İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İKİ BOYUTLU MANYETOTELLÜRİK MODELLEMEDE TE VE TM MODLARININ JEOELEKTRİK YAPILARA VE SINIRLARINA KARŞI DUYARLILIĞI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Volkan TUNCER

Anabilim Dalı : JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ

Programı : JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ

OCAK 2003

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İKİ BOYUTLU MANYETOTELLÜRİK MODELLEMEDE TE VE TM MODLARININ JEOELEKTRİK YAPILARA VE SINIRLARINA KARŞI DUYARLILIĞI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Volkan TUNCER
Enstitü No : 505991046

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24 Ocak 2003
Tezin Savunulduğu Tarih : 16 Ocak 2003

Tez Danışmanı : Prof. Dr. İlyas ÇAĞLAR

Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Gülçin ÖZÜRLAN

Doç. Dr. Aysan GÜRER (İ. Ü.)

OCAK 2003

ÖNSÖZ

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

Jeofizik Mühendisliği Bölümü' nde yaptığım yüksek lisans öğrenimimin son aşaması olan bu tez çalışmasında, iki boyutlu manyetotellürik yöntemdeki TE ve TM modlarının farklı elektriksel özelliklerdeki yapılara karşı olan duyarlılıkları düz çözüm yaklaşımları kullanılarak irdelenmeye çalışılmıştır.

Tezde yer alan çalışma konusunu öneren ve danışmanlığımı yapan, tez çalışması süresince yorumlarıyla bana yol gösteren, yardımlarını esirgemeyen ve çalışmalarım sırasında düşüncelerinden yararlandığım sayın hocam Prof. Dr. İlyas Çağlar' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez savunmasından sonraki aşamada düşünceleri ve yorumlarıyla tezime büyük katkılar sağlayan sayın hocalarım Doç. Dr. Gülçin Özürlan' a ve Doç. Dr. Aysan Gürer' e içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalışmam süresince modelleme yapılan arazinin jeolojisinin yazılması sırasında yardımlarını esirgemeyen sayın hocam Yard. Doç. Dr. Turgay İşseven' e, tez içerisinde yer alan şekillerin oluşturulmasında büyük emekleri bulunan arkadaşım Araş. Gör. Ahmet Ökeler' e ve tezin oluşum sürecinde yorumlarından ve fikirlerinden yararlandığım başta Erşan Türkoğlu olmak üzere tüm yüksek lisans arkadaşlarıma ve hocalarıma teşekkür ederim.

Tüm öğrenim hayatım boyunca bana emeği geçen bütün öğretmenlerim ile her türlü fedakarlığa katlanarak beni yetiştiren aileme de teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Aralık, 2002 Volkan TUNCER

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

KISALTMALAR..... v
TABLO LİSTESİ..... vi
ŞEKİL LİSTESİ..... vii
SEMBOL LİSTESİ..... ix
ÖZET..... x
SUMMARY..... xi

1. GİRİŞ..... 1

2. MANYETOTELLÜRİK YÖNTEM VE TEMEL İLKELERİ..... 4
2. 1 Manyetotellürik Yöntem..... 4
2. 2 Yer Manyetik Alanının Zamana Bağlı Değişimleri..... 7
2. 2. 1 11 Yıllık, Yıllık, 27 Günlük ve Günlük Değişimler..... 7
2. 2. 2 Küçük Titreşimler (Micropulsations)..... 7
2. 2. 2. 1 Düzenli Değişimler (Pc_1, Pc_2, Pc_3, Pc_4, Pc_5)..... 7
2. 2. 2. 2 Düzensiz Değişimler (Pi_1, Pi_2)..... 8
2. 3 Manyetotellürik yöntemin üstünlükleri ve zayıf noktaları..... 9
2. 4 Ölçü alım teknikleri..... 9
2. 4. 1 Ölçülen Büyüklükler..... 10
2. 5 Manyetotellürik Kuram..... 10
2. 5. 1 Zamanla Değişen Alanlar İçin Maxwell Denklemleri..... 10
2. 5. 1. 1 Maxwell Denklemleri ile Genel Elektromanyetik Dalga Denkleminin Çıkarılması..... 11
2. 5. 1. 2 Elektromanyetik Dalga Denklemi Çözümünden Elektromanyetik Yayınım Sabitinin Saptanması..... 12
2. 5. 1. 3 Manyetik Alanın Çıkarılması..... 13
2. 5. 1. 4 TE ve TM Modları..... 14
2. 6 Empedans..... 15
2. 6. 1 İki Tabaka Elektrik Model Yapısı..... 16
2. 7 Homojen Ortama Geçiş ve Cagniard Özdirenci..... 17
2. 8 Elektromanyetik Alan Nüfuz Derinliği..... 18

3. MANYETOTELLÜRİK YÖNTEMDE İKİ BOYUTLU MODELLEME..... 20
3. 1 İki Boyutlu Modellemede Çözümler..... 20
3. 1. 1 Analitik Çözümler..... 20
3. 1. 2 Sayısal Çözümler..... 20
3. 2 Sonlu Elemanlar Yöntemi..... 21
3. 3 PWM – İki Boyutlu Manyetotellurik Modelleme Programında Kullanılan Örnek Giriş Dosyası..... 25

4. İKİ BOYUTLU MANYETOTELLÜRİK MODELLEME ÇALIŞMALARI..... 29
4. 1 Kuramsal Modeller ve Manyetotellürik Yöntemde TE ve TM Modlarının İki Boyutlu Yapılara Karşı Duyarlılığı..... 29
4. 2 Uygulamalar..... 30
4. 2. 1 Sığ İletken Yapı..... 30

4. 2. 2 Sığ Dirençli Yapı..... 33
4. 2. 3 Derin İletken Yapı..... 35
4. 2. 4 Derin Dirençli Yapı..... 37
4. 2. 5 Arazi Modeli..... 39

5. KEŞAN – SALİHLİ MANYETOTELLÜRİK PROFİLİNİN İKİ BOYUTLU DÜZ ÇÖZÜM İLE MODELLENMESİ..... 43
5. 1 Ölçü Alınan Bölgenin Jeolojisi..... 44
5. 1. 1 İstanbul Zonu..... 44
5. 1. 2 Ezine Zonu..... 44
5. 1. 3 Sakarya Zonu..... 45
5. 1. 3. 1 Kazdağ Grubu..... 45
5. 1. 3. 2 Karakaya Kompleksi..... 45
5. 1. 4 Bornova Zonu..... 45
5. 1. 5 Menderes Masifi ve Gediz Grabeni..... 45
5. 2 Keşan – Salihli Manyetotellürik Profilinin İki Boyutlu Modellemesi.. 46

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER..... 52

KAYNAKLAR..... 54

EK A..... 57

ÖZGEÇMİŞ..... 73

KISALTMALAR

TE : Transverse Electric
TM : Transverse Magnetic
MT : Magnetotellurics (Manyetotellürik Yöntem)
EM : Electromagnetics (Elektromanyetik)
CGÖ : Cagniard Görünür Özdirenci
2-B : İki Boyutlu
3-B : Üç Boyutlu
DAÖ : Doğru Akım Özdirenç
ELF : Extremely Low Frequency
MA : Manyetopoz Akımları
KA : Kuyruk Akımları
RA : Ring Akımları
BA : Bağımsız Levha Akımları
$\mathbf{P_c}$: Düzenli Küçük Titreşimler
$\mathbf{P_i}$: Düzensiz Küçük Titreşimler
SF : Sonlu Farklar
SE : Sonlu Elemanlar
FD : Finite Difference
FE : Finite Element
IP : In-Phase Measurements
OP : Out-of-Phase Measurements
KS : Keşan – Salihli Manyetotellürik Profili
EZ : Ezine Zonu
SZ : Sakarya Zonu
BZ : Bornova Zonu

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2. 1 **:** Yerin manyetik alanında zamana bağlı değişimler..... 6
Tablo 4. 1 **:** Ek . A ' da verilen modellerin TE ve TM modlarındaki duyarlılıkları..... 41
Tablo 6. 1 **:** TE ve TM modlarının farklı özellikteki yapılara karşı olan duyarlılığı..... 52
Tablo 6. 2 **:** Fiziksel ve elektriksel özelliklerin bir arada bulunması durumunda TE ve TM modlarının duyarlılığı…… 53

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2. 1 : Manyetosfer ve iyonosfer akımları..... 5
Şekil 2. 2 : Elektromanyetik dalgaların farklı frekanslardaki davranışları..... 6
Şekil 2. 3 : Yer manyetik alanında ki zamana bağlı değişimlerin genlik spektrumları..... 8
Şekil 2. 4 : TE ve TM modları ile elektrik ve manyetik alan bileşenleri..... 14
Şekil 2. 5 : Kayaçların özdirençlerine ve ölçüm alınan frekanslara bağlı olarak elektromanyetik dalgaların nüfuz derinliği..... 19
Şekil 3. 1 : Analitik çözüm için bazı kuramsal modeller..... 20
Şekil 3. 2 : Üçgen eleman ve polinom yaklaşımı..... 22
Şekil 3. 3 : Üçgen elemanın düğüm noktalarında $\Phi(x, z)$' nin tanımlanması..... 22
Şekil 4. 1 : Sığ iletken kütle..... 31
Şekil 4. 2 : Sığ iletken yapının TE ve TM modları için hesaplanan görünür özdirenç dağılımı..... 31
Şekil 4. 3 : Sığ iletken yapının altı ana frekanstaki görünür özdirenç değişimi..... 32
Şekil 4. 4 : Sığ dirençli yapı..... 33
Şekil 4. 5 : Sığ dirençli yapının TE ve TM modlarındaki görünür özdirenç görüntüsü..... 34
Şekil 4. 6 : Sığ dirençli yapının altı ana frekanstaki görünür özdirenç değişimi..... 34
Şekil 4. 7 : Derin iletken kütle..... 35
Şekil 4. 8 : Derin iletken yapının TE ve TM modlarındaki görünür özdirenç görüntüsü..... 36
Şekil 4. 9 : Derin iletken yapının altı ana frekanstaki görünür özdirenç değişimi..... 36
Şekil 4. 10 : Derin dirençli yapı..... 37
Şekil 4. 11 : Derin dirençli yapının TE ve TM modlarındaki görünür özdirenç dağılımı..... 38
Şekil 4. 12 : Derin dirençli yapının altı ana frekanstaki görünür özdirenç değişimi..... 38
Şekil 4. 13 : Kırgız Tien Shan Bölgesi MT verileri için hazırlanan model (Berdichevsky ve diğ. 1998), iki boyutlu görünür özdirençleri ve değişimleri..... 40
Şekil 5. 1 : Keşan – Salihli (KS) profilinin alındığı Batı Anadolu Bölgesi' nin rölyef haritası..... 43
Şekil 5. 2 : Keşan – Salihli (KS) profili boyunca düşey jeolojik kesit ve manyetotellürik ölçüm noktaları (Çağlar 2001' den değiştirilerek alınmıştır)..... 44
Şekil 5. 3 : Keşan – Salihli manyetotellürik profilinin iki boyutlu düz çözümü için oluşturulan yerelektrik modeli..... 47

Şekil 5. 4 **: a)** KS profili için gözlenen TE modu manyetotellürik verisi **b)** KS profili için hesaplanan TE modu görünür özdirençleri **c)** KS profili için gözlenen TM modu manyetotellürik verisi **d)** KS profili için hesaplanan TM modu görünür özdirençleri (EZ: Ezine Zonu, SZ: Sakarya Zonu, BZ: Bornova Zonu)..... 48
Şekil 5. 5 **:** Keşan – Salihli profili sonuçlarından belirli frekanslarda alınan TE ve TM modları görünür özdirenç değişimleri..... 49
Şekil A. 1 **:** İç içe iletken yapı modeli, iki boyutlu görünür özdirençleri ve değişimleri..... 58
Şekil A. 2 **:** İç içe dirençli yapı modeli, iki boyutlu görünür özdirençleri ve değişimleri..... 59
Şekil A. 3 **:** İki özdeş iletken yapı modeli, iki boyutlu görünür özdirençleri ve değişimleri..... 60
Şekil A. 4 **:** İki özdeş dirençli yapı modeli, iki boyutlu görünür özdirençleri ve değişimleri..... 61
Şekil A. 5 **:** Alüvyal graben modeli, iki boyutlu görünür özdirençleri ve değişimleri..... 62
Şekil A. 6 **:** Fay modeli, iki boyutlu görünür özdirençleri ve değişimleri..... 63
Şekil A. 7 **:** İletken dayk modeli, iki boyutlu görünür özdirençleri ve kesitleri 64
Şekil A. 8 **:** Dirençli dayk modeli, iki boyutlu görünür özdirençleri ve değişimleri..... 65
Şekil A. 9 **:** Test modeli – 1' in modeli, iki boyutlu görünür özdirençleri ve değişimleri..... 66
Şekil A. 10 **:** 3 - B horst benzeri yükselim modeli, iki boyutlu görünür özdirençleri ve değişimleri..... 67
Şekil A. 11 **:** Hidrotermal alterasyon zonu modeli, iki boyutlu görünür özdirençleri ve değişimleri..... 68
Şekil A. 12 **:** Dağ kökü modeli, iki boyutlu görünür özdirençleri ve değişimleri 69
Şekil A. 13 **:** Horst - graben modeli, iki boyutlu görünür özdirençleri ve değişimleri..... 70
Şekil A. 14 **:** Düşey kanallarla sınırlandırılmış astenosfer yükselimi modeli, iki boyutlu görünür özdirençleri ve değişimleri..... 71
Şekil A. 15 **:** Çökel dolu düşey kanallarla sınırlandırılmış dirençli sokulum modeli, iki boyutlu görünür özdirençleri ve değişimleri..... 72

SEMBOL LİSTESİ

B : Manyetik akı (weber/m^2)
D : Elektrik deplasman (Coulomb/m^3)
d : Nüfuz derinliği (m)
E : Elektrik alan şiddeti(mV/km)
$\boldsymbol{E_x, E_y, E_z}$: Elektrik alan bileşenleri (mV/km)
e : Üstel sabit (~2,7)
ε : Dielektrik sabiti (farad/m)
f : Frekans (Hz)
H : Manyetik alan şiddeti (γ(gamma))
$\boldsymbol{H_x, H_y, H_z}$: Manyetik alan bileşenleri (γ(gamma))
i : Birim karmaşık sayı ($\sqrt{-1}$)
J : Akım yoğunluğu (Amper/m^2)
k : Elektromanyetik yayınım sabiti
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)

İKİ BOYUTLU MANYETOTELLÜRİK MODELLEMEDE TE VE TM MODLARININ JEOELEKTRİK YAPILARA VE SINIRLARINA KARŞI DUYARLILIĞI

ÖZET

Manyetotellürik Yöntem, jeofiziğin doğal kaynaklı elektromanyetik yöntemlerinden biridir. Bu yöntem ile yerkabuğu ve üst mantonun elektriksel özdirenç yapısı araştırılabilir. 10^{-5} Hz ile 10^{5} Hz arasında değişen çok geniş bir frekans aralığını kullanan yöntem, yüksek frekanslar ile sığ kesimleri, alçak frekanslar ile de derin kesimleri inceler.

Bu çalışmada kullanılan iki boyutlu manyetotellürik modellemede ise iki ayrı mod tanımı vardır; elektrik alanın jeolojik doğrultuya dik olduğu TE modu ve manyetik alanın jeolojik doğrultuya dik olduğu TM modu. TE modu boyuna manyetotellürik alanlar oluşturur ve tellürik akımlar yapının etrafında akarlar. Bu nedenle TE modu yapıyı yüklemez ve anomalileri jeolojik yapının indüktif doğasından kaynaklanır. TM modu ise enine manyetotellürik alanlar yaratır ve tellürik akımlar yapının içinden akarlar. Bu nedenle TM modu yapıyı yükler ve bu yüzden anomalileri jeolojik yapının galvanik doğasından kaynaklanır. İki mod arasındaki bu temel farklar, sonuçları da farklı etkiler. Bu çalışmada da TE ve TM modları arasındaki fark, duyarlılık açısından incelenmiştir.

Bu inceleme için ise sonlu elemanlar yöntemini kullanan iki boyutlu düz modelleme algoritması kullanılmıştır. Algoritma bloklar halinde boyutları ve özdirençleri ile birlikte girilen modeli kendi içinde istenilen sayıda bloğa ayırır. Sonra her blok dört üçgen parçaya bölünür ve burada her üçgen bilinmeyen sonlu eleman kabul edilir. Üçgenler için sonuçlar bulunduktan sonra bu dört üçgen için ortak bir sonuç, bir tek bloğun çözümü olarak sunulur. En son olarak da bütün blokların çözümleri, girilen modelin sonucunu verir.

Bu yöntemler uygulanarak bulunan sonuçlara göre; TE modu derin ve iletken yapılara karşı, TM modu ise sığ ve dirençli yapılara karşı daha duyarlıdır. Modellenen bloğun sınırları göz önüne alındığı takdirde ise TE modu düşey sınırlara karşı daha duyarlı, TM modu ise yanal sınırlara karşı daha duyarlıdır.

Buraya kadar bahsedilen çalışmalar, Keşan – Salihli arasında ölçümleri alınan manyetotellürik profili kullanılarak, gerçek arazi verisi üzerinde uygulanmış, sonuçlar duyarlılık açısından incelenmiştir. Yüzeye yakın kesimlerdeki model yapılar karmaşık bir geometri gösterdiğinden dolayı sonuçlar her iki mod tarafından da duyarlı bir şekilde belirlenebilmiştir. Ayrıca, derin dirençli yapılar TM modunda, derin iletken yapılar ise TE modunda daha duyarlı sonuçlar vermiştir.

SENSITIVITIES OF TE AND TM MODES VERSUS GEOELECTRICAL STRUCTURES AND THEIR BORDERS IN TWO–DIMENSİONAL MAGNETOTELLURIC MODELLING

SUMMARY

Magnetotellurics is one of the electromagnetic methods, that uses natural electromagnetic field in geophysics. It is possible to investigate the electrical resistivity structure of the Earth's crust and the upper mantle, using this method. Due to magnetotelluric method uses a very large frequency band that changes between 10^{-5} Hz and 10^{5} Hz, it investigates the shallow zones with high frequencies and the deep zones with low frequencies.

There are two different mode definitions two-dimensional magnetotelluric modeling that has been used in this study; electrical field is perpendicular to the geological direction in TE mode and magnetic field is perpendicular to the geological direction in TM mode. TE mode generates the longitudinal magnetotelluric curves and telluric current flows along the structures. Therefore, TE mode does not charge the structures and its anomalies are of inductive nature. Moreover, TM mode generates the transverse magnetotelluric curves and telluric current flows across the structures. Thus, TM mode charges the structures and its anomalies are of galvanic nature. The main differences between these modes, affect the results. In this study, the differences between TE and TM modes have been investigated in view of sensitivity.

Two-dimensional forward modeling algorithm, which used finite element method, has been used for this investigation. Algorithm separates the model, which is made up blocks, that is entered in dimensions and resistivities, into desired number of blocks. Then, each block is separated into four triangles and each triangle is an unknown finite element. After finding results for triangles, the joint result of four triangles is presented as a solution of one block. Finally, solutions of all blocks give the result of the entered model.

According to these results; TE mode is more sensitive than TM mode to the deep structures and conductive structures, and TM mode is more sensitive than TE mode to the shallow structures and the resistive structures. Looking over the borders of the blocks that are modeled, TE mode is more sensitive to the vertical borders than TM mode is and TM mode is more sensitive to the horizontal borders than TE mode is.

Mentioned works thus far, have been applied on real field data, using Keşan – Salihli magnetotelluric profile, and results have been investigated in term of sensitivity. Because the near-surface structures show a complex geometry, results have been defined by both modes. Furthermore, deep resistive structures give more sensitive results in TM mode, but deep conductive structure gives more sensitive result in TE mode.

1. GİRİŞ

Elektromanyetik yöntemler, bir kaynaktan yayılan değişken elektrik ($\vec{E}$) ve manyetik ($\vec{H}$) alan şiddetlerinin oluşturduğu ve yer içinde difüzyon denklemlerine göre yayılan elektromanyetik dalgalara yer katmanlarının verdiği tepkinin araştırılmasını amaçlayan yöntemlerdir (Sheriff, 1997). Kaynağın, yani vericinin doğal veya yapay olmasına göre doğal kaynaklı ve yapay kaynaklı elektromanyetik yöntemler olarak, ölçümlerin frekans veya zaman ortamında yapılmasına bağlı olarak ise zaman ortamı elektromanyetik yöntem veya frekans ortamı elektromanyetik yöntem olarak ikiye ayrılırlar. Doğal kaynaklı yöntemler çoğunlukla derin aramalara yönelik olarak, yapay kaynaklı yöntemler ise genellikle sığ aramalara yönelik olarak tercih edilen yöntemlerdir.

Yapay kaynaklı yöntemlerde verici olarak düzenlenmiş, içinden alternatif akım geçen bir bobinden yayılan birincil (primary-(P)) elektromanyetik dalgalar, yeryüzünün üstünden ve hemen altından ilerleyerek alıcı olarak düzenlenmiş diğer bir bobine ulaşır. Yeraltı tek düze ise alıcıya ulaşan dalgaların özelliklerinde herhangi bir değişim olmaz. Ancak yeraltında elektriksel özellikleri farklı bir yapı varsa (örneğin iletken bir maden cevheri kütlesi) yayılan değişken manyetik alan bu kütle üzerinde girdap (Eddy) akımları olarak bilinen değişken bir elektrik alan indükleyecektir. Bu girdap akımları da kütleden etrafa yayılan kendi ikincil (secondary-(S)) elektromanyetik alanını üretir. Bu durumda yeryüzündeki alıcıya ulaşan birincil alana bu ikincil alan da eklenir ve başlangıçta üretilen elektromanyetik dalganın özelliklerinden daha farklı genlik ve faza sahip bir toplam bileşke alan (resultant-(R)) algılanır. Gönderilen P ve algılanan R elektromanyetik dalgaları arasındaki bu türden bir ayrılık, yerin içinde elektriksel açıdan farklı bir yapının varlığını gösterir ve onun elektriksel özelliklerine ve geometrisine ilişkin bilgiler verir.

Doğal kaynaklı yöntemlerde ise verici olarak düşünülen kaynak, elektrik yüklü parçacıklar taşıyan Güneş rüzgarlarından kaynaklanan manyetopoz içindeki manyetosfer – iyonosfer akımlarının neden olduğu düşük frekanslı, yüksek periyotlu manyetotellürik olaylar ile şimşek, yıldırım gibi atmosferik olaylardan kaynaklanan yüksek frekanslı manyetotellürik olaylardır. Doğal kaynaklı yöntemler ile yapay kaynaklı yöntemlerle elde edilemeyecek kadar düşük frekanslar kullanılarak istenilen

derinliklerden bilgi alınabilir. Doğal kaynaklı yöntemlerin en önemlilerinden biri de bu çalışmanın konusunu oluşturan manyetotellürik yöntemdir.

Son yıllarda literatürde oldukça sık rastlanan çalışmaların gösterdiğine göre, manyetotellürik yöntemin oldukça yaygın kullanım alanları bulunmaktadır. Birçok manyetotellürik ölçümden kazanılan deneyimler yöntemin pek çok jeolojik problemin araştırılmasında uygulanabileceğini göstermiştir.

Manyetotellürik yöntem, petrol araştırmalarında çökel havzanın stratigrafisindeki değişimlerin belirlenmesi amacıyla sismik yöntem ile birlikte kullanılmaktadır. Bazı durumlarda da sismik yöntemlerle aşılamayan volkaniklerin altında kalan derinliklerdeki jeolojik yapının belirlenmesi amacına yönelik olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Manyetotellürik yöntemin uygulama alanlarından biri de metalik maden yataklarının aranmasıdır. Metalik maden yataklarının aranmasında göreceli olarak sığ derinlikler için özellikle yüksek frekanslardaki doğal alanın incelenmesi gerekir. Bu tür çalışmalarda kullanılacak frekans aralığı ise genellikle 8Hz - 10KHz' dir. Bu frekans aralığında yapılan çalışmalar ise AMT (Audio Magnetotellurics) olarak adlandırılırlar (Strangway ve Koziar, 1979). Yine Kontrol Kaynaklı Manyetotellürik yöntem olarak adlandırılan (Controlled Source Audio Magnetotelluric (CSAMT)) yöntem de bu çalışmalara benzer amaçlara yönelik olarak kullanılmaktadır.

Manyetotellürik yöntemin diğer bir uygulama alanı ise jeotermal enerji kaynaklarının araştırılmasıdır. Bu amaçla yapılan çalışmalar hızla yaygınlaşmaktadır. Akışkan içeren kayaçların özdirençleri ayrıca sıcaklıktan da etkilenip belirgin şekilde düştüğünden, manyetotellürik yöntemin jeotermal alanların araştırılmasında oldukça iyi sonuç vereceği açıktır. Bu konuda yapılan manyetotellürik çalışmalar göstermiştir ki bu yolla birkaç kilometre derinlikteki suya doygun termal yatakların bulunması ve haritalanması, 5 - 10 km veya daha derinde ve sokulum (intrüzyon) hâlindeki birincil ısı kaynaklarının saptanması mümkündür (Galanopoulos ve diğ., 1998).

Diğer yandan manyetotellürik yöntemin yerkabuğu araştırmalarına ilişkin çok sayıda uygulama örnekleri vardır (Chen ve diğ., 1996; Gürer, 1996; Çağlar, 2001; Bedrosian ve diğ., 2001; Wei ve diğ., 2001). Bu tür çalışmalarda elde edilen jeoelektrik yapının bazen sahip olduğu elektrik anizotropisi bölgesel jeoloji için önemli bulgular ortaya koyabilmektedir.

Fay araştırmalarında, fayların yer elektrik yapılarının manyetotellürik yöntem ile saptanması da, son yıllarda oldukça yaygınlaşan çalışmalar içerisinde yer almaktadır. Sismik çalışmalar ile belirlenen düşük hızlı bölgelerin, deprem

mekanizması ile ilişkili olarak akışkan içeren ve dolayısıyla düşük özdirenç verebilecek bölgeler olarak düşünülmüş ve bu bağlamda manyetotellürik yöntemle düşük özdirenç gösteren bölgeler saptanarak bu çalışmalar için ek bilgiler sağlanmıştır (Unsworth ve diğ., 1999; Unsworth ve diğ., 2000).

Ayrıca nükleer santrallerin yer seçimi için yapılan çalışmalarda da manyetotellürik yöntem, tellürik yöntem ile birlikte tektonik olarak aktif olabilecek kırık ve çatlak sistemlerini belirleyebilmek amacı ile kullanılmıştır (Ádám ve Verö, 1990).

2. MANYETOTELLÜRİK YÖNTEM VE TEMEL İLKELERİ

2. 1 Manyetotellürik Yöntem

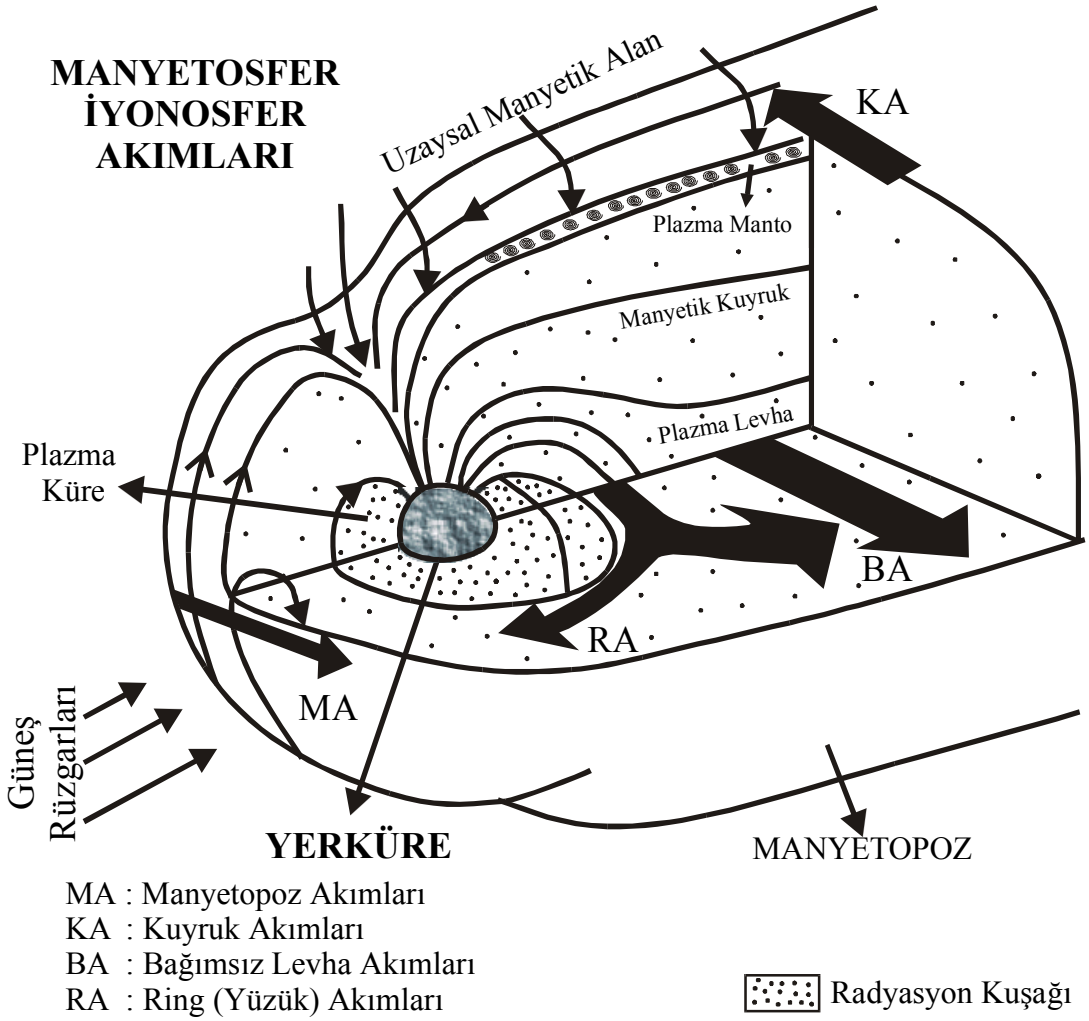
Günümüzde Manyetotellürik olarak bilinen yöntemle ilgili ilk çalışmalar iki grupta toplanır. Bunlardan ilki 19. yüzyıl sonlarında gelişmiş ve manyetik gözlem evlerinde kaydedilen uzun periyotlu manyetik değişimlerin kullanılmasına dayanır. Manyetik alan değişimlerinin yatay ve düşey bileşenleri kullanılarak mantoya kadar olan derinliklerdeki tabakaların iletkenlikleri ve kalınlıkları hakkında bilgi elde edilebilir ve bu yöntem ile global ölçekte yer içinin elektrik özdirenç dağılımı hakkında bilgi sağlanabilir.

20. yüzyılda doğal elektromanyetik alanın kullanılmasına dayanan diğer bir jeofizik araştırma yöntemi geliştirilmiştir. Sadece elektrik alan bileşenlerinin en az iki gözlem noktasında aynı anda ölçüldüğü bu yönteme Tellürik yöntem adı verilmiştir. Ölçüm birçok gözlem noktasında aynı anda ölçüm alma ilkesine dayanır ya da daha pratik olarak gözlem noktalarından biri sabit olarak tutulurken ikinci gözlem noktası hareket ettirilerek zaman içinde istasyon çiftleri arasındaki elektrik alan şiddetlerinin karşılaştırılması yolu ile yerelektrik yapısı hakkında bilgi sağlanabilir.

Bu iki yöntemdeki gelişmeler, bir frekans aralığındaki hem manyetik hem de elektrik alan bileşenlerinin ölçülebildiği manyetotellürik yöntemin başlangıç ilkelerini oluşturmuştur. Jeomanyetik yöntem ve Tellürik yöntem ile kazanılan bu gibi deneyimler özellikle manyetotellürik sondaj yönteminin ilk evrelerinin gelişiminde etkili olmuşlardır.

Manyetotellürik alanın kökeni, yeri çevreleyen atmosfer, iyonosfer ve manyetosfer katmanlarında çeşitli elektriksel olaylara bağlı olarak meydana gelen değişimler ve bu değişimlerin yer manyetik alanında yarattığı ani değişikliklerdir. Şekil 2. 1' de elektrik yüklü parçacıklardan oluşan Güneş rüzgarlarının etkisiyle oluşan bu değişimler görülmektedir. Diğer bir deyişle, manyetotellürik alanlar yer manyetik alanının zaman değişimli bileşenleridir. Yaklaşık 10^{-5} - 10^{5} Hz frekans aralığında doğadan kaynaklanan manyetik değişimler, iletken olan yer içinde elektrik akımlarının akmasına neden olarak elektrik alan bileşenlerini de etkiler. Bu durumda manyetotellürik alan, birbirlerine dik $\vec{H}_x, \vec{H}_y, \vec{H}_z$ manyetik alan ve $\vec{E}_x, \vec{E}_y, \vec{E}_z$ elektrik alan bileşenlerinden oluşur. Belirtilen frekans aralığında yerin manyetik alanı

0,01 – 30 γ (gamma) civarında bir değişime uğrarken, elektrik alan ise 0,1 – 30 mV/km aralığında değişir.

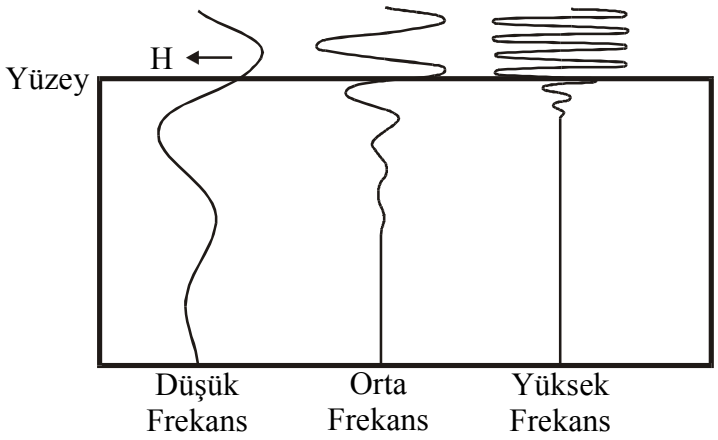


Şekil 2. 1 Manyetosfer ve iyonosfer akımları.

Normalde düzgün ve simetrik dağılım göstermesi beklenen yerküre manyetik alan dağılımı, güneşteki olayların ve patlamaların yarattığı elektriksel alanı taşıyan Güneş rüzgarları nedeniyle yerkürenin Güneş'e bakan cephesinde sıkışır. Buna bağlı olarak yerkürenin diğer yüzeyindeki alan dağılımında ise bir genişleme, dağılma meydana gelir. Burada Manyetopoz akımları ile Kuyruk akımları dış kısımda oluşurken, Bağımsız Levha akımları ve Ring akımları yerküreye yakın kesimlerde oluşarak yerin çevresinden ve içinden geçerek yer içini indükler. Özellikle Ring akımlarının mikropulsasyonlar (micropulsations-(küçük titreşimler)) diye adlandırılan kısmındaki frekanslar manyetotellürik yöntemin çok sık kullandığı frekanslardır.

Yerin derinliklerinde akan bu akımlara karşı yer içi, derinlerden yüzeye yaklaştıkça geçirim frekans aralığı genişleyen doğal bir süzgeç gibi davranır. Katedilen yol ile frekans ters orantılı olduğundan, yüksek frekanslı olayların simgeleri kısa bir yol

olarak sönümlenir. Alçak frekanslı simgeler ise daha az sönüme uğrayarak daha uzun bir yolu kat edebilirler. Diğer bir deyişle Şekil 2. 2' den de anlaşılabileceği gibi yüksek frekanslı sinyallerin sığ derinliklerden, alçak frekanslı sinyallerin ise daha derinlerden geldiği düşünülür.



Şekil 2. 2 Elektromanyetik dalgaların farklı frekanslardaki davranışları.

Manyetotellürik alanın kaynağı genel olarak iki ayrı grupta incelenebilir. Bunlar; yüksek frekanslı etkiler iyonosferde soğurulduğu için 1 Hz' den düşük frekanslarda oluşan, güneşin yarattığı dış alan ve 1 Hz' den büyük frekansları içeren atmosferik olayların yarattığı iç alanlardır. Yer manyetik alanının zamana bağlı değişimleri Tablo 2. 1' de verilmiştir.

Tablo 2. 1 Yerin manyetik alanında zamana bağlı değişimler.

OLAY	PERİYOT	ORTALAMA GENLİK (nT)
Seküler değişimler (batıya kayma)	> 1000 yıl	? küçük
Güneş lekesi dönemleri	11 ve 22 yıl	? küçük
Yıllık değişimler	1 yıl	
Ay'a bağlı değişimler	27 gün	
Manyetik fırtınalar Başlangıç Ana değişimler Düzelmesi	 ≈ 4 saat ≈ 8 saat ≈ 60 saat	 ≈ 15 ≈ 35 ≈ 35
Günlük değişimler (S_q, S_D L)	24 saat	≈ 20
Manyetik körfezler	1 – 2 saat	≈ 10
Küçük titreşimler (micropulsations) Düzenli (P_{c_1}, P_{c_2}, P_{c_3}, P_{c_4}, P_{c_5}) Düzensiz (P_{i_1}, P_{i_2}, P_i+P_c karışık)	3 dk – 1 ms	< 1
ELF (aşırı alçak frekanslı olaylar)		≈ 0,1
VLF (çok alçak frekanslı olaylar)	< 1 ms	≈ 0,1

Manyetik alanın zamana bağlı değişimlerinden seküler değişimler ve 22 yıl dönemli değişimler manyetotellürikte kullanılmaz. 11 yıllık, yıllık, 27 günlük ve günlük değişimler çok derin (≈ 700 km) olan çalışmalarda kullanılır (Jeomanyetik sondaj).

Küçük titreşimlerin alanı kullanılarak ise 2 km' den 200 km' ye (litosfer ve üst manto üstü) kadar uzanan derinliklerden bilgi edinilebilir.

2. 2 Yer Manyetik Alanının Zamana Bağlı Değişimleri

2. 2. 1 11 Yıllık, Yıllık, 27 Günlük ve Günlük Değişimler

Bu değişimler güneş lekelerinden kaynaklanmaktadır. Güneş lekelerinin arttığı dönemlerde manyetik alan üzerindeki Ring (yüzük) akımlarının yere normalde olduğundan daha çok yaklaşması sonucunu doğurduğu düşünülür. Bu dönemde manyetik alan anomalilerinde fark edilir bir artış olur. Bu artışlar genellikle 1000 γ – 4000 γ aralığında olur.

Manyetik alan, mevsimlere göre Kuzey Yarım Küre' de ve Güney Yarım Küre' de farklılıklar gösterirler. Bu farklılık şu şekilde açıklanabilir. Kuzey Yarım Küre kış aylarındayken, yer ekseni eğik olduğu için Güneş Güney Yarım Küre' ye daha fazla ve daha dik vurur. Bunun sonucu olarak manyetik alan Güney Yarım Küre' de daralıp Kuzey Yarım Küre' ye doğru genişler. Bu nedenle Ring akımları kuzeye yönelir ve kış aylarında Kuzey Yarım Küre' deki manyetik alan değerini arttırır. Güney Yarım Küre' de ise bunun tam tersi olarak azalır.

Güneş' in kendi etrafında dolanımı ile ilgili değişimlerdir. Bu süre içerisinde manyetik alan değeri düzenli olarak artıp, azalır.

Yerin Güneş etrafında dönmesi ile ilgili değişimlerdir. Başka bir deyişle gece ve gündüz bu değişimde önemli bir rol oynar. Geceleri bu değer düşerken, gündüzleri ise 10 – 40 nT kadar artar. Bu artış günden güne, mevsimden mevsime değişir. Ay' da günlük değişimlere 1 – 4 nT kadar bir etki yapar. Ay ile ilgili değişimler L simgesi ile verilir.

2. 2. 2 Küçük Titreşimler (micropulsations)

2. 2. 2. 1 Düzenli Değişimler (Pc_1, Pc_2, Pc_3, Pc_4, Pc_5)

Pc_1 tipi küçük titreşimler 0,2 – 5 s arasındaki periyotlarda genliği modüle olmuş sinüzoidal sinyal görünümünde genellikle 10 dakika ile birkaç saat arasında bir süre devam eden salınımlardır. Orta dereceli enlemlerde gece yarısından sonra ve şafak sökerken ayda bir kaç kez görülürler.

Pc_2, Pc_3 ve Pc_4 türü küçük titreşimler ise öğle zamanı görülen genellikle 10 – 60 s periyotlu ve en az bir kaç saat süren titreşimlerdir. Manyetik fırtınalar bu sınıfa giren

titreşimlerin periyotlarında bir azalmaya, genliklerinde ise bir artmaya yol açmaktadır.

Pc_5 tipi küçük titreşimler 150 – 600 s arasındaki periyotlarda oldukça büyük genlikler gösterirler. Ve birkaç dakika ile birkaç saat arasında görülürler. Bu tür titreşimlerde enleme bağlı olarak periyot ve genliklerinde değişimler görülür.

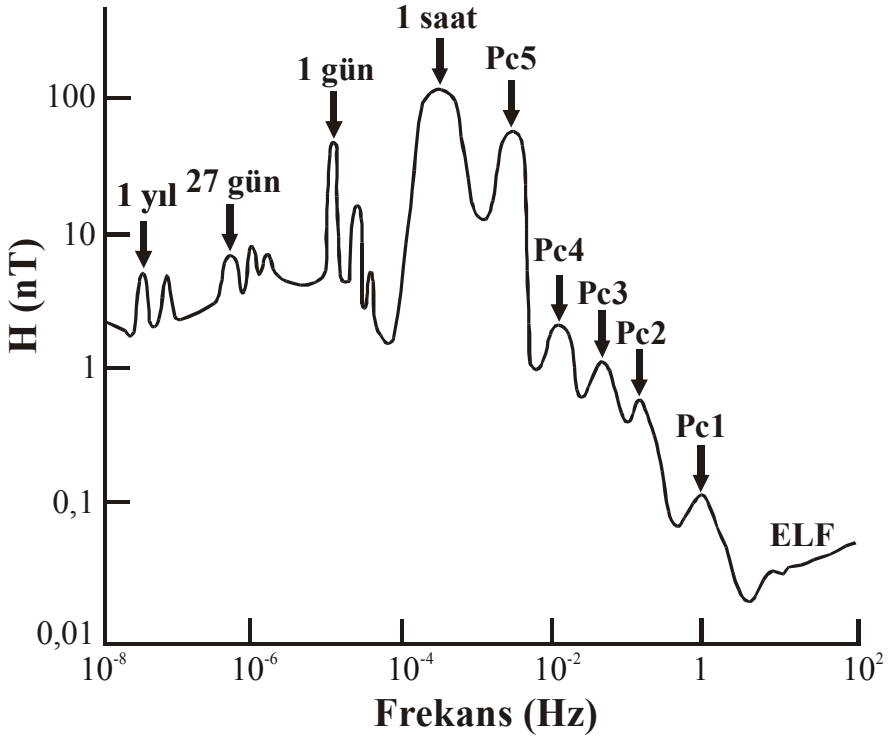
2. 2. 2. 2 Düzensiz Değişimler (Pi_1, Pi_2)

Pi_1 ve Pi_2 türü düzensiz küçük titreşimler de 1 – 40 s ve 40 – 150 s' lik periyotlar arasında sakin manyetik etkinlikler sırasında görülmesine karşın manyetik fırtınalar ile, orora bölgelerindeki olaylar ile ilişkilendirilirler ve gece yarısı oluşurlar. Pi_2' ler ayrı ayrı veya birbiri ardından görülen titreşim trenleri şeklindedir ve bütün gece gözlenirler.

Bunların dışında 10 – 40 s periyot aralığında gece yarısına doğru ve birkaç saat sonrasına kadar görülebilen, geçici titreşimlerde vardır.

3 – 3000 Hz frekans aralığında görülen titreşimler ise sferikler ile ilgilidir. Bir yıldırımın baş (ıslık –(whistle)) ve kuyruk (spherics) olarak adlandırılan iki kısmı vardır. Kuyruk, yıldırımın 3 – 300 Hz' lik, ıslık ise 300 – 3000 Hz' lik bölümleridir.

Aşağıda görülen Şekil 2. 3' te yukarıda açıklanan manyetik alanın zamana bağlı tüm değişimlerin genlik spektrumları ile ELF ve VLF frekans aralıklarındaki değişimlerin genlik spektrumları gösterilmiştir.



Şekil 2. 3 Yer manyetik alanında zamana bağlı değişimlerin genlik spektrumları.

2. 3 Manyetotellürik yöntemin üstünlükleri ve zayıf noktaları

a.) Klasik özdirenç yöntemlerinde yer içi özdirenci bulunmak istenen derinlik, yüzeyden uygulanan akım miktarına bağımlıdır. Manyetotellürik yönteminde ise doğada var olan tellürik akımlar kullanılarak bu kısıtlama ortadan kaldırılmış olur.

b.) Uzun periyotlu değişimler zayıf akımları indükler ve sönümlenmeden daha derinlere nüfuz ederler. Bu yolla farklı frekanslardaki alanlar incelenerek yeraltının farklı bölümleri örneklenmiş olur.

c.) Genel olarak diğer elektromanyetik yöntemlerde elektromanyetik alanın sadece bir bileşeni veya bu bileşenin türevi ölçülmektedir. Manyetotellürik yönteminde hem elektrik alanın hem de manyetik alanın tüm bileşenleri ölçülebildiğinden dolayı diğer elektromanyetik yöntemlere göre çok daha fazla bilgi elde edilir.

d.) Genel olarak diğer elektromanyetik yöntemlerde elektromanyetik alanın sadece bir bileşeni veya bu bileşenin türevi ölçülmektedir. Manyetotellürik yönteminde ise hem elektrik alanın hem de manyetik alanın tüm bileşenleri ölçülebildiğinden dolayı diğer elektromanyetik yöntemlere göre çok daha fazla bilgi elde edilir.

e.) Ölçülen değerlerin çok küçük (μV veya mV) olması, ölçüm noktası etrafında gürültü kaynaklarının bulunması durumunda yöntemi kullanışsız hâle getirebilir.

2. 4 Ölçü alım teknikleri

Genelde elektrik alanın iki bileşeni ($\vec{E}_x, \vec{E}_y$) ve manyetik alanın üç bileşeni ($\vec{H}_x$, $\vec{H}_y, \vec{H}_z$) ölçülür. Elektrik alan ölçümleri için doğru akım özdirenç yöntemindekine benzer kutuplaşmayan (polarize olmayan) elektrotlar kullanılır. Elektrotlar arası uzaklık, arazi koşullarına göre 50 – 200 m arasında değişir. Elektrik alanı ölçen algılayıcılar ölçüm noktasının koşullarına uygun olacak şekilde yerleştirilir. Manyetik alan ölçümünde ise indüksiyon tipi üç adet çok sarımlı indüksiyon bobinleri kullanılır.

Manyetotellürik yöntemde ölçüm süresi, ölçü alınan frekansa bağlı olarak değişir. Genelde ölçüm alınan frekansın ya da diğer bir deyişle periyodun birkaç defa tekrarlanması istenir. Böylece tekrarlanan periyotlardaki değişimlere bakarak daha sağlıklı sonuçlar almak mümkün olacaktır. Örneğin 5 dakikalık periyotta ölçü alırken ölçüm süresi 1 saat kadar olabilir.

2. 4. 1 Ölçülen Büyüklükler

Ölçülen değerler elektrot açıklığına göre μV veya mV arasında değişir. Ölçümler zamana karşı yapıldığından, frekans analizi yapabilmek için frekans ortamına dönüştürülmeleri gerekir. Bu işlem ayrık Fourier dönüşümleri ile yapılır.

$X(f) = \sum_n x(n\Delta t)\, e^{(-i\omega n\Delta t)}$ (2. 1)

Arazide zaman ortamında ölçülen $\vec{E}$ ve $\vec{H}$ değerleri frekans ortamında kullanılarak

$$\vec{E}_x = \left|\vec{E}_x(f)\right|.e^{(i\varphi\vec{E}(f))} \qquad (2.2)$$

ve

$$\vec{H}_x = \left|\vec{H}_x(f)\right|.e^{(i\phi\vec{H}(f))} \qquad (2.3)$$

bağıntıları ile verilir.

Elektromanyetik dalga empedansı bir yöndeki elektrik alanın kendisine dik yöndeki manyetik alana oranı olarak tanımlanabilir ve genel olarak aşağıdaki gibi yazılır.

$$\vec{Z} = \vec{E} / \vec{H} \qquad (2.4)$$

Empedans bağıntısı kullanılarak $\vec{E}$ ve $\vec{H}$'ın değişimleri ve yerküreyi oluşturan jeolojik birimlerin özdirençleri arasında bir ilişki kurulabilir.

2. 5 Manyetotellürik Kuram

Genel elektromanyetik dalga denklemi, elektromanyetik yayınım sabiti ve manyetotellürik özdirenç bağıntısı (Cagniard, 1953) elektromanyetiğin temel denklemleri olan Maxwell denklemlerinden elde edilir.

2. 5. 1 Zamanla Değişen Alanlar İçin Maxwell Denklemleri

I. $rot\vec{E} + \dfrac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$ (Faraday Yasası) (2. 5)

Fiziksel Anlamı: Kapalı bir yol etrafındaki elektromotif kuvvet, yolla sınırlandırılmış herhangi bir yüzeyden geçen manyetik akının (B) zamana göre türevine eşittir.

II. $rot\vec{H} - \dfrac{\partial \vec{D}}{\partial t} = J$ (Amper Yasası) (2. 6)

Fiziksel Anlamı: Kapalı bir yol etrafındaki manyetomotif kuvvet, iletkenlik akımı ve yolla sınırlanan herhangi bir yüzeyden geçen elektrik deplasmanın (D) zamana göre türevine eşittir.

III. $div\vec{B} = 0$ (Selenoidal Özellik) (2. 7)

Fiziksel Anlamı: Herhangi bir kapalı yüzeyden çıkan net manyetik akı (B) sıfırdır.

IV. $div\vec{D} = \rho$ (Coulomb Yasası) (2. 8)

Fiziksel Anlamı: Bir hacmi saran yüzeyden geçen toplam elektrik deplasman hacim içindeki toplam yüke (ρ) eşittir.

Tekdüze ve homojen ortamlarda elektrik alan ile elektriksel akım yoğunluğu ve yer değiştirme akımları arasında ise

$\vec{D} = \varepsilon \ \vec{E}$

$\vec{J} = \vec{E} / \rho$ ya da $\vec{J} = \sigma \ \vec{E}$

şeklinde doğrusal ilişkiler vardır. Manyetik alan ile manyetik akı yoğunluğu arasında ise

$\vec{B} = \mu \ \vec{H}$

ilişkisi vardır.

2. 5. 1. 1 Maxwell Denklemleri ile Genel Elektromanyetik Dalga Denkleminin Çıkarılması

Yukarıdaki doğrusal ilişkiler kullanılarak Maxwell bağıntılarından Düzlem Dalga Denklemleri geliştirilebilir.

$$rot\vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \qquad (\text{I})$$

$$rot\vec{H} = \frac{\vec{E}}{\rho} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \qquad (\text{II})$$

$$div\vec{H} = 0 \qquad (\text{III})$$

$$div\vec{E} = 0 \qquad (\text{IV})$$

(I) denkleminin her iki tarafının rotasyoneli alınırsa

$$rotrot\vec{E} = -\underbrace{\mu rot \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}}_{A} \qquad (2.9)$$

(II) denkleminin her iki tarafını μ ile çarpıp zamana göre türevi alınırsa,

$$\mu rot\vec{H} = \mu\frac{\vec{E}}{\rho} + \mu\varepsilon\frac{\partial\vec{E}}{\partial t} \qquad (2.\ 10)$$

$$\underbrace{\mu rot\frac{\partial\vec{H}}{\partial t}}_{A} = \frac{\mu}{\rho}\frac{\partial\vec{E}}{\partial t} + \mu\varepsilon\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2} \qquad (2.\ 11)$$

olur. (2. 9) numaralı denklemin ikinci tarafı ile (2. 11) numaralı denklemin ilk tarafını birbirine eşitlenirse

$$-rotrot\vec{E} = \frac{\mu}{\rho}\frac{\partial\vec{E}}{\partial t} + \mu\varepsilon\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2} \qquad (2.\ 12)$$

elde edilir. Vektörel analizden bilindiğine göre,

$rotrot\vec{E} = grad.div\vec{E} - \nabla^2\vec{E}$' dir ve $div\vec{E} = 0$ olduğundan,

$$rotrot\vec{E} = -\nabla^2\vec{E} \qquad (2.\ 13)$$

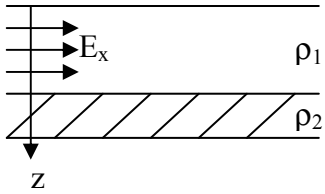
olur. Bu da (2. 12) numaralı denklemde yerine konulursa,

$$\nabla^2\vec{E} = \frac{\mu}{\rho}\frac{\partial\vec{E}}{\partial t} + \mu\varepsilon\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2} \qquad (2.\ 14)$$

elde edilir. Bu bağıntı ise Elektromanyetik Dalga Denklemi olarak adlandırılır (Keller ve Frischknecht, 1977).

2. 5. 1. 2 Elektromanyetik Dalga Denklemi Çözümünden Elektromanyetik Yayınım Sabitinin Saptanması

Manyetik alan ve empedans bağıntılarının elde edilmesi için gerekli olan elektromanyetik yayınım sabitini elde etmek gerekir.



z : EM dalga mekanik yönü

x : EM dalga yayınım yönü

Genel çözüm;

$$\frac{\partial^2\vec{E}_x}{\partial z^2} = \frac{\mu}{\rho}\frac{\partial\vec{E}_x}{\partial t} + \mu\varepsilon\frac{\partial^2\vec{E}_x}{\partial t^2} \Rightarrow \vec{E}_x = Ae^{i\omega t}e^{kz} \qquad (2.\ 15)$$

bu denklemdeki kısmi türevler alınırsa;

$$\frac{\partial\vec{E}_x}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z}\left(Ae^{i\omega t}e^{kz}\right) = k\underbrace{Ae^{i\omega t}e^{kz}}_{\vec{E}_x} = k\vec{E}_x \qquad (2.\ 16)$$

$$\frac{\partial^2 \vec{E}_x}{\partial z^2} = \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial \vec{E}_x}{\partial z}\right) = \frac{\partial}{\partial z}\left(kAe^{i\omega t}e^{kz}\right) = k^2 \underbrace{Ae^{i\omega t}e^{kz}}_{\vec{E}_X} = k^2 \vec{E}_x \qquad (2.\ 17)$$

$$\frac{\partial \vec{E}_x}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t}\left(Ae^{i\omega t}e^{kz}\right) = i\omega \underbrace{Ae^{i\omega t}e^{kz}}_{\vec{E}_x} = i\omega \vec{E}_x \qquad (2.\ 18)$$

$$\frac{\partial^2 \vec{E}_x}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial \vec{E}_x}{\partial t}\right) = \frac{\partial}{\partial t}\left(i\omega Ae^{i\omega t}e^{kz}\right) = -\omega^2 \underbrace{Ae^{i\omega t}e^{kz}}_{\vec{E}_x} = -\omega^2 \vec{E}_x \qquad (2.\ 19)$$

Bu kısmi türevler, (2. 15) denkleminde yerine konulursa;

$$k^2 \vec{E}_x = \frac{\mu}{\rho} i\omega \vec{E}_x - \mu\varepsilon\omega^2 \vec{E}_x \qquad (2.\ 20)$$

bağıntısı elde edilir. Bu denklemde bulunan elektrik alan değeri sadeleştirilip k elektromanyetik yayınım sabiti çekilerek bulunur (Keller ve Frischknecht, 1977).

$$k = \mp\sqrt{i\omega\mu\sigma - \varepsilon\mu\omega^2} \qquad (2.\ 21)$$

Elektrik alanın, manyetik alana oranı olan empedans bağıntısını elde etmek için gerekli olan manyetik alanı da bulmak gereklidir.

2. 5. 1. 3 Manyetik Alanın Çıkarılması

Manyetik alan ise aşağıdaki şekilde bulunabilir.

Genel çözüm;

$$\vec{E}_x = Ae^{i\omega t + kz} + Be^{i\omega t - kz} \qquad (2.\ 22)$$

$$\vec{H}_y = \left|\vec{H}_{y0}\right| e^{i\omega t} \qquad \text{ve} \qquad \vec{E}_x = \left|\vec{E}_{x0}\right| e^{i\omega t} \qquad (2.\ 23)$$

$$\frac{\partial \vec{H}_y}{\partial t} = i\omega \underbrace{\vec{H}_{y0}e^{i\omega t}}_{\vec{H}_y} = i\omega \vec{H}_y \qquad (2.\ 24)$$

I. Maxwell' de

$$rot\vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}_y}{\partial t} \qquad (2.\ 25)$$

$$rot\vec{E} = -i\omega\mu \vec{H}_y \qquad (2.\ 26)$$

$$\frac{\partial \vec{E}_X}{\partial z} = -i\omega\mu \vec{H}_y \qquad (2.\ 27)$$

$$\frac{\partial \vec{E}_x}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z}\left(Ae^{i\omega t+kz} + Be^{i\omega t-kz}\right) = \left(kAe^{i\omega t+kz} - kBe^{i\omega t-kz}\right) \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial \vec{E}_x}{\partial z} = k\left(Ae^{i\omega t+kz} - Be^{i\omega t-kz}\right) \quad (2.29)$$

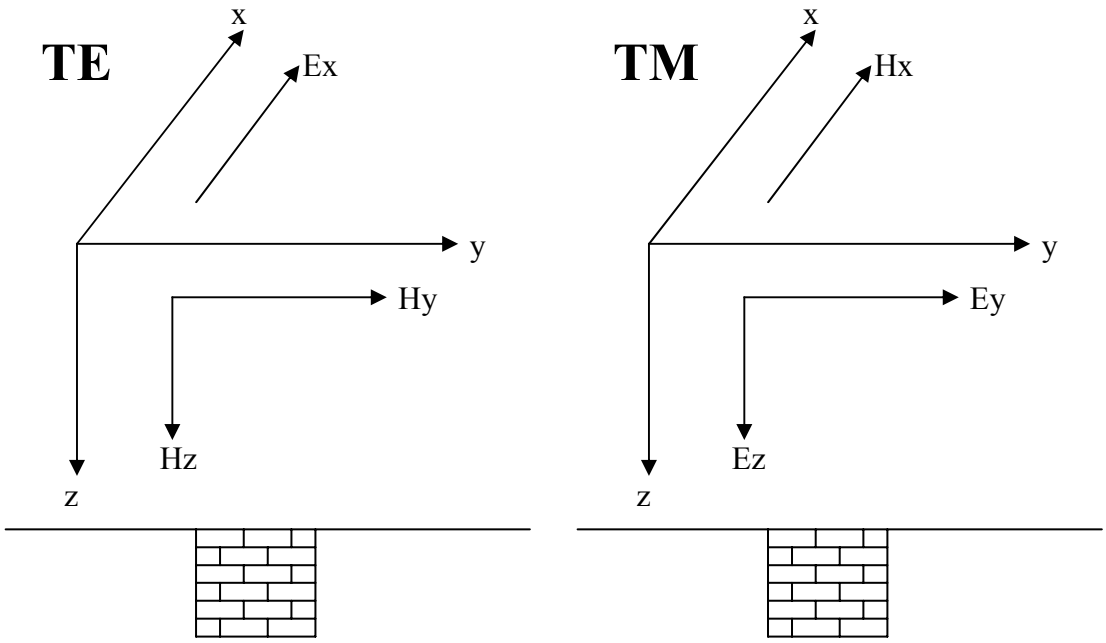
(2. 29) numaralı denklem (2. 27) numaralı denklemde yerine konulursa;

$$k\left(Ae^{i\omega t+kz} - Be^{i\omega t-kz}\right) = -i\omega\mu\vec{H}_y \quad (2.30)$$

denklemi elde edilir. Bu denklemde de $\vec{H}_y$ manyetik alanı çekilerek TE modu için manyetik alan bulunur (Keller ve Frischknecht, 1977).

$$\vec{H}_y = -\frac{k}{i\omega\mu}\left(Ae^{i\omega t+kz} - Be^{i\omega t-kz}\right) \quad (2.31)$$

2. 5. 1. 4 TE ve TM Modları



Şekil 2. 4 TE ve TM modları ile elektrik ve manyetik alan bileşenleri.

Manyetotellürik yöntemde elektrik alanın jeolojik doğrultuya dik olduğu TE (Transverse Electric) modu ve manyetik alanın jeolojik doğrultuya dik olduğu TM (Transverse Magnetic) modu gibi iki ayrı mod tanımı yapılır. Bu modlar literatürde sırasıyla E - polarizasyon, H - polarizasyon olarak da kullanılmaktadır. TE modunda elektrik alanın jeolojik doğrultuya dik olduğu bileşen $\vec{E}_x$ ile bu bileşene dik olan manyetik alan bileşeni $\vec{H}_y$ ve düşey manyetik bileşen $\vec{H}_z$ ölçülür. TM modunda ise

jeolojik doğrultuya dik olan $\vec{H}_x$ ile bu bileşene dik olan elektrik alan bileşeni $\vec{E}_y$ ölçülür. Şekil 2. 4' te de TE ve TM modlarındaki elektrik alan ve manyetik alan bileşenleri görülmektedir.

Manyetotellürik arazi çalışmalarında genellikle elektrik alan bileşenleri $\vec{E}_x$ ve $\vec{E}_y$ ile manyetik alan bileşenleri $\vec{H}_x$ ve $\vec{H}_y$ ölçülür. Bu bileşenlerden yararlanarak frekans bağımlı görünür özdirenç hesaplamalarında gerekli olan büyüklük empedans (Z) parametresidir. Örneğin TE modu için hesaplanan empedans tanımlaması aşağıda gösterilmiştir.

2. 6 Empedans

Empedans elektrik alanın kendisine dik yöndeki manyetik alana oranı ya da selfin (bobinin) zamanla değişen akıma karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır.

E - polarizasyon (TE modu) için empedans formülü Keller ve Frischknecht (1977) tarafından

$$Z = \frac{\vec{E}_x}{\vec{H}_y} = \frac{Ae^{i\omega t}e^{kz} + Be^{i\omega t}e^{-kz}}{-\frac{k}{i\omega\mu}\left(Ae^{i\omega t}e^{kz} - Be^{i\omega t}e^{-kz}\right)} \qquad (2.\ 35)$$

şeklinde verilmiştir. Bu formül $e^{i\omega t}$ parantezine alınıp sadeleştirilirse;

$$Z = -\frac{i\omega\mu}{k}\frac{\left(Ae^{kz} + Be^{-kz}\right)}{\left(Ae^{kz} - Be^{-kz}\right)} \qquad (2.\ 36)$$

elde edilir. Her iki taraf da $1/\sqrt{AB}$ ile çarpılıp

$$Z = -\frac{i\omega\mu}{k}\frac{\frac{A}{\sqrt{AB}}e^{kz} + \frac{B}{\sqrt{AB}}e^{-kz}}{\frac{A}{\sqrt{AB}}e^{kz} - \frac{B}{\sqrt{AB}}e^{-kz}} \Rightarrow \left\{\begin{array}{l}\frac{A}{\sqrt{AB}} = \sqrt{\frac{A^2}{AB}} = \sqrt{\frac{A}{B}} \\ \frac{B}{\sqrt{AB}} = \sqrt{\frac{B^2}{AB}} = \sqrt{\frac{B}{A}}\end{array}\right\} \qquad (2.\ 37)$$

yukarıda köşeli parantez içinde gösterilen dönüşümler yapılırsa

$$Z = -\frac{i\omega\mu}{k}\frac{\sqrt{\frac{A}{B}}e^{kz} + \sqrt{\frac{B}{A}}e^{-kz}}{\sqrt{\frac{A}{B}}e^{kz} - \sqrt{\frac{B}{A}}e^{-kz}} \qquad (2.\ 38)$$

olarak elde edilir.

Burada da $\sqrt{A/B} = e^{\ln\sqrt{A/B}}$ ve $\sqrt{B/A} = e^{-\ln\sqrt{A/B}}$ dönüşümlerini yaparak

$$Z = -\frac{i\omega\mu}{k}\frac{e^{\ln\sqrt{A/B}+kz} + e^{-\ln\sqrt{A/B}-kz}}{e^{\ln\sqrt{A/B}+kz} - e^{-\ln\sqrt{A/B}-kz}} \qquad (2.39)$$

elde edilir. Trigonometriden aşağıda verilen sinh, cosh ve coth dönüşümleri yapılırsa

$\cosh x = (e^x + e^{-x})/2, \sinh x = (e^x - e^{-x})/2 \Rightarrow \coth x = \frac{e^x + e^{-x}}{e^x - e^{-x}}$ olur.

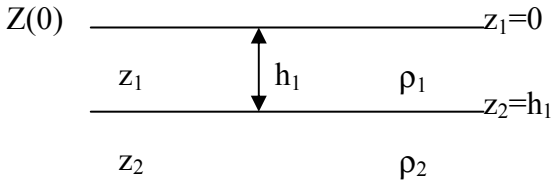
Böylece,

$$Z = -\frac{i\omega\mu}{k}\coth\left(kz + \ln\sqrt{\frac{A}{B}}\right) \qquad (2.40)$$

yazılabilir (Keller ve Frischknecht, 1977).

Buradan Cagniard görünür özdirencine (Cagniard, 1953) geçmek için gerekli olan A ve B terimleri sınır koşulları kullanılarak saptanır.Örnek olarak iki tabaka koşulu için A ve B terimlerinin saptanması Bölüm 2. 6. 1' de gösterilmiştir..

2. 6. 1 İki Tabaka Elektrik Model Yapısı



$$\frac{-kz_1}{i\omega\mu} = \coth\left(kz + \ln\sqrt{\frac{A}{B}}\right) \qquad (2.41)$$

ters trigonometrik işlem ile

$$\ln\sqrt{\frac{A}{B}} = \coth^{-1}\left(\frac{-kz_1}{i\omega\mu}\right) - kz_1 \qquad (2.42)$$

olur. Z_2 formülü ise

$$Z_2 = \frac{-i\omega\mu}{k}\coth\left(kz_2 + \ln\sqrt{\frac{A}{B}}\right) \qquad (2.43)$$

şeklinde yazılabilir. (2. 42) numaralı formül (2. 43)' te yerine konulursa

$$Z_2 = \frac{-i\omega\mu}{k}\coth\left[k\left(\underbrace{z_2 - z_1}_{h_1}\right) + \coth^{-1}\left(\frac{-kz_1}{i\omega\mu}\right)\right] \qquad (2.44)$$

olur. Burada Z_2 yüzeydeki empedansa eşittir ve düzenlenerek yazılması hâlinde aşağıdaki denklem elde edilir.

$$Z_2(Z_1=0)=-\frac{i\omega\mu}{k}\coth\left[kh_1+\coth^{-1}\left(\frac{kZ_{(z_2=h_1)}}{i\omega\mu}\right)\right] \qquad (2.45)$$

2. 7 Homojen Ortama Geçiş ve Cagniard Özdirenci

Cagniard özdirencini (Cagniard,1953) bulmak için gerekli olan yüzeydeki empedans aşağıdaki (2. 46) numaralı denklemdeki şekli ile verilir

$$Z(0)=-\frac{i\omega\mu}{k} \quad \text{(yüzey)} \qquad (2.46)$$

burada k;

$$k=\sqrt{\left(\frac{i\omega\mu}{\rho}-\underbrace{\omega^2\varepsilon\mu}_{ihmaledilebilir}\right)}=\sqrt{\frac{i\omega\mu}{\rho}} \qquad (2.47)$$

olur. (2. 47) numaralı denklem (2. 46)' da yerine konulursa

$$Z(0)=\sqrt{i\omega\mu\rho} \qquad (2.48)$$

$$Z^2(0)=i\omega\mu\rho \qquad (2.49)$$

elde edilir. (2. 49) numaralı denklemden ρ çekilirse

$$\rho=\frac{Z^2(0)}{\omega\mu} \qquad (2.50)$$

olur. Bu denklem görünür özdirenç şeklinde yazılmak istenirse;

$$\rho_a=\frac{1}{\omega\mu}\left|\frac{\vec{E}_x}{\vec{H}_y}\right|^2 \qquad (2.51)$$

olur. Ancak pratikte ω ve μ değerleri yerine konarak daha kolay bir formül uygulanır.

$\omega=2\pi f$ ya da $\omega=2\pi / T$, $\mu=1/ 4\pi10^{-1}$ değerleri yerine konarak;

$$\rho_a=\frac{1}{\frac{2\pi}{T}\frac{1}{4\pi10^{-1}}}\left|\frac{\vec{E}_x}{\vec{H}_y}\right|^2=\frac{^2 4\pi10^{-1}T}{2\pi}\left|\frac{\vec{E}_x}{\vec{H}_y}\right|^2 \qquad (2.52)$$

şeklinde yazılabilir.

Yukarıda verilen formül daha düzenli bir şekilde yazılması halinde TE ve TM modları için Cagniard Görünür Özdirenç (CGÖ) formüllerini elde edilir (Cagniard, 1953).

$$\left.\begin{aligned} \rho_a &= 0{,}2T\left|\frac{\vec{E}_x}{\vec{H}_y}\right|^2 \quad \text{(CGÖ) (TE - mod)} \\ \rho_a &= 0{,}2T\left|\frac{\vec{E}_y}{\vec{H}_x}\right|^2 \quad \text{(CGÖ) (TM - mod)} \end{aligned}\right\} \qquad (2.\ 53)$$

2. 8 Elektromanyetik Alan Nüfuz Derinliği

Manyetotellürik yöntemde elektromanyetik alanın nüfuz derinliği formülü aşağıdaki gibi,

$$d = \frac{T}{2\pi\mu}|Z| \qquad (2.\ 54)$$

şeklinde verilir. Burada nüfuz derinliği elektromanyetik dalganın başlangıç genliğinin % 37' sine (1/e' ye) indiği andaki derinlik olarak kabul edilir. Başka bir deyişle, teorik olarak elektromanyetik dalga, % 63' ü sönümlenene kadar manyetotellürik yöntem için bilgi taşır.

Pratikte kullanılan nüfuz derinliği formülü ise;

$$d = 503{,}2\sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad \text{ya da} \quad d = 503{,}2\sqrt{\rho T} \qquad (2.\ 55)$$

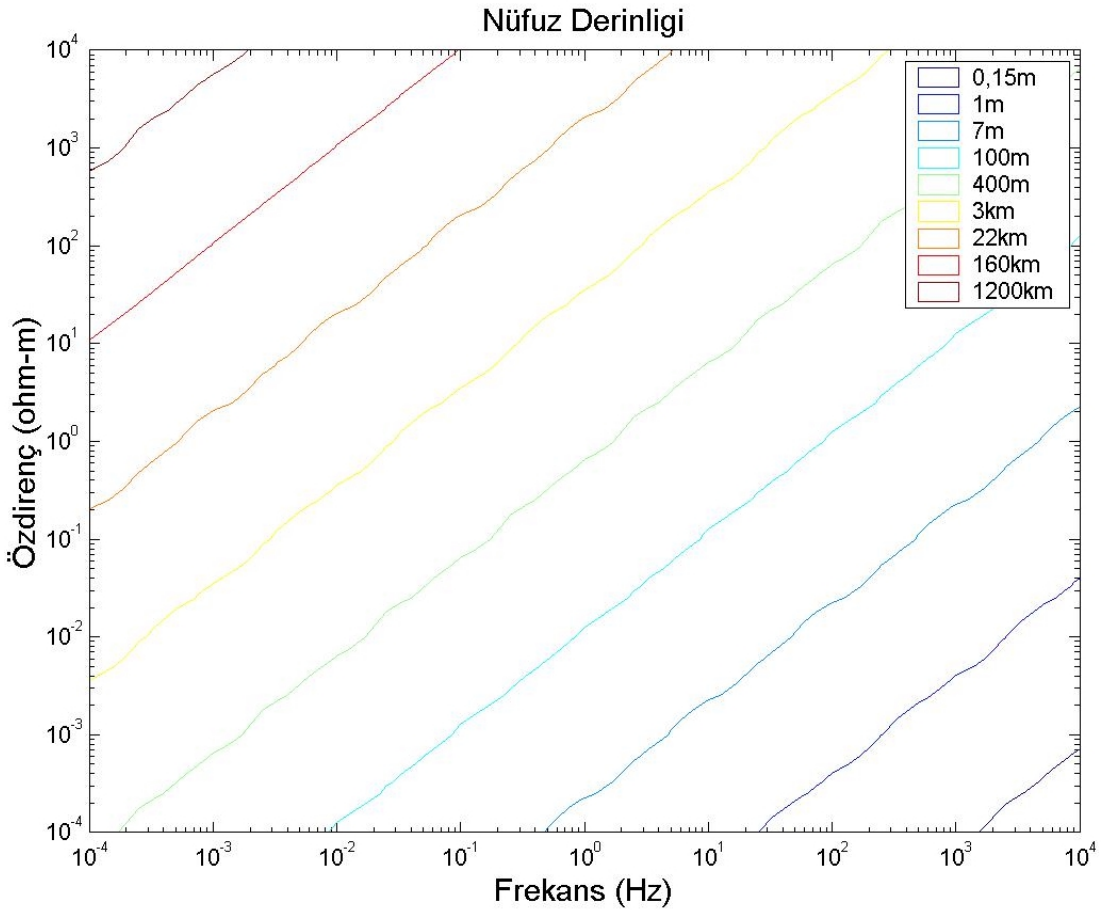
olarak verilir.

Şekil 2. 5' te de kayaçların özdirencine ve ölçüm alınan frekansa bağlı olarak hesaplanmış olan elektromanyetik dalgaların d nüfuz derinliği gösterilmiştir. Bu şekle bakılarak özdirenci belli olan bir ortamda herhangi bir frekansla ne kadar derinliğe inilebileceği hakkında ortalama bir fikir elde edilebilir. Örneğin, Bölüm 4 ve 5' de verilen sığ (5 – 10 km) ve derin (> 10 km) düz çözüm model yapılarında istenilen derinliklerden bilgi alınabilmesi için hangi frekans aralıklarının kullanılabileceğine Şekil 2. 5' e bakılarak karar verilebilir. Bunun için gerekli olan tek kriter ortamın özdirencinin bilinmesidir.

(2. 55) numaralı bağıntıdan ve Şekil 2. 5' ten de anlaşılabileceği gibi özdirenç ile frekans ters orantılı veya özdirenç ile periyot doğru orantılıdır. Diğer bir deyişle aynı frekansta ölçüm alındığı takdirde düşük özdirençli bir ortamda daha sığ bilgiler toplanabilirken, yüksek özdirençli bir ortamda daha derin bilgiler toplanabilir. Aynı

şekilde frekanslar için bir yorum yapılırsa yüksek frekanslı (düşük periyotlu) ölçümler ile sığ çalışmalar yapılırken, düşük frekanslı (yüksek periyotlu) ölçümler ile derin çalışmalar yapılır. Birçok frekansta ölçüm almak suretiyle de yeraltının farklı kesimleri örneklenmiş olur.

Şekil 2. 5' ten sayısal örnekler verilecek olunursa 0,0001 Hz frekansında 600 Ωm' lik bir ortamda ölçüm alındığı takdirde ulaşılan teorik nüfuz derinliği 1200 km' lere kadar ulaşırken, aynı frekansta 10 Ωm' lik bir ortamda ölçüm alındığı takdirde ise nüfuz derinliği 160 km olur. Yüksek frekanslar için bir örnek verilecek olursa, 10000 Hz frekansında 8000 Ωm' lik çok dirençli bir ortamda bile nüfuz derinliği ancak 400 m civarına kadar ulaşırken, 1 Ωm' lik çok iletken bir ortamda ölçüm alındığında nüfuz derinliği 1 m gibi çok sığ bir derinlikte kalmaktadır.



Şekil 2. 5 Kayaçların özdirençlerine ve ölçüm alınan frekanslara bağlı olarak elektromanyetik dalgaların nüfuz derinliği.

3. MANYETOTELLÜRİK YÖNTEMDE İKİ BOYUTLU MODELLEME

Modelleme çalışmalarında, gözlem verilerini bilgisayar ortamında girilen modeller ile yeniden oluşturmaya ve elde edilen kuramsal veriler ile gözlem verilerinin karşılaştırılması yolu ile de gözlem verisini yaratan yeraltı yapıları tanımlanmaya çalışılır. Bu amaçla en yaygın kullanılan yol, ters çözüm yöntemleridir. Fakat modellemenin ilk aşamasında gerekli olan düz çözümler elde edilmelidir. Bunun dışında, ters çözüm yöntemlerinden elde edilen sonuçların çalışılan bölgenin jeolojisi ile uyumunun test edilmesi amacıyla düz çözüm yöntemlerinin kullanılması da oldukça yaygın bir yoldur. Düz çözüm yöntemleri için gerekli olan işlemlerde aşağıdaki bölümlerde açıklanan analitik çözümler ile veya sayısal çözümler ile elde edilebilirler.

3. 1 İki Boyutlu Modellemede Düz Çözümler

3. 1. 1 Analitik Çözümler

Analitik çözümler basit yapılar ile sınırlıdırlar (Şekil 3. 1). Sadece basit iki boyutlu (2B) kuramsal modellerin TM modu için analitik çözümleri bulunabilir. Bunun nedeni TM modunda yüzeyde H_0 sabit olduğundan çözüm elde edilirken, TE modunda E_0 sabit değildir ve bu nedenle de analitik çözümü de yoktur (d'Erceville ve Kunetz, 1962; Rankin, 1962; Geyer, 1972; Berdichevsky ve Dimitriev, 1976). TE modunda E_0' ın sabit olmamasının nedeni ise modellenmek istenen ortamda iletkenlikleri birbirinden farklı olan yapıların bulunmasıdır. (Kaufman, 1992)



Şekil 3. 1 Analitik çözüm için bazı kuramsal modeller.

3. 1. 2 Sayısal Çözümler

Ortamı temsil eden yerelektrik kesitinin elde edilmesi için yeraltının bloklara ayrılması ve her bir blok içinde, parametrelerin sabit tutularak sayısal işlem ile

çözümünün bulunması esasına dayanan çözümler sayısal çözümler olarak isimlendirilirler.

Sayısal çözümler üç grupta incelenebilir.

1. İntegral denklemleri ile çözümler
2. Türev denklemleri ile çözümler
    a.) Sonlu farklar (SF-(Finite difference(FD))
    b.) Sonlu elemanlar (SE-(Finite elements (FE))
3. Karışık yöntemler (integral ve türev denklemleri)

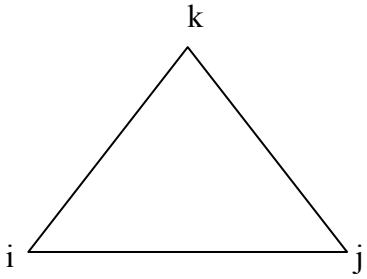
İntegral yöntemi bir boyutlu yapı içinde yer alan iki boyutlu yapılar için geliştirilmiştir. Türev denklemleri de iki boyutlu her tür yapı için geliştirilmiştir. Karışık yöntemler ise, integral denklemleri ile çözümün hızlı yapılabilmesine karşın modellenebilecek yapının sınırlı olması, buna karşılık istenilen her türlü yapının modellenebildiği türev denklemleri ile çözümün yavaş olması, bu iki yöntemin birleştirilebileceği düşüncesi ile gündeme gelmiştir. Yapılan işlem en basit hâliyle; modellenecek yapı türev denklemleri ile tanımlanırken yapının dışında kalan kesimler integral denklemleri ile tanımlanmaktadır (Tarlowsky ve diğ., 1984).

Bu tezin kapsamındaki modeller sonlu elemanlar yöntemini kullanarak düz çözüm yöntemiyle iki boyutlu manyetotellürik modelleme yapan ve Steiner (1988) tarafından geliştirilen PWM adlı bir bilgisayar programı tarafından hesaplanmıştır. Program TE ve TM modlarındaki görünür özdirenç değerlerini, faz değerlerini ve her elektrik alan manyetik alan bileşeninin büyüklüklerini sonlu elemanlar yöntemini kullanarak hesaplamaktadır. Program daha önce yazılmış olan benzer iki boyutlu manyetotellürik düz çözüm algoritmaları tekrardan düzenlenerek hazırlanmıştır (Rijo, 1977; Stodt, 1978; Wannamaker ve diğ., 1985; Wannamaker ve diğ., 1987).

3. 2 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yönteminde incelenen bölge bloklar ile modellendikten sonra genellikle belirli sayıda üçgenlere bölünür. Üçgen alanların her biri sonlu eleman olarak adlandırılır. Üçgenlerin ortak noktaları yardımı ile bu ortamdaki herhangi bir sürekli fonksiyona çeşitli polinomlar yardımı ile yaklaşım yapılabilir ve her noktada ayrık değerler olarak elde edilebilir (Zienkiewicz, 1971; Coggon, 1971; Rijo, 1977; Candansayar, 1997).

Üçgen eleman (Şekil 3. 2) için bilinmeyen alan olan ($\Phi(x , z)$)' nin değerleri, polinom yaklaşımından aşağıdaki gibi yazılabilir.

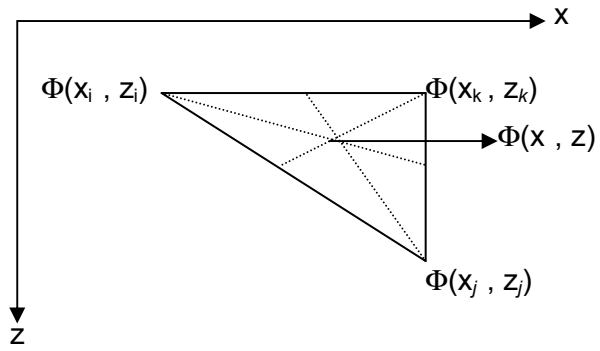


Şekil 3. 2 Üçgen eleman ve polinom yaklaşımı.

$$\Phi(x,z)=\alpha_0+\alpha_1 x+\alpha_2 z=[1,x,z]\begin{bmatrix}\alpha_0\\ \alpha_1\\ \alpha_2\end{bmatrix} \qquad (3.1)$$

Üçgen elemanda, bilinmeyenler köşe noktalarında tanımlanır. Buna göre i, j ve k noktalarında tanımlı olan $\Phi(x , z)$ fonksiyonu (3. 2) numaralı denklemdeki gibi yazılabilir (Şekil 3. 3).

$$\left.\begin{aligned}\Phi(x_i , z_i)&=\alpha_0+\alpha_1 x_i+\alpha_2 z_i\\ \Phi(x_j , z_j)&=\alpha_0+\alpha_1 x_j+\alpha_2 z_j\\ \Phi(x_k , z_k)&=\alpha_0+\alpha_1 x_k+\alpha_2 z_k\end{aligned}\right\} \qquad (3.2)$$



Şekil 3. 3 Üçgen elemanın düğüm noktalarında $\Phi(x , z)$' nin tanımlanması.

Bu denklemlerde α_0, α_1 ve α_2 sabit katsayılardır. Son denklem sistemi matris olarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix}\phi_i\\ \phi_j\\ \phi_k\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & x_i & z_i\\ 1 & x_j & z_j\\ 1 & x_k & z_k\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\alpha_0\\ \alpha_1\\ \alpha_2\end{bmatrix} \qquad (3.3)$$

Yazılan bu matris denkleminden α_0, α_1 ve α_2

$$\begin{bmatrix}\alpha_0\\ \alpha_1\\ \alpha_2\end{bmatrix}=\frac{1}{2\Delta}\begin{bmatrix}a_i & a_j & a_k\\ b_i & b_j & b_k\\ c_i & c_j & c_k\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\phi_i\\ \phi_j\\ \phi_k\end{bmatrix} \qquad (3.4)$$

şeklinde çözülür. Burada, Δ üçgenin alanıdır.

$$\begin{bmatrix}N_i & N_j & N_k\end{bmatrix}=\frac{1}{2\Delta}\begin{bmatrix}1 & x & z\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}a_i & a_j & a_k\\ b_i & b_j & b_k\\ c_i & c_j & c_k\end{bmatrix} \qquad (3.5)$$

şeklinde bir tanım yapılırsa burada N_i, N_j ve N_k değişkenleri şekil fonksiyonu, aradeğer fonksiyonu veya temel fonksiyon (shape functions, interpolation functions, or basis functions) olarak bilinir. Şekil fonksiyonu denklemi sadece elemanın koordinatlarına bağlıdır. Buna göre (3. 3), (3. 4) ve (3. 5) denklemleri birleştirilip aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\phi = N_i\phi_i + N_j\phi_j + N_k\phi_k \qquad (3.6)$$

Burada çözüm bölgesi içinde herhangi bir elemandaki alan değeri, elemanın düğüm noktalarında tanımlanan alan değerleri ve şekil fonksiyonları cinsinden tanımlanmıştır. Hesaplanması gereken düğüm noktalarındaki Φ_i, Φ_j ve Φ_k değerleri yukarıdaki denklemlerin çözümünden elde edilir. Bu denklemler doğrusaldır ve çözümü de doğrusal olarak elde edilir (Coggon, 1971).

Simgesel bir i elemanı için aşağıdaki matris denklemi elde edilir.

$$\begin{bmatrix}k^i_{11} & k^i_{12} & k^i_{13}\\ k^i_{21} & k^i_{22} & k^i_{23}\\ k^i_{31} & k^i_{32} & k^i_{33}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\phi^i_1\\ \phi^i_2\\ \phi^i_3\end{bmatrix}=I_\Delta\begin{bmatrix}a^i_1\\ a^i_2\\ a^i_3\end{bmatrix} \qquad (3.7)$$

Bu denklem kısaca;

$$k^i \,.\, u^i = s^i \qquad (3.8)$$

şeklinde yazılabilir. Yukarıdaki denklemde i-elemanı için k^i, (3x3) boyutlu düğüm noktalarının koordinatlarına, k_y dönüşüm katsayısına ve elemanın öziletkenliğine bağlı katsayı matrisi (stiffness matrix), u^i düğüm noktalarındaki alanlara bağlı (3x1) boyutunda sütun matris, s^i elemana uygulanan sınır koşullarına bağlı (3x1) boyutunda sütun matristir. Elemanlar düğüm noktalarından birbirine bağlı olduğu için, düğüm noktalarındaki alanlar bir eleman için yazılan matris denkleminin çözümüyle bulunamaz. Alanların hesaplanması için elemanlar için oluşturulan matris denklemleri, sonlu elemanlar ağına bağlı olarak birleştirilerek genel matris denklemi

oluşturulmalıdır. Oluşturulan genel matris denklemi çözülerek düğüm noktalarındaki alanlar hesaplanır. Yukarıdaki matris denklemi, bütün elemanların katkısı toplanarak,

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & 0 & K_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} & K_{25} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{32} & K_{33} & 0 & K_{35} & K_{36} & 0 & 0 & 0 \\ K_{41} & K_{42} & 0 & K_{44} & K_{45} & 0 & K_{47} & 0 & 0 \\ 0 & K_{52} & K_{53} & K_{54} & K_{55} & K_{56} & K_{57} & K_{58} & 0 \\ 0 & 0 & K_{63} & 0 & K_{65} & K_{66} & 0 & K_{68} & K_{69} \\ 0 & 0 & 0 & K_{74} & K_{75} & 0 & K_{77} & K_{78} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{85} & K_{86} & K_{87} & K_{88} & K_{89} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{96} & 0 & K_{98} & K_{99} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \\ \phi_5 \\ \phi_6 \\ \phi_7 \\ \phi_8 \\ \phi_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ S_7 \\ S_8 \\ S_9 \end{bmatrix} \qquad (3.9)$$

şeklinde yazılabilir. Buna göre matris denklemi genel olarak tanımlanan bir sonlu elemanlar ağı için aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$G_{(N \times N)} \cdot f_{(N \times 1)} = S_{(N \times 1)} \qquad (3.10)$$

Burada N ağ üzerindeki düğüm noktası sayısı olmak üzere, (3. 10) numaralı denklemde (N x N) boyutlu, pozitif değerli, simetrik-band matristir. Bu matris sonlu elemanlar ağındaki tüm elemanların geometrisine ve öziletkenliğine bağlıdır. S vektöründe sadece sınır noktalarını temsil eden elemanda değer vardır. Diğer elemanlara sıfır değeri atanır.

Sonlu elemanlar yöntemini kullanarak iki boyutlu düz çözüm yapan bilgisayar yazılımları oldukça karmaşıktır. Bu nedenden dolayı kullanılması ve kontrol edilmesi zor olan programlardır. Bu tür programlarda iki tür boyut girmek gereklidir; yapıların boyutları ve sonlu elemanlar yöntemi hesaplamaları için gerekli olan boyutlar. Birinci tür boyutta model girilirken oluşturulan yerelektrik yapısı bloklarının yatay ve düşey yönde boyutları girilirken, ikinci tür boyut için sonlu elemanlar tarafından kaç parçaya ayrılacağının ve bu parçaların boyutlarının ne olduğunun belirtilmesi gerekir. Hesaplama yapılırken sonlu elemanların boyutları kullanıldığından özellikle ikinci türdeki boyutların çok dikkatli girilmesi gereklidir. Dikkat edilmesi gereken diğer bir önemli noktada modellenmek istenen yapı civarındaki blokların boyutlarının küçük girilmesidir.

Bu nedenle, iki boyutlu modelleme programı örneklerinden biri olan PWM programını (Steiner, 1988) daha iyi açıklayabilmek amacıyla aşağıda, oldukça basit bir dirençli dayk modeli için hazırlanmış PWM programı giriş dosyası örneği verilmiştir

3. 3 PWM – İki Boyutlu Manyetotellürik Modelleme Programında Kullanılan Örnek Giriş Dosyası

Yukarıda matematik esasları verilen PWM iki boyutlu manyetotellürik modelleme bilgisayar yazılımında (Steiner, 1988) girilen veri dosyasının içeriği ve çeşitli parametreleri aşağıdaki giriş dosyası örneğinde açıklanmıştır.

PWM – Giriş Dosyası Örneği

```
HZ3 COMPATIBLE INPUT FILE
Y BLOCKS                                   }
6000                                       }
500                                        }
500                                        }
500                                        }  *A
500                                        }
500                                        }
6000                                       }
Z BLOCKS                                   }
250                                        }
250                                        }
250                                        }
250                                        }  *B
250                                        }
250                                        }
250                                        }
POLARISATIONS AND FREQUENCIES
2 10                                       }
2 1                                        }
2 0.1                                      }  *C
3 10                                       }
3 1                                        }
3 0.1                                      }
RHO AND PHASE MEASUREMENTS
INPHASE MEASUREMENTS
OUTPHASE MEASUREMENTS
NUMBER OF Y NODES 85                       }  *D
NUMBER OF Z NODES 35                       }
RESISTIVITIES
10                                         }  *E
150                                        }
RESISTIVITY STRUCTURE
11222211                                   }
11222211                                   }
11222211                                   }
11222211                                   }  *F
11222211                                   }
11222211                                   }
11222211                                   }
11222211                                   }
LEFT SIDE M -8000                          }  *G
RIGHT SIDE M 8000                          }
CALCULATE MODEL (Y/N) y                    }
DRAW RESULTS (Y/N) y                       }
DRAW MEASUREMENTS (Y/N) y                  }
DRAW INPHASE MEASUREMENTS (Y/N) y          }  *H
DRAW OUTPHASE MEASUREMENTS (Y/N) y         }
MODEL DESCRIPTION          BURE PROFIL PF1 (B19-P24)
DISPLACEMENT OF MODELLING 0                }
MESH                                       }
500 500 125 125 125
```

Giriş Dosyası İle İlgili Önemli Notlar:

***A :** Y bloklarının metre cinsinden boyutlarını verir (en çok 48 tane).

***B :** Z bloklarının metre cinsinden boyutlarını verir (en çok 29 tane).

***C :** Polarizasyonları ve frekansları verir. Baştaki 2 rakamı E-polarizasyonu (TE-mod), 3 rakamı ise H-polarizasyonunu (TM-mod) temsil eder ve matematiksel bir değerleri yoktur. Sonraki sayı ise ölçüm yapılacak frekansı verir. Örneğin, giriş dosyasındaki 2 10' un anlamı TE modunda 10 Hz' lik ölçüm anlamını taşımaktadır. Program en çok 15 frekansta çalışır.

***D :** Y ve Z yönündeki düğüm noktası sayısını verir. Sonlu elemanlar yöntemine göre karelajlama yapılırken kaç parçaya bölüneceğini gösterir. İki sayının toplamı en fazla 120 olabilir.

***E :** Modele girilecek olan blokların Ωm cinsinden özdirençlerini gösterir (en çok 20 tane).

***F :** Model bloklar burada girilir. Yazılan rakamların matematiksel bir anlamı yoktur. Y yönünde en çok 50, Z yönünde en çok 30 blok girilebilir. *A'da ve *B'de verilen boyutlar buradaki rakamların boyutlarıdır. Y yönündeki blokları sayısı *A'da girilen boyutların sayısından 2 fazla olmak zorundadır. Örneğin giriş dosyasındaki *A'da 6 tane boyut girilmiş olduğu için modele 8 adet blok girilmiştir. Baştaki ve sondaki bloğun sonsuza gittiği var sayılır. Z yönündeki blokların sayısı da *B'de girilen boyutların sayısından 1 fazla olmak zorundadır. Model blokları 1,2,....,9 gibi sayılarla daha sonra ise A,B,.... gibi büyük harflerle girilir, en fazla 20 adet olabilir. 0 (sıfır) havanın özdirencini temsil eder. Örneğin buradaki 1 sayısı *E'de verilen ilk özdirenç 10 Ωm' yi temsil eder.

***G :** Profilin sıfır noktasından olan – ve + uzaklığı metre cinsinden girilir.

***H :** Parametrelerin hesaplanması burada kontrol edilir. Hesaplanmasını istediğiniz parametreye y (yes), istemediğinize n (no) koyulur.

***I :** Sonlu elemanlar için *E'de girilen y bloklarının boyutlarını verir. Örneğin *E'de girilen 85 sayısının anlamı y yönünde 84 blok demektir. Bu nedenle 84 tane boyut girilir. Buradaki boyutların toplamı ile *A'da verilen boyutların toplamı birbirini tutmalıdır.

***J :** Sonlu elemanlar için *E'de girilen z bloklarının boyutlarını verir. Örneğin *E'de girilen 35 sayısının anlamı z yönünde 34 blok demektir. Bu nedenle 34

tane boyut girilir. Buradaki boyutların toplamı ile *B'de verilen boyutların toplamı birbirini tutmalıdır.

***K :** *F'deki y bloklarının sayısı kadardır (8 tane). Buradaki blokların sonlu elemanlar tarafından kaça bölünmesi gerektiğini ifade eder. Sayıların toplamı *I'da verilen blok sayısına (84 tane) eşit olmalıdır.

***L :** *F'deki z bloklarının sayısı kadardır (8 tane). Buradaki blokların sonlu elemanlar tarafından kaça bölünmesi gerektiğini ifade eder. Sayıların toplamı *J'de verilen blok sayısına (34 tane) eşit olmalıdır.

Büyük modelleri hesaplayan programı çalıştırmak için HZ3.exe gerekmektedir, bunların dışında pwm.exe ve os386.exe ya da run386.exe' de programın çalıştığı sırada kullandığı alt programlardır. DOS ortamında HZ3 programının ve giriş dosyasının bulunduğu klasör içinde HZ3 "giriş dosyasının adı" yazarak program çalıştırılabilir (Not: Oluşturulan giriş dosyasının sonunda herhangi bir uzantı bulunmamalıdır).

Programdan tüm hesaplamaları yapmasını istemişseniz her frekans için bir res*.inp ve res*.out adında dosyalar oluşturur (Örneğin ilk frekans için res1.inp, res1.out, ikinci frekans için res2.inp, res2.out gibi). Oluşturulan inp dosyalarında hesaplama yapılması istenen her frekans için yeni bir giriş dosyası ve inp dosyasının sonuçlarını içeren çözümlerde aynı isimli out dosyalarında bulunmaktadır. Hesaplanan elektrik alan bileşenlerinin ve manyetik alan bileşenlerinin büyüklükleri ile faz açılarını, görünür özdirenç değerlerini ve bunların faz açılarını ^{o} (derece) cinsinden her bir frekans için out dosyalarında verilir.

Ayrıca program, giriş dosyasında girilen tüm frekansların sonuçlarının birlikte gösterildiği Harward Grafics çizim programı formatında 6 tane farklı çıkış dosyası daha verir. Örneğin, giriş dosyanızın adı "model" ise programın oluşturacağı çıkış dosyaları "model.rhe", "model.rhh", "model.phe", "model.phh", "model.re" ve "model.im" isimlerinde olacaktır. Buradaki rhe çıkış dosyası TE modundaki görünür özdirençleri, rhh çıkış dosyası ise TM modundaki görünür özdirençleri Ωm cinsinden, profil üzerinde yer alan noktaların km cinsinden koordinatlarına karşılık vermektedir. phe dosyası TE modundaki faz açısını, phh dosyası ise TM modundaki faz açısını ^{o} (derece) cinsinden vermektedir. re dosyası reel bileşeninin (In-Phase(IP)), im dosyası ise sanal bileşeninin (imajiner, (Out of-Phase(OP))) değerlerini vermektedir.

PWM – iki boyutlu manyetotellürik modelleme programını kullanabilmek için gerekli olan minimum bilgisayar özellikleri PC – 386 ve 8 MB' lık hafızadır. Programın çalışma hızı oluşturulan modelin büyüklüğüne ve sonlu elemanlar yöntemi için verilen düğüm sayısına bağlı olarak değişir. Ayrıca TE ve TM modlarında da süre değişmektedir. Pentium 200-MMX, 40 MB EDO RAM' e sahip bilgisayarda 81 X 36 düğüm noktası ile yapılan hesaplamada süreler TE modu için 6 saniye, TM modu için 3 saniye iken, 10 X 10 düğüm noktası ile yapılan hesaplamada süreler her iki mod için 1 saniyedir.

Programın dezavantajı otomatik olarak çizim yapmamasıdır, fakat sonuçlar Harward Graphics formatında çıktığından dolayı bu program kullanılarak çizimler yapılabilir. Bu çalışmada ise çıkış dosyaları ascii formata çevrilerek çizimler MATLAB programlama dilinde yaptırılmıştır.

4. İKİ BOYUTLU MANYETOTELLÜRİK MODELLEME ÇALIŞMALARI

4. 1 Kuramsal Modeller ve Manyetotellürik Yöntemde TE ve TM Modlarının İki Boyutlu Yapılara Karşı Duyarlılığı

İki boyutlu manyetotellürik modelleme çalışmalarında jeoelektrik modeller y' ye (-km, profil uzunluğu) ve z' ye (-Hz, frekans –s, periyot –km, derinlik) karşılık görünür özdirenç değerleri Ωm cinsinden konturlanarak sunulur. Bu sunumlar iki boyutlu manyetotellürik yöntemde TE ve TM gibi iki ayrı mod olduğundan dolayı, her iki mod için de ayrı ayrı yapılır. Her iki modda da sonuçlar farklı karakteristikler göstermektedir. Literatürdeki çalışmalarda, araştırmacılar özellikle 1960' lı, 1970' li yıllardaki çalışmalarında sadece TM modu için olan sonuçlara güvenebilmişlerdir (d'Erceville ve Kunetz, 1962; Rankin, 1962; Jones ve Price, 1970; Jones ve Pascoe, 1971; Swift, 1971). Bunun nedeni, TE modu için analitik çözüm olmadığından dolayı bu moda fazla güven duyulmamasından kaynaklanmaktadır. Fakat TM modunda da özellikle yüzeye yakın bölgelerde karmaşık özdirenç yapılarının neden olduğu bozulmalar (distortions) vardır. Bu bozulmalar statik kaymadan (static shift) kaynaklanmaktadır ve bu sorun farklı yöntemlerle (doğru akım özdirenç (DAÖ), geçici elektromanyetik yöntem (transient electromagnetics (TEM))) sığ çalışmalar yapılıp elde edilen veriler ile manyetotellürik verilerin birlikte ortak (joint) değerlendirilmesi ile giderilebilir (Sasaki, 1989; Meju, 1996; Yang ve Tong, 1999). Buna karşılık bazı araştırmacılar (Berdichevsky ve diğ., 1998) her iki modun da birbirlerine karşı bir takım üstünlükleri olduğunu savunmuşlar ve iki boyutlu bir manyetotellürik problemin çözümü için her iki moddan da eşit derecede yararlanılması gerektiğini belirtmişlerdir. Bu bağlamda her iki modun da farklı derinliklere veya farklı özdirençlere sahip yapılara karşı duyarlılıkları aynı değildir. Statik kaymadan da her iki mod farklı etkilenir. TM modu çok etkilenirken, TE modu hiç etkilenmeyebilir (Berdichevsky ve diğ., 1998). Bunun için Hermance (1982) "Eğer modellenecek yapı çok düzensiz bir geometriye sahipse iki boyutlu TM algoritması çok tehlikeli olabilir." demiştir. Yukarıda bahsedilen bütün farklılıklar aşağıdaki şekilde maddeler halinde sıralanabilir (Berdichevsky ve diğ., 1998).

1. TM modu yüzeye yakın yapılara karşı daha duyarlıdır.
2. TE modu derinlerdeki yapılara karşı daha duyarlıdır.

3. TM modu dirençli yapılara karşı daha duyarlıdır.
4. TE modu iletken yapılara karşı daha duyarlıdır.
5. TM modu iletken yapıların üç boyutlu etkilerine karşı daha etkindir (robustness).
6. TE modu dirençli yapıların üç boyutlu etkilerine karşı daha etkindir (robustness).
7. TM modu statik kaymadan çok fazla etkilenir.
8. TE modu statik kaymadan belki de hiç etkilenmeyebilir.

Bu nedenlerden dolayı herhangi bir moddan kaynaklanabilecek açıklar diğer bir modla giderilebilir (Berdichevsky ve diğ., 1998).

Manyetotellürik ölçüler çok düşük frekanslar kullanıldığında bazen 100 km' yi aşan derinliklerde yerin elektrik yapısına karşı duyarlı olabilmektedir. Yapılara karşı olan duyarlılıkta manyetotellürik yöntemin en önemli hedefidir. Bu nedenle bu tezin kapsamında manyetotellürik yöntemin TE ve TM modlarının yukarıdaki ilk dört maddede verilen duyarlılıkları uygulamalar ile birlikte irdelenmiştir.

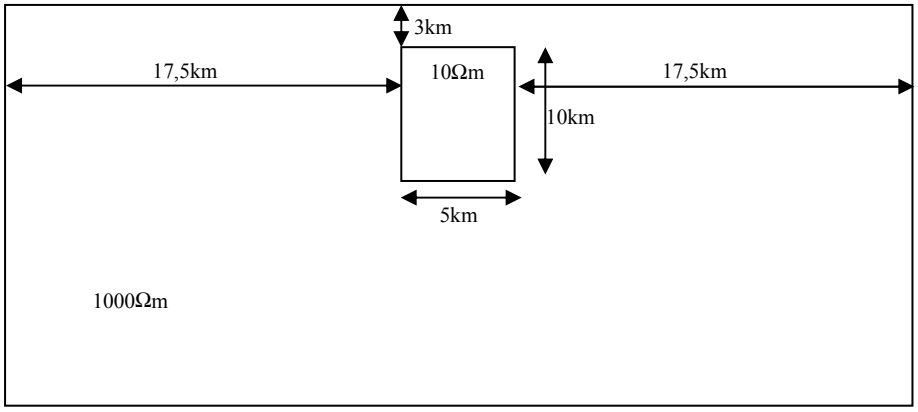
4. 2 Uygulamalar

TM modu enine (transverse) eğriler yaratır ve tellürik akımlar yapının içinden akarlar, bu nedenle TM modu yapıyı yükler ve bu yüzden anomalileri modellenecek yapının galvanik doğasından kaynaklanır; TE modu ise boyuna (longitudinal) eğriler oluşturur ve tellürik akımlar yapının etrafından akarlar, bu nedenle TE modu yapıyı yüklemez ve anomalileri modellenecek yapının indüktif doğasından kaynaklanır (Berdichevsky ve diğ., 1998). TE ve TM modları arasındaki duyarlılık farkları da bu nedenlerden kaynaklanır. Bu duyarlılıkları göstermek için oluşturulan kuramsal modeller de dört ana başlık altında toplanmıştır; sığ iletken yapı, sığ dirençli yapı, derin iletken yapı ve derin dirençli yapı. Burada yukarıdaki dört ana modelin seçilmesindeki amaç, TE modunun derin yapılara ve iletken yapılara karşı olan duyarlılığını, TM modunun ise sığ yapılara ve dirençli yapımlara karşı olan duyarlılığını ayrıntılı bir şekilde irdelemek ve sonuçları yukarıdaki verilen maddeler göre test edebilmektir.

4. 2. 1 Sığ İletken Yapı

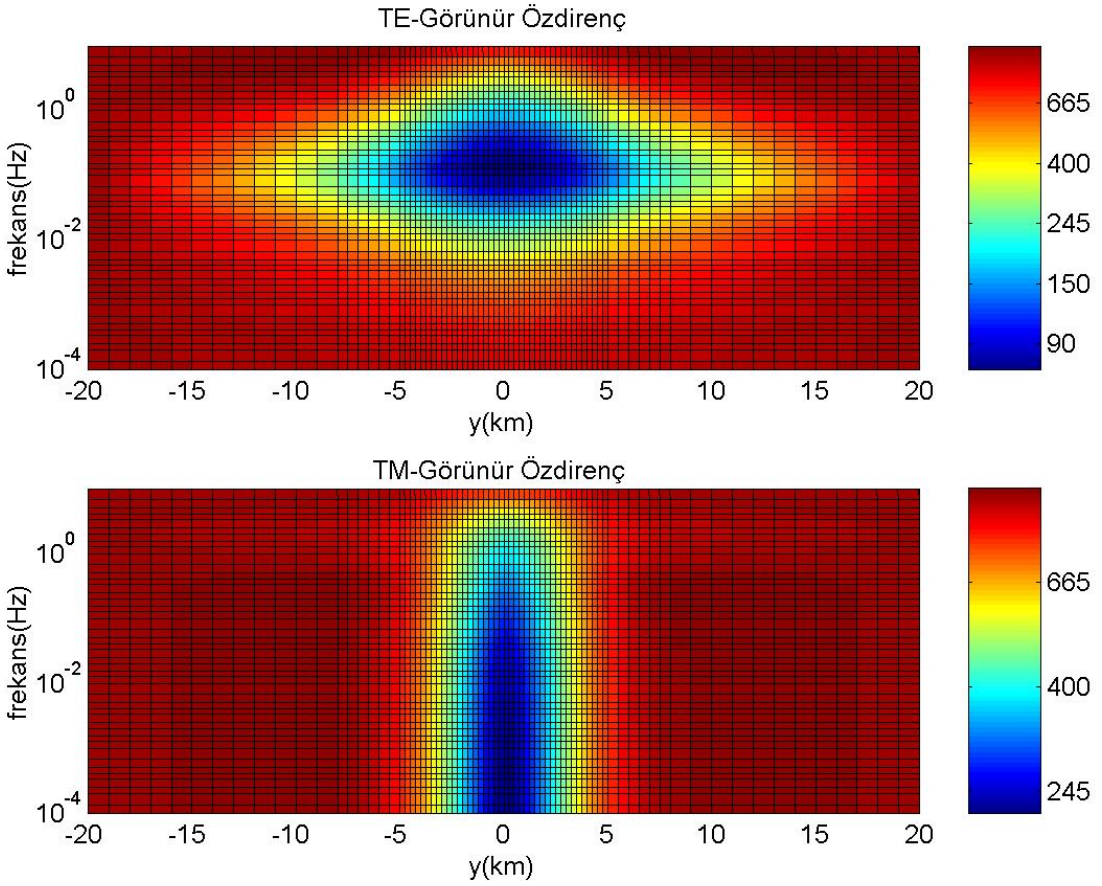
Bu modelde dirençli bir ortam içinde iletken bir kütle olduğu varsayılmıştır. Özdirenç kontrastları ise her kuramsal modelde olduğu gibi biraz yüksek tutulmuştur. Bu

modelde ortam 1000 Ωm, yapı ise 10 Ωm ile ifade edilmiştir. Yapının derinliği manyetotellürik yöntem için sığ sayılabilecek bir derinlik olan 3 km olarak alınmıştır. Yapının boyutları 5 X 10 km olarak alınmış ve profil uzunluğu da 40 km olarak belirlenmiştir. Sığ iletken yapının modeli ayrıntılı olarak Şekil 4. 1' de verilmiştir.



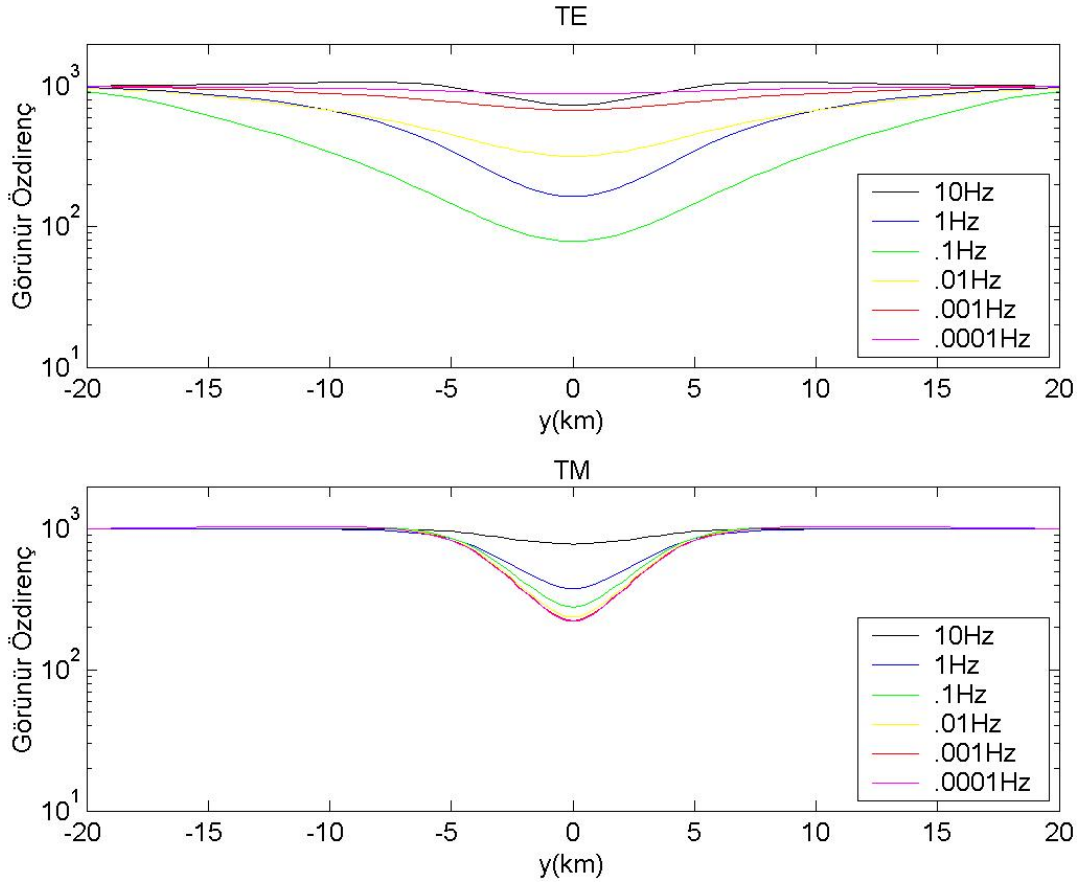
Şekil 4. 1 Sığ iletken kütle.

Bu yapı 45 ayrı frekansta (10 – 0.0001 Hz) TE ve TM modları için modellendikten sonra elde edilen görünür özdirençler frekansa ve profil uzunluğuna karşılık çizilerek Şekil 4. 2' de ve altı ana frekanstaki (10, 1, 0.1 0.01, 0.001 ve 0.0001 Hz) değişimleri ise Şekil 4. 3' te verilmiştir.



Şekil 4. 2 Sığ iletken yapının TE ve TM modları için hesaplanan görünür özdirenç dağılımı.

Şekil 4. 2' deki kareler iki boyutlu manyetotellürik düz çözüm programı tarafından oluşturulan sonlu elemanları ifade etmektedir. Şekilde de görülebileceği gibi modellenmek istenen yapı civarında modeller daha sık karelajlanmış, bu şekilde daha iyi bir sonuç almak amaçlanmıştır. Şekilde mavi bölgeler iletken, kırmızı bölgeler ise dirençli kısımları göstermektedir. TE modu iletken kütlelere daha duyarlı olduğu için yapıyı ortaya çıkarmıştır. Fakat tellürik akımlar bu modda yapının etrafından aktığı için yapı, olduğundan daha genişmiş gibi bir izlenim vermektedir. Başka bir deyişle TE modu yapının yanal sınırlarını çok iyi belirleyemediği halde düşey sınırlarını belirleyebilmektedir. Yapının altındaki dirençli ortam bu modelde TE modu ile çok iyi bir şekilde belirlenebilmektedir. Sığ yapılara duyarlı olan TM modunda ise 3 km gibi sığ, bu yapı, daha belirgin görülebilmektedir. TM modunda yapı yüklenip, tellürik akımlar yapının içinden aktığından dolayı yanal sınırlar çok daha rahat bir şekilde belirlenebilmektedir. Üst sınır da bu yapıda göründüğü halde statik kaymadan dolayı alt sınır bu modda belirlenememekte, yapının iletkenlik etkisi düşük frekanslarda bile görülmektedir.

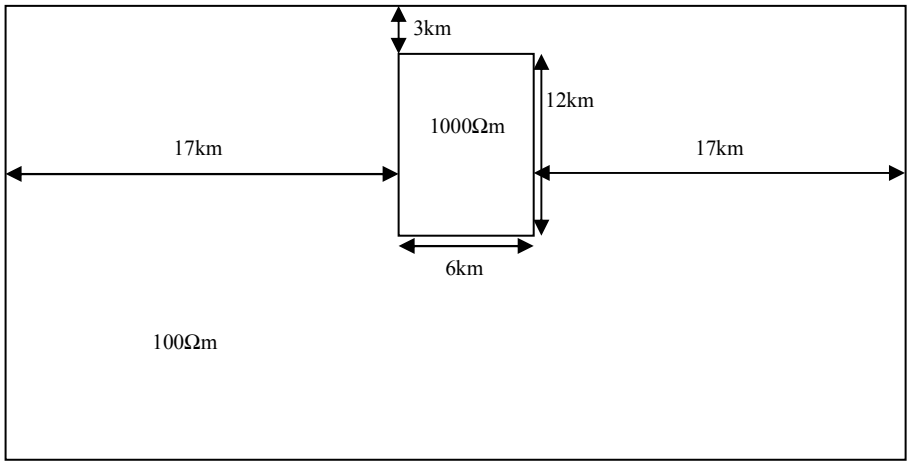


Şekil 4. 3 Sığ iletken yapının altı ana frekanstaki görünür özdirenç değişimi.

Aynı şekilde görünür özdirenç değişimleri profil boyunca TE ve TM modları için gösterilmiştir (Şekil 4. 3). Şekilden de anlaşılabileceği gibi TE modu sığ bir yapı olmasına rağmen yapıya karşı daha duyarlıdır. Bunun nedeni yapının iletken

olmasıdır. TM modu ise yapı sığ olduğu için iletken bir kütle bile olsa duyarlı bir davranış göstermektedir. TE modunda 10 Hz gibi yüksek bir frekans ile 0,001 ve 0,0001 Hz gibi düşük frekanslarda önemli bir anomali görülmezken ara frekanslarda yapıya oldukça duyarlı olan anomaliler görülebilmekte ve böylelikle yapının alt ve üst sınırları belirlenebilmektedir. TM modunda ise frekans azaldıkça anomalinin duyarlılığı artmakta ve bu nedenle de düşey sınırlar belirlenememektedir. Buna rağmen TE modunda daha geniş görünen anomaliler TM modunda yapının bulunduğu yere daha uygun bir biçimde dar olarak görünmekte ve yanal sınırları belirlemede çok daha başarılı olmaktadır.

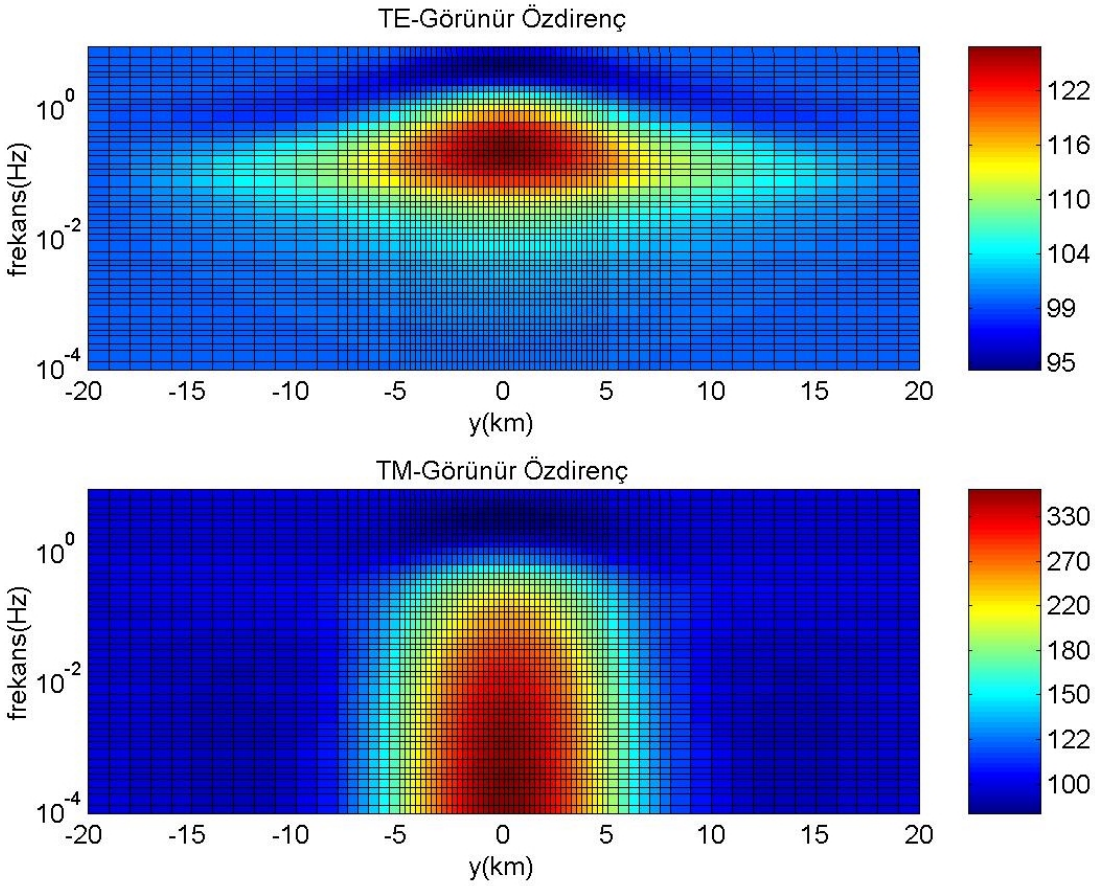
4. 2. 2 Sığ Dirençli Yapı



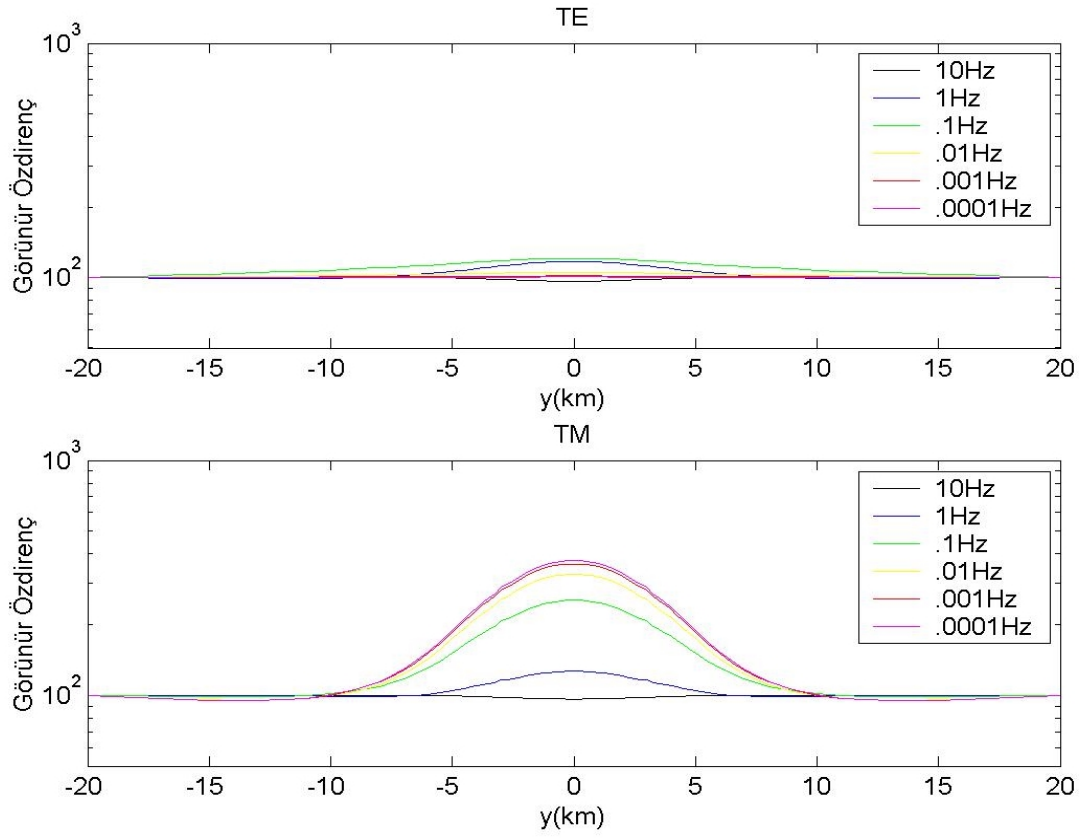
Şekil 4. 4 Sığ dirençli yapı.

Bu modelde de 6 X 12 km boyutları olan 1000 Ωm' lik dirençli bir yapı, daha iletken bir ortam (100 Ωm) içerisinde 3 km derinde bulunmaktadır. Bu modelde de profilin uzunluğu 40 km alınmıştır. Modelleme çalışması, frekansları 10 Hz ile 0,0001 Hz arasında değişen 45 ayrı frekansta hesaplanıp sunulmuştur.

Şekil 4. 5' te de bu modele ait görünür özdirenç değerleri görülmektedir. Şekilden de izlenebileceği gibi her iki modda da dirençli bölge çözülebilmiştir. Fakat duyarlılık açısından TM modu TE moduna göre çok daha duyarlıdır. Beklenilen sonuçta budur. Yapı hem sığ, hem de dirençli olduğundan dolayı TM modu her iki yönden de duyarlılık açısından daha üstündür. TE modunda yapının olduğu bölgedeki görünür özdirenç ancak 125 Ωm' lere ulaşabilirken, TM modunda 400 Ωm gibi yüksek bir görünür özdirenç değeri elde edilmiştir. Bu modelde de yine tellürik akımlar yapının etrafından aktığından dolayı TE modunda düşey sınırlar çok daha iyi belirlenirken, TM modunda ise tellürik akımlar yapı içinden aktığından dolayı yanal sınırlar daha iyi belirlenmiştir.



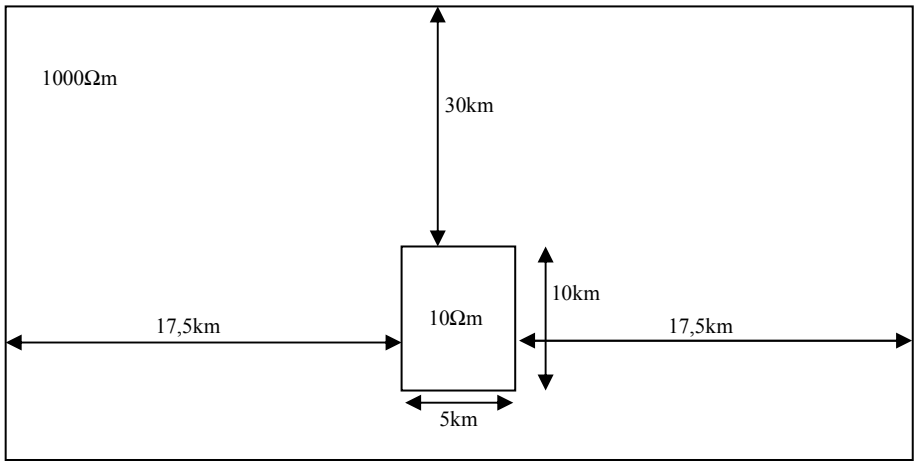
Şekil 4. 5 Sığ dirençli yapının TE ve TM modlarındaki görünür özdirenç görüntüsü.



Şekil 4. 6 Sığ dirençli yapının altı ana frekanstaki görünür özdirenç değişimi.

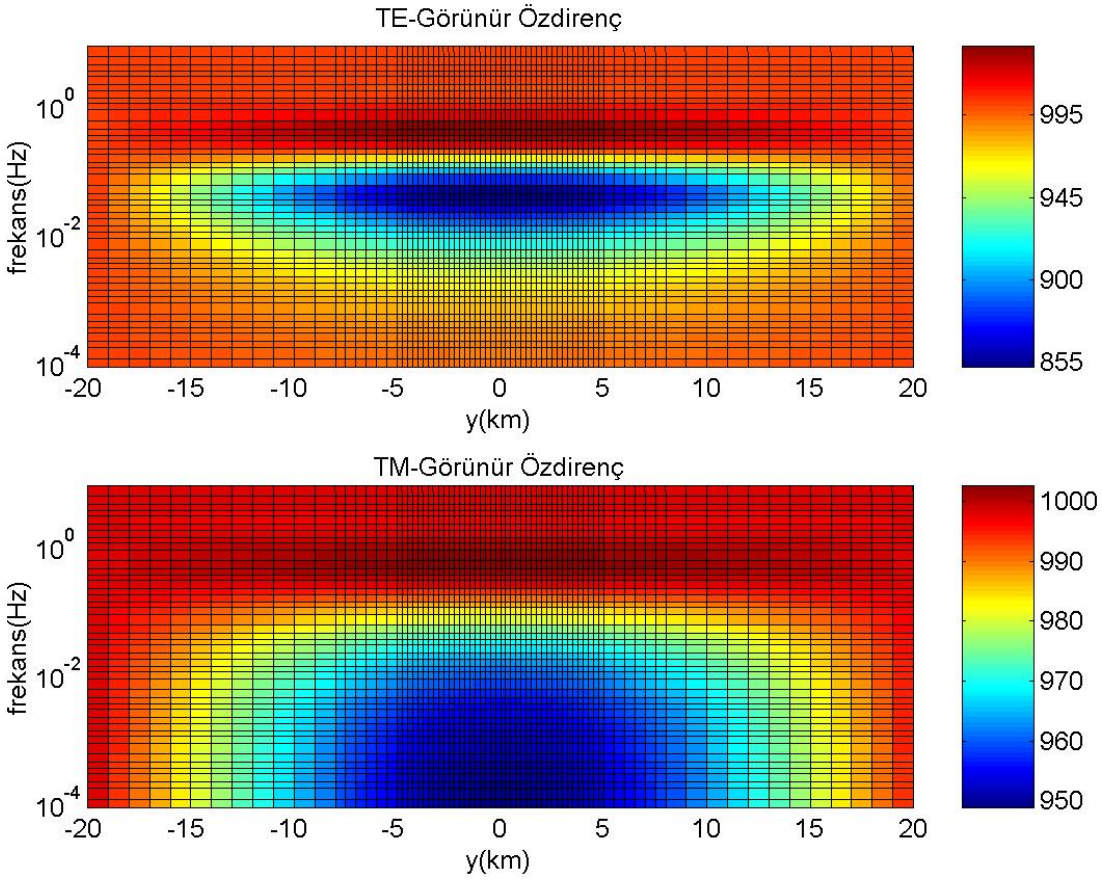
Şekil 4. 6 TM modunun sığ ve dirençli yapılara karşı çok duyarlı olduğunu işaret etmektedir. TM modunda büyük genlikli anomaliler görüldüğü halde, TE modunda hemen hemen hiç bir önemli anomali görülmemektedir. Yalnızca 1 Hz ve 0,1 Hz frekanslarında küçük anomaliler vermiş, diğer yüksek ve düşük frekanslarda ise hemen hemen hiç bir tepki vermemiştir. Başka bir deyişle öteki kriterler bir tarafa bırakılıp sadece duyarlılık açısından bakılırsa; sığ, dirençli bir yapı ancak TM modu ile yakalanabilir. TE modunda ise böyle bir yapıyı kaçırma olasılığı çok yüksektir. Özellikle bu modelden daha sığda ve daha küçük bir yapıyı TE modunda görememe ihtimali oldukça yüksektir. Böyle bir yapı TE modunda hemen hemen hiç bir anomali vermeyecektir. TM modu ile ise bu tip yapılar çok kolay bir şekilde ortaya çıkarılabilir. Ancak anomaliler yine frekans azaldıkça statik kaymadan dolayı artmıştır. Oysa alt sınırı belirleyebilmek için düşük frekanslarda hiç bir anomali vermemesi beklenirdi. Bu nedenle modelde alt sınırı çok daha iyi bir şekilde belirleyebilmek için TE moduna ihtiyaç vardır.

4. 2. 3 Derin İletken Yapı

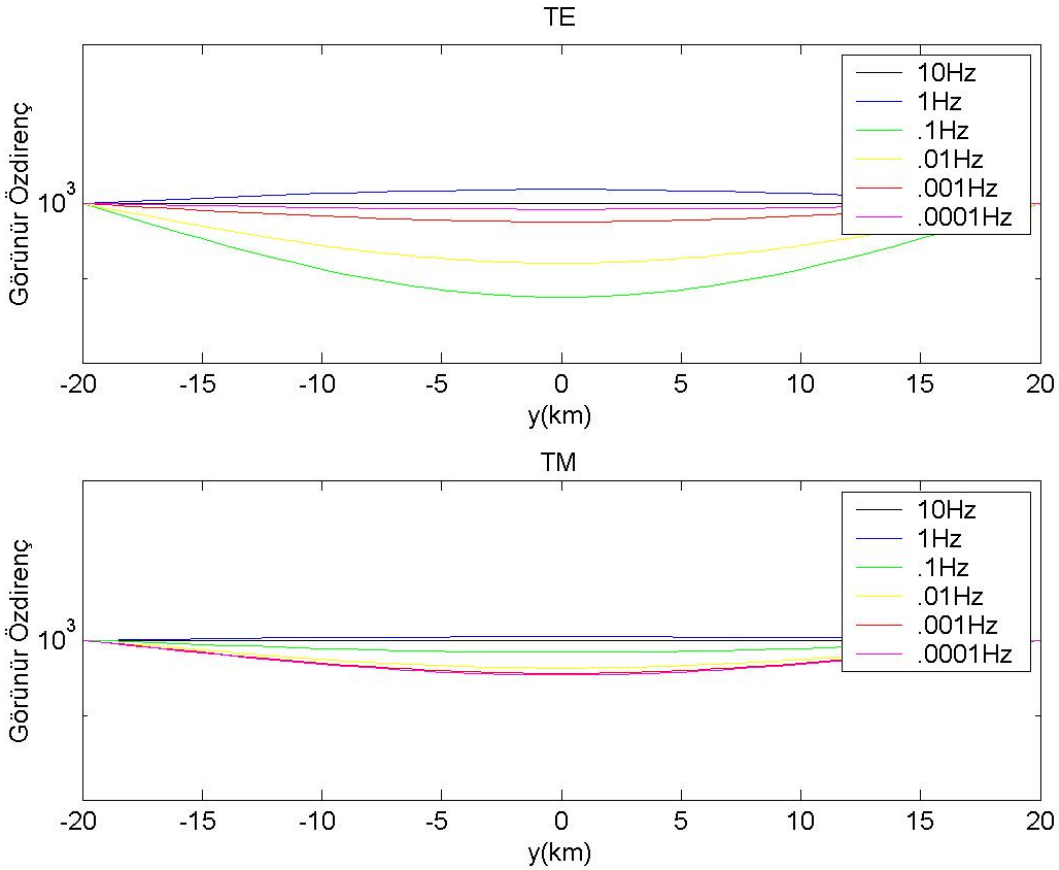


Şekil 4. 7 Derin iletken kütle.

Bu elektrik modelde dirençli bir ortam içinde iletken bir kütle olduğu varsayılmıştır. Özdirenç kontrastları ise her kuramsal modelde olduğu gibi yüksek tutulmuştur. Bu modelde ortam 1000 Ωm, yapı ise 10 Ωm ile tanımlanmıştır. Yapının derinliği 30 km olarak alınmıştır. Yapının boyutları 5 X 10 km olarak alınmış ve profil uzunluğu da 40 km olarak belirlenmiştir. Derin iletken model ayrıntılı olarak yukarıdaki Şekil 4. 7' de verilmiştir. (Bu kuramsal modeldeki yapının boyutları, özdirenç kontrastı ve profil uzunluğu ilk modeldeki sığ iletken kütle ile aynıdır, bu modelde karşılaştırma kolaylığı açısından sadece derinlik değeri değiştirilmiş ve 30 km kabul edilmiştir. Böylece sadece derinliğin değişmesi halinde duyarlılık açısından hangi modda nasıl bir değişim gerçekleştiğinin izlenmesi daha kolay olacaktır.)



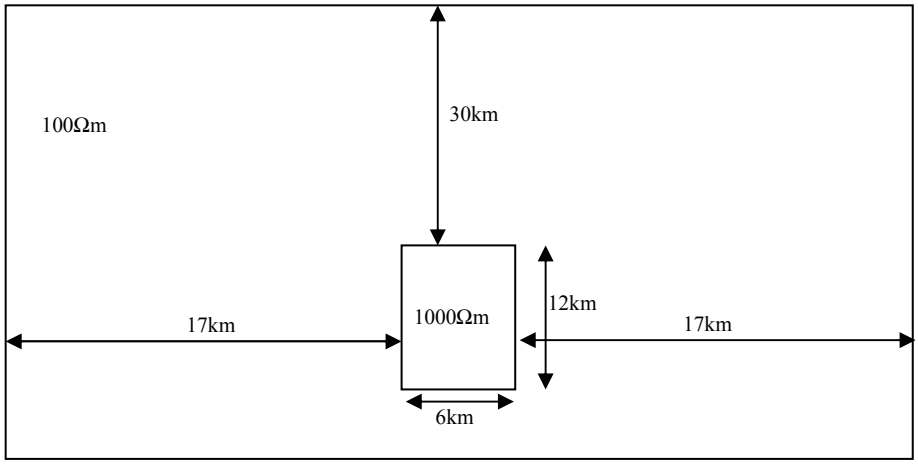
Şekil 4. 8 Derin iletken yapının TE ve TM modlarındaki görünür özdirenç görüntüsü.



Şekil 4. 9 Derin iletken yapının altı ana frekanstaki görünür özdirenç değişimi.

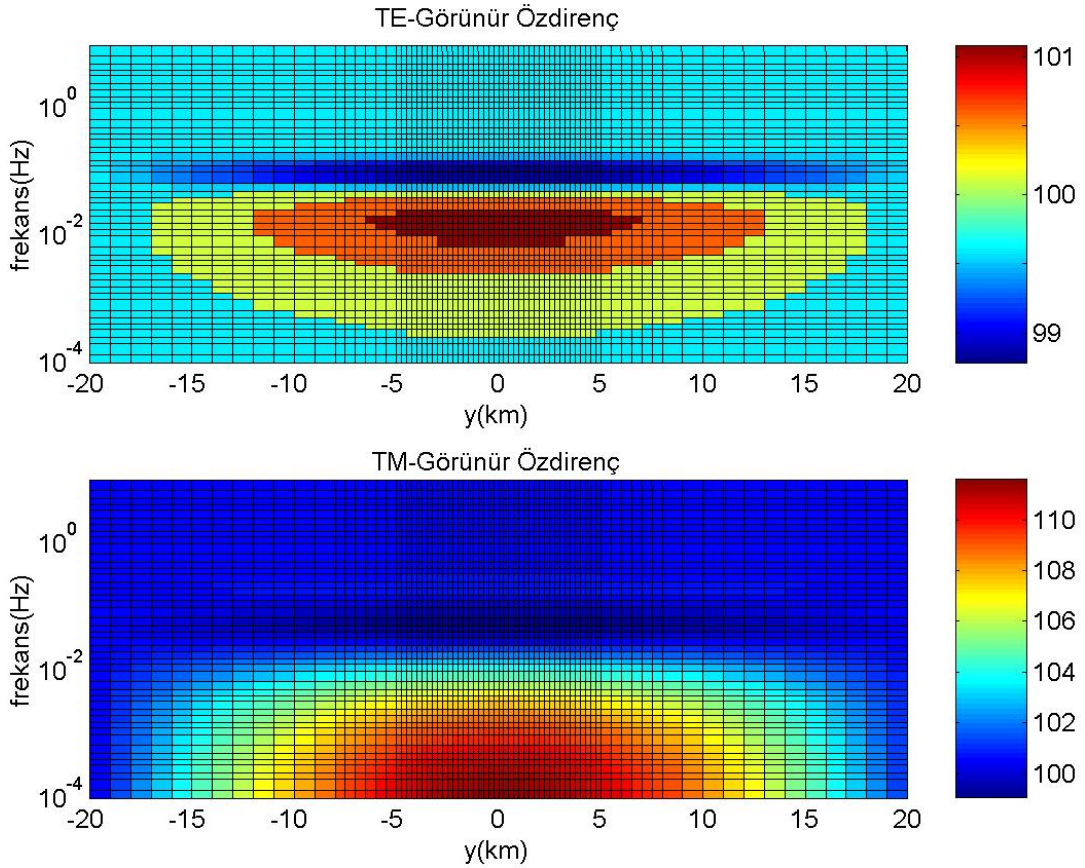
Şekil 4. 8' de derin iletken bir yapının TE ve TM modlarında verdiği görünür özdirenç cevabı görülmektedir. Burada TE modu, TM modundan çok daha duyarlıdır. TM modunda yapının görünür özdirenci 950 Ωm gibi görünürken, TE modunda bu değer 850 Ωm' ye kadar inebilmektedir. Bu modelde yapı sonlu elemanlar yöntemiyle yapı içinde ve yakın çevresinde daha sık karelajlandığı halde görünür özdirenç değerleri dışarıya doğru yayılmış durumdadırlar. Bunun nedeni TE modunda tellürik akımların yapının dışında akmasından kaynaklanmakta, TM modunda ise TM modunun derin yapılara karşı duyarlı olmamasından dolayı yapıyı tam olarak görememesi, fakat yapının etkisini alarak bu etkiyi çevreye de yaymasından kaynaklanmaktadır. Yine burada TE modu ile düşey sınırlar belirlenebilirken, TM modu ile bu mod hem derin yapılara, hem de iletken yapılara duyarlı olmadığından dolayı –2,5 km ile 2,5 km arasında olan yapının yanal sınırlarını belirleyebilmek imkansız hale gelmiştir. Şekil 4. 9' a göre de TE modu TM moduna göre daha duyarlıdır. TE modunda 0,1 Hz ile 0,01 Hz frekanslarında yapı gözlenebilirken daha yüksek ve düşük frekanslarda sadece çevredeki 1000 Ωm' lik ortam görülebilmektedir. TM modunda ise 30 km derinde, 10 X 5 km' lik bir yapıyı söyleyebilecek bir ipucu bulunmamaktadır.

4. 2. 4 Derin Dirençli Yapı

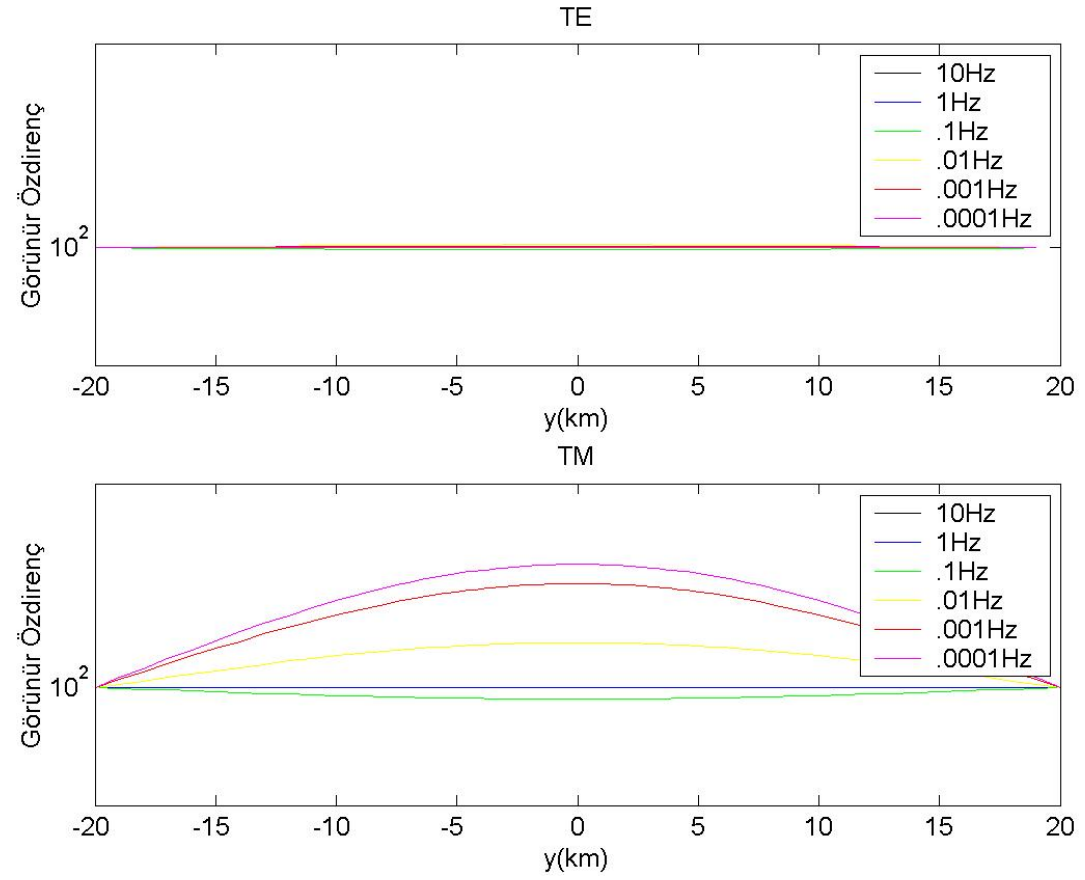


Şekil 4. 10 Derin dirençli yapı.

Bu kuramsal modelde de 100 Ωm gibi iletken bir ortam içerisinde 1000 Ωm gibi bir yüksek özdirence sahip dirençli 12 km uzunluğunda, 6 km eninde bir yapı 30 km derinliğe yerleştirilmiştir. Derin dirençli yapı modeli ayrıntılı olarak yukarıda verilen Şekil 4. 10' da verilmiştir. (Bu kuramsal modelde yapının boyutları, özdirenç kontrastı ve profil uzunluğu sığ dirençli yapı modeliyle tamamen aynıdır, bu modelde karşılaştırma kolaylığı açısından sadece derinlik değeri değiştirilmiş ve 30 km kabul edilmiştir. Böylece sadece derinlik değiştiği takdirde duyarlılık açısından hangi modda ne tür bir değişim olacağının izlenmesi daha kolay olacaktır.)



Şekil 4. 11 Derin dirençli yapının TE ve TM modlarındaki görünür özdirenç dağılımı.



Şekil 4. 12 Derin dirençli yapının altı ana frekanstaki görünür özdirenç değişimi.

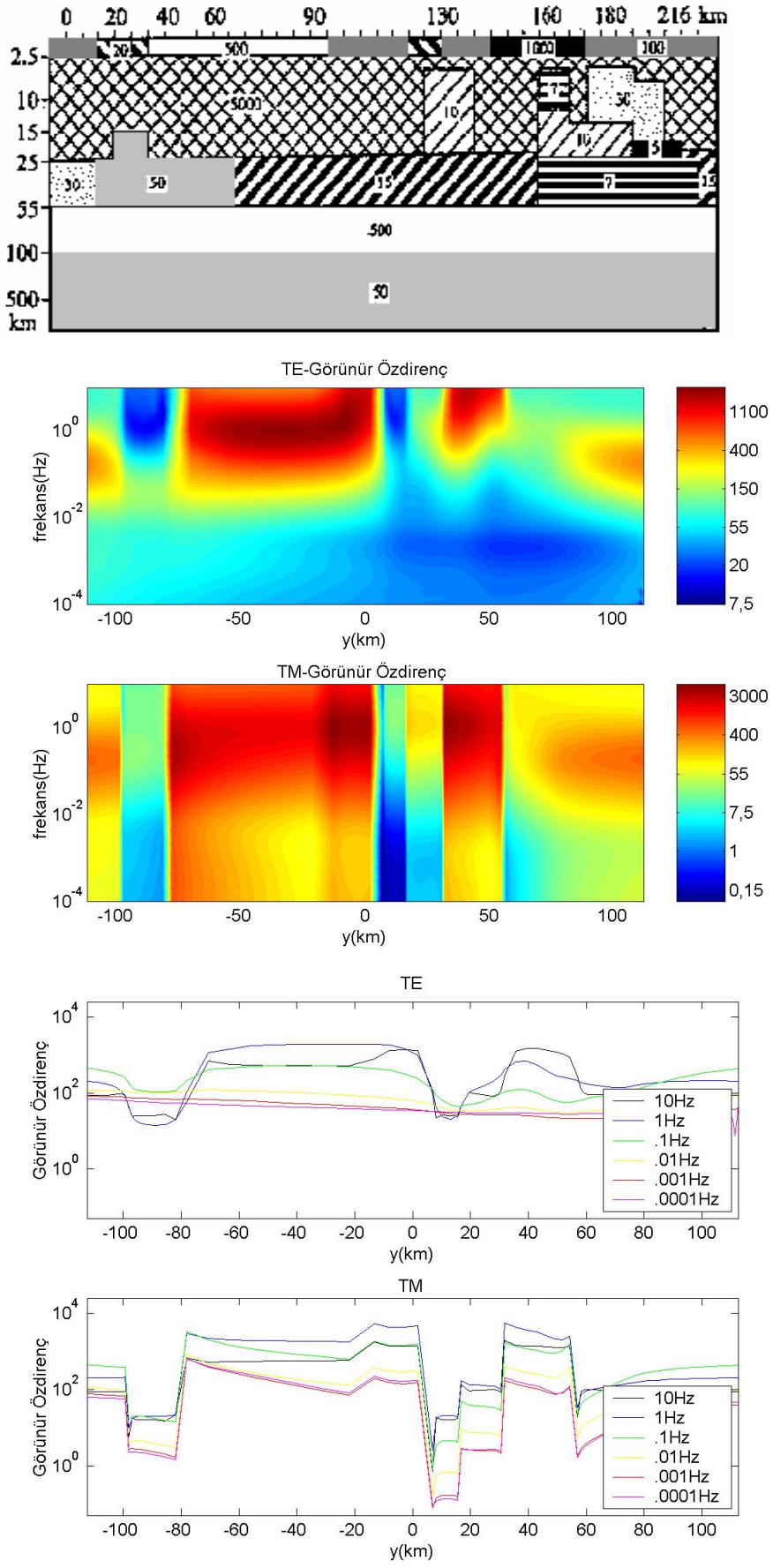
Yukarıdaki Şekil 4. 11' de izlenebileceği gibi derin dirençli yapının özdirençlerine karşı TM modu çok fazla olmamakla birlikte TE moduna göre daha duyarlıdır. TE modunda tellürik akımlar dirençli bir ortam yerine daha iletken olan dirençli yapının yukarısında yüzeylenmiş ve sanki orada bir iletken bölge varmış gibi bir sonucu ortaya çıkarmışlardır. Fakat yandaki renkli ölçeğe bakıldığı zaman aslında sonucun pek güvenilemeyecek bir sonuç olduğu görülebilir. Buradaki görünür özdirenç değerleri 99 Ωm ile 101 Ωm gibi çok küçük bir aralıkta değiştiklerinden sadece TE moduna bakarak dirençli bir yapının varlığından söz etmek olanaksız gibidir. TM modunda ise bu mod dirençli yapılara duyarlı olduğu halde modellenmek istenen yapı derinde olduğu için modeldeki bu dirençli yapıya yeteri kadar duyarlılık gösterememiştir. Burada da görünür özdirenç değerleri en çok 110 Ωm gibi bir değere ulaşabiliyor. Ancak her iki modda da bu dirençli yapı ortaya konabildiğinden dolayı burada dirençli bir yapının varlığından bahsetmek mümkün olabilir. TE ve TM modları için çizilen konturlarda koyu kırmızı bölgenin dirençli yapıya denk geldiği düşünülürse yanal ve düşey sınırlardan da söz etmek mümkün olabilir.

Şekil 4. 12' deki belli frekanslardaki görünür özdirenç değişimlerine bakılacak olursa TE modunda hiç bir anomali gözlenmediği görülmektedir. y görünür özdirenç ölçeği 90 ile 120 Ωm gibi küçük bir aralıkta logaritmik olarak değiştiği halde hiç bir dirençli yapı izi olmaması TE modunun dirençli yapılara karşı ne kadar duyarsız olduğunun kanıtı olarak sunulabilir. Derin yapılara karşı gösterdiği duyarlılık dâhi bu modelde gözlenememiştir. TM modu ise derin yapılara karşı duyarlı olmamasına rağmen yapı dirençli olduğu için az da olsa bir tepki vermiş, dirençli bir yapının var olabileceği konusunda bazı ipuçlarını sunmuştur.

Yukarıda verilen duyarlılıkla ilgili dört maddede söylenen yargılar, yukarıdaki dört ana kuramsal modelle açıklanmaya çalışılmıştır. Bu basit kuramsal modellerin dışında diğer basit kuramsal modeller ve literatürdeki çalışmalardan alınmış bazı basit ve karmaşık kuramsal modeller de EK – A' da verilen 15 modelle sunulmuştur.

4. 2. 5 Arazi Modeli

Karmaşık bir yapısı bulunan Kırgız Tien Shan Bölgesi' nde alınan manyetotellürik ölçülerden (Berdichevsky ve diğ., 1998) çıkarılan sonuçlarla hazırlanmış bir model ve TE – TM modlarında verdikleri cevaplar Şekil 4. 13' te sunulmuştur. Şekillerden de izlenebileceği gibi yapılar TE modunda çok daha net bir biçimde ortaya konabilmiştir. TM modunda ise, modeldeki sığ kesimlerin çok düzensiz bir geometriye ve özdirenç yapısına sahip olması nedeniyle bir takım bozulmalar meydana gelmiş ve net bir sonuç verememiştir.



Şekil 4. 13 Kırgız Tien Shan Bölgesi MT verileri için hazırlanan model (Berdichevsky ve diğ., 1998), iki boyutlu görünür özdirenç görüntüleri ve değişimleri.

Şekil 4. 13' te görülebileceği gibi sığ kesimlerde çok farklı özdirençlere sahip iletken ve dirençli kesimlerin bulunması, görünür özdirenç değerlerinde TE modunun iletken kesimlere olduğu kadar, dirençli kesimlerin özdirençlerine karşı da duyarlı olmasını sağlamıştır. Derin yapılara karşı duyarlı olan TE modu, ayrıca derin kesimlerdeki iletken yapıların görünür özdirençlerini de gösterebilmektedir. Ancak, Derin dirençli tabaka ve onun altında yer alan daha iletken tabaka hakkında derin dirençli tabakayı geçemediği için herhangi bir bilgi elde edilememiştir. TM modunda ise, sığ kesimlerde çok karmaşık bir geometrinin var olması nedeniyle, statik kaymadan ileri gelen bozulmalar gerçekleşmiş ve derin kesimler hakkında hiç bir bilgi elde edilememiştir. Fakat, sığ yapıların yanal sınırları TE modundan çok daha duyarlı bir şekilde belirleyebilmiştir.

Aşağıdaki tabloda ekte (Ek – A) verilen diğer basit ve karmaşık modellerin TE ve TM modlarında verdikleri cevapların duyarlılığı incelenmiştir. Bu modellerde verilen yapılar genellikle sığ yapılar olduğundan TM modu daha duyarlı gibi görülmekle birlikte statik kaymadan dolayı alt sınırları belirleyememektedir. TE modu ise özellikle sığ dirençli yapılarda duyarsız ya da kısmen duyarlı olmakta fakat yanal sınırları pek iyi belirleyememesine rağmen alt sınırları belirleyebilmektedir.

Tablo 4. 1 Ek. A' da verilen modellerdeki özdirençlere karşı TE ve TM modlarının duyarlılıkları.

MODEL NO	TE MODU	TM MODU
Model A. 1	Duyarlı	Kısmen duyarlı
Model A. 2	Kısmen duyarlı	Duyarlı
Model A. 3	Duyarlı	Kısmen duyarlı
Model A. 4	Duyarsız	Duyarlı
Model A. 5	Kısmen duyarlı	Duyarlı
Model A. 6	Kısmen duyarlı	Duyarlı
Model A. 7	Kısmen duyarlı	Duyarlı
Model A. 8	Kısmen duyarlı	Duyarlı
Model A. 9	Duyarlı	Duyarlı
Model A. 10	Duyarlı	Duyarlı
Model A. 11	Duyarlı	Duyarlı
Model A. 12	Kısmen duyarlı	Duyarlı
Model A. 13	Kısmen duyarlı	Duyarlı
Model A. 14	Kısmen duyarlı	Duyarlı
Model A. 15	Kısmen duyarlı	Duyarlı

Ek-A' da verilen modellerden kısaca bahsetmek gerekirse; ilk dört model (Model A.1, A. 2, A. 3 ve A. 4) ile verilen iç içe yapılar ile özdeş yapılardan iletken olan yapıların özdirençlerine karşı TE modu, dirençli olan yapıların özdirençlerine karşı ise TM modu daha duyarlı davranmaktadır. Orta derinliklerde yer aldıkları söylenebilecek bu modellerdeki yapıların yanal sınırlarına karşı TM modu, düşey sınırlarına karşı da TE modu daha duyarlıdır.

Model A. 5, A. 10 ve A. 13' te verilen Graben ve Horst benzeri yapıların sınırlarına ve özdirençlerine karşı TM modu TE modundan daha duyarlı davranmaktadır. Özellikle bu tip yapıların sınırlarını belirlemede TM modunun duyarlılık açısından daha üstün olduğu çok açık bir şekilde görülebilmektedir.

Model A. 6 ile verilen Fay modelinde ise TE modunda hesaplanan görünür özdirenç değerleri, gerçek özdirenç çok daha fazla yaklaşmaktadır. Buna karşılık yanal sınırlar, TM modunda çok daha keskin bir şekilde görülebilmektedir. Bu durumda düşey fay benzeri yapıların özdirençlerine karşı TE modunun, sınırlarına karşı ise TM modunun daha duyarlı olduğu söylenebilir.

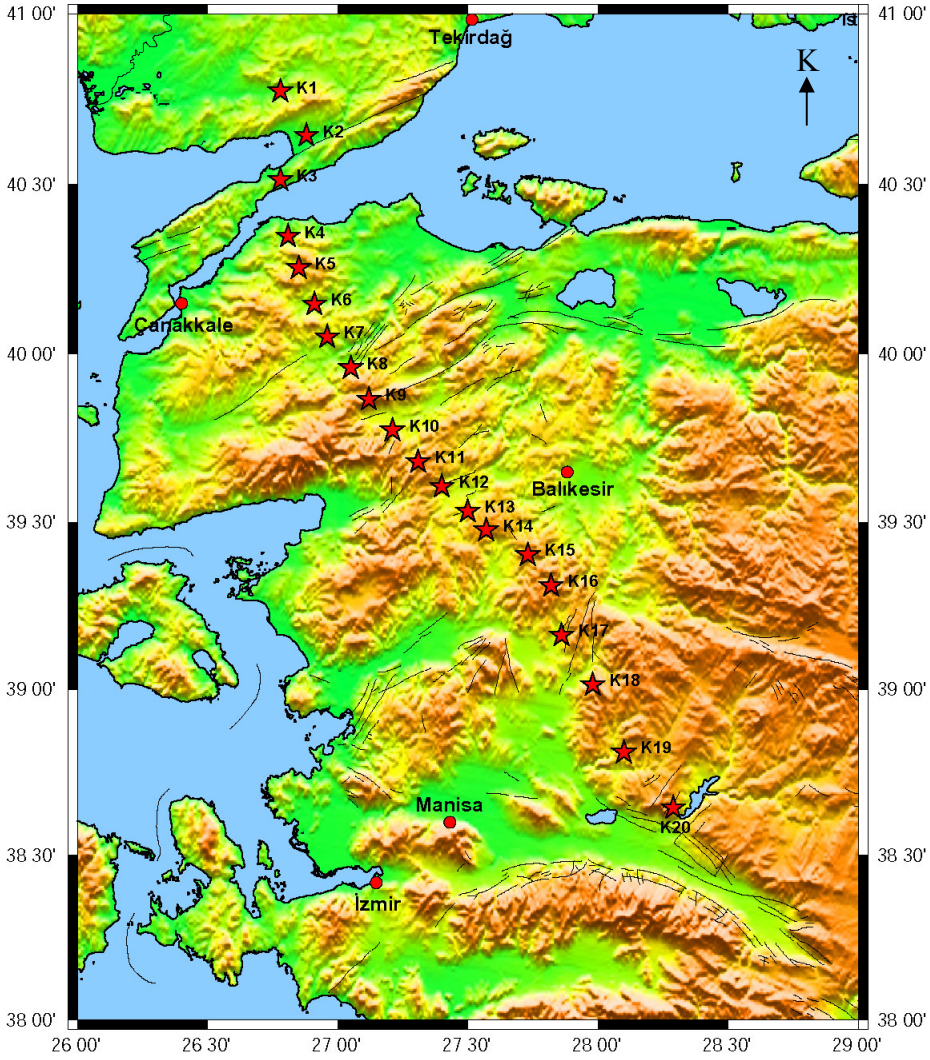
Model A. 7 ve A. 8' de verilen dayk modellerinde, özdirençlere karşı TE modu daha duyarlı sonuçlar vermiştir. Modellerde verilen özdirenç kontrastlarının çok yüksek olması TM modunda statik kaymadan dolayı bozulmalara yol açmış ve çok yüksek ya da çok düşük görünür özdirenç değerleri vermiştir. Buna karşılık daykların sınırları TM modunda yine daha bir şekilde belirlenebilmektedir.

Model A. 11' de verilen iletken Hidrotermal Alterasyon Zonu modelinde TE modu hem özdirençlere, hem de sınırlara karşı oldukça duyarlı sonuçlar vermiştir. Yine bu modele benzer, dirençli Dağ Kökü modelinde (Model A. 12) ise TM modu özdirençler ve sınırlar karşı daha duyarlı sonuçlar vermiştir.

Model A. 9, A. 14 ve A. 15' te verilen karmaşık geometrilere sahip modellerde ise TE modunun daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Özellikle derin kesimlerin özdirençlerini ve sınırlarını belirlemede TE modu oldukça başarılıdır. Buna karşılık TM modu düzensiz yapılardan çok fazla etkilenerek bozulmuş görüntüler ortaya çıkartmaktadır, fakat sığ kesimlerdeki yapıların sınırlarını ortaya çıkartmak konusunda yine duyarlı sonuçlar verebilmektedir.

5. KEŞAN – SALİHLİ MANYETOTELLÜRİK PROFİLİNİN İKİ BOYUTLU DÜZ ÇÖZÜM İLE MODELLENMESİ

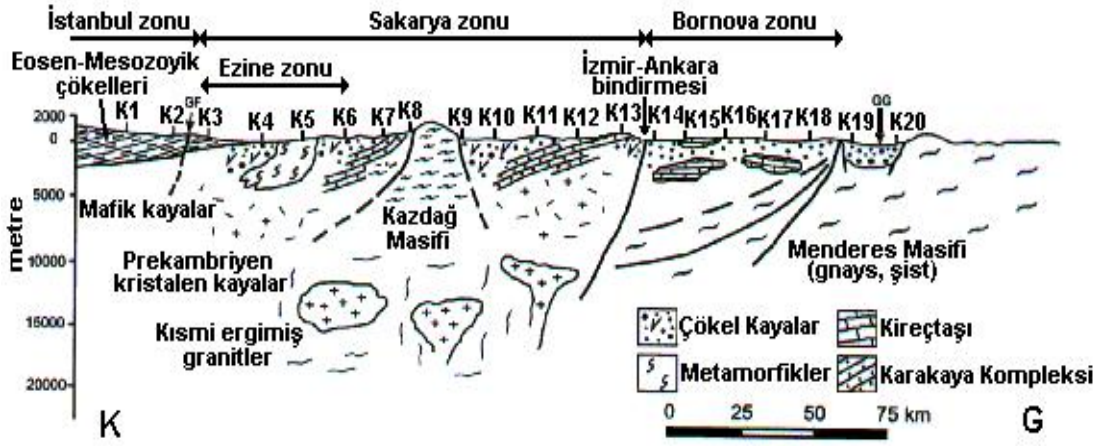
Bu bölümde Kuzey Batı Anadolu yerkabuğu elektrik yapısının ortaya konmasına yönelik olarak Keşan – Salihli (KS) arasında ölçülmüş bir manyetotellürik profil (Çağlar, 2001) verilerinin iki boyutlu modellenmesi amaçlanmıştır. Söz konusu profil üzerinde yer alan ölçüm noktalarının konumları, bölgenin rölyef haritası üzerine kırmızı yıldızlar yerleştirilerek, Şekil 5. 1' de verilmiştir.



Şekil 5. 1 Keşan – Salihli (KS) profilinin alındığı Batı Anadolu Bölgesi'nin rölyef haritası.

5. 1 Ölçü Alınan Bölgenin Jeolojisi

Ege Bölgesi' ndeki başlıca jeolojik unsurlar; metamorfik topluluklar, Neojen havza çökelleri, magmatik topluluklar, graben havzaları ve Ege denizel ortamı olarak sıralanabilir. Şekil 5. 1' de içi kırmızı yıldızlarla gösterilen manyetotellürik ölçüm noktalarından oluşan Keşan – Salihli (KS) profilinin kestiği tektonik birlikler ise kuzeybatıdan güneydoğuya doğru sırası ile İstanbul zonu, Ezine zonu, Sakarya zonu, Bornova zonu ve Menderes Masifi' nin içinde yer alan Gediz Grabeni' dir. Bu tektonik birliklerin profil boyunca düşey jeolojik kesiti de Şekil 5. 2' de gösterilmiştir (Çağlar, 2001).



Şekil 5. 2 Keşan – Salihli (KS) profili boyunca düşey jeolojik kesit ve manyetotellürik ölçüm noktaları (Çağlar 2001' den değiştirilerek alınmıştır).

5. 1. 1 İstanbul Zonu

İstanbul zonu güneyde Intra-Pontid bindirmesi ile Sakarya zonundan ayrılmaktadır. Bu zonda, Prekambriyen, kristalli bir alt katmanın hemen üzerinde yaşları Eosen' den Miyosen' e kadar uzanan iyi gelişmiş transgresif çökeller bulunmaktadır. Bu çökellerin kalınlığı yaklaşık olarak 3 km' ye kadar uzanmaktadır.

5. 1. 2 Ezine Zonu

Ezine zonu, Sakarya zonunun kuzeybatı kesimini oluşturan bir zondur. Büyük bir kesimi kıtasal kökenli kayaçlardan oluşur. Ezine zonu kuzeydoğu güneybatı yönünde başlıca üç birimden oluşmuştur. Bunlar; Karadağ Birimi, Denizgören Ofiyoliti ve Çamlıca Mikaşistleri' dir.

Geç Paleozoyik – Triyas yaşta hafif metamorfik epikontinental çökel istif Karadağ Birimi olarak isimlendirilir. Denizgören Ofiyoliti ise kısmen serpantinleşmiş olan birimlerden oluşmuştur. Ezine kuzeyinde ve Karabiga batısında, geniş alanlarda yüzeylenen metasedimanter kayalar ise Çamlıca Metamorfitleri olarak isimlendirilir.

5. 1. 3 Sakarya Zonu

Sakarya zonu Geç Mesozoyik' te oluşmuş, kuzeyde Intra-Pontid bindirmesi ile İstanbul zonundan, güneyde ise İzmir-Ankara Ofiyolitik bindirmesi ile Bornova fliş zonundan ayrılmaktadır. Sakarya zonu, Kazdağ Grubu metamorfitlerinden, tektonik olarak bu metamorfitleri üzerleyen Karakaya Kompleksi birimlerinden ve Triyas sonrası çökellerden oluşur.

5. 1. 3. 1 Kazdağ Grubu

Kazdağ' ın çekirdeğini oluşturan gnays, amfibolit ve mermer Kazdağ Grubu olarak adlandırılır. Kazdağ grubu 50 km uzunlukta güneybatı kuzeydoğu yönelimli çok sayıda muhtemelen Geç Tersiyer yaşta granodiyoritlerce kesilmiş kompleks bir antiklinoryum oluşturur. Kazdağ Grubu doğuda Karakaya Kompleksi' nin metatüfleri (Nilüfer Birimi) ve arkozik kumtaşları (Hodul Birimi) tarafından, batıda ve kuzeyde ise Geç Kretase yaşta Çetmi Ofiyolit Melanjı tarafından tektonik olarak örtülür (Okay ve diğ., 1991).

5. 1. 3. 2 Karakaya Kompleksi

Jura öncesi bu orojenik kompleks Permo-Karbonifer kireçtaşı blokları kapsayan bazalt, çamurtaşı, radyolarit, feldispatik kumtaşı, kuvarsit, konglomera ve silttaşı içermekte olup, uyumsuzlukla Kazdağ Grubu gnaysları üzerinde yer alır. Kapsadığı Üst Permiyen kireçtaşı blokları ve üzerine uyumsuzlukla geldiği ileri sürülen Orta Triyas kireçtaşları yüzünden bu formasyon için Erken Triyas yaşı öngörülmüştür (Okay ve diğ., 1991).

5. 1. 4 Bornova Zonu

Bornova Fliş zonu, kireçtaşları ile volkanik ve şist bloklarının kalın klastik izlerinden oluşur. Fliş çökelleri, Mesozoyik karbonat platformlarından oluşan kireçtaşı bloklarının üzerlerini örterler. Neojen birimleri ise İzmir - Ankara bindirmesini çevreleyerek Sakarya ve Bornova zonları arasında sınır oluştururlar. Bu çökellerin kalınlığı 5 km' ye kadar ulaşır, fakat güneyde 3,5 – 4 km' yi geçmez.

5. 1. 5 Menderes Masifi ve Gediz Grabeni

Batı Anadolu' nun diğer bir ana tektonik birimi ise Menderes Masifi' dir. Menderes Masifi uzun ekseni kuzeydoğu doğrultusunda yaklaşık 300 km uzanan elips biçimli bir metamorfik topluluktur. Bu masifi kuzeyden İzmir – Ankara Ofiyolitik bindirmesi kuşatır. Menderes Masifi' nde iki stratigrafik düzey ayırt edilmektedir. Bunlar ileri derecede metamorfik gözlü gnays, migmatit, amfibolit ve çeşitli şistlerdir.

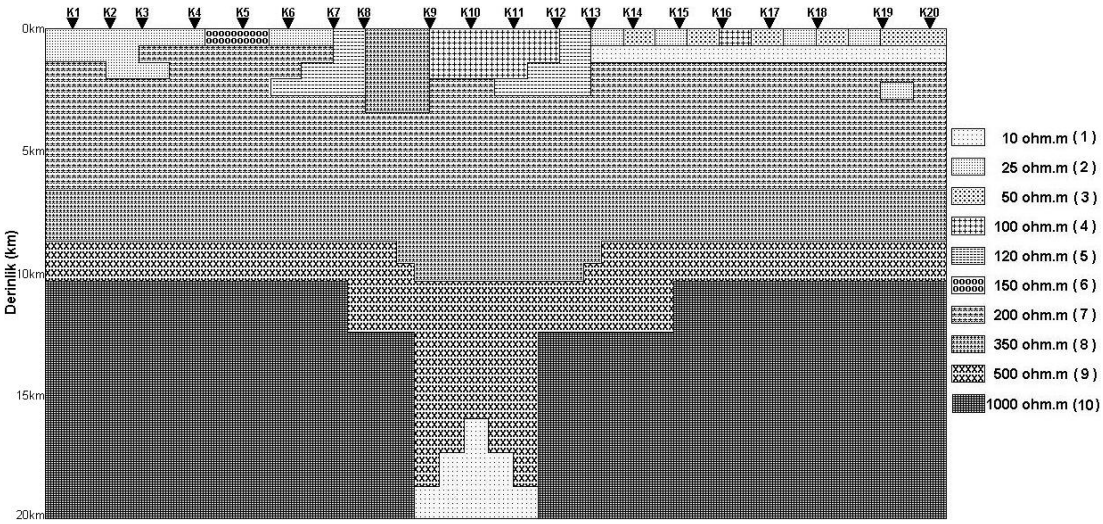
Gediz Grabeni ise doğu – batı doğrultulu boyu 140 km, eni 10 –15 km olan " V " şekilli bir grabendir. İçindeki çökel dolgusu grabenin uzunluğu boyunca bazı belirgin değişiklikler göstermektedir (Seyitoğlu ve Scott, 1991). Grabende yer alan çökellerin kalınlığı 1 km ile 2,5 km arasında değişir. Çökellerin kalın olduğu kesimler kuzeydoğu güneybatı doğrultulu grabenler ile Gediz Grabeni' nin birbirleri ile üstelendiği yerlerdir. Salihli' nin kuzeyi de bu yörelerdendir.

Menderes Masifi' nin üzerinde yer alan ve açılan bu graben havzasının kırılgan deformasyona uğramış tavan bloğunda Erken Miyosen' den günümüze kadar gelen yaşlarda klastik kayaların egemen olduğu 2,5 km kalınlığında çökel bir istif vardır.

5. 2 Keşan – Salihli Manyetotellürik Profilinin İki Boyutlu Modellemesi

Keşan – Salihli (KS) arasındaki yaklaşık 300 km' lik manyetotellürik profil, önceki bölümlerde yapılan çalışmalara benzer bir uygulama kullanılarak iki boyutlu düz çözüm yöntemi ile modellenmiştir. Yirmi noktada ölçüm alınan Keşan - Salihli profilinden elde edilen sonuçların TE ve TM modlarındaki duyarlılıkları irdelemek amacı ile oluşturan model, Şekil 5. 2' de verilen düşey jeolojik kesitteki bulgular ile iki boyutlu manyetotellürik ters çözüm sonuçlarından (Çağlar, 2001) yararlanılarak hazırlanmıştır. Bu veriler ışığında oluşturan yerelektrik modeli ise Şekil 5. 3' te gösterilmektedir.

Aşağıda verilen Şekil 5. 3' te 10 Ωm ile gösterilen 1 numaralı blok derin iletken olan kısmi ergimiş granitleri temsil etmektedir. 25 Ωm ile verilen 2 numaralı blok ise İstanbul Zonu' nda yer alan Eosen – Mesozoyik çökelleri ile Bornova Fliş Zonu' nda yer yer bulunan çökelleri temsil etmektedir. 50 Ωm ve 100 Ωm ile verilen 3 ve 4 numaralı bloklar ise çökeller arasında kalan ve çökellere nazaran daha dirençli olan kireçtaşlı bölgeleri temsil etmesi amacıyla, 120 Ωm' lik 5 numaralı blok ise Karakaya Kompleksi' ni temsil etmesi amacı ile bu iki boyutlu modelleme çalışmasında kullanılmışlardır. Bunların dışında, 150 Ωm ile ifade edilen 6 numaralı blok Ezine Zonu' nun metamorfik kayaçlarını temsil ederken, 350 Ωm ile verilen 8 numaralı blok ise profil boyunca olan bölgelere göre göreceli olarak daha dirençli olan Kazdağ Masifi' ni temsil etmektedir. Ayrıca derin dirençli bölgeleri temsil eden 10 numaralı 1000 Ωm' lik blok ile de Prekambriyen Kristalen Kayalar ile Mafik Kayalar modellemek istenmiştir. Şekil 5. 3' te verilen modelde kullanılan 7 numaralı ve 9 numaralı orta derecede özdirençlere sahip bloklarla ise sadece derinlere indikçe artan bir özdirenç yapısını ortaya koyan bir yerelektrik yapısını ifade etmek amaçlanmıştır.



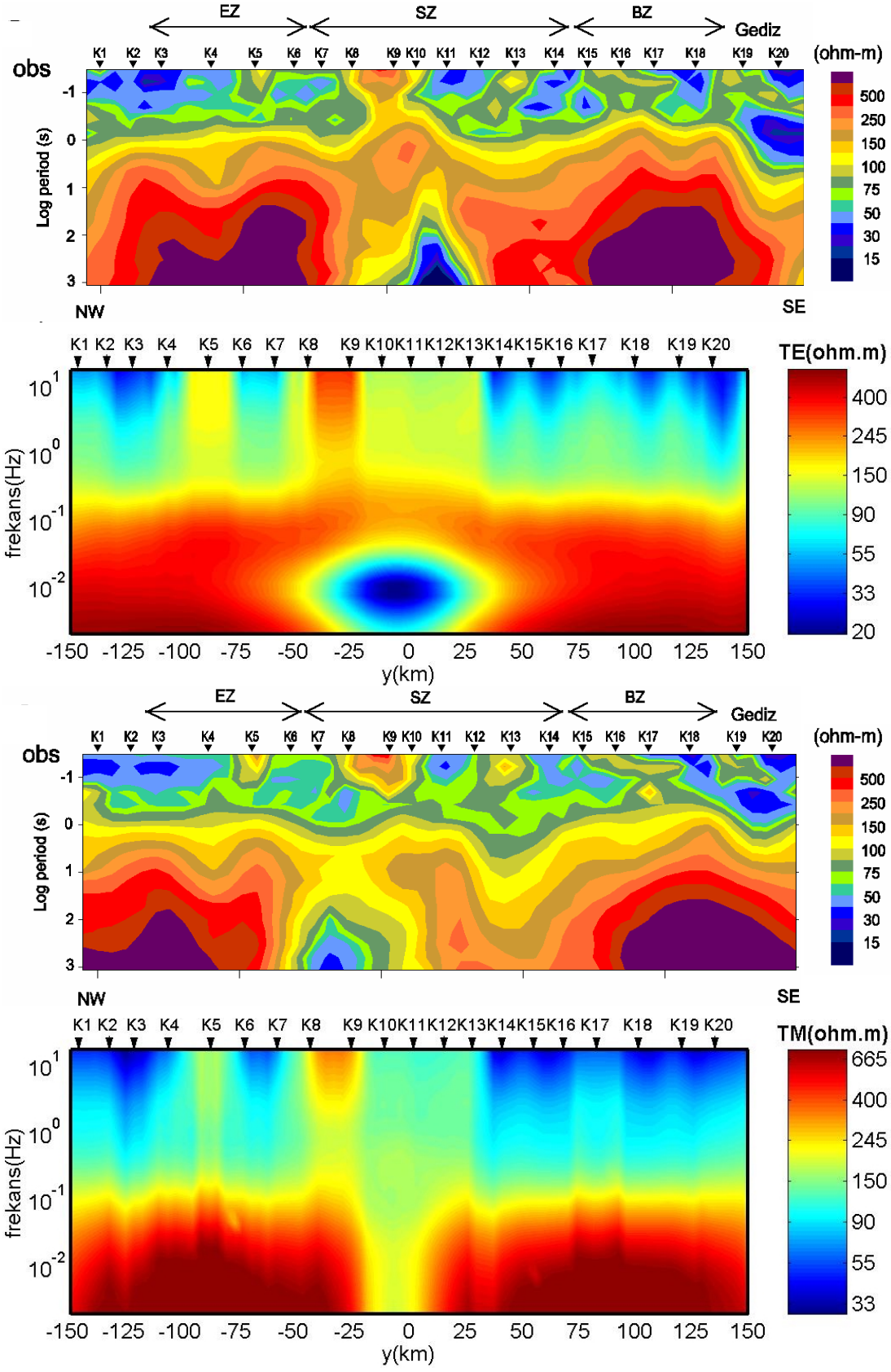
Şekil 5. 3 Keşan – Salihli manyetotellürik profilinin iki boyutlu düz çözümü için oluşturulan yerelektrik modeli.

Şekil 5. 3' te verilen model, ölçüm alınan 21 frekans (19,6 – 0,002 Hz) için ayrı ayrı TE ve TM modlarında iki boyutlu düz çözüm algoritması kullanılarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalardan elde edilen sonuçlar ise Keşan – Salihli arasında gözlenen arazi verileri ile karşılaştırılmıştır.

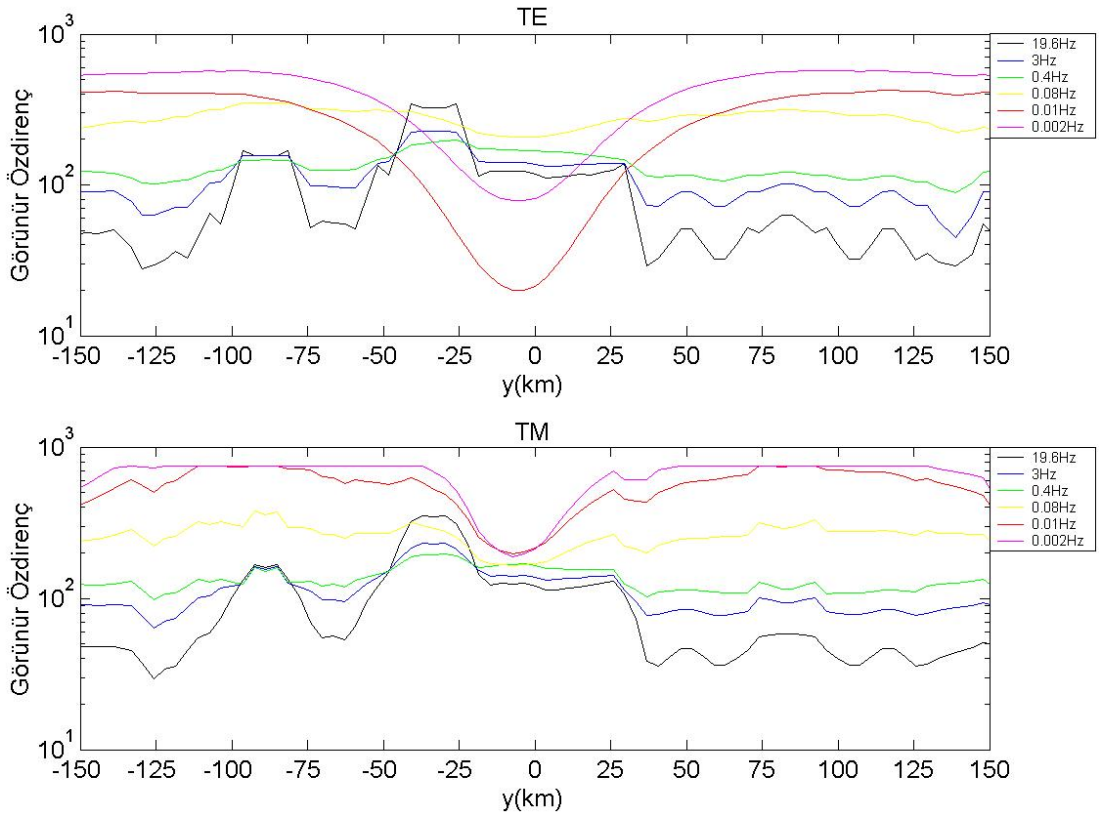
TE modu için gözlenen arazi verisi Şekil 5. 4a' da, iki boyutlu düz çözüm algoritması ile üretilen yapay TE modu verisi ise Şekil 5. 4b' de verilmiştir. TM modu için gözlenen görünür özdirençler Şekil 5. 4c' de, iki boyutlu düz çözüm yöntemi ile elde edilen görünür özdirençler ise Şekil 5. 4d' de verilmiştir.

Burada ham veriler ile hesaplanan modelin sonuçları arasında bire bir benzerlik yoktur. Jeofizik problemlerde düz çözüm sonuçları ile arazi verisinin tam bir benzerlik göstermesi de zaten beklenemez. Bunun nedeni yeraltında bulunabilecek pek çok farklı özellikteki yapıların aynı ya da benzer anomaliler gösterebileceği gerçeğidir (eşdeğerlilik problemi). Fakat bu çalışmada elde edilen sonuçlar arazi verisine tam olarak uymamasına rağmen modelde verilen sığ veya derin dirençli ve iletken kütleleri oldukça iyi bir biçimde yansıtmaktadır.

TM modunda oluşan sığ bozucu etkiler de (statik kayma nedeniyle oluşabilecek etkiler) çevrenin özdirenç yapısı dikkate alınarak giderildikten sonra her iki mod sonuçlarının da sığ yapılar için iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Özellikle derin iletken yapının TE modunda oldukça iyi bir biçimde çözümlendiği, TM modunda da varlığının kanıtlandığı anlaşılmaktadır. Elde edilen bu sonuçlar her iki moddaki belirli frekanslardan alınan kesitler ile desteklenmiştir (Şekil 5. 5).



Şekil 5. 4 **a)** KS profili için gözlenen TE modu manyetotellürik verisi **b)** KS profili için hesaplanan TE modu görünür özdirençleri **c)** KS profili için gözlenen TM modu manyetotellürik verisi **d)** KS profili için hesaplanan TM modu görünür özdirençleri (EZ : Ezine Zonu, SZ : Sakarya Zonu, BZ : Bornova Zonu).



Şekil 5. 5 Keşan – Salihli profili sonuçlarından belirli frekanslarda alınan TE ve TM modları görünür özdirenç eğrileri.

Yukarıda verilen son iki şekle toplu halde bakılarak yapılan yorumlardan elde edilen sonuçlar da aşağıdaki gibi ifade edilebilirler:

Şekillerden de anlaşılabileceği gibi düşük frekanslardaki (< 0.1 Hz) kısmi ergimiş granitleri temsil eden 1 numaralı blokla verilen derin iletken zon modeli her iki mod sonuçlarında da yerini belli etmektedir. Fakat yapı derin ve iletken olduğundan dolayı görünür özdirençler TE modunda çok daha yüksek bir duyarlılıkla (≈20 Ωm) belirlenebilmişken (Şekil 5. 4b), Şekil 5. 4d' de görülen TM modunda ise sadece çevresine oranla daha iletken (≈150 Ωm) bir bölge olarak göze çarpmaktadır. Yapının yanal sınırlarına karşı duyarlı olan mod ise TM modudur.

Yine düşük frekanslarda görülen, 1000 Ωm' lik Şekil 5. 3' teki 10 numaralı blok ile modellenen derin dirençli kayaç ortamını temsil eden yapı TM modunda çok iyi bir duyarlılıkla (≈750 Ωm) hesaplanırken, TE modunda TM moduna göre daha az bir duyarlılıkla (≈600 Ωm) hesaplanmıştır. Fakat sonuç olarak, Prekambriyen Kristalen Kayalar ile Mafik Kayaları temsil eden bu derin dirençli bölgeler her iki modda da çok açık bir biçimde ortaya konabilmiştir.

Yüksek frekanslara bakıldığı zaman ise, 2 numaralı blok ile verilen İstanbul Zonu çökelleri K1 – K4 istasyonları arasında fark edilir biçimde görülmektedir. Her iki mod

da burada yaralan çökellerin özdirençlerine karşı yüksek duyarlılık göstermiştir. Çökellerin iletken olması TE modunun, sığ olması ise TM modunun duyarlı olmasında rol oynayan faktörlerdir.

Şekil 5. 3' te 6 numaralı blok ile temsil edilen K5 manyetotellürik ölçüm noktası altında yer alan Ezine Zonu' nun metamorfiklerinin iki boyutlu düz çözüm sonuçları da TE modu için Şekil 5. 4b, TM modu için ise Şekil 5. 4d' de verilmiştir. 150 Ωm ile verilen model bloğun hesaplanan sonuçları her iki modda da görünür özdirenç değerini 150 Ωm olarak bulunabilmiştir.TM modunda, özdirenç kontrastı düşük olduğundan dolayı birbirine yakın görünür özdirenç değerleri ile TE moduna göre, beklenilenin tersine, görünür özdirençlere görüntü olarak daha az bir duyarlılık göstermiş gibi gözükmektedir.

K7 – K8 ve K10 – K13 istasyonları arasında kalan ve Karakaya Kompleksi' ni temsil etmesi amacıyla Şekil 5. 3' teki modele konulan 120 Ωm' lik 5 numaralı bloğun, TE ve TM modlarındaki görünür özdirenç görüntüleri de her iki mod için hemen hemen aynıdır. Aralarında kalan dirençli Kazdağ Masifi' ne oranla daha iletken, çevrelerindeki iletken çökellere nazaran ise daha dirençli bir bölge olarak görüntülenebilmiştir.

8 numaralı 350 Ωm'lik model bloğuyla temsil edilen Kazdağ Masifi' nin hesaplanan sonuçları da her iki mod için de aynıdır. Şekil 5. 2' de K8 – K9 ölçüm istasyonlarının arasında verilen masifin iki boyutlu modelleme ile hesaplanan görünür özdirençleri de Şekil 5. 4b' de ve Şekil 5. 4d' de TE ve TM modları için yaklaşık olarak 350 Ωm olarak bulunabilmiştir. Sığ ve dirençli bir yapı olarak Şekil 5. 3' te modellenen yapının TM modunda iyi bir şekilde görülmesi oldukça normal bir sonuçken, beklenenin tersine TE modunda da oldukça duyarlı bir şekilde hesaplanabilmiştir. Bunun nedeni yapının hemen etrafında ve altında kendine oranla daha iletken bölgelerin olmasıdır.

K14 – K19 manyetotellürik ölçüleri arasında kalan ve Şekil 5. 3' te çeşitli elektriksel özelliklerdeki bloklar ile modellenen Bornova Fliş Zonu' nun çökelleri ve bu çökeller arasında bulunan yer yer kireçtaşı blokları çok belirgin olmamakla birlikte, Şekil 5. 4b ve Şekil 5. 4d' de azda olsa görülebilmektedir. Özellikle, TM modunda modelin bu kadar karmaşık bir geometriye sahip olması belki de statik kaymaya neden olmuş ve sonuçta oluşan görüntüyü bozmuştur (Hermance, 1982). Statik kaymanın neden olduğu bu türde bozulmalar, düşük frekanslarda görülen derin dirençli kütlenin görünümünde bile fark edilebilmektedir (Şekil 5. 4d).

Şekil 5. 3' te 25 Ωm' lik 2 numaralı model blok ile temsil edilen Gediz Grabeni' nin çökelleri ise sığ olduklarından dolayı TM modunda, iletken olduklarından dolayı ise TE modunda oldukça yüksek bir duyarlılık ile hesaplanıp gösterilebilmişlerdir. (Şekil 5. 4b ve Şekil 5. 4d)

Genel bir bakış açısıyla bakıldığı zaman ise Şekil 5. 4b ile Şekil 5. 4d arasında bazı küçük farklar vardır. Şekillerin yanlarındaki görünür özdirenç renk ölçekleri TE modu için 20 Ωm – 400 Ωm arasında değişirken, TM modu için 33 Ωm - 665 Ωm arasında değişmektedir. Dolayısıyla şekillerdeki aynı renkler, eşit görünür özdirenç değerlerini göstermemektedir. TE ve TM modunda renk ölçeği ile verilen görünür özdirenç değerlerinden en genel haliyle söylenebileceği gibi, 20 Ωm' ye kadar inen TE modu görünür özdirenç değeri iletken yapıların özdirencine karşı, 750 Ωm' lere kadar çıkan TM modu görünür özdirenç değeri ise dirençli yapıların özdirencine karşı olan duyarlılıkları en basit haliyle kanıtlamaktadır.

Bunların dışında, sığ kesimlerde iletken ve dirençli yapıların karmaşık bir geometri ile yan yana sıralanmaları hem TM modunun hem de TE modunun yanal sınırlara karşı olan duyarlılığının artıran bir etken olmuştur. Şekil 5. 4b ile Şekil 5. 4d' de de görülebileceği gibi hem iletken yapıların hem de dirençli sığ yapıların yanal sınırları oldukça yüksek bir duyarlılıkla belirlenebilmiştir.

Derin yapılara bakılacak olunursa da derin iletken kütle olarak karşımıza çıkan kısmi ergimiş granitlerin yanal sınırları TM modunda, düşey sınırları ise TE modunda duyarlı bir şekilde belirlenebilmiştir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Jeolojik yapıların modellenmesinde fiziksel parametreler ile belirlenen modelin tepkisi olarak bilinen düz çözüm tekniği iki boyutlu manyetotellürik yöntem için uygulanmış ve bu yöntemdeki TE ve TM modlarının farklı fiziksel ve elektriksel özelliklerdeki yapılara karşı olan duyarlılığı, sentetik modeller ve arazi modelleri oluşturularak incelenmeye çalışılmıştır.

Daha önceki bölümlerde de söylenildiği gibi (4. ve 5. Bölümler) TE modu iletken yapıların ve derin yapıların özdirençlerine karşı daha duyarlı, TM modu ise dirençli yapılar ile sığ kesimlerdeki yapıların özdirençlerine karşı daha duyarlıdır (Berdichevsky ve diğ., 1998). Bu duyarlılıklar da aşağıda Tablo 6. 1' de açık bir şekilde gösterilmiştir.

Tablo 6. 1 TE ve TM modlarının farklı özellikteki yapılara karşı olan duyarlılığı.

ÖZELLİK / MOD	TE	TM
İletken	Duyarlı	Duyarsız
Dirençli	Duyarsız	Duyarlı
Sığ	Duyarsız	Duyarlı
Derin	Duyarlı	Duyarsız

Yukarıda Tablo 6. 1' de verilen duyarlılıklar TE ve TM modlarının tek bir fiziksel ya da elektriksel özellikteki yapılara karşı olan duyarlılığını yansıtmaktır. Oysa doğada bu özellikler birlikte bulunurlar. Bu durumda iki boyutlu manyetotellürik yöntemde modlar için duyarlılık analizi yapılırken, her iki durumunda göz önüne alınması gerekir, çünkü TE ve TM modlarının duyarlı oldukları bu fiziksel ve elektriksel özelliklerinden her ikisinin de var olması durumunda daha duyarlı, birinin var olması durumunda kısmen duyarlı, hiçbirisinin olmaması durumunda ise duyarsız oldukları görülmektedir. Yukarıda açıklanan duyarlılıklar daha açık bir şekilde aşağıda verilen Tablo 6. 2' deki gibi ifade edilebilirler.

Tablo 6. 2 Fiziksel ve elektriksel özelliklerin bir arada bulunması durumunda TE ve TM modlarının duyarlılığı.

YAPI / MOD	TE	TM
Sığ İletken	Kısmen Duyarlı	Kısmen Duyarlı
Sığ Dirençli	Duyarsız	Duyarlı
Derin İletken	Duyarlı	Duyarsız
Derin Dirençli	Kısmen Duyarlı	Kısmen Duyarlı

Bunların dışında TE ve TM modlarındaki anomalilerin doğalarından kaynaklanan farklılıklar mevcuttur. Dolayısıyla, bu modların yanal ve düşey sınırlara karşı olan duyarlılıkları da değişiklikler göstermektedir. TE modu boyuna (longitudinal) eğriler yaratır. Anomalileri modellenecek yapının indüktif doğasında kaynaklanan TE modunda tellürik akımlar yapıyı yüklemeyip, yapının etrafında akarlar (Berdichevsky ve diğ., 1998). Bu nedenle bu moddaki yanal sınırlar olduklarından daha geniş görülürken, düşey sınırlar tellürik akımlar yapının üstünden ve altından aktığı için çok iyi bir şekilde belirlenebilirler. TM modu ise enine (transverse) eğriler yaratır. Anomaliler yapının galvanik doğasından kaynaklanır ve tellürik akımlar yapıyı yükleyerek yapının içinden akarlar (Berdichevsky ve diğ., 1998). Bu nedenden dolayı TM modunda modellenen yapının yanal sınırları TE moduna göre çok daha iyi bir şekilde belirlenebilmektedir (Ledo ve diğ., 2002).

Bütün bu sonuçlar ışığında, gerçek arazi verisi üzerinde şüphelenilen fakat kesin bir yargıya varılamayan yapıların olması durumunda, yukarıda verilen kriterler göz önüne alınarak bir yoruma gidilmesi çok daha sağlıklı sonuçları ortaya çıkaracaktır. Ayrıca doğrusal olmayan jeofizik problemlerin ters çözümünde başlangıç modelinin çok önemli olduğu da bir gerçektir. Başlangıç modeli tüm sonuçları etkileyebilecek bir kriterdir. Bu çalışma içerisinde verilen sonuçlar ışığında oluşturulacak başlangıç modeli ile ters çözümden daha sağlıklı sonuçlar almak mümkün olacaktır.

KAYNAKLAR

Ádám, A. and Verő, J., 1990. Application of the telluric and magnetotelluric methods in selection of sites for nuclear plants. *Proc. Indian Acad. Sci. (Earth Planet. Sci.)*, **99**, 657 – 667.

Bedrosian, P.A., Unsworth, M.J. and 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. and Dmitriev, V. I., 1976. Basic principles of interpretation of magnetotelluric curves in geoelectric and geothermal studies, *Ed: Adam, A. Budapest, Akademai Kiado*, 165 – 221.

Berdichevsky, M. N., Dmitriev, V. I. and Pozdnjakova E. E., 1998. On two-dimensional interpretation of magnetotelluric soundings. *Geophys. J. Int.,* **133**, 585 – 606.

Cagniard, L., 1953. Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting. *Geophysics*, **18,** 605 – 635.

Candansayar, M. E., 1997. Doğru akım özdirenç yönteminde modelleme ve iki boyutlu sığ yapıların aranmasında elektrod dizilimlerinin ayrımlılıklarının karşılaştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, A.Ü., Ankara.

Chen, L., Booker, J. R., Jones, A. G., Wu, N., Unsworth, M. J., Wenbo, W. and Tan, H., 1996. Electrically conductive crust in southern Tibet from INDEPTH magnetotelluric surveying. *Science*, **274**, 1694.

Coggon, J. H., 1971. Electromagnetic and electrical modeling by the finite element method. *Geophysics*, **36**, 132 – 155.

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.

d'Erceville, I. and Kunetz, G., 1962. The effect of a fault on the earth's natural electromagnetic field. *Geophysics*, **37**, 651 – 665.

Galanopoulos, D., Lagios, E., Dawes, G. J. K. and Hobbs, B. A., 1998. Geoelectric structure of Sousaki geothermal area (Greece) deduced from two dimensional magnetotelluric studies. *Journal of the Balkan Geophysical Society,* **1**, 4, 60 – 74.

Geyer, R. G., 1972. The effect of dipping contact on the behaviour of the electromagnetic field. *Geophysics*, **37**, 337 – 350.

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.

Hermance, J. F., 1982. The asymptotic response of three-dimensional basin offsets to magnetotelluric fields at long periods: The effect of current-channeling. *Geophysics*, **47**, 1562 – 1573.

Jones, F. W. and Price, A. T., 1970. The perturbations of alternating geomagnetic fields by conductivity anomalies. *Geophys. J. R. astr. Soc*., **20**, 317 – 334.

Jones, F. W. and Pascoe, L. J., 1971. A general computer program to determine the perturbations of alternating electric currents in a two-dimensional model of a region of uniform conductivity with an embedded inhomogeneity. *Geophys. J. R. astr. Soc*., **24**, 3 – 30.

Kaufman, A. A., 1992. Geophysical field theory and method, Part A: Gravitational, electric and magnetic fields. Academic Press

Keller, G. V. and Frischknecht, F. F., 1977. Electrical methods in geophysical prospecting. Pergamon Press, Oxford.

Ledo, J., Queralt, P., Marti, A. and Jones, A. G., 2002. Two – dimensional interpretation of three – dimensional magnetotelluric data: an example of limitations and resolutions. *Geophys. J. Int.*, **150**, 1, 127 – 139.

Meju, M. A., 1996. Joint inversion of TEM and distorted MT soundings: Some effective practical considerations. *Geophysics*, **61**, 56 – 65.

Okay, A. İ., Siyako, M. and Bürkan, K. A., 1991. Geology and tectonic evaluation of Biga Peninsula, northwest Turkey. *Bull. Tech. Univ.*, **44**, 191 – 256.

Rankin, D., 1962. The magneto telluric effect on a dike. Geophysics, 27, 666 – 676.

Rijo, L., 1977. Modeling of electric and electromagnetic data. *PhD Thesis*, U. of Utah.

Sasaki, Y., 1989. Two-dimensional joint inversion of magnetotelluric and dipole-dipole resistivity data. *Geophysics*, **36**, 38 – 52.

Seyitoğlu, G. and Scott, B. C., 1991. Late Cenozoic crustal extension and basin formation in west Turkey. *Geol. Mag.*, **128**, 155 – 166.

Sheriff, R. E., 1997. Encyclopedic dictionary of exploration geophysics. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa.

Steiner, T., 1988. Solving systems of linear equations in numerical electromagnetic modelling. *Magyar Geofizika,* **30**, 1 – 8.

Stodt, J. A., 1978. Documentation of a finite element program for solution of geophysical problems governed by the inhomogeneous 2-D scalar Helmholtz equation, *NSF Program Listing and Documentation,* University of Utah.

Strangway, D. W. and Koziar, A., 1979. Audio frequency magnetotelluric sounding –a case history of the Cavendish geophysical test range. *Geophysics*, **44**, 1429 – 1446.

Swift, C. M. Jr., 1971. Theoretical magnetotelluric and TURAM response from two-dimensional inhomogeneities. *Geophysics*, **36**, 38 – 52.

Tarlowski, C. Z., Raiche, A. P. and Nabighan M., 1984. The use of summary representation of electromagnetic modelling. *Geophysics*, **49**, 1506 – 1516.

Unsworth, M. J., Travis, B. J. and Chave, A. D., 1999. Electromagnetic induction by a finite electric dipole source over a 2-D earth. *Geophysics*, **58**, 198 – 214.

Unsworth, M. J., Bedrosian, P., Eisel, M., Egbert G. and Siripunvaraporn, W., 2000. Along strike variations in the electrical structure of the San Andreas Fault at Parkfield, California. *Geophysical Research Letters*, **27**, 3021 – 3024.

Wannamaker, P. E., Stodt, J. A. and Rijo, L., 1985. PW2D – finite element program for solution of magnetotelluric responses of two – dimensional earth resistivity structure: Program documentation, University of Utah Research Institute Report ESL – 158.

Wannamaker, P. E., Stodt, J. A. and Rijo, L., 1987. A stable finite element solution for two-dimensional magnetotelluric modeling. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **88**, 277 – 296.

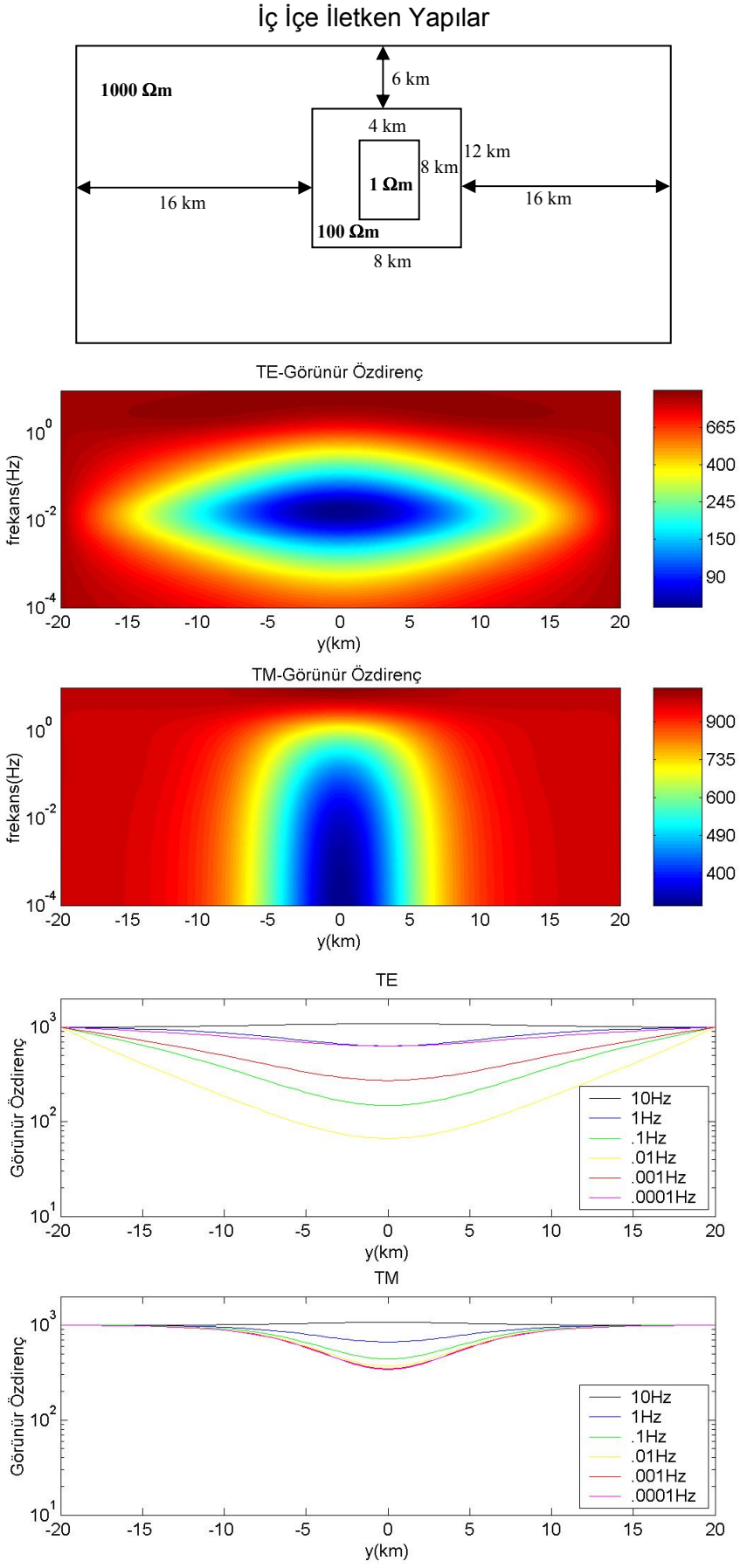
Wei, W., Unsworth, M.J., Jones, A.G., Booker, J.R., Tan, H., Nelson, K. D., Chen, L., Li, S., Solon, K., Bedrosian, P.A., Jin, S., Deng, M., Ledo, J., Kay D. and Roberts, B., 2001. Detection of widespread fluids in the Tibetan crust by magnetotelluric studies, *Science*, **292**, 716.

Yang, C. H. and Tong, L. T., 1999. A study of joint inversion of direct current resistivity, transient electromagnetic and magnetotelluric sounding data. *TAO,* **10**, 293 - 301

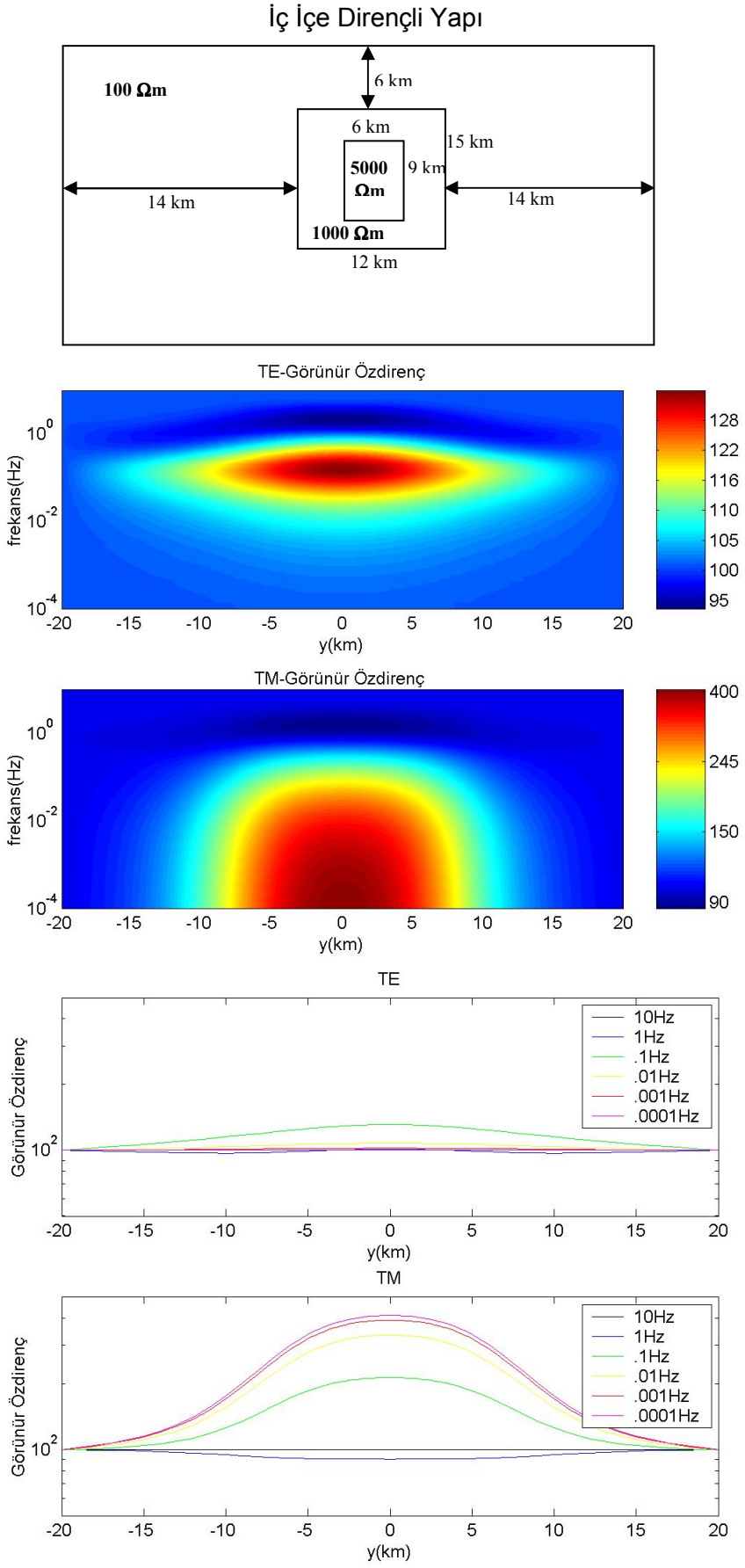
Zienkiewicz, O. C., 1971. The finite element method in engineering science. McGraw – Hill, New York.

EK – A

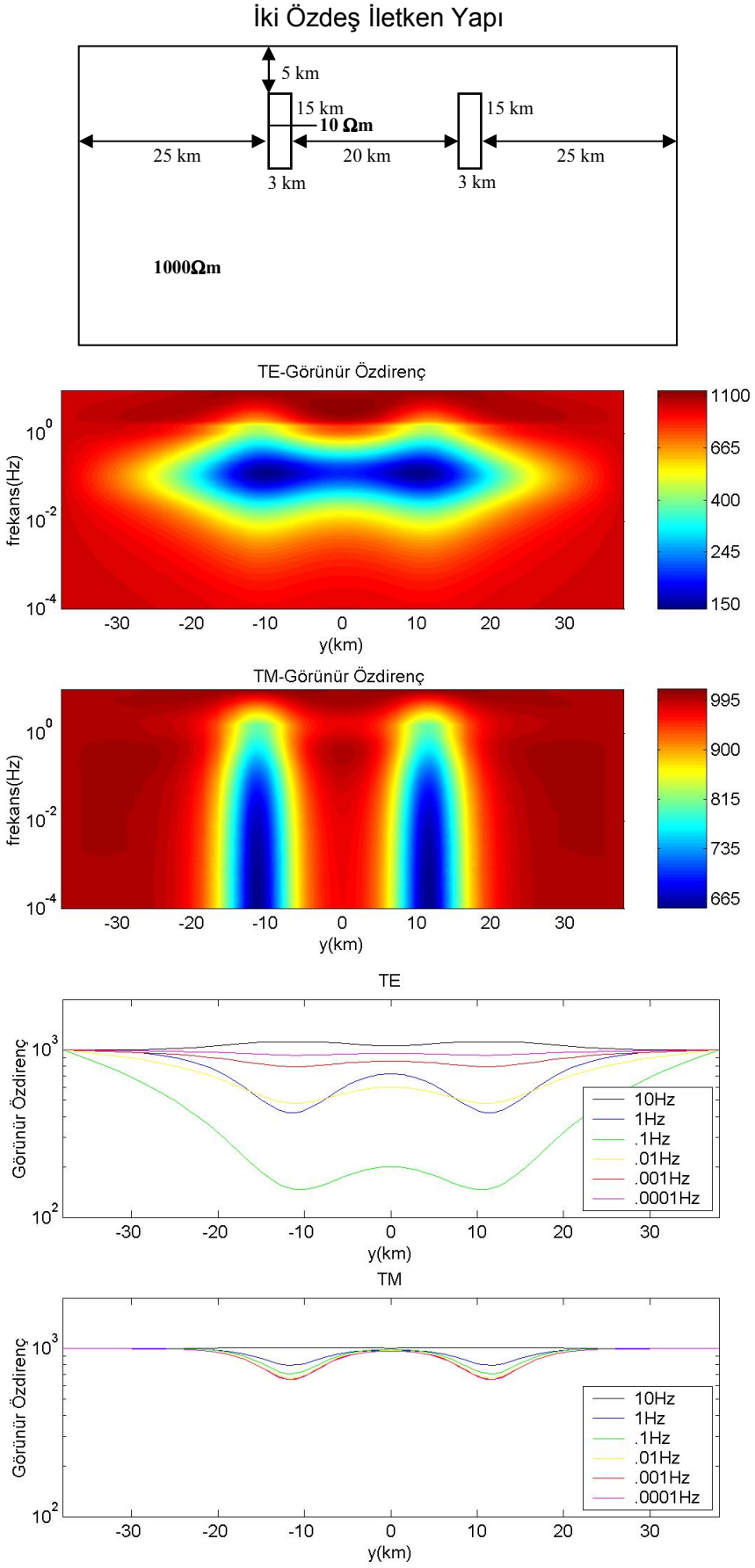
İKİ BOYUTLU MANYETOTELLÜRİK MODELLEMEDE TE VE TM MODLARININ DUYARLILIKLARININ ANALİZİ İÇİN OLUŞTURULAN SENTETİK MODELLER



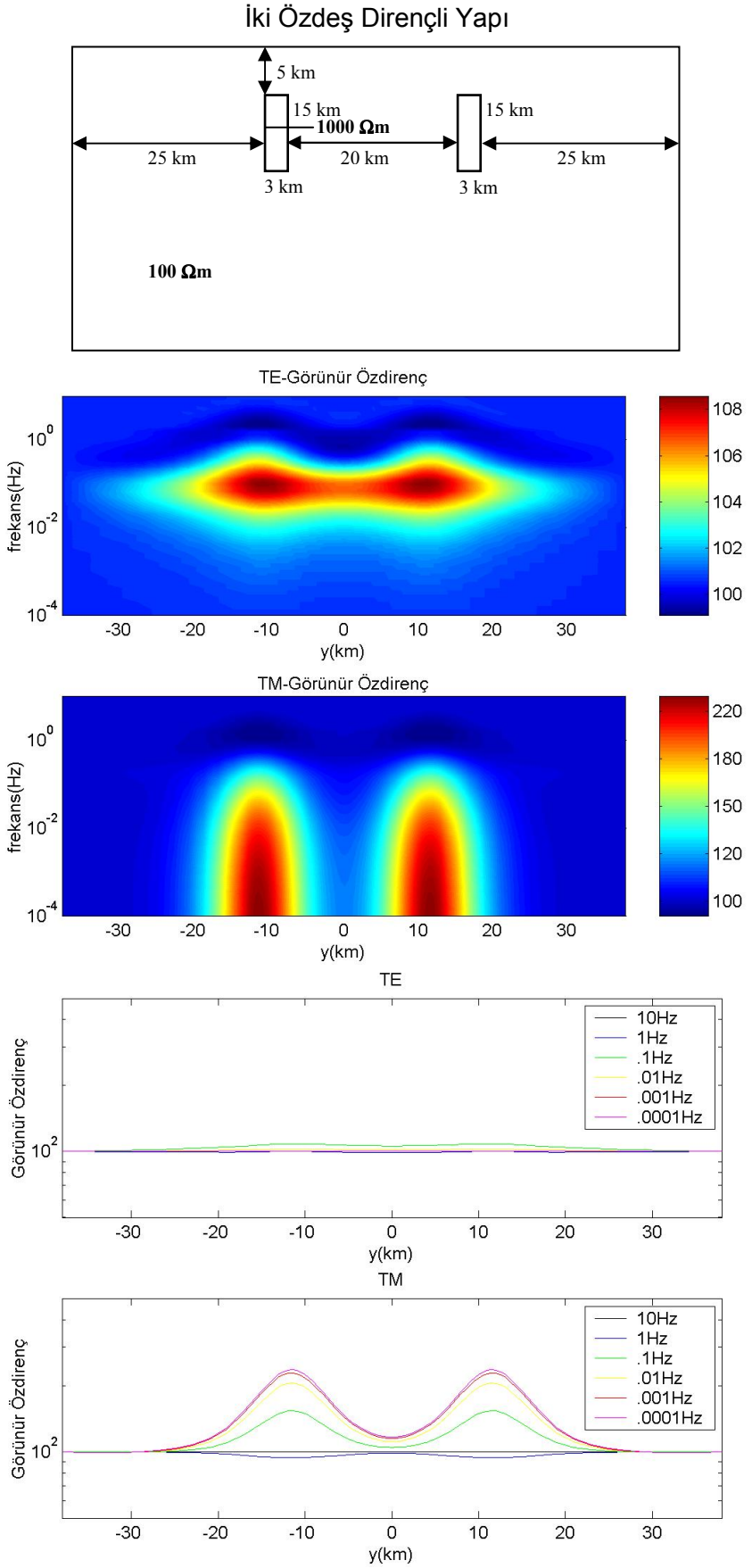
Şekil A. 1 İç içe iletken yapı modeli, iki boyutlu görünür özdirençleri ve değişimleri.



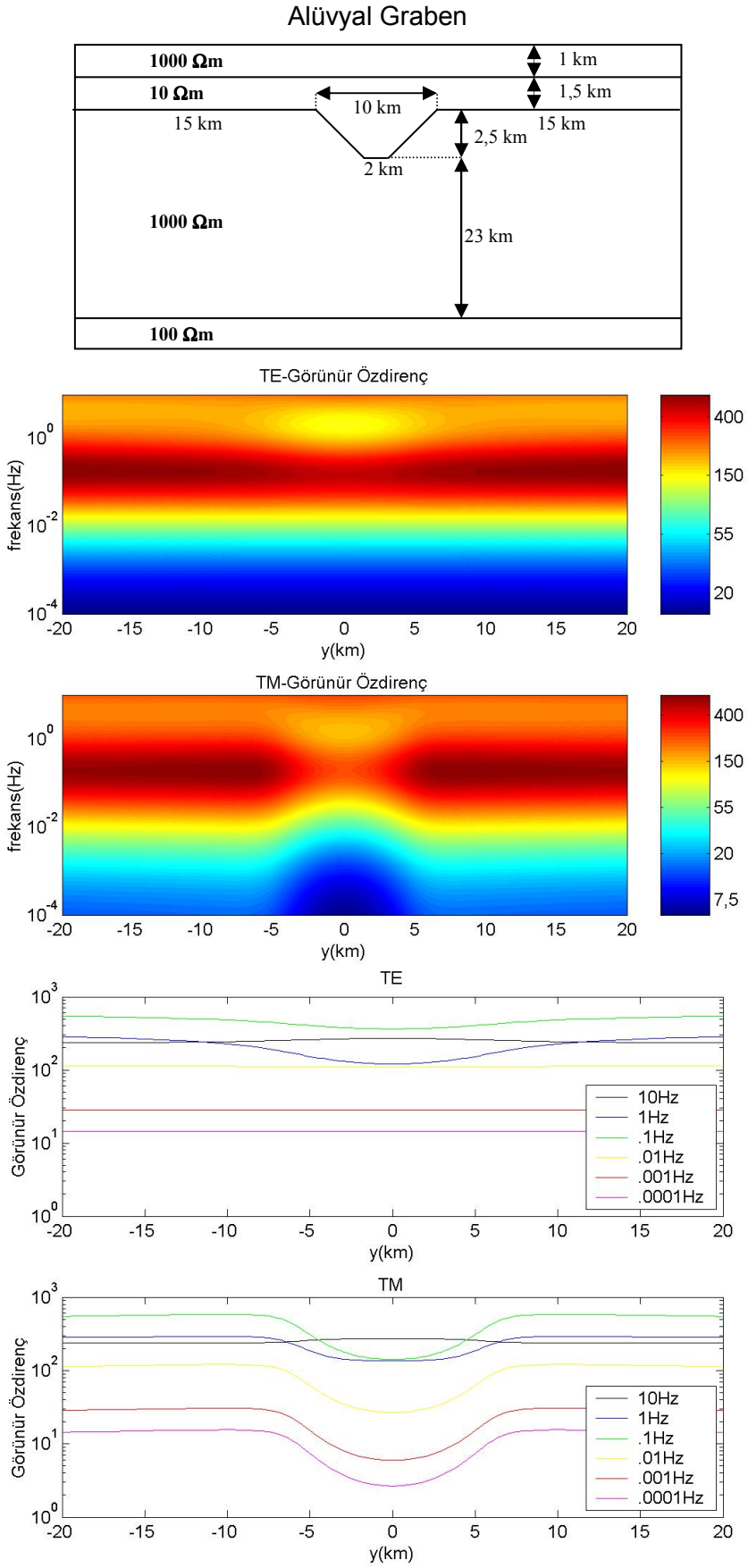
Şekil A. 2 İç içe dirençli yapı modeli, iki boyutlu görünür özdirençleri ve değişimleri.



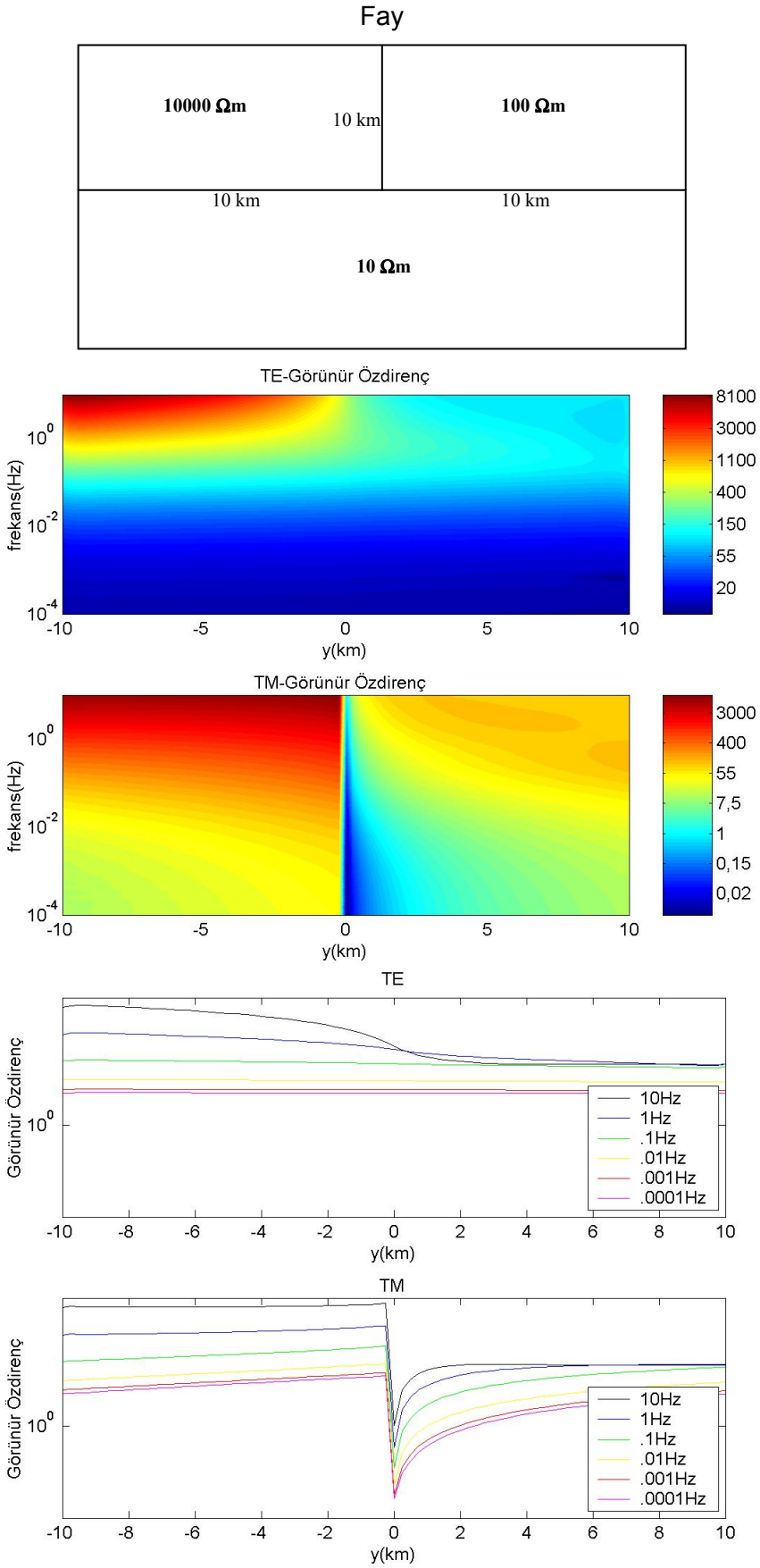
Şekil A. 3 İki özdeş iletken yapı modeli, iki boyutlu görünür özdirençleri ve değişimleri.



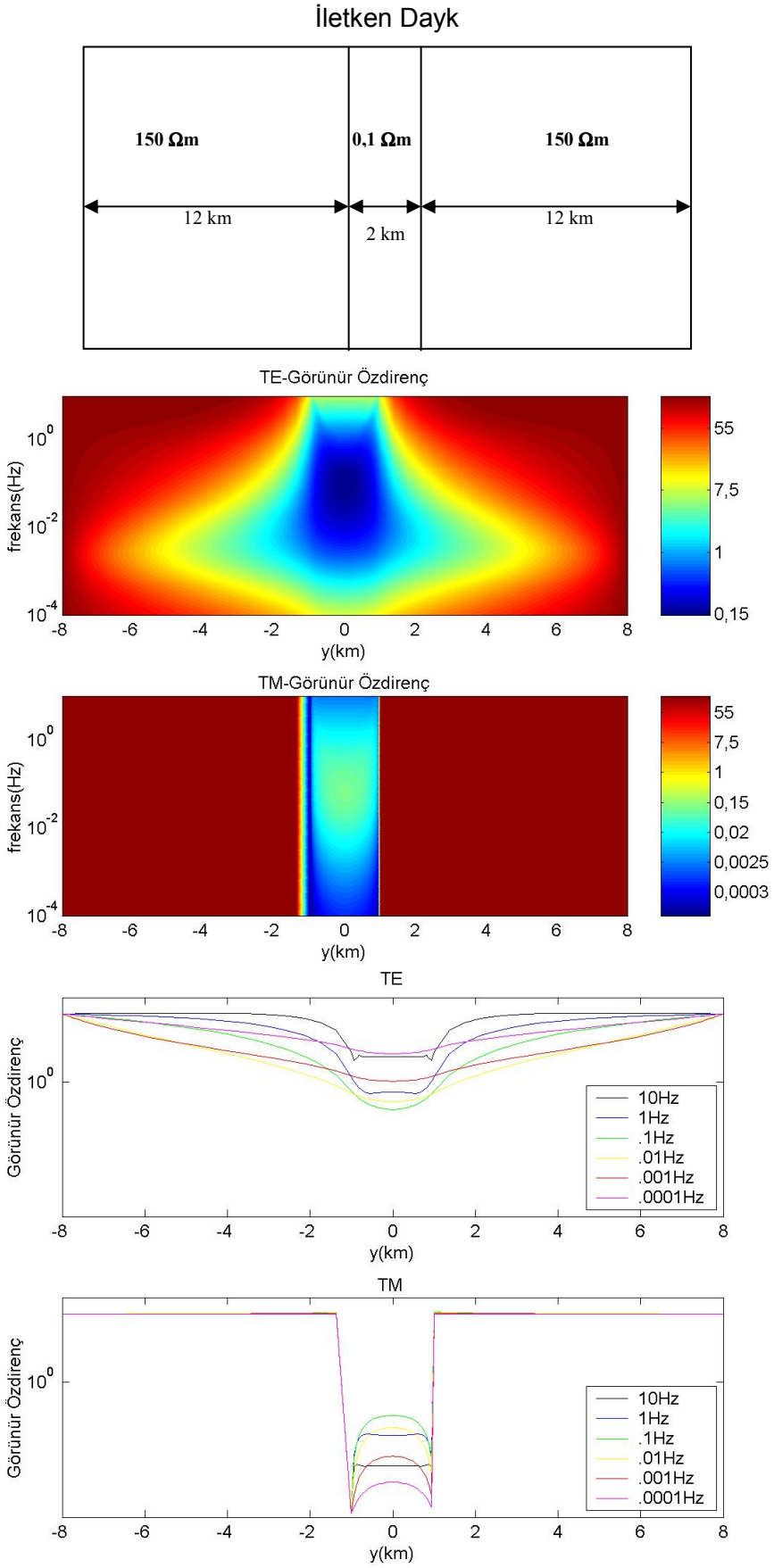
Şekil A. 4 İki özdeş dirençli yapı modeli, iki boyutlu görünür özdirençleri ve değişimleri.



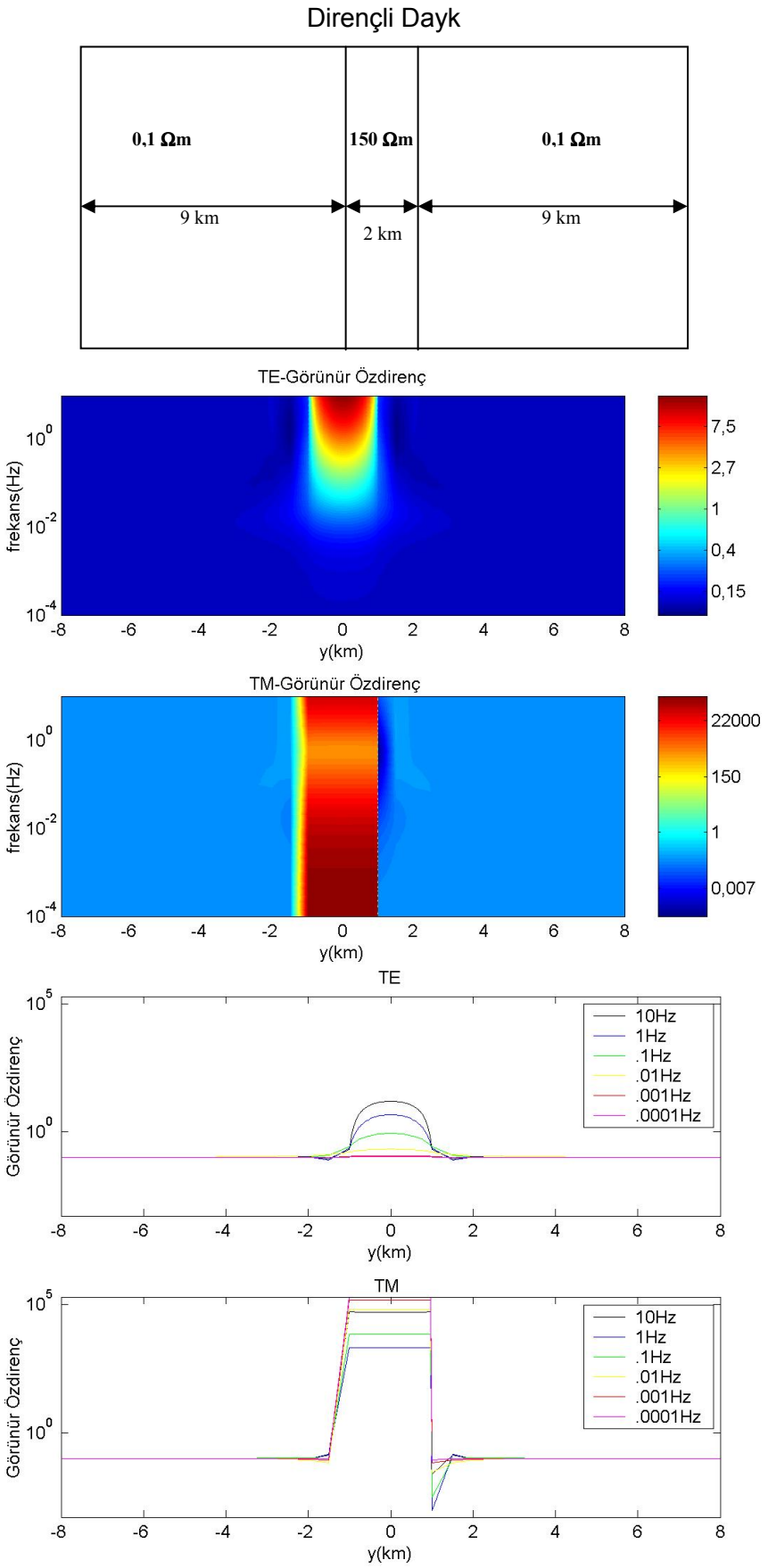
Şekil A. 5 Alüvyal graben modeli, iki boyutlu görünür özdirençleri ve değişimleri .



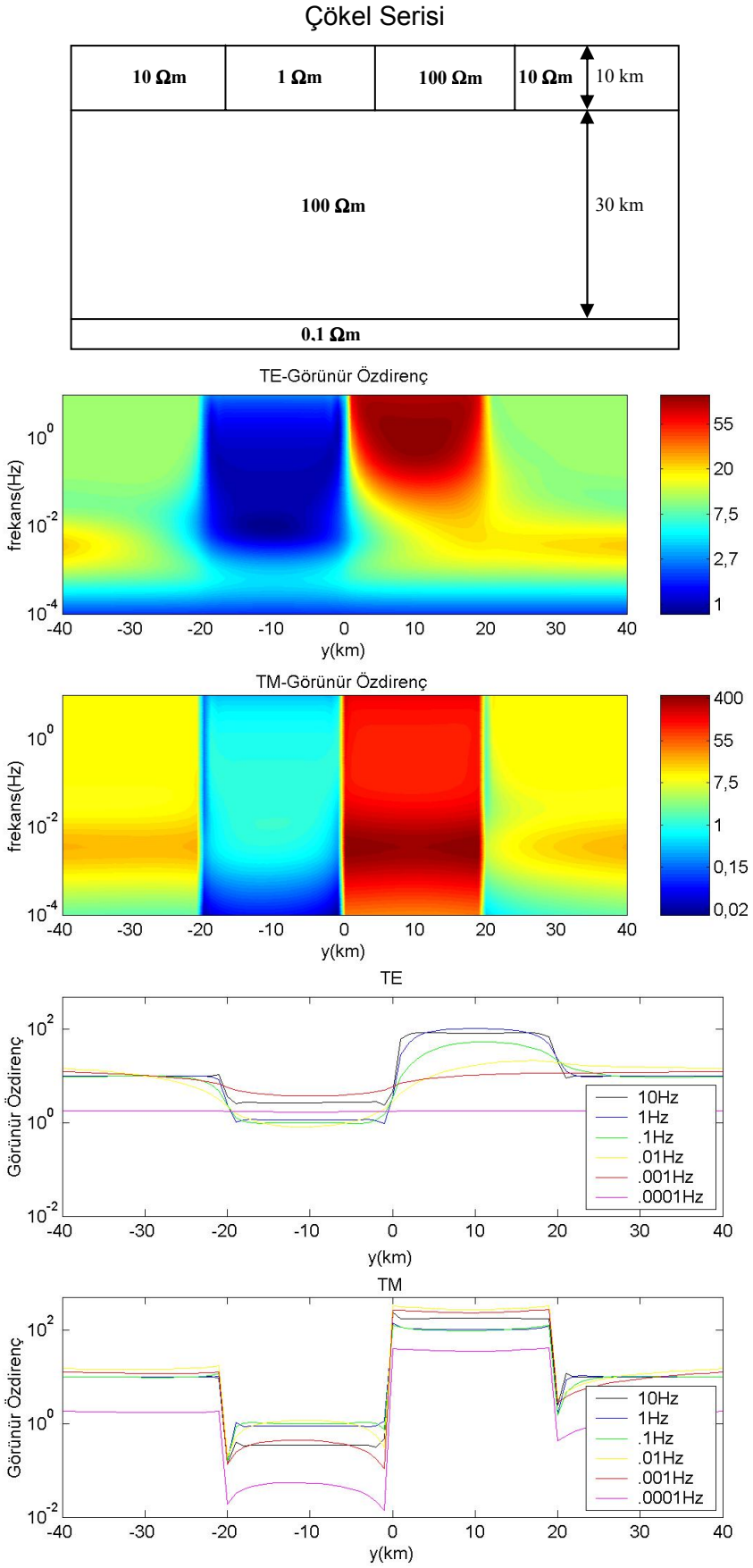
Şekil A. 6 Fay modeli, iki boyutlu görünür özdirençleri ve değişimleri.



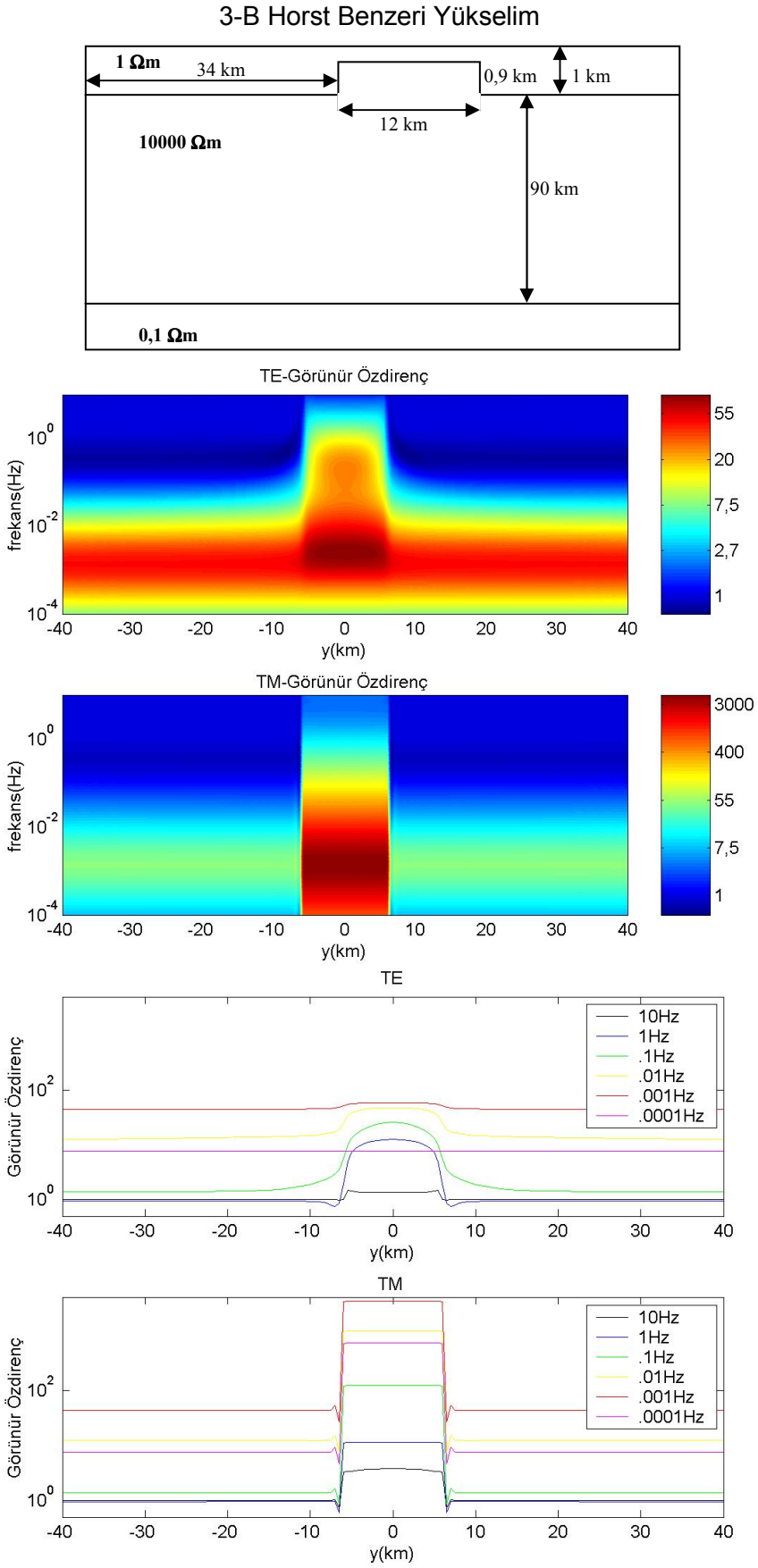
Şekil A. 7 İletken dayk modeli, iki boyutlu görünür özdirençleri ve değişimleri.



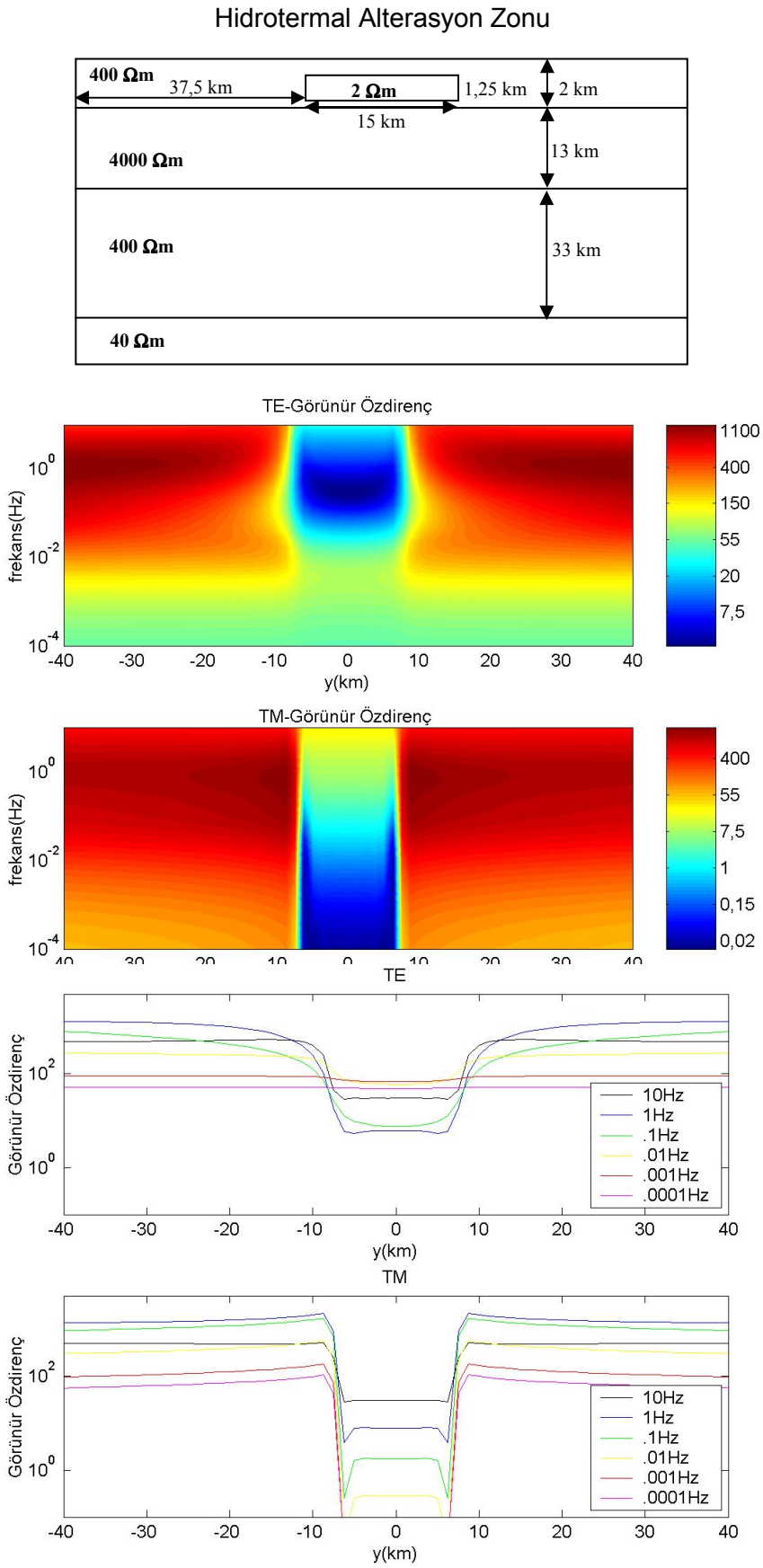
Şekil A. 8 Dirençli dayk modeli, iki boyutlu görünür özdirençleri ve değişimleri.



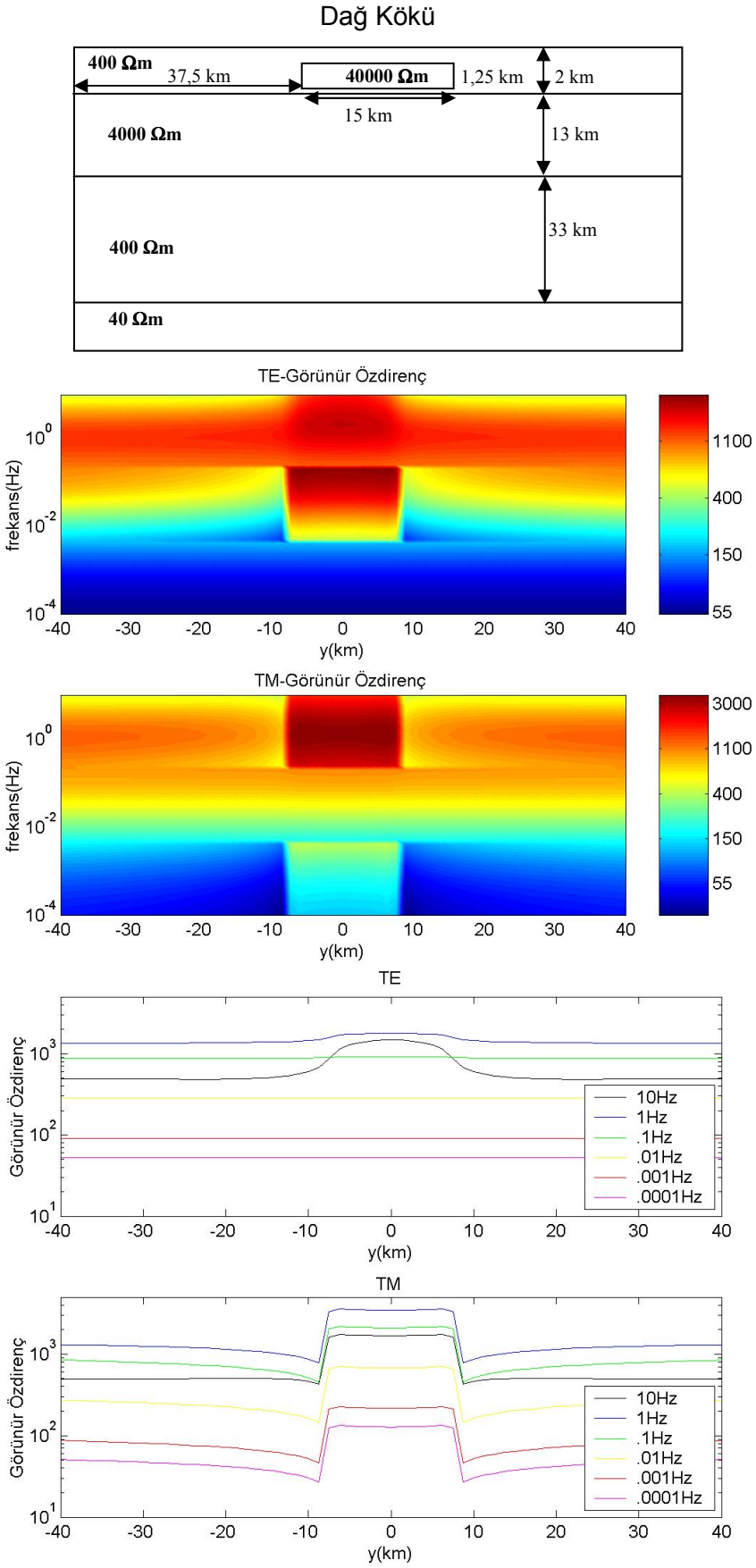
Şekil A. 9 Çökel Serisi modeli, iki boyutlu görünür özdirençleri ve değişimleri.



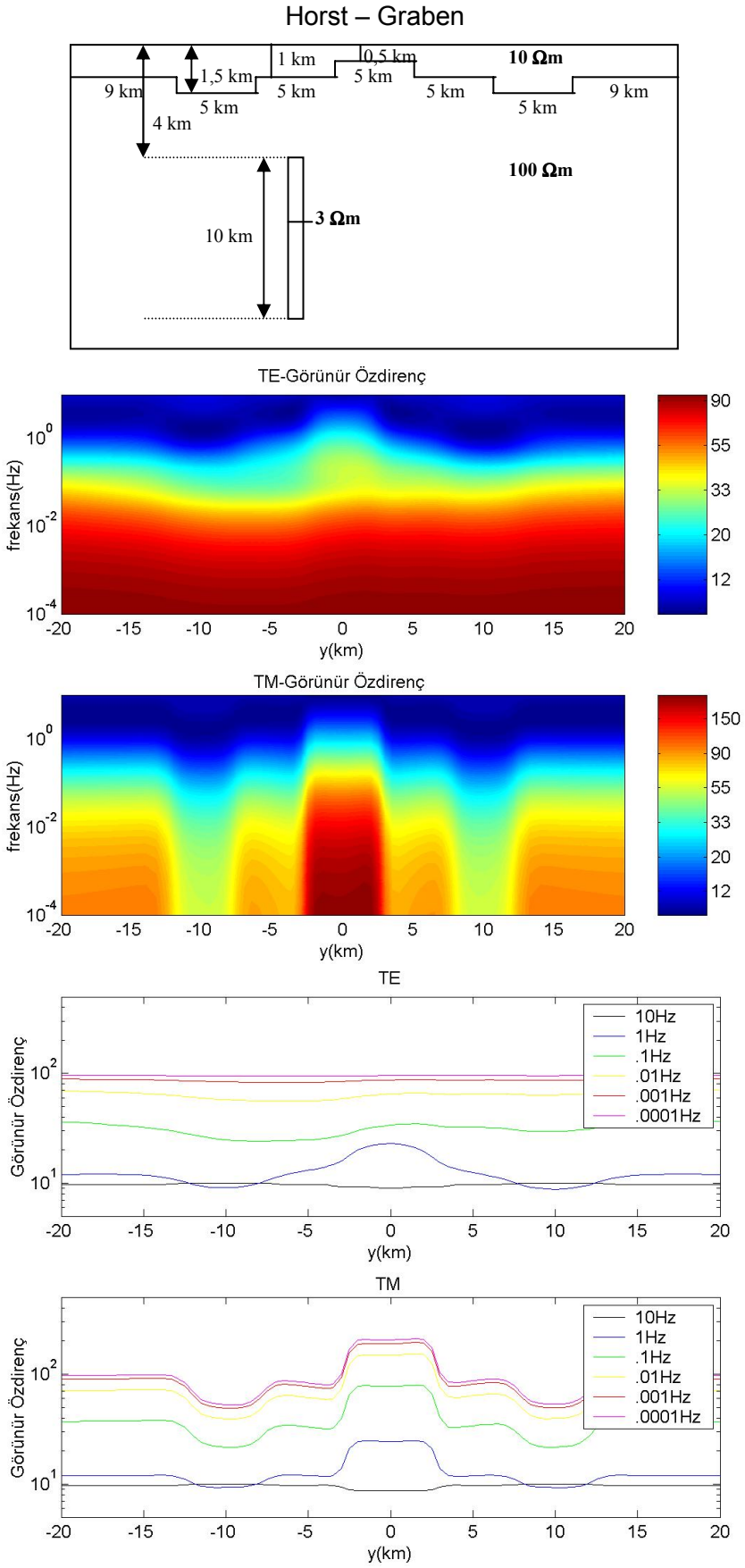
Şekil A. 10 3-B horst benzeri yükselim modeli, iki boyutlu görünür özdirençleri ve değişimleri.



Şekil A. 11 Hidrotermal alterasyon zonu modeli, iki boyutlu görünür özdirençleri ve değişimleri.

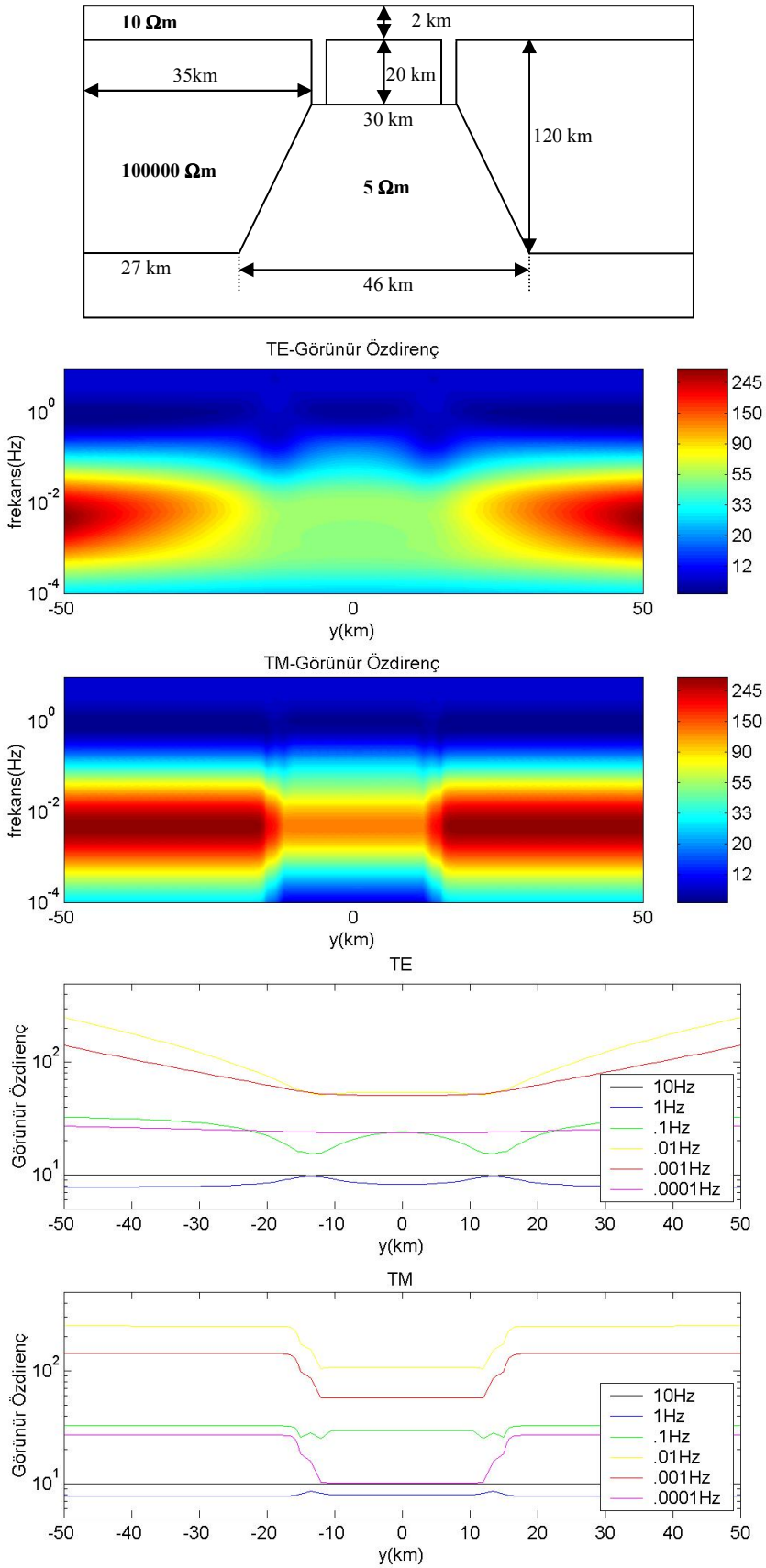


Şekil A. 12 Dağ kökü modeli, iki boyutlu görünür özdirençleri ve değişimleri.



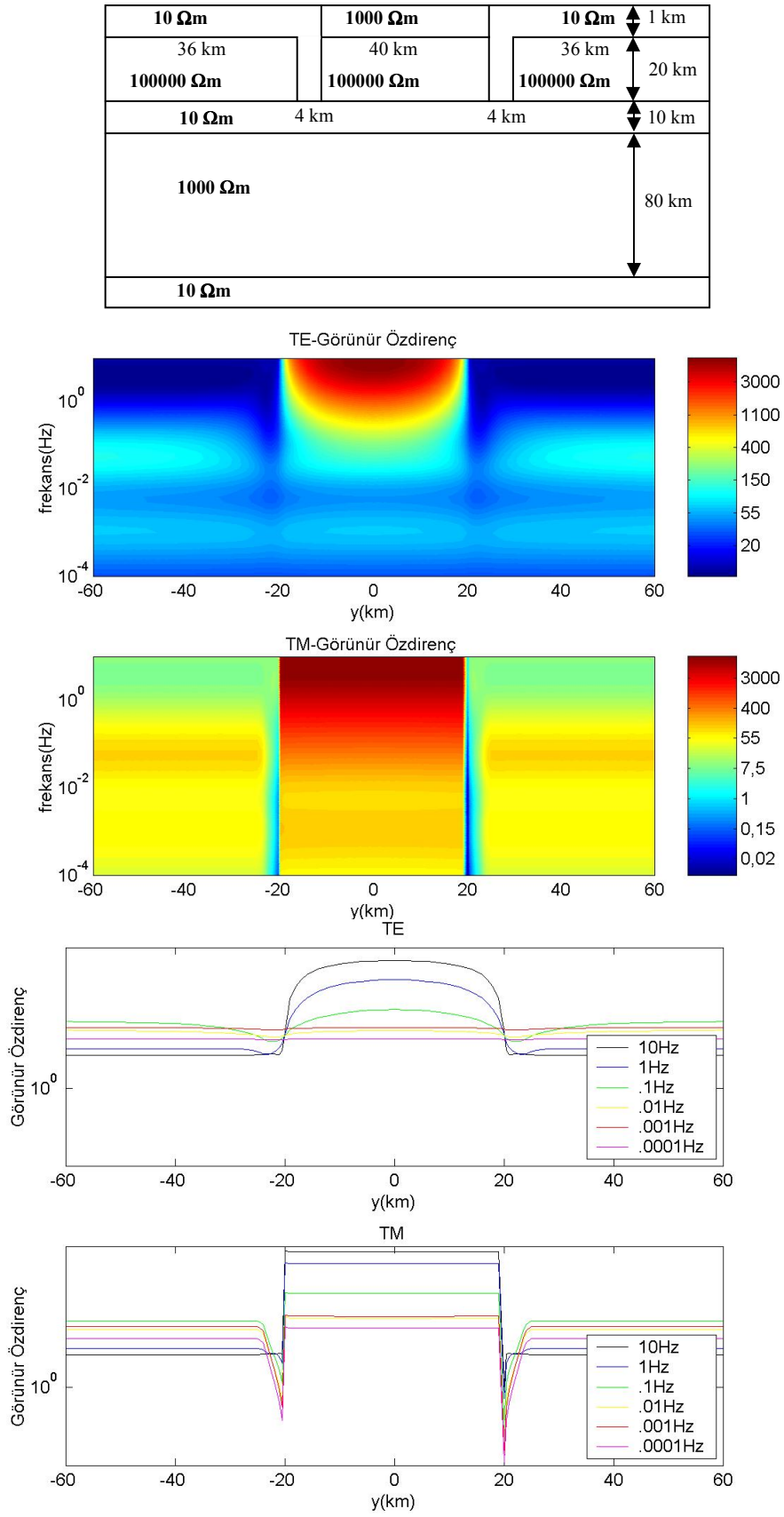
Şekil A. 13 Horst - graben modeli, iki boyutlu görünür özdirençleri ve değişimleri.

Düşey Kanallarla Sınırlandırılmış Astenosfer Yükselimi



Şekil A. 14 Düşey kanallarla sınırlandırılmış astenosfer yükselimi modeli, iki boyutlu görünür özdirençleri ve değişimleri.

Çökel Dolu Düşey Kanallarla Sınırlandırılmış Dirençli Sokulum



Şekil A. 15 Çökel dolu düşey kanallarla sınırlandırılmış dirençli sokulum modeli, iki boyutlu görünür özdirençleri ve değişimleri.

ÖZGEÇMİŞ

Volkan TUNCER, 28.Temmuz.1976 tarihinde İstanbul' da doğdu. İlk öğrenimini Ortaköy Kılıç Ali Paşa İlkokulu' nda, orta öğrenimini Bebek Ortaokulu' nda tamamladı. 1994' te Kabataş Erkek Lisesi' nden mezun oldu. Lisans eğitimini 1999 yılında İstanbul Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü' nde tamamladıktan sonra aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeofizik Mühendisliği Programı Jeofizik Mühendisliğ Anabilim Dalı' nda yüksek lisans eğitimine başladı ve halen bu bölümde öğrenimini sürdürmektedir.