

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MANYETOTELLÜRİK YÖNTEMDE SONLU FARKLAR
İLE İKİ BOYUTLU MODELLEME**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Berk YAKAR

Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Jeofizik Mühendisliği Programı

OCAK 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MANYETOTELLÜRİK YÖNTEMİNDE SONLU FARKLAR METODU
İLE İKİ BOYUTLU MODELLEME**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Berk YAKAR
(505061402)**

Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Jeofizik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. H. İlyas ÇAĞLAR

OCAK 2012

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 505061402 nnumaralı Yüksek LisansÖğrencisi **Berk YAKAR**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**MANYETOTELLÜRİK YÖNTEMDE SONLU FARKLAR İLE İKİ BOYUTLU MODELLEME**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. H. İlyas ÇAĞLAR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. H. İlyas ÇAĞLAR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

.....
Prof. Dr. Gülçin ÖZÜRLAN
AĞAÇGÖZGÜ
İstanbul Teknik Üniversitesi

.....
Doç. Dr. M. Emin CANDANSAYAR
Ankara Üniversitesi

Teslim Tarihi : **23 Aralık 2011**
Savunma Tarihi : **20 Ocak 2012**

Aileme,

ÖNSÖZ

Bu çalışma İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeofizik Mühendisliği Ana Bilim Dalı'ndaki Jeofizik Mühendisliği Programı için Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Bana tez konusunu öneren ve danışmanlığımı yapan, tez çalışması boyunca yardımlarını eksik etmeyen ve çalışmalarım sırasında tecrübelerinden yararlandığım sayın hocam Prof. Dr. İlyas ÇAĞLAR ile tüm bölüm hocalarıma teşekkür ederim. Çalışmam esnasında karşılaştığım sorunları aşmamda yardımlarını, kaynaklarını ve zamanlarını esirgemeyen sayın hocalarım Doç. Dr. Emin CANDANSAYAR'a ve Yrd. Doç. Dr. Bülent TANK'a ayrıca teşekkür ederim.

En son olarak aileme, bana verdikleri manevi ve maddi destekler için sonsuz teşekkür ederim.

Aralık 2011

Berk YAKAR
Jeofizik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
2. MANYETOTELLÜRİK YÖNTEM VE İLKELERİ	5
2.1 Manyetotellürik Yöntem	5
2.2 Yer Manyetik Alanı.....	6
2.2.1 Yer manyetik alanında meydana gelen değişimler	7
2.2.2 Jeomanyetik küçük değişimler.....	9
2.3 Manyetotellürik Yöntemin Üstünlükleri ve Zayıf Noktaları.....	9
2.4 Manyetotellürik Yöntemde Ölçü Düzenegi	9
2.4.1 Ölçülen büyüklükler.....	11
2.5 Manyetotellürik Kuram	12
2.5.1 Maxwell denklemleri	12
2.5.2 Elektromanyetik dalga denklemlerinin çıkarımı.....	13
2.5.3 Özdirenç için Tikhonov-Cagniard yaklaşımı.....	15
2.5.4 Tikhonov-Cagniard özdirenci	15
2.5.5 Elektromanyetik alan nüfuz derinliği.....	16
3. MANYETOTELLÜRİK YÖNTEMDE İKİ BOYUTLU MODELLEME	17
3.1 Temel Denklemler.....	18
3.2 Sonlu Farklar ile Düz Çözüm	18
3.2.1 TE modu için sonlu fark denklemleri	22
3.2.2 TM modu için sonlu fark denklemleri	23
3.3 Model Ağının Tasarlanması	25
3.4 Sınır Koşulları	25
3.5 Genel Dizey Denklemlerinin Elde Edilmesi ve Çözümü.....	25
3.6 Jeolojik Doğrultuya Dik Alanların Hesaplanması.....	27
4. MANYETOTELLÜRİK YÖNTEMDE MODELLEME ÇALIŞMALARI ...	29
4.1 Manyetotellürik Yöntemde TE ve TM modlarının Zayıflık ve Üstünlükleri...	29
4.2 Programın Test Edilmesi.....	29
4.2.1 Analitik çözüm ile sonuçların karşılaştırılması.....	30
4.2.2 İki tabakalı ortam modeli	31
4.2.3 Fay modeli.....	35
4.2.4 Dirençli dayk modeli.....	37
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	39
KAYNAKLAR.....	41

EKLER.....	45
ÖZGEÇMİŞ.....	51

KISALTMALAR

AMT	: Audio Magnetotelluric
CSAMT	: Controlled Source Audio Magnetotelluric
YMA	: Yer Manyetik Alanı
S	: Düzenli Günlük Değişimler
L	: Aysal Günlük Değişimler
D	: Ani Değişimler
Pc	: Sürekli küçük titreşimler
Pi	: Düzensiz titreşimler
MT	: Manyetotellürik
TE	: Transverse Electric
TM	: Transverse Magnetic
SF	: Sonlu Farklar
SE	: Sonlu Elemanlar
B	: Manyetik akı (Weber/m ²)
D	: Elektrik deplasman (Coulomb/m ³)
d	: Nüfuz derinliği (m)
E	: Elektrik alan şiddeti (mV/km)
Ex,Ey,Ez	: Elektrik alan bileşenleri (mV/km)
e	: Üstel sabit (~2,7)
ε	: Dielektrik sabiti (farad/m)
f	: Frekans (Hz)
H	: Manyetik alan şiddeti (γ(gamma))
Hx,Hy,Hz	: Manyetik alan bileşenleri (γ (gamma))
i	: Birim karmaşık sayı (√-1)
J	: Akım yoğunluğu (Amper/m ²)
k	: Dalga sayısı
λ	: Dalga boyu
μ	: Manyetik geçirgenlik (Henry/m)
ρ	: Görünür özdirenç (Ωm)
σ	: İletkenlik (S-(mho/m))
T	: Periyot (s)
t	: Zaman (s)
ω	: Açısal frekans (2πf-(radyan/s))
X(f)	: Ayrık Fourier dönüşümü
Z	: Empedans (Ω)

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : TE ve TM modlarının karşılaştırılması	29
Çizelge 4.2 : Hesaplama da kullanılan frekanslar	30
Çizelge A.1 : Model 1 için ağ parametreleri.....	46
Çizelge A.2 : Model 2 için ağ parametreleri.....	46
Çizelge A.3 : Model 3 için ağ parametreleri.....	46
Çizelge A.4 : Model 4 için ağ parametreleri.....	46

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Yer Manyetik Alanının uzaydaki dağılımı.....	7
Şekil 2.2 : MT yönteminde ölçüm düzeneği.....	10
Şekil 2.3 : TE ve TM modları için elektrik ve manyetik alan bileşenleri.....	11
Şekil 3.1 : 1B ve 2B yapılar için iletkenlik modeli	18
Şekil 3.2 : Programın akış şeması.....	19
Şekil 3.3 : Sonlu farklar yöntemi için model ağı	21
Şekil 3.4 : Sonlu farklar ağı içindeki (i,j) düğüm noktası ve ona komşu noktaları	21
Şekil 3.5 : 9 adet düğüm noktasından oluşan model ağı.....	26
Şekil 4.1 : COMMEMI 2D-0 modeli.....	30
Şekil 4.2 : TM modu görünür öz direnç ve faz eğrileri ile analitik çözümün karşılaştırılması.	31
Şekil 4.3 : 2 tabakalı ortam öz direnç modeli, Model 1.....	32
Şekil 4.4 : Model 1 görünür öz direnç ve faz eğrileri.	32
Şekil 4.5 : Model 1 için TE ve TM moduna ait yer altı görünür öz direnç kesitleri. .	33
Şekil 4.6 : 2 tabakalı ortam öz direnç modeli, Model 2.....	34
Şekil 4.7 : Model 2 görünür öz direnç ve faz eğrileri.....	34
Şekil 4.8 : Model 2 için TE ve TM moduna ait yer altı görünür öz direnç kesitleri. .	35
Şekil 4.9 : Fay modeli, Model 3.	36
Şekil 4.10 : Model 3 için TE ve TM moduna ait yer altı görünür öz direnç kesitleri.....	36
Şekil 4.11 : Dirençli dayk modeli, Model 4.....	37
Şekil 4.12 : Model 4 için TE ve TM moduna ait yer altı görünür öz direnç kesitleri.....	38
Şekil B.1 : Model 3 TE modu için görünür öz direnç ve faz eğrileri	47
Şekil B.2 : Model 3 TM modu için görünür öz direnç ve faz eğrileri	48
Şekil B.3 : Model 4 TE modu için görünür öz direnç ve faz eğrileri.	49
Şekil B.4 : Model 4 TM modu için görünür öz direnç ve faz eğrileri.	50

MANYETOTELLÜRİK YÖNTEMİDE SONLU FARKLAR METODU İLE İKİ BOYUTLU MODELLEME

ÖZET

Jeofizikte doğal kaynaklı elektromanyetik yöntemlerden biride Manyetotellürik yöntemdir. Yer içinde bulunan doğal akımları kullanarak yer kabuğu ve üst mantonun elektriksel yapısı hakkında bilgi edinilebilir. Geniş bir frekans ($10^3 - 10^{-4}$ Hz) aralığında çalışan Manyetotellürik yöntem, yüksek frekanslar ile sığ kesimleri, alçak frekanslar ile derin kesimleri inceleyerek farklı araştırma alanlarında çalışmayı mümkün kılar.

Manyetotellürik yöntemde iki ayrı mod tanımı vardır. İlki elektrik alanının jeolojik doğrultuya paralel olduğu TE (Trasverse Electric) modu, diğeri ise manyetik alanın jeolojik doğrultuya paralel olduğu TM (Transverse Magnetic) modu. TE modunda akımlar yeraltındaki yapının etrafından akarlar ve boyuna manyetotellürik alanlar oluşturur. TM modunda ise akımlar yeraltındaki yapının içinden akar ve enine manyetotellrik alanlar meydana getirir. Bu durum TE modunun indüktif ve TM modunun galvanik yapısından açıklanır. Her iki mod doğaları gereği yeraltındaki farklı elektriksel yapıları diğere göre daha iyi çözümler. TE modu yeraltındaki iletken yapıların bulunmasında hassasiyet gösterirken TM modu ise dirençli yapılara karşı daha hassastır. Bu iki modun temel farklılıkları incelenen alanlardan farklı sonuçlar elde edilmesini sağlar. Bu fark bu çalışma kapsamında incelenmiştir.

Bu tez kapsamında MT yönteminde sonlu farklar tekniği kullanılarak iki boyutlu düz çözüm yapan bir algoritma MATLAB programlama dili kullanılarak geliştirilmiştir. Algoritma yeraltını öz direnç modelini dikdörtgen bloklara ayırarak hesaplama yapmaktadır. Bu çalışma kapsamında blok kalınlıkları sabit tutulmayıp model parametrelerine göre her model için farklı kullanılmıştır. Geliştirilen algoritma analitik çözüm ile karşılaştırılarak test edilmiştir. Daha sonra algoritma farklı iki boyutlu öz direnç modelleri ile denenmiştir. Bu denemelerde TE ve TM modu görünür öz direnç ve faz eğrilerinin davranışı incelenmiştir.

TWO DIMENSIONAL MODELING IN MAGNETOTELLURIC METHOD BY FINITE DIFFERENCE METHOD

SUMMARY

Electromagnetic methods for its name implies, places or time-varying electromagnetic fields electromagnetic wave in the analyzes. Collected in several different electromagnetic methods in the classroom. These are mainly derived from natural sources and man-made electromagnetic methods. In addition to the measurements made when the environment or the frequency domain and time domain electromagnetic methods can be classified as frequency domain electromagnetic methods. Electromagnetic methods can be used for investigating shallow or deep geological problems. At this point, the current source is natural or artificial originis important. Seeking the deep natural source methods in general, controlled source electromagnetic methods gives better results than shallow searches.

Methods from Artificial electromagnet methods, examines the transmitter and receiver interrelationships of the structure of the buried conductor. Transmitting method called controlled source electromagnetic fields known as the primary mechanism creates the source. The primary structure of the electromagnetic fields inducing in the conductive bottom of the secondary electromagnetic field. In this case, both areas the the receiver on Earth (Primary and Secondary) are measured. Comparison of the measured electromagnetic fields from the source and the donor information on the electrical properties of the subsurface structure can be achieved as a result.

Changes in the magnetic field is recorded continuously. This is mainly due to changes in the ionosphere. In the ionosphere, the rays from the sun's ultraviolet rays with a wavelength smaller influence, are accounted for as changes in the magnetic field. Changes occurring in the magnetic field is observed continuously in a systematic way. Interacting with the ionosphere, a layer of solar storms are caused by telluric currents. The bottom layer of the telluric currents induces currents in the ionosphere. Natural source electromagnetic methods works in a low frequency range unable to artificially create. Due to long period of attenuation low frequencies are preferred for deep research.

Magnetotelluric method has become quite popular in recent years. The main reason is the increase of the application of the method in research fields. Another method is to give good results in the face of different needs is preferred. Magnetotelluric method is used together with other geophysical methods. In common with the seismic method is the best example of these studies is the use of oil. In some cases the limits of the reservoir estimation of underground

geological structures applicable seismic method gives good results. The success of the magnetotelluric method in the seismic networks and related literature on this subject could not be a more challenging terrain conditions, the ability to take measurements along the profile is that it allows a comfortable and easy.

Physical aspects of the modeling studies examined the methods of theoretical data is obtained with the help of mathematical expressions. This theoretical data is obtained, visual data is compared with the values of the approximation. Learn about the structure shall be underground as a result of this approximation. Modeling results obtained are evaluated using a variety of inversion methods. Algorithm is sensitive to the development of a solid solution is extremely important for this reason.

In forward modeling algorithms, the physical and mathematical principles of the method used, as well as the method modeled in terms of geological properties of the subsurface structure is expected to be appropriate. Multi dimensional work is created for the underground structure of the rectangular cells. Each represent a physical parameter of the cell is constant, and is considered to represent the physical area covered by that cell.

Modelling studies are calculated separately for TE and TM modes. The length of the horizontal distance profile, refers to the depth of the vertical distance from the face of the earth. While the literature has analytical solution for the TM mode, the TE mode is not the case in the same situation. Difference from each other underground structures in TE and TM modes give different results.

TM mode of telluric currents in the flow inside the structure intact. This creates load up the anomaly. TM mode is sensitive to the nature of the galvanic prominent feature of the structure being modeled. TE mode, the telluric currents flowing around the structure so that the sensitivity to the nature of the structure of inductive load, and the TE mode structure is observed. These differences in sensitivity to differ significantly between TM and TE mode causes.

Algorithms are often interpreted using two-dimensional inversion of magnetotelluric data. MT method in two and three dimensional Helmholtz equations are solved using numerical methods. On MT forward modeling mostly finite difference solution (FD) or finite element (FE) numerical solution methods are used. Method of FE model by using complex models are able to solve the structure of the underground. However, this solution takes time. With finite difference solution easier and faster than the finite element method.

By nature, you find in the TE and TM modes in the structures in place of natural telluric currents will be different reactions to the show. The lateral and vertical limits of these modes differ from each other sensitivity. TE mode in the case of these currents, while the structure defining the upper and lower limits of the TM mode in the case of the lateral boundaries are decisive. In this case, consideration must be taken during the interpretation of each properties of the two modes.

This thesis is written in MATLAB program developed under the two-dimensional forward solution. Forward or initial model solution is an important

criterion. In particular the solution of nonlinear geophysical inverse problems, it is important to have a healthy start to the model. Here, selection of the aforementioned physical parameters of the most important part. TE and TM modes in order to analyze the weak and the superior aspects of the calculations were made according to different models. During these calculations the parameters of the model came to the fore the importance of the thickness of the block.

Instead of using fixed blocks according to the model used in the block thickness is paying attention to the frequency and impedance. Created by paying attention to the effective depth of the vertical direction towards the block thickness has been found that the results of the calculation. Otherwise, the results from the model and gives the wrong results.

Modeled to represent the structure and methods used in modeling the choice of the parameters are also important. Fast solution during the calculation of finite difference method is preferred. This method is initial model represented by blocks vertically and horizontally in the underground. Setting parameters to appropriate groundwater model to obtain realistic results are extremely important. Errors to be made at this stage are expected to lead to completely different results.

Modelling studies are calculated separately for TE and TM modes. The length of the horizontal distance refers to the profile length and vertical distance refers to the depth from the face of the earth. While the literature has analytical solution for the TM mode, the TE mode is not the case in the same situation. TE and TM modes give different results to different underground structures. However, situation created by a two-dimensional structure can be solved by using both of these modes are equally.

TE and TM modes by their nature, natural telluric currents will have different reactions in the structures. The lateral and vertical limits of these modes differ from each other in terms of sensitivity. TE mode in the case of these currents, defining the upper and lower limits of the structure, TM mode in the case of the lateral boundaries are decisive. In this case, consideration must be taken during the interpretation of each properties of the two modes.

Within the scope of this thesis using the two-dimensional forward solution an algorithm developed in MATLAB programming language using finite difference method. Rectangular model of the underground resistivity calculation algorithm is separated into blocks. Instead of using fixed block length, in this thesis each model parameters are different according to the initial parameters given. The developed algorithm was tested by comparing with the analytical solution. Then, the algorithm has been tested in different models of two-dimensional impedance. In these experiments the behavior of the TE and TM mode apparent resistivity and phase curves are investigated.

1. GİRİŞ

Elektromanyetik yöntemler isminden anlaşılacağı üzere, yer içindeki elektromanyetik dalga ya da zamanla değişen elektromanyetik alanları inceler (Telford, 1990). Elektromanyetik yöntemler birkaç farklı sınıfta toplanabilir. Bunlar başlıca doğal kaynaklı ve yapay kaynaklı elektromanyetik yöntemlerdir. Ayrıca ölçümlerin zaman ortamı ya da frekans ortamında yapılması ile zaman ortamı elektromanyetik yöntemler ve frekans ortamı elektromanyetik yöntemler olarak sınıflandırılabilir. Elektromanyetik yöntemler sığ derinlikler ya da derin aramalarda kullanılabilirler. Kullanılan kaynağın doğal ya da yapay kaynaklı olması bu noktada önem kazanır. Genel olarak doğal kaynaklı yöntemlerle derin araştırmalar yapılırken, yapay kaynaklı elektromanyetik yöntemler sığ aramalarda daha iyi sonuç vermektedir.

Yapay kaynaklı elektromanyetik yöntemler alıcı, verici ve yer içindeki gömülü iletken yapının birbirleri ile olan ilişkilerini inceler. Yapay kaynaklı yöntemde verici olarak adlandırılan kaynak mekanizması birincil olarak adlandırılan elektromanyetik alanlar yaratır. Bu birincil elektromanyetik alanlar yer altındaki iletken yapıları indükleyerek ikincil olarak adlandırılan bir başka elektromanyetik alan yaratırlar. Bu durumda yeryüzündeki alıcı bu her iki alanı (Birincil ve İkincil) ölçer. Kaynaktan çıkan ve vericiden ölçülen elektromanyetik alanların karşılaştırılması sonucu yer altı yapısının elektriksel özellikleri hakkında bilgi sağlanabilir.

Doğal kaynaklı elektromanyetik yöntemler ise kaynak olarak yer altında bulunan büyük ölçekli tellürik akımlardan yararlanır. Tellürik akımlar güneş fırtınalarının iyonosfer tabakası ile etkileşimi sonucu oluşur. Kısaca iyonosfer tabakasındaki akımlar yer altındaki tellürik akımları indükler. Doğal kaynaklı elektromanyetik yöntemler yapay olarak yaratılamayacak kadar düşük frekans aralığında çalışır. Düşük frekanslar uzun sürede sönmüldüğünden dolayı derin araştırmalar için tercih sebebidir.

Son yıllarda Manyetotellürik yöntem oldukça popüler hale gelmiştir. Bu konuda yöntemin uygulama alanlarının artış göstermesi başlıca sebeptir. Yöntemin farklı ihtiyaçlar karşısında başarılı sonuçlar vermesi ise bir başka tercih sebebi olmaktadır.

Manyetotellürik yöntem diğer jeofizik yöntemlerle beraber kullanılmaktadır. Bunlardan en iyi örnek petrol araştırmalarında sismik yöntem ile ortak kullanımudur. Bazı durumlarda sismik yöntemin uygulanamadığı jeolojik yapılarda yeraltında bulunan rezervin sınırlarının kestirilmesinde başarılı sonuçlar vermektedir. Manyetotellürik yöntemin bu konudaki bir diğer başarısı ise sismik serimlerin kurulamadığı zorlu arazi koşullarında, rahat ve kolayca bir profil boyunca ölçüm alınabilmesine olanak sağlamasıdır (Unsworth, 2005).

AMT (Audio Magnetotelluric) uygulaması yaklaşık 1 ile 10^4 Hz arasındaki frekanslarda çalışmaktadır. Bu frekans aralığının kullanılmasının önemi birkaç km derinliğe kadar MT yöntemi kullanılarak sığ derinlik araştırmasına olanak sağlamasıdır. Özellikle petrol araştırmalarında başarılı sonuç vermektedir. Petrol rezervlerinin yüksek iletkenlikli yapısı yer altı araştırmalarına olanak sağlamaktadır (Yamaya ve diğ., 2009). Ayrıca AMT uygulaması sığ derinliklerde kullanıldığından metalik maden araştırmalarında (Strangway ve Kozior, 1979) ve tuzlu su girişimini araştırma konularında kullanılmaktadır (Lujan ve Romo, 2010). Bu uygulama alanı ile aynı araştırma konularına sahip Yapay Kaynaklı Manyetotellürik yöntem (Controlled Source Audio Magnetotelluric (CSAMT)) son yıllarda kullanılmaktadır. Bu uygulamanın esası MT yöntemindeki doğal alanların kullanımının aksine, araştırma sahasında yapay bir akım kaynağının mevcut olmasıdır. Yapay kaynak kullanımı daha güçlü sinyaller yaratacağından daha etkin veri-işlem aşamaları ve daha hızlı ölçü alınmasını sağlar.

Bir başka uygulama alanı ise jeotermal alanların aranması ve sınırlarının belirlenmesidir. Jeotermal alanlar doğaları gereği yer içinden gelen yüksek orandaki ısıyı yer altı suyu aracılığıyla yeryüzüne aktarmaktadır. Bu esnada oluşan ısı akısı yer altı suyu içinde bulunan iyonların hızını artırarak iletkenliği artırmaktadır. Bu durum yer altı jeotermal rezerv sınırlarının belirlenmesinde büyük kolaylık sağlamaktadır. Jeotermal enerji kaynaklarının araştırılmasında Manyetotellürik yöntemin doğru akım öz direnç yöntemleri ile birlikte kullanımı sonuçları destekleyici niteliktedir (Yu ve diğ., 2008; Strack ve diğ., 2008; Bibby ve diğ., 2008).

Manyetotellürik yöntem yer kabuğu araştırmalarında da kullanılmaktadır. Yer kabuğu ve üst mantonun yüksek iletkenlikli kısmi ergimeye karşı duyarlı olması dolayısıyla Manyetotellürik yöntemin uygulanabilirliğini artırmıştır (Wei ve diğ., 2001; Rippe ve Unsworth, 2010). Ayrıca Manyetotellürik yöntem fay araştırmalarında kullanılmaktadır. Fay zonlarının jeoelektriksel yapısının belirlenmesinde etkili bir yöntemdir (Gürer, 1996; Unsworth ve diğ., 1997; Çağlar, 2001; Bedrosian ve diğ., 2001; Unsworth ve Bedrosian, 2004).

Manyetotellürik yöntemde ölçüler deniz tabanında da alınmaktadır. Deniz tabanında yapılan MT ölçüleri daha çok petrol arama amaçlıdır. Bu uygulamanın getirdiği esneklik sayesinde ölçüm yapılan bölgeler deniz ile sınırlandırılmamakta ve incelenmekte olan bir jeolojik birim deniz altında da incelenebilmektedir. Ancak henüz geliştirilmekte uygulama alanı olduğundan dolayı ve deniz tabanı derinliğine bağlı olarak elektrik ve manyetik alanların ölçümünün zorlukları mevcuttur (Constable ve diğ., 1998; Yin, 2006).

Manyetotellürik verileri çoğunlukla ikiboyutlu ters çözüm algoritmaları kullanılarak yorumlanır. MT yönteminde Helmholtz denklemleri iki ve üç boyutlu olarak sayısal yöntemler kullanılarak çözülür. MT düz çözümde çoğunlukla Sonlu farklar (SF) veya Sonlu elemanlar sayısal çözüm yöntemleri kullanılmaktadır. SE yöntemi (SE) model alınan yer altı yapısını karmaşık modeller kullanarak çözebilmektedir. Ancak bu çözüm vakit almaktadır. SF ile çözüm ise sonlu elemanlar yöntemine göre daha kolay ve daha hızlıdır.

2. MANYETOTELLÜRİK YÖNTEM VE TEMEL İLKELERİ

2.1 Manyetotellürik Yöntem

Manyetotellürik yöntemin temelleri birbirinden bağımsız çalışan iki farklı bilim adamının Andrei Nikolaevich Tikhonov ve Louis Cagniard'ın araştırmaları tarafından oluşturulmadan önce yer içinin araştırılması amacıyla yer içindeki doğal akımları kullanan iki farklı yöntem geliştirilmiştir. Her iki bilim adamı aynı görünür öz direnç tanımını yaparak yöntemin kuramsal gelişimine katkıda bulunmuşlardır. 19.yy sonlarına doğru manyetik gözlemlerinde uzun periyotlu manyetik değişimler kayıt edilmiştir. Manyetik alanın yatay ve düşey bileşenlerindeki değişimler kullanılarak yer kabuğundaki katmanların iletkenlik ve kalınlıkları hakkında bilgi sağlarken aynı zamanda manyetik alanları doğal değişimlerin iyonosferdeki akım sistemlerini oluşturması incelenmiştir. Jeomanyetik derinlik sondajı adı verilen bu yöntem sayesinde yer içinin öz direnç yapısı küresel çapta incelenebilmektedir.

20.yy'a gelindiğinde doğal elektromanyetik alanı kullanan bir başka yöntem geliştirilmiştir. Tellürik yöntem adı verilen bu yaklaşımda yer manyetik alanının sadece elektrik alan bileşenleri ölçülmektedir. Genellikle iki farklı ölçüm noktasından sürekli ölçüm yapılması esasına dayanır. Ölçüm istasyonları arasındaki elektrik alan şiddetlerinin karşılaştırılması ile yer elektrik yapısı hakkında bilgi sahibi olunabilir.

Bu iki yöntem Manyetotellürik yöntemin geliştirilmesine olanak tanımıştır. Elektrik ve manyetik alanların farklı frekans aralığında ölçülmesi Manyetotellürik yöntemin temelini meydana getirmektedir.

Manyetotellürik yöntemde, dünyanın yer altı elektrik öz direnç yapısını incelemek için yer içindeki doğal elektromanyetik alanlar araştırılır. Yer manyetik alanı geniş bir frekans aralığında kayda değer enerji içermektedir. Bu doğal oluşan elektromanyetik alanların kuvveti insan yapımı kaynaklar ile üretebilen elektromanyetik alanların kuvvetinden çok fazladır. Bu sebeple doğal olarak oluşan elektromanyetik alanların kullanılması, dünyanın derinliklerindeki elektrik öz direnç

yapısının incelenmesinde büyük ölçüde yardımcı olmaktadır. Yer manyetik alanı birden fazla sebeple oluşmaktadır. 1 Hz'den yüksek alanlar meteorolojik aktivite sonucu oluşmaktadır. Meteorolojik aktivite ise özellikle herhangi bir saatte, dünyanın herhangi bir yerinde meydana gelen yıldırımlardır.

Manyetotellürik yöntemde 10^3 ile 10^{-4} Hz arasındaki frekanslar kullanılmaktadır. Birkaç Hz'den daha büyük frekansların kullanımı son yıllarda yaygınlaşmıştır. Bu frekansların kullanımı sonucu AMT (Audio Magnetotelluric) isimli sığ derinliklere yönelik yöntem geliştirilmiştir. Ancak Manyetotellürik yöntem yer içinin derinliklerinden bilgi almak için daha küçük frekans aralığında çalışır. Yer manyetik alanının bu düşük frekans aralığının kaynağı ise Güneşten gelen plazma akışının yer manyetik alanı arasındaki ilişkidir. Güneş rüzgârları önceden tahmin edilmesi güç bir karaktere sahiptirler. Özellikle bir güneş rüzgârı, güneş lekelerinden etkilenerek daha çok kuvvetlenerek dünyanın manyetik alanına çarpar. Ayda bir ya da iki kez oluşan ve birkaç gün boyunca süren bu durum “manyetik fırtına olarak adlandırılır”. Son yıllarda manyetik fırtınalar kadar şiddetli olmayan ancak aynı karaktere sahip değişimlere “altfırtına” (substorm) adı verilmiştir. Bu değişimlere ilerde değilenecektir.

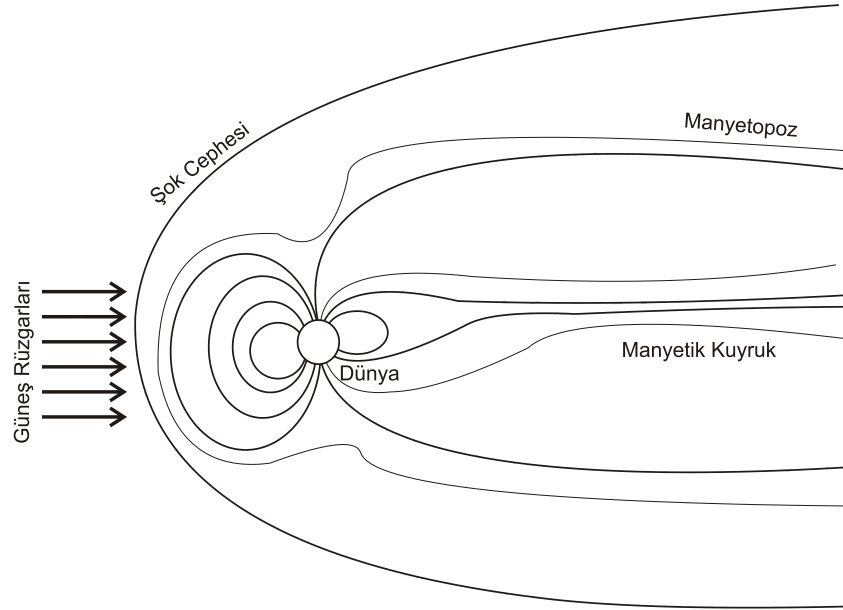
80-160 km'nin üstündeki yükseklikte dünyanın atmosferi iyonize olmaktadır. Bu durum bazı seviyelerde diğerlerine göre daha şiddetlidir. İyonosferdeki indüksiyon kütlenin yer değiştirmesine olanak sağlar. Manyetik ve dünyanın kendi eksenini etrafında dönmesi manyetohidrodinamik dalgalara sebebiyet verir. Bu manyetik değişimler gökyüzüne kıyasla daha iletken olan yeryüzünde elektrik akımlarının akmasını sağlamaktadır. Bu olaylar fiziksel olarak düzlem dalga yaklaşımıyla incelenebilmektedir.

2.2 Yer Manyetik Alanı

Yer Manyetik Alanı (YMA), yerin sıvı dış çekirdeğinde oluşan dinamodan kaynaklıdır. Yerin sıvı dış çekirdeğinde bulunan demir ve nikel iletkenliği oldukça artırmaktadır. Sıvı dış çekirdekte termal rejimi gereği, konveksiyon hareketleri bulunduğu inanılmaktadır. Bu hareketler sıvı dış çekirdek içinde yer manyetik alanını oluşturacak uygun şiddet ve dağılıma sahip elektrik akımları oluşturmakta ve

devam ettirmektedir. Yerkürenin eksenini etrafındaki dönme hareketi sıvı dış çekirdekdeki konveksiyon hareketlerini yönlendirici etkisi vardır.

Yapılan çalışmalar sonucu yer manyetik alanının kaynağının büyük bir çoğunluğu yer içine aitken, %1'lik kadar ufak bir kısmı yerkürenin dışına aittir. Yerkürenin dışından gelen etkinin kaynağı ise dış kaynaklı alanın yerküre içinde oluşturduğu indüksiyon etkisidir. Dış kaynaklı alan ise dünyamızı çevreleyen iyonosfer tabakasıdır. YMA normalde düzgün ve simetrik bir dağılım göstermesi gerekirken güneş patlamaları ve güneş rüzgârlarının yarattığı etki sonucu, dünyanın güneşe bakan cephesinde sıkışır. Bunun sonucu olarak diğer cephesinde ise bir genişleme meydana gelir. Bu durum Şekil 2.1'de görülmektedir. Bu durum manyetopoz üzerinde akımların meydana gelmesini sağlayarak yerküreye yakın yerlerde yer içini indükler.



Şekil 2.1 : Yer Manyetik Alanının Güneş Rüzgarları Etkisinde Uzaydaki Dağılımı.

2.2.1 Yer manyetik alanında meydana gelen değişimler

Yer Manyetik alanı sürekli olarak kayıt edildiğinde bir takım değişimler görülür. Bu değişimlerin başlıca sebebi iyonosferdir. İyonosfer ise güneşten gelen mor ötesi ışınlar ile küçük dalga boylu ışınlardan etkilenecek, yer manyetik alan değişimleri olarak kaydedilmektedir. Yer Manyetik Alanında meydana gelen değişimler sürekli olarak sistematik bir şekilde gözlenmektedir. Manyetik gözlemlerinde yapılan kayıtlar incelendiğinde göze çarpan değişimler şunlardır.

- Düzenli Günlük Değişimler: Güneş'e bağlı günlük değişim olarak ta adlandırılırlar. Bazı günlerde kayıt üzerinde hiçbir değişim gözlenmezken 24 saat boyunca ani olmayan düzenli bir değişim görülür. İngilizce Solar (Güneşsel) kelimesinden kısaltılmış olan "S" harfi ile gösterilirler.
- Ay'ın etkisiyle oluşan Değişimler: Yer Manyetik Alanı dikkatle incelendiğinde Ay nedeniyle düzenli bir değişim geçirdiği anlaşılır. "L" (İngilizce Lunar (Aysal) kelimesinden kısaltma) harfi ile gösterilirler. Genliği "S" değişiminden oldukça küçüktür. 25 saat boyunca gözlenirler. Manyetik fırtına: Birkaç günlük süre boyunca devam edebilirler. Genlikleri 300nT civarında olabilir. Elektromanyetik ölçümlerde bozucu bir etkiye sahiptir.
- Bazı günlerde Güneş'e bağlı Günlük Değişimler üzerinde ani değişimler saptanır. Bu değişimler birkaç saniye ile birkaç gün süren periyotlara sahip olduğu görülmüştür. Genlikler ise 1 γ ile birkaç yüz γ arasında değişim gösterir. Ani değişimler İngilizce "disturbance" kelimesinin kısaltılmışı olan "D" harfi ile gösterilirler.

Güneş rüzgârlarının iyonosferdeki elektrik akımlarının şiddetinde ve akış yönünde değişikliklere sebep olur. Bu bozucu etkilerden büyük genlik sahibi, hızlı değişim gösteren ve devam süresi genellikle bir günü aşanlarına Manyetik Fırtına adı verilir. Manyetik Fırtına dışında da bazı "D" değişimleri mevcuttur.

- Manyetik Çengel: Yaklaşık yarım saat gözlenir. Genliği 15-20 γ olarak gözlemlenir. Hızlı gelişmesine karşın yavaş son bulur. Kısa dalga radyo yayınlarının kesilmesi ile kendini gösterir. Uzun radyo dalgalarında ise şiddetlenme oluşur.
- Manyetik Körfez: Bir saat kadar gözlenebilir. Genliği 100 γ 'dır. Gece vakti oluşması haline YMA'nı şiddetlendirir. Ancak, gündüz vakti oluşması halinde YMA'nı zayıflatır. Oluştığı enleme bağlı olarak oluşum sürelerinde ve genliklerinde değişim gözlenir.

Bütün bu bahsedilen olayların asıl nedeni Güneş Patlamalarıdır. Söz konusu olay güneşin kromosfer tabakasında meydana gelir ve olay esnasında bol miktarda x-ışınımı gözlemlenir.

YMA'nın seküler değişimleri, bir noktaya ait yıllık ortalama değerleri arasındaki farka denir. Çok büyük periyotlara sahiptir. Kaynağı YMA'nın olduğu gibi katı yerkürenin içidir. Manyetotellürik yönteminde seküler değişimlerden faydalanılmaz.

2.2.2 Yermanyetik alandaki küçük değişimler

Yermanyetik titreşimler YMA'da birkaç milihertz büyüklüğünden birkaç Hz frekans aralığında zamanla değişmektedir. Ana sebebi dünyanın manyetosferindeki manyetohidrodinamik (iyonosferdeki mekanik ve elektriksel dalgalardan oluşmakta olan) dalgalardır. Küçük titreşimler dünyanın dış kabuğundaki yer manyetik alanındaki değişimlerin kaynağı olup, tellürik akımların sürekli olarak izlenmesi dış kabuktaki katmanların kalınlık ve iletkenliklerinin tayin edilmesinde önemli rol oynar. Küçük titreşimler sınıflandırılması amacıyla iki ana sınıfta toplanabilir.

2.3 Manyetotellürik Yöntemin Üstünlükleri ve Zayıf Noktaları

MT yöntemi yerin içinde doğal olarak oluşan tellürik akımları kullandığından dolayı, derinlik araştırmalarındaki akım şiddetine olan bağımlılık söz konusu değildir. Bir başka deyişle öz direnç çalışmalarında daha derinden bilgi almak akım şiddetine bağılı iken MT yöntemi bu durum söz konusu değildir. Aynı anda elektrik ve manyetik alanların birden fazla bileşeni ölçüldüğünden yer içi hakkında çok daha fazla bilgi elde edilebilmektedir. Farklı frekanslarda ölçüm yapılarak yer içinin farklı derinliklerine ait bilgi elde edilmiş olur. Özellikle uzun periyotlu frekanslar sönümlenmeden önce derinlere nüfuz ederler.

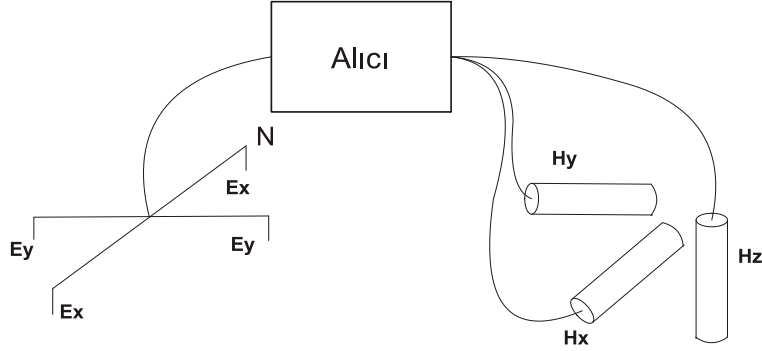
YMA'nındaki değişimlere ve ölçüm noktası etrafındaki gürültü kaynaklarına karşı oldukça duyarlıdır. Bunun başlıca sebebi yer içindeki doğal akımların çok küçük olmasıdır. Ölçüm noktası dikkatle seçilmediği takdirde yöntem kullanışsız hale gelebilmektedir.

2.4 Manyetotellürik Yöntemde Ölçü Düzenegi ve Ölçülen Büyüklükler

MT yönteminde doğal elektrik alanının iki bileşeni (E_x , E_y) ve manyetik alanın üç bileşeni (H_x, H_y, H_z) ölçülür (Şekil 2.2). Elektrik alan ölçümlerinde doğru akım yöntemindekilere benzeyen kutuplaşmayan elektrotlar kullanılır. Elektrotların arasındaki mesafe arazi şartlarına göre seçilir. Elektrik alanı ölçen elektrot çiftleri birbirlerine dik olacak şekilde yerleştirilirler. Manyetik alan ölçümleri için

indüksiyon bobinleri kullanılır. Bobin sayısı bobinin tipine göre 1 veya 3 adet seçilebilir.

Manyetotellürik yöntemde araştırmalar alınan frekansa göre farklı sürelerde bitirebilir. Elde edilecek verilerin doğruluğu açısından ölçülen frekansın tekrarlanması verinin sağlıklı olması bakımından önemlidir.



Şekil 2.2 : MT yönteminde ölçüm düzeneği.

Manyetotellürik yönteminde elektrik ve manyetik alanlar zamanın bir fonksiyonu olarak ölçüldüğünden dolayı, frekans ortamına dönüştürülmeleri için Fourier dönüşümü kullanılır. Bu işlem için ayrık Fourier dönüşümü kullanılır. Bu dönüşüm,

$$X(f) = \sum_n x(n\Delta t) e^{-i\omega n\Delta t} \quad (2.1)$$

şeklinde tanımlanır. Empedans bir yöndeki elektrik akımının kendisine dik yöndeki manyetik alana olan oranı şeklinde tanımlanabilir. Bu durumda en genel haliyle empedans bağıntısı

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$Z_{ij} = \frac{E_i}{H_j} \quad (2.3)$$

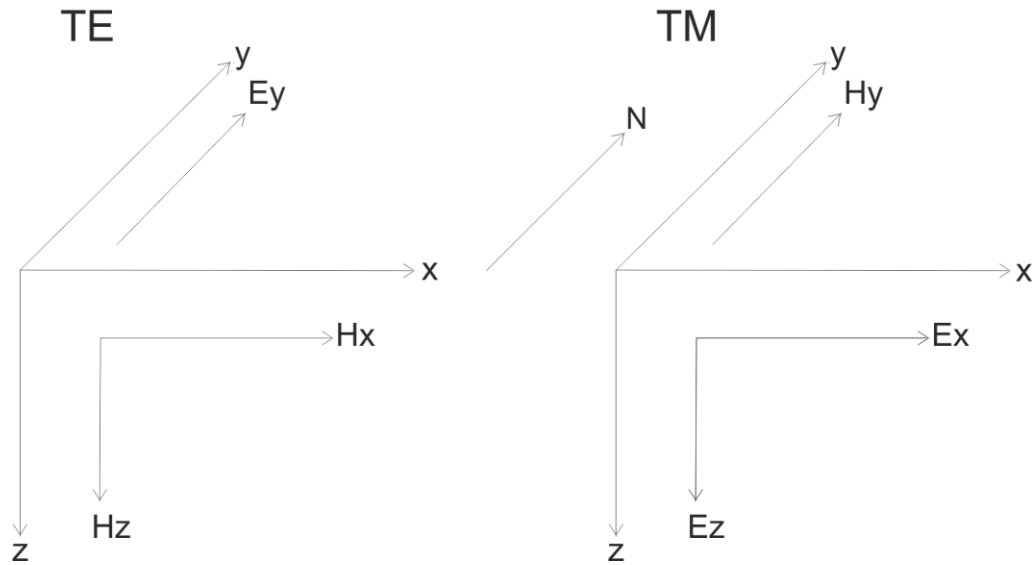
şeklinde ifade edilirken,

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & Z_{xy} \\ Z_{yx} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

olarak iki boyutlu ortamlar için ifade edilebilir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta bir boyutlu ve iki boyutlu ortamlar için Z_{xx} ve Z_{yy} parametreleri 0 değerini almaktadır. Bir boyutlu ortam olması durumunda Z_{yx} ve Z_{xy} birbirine eşit ancak sıfırdan farklı bir değer olacaktır. İki boyutlu olması durumunda ise Z_{yx} ve Z_{xy} parametreleri birbirlerinden farklı olacaktır.

2.4.1 TE ve TM modu

Daha önce bahsedildiği üzere MT yönteminde Elektrik alanın (E_x, E_y) ve Manyetik alanın (H_x, H_y, H_z) bileşenleri ölçülmektedir. Elektrik alanın jeolojik doğrultuya paralel olduğu durum TE (Transverse Electric), manyetik alanın jeolojik doğrultuya paralel olduğu durumda ise TM (Transverse Magnetic) tanımlamaları yapılır. Ayrıca E-polarizasyon ve H-polarizasyon olarak adlandırılmaktadırlar. TE modunda elektrik alanının jeolojik doğrultuya dik olduğu E_x ve bu bileşene dik olan manyetik alan bileşenleri H_y ve H_z ölçülür. Benzer şekilde TM modunda jeolojik doğrultuya dik H_x ve bu bileşene dik olan E_y ölçülür. Şekil 2.3 TE ve TM modları için elektrik ve manyetik alan bileşenleri gösterilmektedir.



Şekil 2.3 : TE ve TM modları için elektrik ve manyetik alan bileşenleri.

2.5 Manyetotellürük Kuram

Periyodik karakterli elektrik ve manyetik alanları varlığı bir elektromanyetik yayınımlı göstermektedir. Bu nedenle Manyetotellürük kuramı açıklamak için, elektromanyetik dalga kuramı kullanılmaktadır. Elektromanyetik dalganın davranışı Maxwell denklemleri ile ifade edilir.

2.5.1 Maxwell denklemleri

Maxwell denklemleri Faraday, Amper ve Coulomb yasalarından yararlanılarak türetilmiştir.

- 1- Faraday yasası: Bu denklemin anlamı elektrik alanın vektörel kaynağının, zamanla değişen manyetik akı olduğudur. Herhangi bir kapalı eğri üzerinde elektrik alanın dolaşımı, eğrinin çevrelediği yüzey üzerindeki manyetik akının negatifinin zamanla değişimine eşittir.

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.5)$$

Bu denklemde E elektrik alan şiddeti, B ise manyetik akıyı temsil etmektedir.

- 2- Amper yasası: Kapalı bir yol etrafındaki elektromotif kuvvet, iletkenlik akımı ve yolla sınırlanan herhangi bir yüzeyden geçen elektrik yer değıştirmenin zamana göre türevine eşittir.

$$\nabla \times H = j + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.6)$$

Bu denklemde H manyetik alan şiddetini, j akım yoğunluğunu ve D ise elektrik yer değıştirmeyi temsil etmektedir.

- 3- Selenoidal özellik: Herhangi bir kapalı yüzeyden çıkan net manyetik akı sıfırdır.

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2.7)$$

- 4- Coulomb yasası: Bir hacmi saran yüzeyden geçen toplam elektrik yerdeğiştirme hacim içindeki toplam yüke eşittir. Bir başka deyişle herhangi bir kapalı yüzeydeki elektrik alanın akısı o yüzeyin içindeki toplam yük ile doğru orantılıdır.

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (2.8)$$

Bu denklemde ρ yük yoğunluğunu temsil etmektedir.

Eğer temsil edilen ortam homojen ve tekdüze olarak ifade ediliyor ise akım yoğunluğu (j) ile elektrik yer değiştirme (D) arasında,

$$D = \epsilon E \quad (2.9)$$

$$J = E/\rho \quad (2.10)$$

şeklinde yazılır. Aynı durum söz konusu iken Manyetik alan (H) ile manyetik akı yoğunluğu arasında,

$$B = \mu H \quad (2.11)$$

ilişkisi vardır. (2.10), (2.11) ve (2.12) malzeme denklemleri olarak adlandırılırlar.

2.5.2 Elektromanyetik dalga denklemlerinin çıkarımı

Maxwell denklemlerinden düzlem dalga denklemleri geliştirilir. Malzeme denklemleri (2.10), (2.11) ve (2.12)), (2.6) ve (2.7)'de yerine konulursa,

$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2.12)$$

$$\nabla \times H = E/\rho + \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2.13)$$

benzer şekilde (2.8) ve (2.9),

$$\nabla \cdot H = 0 \quad (2.14)$$

$$\nabla \cdot E = 0 \quad (2.15)$$

şeklini alır. (2.13)'ün her iki tarafının rotasyoneli alınırsa,

$$\nabla \times \nabla \times E = -\mu \nabla \times \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2.16)$$

(2.14) ise her iki tarafı μ ile çapılıp zamana göre türev alınınca,

$$\mu \nabla \times \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial E}{\partial t} + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (2.17)$$

şeklini alır. (2.17)'nin sol tarafı (2.18)'in sağ tarafına eşitlenirse,

$$-\nabla \times \nabla \times E = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial E}{\partial t} + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (2.18)$$

elde edilir. Vektörel analize göre,

$$\nabla \times \nabla \times A = \nabla(\nabla \cdot A) - \nabla \cdot \nabla A = \nabla \nabla \cdot A - \nabla^2 A \quad (2.19)$$

(2.20),(2.19) için uygulanırsa

$$\nabla \times \nabla \times E = \nabla \nabla \cdot E - \nabla^2 E \quad (2.20)$$

(2.16)'dan bilindiği üzere $\nabla \cdot E = 0$ olduğundan (2.21),

$$\nabla \times \nabla \times E = -\nabla^2 E \quad (2.21)$$

halini alır. (2.22),(2.19)'da yerine konulursa

$$\nabla^2 E = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial E}{\partial t} + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (2.22)$$

elde edilir. Aynı şekilde

$$\nabla^2 H = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial H}{\partial t} + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \quad (2.23)$$

elde edilir. (2.23) ve (2.24) zaman ortamı için elektromanyetik dalga denklemleridir.

2.5.3 Özdirenç için Tikhonov-Cagniard yaklaşımı

Helmholtz denklem çifti elektromanyetik dalgaların iletken ortamlarda yayılımının incelenmesi amacıyla önem taşır. Elektrik prospeksiyonun birçok uygulamasında, elektromanyetik alanların zamanla göreceli olarak çok az değişim gösterdiği bilinmektedir. Bu sebeple (2.23) ve (2.24)'te ikinci dereceden türevleri ihmal edersek,

$$\nabla^2 E - \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial E}{\partial t} = 0 \quad (2.24)$$

$$\nabla^2 H - \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (2.25)$$

şeklini alır. Bu iki denklem çifti aynı zamanda difüzyon denklemleri olarak adlandırılır. (2.24) ve (2.25) numaralı denklemlerin Fourier dönüşümü alınır,

$$\nabla^2 H + i\omega\mu_0\sigma H = 0 \quad (2.26)$$

$$\nabla^2 E + i\omega\mu_0\sigma E = 0 \quad (2.27)$$

bulunur. Bulunan bu denklemler 2. Dereceden eliptik kısmi diferansiyel denklemler olup Helmholtz denklem çifti olarak adlandırılırlar (Zhdanov ve diğ., 1994).

2.5.4 Tikhonov-Cagniard özdirenci

MT verisi genel olarak özdirenç ve empedans fazı parametreleri ile sunulur. TE ve TM yöntemi için empedans bağıntıları

$$Z_{yx} = \frac{E_y}{H_x} \quad (2.28)$$

$$Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y} \quad (2.29)$$

şeklindedir. Görünür özdirenç ve empedans fazı ise,

$$\rho_a = \frac{1}{\mu\omega_0} |Z_{ij}|^2 \quad (2.30)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{\text{sanal}(Z_{ij})}{\text{gerçel}(Z_{ij})}\right) \quad (2.31)$$

2.5.5 Elektromanyetik alan nüfuz derinliği

MT yönteminde elektromanyetik alanın nüfuz derinliği,

$$d = \sqrt{\frac{\rho}{\omega\mu_0}} \quad (2.31)$$

denklemleri ile verilir (Jones, 1983). Nüfuz derinliği iletken bir ortamdaki elektromanyetik alanın sönümlenmesi ile ilgilidir. Alanın yüzeydeki değerinin 1/e yada yaklaşık %33'üne denk geldiği derinlik nüfuz derinliği olarak adlandırılır. Kısaca elektromanyetik dalganın taşıdığı enerjinin %63'ü sönümlenene kadar bilgi taşır. (2.31)pratik kullanım için düzenlenirse,

$$d = 503.2 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (2.32)$$

şeklini alır. Nüfuz derinliğinin altına araştırmaya katkı koyabilecek bir veri elde edilemez. (2.32)'e bakıldığında, frekans ile ters orantılı, öz direnç ile doğru orantılıdır. Bunun anlamı tek bir frekansta ölçüm yapılırken iletken bir ortamda derin araştırma yapılamazken, dirençli bir ortamda daha derinden bilgi alınabilmektedir. Böylece birden çok frekansta ölçüm yapılarak yer için farklı derinliklerinden bilgi alınabilmesi mümkün olmaktadır.

3. MANYETOTELLÜRİKYÖNTEMDE İKİ BOYUTLU MODELLEME

Modelleme çalışmalarında incelenen yöntemlerin fiziksel esasları matematiksel ifadeler yardımıyla kuramsal veriler elde edilir. Elde edilen bu kuramsal veriler, gözlemsel veriler ile karşılaştırılarak veriler arasındaki benzeştirmeler yapılır. Bu benzeştirmeler sonucu yer altı yapısı hakkında bilgi sahibi olunur. Modelleme çalışmalarından elde edilen sonuçlar çeşitli ters çözüm yöntemleri kullanılarak değerlendirilir. Duyarlı bir düz çözüm algoritmasının geliştirilmesi bu sebeple son derece önemlidir.

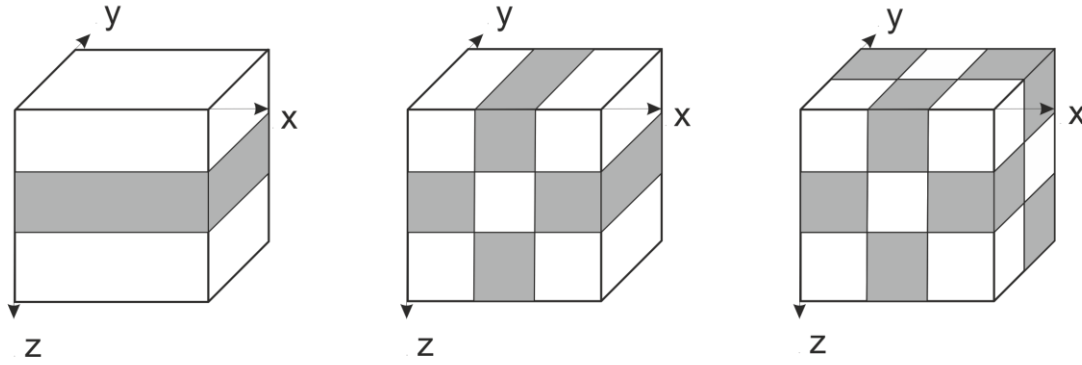
Düz çözüm algoritmalarının geliştirilmesinde, kullanılan yöntemin fiziksel ve matematiksel esaslarını yanı sıra modellenecek yer altı yapısının jeolojik özelliklerinin de yöntem açısından uygun olması beklenir. Çok boyutlu modelleme çalışması için yer altı yapısı dikdörtgen hücrelerden oluşturulur. Her bir hücrenin temsil ettiği fiziksel parametrenin sabit olduğu ve söz konusu hücrenin kapsadığı fiziksel alanı temsil ettiği kabul edilir. Son yıllarda dikdörtgen tipi hücrelerin yanı sıra yer altı yapısını daha detaylı temsil etmesi bakımından üçgen hücre yanımı geliştirilmiştir. Düz çözüme analitik ya da sayısal yollarla ulaşılabilir. Analitik çözümler ise basit modeller için vardır. Karmaşık modeller için sayısal yöntemler kullanılır. Sayısal yöntemler 3 farklı grupta incelenebilir.

- I. İntegral denklemleri ile çözümler
- II. Türev denklemleri ile çözümler
 - Sonlu Farklar (SF)
 - Sonlu Elemanlar (SE)
- III. Karışık yöntemler (integral ve türev yöntemleri)

İntegral yöntemi tek boyutlu yapılar için söz konusu olup modellenecek yapı boyunca integral alınarak çözüme ulaşılır. Türev denklemleri olarak adlandırılan SF (Finite difference) ile SE (Finite Element) yöntemleri 2B ortamlar için kullanılır (Şekil 3.1). Karışık yöntemler ise türev denklemlerinin çok boyutlu ortamları

özebilme kapasitesi ile integral yönteminin hızını birleştirmek amacıyla düşünölmüştür.

Bu tez çalışmasında MT yöntemi için SF yöntemi kullanılarak görünür özdirenç, faz ve her elektrik ve manyetik alan bileşeninin büyüklükleri hesaplanmaktadır. Algoritmanın geliştirilme aşamaları ilerleyen kısımlarda anlatılacaktır.



şekil 3.1: 1B, 2B ve 3B yapılar için iletkenlik modeli.

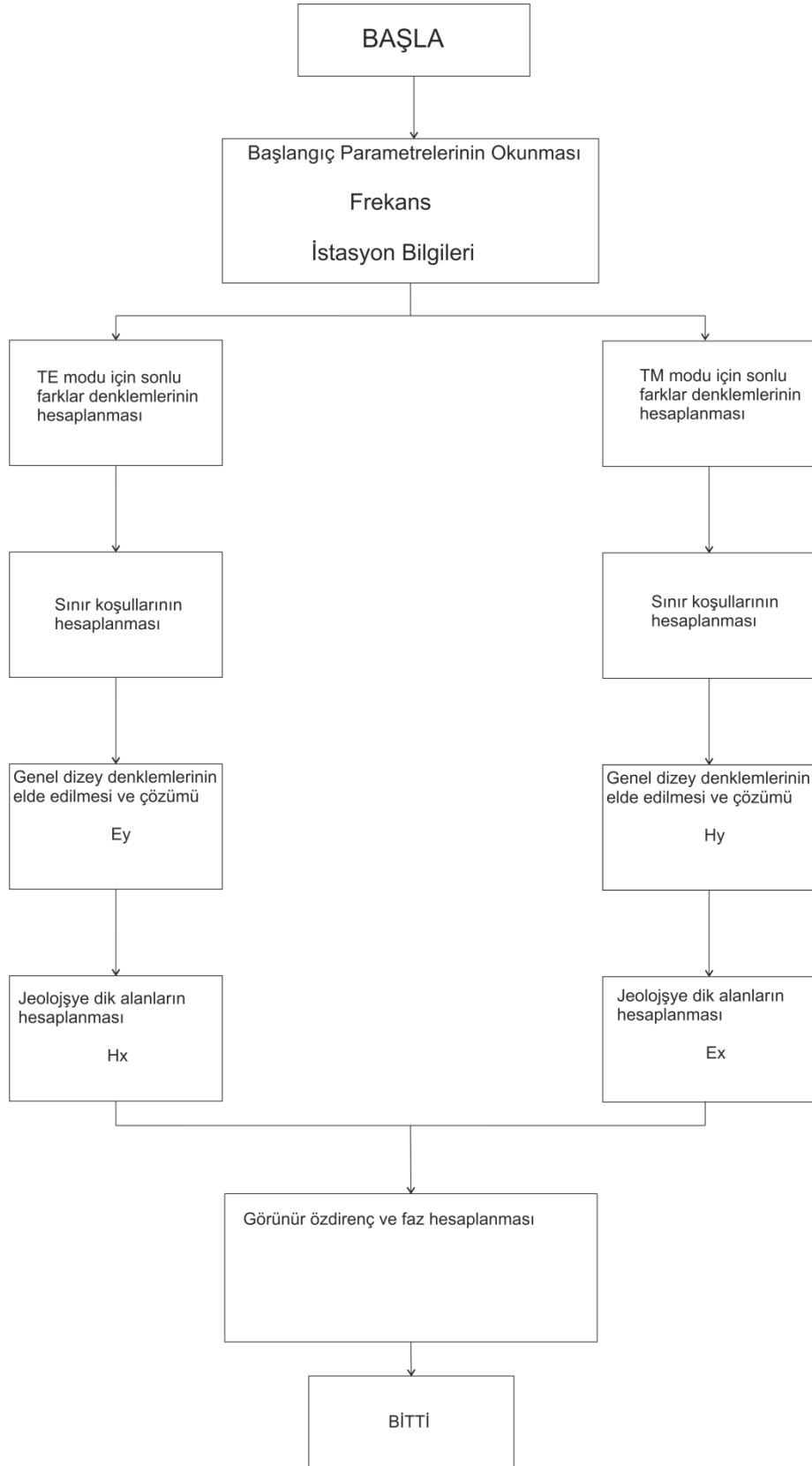
3.1 Temel Denklemler

SF yönteminde ilk olarak modellenecek yer altı yapısının çözüm bölgesi tanımlanır. özüm bölgesi dikdörtgen ya da üçgen elemanlardan (Weaver, 1994) oluşturularak SF’lar ağı elde edilir. Bir sonraki adım her düğüm noktası için SF’lar denklemlerinin elde edilmesidir. Daha sonra sınır koşulları uygulanarak genel düzey denklemleri oluşturulur. Genel düzey denklemlerinin elde edilmesinden sonra uygulanacak işlem jeolojik doğrultuya dik alanların hesabı ve görünür özdirenç ve empedans fazının değerklerinin hesabıdır. Bu adımlar şekil 3.2’deki akış şemasında gösterilmektedir.

3.2 Sonlu Farklar ile 2B Düz özüm

MT yönteminde temel denklemler 2. Bölümde anlatıldığı üzere Maxwell denklemleridir. Frekans ortamında düzlem dalga için Maxwell denklemleri 2. Bölümde elde edilmişti. Bu denklemlerin çözümünden TE modu için,

$$(\nabla_x \nabla_x E) = \nabla \cdot \nabla E_y = \nabla^2 E_y = \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} = -i\omega\sigma\mu_0 E_y \quad (3.1)$$



Şekil 3.2: Programın akış şeması.

Benzer şekilde TM modu için,

$$\begin{aligned} (\nabla_x \nabla_x H) &= \nabla \cdot \rho \nabla H_y = \rho \nabla^2 H_y + \nabla \rho \nabla H_y \\ &= \rho \left(\frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_y}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{\partial H_y}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial z} \frac{\partial H_y}{\partial z} = -i\omega \sigma \mu_0 H_y \end{aligned} \quad (3.2)$$

bağıntıları elde edilir.

$$\frac{\partial E_y}{\partial z} = -i\omega \mu_0 H_x \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial z} = i\omega \mu_0 H_z \quad (3.4)$$

bağıntıları elde edilir. (3.3) ve (3.4) denklemleri, TE modu için jeolojiye dik doğrultudaki manyetik alan bileşenlerinin hesabında kullanılır. Benzer şekilde TM modu için jeolojik doğrultuya dik elektrik alan bileşenleri,

$$\frac{\partial H_y}{\partial z} = \sigma E_x \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial z} = -\sigma E_z \quad (3.6)$$

şeklinde elde edilir. MT verisi görünür öz direnç ve empedans fazı büyüklükleri ile sunulur. Hatırlanacağı üzere,

$$Z_{yx} = \frac{E_y}{H_x} \quad (3.7)$$

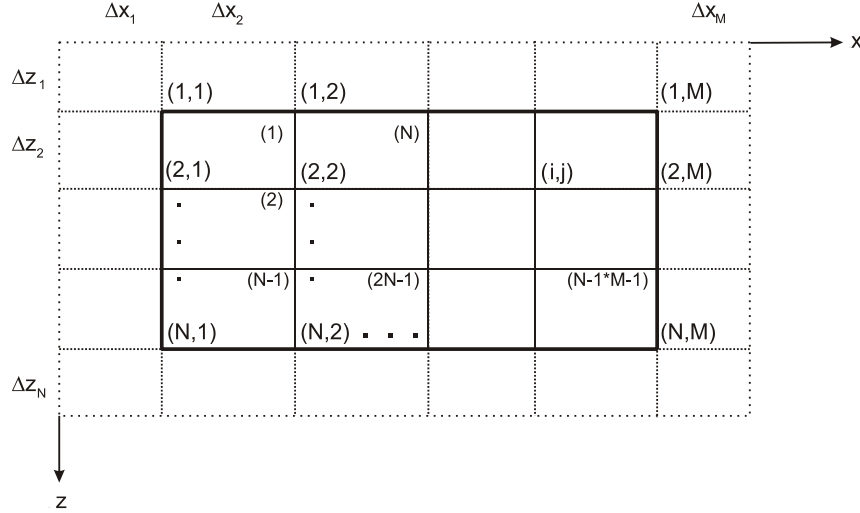
$$Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y} \quad (3.8)$$

Sırasıyla TE ve TM modu için empedans denklemleridir. Görünür öz direnç ve empedans fazı bağıntıları ise,

$$\rho_a = \frac{1}{\omega \mu_0} |Z_{ij}|^2 \quad (3.9)$$

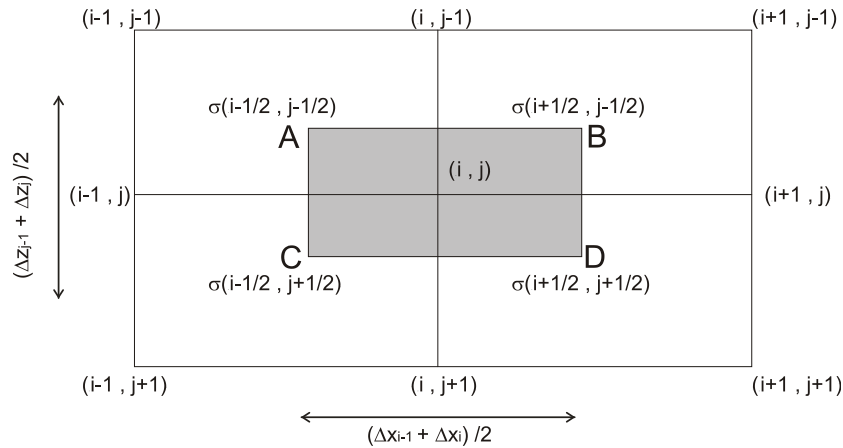
$$\phi = \arg \tan \left(\frac{\text{sanal}(Z_{ij})}{\text{gerçel}(Z_{ij})} \right) \quad (3.10)$$

şeklindedir. Burada ij TE modu için yx 'i ve TM modu için xy 'i temsil eder. Şekil 3.3'de SF için kullanılabilecek bir model ağı verilmiştir. Dikdörtgen hücrelerden temsil edilen bu tanımlamada herhangi bir (i, j) noktasını ele alalım.



Şekil 3.3: Sonlu farklar yöntemi için model ağı.

Bu düğüm noktası komşu olan diğer düğüm noktaları $(i-1, j)$, $(i+1, j)$, $(i, j-1)$ ve $(i, j+1)$ koordinatları ile temsil edilirler (Şekil 3.4). Δx_{i-1} , Δx_i , Δz_{j-1} ve Δz_j ise sırasıyla bu noktaların merkezde bulunan (i, j) noktasına olan uzaklıkları olur. Dikkat edilecek olunursa (i, j) noktası dikdörtgen şekilli hücre tanımlı yapıldığından $\sigma(i-1/2, j-1/2)$, $\sigma(i+1/2, j-1/2)$, $\sigma(i-1/2, j+1/2)$ ve $\sigma(i+1/2, j+1/2)$ öziletkenliklerine sahip dört adet dikdörtgen hücre ile çevrilidir. Bu nokta için sırasıyla TE ve TM modu için SF çözümleri hesaplanacaktır.



Şekil 3.4 : SF ağı içindeki (i, j) düğüm noktası ve ona komşu noktaları.

3.2.1 TE modu için sonlu fark denklemleri

TE modu için (3.1)'in integrali ABCD alanı için alınır ve denklemin sol tarafına Green teoremi uygulanırsa, bu alan etrafındaki çizgi integrali aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\int_A (\nabla \cdot \nabla E_y) dA = \int \frac{\partial E_y}{\partial \hat{n}} dl = - \left(\int_{DC} + \int_{AB} \right) \frac{\partial E_y}{\partial z} dx + \left(\int_{BD} + \int_{CA} \right) \frac{\partial E_y}{\partial x} dz \quad (3.11)$$

Burada A, (i, j) düğüm noktası ile ona komşu olan düğüm noktalarını birleştiren ABCD dikdörtgeninin alanı ve $\hat{n}$ ise A'nın kenarlarında dışa doğru birim normal vektördür. Bu denklemin çözümünde $E_y = E(i, j)$ olarak alınmıştır. Dikdörtgen üzerindeki her kenarın türevi, merkezi türetme formülü ile hesaplanırsa,

$$\frac{\partial E_y}{\partial z} \cong \frac{E(i+1, j) - E(i, j)}{\Delta x_i} \quad (3.12)$$

şeklinde yazılabilir. (3.12), (3.11) için uygulanırsa,

$$\begin{aligned} \int \frac{\partial E_y}{\partial \hat{n}} dl \cong & \frac{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i}{2} \left[\frac{E(i, j+1) - E(i, j)}{\Delta z_j} - \frac{E(i, j) - E(i, j-1)}{\Delta z_{j-1}} \right] \\ & + \frac{\Delta z_{j-1} + \Delta z_j}{2} \left[\frac{E(i+1, j) - E(i, j)}{\Delta x_i} - \frac{E(i, j) - E(i-1, j)}{\Delta x_{i-1}} \right] \end{aligned} \quad (3.13)$$

elde edilir. (3.1) denkleminin sağ tarafının integrali aşağıdaki gibi alınabilir (Weaver, 1994).

$$i\omega\mu_0 \int_A E(i, j) \sigma(i, j) dA = i\omega\mu_0 E(i, j) \int_A \sigma(i, j) dA \cong i\omega\mu_0 \tilde{\sigma}(i, j) E(i, j) \quad (3.14)$$

Burada $\tilde{\sigma}(i, j)$, (i, j) düğüm noktasındaki ağırlıklı ortalama iletkenliktir (Weaver 1994, Apprea ve diğ. 1997) ve tanımı aşağıdaki gibi yapılmaktadır.

$$\begin{aligned}\tilde{\sigma}(i, j) = & \frac{\Delta x_i \Delta z_{j-1}}{4} \sigma(i + 1/2, j - 1/2) + \frac{\Delta x_i \Delta z_j}{4} \sigma(i + 1/2, j + 1/2) \\ & + \frac{\Delta x_{i-1} \Delta z_j}{4} \sigma(i - 1/2, j + 1/2) + \frac{\Delta x_{i-1} \Delta z_{j-1}}{4} \sigma(i - 1/2, j - 1/2)\end{aligned}\quad (3.15)$$

(3.13), (3.14) ve (3.15) kullanılarak TE modu için SF çözümü aşağıdaki gibi elde edilir(Candansayar, M.E., 2002).

$$\begin{aligned}& \frac{\Delta z_{j-1} + \Delta z_j}{2\Delta x_i} E(i + 1, j) + \frac{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i}{2\Delta z_j} E(i, j + 1) + \frac{\Delta z_{j-1} + \Delta z_j}{2\Delta x_{i-1}} E(i - 1, j) \\ & + \frac{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i}{2\Delta z_{j-1}} E(i, j - 1) \\ & = \left[\frac{\Delta z_{j-1} + \Delta z_j}{2\Delta x_i} + \frac{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i}{2\Delta z_j} + \frac{\Delta z_{j-1} + \Delta z_j}{2\Delta x_{i-1}} + \frac{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i}{2\Delta z_{j-1}} - i\omega\mu_0 \tilde{\sigma}(i, j) \right] E(i, j)\end{aligned}\quad (3.16)$$

3.2.2 TM modu için sonlu fark denklemleri

(3.2) numaralı denklem TE modu için kullanılan yaklaşımla çözülebilir. Söz konusu denklemin sağ tarafının integrali alınır,

$$\begin{aligned}-i\omega\mu_0 \int_A H(i, j) dA &= i\omega\mu_0 H(i, j) \sum_{i=1}^4 A_i \\ &= i\omega\mu_0 H(i, j) + \frac{(\Delta x_{i-1} + \Delta x_i)(\Delta z_{j-1} + \Delta z_j)}{4}\end{aligned}\quad (3.17)$$

elde edilir. Denklemde $H(i, j)$ (i, j) noktasındaki manyetik alanın H_y bileşenidir. Denklemi sol tarafına Green teoremi uygulanırsa,

$$\begin{aligned}\int_A (\nabla \cdot \rho \nabla H_y) dA &= \int \rho \frac{\partial H_y}{\partial \hat{n}} dl = - \left(\int_{DC} + \int_{AB} \right) \rho \frac{\partial H_y}{\partial z} dx \\ &+ \left(\int_{BD} + \int_{CA} \right) \rho \frac{\partial H_y}{\partial x} dz\end{aligned}\quad (3.18)$$

bulunur. (3.11)'de ρ integrali boyunca değişmektedir. Bu nedenle her parça boyunca uygun bir değer kullanılmalıdır (Şekil 3.3). Böylece BD kenarı boyunca

$$\int_{BD} \rho \frac{\partial H_y}{\partial x} dz \cong \left(\frac{\Delta z_{j-1}}{2} \rho(i+1/2, j-1/2) + \frac{\Delta z_j}{2} \rho(i+1/2, j+1/2) \right) \frac{H(i+1, j) - H(i, j)}{\Delta x_i} \quad (3.19)$$

yazılabilir. Bu denklemde öz direnç için kullanılan simgeler iletkenlik için kullanılanlarla aynıdır. Sonuç olarak, her kenar aşağıdaki gibi tanımlanan dört etkili öz dirence bağlıdır (Weaver, 1994; Apprea ve diğ, 1997).

$$\tilde{\rho}(i+1, j) = \frac{\Delta z_{j-1} \rho(i+1/2, j-1/2) + \Delta z_j \rho(i+1/2, j+1/2)}{2 \Delta x_i} \quad (3.20)$$

$$\tilde{\rho}(i, j+1) = \frac{\Delta x_{i-1} \rho(i-1/2, j+1/2) + \Delta x_i \rho(i+1/2, j+1/2)}{2 \Delta z_j} \quad (3.21)$$

$$\tilde{\rho}(i-1, j) = \frac{\Delta z_{j-1} \rho(i-1/2, j-1/2) + \Delta z_j \rho(i-1/2, j+1/2)}{2 \Delta x_{i-1}} \quad (3.22)$$

$$\tilde{\rho}(i+1, j) = \frac{\Delta x_{i-1} \rho(i+1/2, j-1/2) + \Delta x_i \rho(i+1/2, j+1/2)}{2 \Delta z_{j-1}} \quad (3.23)$$

(3.17) ve (3.18), etkili öz direnç denklemleri ile birlikte kullanılırsa TM modu için SF çözümü aşağıdaki gibi elde edilir (Candansayar, 2002).

$$\begin{aligned} &\tilde{\rho}(i+1, j)H(i+1, j) + \tilde{\rho}(i, j+1)H(i, j+1) + \tilde{\rho}(i-1, j)H(i-1, j) \\ &+ \tilde{\rho}(i+1, j)H(i+1, j) = \left[\tilde{\rho}(i+1, j) + \tilde{\rho}(i, j+1) + \right. \\ &\left. \tilde{\rho}(i-1, j) + \tilde{\rho}(i+1, j) - i\omega\mu_0 \frac{(\Delta x_{i-1} - \Delta x_i)(\Delta z_{j-1} - \Delta z_j)}{4} \right] H(i, j) \end{aligned} \quad (3.24)$$

3.3 Model Ağının Tasarlanması

Düz çözüm tekniğinde, çözümün güvenilirliği önerilen modelin ağın tasarımına bağlıdır. Ağ düzenlenmesinde kullanıcının deneyimi önem taşır. Bu esnada yapılacak hatalı bir ağ düzeni düz çözüm sonuçlarını yanlış yönde etkileyecek ve hatalı

sonuçlar elde edilmesine sebep verecektir. Ağ için kullanılan hücre boyutları kullanılan frekanslara bağlıdır. Sayısal çözümün geçerli olması hücre boyutlarının araştırma derinliğinden küçük olması gerekir (Weaver, 1994). Yarı sonsuz bir ortamın özdirencinin, belirli bir frekansta görünür özdirence eşit olduğu derinlik elektromanyetik alan nüfuz derinliği denklemi (2.41) ile bulunur. Bu denklemden yararlanılarak sabit hücre kalınlıkları kullanmak yerine veriye bağlı olarak ağ tasarımı geliştirmek daha uygun sonuçlar vermektedir (Ulugergerli, 2002).

3.4 Sınır Koşulları

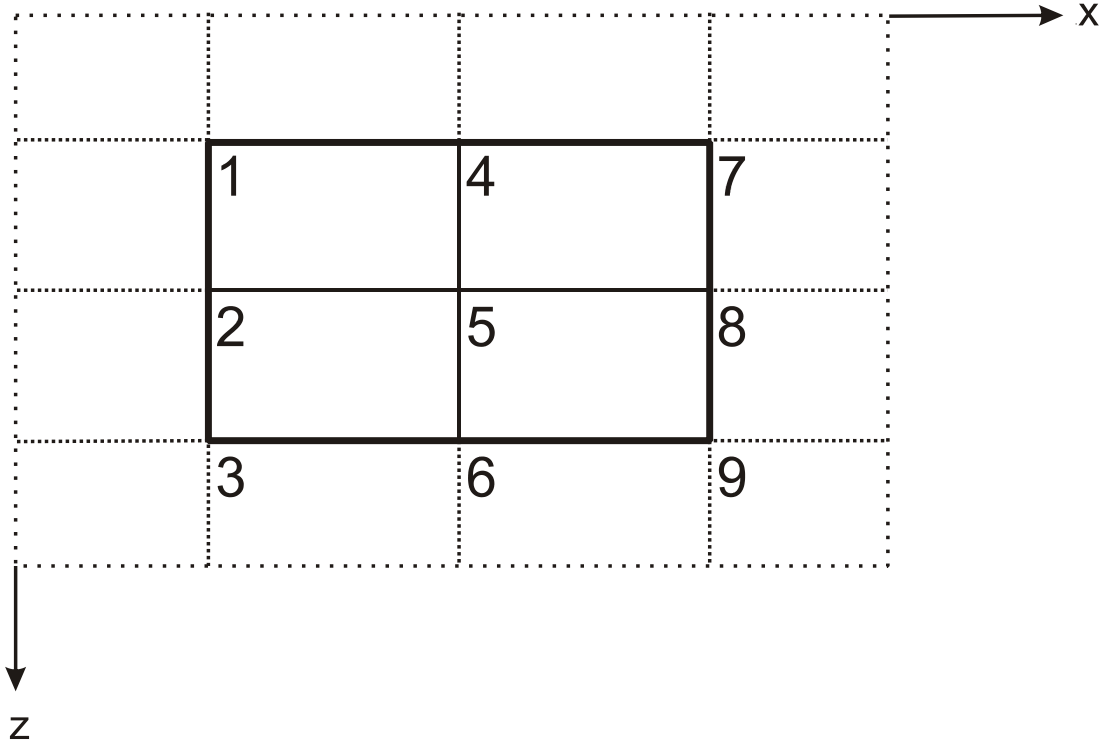
Oluşturan ağın sınırlarında veya kenarlarında Elektrik ve Manyetik alanın çözümü için farklı yaklaşımlar önerilmiştir. Bu yöntemlerden biri yüzeyde integral sınır koşulunu uygulamaktır. Ancak bu yöntemde TE modunda yukarıya fazladan blok konulmadığı için genel dizey denklemlerindeki katsayı dizeyi bant matris özelliğini kaybetmektedir (Weaver, 1994). Bu durum ise çözüm zamanını artıracaktır.

Jones ve Price (1970), DeLugao ve diğ. (1997) ve Candansayar (2008) izleyen sınır koşulunu kullanmışlardır. Kenarlarda Elektrik ve Manyetik alan tabakalı ortam için 1B olarak hesaplanmıştır. Üst ve alt sınırlarda ise üst ve alt köşelerdeki düğüm noktalarındaki E ve H alanlarının aritmetik ortalaması alınarak sabit tutulmuştur. Şekil 3.2'ye bakıldığında sol ve sağ kenarlardaki düğüm noktaları ((1,1), (2,1), ..., (N,1), (1,M), (2,M), ..., (N,M)) sırasıyla sağında ve solunda kalan düğüm noktalarındaki E ve H alanları 1B yer modeli için hesaplanır. (1,1) ve (1,M) numaralı düğüm noktalarının arasındaki blokların üstünde kalan düğüm noktalarının alan değerleri söz konusu düğüm noktalarında hesaplanan alan değerlerinin aritmetik ortalamasıdır. Benzer şekilde (N,1) ile (N,M) numaralı düğüm noktalarının arasında kalan blokların altındaki düğüm noktalarındaki alan değerleri bahsi geçen düğüm noktalarındaki alan değerlerinin aritmetik ortalamasıdır. Bu tez kapsamında kenarlardaki E ve H alanlarının hesabı için Candansayar'ın (2002) geliştirmiş olduğu bir boyutlu kod kullanılmıştır.

3.5 Genel Dizey Denkleminin Elde Edilmesi ve Çözümü

Genel dizey denklemlerinin elde edilmesi için bir model ağ tasarlayalım. Şekil 3.5'de düşey yönde 3 ($N=3$) ve yatay yönde 3 ($M=3$) adet olmak üzere toplam 9 adet düğüm noktasından oluşmakta olan bir ağ görülmektedir. Bu ağ üzerindeki her bir düğüm

noktasının SF yöntemi ile çözümü sonucunda bir doğrusal denklem elde edilir. Bu denklemler TE modu için ve TM modu için sırasıyla (3.16) ve (3.24) numaralı denklemlerdir. Elde edilen doğrusal denklemlerde düğüm noktası ve ona komşu 4 düğüm noktasının alan değerleri bilinmemektedir (TE için E_y ve TM için H_y). Tüm düğüm noktaları için bu denklemler elde edildikten sonra birleştirilerek genel düzey denklemi elde edilmiş olur.



Şekil 3.5 : 9 adet düğüm noktasından oluşan model ağ.

$$\begin{bmatrix}
 K_{1,1} & K_{1,2} & 0 & K_{1,4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 K_{2,1} & K_{2,2} & K_{2,3} & 0 & K_{2,5} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & K_{3,2} & K_{3,3} & 0 & 0 & K_{3,6} & 0 & 0 & 0 \\
 K_{4,1} & 0 & 0 & K_{4,4} & K_{4,5} & 0 & K_{4,7} & 0 & 0 \\
 0 & K_{5,2} & 0 & K_{5,4} & K_{5,5} & K_{5,6} & 0 & K_{5,8} & 0 \\
 0 & 0 & K_{6,3} & 0 & K_{6,5} & K_{6,6} & 0 & 0 & K_{6,9} \\
 0 & 0 & 0 & K_{7,4} & 0 & 0 & K_{7,7} & K_{7,8} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & K_{8,5} & 0 & K_{8,7} & K_{8,8} & K_{8,9} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{9,6} & 0 & K_{9,8} & K_{9,9}
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 x_1 \\
 x_2 \\
 x_3 \\
 x_4 \\
 x_5 \\
 x_6 \\
 x_7 \\
 x_8 \\
 x_9
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 b_1 \\
 b_2 \\
 b_3 \\
 b_4 \\
 0 \\
 b_6 \\
 b_7 \\
 b_8 \\
 b_9
 \end{bmatrix}
 \quad (3.25)$$

Buradaki K değerleri $\Delta x, \Delta z$ ve σ değerlerine bağlı sabit katsayılarıdır. Bu değerlerler (3.16) ve (3.24)'dan TE ve TM modları için hesaplanır. (3.25), $K \cdot x = b$ formunda yazılır ise, K 9x9 boyutlu katsayı matrisi, x 9x1 boyutlu bilinmeyen alan değerlerini (TE için E_y ve TM için H_y) ve b ise sınır koşullarından hesaplanan sıfırdan farklı 9x1 boyutlarında bir matristir. x matrisinin çözümüne ulaşmak için,

$$x = K^{-1} \cdot b \quad (3.26)$$

denkleminin çözümü yeterli olacaktır. Bu tersleme işleminin çözümü için “LU ayrışım” yöntemi kullanılmıştır. Ayrık dizey kullanımı sayesinde sadece sıfırdan farklı değerler ve bu değerlerin satır ve sütun değerleri hafızada tutulmakta, hesaplama işlemi ise sadece bu değerler ile yapılmaktadır (Candansayar, 2002).

3.6 Jeolojik Doğrultuya Dik Alanların Hesaplanması

Jeolojik doğrultuya dik Elektrik ve Manyetik alanların hesaplanması görünür öz direnç ve empedansfazi'nin hesabı açısından önemlidir. Bu alanların hesabı ölçülen alanların türevini almaktan geçer. Türevler merkezi türetme operatörlerine göre hesaplanmaktadır, böylece bir noktadaki E ve H alanlarının jeolojiye dik doğrultudaki bileşenlerinin hesaplanması için o noktadaki alanlar ve komşu iki noktadaki alanlar kullanılmaktadır. TE modu için jeolojiye dik olan alanlar (3.3) ve (3.4) kullanılarak,

$$H_x(i, 1) = -\frac{i}{\omega \mu_0} \left[\frac{2\Delta z_1 + \Delta z_2}{\Delta z_1(\Delta z_1 + \Delta z_2)} E_y(i, 1) - \frac{\Delta z_1 + \Delta z_2}{\Delta z_1 \Delta z_2} E_y(i, 2) + \frac{\Delta z_1}{\Delta z_2(\Delta z_1 + \Delta z_2)} E_y(i, 3) \right] \quad (3.27)$$

$$H_z(i, 1) = -\frac{i}{\omega \mu_0} \left[\frac{\Delta x_i}{\Delta x_{i-1}(\Delta x_i + \Delta x_{i-1})} E_y(i-1, 1) - \frac{\Delta x_i - \Delta x_{i-1}}{\Delta x_i \Delta x_{i-1}} E_y(i, 1) + \frac{\Delta x_{i-1}}{\Delta x_i(\Delta x_i + \Delta x_{i-1})} E_y(i+1, 1) \right] \quad (3.28)$$

denklemleri elde edilir (Candansayar, M.E., 2002). Benzer şekilde (3.5) ve (3.6) kullanılarak TM modu için,

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

Jeolojiye dik doğrultudaki E_x alanı hesaplanabilir. TM modunda Elektrik alanının z yönündeki bileşeni ölçülmez. Bu işlemlerden sonra **(3.9)** ve **(3.10)**'den görünür öz direnç ve empedans fazı hesaplanır.

4. MANYETOTELLÜRİK YÖNTEMDE MODELLEME

4.1 Manyetotellürik Yöntemde TE ve TM modlarının Zayıflık ve Üstünlükleri

Modelleme çalışmaları TE ve TM modu için ayrı hesaplanarak elde edilir. Yatay mesafe profil uzunluğunu , düşey mesafe ise yeryüzünden itibaren derinliği ifade eder. TM modunun analitik çözümü literatürde karşılığı var iken aynı durum TE modu için söz konusu değildir(Jones ve diğ., 1970, Candansayar, 2002). TE ve TM modları yeraltındaki farklı yapılara birbirlerinden farklı sonuçlar vermektedir. Ancak bu durum iki boyutlu bir yapının yarattığı bir problemin çözümü için her iki moddan eşit derecede yararlanarak çözülebilir. Her iki modun farklılıkları kısaca Çizelge 4.1 'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.1 : TE ve TM modlarının karşılaştırılması.

	TE Modu	TM Modu
Derin Yapılar	Duyarlıdır	-
Sığ Yapılar	-	Duyarlıdır
Dirençli Yapılar	-	Duyarlıdır
İletken Yapılar	Duyarlıdır	-

Bu sayede bir moddan kaynaklanan açıklık diğer mod kullanılarak giderilebilir (Berdichevsky ve diğ., 1998).

4.2 Programın Test Edilmesi

TM modunda tellürik akımlar yer içindeki yapını içinden akarlar. Bu sayede yapıyı yükleyerek anomali oluşturur. TM modunun öne çıkan özelliği modelleneyecek yapının galvanik doğasına duyarlı olmasıdır(Berdichevsky ve diğ., 1998). TE modunda ise tellürik akımlar yapının etrafından akar böylece yapı yüklenmez ve TE modunun yapının indüktif doğasına karşı duyarlılığı gözlemlenmiş olur. Bu duyarlılık farkları TM ve TE modunun birbirinden belirgin biçimde farklılık göstermesine sebep olur. Bu duyarlılıkları test etmek için derinlikleri değişen iletken ve dirençli yapılar

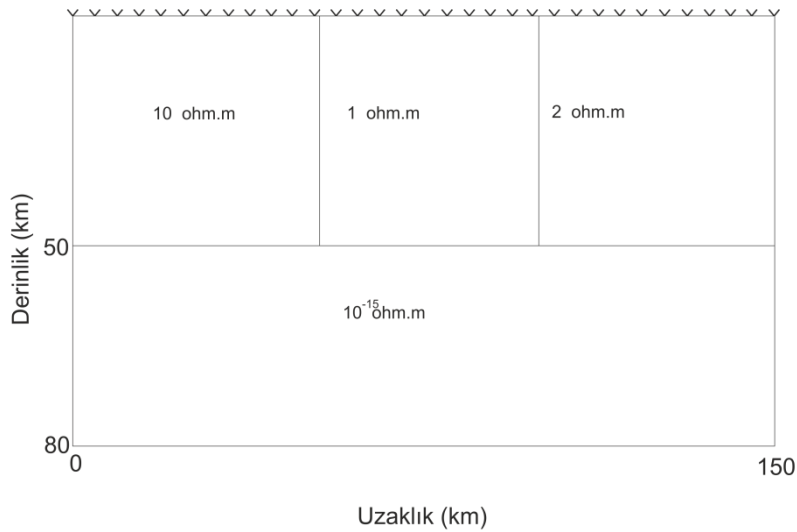
modellenmiş ve sonuçları ilerleyen kısımda tartışılmıştır. Hesaplamalar boyunca sabit 50 adet frekans kullanılmıştır. Bu frekanslar Çizelge 4.2’te sunulmuştur.

Çizelge 4.2: Hesaplamalarda kullanılan frekanslar

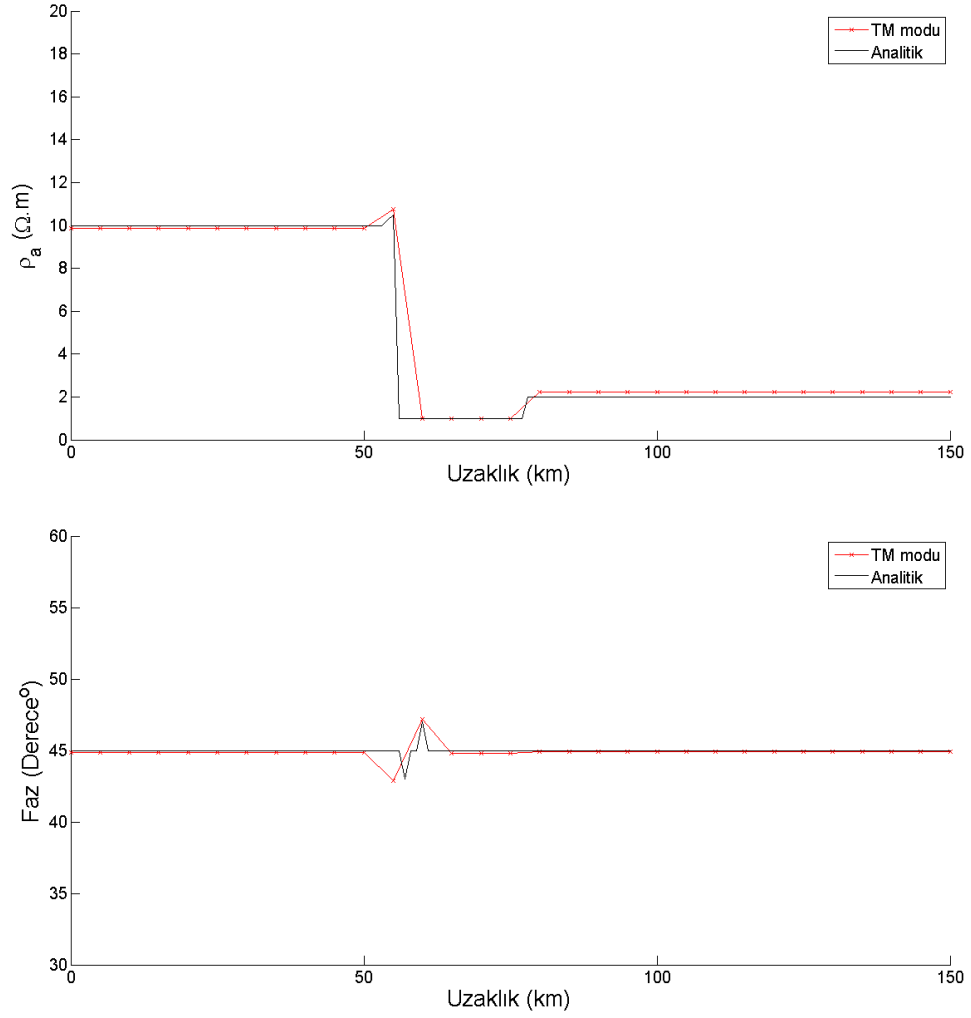
Frekans değerleri					
300	30	3	0,3	0,03	0,003
250	25	2,5	0,25	0,025	0,0025
200	20	2	0,2	0,02	0,002
150	15	1,5	0,15	0,015	0,0015
100	10	1	0,1	0,01	0,001
80	8	0,8	0,08	0,008	
60	6	0,6	0,06	0,006	
50	5	0,5	0,05	0,005	
40	4	0,4	0,04	0,004	

4.2.1 Analitik çözüm ile sonuçların karşılaştırılması

Bu çalışma kapsamında geliştirilen program, COMMEMI projesinde (Zhdanov ve diğ, 1997) kullanılmış olan 2D-0 modeli (Şekil 4.1) 10 Hz için test edilmiştir. Bu modelin sadece TM modu için analitik çözümü vardır. TE modu için sadece yarı analitik çözümü bulunduğundan programın TM modu sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Şekil 4.2).



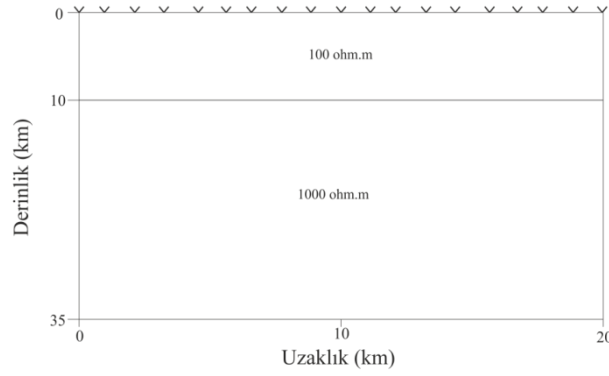
Şekil 4.1: COMMEMI 2D-0 modeli.



Şekil 4.2: TM modu görünür öz direnç ve faz eğrileri ile analitik çözümün karşılaştırılması.

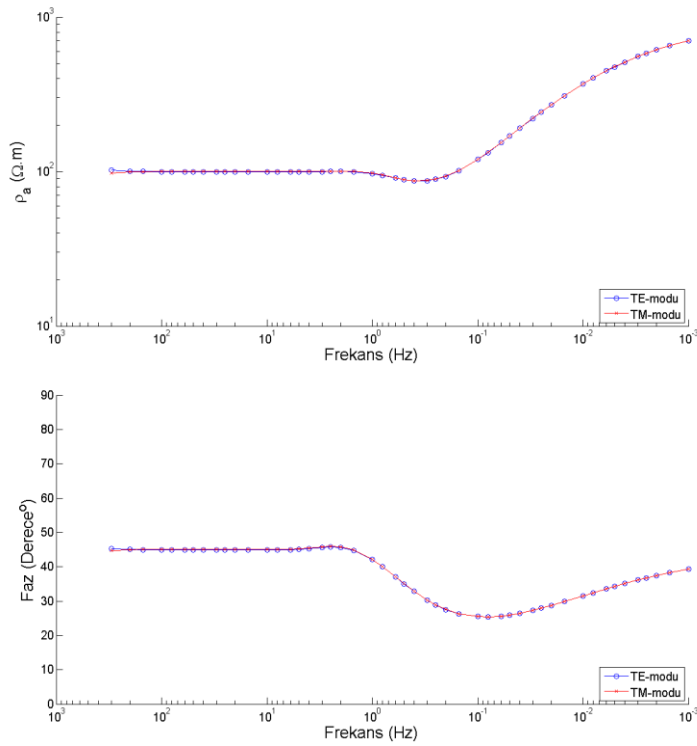
4.2.2 İki tabakalı ortam modeli

İlk olarak bu tez kapsamında geliştirilen iki boyutlu modelleme programı karmaşık modellerden önce daha basit yer altı modellerinde denemiştir. Buradaki amaç karmaşık modelleri incelemenden önce programın basit yeraltı modellerini çözme kapasitesini ölçmektir. Bu bölümde iki tabakalı ortam için derinliği değişen iletken örtü katmanları önerilmiştir. Şekil 4.3’de görüldüğü üzere örtü tabakası 10 km alınmıştır. 100 $\Omega.m$ ’lik örtü tabakasının altında 1000 $\Omega.m$ değerine sahip bir tabaka vardır. Bu model için 20 istasyon noktası aralarında 1 km olacak şekilde seçilmiştir. Hesaplamalarda 50 frekans kullanılmıştır. Hesaplamalar 8 sn. sürmüştür. Model blok kalınlıkları ekler kısmında verilmiştir (Çizelge A.1).

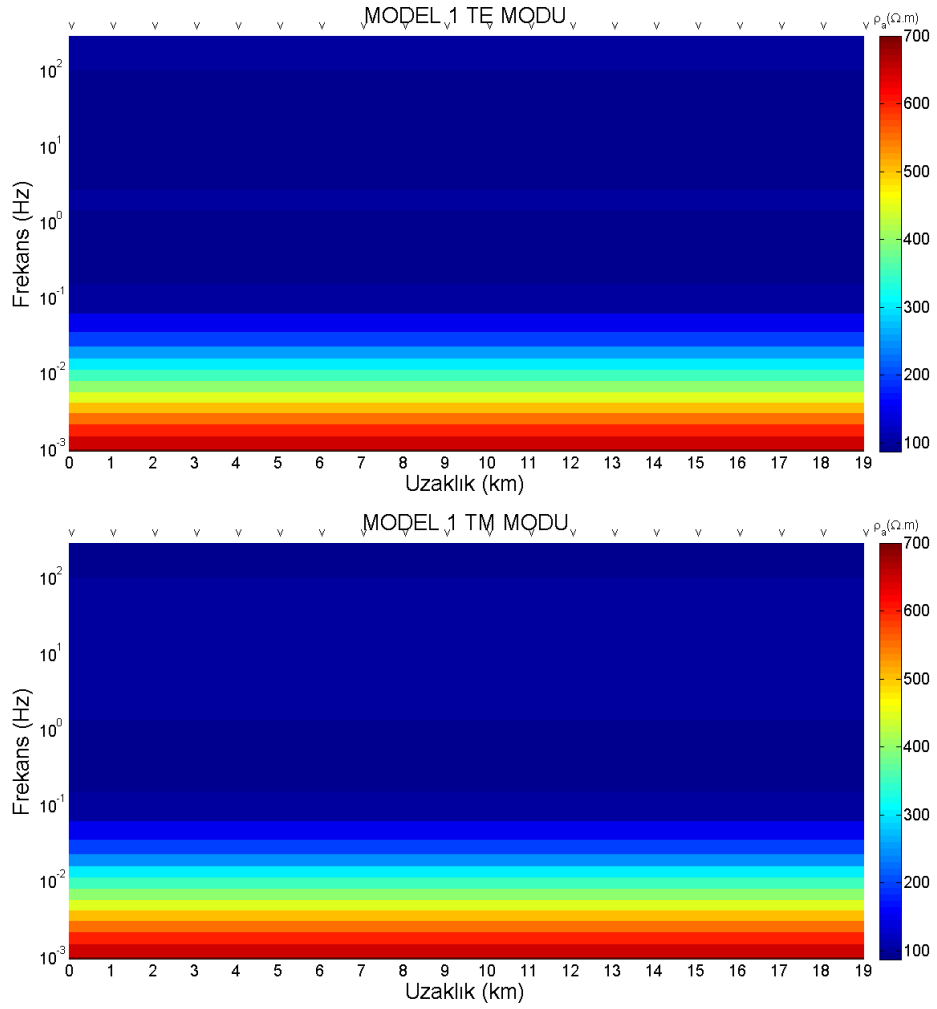


Şekil 4.3: 2 tabakalı ortam öz direnç modeli, Model 1.

Şekil 4.4'te 10 numaralı istasyondan alınmış olan görünür öz direnç ve faz eğrileri görülmektedir. Her iki modda iki tabakanın ortamı belirgin olarak bulmuş ancak TE ve TM modları ikinci tabakanın öz direnç değeri olan 1000 $\Omega.m$ 'ye ulaşamamıştır ve faz eğrileri bu durumu desteklemektedir. Şekil 4.5'teki yeraltı TE ve TM modları için hesaplanan görünür öz direnç kesitleri ise iki tabakanın varlığını belirgin bir şekilde göstermektedir.



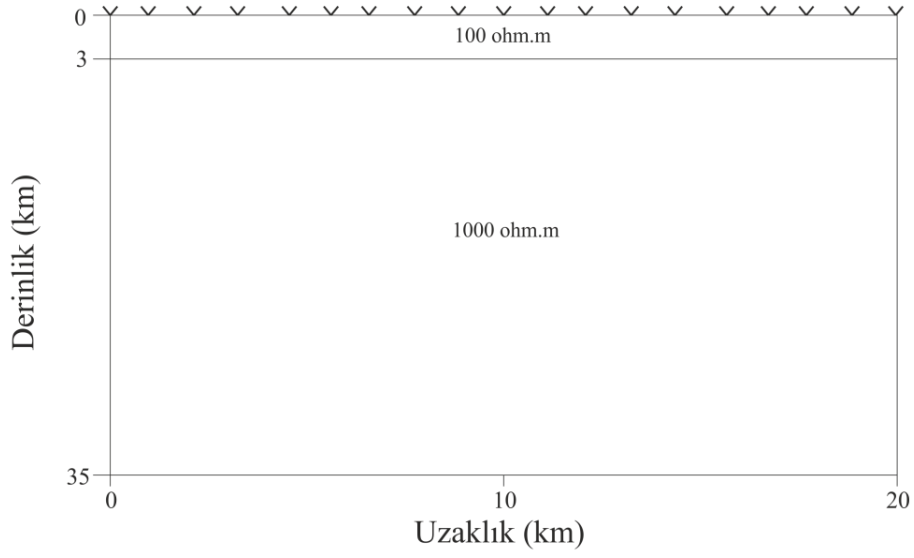
Şekil 4.4: Model 1 görünür öz direnç ve faz eğrileri.



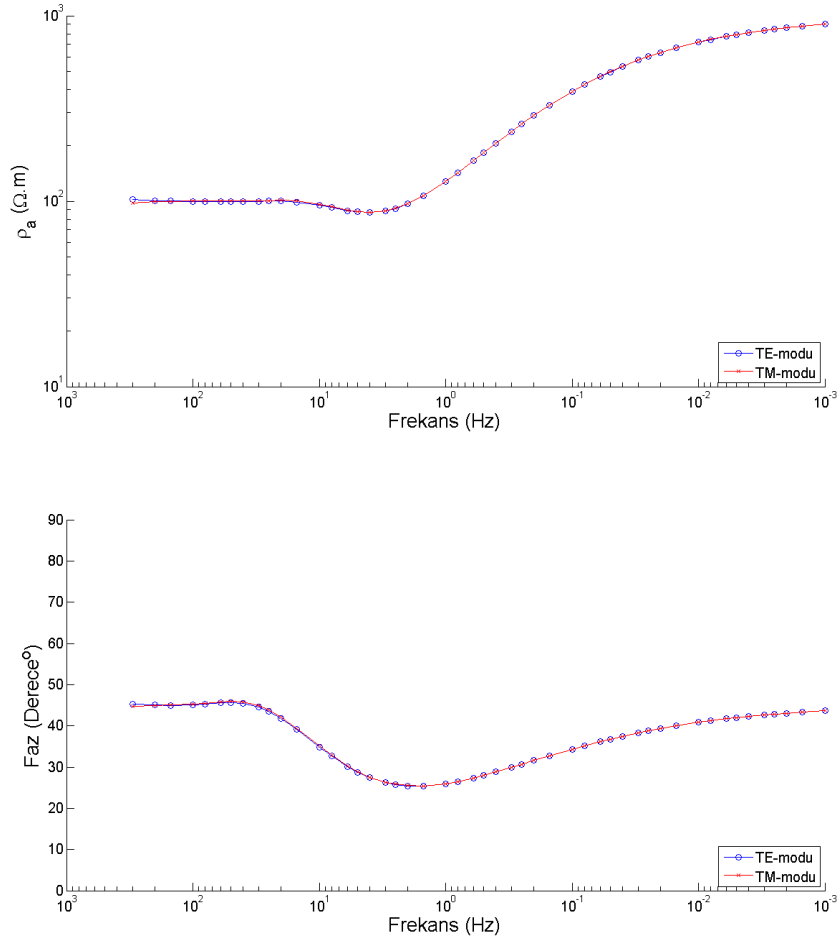
Şekil 4.5: Model 1 için TE ve TM moduna ait yer altı görünür öz direnç kesitleri.

Şekil 4.6’da örtü tabakası için 3 km gibi sık bir derinlik seçilmiştir. Bu yer altı modelinde 20 istasyon ve 50 frekans kullanılmıştır. İstasyon aralıkları 1 km olarak seçilmiştir. Tabakaların öz dirençleri sırasıyla 100 $\Omega.m$ ve 1000 $\Omega.m$ seçilmiştir. Hesaplamalar 9 sn. sürmüştür. Model blok kalınlıkları ekler kısmında verilmiştir (Çizelge A.2).

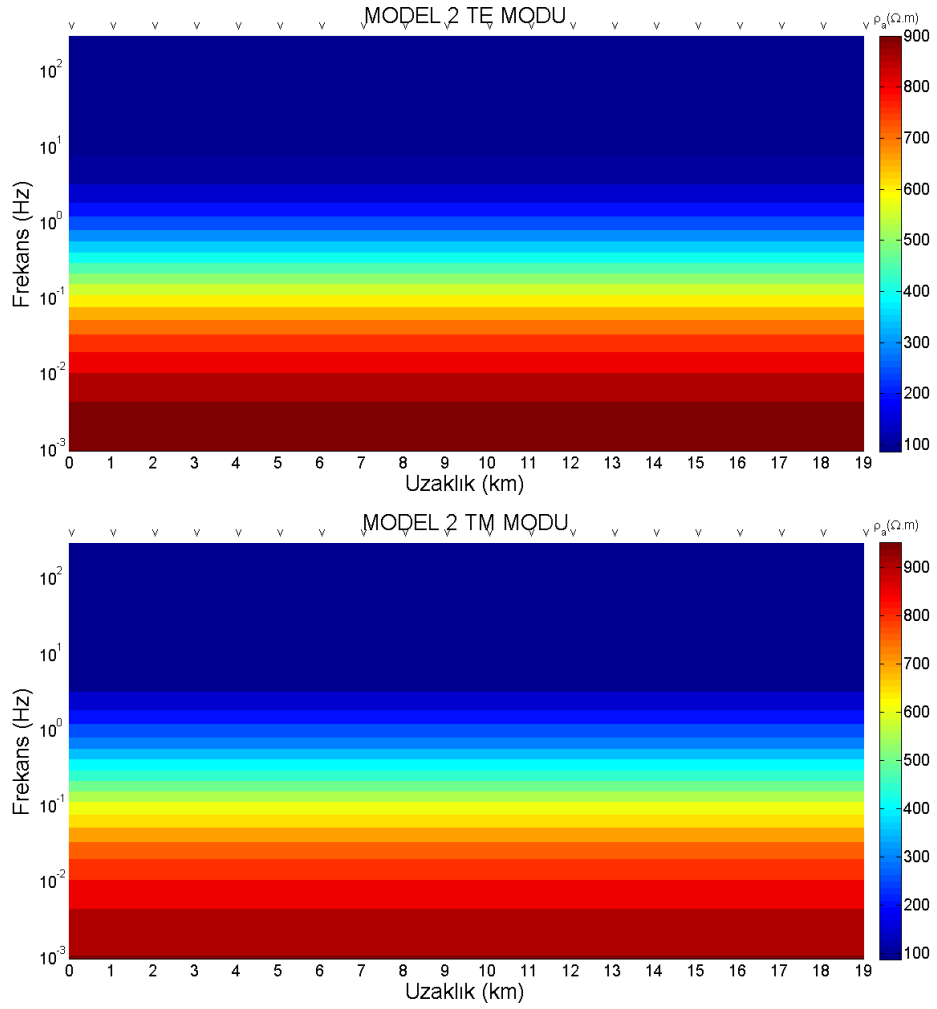
Şekil 4.7’de görülen görünür öz direnç ve faz eğrileri Model 1’in sonuçlarında olduğu gibi iki tabakanın varlığı hem görünür öz direnç hem de faz eğrilerinde görülmektedir. TE modunda 800 $\Omega.m$ değerine ulaşılırken, TM modunda ise 900 ohm.m değerine ulaşılmıştır. Şekil 4.8’teki yeraltı TE ve TM modları için hesaplanan görünür öz direnç kesitleri ise iki tabakanın varlığını belirgin bir şekilde göstermektedir.



Şekil 4.6: 2 tabakalı ortam öz direnç modeli, Model 2.



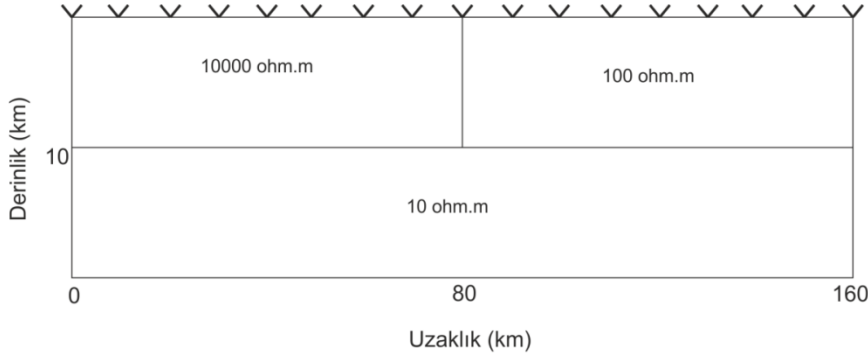
Şekil 4.7: Model 2 görünür öz direnç ve faz eğrileri.



Şekil 4.8: Model 2 için TE ve TM moduna ait yer altı görünür öz direnç kesitleri.

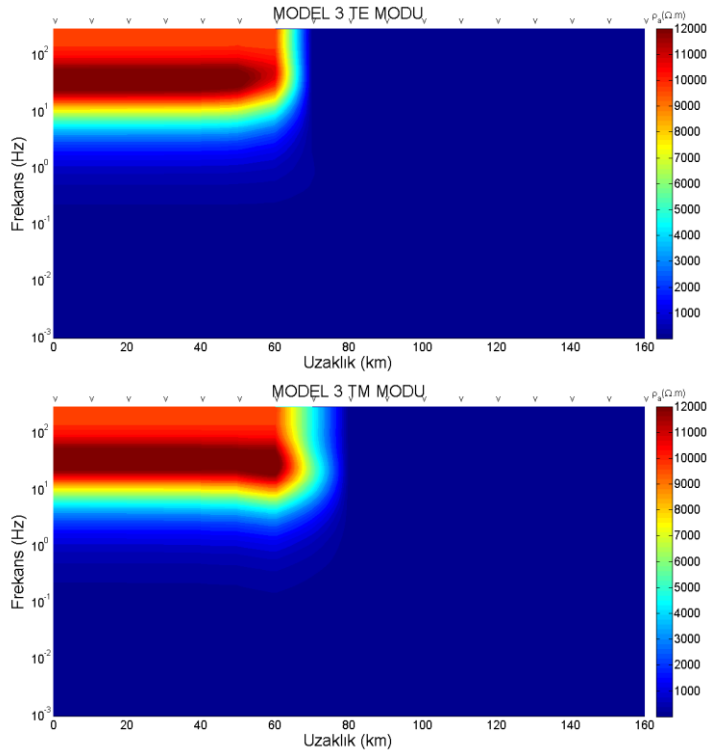
4.2.3 Fay modeli

Bu bölümde TE ve TM modlarının yanıl ve düşey olarak değişim gösteren bir fay modeline karşı duyarlılıkları incelenecektir. Bu modelde ilk tabakada $10000 \Omega.m$ 'den $100 \Omega.m$ 'ye geçiş görülmektedir. Bu tabakanın altında ise $10 \Omega.m$ 'lik yarı sonsuz bir ortam bulunmaktadır. Şekil 4.9'da bu yer altı modeli görülmektedir.3. Bu modeldeki amaç yanıl ve düşey süreksizliklerin TE ve TM modlarında yarattığı farklılıkların aynı model üzerinde incelenmesidir. Hesaplamalar 16 istasyon ve 50 frekans için 3,4 sn sürmüştür. İstasyon aralıkları 10 km seçilmiştir. Model blok kalınlıkları ekler kısmında verilmiştir (Çizelge A.3).



Şekil 4.9:Fay modeli, Model 3.

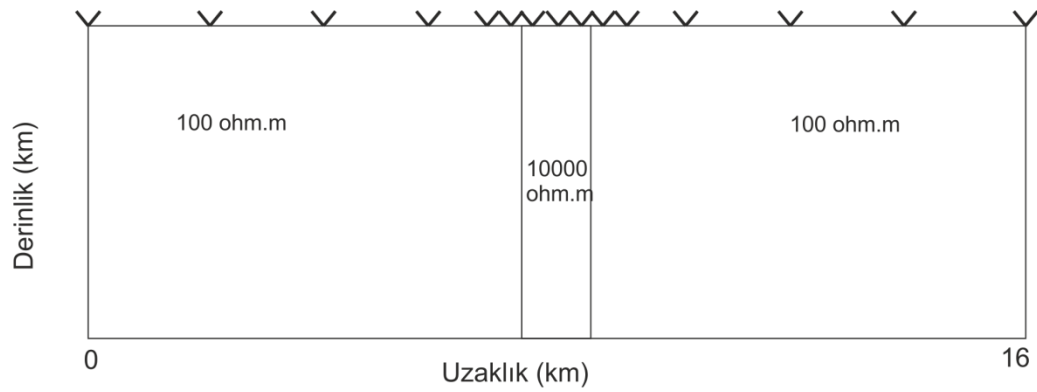
Şekil 4.10’da TE modu için görünür öz direnç ve faz eğrileri verilmiştir. Görülebildiği üzere TE ve TM modları tabakalı yer altı yapısını çözümleyebilmiştir. Her iki yer altı kesidine bakıldığında iki tabakalı yer altı modeli görülebilmektedir. TE ve TM modlarına ait görünür öz direnç ve faz eğrileri ekler kısımda verilmiştir. Bu grafiklere bakıldığında 10000 $\Omega.m$ ’den 100 $\Omega.m$ ’lik tabakaya geçişin TM modundan TE moduna göre daha belirgin olduğu görülmektedir (Şekil B.1 ve Şekil B.2). Hem yanal hemde düşey yönde süreksizlik barındıran yer altı modellerinde TE ve TM modlarının ortak yorumlanması yer altı yapısını belirlemede uygun olacaktır.



Şekil 4.10: Model 3 için TE ve TM moduna ait yer altı görünür öz direnç kesitleri.

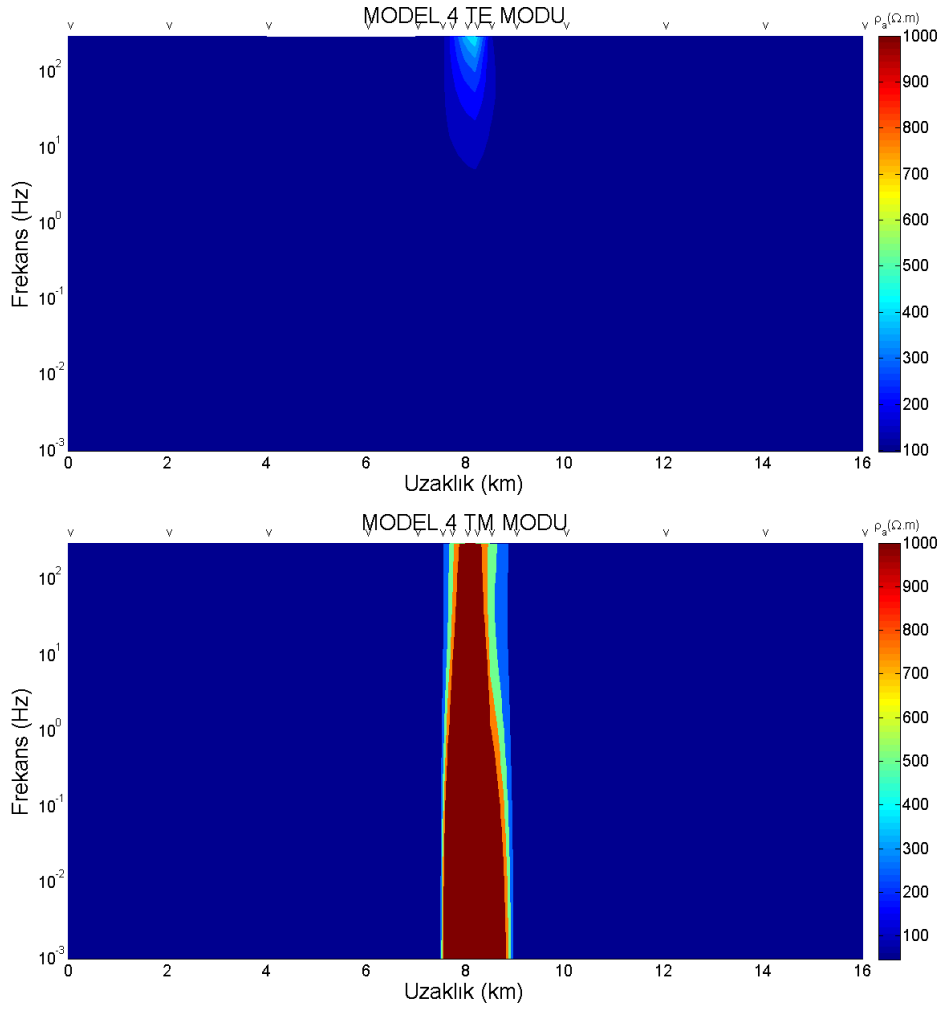
4.2.4 Dirençli dayk

Bu bölümde TE ve TM modlarının yer altı modelinin çevre ortama göre dirençli bir dayk olması durumundaki farklılıkları ve duyarlı oldukları kısımlar incelenecektir. Şekil 4.11'deki Model 4'de dirençli dayk yapısı gösterilmektedir. 16 km uzunluğundaki profil üzerinde 15 adet istasyon konulmuştur. İstasyonlar arası mesafe değişmektedir. Ortam öz direncinin değişim gösterdiği yerlerde istasyonlar arası mesafe azaltılarak değişim daha iyi gözlemlenmeye çalışılmıştır. Hesaplamalar 50 frekans için 3.1 sn sürmüştür. Model blok kalınlıkları ekler kısmında verilmiştir (Çizelge A.4).



Şekil 4.11:Dirençli dayk modeli, Model 4.

Şekil 4.12'de derinliğe göre değişen görünür öz direnç ve faz eğrileri TE modu için sunulmuştur. Görülebileceği üzere TE modunun sonuçlarında derin ve iletken yapı sığ bir yapı gibi görülmektedir. Şekil 4.12'te ise TM modu için görünür öz direnç ve faz eğrilerine bakıldığında dirençli dayk modeli açıkça öz direnç değerlerinde görülebilmektedir. TE modunda derin yapı görülemezken TM modunda ise 5500 $\Omega.m$ 'lik ilk modelden oldukça farklı sonuçlar elde edilmiştir. TE ve TM modlarının görünür öz direnç ve faz grafikleri ekler kısmında verilmiştir (Şekil B.3 ve Şekil B.4). Bu grafiklere bakıldığında TM modunda dirençli yapının yanal sınırlarını belirgin bir şekilde görülmektedir. TE modu ise derin yapının sadece yüzeysel kısmına ait verileri çözümleyebilmiş ancak derin kısmını çözümleyememiştir.



Şekil 4.12: Model 4 için TE ve TM moduna ait yer altı görünür öz direnç kesitleri.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Modelleme çalışmalarında kullanılan yöntem kadar modellenen yapıyı temsil eden parametrelerin seçimi de önemlidir. Sonlu farklar yöntemi hesaplama aşamasında çözüme hızlı ulaşılmasını sağladığından tercih edilmiştir. Bu yöntemde yer altı düşey ve yatay yönde bloklar halinde temsil edilir. Çalışılan yer altı modeline uygun parametrelerin girilmesi sağlıklı sonuç elde edilmesi bakımından son derece önemlidir. Bu aşamada yapılan hatalar beklenenden tamamen farklı sonuçlar elde edilmesi sebep olur.

Manyetotellürik yöntemde tanımı yapılan TE ve TM modlarının anlaşılması son derece önem taşır. Bunun başlıca sebeplerinde biri her iki modun farklı yer altı yapılarına karşı duyarlı olmasından ileri gelir. Kısaca özetlemek gerekirse TE modu iletken ve derin yapılara karşı duyarlı iken, TM modu ise dirençli ve sıkı yapılara duyarlıdır (Berdichevsky ve diğ., 1998). Ancak bu etkiler en iyi kuramsal modellerde kendilerini gösterirler ancak doğada bu özellikler bir arada bulunur. Bunun önemi yukarıda bahsedilen fiziksel ve elektriksel parametrelerin bir arada bulunması durumunda ortaya çıkar. Bahsedilen modların tüm parametrelerin olması durumunda daha duyarlı hiçbirinin olmaması durumunda ise tamamen duyarsız olduğu bilinmektedir.

TE ve TM modlarının doğaları gereği yer içinde bulunan doğal tellürik akımların yer içindeki yapılara karşı gösterdiği tepkilerde farklı olacaktır. Bu modların yanal ve düşey sınırlara olan duyarlılıkları da birbirlerinden farklılık göstermektedir. TE modu söz konusu olduğunda bu akımlar yapının üst ve alt sınırlarını belirleyici olurken, TM modu söz konusu olduğunda ise yanal sınırları belirleyici olurlar. Bu durumda yorumlama aşamasında her iki modun özellikleri göz önüne alınması gerekmektedir.

Bu tez kapsamında geliştirilen iki boyutlu düz çözüm programı MATLAB ortamında yazılmıştır. Düz çözüm ya da başlangıç modeli önemli bir kriterdir. Özellikle doğrusal olmayan Jeofizik problemlerin ters çözümde sağlıklı bir başlangıç

modelinin olması önem taşır. Burada daha önce bahsedilen fiziksel parametrelerin seçimi en önemli kısımdır. TE ve TM modlarının zayıf ve üstün yönlerini incelemek üzere farklı modeller üzerinde hesaplamalar yapılmıştır. Bu hesaplamalar esnasında model parametrelerinden blok kalınlıklarının önemi ön plana çıkmıştır. Sabit blok kullanmak yerine kullanılan frekans ve öz dirence dikkat edilerek modele göre blok kalınlık seçilmelidir. Etkin derinliğe dikkat edilerek oluşturulan düşey yöndeki blok kalınlıkları hesaplama sonuçlarının doğru sonuç verdiği görülmüştür. Aksi takdirde sonuçların modelden uzak ve yanlış sonuçlar vermektedir.

KAYNAKLAR

- Aprea, C., Booker, J.R. ve Smith T.**(1997). The forward problem of electromagnetic induction: accurate finite-difference approximations for two-dimensional discrete boundaries with arbitrary geometry. *Geophys. J. Int.*, **129**, 29-40.
- Başokur, A.T.**(1994). Definitions of apparent resistivity for the presentation of magnetotelluric sounding data. *Geophysical Prospecting*, **42**,141-149.
- Bedrosian, P.A., Unsworth, M.J. ve Wang,F.**(2001).Structure of the Altyn Tagh Fault and Daxue Shan from magnetotelluric surveys: implications for faulting associated with the rise of the Tibetan Plateau, *Tectonics*, **20**, 474.
- Berdichevsky, M.N., Dmitriev, V.I. ve Pozdnjakova E.E.**(1998).On two-dimensional interpretation of magnetotelluric soundings.*Geophys. J. Int.*,**133**, 585-606.
- Bibby H.M., Risk, G.F., Caldwell T.G.ve Heise W.**(2008). Investigations of deep resistivity structures at the Wairakei geothermal field. *Geothermics*, **38**, 98-107.
- Brewitt-Taylor, C.R. ve Weaver, J.T.**(1976). On the finite difference solution of twodimensionalinduction problems. *Geophys. J.R. Astr. Soc.*, **47**, 375-396.
- Cagniard, L.**(1953). Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting. *Geophysics*, **18**, 605-635.
- Çağlar, İ.** (2001). Electrical resistivity structure of the northwestern Anatolia and its tectonic implications for the Sakarya and Bornova Zones. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **125**, 95-110.
- Candansayar, M.E.**(2002).Sönümlü en küçük kareler ve eşlenik türev algoritmalarının ardışık kullanımı ile Manyetotellürik verilerin düzgünleştiricili iki-boyutlu ters çözümü. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, *Doktora Tezi*, Ankara.
- Candansayar, M.E.**(2008). Two-dimensional inversion of magnetotelluric data with consecutive use of conjugate gradient and least-squares solution with singular value decomposition algorithms. *Geophysical Prospecting*, **56**, 141-157.
- Constable, S.C., Orange, A.S., Hoversten, G.M. ve Morrison, H.F.**(1998). Marine magnetotellurics for petroleum exploration Part I: A sea-floor equipment system.*Geophysics*, **63**, 816–825.
- DeLugão, P.B., Portniaguine, O.ve Zhdanov, M.S.**(1997). Fast and stable two-dimensionalInversion of magnetotellurics data. *J. Geomag. Geoelectr.***49**, 1469-1497.

- Gürer, A.** (1996). Deep conductivity structure of the north Anatolian Fault Zone and the Istanbul and Sakarya Zones along the Gölpazarı – Akçaoca profile, northwest Anatolia. *Int. Geol. Rev.*, **38**, 727-736.
- Jones, A.G.** (1983). On the equivalence of the “Niblett and Bostick” transformation in the magnetotelluric method. *Journal of Geophysics*, **53**, 72-73.
- Jones, F.W. ve Price, A.T.** (1970). The perturbations of alternating geomagnetic fields by conductivity anomalies. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, **20**, 317-334.
- Kaufman, A.A., ve Keller, G.V.** (1981). *The Magnetotelluric Method*. Amsterdam, Elsevier, 595 pp.
- Lujan, V. ve Romo, J.M.** (2010). Audiomagnetotelluric investigation of seawater intrusion using 2-D inversion of invariant impedances. *Geologica Acta*, **8**, 51 – 66.
- Rippe, D., ve Unsworth, M.J.** (2010). Quantifying crustal flow in Tibet with Magnetotelluric data. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **179**, 107 -121.
- Strack, K.-M., Allegar, N., Yu, G., Tulimius, H., Adam, L., Gunnarsson, A., He, L., ve He, Z.** (2008). Mapping geothermal reservoirs using broadband 2-D MT and gravity data. 70th EAGE Conference & Exhibition, Rome, Italy.
- Strangway, D.W. ve Koziar, A.** (1979). Audio frequency magnetotelluric sounding – a case history of the Cavendish geophysical test range. *Geophysics*, **44**, 1429-1446.
- Tikhonov, A.N.** (1950). On Determining Electrical Characteristics of the Deep Layers of the Earth’s crust. *Doklady*, **73** (2), 295 – 297.
- Tuncer, V.** (2003). İki boyutlu Manyetotellürik modellemede TE ve TM modlarının jeoelektrik yapılara ve sınırlara karşı duyarlılığı. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul.
- Ulugergerli, E.U. ve Candansayar, M.E.** (2002). Automated mesh design for two-dimensional magnetotelluric interpretation codes. *Journal of Balkan Society*, **5**, 7-14.
- Unsworth, M.J., Malin, P.E., Egbert, G.D. ve Booker J.R.** (1997). Internal structure of the San Andreas fault at Parfield, California. *Geology*, **25**, 359-362.
- Unsworth, M.J. ve Bedrosian, P.A.** (2004). On the geoelectric structure of major strike-slip faults and shear zones. *Earth planets and Space*, **56**, 1177 – 1184.
- Unsworth, M.J.** (2005). New developments in conventional hydrocarbon exploration with electromagnetic methods. *CSEG Recorder*, 34 – 38.
- Wannamaker P.E., Stodt, J.A., ve Rijo, L.** (1986). Two-dimensional topographic responses in magnetotellurics modeled using finite elements. *Geophysics*, **51**, 2131-2144.
- Weaver, J.T.** (1994). *Mathematical methods for Geo-electromagnetic induction*. Research Studies Press Ltd., Taunton, Somerset, England.

- Wei, W., Unsworth, M.J., Jones A.G., Booker, J., Tan, H., Nelson, D., Chen, L., Li, S., Solon, K., Bedrosian, P.A., Jin. S., Deng, M., Ledo, J., Kay, K., ve Roberts, B.**(2001). Detection of widespread fluids in the Tibetan crust by Magnetotelluric studies. *Science*,**292**, 716 – 719.
- Yamaya, Y., Mogi, T., Hashimoto, T. ve Ichihara, H.**(2009). Hydrothermal system beneath the crater of Tarumai volcano, Japan: 3-D resistivity structure revealed using audio-magnetotellurics and induction vector. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*,**187**, 193–202.
- Yin, C.**(2006).MMT forward modeling for a layered earth with arbitrary anisotropy. *Geophysics*, **71**, G115 – G128.
- Yu, G., Strack, K.-M., Allegar, N., Gunnarsson, Á. Tulinius, H., He, L.ve He, Z.**(2008). Characterizing a geothermal reservoir using broadband 2-D MT survey in Theistareykir, Iceland. SEG Las Vegas 2008 Annual Meeting Expanded Abstracts,1152 – 1156.
- Zhdanov, M.S., Varentsov, I.M., Weaver, J.T., Golubav, N.G. ve Krykov, V.A.** (1997). Methods for modeling electromagnetic fields Results from COMMEMI – the international project on the comparison of modeling methods for electromagnetic induction. *Journal of Applied Geophysics*, **37**, 133 – 271.
- Zhdanov, M.S. ve Keller, G.V.**(1994). *The Geoelectrical Methods in Geophysical Exploration*. Amsterdam, Elsevier, 873 pp.

EKLER

EK A: Modellerde kullanılan model ağı parametreleri

EK B: Hesaplamalar sonucunda elde edilmiş görünür özdirenç ve faze eğrileri

EK A

Çizelge A.1 : Model 1 için ağ parametreleri

X yönündeki blok kalınlıkları																								
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Z yönündeki blok kalınlıkları																								
25	25	25	25	50	50	100	150	150	150	200	200	250	300	400	400	450	450	500	500	550	600	750	850	900
950	1000	1000	1100	1200	1400	1600	2000	2000	2300	2300	2500	2600	2700	2900	3000	3000	3500	3500	4000	4000	4000	5000	5000	5000
6500	6500	7000	7000	8000	9000	10000	10000	11000	12000	14000	15000	15000	17000	19000	20000	20000	22000	23000	24000	25000	26000	27000	28000	30000
45000	45000	50000	50000	60000	60000	70000	70000	80000	80000	90000	90000	100000	120000	130000	130000	150000	150000	170000	170000	180000	180000	200000	200000	210000
210000	210000	210000	230000	230000																				

Çizelge A.2 : Model 2 için ağ parametreleri

X yönündeki blok kalınlıkları																								
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Z yönündeki blok kalınlıkları																								
25	25	25	25	50	50	100	150	150	150	200	200	250	300	400	400	450	450	500	500	550	600	750	850	900
950	1000	1000	1100	1200	1400	1600	2000	2000	2300	2300	2500	2600	2700	2900	3000	3000	3500	3500	4000	4000	4000	5000	5000	5000
6500	6500	7000	7000	8000	9000	10000	10000	11000	12000	14000	15000	15000	17000	19000	20000	20000	22000	23000	24000	25000	26000	27000	28000	30000
45000	45000	50000	50000	60000	60000	70000	70000	80000	80000	90000	90000	100000	120000	130000	130000	150000	150000	170000	170000	180000	180000	200000	200000	210000
210000	210000	210000	230000	230000																				

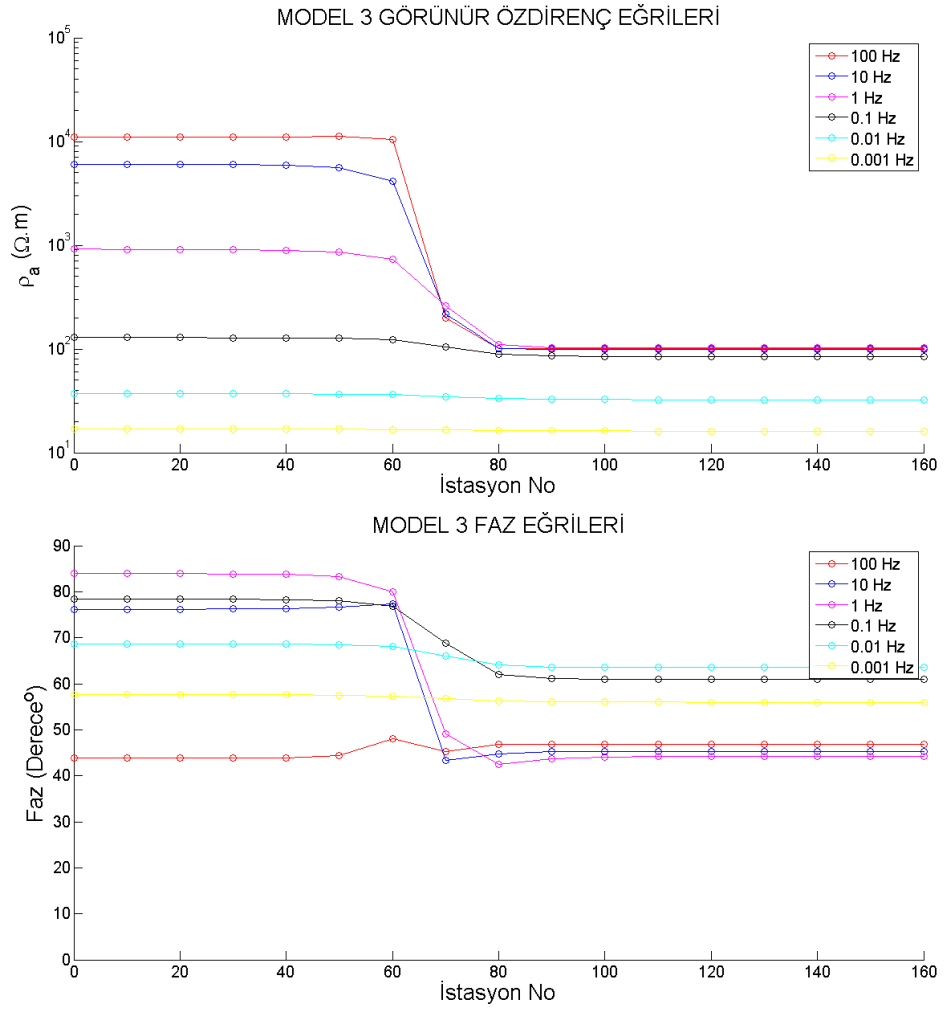
Çizelge A.3 : Model 3 için ağ parametreleri

X yönündeki blok kalınlıkları																								
16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
Z yönündeki blok kalınlıkları																								
125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	150	150	150	160	160	160	165	165	165	170	180	185	190	200	210
220	250	250	270	270	300	300	310	310	310	310	310	310	310	330	330	330	350	350	370	370	500	510	510	550
550	570	570	590	590	610	610	650	650	650	670	670	700	700	1000	1000	5000	5000	10000	10000	25000	25000	50000	50000	

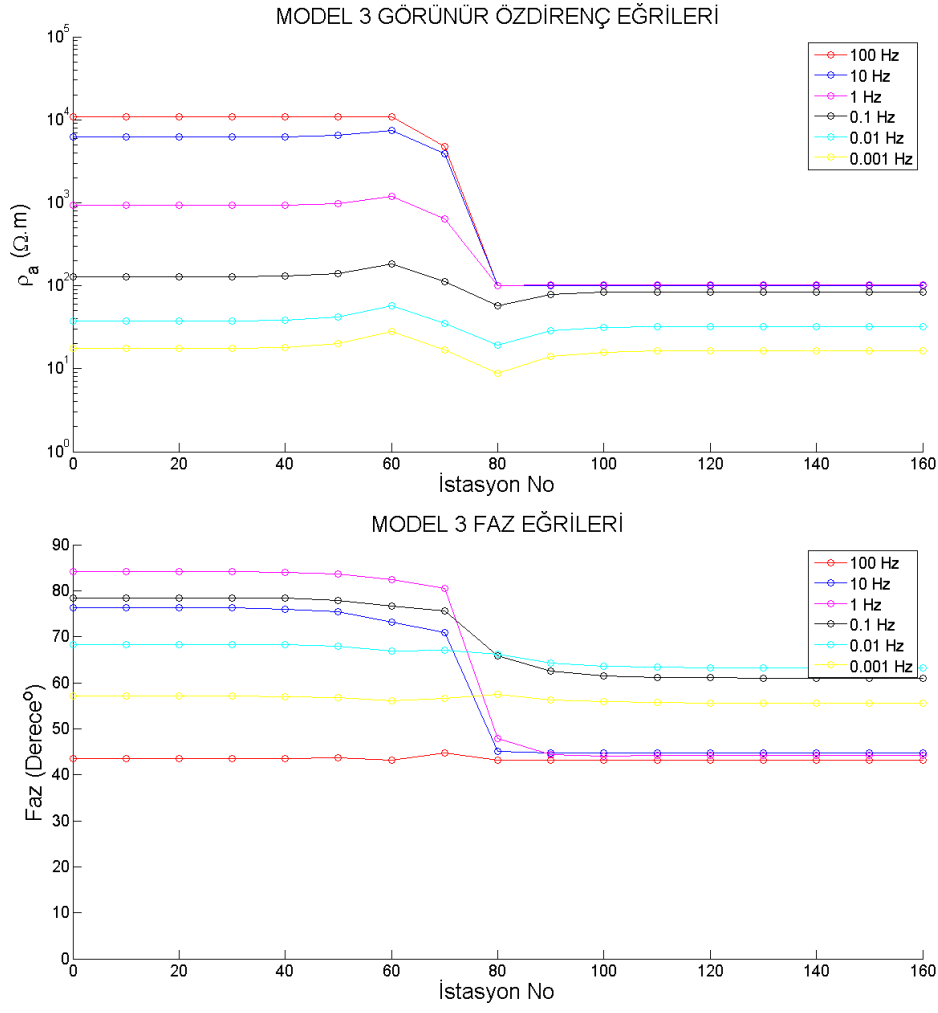
Çizelge A.4 : Model 4 için ağ parametreleri

X yönündeki blok kalınlıkları																								
2	2	2	1	0.5	0.2	0.3	0.2	0.3	0.5	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Z yönündeki blok kalınlıkları																								
50	50	125	125	125	125	200	200	300	300	400	400	500	500	1000	1000	1500	1500	1500	2000	2000	3000	3000	4000	4000
10000	10000	15000	15000	15000	20000	40000	60000	60000	80000															

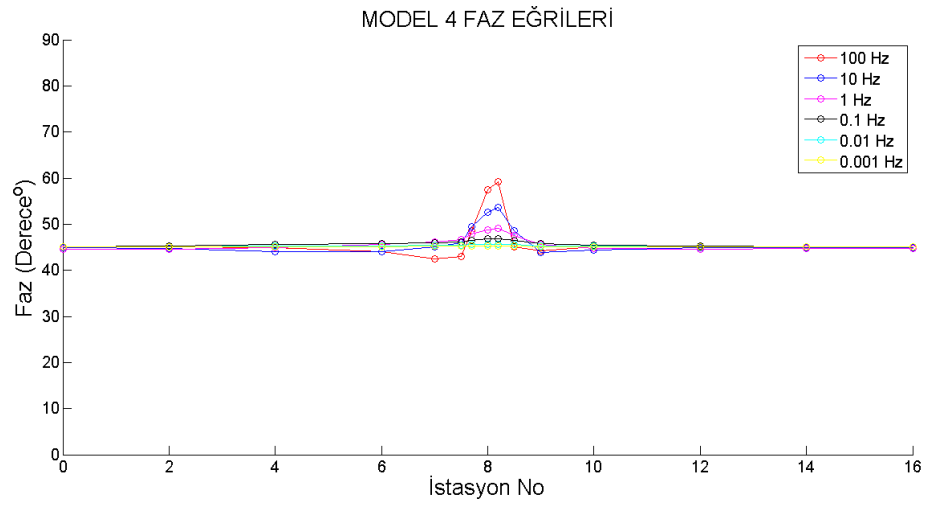
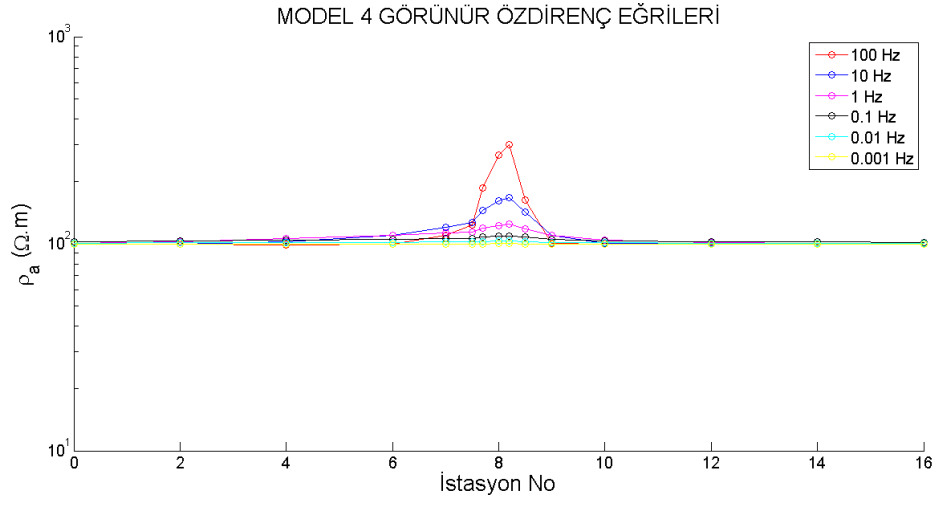
EK B



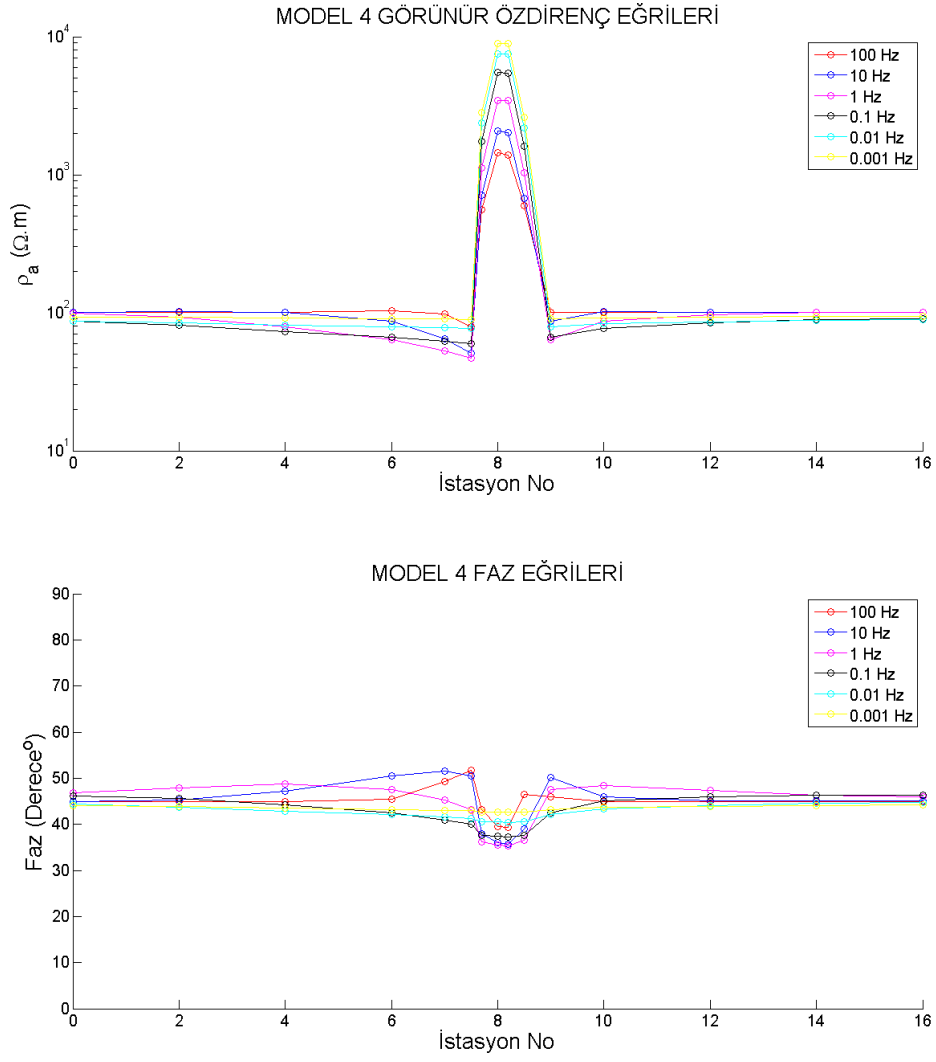
Şekil B.1: Model 3 TE modu için görünür öz direnç ve faz eğrileri.



Şekil B.2: Model 3 TM modu için görünür öz direnç ve faz eğrileri.



ŞekilB.3: Model 4 TE modu için görünür öz direnç ve faz eğrileri.



ŞekilB.4: Model 4 TM modu için görünür öz direnç ve faz eğrileri.

ÖZGEÇMİŞ

AdSoyad: Berk YAKAR
DoğumYeriveTarihi: Adana, 1982
E-Posta: yakarb@itu.edu.tr
Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi, 2006

