldığı gibi FNI empedansına çevirilir. Okunan 'edi' dosyalarının spectra veya computed formatında olması önemli değildir. Maksimum yinleme sayısı, hata kriteri, epsilon sönüm katsayısı bu kısımda algoritmaya verilir. Ayrıca twist, shear, strike ve 2-B FNI elemanları gibi, $S \times (N \times 4 + 2) + 1$ adet ön kestirim parametreleri ($P0(S \times (N \times 4 + 2) + 1)$) giriş olarak algoritmaya verilir.

1. Bölüm (4.1) de anlatılan düz çözüm eşitlikleriyle ön kestirim parametrelerinden kuramsal veri (F_k) hesaplanması:

Giriş değerleri: $P0()$, S, N

Çıkış değerleri: $F_k()$

2. $N \times S \times 8$ adet ölçülen kuramsal veri farklarının hesaplanması :

Giriş değerleri: S, N, $F_k()$, $F()$

Çıkış değerleri: $dd()$

3. Eşitlik (4.22)' de, bu maddeyi izleyen şekilde gösterilen çakışma ölçütünün hesaplanması :

$$chi = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{N \times S \times 8} (Fk(i) - F(i))^2 \right]^{1/2} \quad [4.22]$$

Giriş değerleri: S, N, dd()

Çıkış değerleri: chi

4. Kısmi türevler dizeyinin bölüm (4.2)' de anlatılan eşitliklerle hesaplanması:

Giriş değerleri: S, N, P0()

Çıkış değerleri: a(,)(iki boyutlu dizey)

5. Parametre farklarının eşitlik (4.23)' de gösterileceği gibi doğrusal olmayan problemlerin ters çözümü için kullanılan sönümlü en küçük kareler (Lines ve Treitel, 1984) ile hesaplanması:

$$\Delta p = (A^T A + \varepsilon^2 I)^{-1} A^T \Delta d \quad [4.23]$$

Giriş değerleri:a(,), eps, dd()

Çıkış değerleri: dp()

6. İzleyen (4.24) eşitliği ile (geçici) parametrelerin hesaplanması:

$$p^{yineleme} = p^{yineleme-1} + \Delta p^{yineleme} \quad [4.24]$$

Giriş değerleri:P0(), dp(),S,N

Çıkış değerleri: P()(geçici parametreler)

7. Bölüm (4.1) de anlatılan düz çözüm eşitlikleriyle hesaplanan parametrelerden tekrar kuramsal veri(Fk) hesaplanması:

Giriş değerleri: P(), S, N

Çıkış değerleri: Fk()

8. NxSx8 adet ölçülen kuramsal veri farklarının tekrar hesaplanması :

Giriş değerleri: S, N, Fk(), F()

Çıkış değerleri: ddg() (geçici veri farkları)

9. Eşitlik (4.22)' den çakışma ölçütünün tekrar hesaplanması :

Giriş değerleri: S, N, dd()

Çıkış değerleri: chig (geçici chi değeri)

10. Algoritmanın yanlgı enerjisi daha az noktaya gidip gitmediğinin denetlenmesi:

Eğer, yeni bulunan chig değeri eski chi'den küçük ise;

A. P0()=P() geçici parametreler ön-kestirim parametreleri yapılır.

B. chi=chig geçici çakıştırma ölçütü, çakıştırma ölçütü yapılır.

C. dd()=ddg() geçici veri farkları veri farkları yapılır.

D. Kuramsal ve ölçülen veri arasındaki hata(Eşitlik 4.25) %10⁻⁷'den küçükse programı durdurmak amacı ile 12. adıma geçilir.

$$\text{Hata} = \left(\frac{\sum_{i=1}^{NxSx8} dd(i)^2}{\sum_{i=1}^{NxSx8} F(i)^2} \right) \times 100 \quad [4.25]$$

E. Kuramsal ve ölçülen veri arasındaki hata %10⁻⁷'den büyükse adım 5'e gidilerek yineleme işlemine devam edilir.

Eğer, yeni bulunan chig değeri eski chi'den büyük ise daha küçük yanlgı enerjisi veren parametre kümesi hesaplanamamıştır. Adım 12'ye geçilir.

11. Yineleme işlemi tamamlanmıştır. Elde edilen 2-B FNI (4.2) ve (4.1) eşitliği ile görünür özdirenç değerleri ve normal empedans değerleri hesaplanır. Görünür özdirençler frekansın bir fonksiyonu olarak çizdirilir. Empedans ve görünür özdirençler 'dosya adı+dcm.edi' olarak hafızaya kaydedilir. Bozunma parametreleri '.txt' uzantılı olarak kaydedilir ve ekrana yazdırılır.

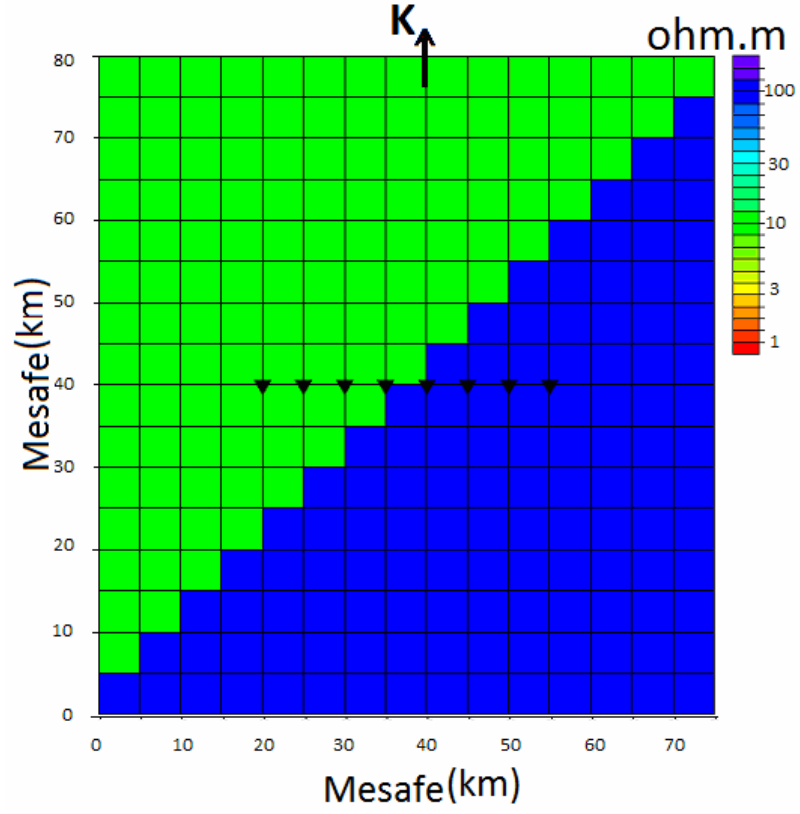
5 YAPAY VERİ UYGULAMASI

FNI ayrıştırma programını test etmek amacıyla, birçok yapay model üzerinde araştırmalar yapılmıştır. Fakat bu tez kapsamında, bu metodun etkinliğini göstermek amacıyla sadece üç modele yer verilmiştir. Programın temel mantığını düşündüğümüzde, seçtiğimiz modele, sadece bir doğrultu vererek programın en önemli parametresi olan doğrultu(strike) açısını, ne kadar hassasiyette bulunduğunun görülmesi gerekmektedir. Bunun için izleyen bölümlerde anlatılacak olan 45 derece doğrultulu ve 0 derece doğrultulu iki model üzerinde, yeryüzünde MT sondaj istasyonları varsayarak 3-B MT modelleme programıyla 'edi' dosyaları elde edilmiştir. Daha sonra bu dosyalar, yapılan ayrıştırma programında giriş olarak kullanılıp ayrıştırma işlemi yapılmıştır. Sonuçta programın strike açısını ne kadar hassas bulunduğu gösterilmiştir. Bunun yanı sıra McNeice and Jones' in de (2001) kullandıkları bir model kullanılıp, düz çözümle elde edilen verilerin empedansları, onların da uyguladıkları bozunma matrisleriyle çarpılarak bozulmuştur. Daha sonra bu verileri FNI ayrıştırma programında deneyerek, çarpılan bozunma parametreleriyle ve McNeice and Jones' in (2001) sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu şekilde programın kullanılabilirliğinin sınaması yapılmaktadır.

5.1 Model-1

Strike açısının bulunmasını test etmek amacıyla 'WinGling' programı kullanılarak yer altının şekil (5.1)' deki gibi 45 derece doğrultulu bir yapıda olduğu varsayılmıştır. Şekil (5.1), modelin üstten ilk tabakasının görünüşüdür ve 10 ohm.m ile 100 ohm.m özdirençlerinde iki yapı ile ifade edildiği görülmektedir. Bu yapı derinlere gidildikçe değişmemektedir. Üçgenler ise MT istasyonlarını ifade etmekte olup, bu istasyonlarda modelleme yapılarak 'edi' dosyaları elde edilmiştir. Modellemede elde edilen verilerin frekans aralığı 1e-4 Hz ile 1e+4 Hz arasında seçilmiştir.

'Edi' uzantılı dosyalar (nkt1, nkt2, nkt3, nkt4, nkt5', nkt6, nkt7, nkt8), FNI ayrıştırma programında giriş verisi olarak kullanılmış ve şekil (5.2)' de görüldüğü gibi ön-kestirim değerleri verilmiştir. Program sonuç olarak 45.05 derece strike açısı ve diğer bozunma parametrelerini de 0.00 derece bulmuştur. Elde edilen sonuçlar bozunma olmayan durumlarda doğrultu bulunmasında programın çok iyi sonuçlar bulduğunun göstergesidir.



Şekil 5.1 Model-1' in üstten görünümü

Şekil 5.2 Ön-kestirim parametreleri

Programın orijinal çıktısı EK-1' de gösterime sunulmuştur. İterasyon, programın hangi yinelemede olduğunu, uygun iterasyon, programın yaptığı yinelemelerde hangi

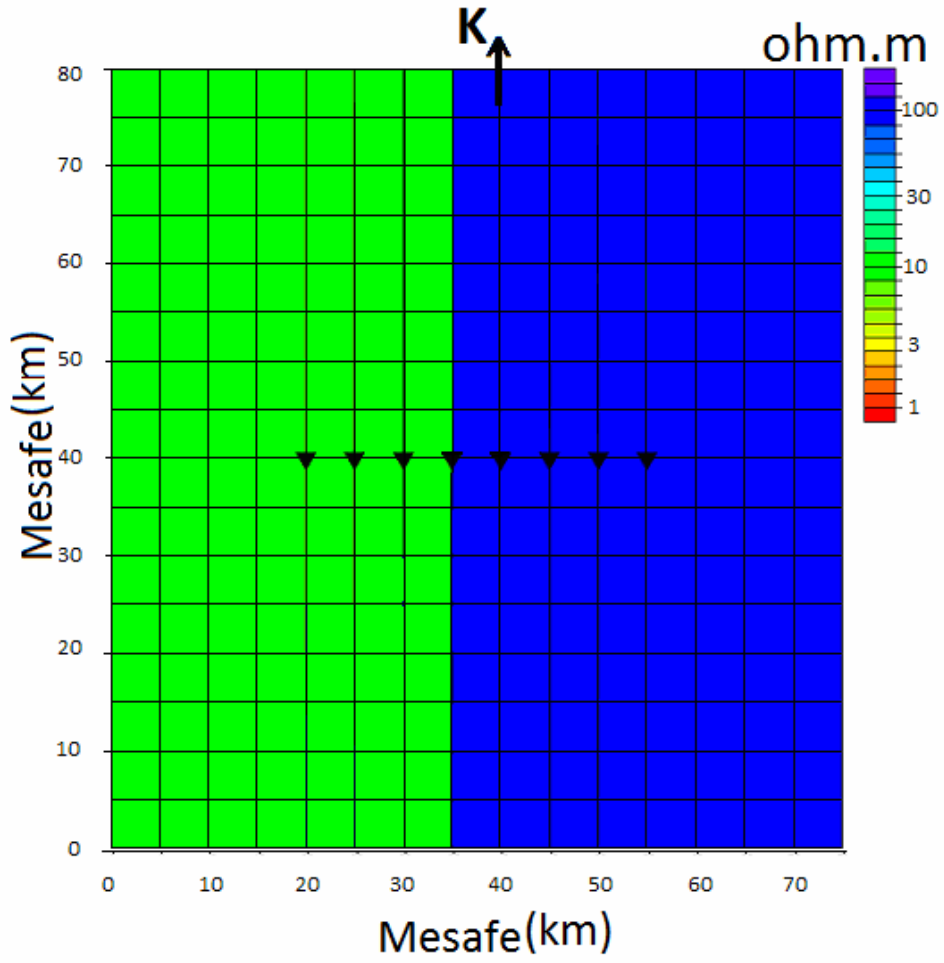
yinelemede en uygun sonucu bulduğu, hata, eşitlik (4.25)' de hesaplanan durdurma kriterini, chi, eşitlik (4.22)' den hesaplanan çakışma ölçütünü, epsilon ise ön-kestirimde kullanıcı tarafından girilen ve 'chi' ölçütünün uygun olmadığı durumlarda artırılarak veya azaltılarak değiştirilebilen, sönümlü en küçük kareler sönüm katsayısını ifade etmektedir.

EK-1' de ki sonuçlara bakıldığında 9. yinelemede iyi bir sonucun bulunmuş ve daha sonraki yinelemede de hata düşmemiştir. Daha sonra program, epsilon değerini artırarak daha uygun sonuçları aramış ve 13. yinelemede en uygun sonucu bulmuştur. 15. yinelemeye kadar epsilonu değiştirmiş, fakat ön-kestirimde yineleme sayısı 15 yineleme ile sınırlandırıldığı için durmuştur. Program ayrıca bulduğu 2-B' lu empedans değerlerini edi uzantılı dosyalar oluşturarak(nkt1dcm.edi, nkt2dcm.edi, nkt3dcm.edi, nkt4dcm.edi, nkt5dcm.edi', nkt6dcm.edi, nkt7dcm.edi, nkt8dcm.edi) otomatik olarak kaydetmektedir.

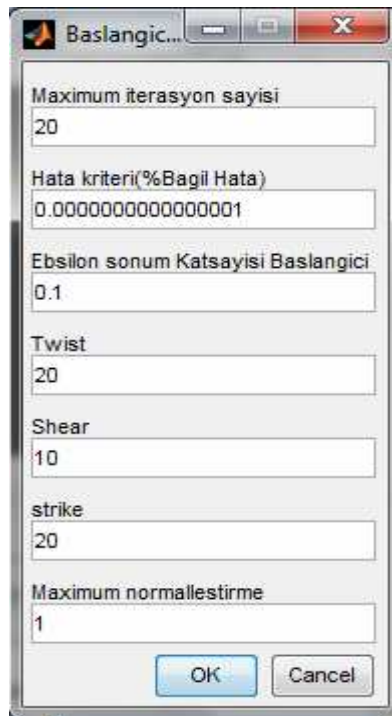
5.2 Model-2

Strike açısının bulunmasını test etmek amacıyla kullanılan modellerden bir tanesi de, yer altının şekil (5.3)' deki gibi 90 derece doğrultulu bir yapıda olduğu varsayımdır. Şekil (5.3), modelin üstten ilk tabakasının görünüşüdür ve 10 ohm.m ile 100 ohm.m öz dirençlerinde iki yapı ile ifade edildiği görülmektedir. Bu yapı da derinlere gidildikçe değişmemektedir.

Modelleme yaparak 'Edi' uzantılı dosyalar (nkt1, nkt2, nkt3, nkt4, nkt5', nkt6, nkt7, nkt8), elde edilmiştir. Modellemede elde edilen verilerin frekans aralığı yine $1e-4$ Hz ile $1e+4$ Hz arasında seçilmiştir. FNI ayrıştırma programına girdi olarak verilmiş ve şekil (5.4)' de görüldüğü gibi ön-kestirim değerleri verilmiştir. Program sonuç olarak 0.00 derece strike açısı ve diğer bozunma parametrelerini de 0.00 derece bulmuştur. Gerçek modelin doğrultusu ile ayrıştırma sonucu arasında 90 derecelik bir fark olması da doğrultu bulunmasında programın çok iyi sonuçlar bulduğunun göstergesidir. Bunun nedeni doğrultu bulmada 90 derecelik belirsizliğin, tüm ayrıştırma yöntemlerinde olabilmesidir. Yani ayrıştırma sonuçlarını gerçek verilerde uygularken, 90 derece ekleyip çıkarmak, verinin yine aynı olması demektir.



Şekil 5.3 Model-2' in üstten görünümü



Şekil 5.4 Ön kestirim parametreleri

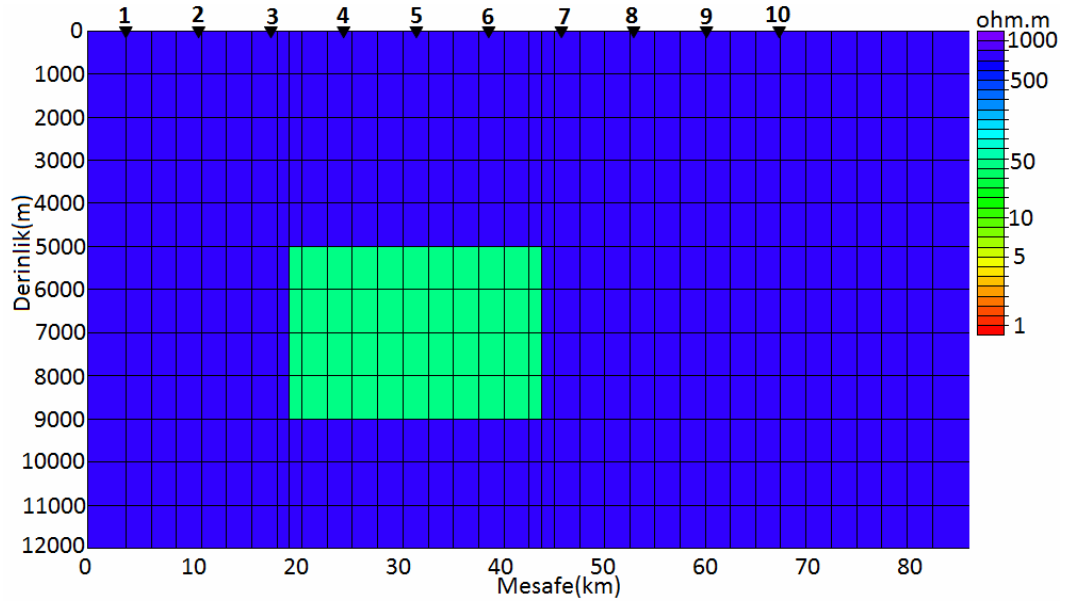
Programın orijinal çıktısı EK-2' de gösterime sunulmuştur. Buradaki sonuçlara bakıldığında 13. yinelemede en iyi sonuç bulunmuş ve daha sonraki yinelemede de hata düşmemiştir. Daha sonra program, epsilon değerini artırarak daha uygun sonuçları aramış olmasına rağmen 17. yinelemeye kadar epsilonu değiştirmiş, fakat program beş kere epsilon değiştirildiğinde durdurulmaya programlandığı için durmuştur.

5.3 Model-3

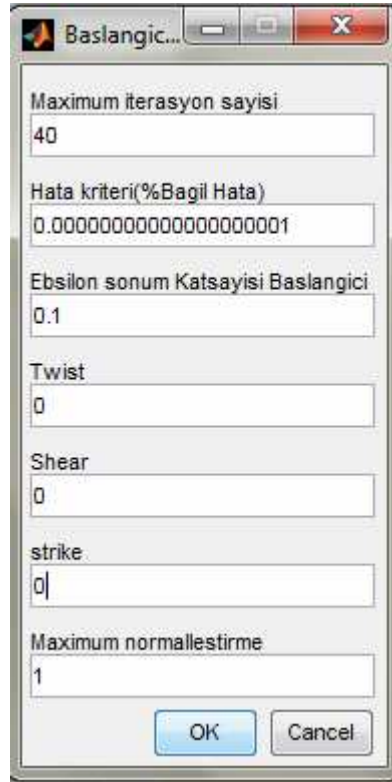
McNeice and Jones' in (2001) tasarladıkları model, FNI ayrıştırma programı ile McNeice and Jones' in (2001) yaptıkları programı karşılaştırmak için, 'WinGling' paket programı kullanarak tamamıyla aynı parametrelerde olan şekil (5.5)' de ki gibi tekrar tasarlanmıştır. 'WinGling' programını kullanarak 10 farklı noktada frekans aralığı $1e-4$ Hz ile $1e+4$ Hz arasında değişen veri oluşturulmuştur (Şekil 5.5).

Verilerin empedansları, EK-6' da ki tabloda verilmiş olan bozunma parametreleriyle (Sadece galvanik bozunmalar) bozularak yeni bozulmuş veriler elde edilmiştir. Daha sonra bu veriler (syn001a.edi, syn002a.edi, syn003a.edi, syn004a.edi, syn005a.edi, syn006a.edi, syn007a.edi, syn008a.edi, syn009a.edi, syn010a.edi), FNI ayrıştırma programında giriş olarak kullanılmış ve şekil (5.6)' de görüldüğü gibi önkestim değerleri verilmiştir. FNI ayrıştırması sonucunda EK-3' de ki sonuçlar bulunmuştur.

Tabloda(EK-6) McNeice and Jones' in (2001) programlarının sonuçları ve EK-3' de ki sonuçlar karşılaştırıldığında, FNI ayrıştırma programının sonuçlarının daha hassas sonuçlar ürettiği göze çarpmaktadır.



Şekil 5.5 Model-3' ün kesit şeklinde görünümü



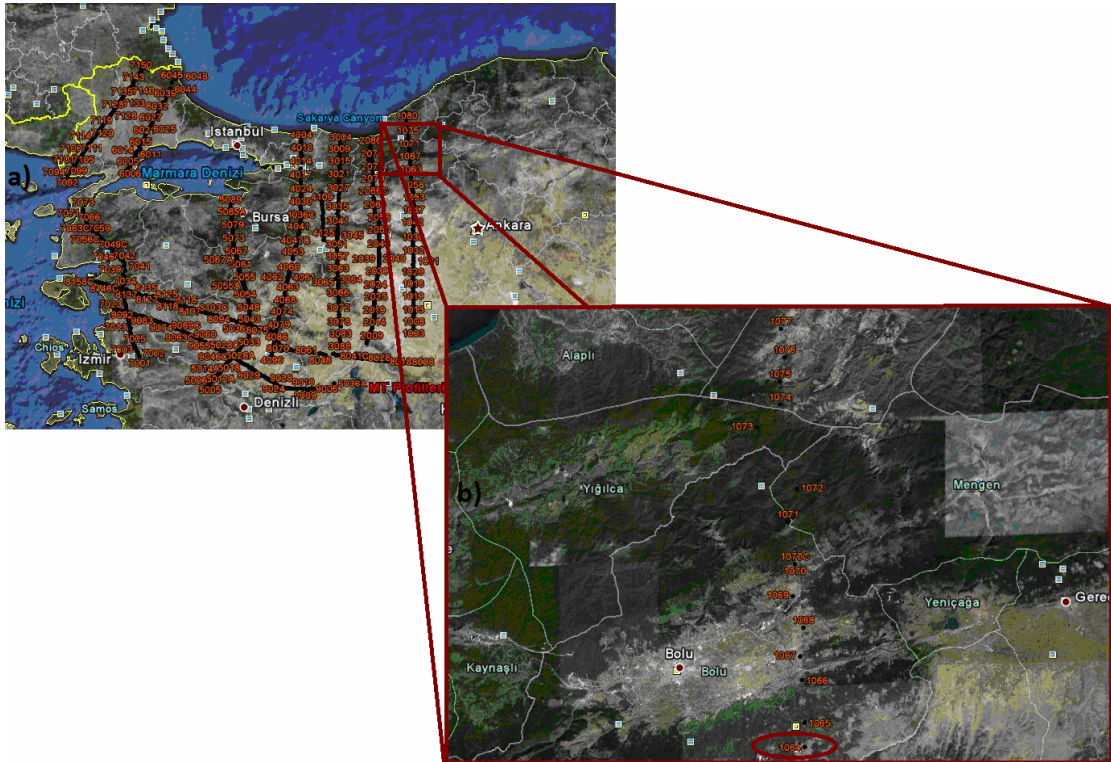
Şekil 5.6 Ön kestirim parametreleri

6 GERÇEK VERİ UYGULAMASI

Programın denenmesi için 106G043 numaralı 'Kuzey-Batı Anadolu 'nun Kabuk Yapısının Jeofizik Yöntemlerle Araştırılması' adlı TÜBİTAK projesi kapsamında, birinci profilin 64 numaralı istasyonunda alınan MT verisi, GB ve FNI ayrıştırma programıyla ayrıştırılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca birinci profilin 64 ve 75 numaralı istasyonları arasında bulunan, Kuzey Anadolu fayını kesen tüm istasyonlardaki veriler yine iki programla ayrıştırılıp sonuçları karşılaştırılmıştır.

6.1 Tek İstasyon Verisinin Ayrıştırılması

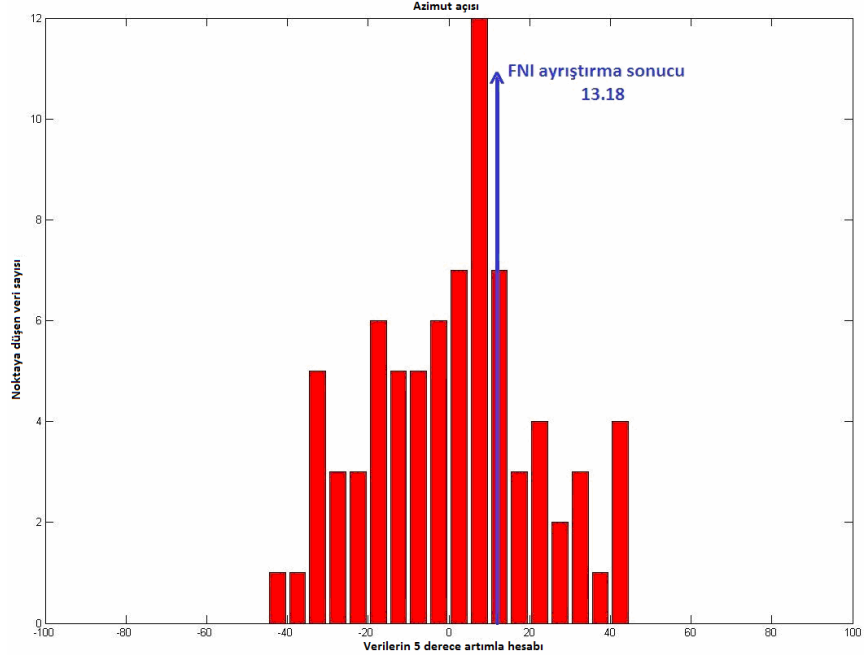
TÜBİTAK projesi kapsamında, birinci profil, 64 numaralı istasyonunun konumu şekil (6.1) de izleyen şekilde görülmektedir.



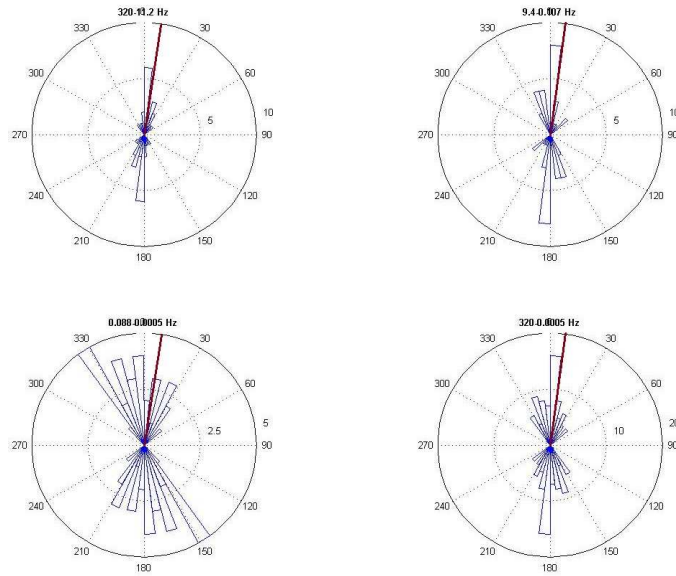
Şekil 6.1 a) 105G145 No' lu TÜBİTAK projesi kapsamında MT istasyonlarının yerleri, b) Tez kapsamında kullanılan 12 MT istasyonunun yeri.

(105G145 No' lu TÜBİTAK projesi 7. dönem proje gelişme raporu)

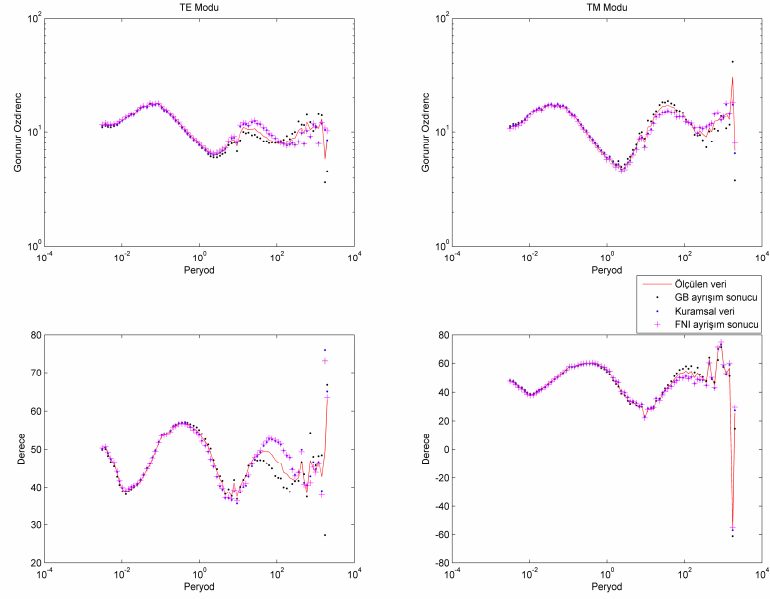
Veri, öncelikle GB ayrıştırma analiziyle ayrıştırılarak 78 frekans($3.2e+2$ Hz ve $5e-4$ Hz arasında) için doğrultu açıları bulunmuştur. Bu açı değerleri bir istasyonda tek açı bulmak için, belirli açı aralıklarına karşı gelen, açıların sayıları kullanılarak gül diyagramı ve sütun grafik şeklinde sunulmuştur(Şekil 6.2 ve 6.3). Grafiklerde yaklaşık olarak doğrultu açısının 5 ile 15 derece aralığında olduğu görülmektedir. FNI ayrıştırması sonucu bulunan doğrultu açısı, iki program arası benzerliği göstermek amacı ile şekil (6.2)' de mavi ok, şekil (6.3)' de kırmızı çizgi ile ifade edilmiştir. Her iki programın sonuçları karşılaştırıldığında FNI ayrıştırması sonucunun, GB analizinin çözüm aralığında olduğu görülmektedir. Burada FNI ayrıştırması ile GB analizindeki doğrultu açısı tahmini pratik hale gelmektedir. FNI ayrıştırma programının 'edi dosyası' yazdırma kısmından elde edilen veriyle, GB analizinden tahmin edilen açığa döndürülmüş veri, aynı açı değerine döndürme yapılmasına karşın, farklıdır. Bunun nedeni FNI ayrıştırmasında veriden etkisi giderilen diğer parametrelerdir. Bu parametreler 'Twist' ve 'Shear' açılarıdır. Bu istasyonda twist değeri -0.20 derece, shear değeri ise 1.22 derece bulunmuştur. İki programdan elde edilen ayrıştırılmış veriler, şekil (6.4)' de karşılaştırılmaktadır. Ayrıca arazide ölçülen veri ile kuramsal verinin çakışması da gösterilmektedir. Burada GB analizinde bulunan sonuç 5 derece ile 15 derece arasında değişmesine rağmen, FNI ayrıştırma programında bulunan 13.18 derece olarak varsayılmıştır. Daha sonra veri 13.18 derece doğrultusuna döndürülerek, FNI ayrıştırma programından elde edilen veriyle karşılaştırılmıştır. Böylece diğer bozunma parametreleri olan twist ve shear açısının, düşük değerlerde olduğu durumlarda da veride değişimlere yol açtığını görülmektedir.



Şekil 6.2 1064 numaralı istasyon MT verisinin 78 frekansta GB ayrıştırma analizi sonucu bulunan doğrultu açılarının sütun grafik ile gösterilmesi ve FNI ayrıştırmasında bulunan doğrultu açısının izdüşümü.



Şekil 6.3 1064 numaralı istasyon MT verisinin 78 frekansta GB ayrıştırma analizi sonucu bulunan doğrultu açılarının gül diyagramında gösterilmesi ve FNI ayrıştırmasında bulunan doğrultu açısının izdüşümü.

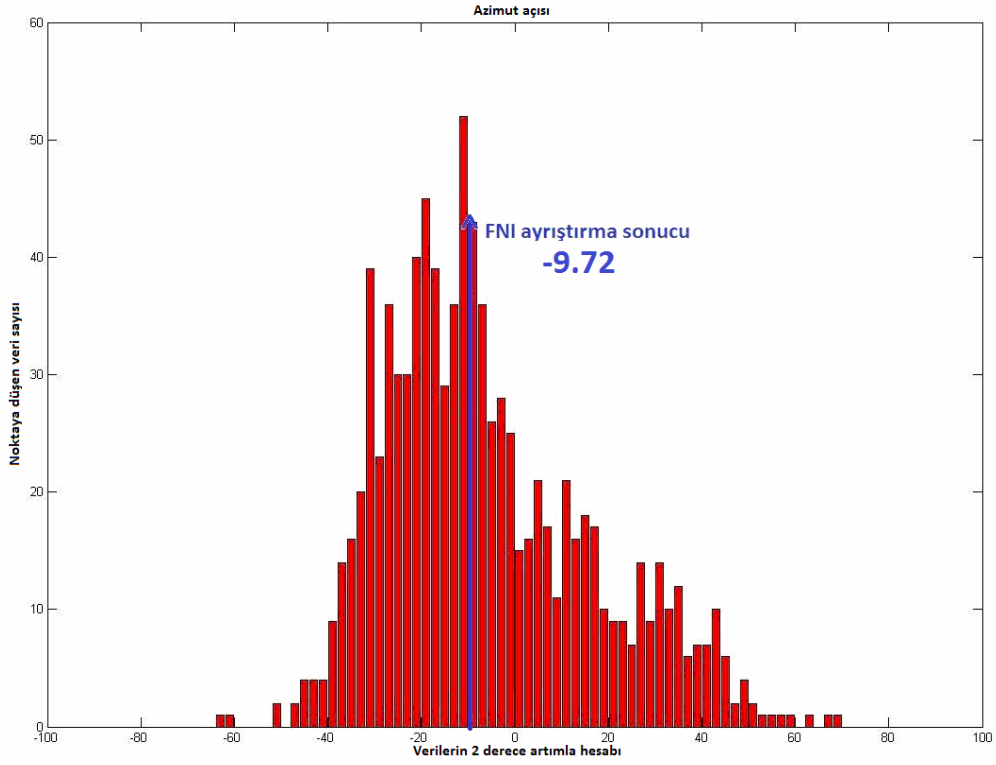


Şekil 6.4 1064 numaralı istasyon MT verisinin, FNI ve GB analizi ile ayrıştırılması sonucu elde edilen görünür öz direnç eğrilerinin karşılaştırması.

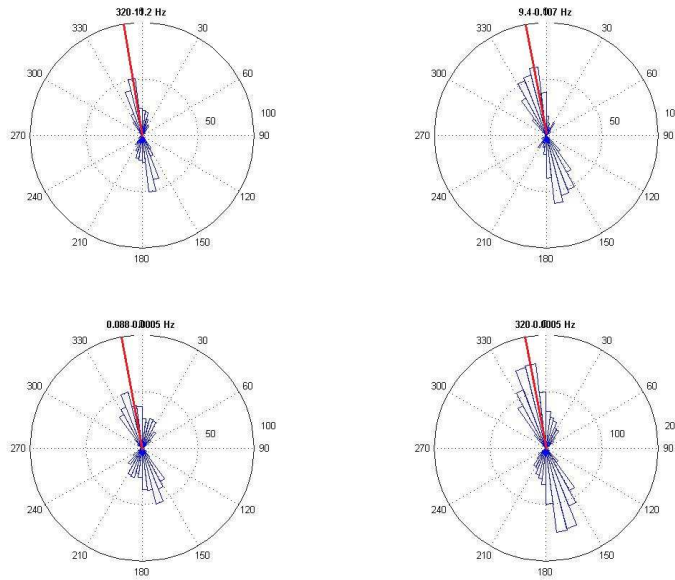
6.2 Çok Verinin Ayrıştırılması

Birinci profilin 64 ve 75 numaralı istasyonları arasında bulunan, Kuzey Anadolu fayını kesen tüm istasyonların konumları şekil (6.1)' de dikdörtgen çerçeve içerisinde gösterilmiştir.

Verilerin, GB ayrıştırma analizi ile tüm istasyonlarının, $3.2e+2$ Hz ve $6.3e-2$ Hz frekansları arasındaki 50 frekansı için doğrultu açıları bulunmuştur. Bu açı değerleri bölgesel doğrultu açısını bulmak amacıyla, belirli açı aralıklarına karşı gelen, bu aralıklardaki veri sayıları gül diyagramında ve sütun grafik şeklinde sunulmuştur (Şekil 6.5 ve 6.6). Önceki örneğe benzer şekilde, FNI ayrıştırması sonucu bulunan doğrultu açısı, iki program arası benzerliği göstermek amacı ile şekil (6.5)' de mavi ok, şekil (6.6)' de kırmızı çizgi ile ifade edilmiştir. Her iki programın sonuçları karşılaştırıldığında FNI ayrıştırması sonucunun, GB analizinin çözüm aralığında olduğu görülmektedir. FNI ayrıştırma programında bulunan bozunma parametreleri EK-5' de görülmektedir.

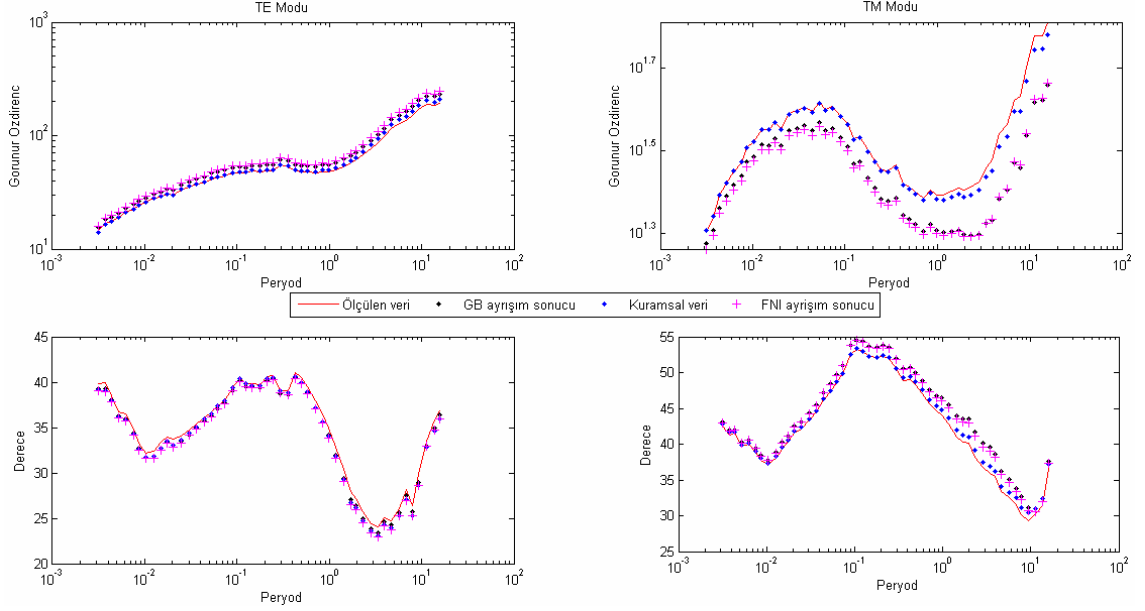


Şekil 6.5 12 istasyon 50 frekansta GB ayrıştırma analizi sonucu bulunan doğrultu açılarının sütun grafik ile gösterilmesi ve FNI ayrıştırmasında bulunan doğrultu açısının izdüşümü.

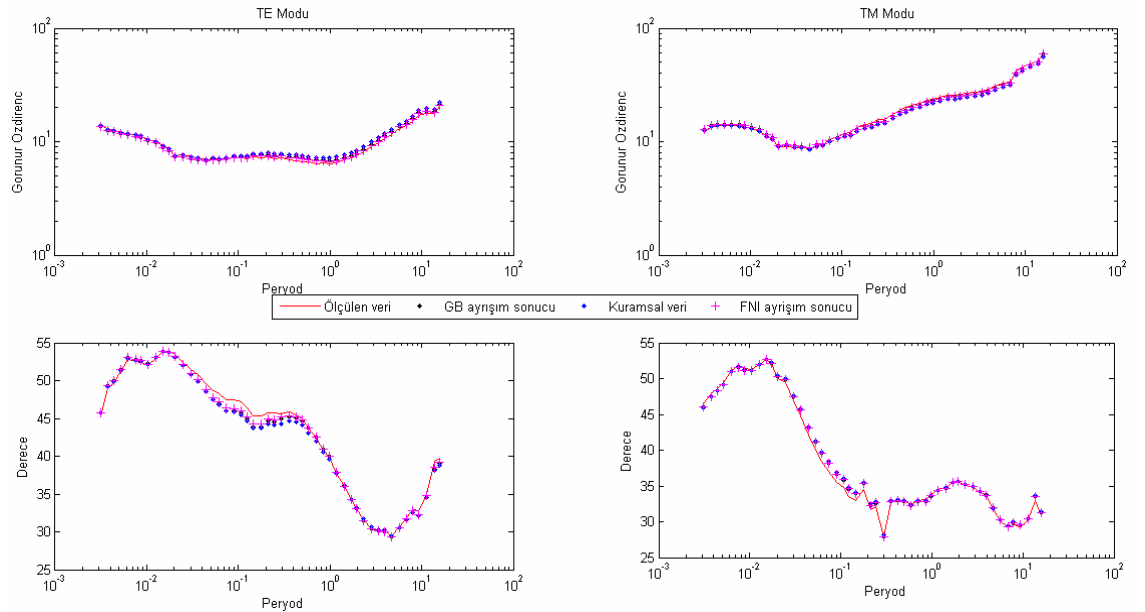


Şekil 6.6 12 istasyon 50 frekansta GB ayrıştırma analizi sonucu bulunan doğrultu açılarının gül diyagramında gösterilmesi ve FNI ayrıştırmasında bulunan doğrultu açısının izdüşümü.

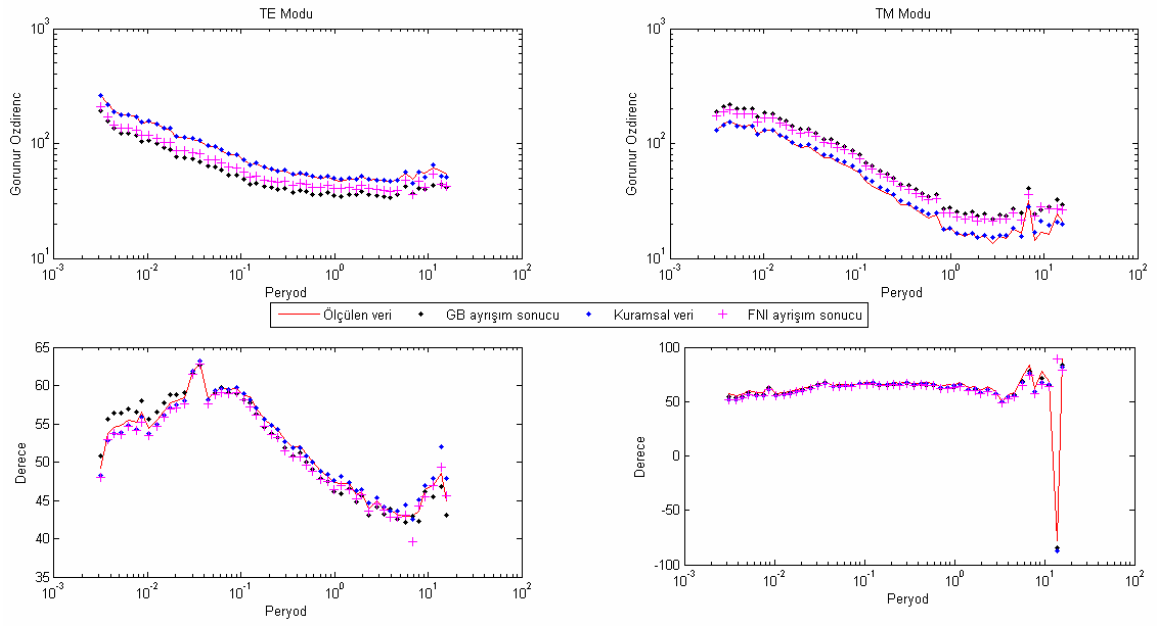
İki programdan elde edilen ayrıştırılmış verileri karşılaştırmak amacıyla, kullanılan 12 istasyondan 4 MT eğrisi(1067, 1068, 1071, 1075 numaralı) izleyen şekilde sunulmaktadır. Ayrıca ölçülen veri ile kuramsal verinin çakışması da gösterilmektedir.



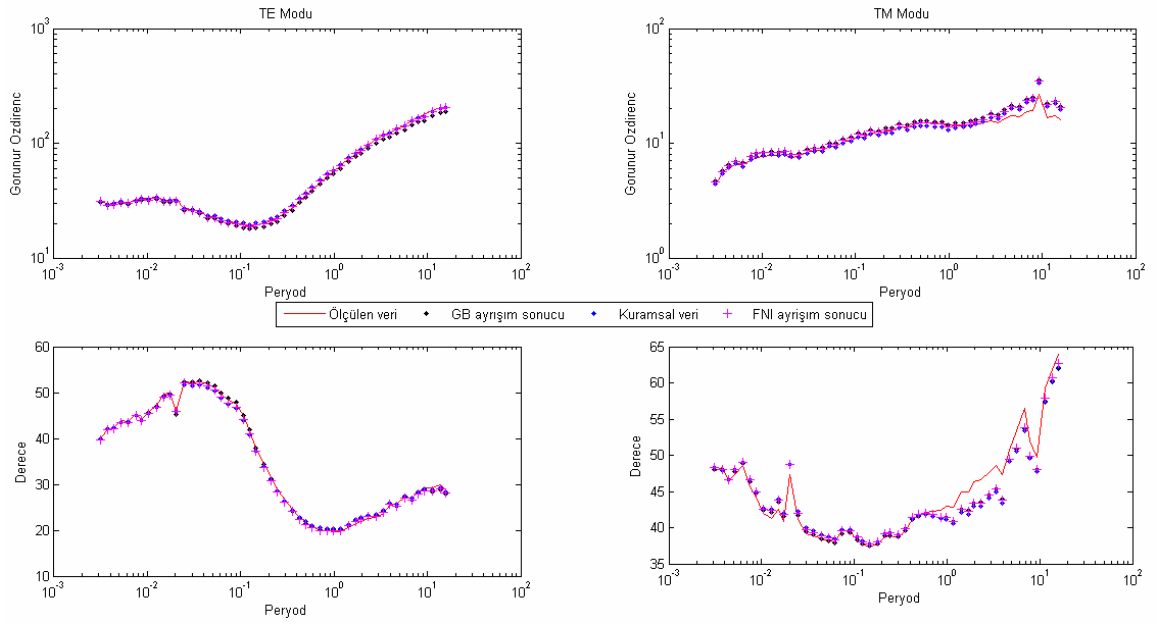
Şekil 6.7 1067 numaralı istasyon MT verisinin, çoklu FNI ve GB analizi ile ayrıştırılması sonucu elde edilen görünür öz direnç eğrilerinin karşılaştırması.



Şekil 6.8 1068 numaralı istasyon MT verisinin, çoklu FNI ve GB analizi ile ayrıştırılması sonucu elde edilen görünür öz direnç eğrilerinin karşılaştırması.



Şekil 6.9 1071 numaralı istasyon MT verisinin, çoklu FNI ve GB analizi ile ayrıştırılması sonucu elde edilen görünür öz direnç eğrilerinin karşılaştırması.



Şekil 6.10 1075 numaralı istasyon MT verisinin, çoklu FNI ve GB analizi ile ayrıştırılması sonucu elde edilen görünür öz direnç eğrilerinin karşılaştırması.

7 SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan uygulamalar kapsamında, MT ayırıştırma işlemi, yorumların gerçekçiliği açısından yöntemin en önemli kolunu oluşturmaktadır. Önceki çalışmaların da etkisi ve yardımı ile tez kapsamında amaçlanan FNI ayırıştırma programı yazılmış ve önceki yöntemlerden daha iyi sonuçlar ürettiği görülmüştür.

Denemeler sonucunda McNeice ve Jones' in (2001) programında, ters çözüm aşamasında 2-B empedans köşegen elemanlarının ön kestiriminde, eksikler olduğu görülmüştür. Bu eksikler göz önüne alınarak FNI ayırıştırma programında bu eksiklikler giderilmiştir. Bununla birlikte iki programın sonuçları karşılaştırıldığında FNI ayırıştırma programının doğruya daha yaklaştığı görülmüştür. Gerçek verilerdeki denemelerde GB ayırıştırması ve FNI ayırıştırmasının sonuçlarının farklı olmasının sebebi, FNI ayırıştırma programında ayırıştırılan diğer parametrelerdir. GB analizinde sadece doğrultu açısına göre grafikler çizilirken, FNI ayırıştırmasında bulunan diğer parametrelerin etkisinden dolayı, GB analizinde bölgesel doğrultu açısını farklıdır.

Programda, sönümlü en küçük kareler sönüm katsayısının seçimi oldukça önemlidir. Sadece bu programın çalışmasına dayalı olarak, epsilon değerinin büyük seçilmesi (>1000), sonuca daha küçük adımlarla gidileceği için, programın gereksiz yere çok yinleme yapmasına neden olmaktadır. Aksine epsilonun küçük seçilmesi de (<0.001), adım aralığı çok büyük olacağı için sonuca hiç gitmeyecektir. Denemelerde epsilon değerinin 0.1 ile 50 değerleri arasında, özellikle 0.1 de, en iyi sonuçlara ulaştığı görülmüştür. Program kapsamında $0.1e-10$ dan küçük hatalarda gerçek sonuçların aynıysa denecek kadar bozunma değerlerine ulaşılmış ve bu hata değerine sadece 10 yinelemede ulaşılabilir.

Uygulamalardan ve GB analizi ile karşılaştırmalardan, yapılan programın kullanılabilir değerler ürettiği görülmüştür. GB analizindeki bölgesel açı değerinin tahmininin zorluğu, bu program ile aşılmıştır. GB analizinde etkisi veriden giderilemeyen diğer bozunma parametreleri olan Twist ve Shear açısı, FNI ayırıştırma programında veriden kolaylıkla ayırıştırılabilmektedir

KAYNAKLAR

- Bahr, K., 1988, Interpretation of magnetotelluric impedance tensor: regional induction and local telluric distortion, *J. Geophys. Res.*, 62, 119-127.
- Bibby, H. M., Caldwell, T. G., Brown, C., 2005, Determinable and non determinable parameters of galvanic distortion in magnetotellurics, *Geophys. J. Int.*, 163, 915-930.
- Caldwell, T.G., Bibby, H.M., Brown, C., 2004, The magnetotelluric phase tensor, *Geophys. J. Int.*, 152, 457-469.
- Chave, A.D. and Smith, J.T., 1994, On electric and magnetic galvanic distortion tensor decompositions, *J. Geophys. Res.*, 99, 4669-4682.
- Eggers, D.E., 1982, An eigenstate formulation of the magnetotelluric impedance tensor, *Geophysiscs*, 47, 1204-1214.
- Groom, R. W., and Bahr, K., 1992, Corrections for near surface effects: Decomposition of the magnetotelluric impedance tensor and scaling correction for regional resistivities: A tutorial, *Survey in Geophys.*, 13, 341,379.
- Groom, R. W., and Bailey, R. C., 1989, Decomposition of Magnetotelluric impedance tensors in the presence of three-dimensional galvanic distortion, *J. Geophys. Res.*, 94, 1913-1925.
- Groom, R. W., Bailey R. C., 1991, Analitic investigations of the effects of near surface 3-D galvanic scatterers on MT tensor decompositions *Geophysiscs*, 56, 496-518.
- Kaya, C., 2002, Frekans düzgünlenmiş empedans fonksiyonu ile Statik-kayma düzeltmesi, Doktora tezi, A.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Latorraca, G. A., Madden, T. R., and Korringa J., 1986, An analysis of the magnetotelluric impedance for three-dimensional conductivity structures, *Geophysics*, 51, 1819-1826.
- Lezaeta, P., 2001, Distorsion analysis and 3-D modelling of magnetotelluric data in the Southern Central Andes: Dissertation.
- Lezaeta, P., Munoz, M., Brasse, H., 2000, Magnetotelluric image of the crust and upper mantle in the backarc of the Northwestern Argentinean Andes, 142, 841-854.
- McNeice, G. W., and Jones, A. G., 2001, Multisite, multifrequency tensor decomposition of magnetotelluric data, *Geophysics*, 66, 158-173.
- Smith, J.T., 1997, Estimating galvanic-distortion magnetic fields in magnetotellurics, *Geophys. J. Int.*, 130, 65-72.
- Weckmann, U., Ritter, O., Haak, V., 2003, Images of the magnetotelluric apparent resistivity tensor, 155, 456-468.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel bilgiler

Adı Soyadı	Özcan ÖZYILDIRIM
Doğum Yeri ve Tarihi	Ankara, 03/12/1984
Medeni Hali	Bekar
Yabancı Dil	İngilizce
İletişim Adresi	Kanuni mah. 919. sok 9/7 Keçiören/Ankara
E-posta Adresi	jeoozcan@hotmail.com

Eğitim ve Akademik Durumu

Lise	Keçiören Lisesi/ANKARA, 1999–2001
Lisans	Ankara Üniversitesi/ANKARA, 2002–2006
Yüksek Lisans	Cumhuriyet Üniversitesi/SİVAS, 2007-.