

HİSARKÖY - BİGADIÇ (BALIKESİR)
JEOTERMAL ALANININ MANYETOTELLÜRİK
(MT) VE DÜŞEY ELEKTRİK SONDAJ (DES)
VERİLERİNİN YORUMLANMASI

SULTAN BOSTAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
2013

CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HİSARKÖY - BİGADIÇ (BALIKESİR) JEOTERMAL ALANININ
MANYETOTELLÜRİK (MT) VE DÜŞEY ELEKTRİK SONDAJ (DES)
VERİLERİNİN YORUMLANMASI

SULTAN BOSTAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
DOÇ. Dr. HÜSEYİN YILMAZ

SİVAS
2013

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

Başkan

Prof. Dr. Ali YILMAZ

Üye

Doç. Dr. Funda BİLİM

Üye (Danışman)

Doç. Dr. Hüseyin YILMAZ

ONAY

Bu tez çalışması, 20/03/2013 tarihinde Enstitü Yönetim Kurulu tarafından belirlenen ve yukarıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mustafa DEĞİRMENCI

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

ÖZET

HİSARKÖY - BİGADİÇ (BALIKESİR) JEOTERMAL ALANININ MANYETOTELLÜRİK (MT) VE DÜŞEY ELEKTRİK SONDAJ (DES) VERİLERİNİN YORUMLANMASI

Sultan BOSTAN

Yüksek Lisans Tezi, Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr Hüseyin YILMAZ

2013, 65

Manyetotellürik yöntem, doğal kaynaklı bir elektromanyetik yöntemdir. Yöntemde kaynak olarak yerin doğal elektromanyetik alanının oluşturduğu tellürik akımlar kullanılır. Bu sayede yeraltının farklı derinlikleri, öz direnç özelliklerine göre ayırt edilir. Birimlerin öz direnç farklılıkları sayesinde, o birimlerin derinlik, kalınlık, yanal ve düşey sınırları, süreksizlik zonları gibi jeolojik yapılar belirlenir. Manyetotellürik yöntem, etkin derinliği yüksek ve pahalı jeofizik yöntemlerden biridir. Bundan dolayı, derin jeofizik (kabuk ve daha derin araştırmalar) ve jeotermal enerji araştırmalarında sıkça kullanılmaktadır.

Jeolojik yapılar MT'de olduğu gibi DES yönteminde de öz direnç farklılıkları kullanılarak belirlenmektedir. DES yönteminde ölçüler 1-Boyutlu alınıp yine 1-Boyutlu değerlendirildikten sonra kesitler 2-Boyutlu olarak hazırlanmaktadır. Yeni geliştirilen tekniklerle 2-Boyutlu ölçüler alınabiliyor olsa da uygulamada karşılaşılan zorluklardan ve nüfuz derinliğinin düşmesinden dolayı (~ 800 m) pek tercih edilmemektedir. Düşey Elektrik Sondaj (DES) yöntemi, etkin derinlik anlamında kıyaslanacak olursa, MT yöntemine göre çok daha sığ bir derinliğe sahiptir. Derin jeotermal yapıların araştırılmasında zayıf kalabileceği düşünülse de sığ derinliklerdeki ayrımlılığı oldukça yüksektir. Bu sayede, DES yöntemi derindeki jeotermal aktivitenin sığdaki etkilerini ayrıntılı bir şekilde ortaya koyabilmektedir.

Bu çalışma, Balıkesir ili Bigadiç ilçesine bağlı Hisarköy ve dolayının jeotermal enerji potansiyelini belirlemeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda Çalışma sahası, jeolojik veriler ve mevcut jeotermal veriler gözetilerek KD-GB ve KB-GD doğrultulu üç adet profil boyunca MT ölçüleri ve bu profillerde belirlenen anomaliler üzerinde 78 adet DES ölçüsü alınmıştır.

Yapılan değerlendirmeler sonucunda, MT yapı kesitleri ve DES seviye haritalarının birbiriyle uyumlu oldukları görülmüştür. Bu haritalarda kaplıca olarak da işletilen Hisarköy yakınları ve Bekirler köyünün kuzeyinin önemli jeotermal potansiyel alanlar olduğu belirlenmiştir. Hisarköyde jeotermal etki ile ilişkilendirilen iletken zon yaklaşık 2000 m derindedir. Bu alanda yapılmış eski sondajların derinliği 650 m'yi aşamadığı için öngörülen hedeflere de ulaşamamıştır. Dolayısıyla, ana hedefe ulaşmak için Hisarköy jeotermal sahasının incelenmesinde 2000 m den daha derin sondajlar planlanmalıdır.

ANAHTAR KELİMELER: Hisarköy - Bigadiç (Balıkesir), Jeotermal Enerji, Manyetotellürik Yöntem, Düşey Elektrik Sondaj.

ABSTRACT

INTERPRETATION OF MAGNETOTELLURIC AND VERTICAL ELECTRICAL SOUNDING (VES) DATA COLLECTED FROM HİSARKÖY-BİGADIÇ (BALIKESİR) GEOTHERMAL FIELD

Sultan BOSTAN

Master Thesis, Department of Geophysical Engineering

Supervisor: Doç. Dr Hüseyin YILMAZ

2013, 65 pages

Magnetotelluric method is an electromagnetic method of natural origin and uses telluric currents formed by the natural electromagnetic field of earth as the source. In this way, different depths of underground are distinguished according to resistivity characteristics. Geological structures, such as depth, thickness, lateral and vertical boundaries, discontinuity zones can be determined due to differences in resistivity values of the units. Therefore, this method is often used for deep (e.g. crust and deeper researches) and geothermal explorations.

Geological structures are also detected by using resistivity differences in VES method as magnetotelluric method. Data are collected as 1-D and processed as 1-D. Then, Sections are prepared as 2-D. Although 2-D measurements can be acquire with newly developed techniques are not preferred much due to difficulties encountered in practice and poor penetration depth (~ 800 m). Effective depth in VES method that has very high resolution in shallow depths is much shallower according to MT method. By this means, VES method can show the effects of shallow depths of geothermal activity in detail in deep depths.

This study aims to determine the geothermal potential of Hisarköy of town of Bigadiç of province of Balıkesir and surrounding areas. For this purpose, MT data were collected along three profiles in NE-SW and NW-SE directions by considering of

geological data and available geothermal data in this research area. Otherwise, 78 pcs VES data were collected above anomalies that had been determined in these profiles.

As a result of these evaluations, MT cross-sections and VES contour maps are proved to be compatible with each other. Around of Hisarköy operated as thermal springs and north of Bekirler village has been determined as areas of geothermal potential in these maps. Conductive zone has been correlated with geothermal effect is approximately 2000 m deeper. Depth of None of old drills did not reach the target zone in this area for these drills are up to 600 meter. Drills should be deeper than 2000 meter for researching of Hisarköy Geothermal area.

Keywords: Hisarköy - Bigadiç (Balıkesir), Geothermal Energy, Magnetotelluric Method, Vertical Electrical Sounding.

TEŞEKKÜR

Hiçbir konuda yardım ve desteğini esirgemeyen, beraber aynı projede de çalışma onuruna eriştiğim danışmanım sayın Doç. Dr. Hüseyin YILMAZ' a teşekkür ederim.

Hiçbir fedakarlıktan kaçınmayarak zaman ayıran tüm mesleki birikimini aktarmaya çalışan ve beraber aynı projede de çalışma onuruna eriştiğim Yrd. Doç. Dr. Cemal KAYA' a teşekkür ederim.

Meslek hayatıma başladığım günden itibaren; bilgi birikimini, görüş ve tavsiyelerini esirgemeyen ve birçok projede beraber çalıştığım Ali Rıza KILIÇ' a şükranlarımı sunarım.

Ayrıca Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü mensuplarına müteşekkirim.

Her zaman mensubu olmaktan onur duyduğum MTA Genel Müdürlüğüne ve yönetimine, tezime konu olan verilerin toplandığı projede çalışan bütün arkadaşlarıma; öneri, eleştiri ve katkılarıyla tezimin sonuçlanmasında desteklerini esirgemeyen meslektaşlarıma teşekkür ederim.

Her konuda verdiği destek ve gösterdiği özveriden dolayı eşim Fatma ve kızım Ayşe Belemir' e sevgilerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
SİMGELER DİZİNİ.....	x
1 GİRİŞ.....	1
2 YÖNTEMLER VE TEKNİKLER.....	3
2.1 Manyetotellürük (MT) yöntem.....	3
2.1.1 Empedans Tanımları.....	5
2.1.2 Seri ve Paralel Empedans Tanımları.....	6
2.1.3 Empedans Tensörü.....	7
2.1.4 S-P Dönüşümü (Transformasyonu).....	8
2.1.5 S-P Datanın 2 Boyuta Dönüştürülmesi.....	11
2.2 TEM (Transient Electro Magnetic) Yöntemi.....	11
2.2.1 Sabit Kayma.....	13
2.3 Elektrik Özdirenç (DAÖ) Yöntemi	15
3 İNCELEME ALANININ JEOLojİK VE JEOfİZİK ÖZELLİKLERİ.....	20
3.1 Çalışma Sahasının Jeolojisi.....	20
3.1.1 Stratigrafi.....	20
3.1.2 Yapısal Jeoloji.....	21
3.2 İnceleme Alanının Jeofizik Özellikleri.....	22
3.3 Modelleme.....	23
3.4 İki Yöntemin (S-P / TE-TM) Karşılaştırılması.....	25

3.5 P1 Profilinin Deęerlendirilmesi.....	28
3.6 P2 Profilinin Deęerlendirilmesi.....	31
3.7 P3 Profilinin Deęerlendirilmesi.....	35
3.8 DES Kesitlerinin Yorumlanması.....	39
3.9 DES ve MT Seviye Haritalarının Birlikte Yorumu.....	43
4 SONUÇLAR.....	49
KAYNAKLAR.....	51
ÖZGEÇMİŞ.....	54
EKLER	
EK 1 - MTA datalarının kullanımı için alınmış kurum izni.....	55

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1 Manyetosferin yapısı (www.yaklasansaat.com/dunyamiz/ manyetik_kalkan/manyetik.asp).....	4
Şekil 2 Yer manyetik alanının günlük değişimi (Keller ve Frischknecht 1966).....	4
Şekil 3 TEM yönteminde arazi yerleşimi ve Eddy akımlarının akışı (McNeill, 1990).....	11
Şekil 4 TEM yönteminde alıcı ve verici dalga biçimi (Kaya, 2002).....	12
Şekil 5 Homojen ortam üzerinde erken ve geç zamanlar için görünür Özdirençler (Spies ve Eggers, 1986).....	13
Şekil 6 Elektrik ve manyetik alan genliğindeki değişimler (Utada ve Munekane, 2000).....	14
Şekil 7 MT İstasyonuna ait Sabit Kayma etkisini düzeltilmesi.....	14
Şekil 8 Özdirenç yönteminin arazi uygulaması (Robinson ve Coruh,1988).....	16
Şekil 9 Elektrik özdirenç ölçümlerinde elektrot dizilimleri (Wightman ve diğ.,2003).....	17
Şekil 10 Schlumberger Elektrot dizilimi (Altunkaynak, 2005)	19
Şekil 11 Çalışma alanının jeolojisi (Burçak ve diğ.,2006).....	21
Şekil 12 MT ve TEM için aynı noktada yerleşim (Kılıç, 2009).....	22
Şekil 13 MT Lokasyon Haritası.....	24
Şekil 14 DES Lokasyon Haritası.....	25
Şekil 15 S-P Empedans kullanılarak elde edilmiş P3 profiline ait özdirenç kesiti.....	27
Şekil 16 TE-TM modları kullanılarak elde edilmiş P3 profiline ait özdirenç kesiti.....	27
Şekil 17 P1 profili boyunca 2-B ters çözüm sonucunda elde edilen elektrik yapı kesiti.....	29
Şekil 18 P1 profili yorumlanmış özdirenç modeli.....	29
Şekil 19 P1 profili boyunca TM modu için ölçülen ve hesaplanan görünür özdirenç ve faz yapma kesitleri.....	30
Şekil 20 P1 profili boyunca TE modu için ölçülen ve hesaplanan görünür özdirenç ve faz yapma kesitleri.....	30
Şekil 21 P2 profili boyunca 2-B ters çözüm sonucunda elde edilen elektrik yapı kesiti.....	32
Şekil 22 P2 profili yorumlanmış özdirenç modeli.....	33
Şekil 23 P2 profili boyunca TM modu için ölçülen ve hesaplanan görünür özdirenç ve faz yapma kesitleri.....	34
Şekil 24 P2 profili boyunca TE modu için ölçülen ve hesaplanan görünür özdirenç ve faz yapma kesitleri.....	34
Şekil 25 P3 profili boyunca 2-B ters çözüm sonucunda elde edilen elektrik yapı kesiti.....	36
Şekil 26 P3 profili yorumlanmış özdirenç modeli.....	37
Şekil 27 P3 profili boyunca TM modu için ölçülen ve hesaplanan görünür özdirenç ve faz yapma kesitleri.....	38
Şekil 28 P3 profili boyunca TE modu için ölçülen ve hesaplanan görünür özdirenç ve faz yapma kesitleri.....	38
Şekil 29 B Profili Görünür Eş özdirenç Kesit.....	40
Şekil 30 B Profili Elektrik Yapı Kesiti.....	40

Şekil 31 C Profili Görünür Eş özdirenç Kesit.....	41
Şekil 32 C Profili Elektrik Yapı Kesiti.....	41
Şekil 33 E Profili Görünür Eş özdirenç Kesit.....	42
Şekil 34 E Profili Elektrik Yapı Kesiti.....	42
Şekil 35 250m. DES Görünür Eş özdirenç Seviye Haritası.....	44
Şekil 36 500m. DES Görünür Eş özdirenç Seviye Haritası.....	44
Şekil 37 750m. DES Görünür Eş özdirenç Seviye Haritası.....	44
Şekil 38 1000m. DES Görünür Eş özdirenç Seviye Haritası.....	44
Şekil 39 500m.MT Eş özdirenç Seviye Haritası.....	45
Şekil 40 1000m.MT Eş özdirenç Seviye Haritası.....	45
Şekil 41 1500m.MT Eş özdirenç Seviye Haritası.....	46
Şekil 42 2000m.MT Eş özdirenç Seviye Haritası.....	46
Şekil 43 2500m.MT Eş özdirenç Seviye Haritası.....	47
Şekil 44 3000m.MT Eş özdirenç Seviye Haritası.....	47
Şekil 45 4000m.MT Eş özdirenç Seviye Haritası.....	48
Şekil 46 5000m.MT Eş özdirenç Seviye Haritası.....	48

SİMGELER DİZİNİ

EM	Elektromanyetik
MT	Manyetotellürük
TEM	Transient Elektromanyetik
DAÖ	Doğru Akım Özdirenç
DES	Düşey Elektrik Sondaj
TM	Transverse Manyetik
TE	Transverse Elektrik
σ	Öziletkenlik (Siemens/m)
ρ	Özdirenç (Ohm-m)
μ	Manyetik geçirgenlik (H/m)
μ_0	Boşluğun manyetik geçirgenlik değeri (H/m)
f	Frekans (Hz)
ω	Açısal frekans
H	Manyetik alan şiddeti (A/m)
E	Elektrik alan şiddeti (mV/m)
$Z_{xy}, Z_{yx},$ Z_{xx}, Z_{yy}	Empedans Tensörleri
Φ	Faz
H_x, H_y, H_z	Manyetik alan bileşenleri
E_x, E_y	Elektrik alan bileşenleri
$Z_s - Z_p$	Seri ve Paralel Empedans
\bar{f}	Açısal Fonksiyonların Ortalamaları
$\Delta\theta$	Açısal Fonksiyonların Farkları
ΔV	Potansiyel Fark (volt)
I	Akım (Amper)

GİRİŞ

Jeotermal enerji; yeni, yenilenebilir ve çevre kirliliği oluşturmeyen bir enerji kaynağı olması sayesinde günümüzün en çok rağbet gören enerji çeşitlerinden biri olmuştur.

Jeotermal kaynak, yer kabuğunun çok değişik derinliklerinde birikmiş ısının oluşturduğu, sıcaklıkları devamlı olarak bölgesel atmosferik ortalama sıcaklığın üstünde olan ve çevresindeki yer üstü ve yeraltı sularına göre daha fazla erimiş mineral, çeşitli tuzlar ve gazlar içeren sıcak su ve buhar olarak tanımlanır. Jeotermal sahalarda bu enerjinin oluşması için üç ana unsur gerekmektedir. Bunlar; ısı kaynağı (derinde soğumasını tamamlamamış bir magma), hazne kaynağı (geçirimli bir kaynaç) ve örtü kaynağıdır (geçirimsiz bir kaynaç).

Türkiye, farklı tektonik rejimlerin denetiminde şekillenmektedir. Örneğin, bir taraftan sıkışma rejimi şiddetli bir şekilde gerçekleşirken diğer taraftan bir açılma rejimi hüküm sürmektedir. Bu durum, dünyanın en aktif doğrultu atımlı faylardan biri olan Kuzey Anadolu Fay Zonu ve Doğu Anadolu Fay Zonu'nun oluşmasına yol açmıştır. Özellikle Batı Anadolu'da açılma rejimine bağlı olarak bir çok horst – graben yapısı gelişmiştir. Bu tektonizma, kırık hatları boyunca mağmanın da yüzeye yaklaşmasına olanak tanımış ve zengin bir jeotermal potansiyel oluşturmuştur.

Doğal çıkışı olan jeotermal sahalarla ilgili çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar sayesinde sistemler daha iyi anlaşılmıştır. Bu çalışmaların akabinde, jeotermal enerji konusunda çalışanlar daha derin bilgilere ihtiyaç duymuş, bu durum da beraberinde derin bilgi üreten yöntemlere gereksinimi arttırmıştır. Derin bilgilere ulaşmak isteği, jeofizik çalışmaların ağırlık kazanmasına neden olmuştur. Özellikle derin çalışmalara cevap verebilen yöntemler daha fazla önem kazanmıştır. Jeotermal sahalarda ısıtıcı niteliğindeki bir sokulumun varlığının tespiti büyük önem kazanmıştır. Manyetotellürik (MT) yöntemin bu anlamda oldukça başarılı bir yöntem

olması tüm çalışmalarda MT kullanımının artmasını sağlamıştır. Yerin elektriksel özdirenç değeri ve değişimlerine bağlı olarak farklı derinliklerdeki farklı birimlerin ayırt edilebilmesi sağlanabilmektedir. MT yöntemi, jeotermal enerji araştırmalarında ülkemizde etkin olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada kullanılan veriler, yazarın da aralarında bulunduğu ekip tarafından, 2006 yılında 'MTA Genel Müdürlüğü Batı Anadolu Jeotermal Araştırmalar Projesi' kapsamında gerçekleştirilmiş olan saha çalışmalarında derlenmiştir. Bu veriler, ilgili makamlardan alınan izinden sonra tez çalışmasında kullanılmıştır.

Jeotermal sistemlerin ısı kaynağı, genellikle yer kabuğu içinde yükselmiş ve yüksek sıcaklıklara sahip magmatik sokulumlardır. Bazı sahalarda radyoaktif bozulmaya bağlı ısı kaynağından bahsedilse de ısı kaynağını genellikle magmatik sokulumlar oluşturmaktadır.

Çalışma alanında rezervuar nitelikli kayalar, temelde yer alan Kretase yaşlı serpantin – radyolarit - kireçtaşı karmaşığı şeklindeki birimlerdir. Pliosen yaşlı, yer yer kloritleşme ve kaolinleşme de gösteren dasitik tüfler, örtü nitelikli kayaları oluşturmaktadır. Sahada birbirini kesen ve paralel yönlerde gelişen çok sayıda fay mevcuttur. Bu faylar, derindeki sıcaklığın yüzeye ulaşmasını sağlamaktadır.

YÖNTEMLER VE TEKNİKLER

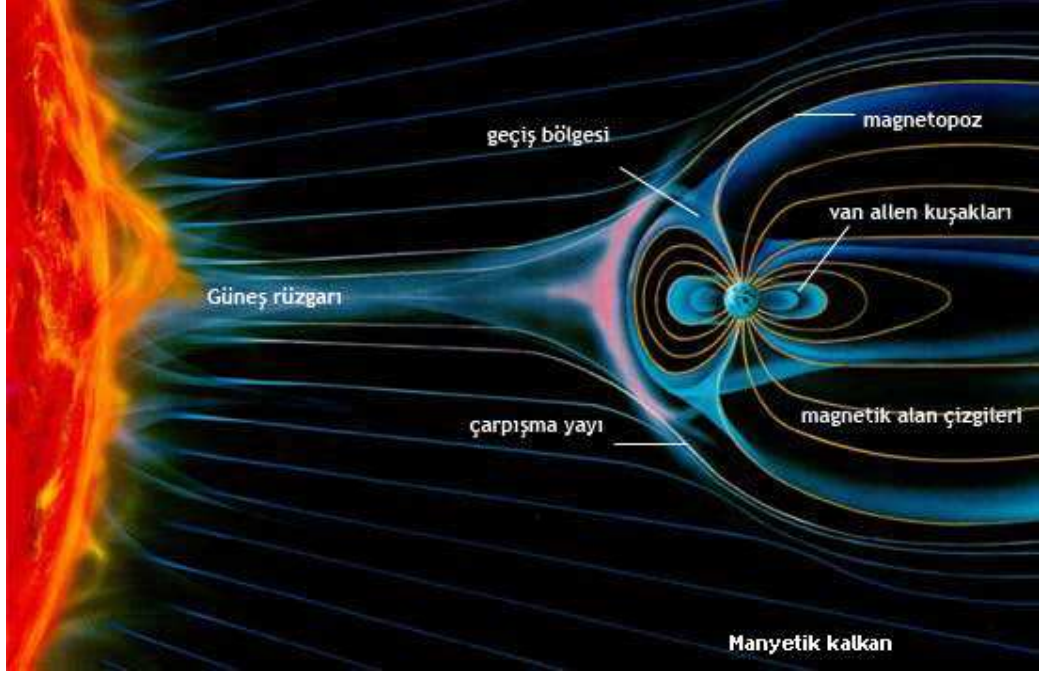
Bu çalışmada Balıkesir ili Bigadiç ilçesine bağlı Hisarköy ve dolayının jeotermal enerji potansiyelini belirlemek için MT ve DES yöntemleri kullanılmıştır.

2.1 MANYETOTELLÜRİK (MT) YÖNTEM

Kuramsal ilkeleri, 1950'li yıllarda Tikhonov (1950) ve Cagniard (1953) tarafından tanımlanmış olmasına karşın ölçü sistemlerinin geliştirilmeleri, teknolojik sebeplere dayalı olarak 1970'li yılları bulmuştur. Hem elektrik hem de manyetik alanın birlikte ölçülüp, yorum aşamasında her iki parametreden de yararlanılıyor olması yöntemin adını belirleyen unsur olmuştur. Bu bağlamda yöntemin adı, manyetik alanla ilgili manyeto ve elektrik alanla ilgili tellürik sözcüklerinin birleşiminden oluşur. Buradan hareketle Manyetotellürik yöntem, tellürik (eddy) akımlardan faydalanılarak, yer içine ait parametrelerin (özdirenç, kalınlık, boyutluluk, vb.) belirlendiği bir yöntem olarak tanımlanabilir. Başka bir deyişle MT yöntem, 10-4-103 Hz aralığında, doğal elektrik ve manyetik alan değişimlerinin ölçülerek yer elektrik özdirenç yapısının belirlendiği bir yöntemdir (Vozoff,1972). Bu kadar düşük frekanslarda ölçüler alınabiliyor olması, yöntemi derin araştırmalarda ön plana çıkartmaktadır. Yöntemin araştırma derinliğinin bu kadar büyük olması ve maliyetinin diğer derin araştırma yöntemlerine göre çok daha düşük olması, kabuk araştırmalarında yöntemi ön planda tutmuştur. Bu durum sadece kabukla sınırlı kalmayıp derin maden yatakları, petrol ve özellikle jeotermal araştırmalarda yöntemin uygulanırlığını oldukça artmıştır.

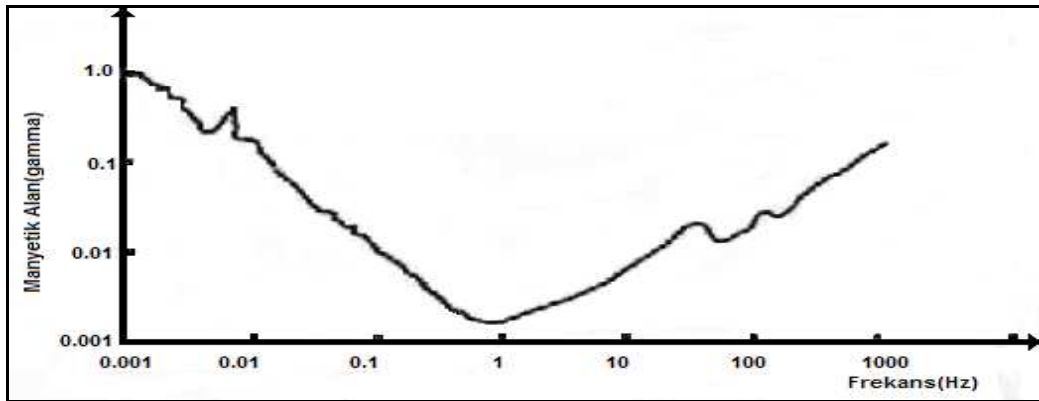
MT alanın kaynağı birbirinden farklı olaylara bağlı olarak atmosfer, iyonosfer ve manyetosferde bulunur. İyonosfer ve manyetosferde oluşan 1 Hz.'ten büyük frekanslardaki değişimler yeryüzüne ulaşmadan soğrulur. Dolayısıyla bu frekanslardaki sinyallerin kaynağını atmosferik olaylar oluşturmaktadır. 1 Hz.'ten küçük frekanslardaki elektromanyetik dalgaların

kaynağı ise güneşte meydana gelen patlamalar sonucu uzaya yayılan plazmaların manyetosfer sınırında oluşturduğu girişimlerdir (Şekil 1).



Şekil 1 Manyetosferin yapısı (www.yaklasansaat.com/dunyamiz/manyetik_kalkan/manyetik.asp).

Şekil 2'de yer manyetik alanının değişimi frekansın bir fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Bu grafik incelendiğinde değişimlerin en zayıf olduğu frekansın 1 Hz. ve civarında olduğu net bir şekilde görülebilmektedir. Bu frekans bölgesi bir anlamda, iki farklı kaynağın da tam olarak kapsama alanına girmemesinden ötürü etkinin en az olduğu bölgedir.



Şekil 2. Yer manyetik alanının günlük değişimi (Keller ve Frischknecht 1966).

2.1.1 Empedans Tanımları

Bir elektromanyetik dalganın empedansı; bir elektrik alanın (E) buna dik olan bir manyetik alana (H) oranı ifadesiyle tanımlanabilir. Ölçü alınan her istasyonda, elektrik alanın iki bileşeni (E_x, E_y) ve manyetik alanın üç bileşeni (H_x, H_y, H_z) ölçülür. Elektrik alanı ölçmek için, polarize olmayan elektrotlar kullanılır. Manyetik alanı ölçmek için ise indüksiyon bobinleri kullanılır. Zaman serisi olarak kaydedilen bir veri grubu üzerinde daha kolay işlem yapabilmek için fourier dönüşümü yapılır. Bu dönüşümün yapılmasıyla veriler zaman ortamında değil, frekans ortamında değerlendirilir.

Buradan hareketle bir elektromanyetik dalganın empedansı;

$$Z_{xy}(f) = \frac{E_x(f)}{H_y(f)} \quad (1)$$

bağıntısı ile verilir. Burada, f frekansı simgelemektedir. Empedans, sanal ve gerçel kısımdan oluşan karmaşık bir sayıdır. Bu karmaşık sayının genliği ve fazı, izleyen denklemler ile verilebilir:

$$\left| Z_{xy}(f) \right| = \frac{|E_x(f)|}{|H_y(f)|} \quad (2)$$

$$\phi_z(f) = \phi_E(f) - \phi_H(f) \quad (3)$$

Bir boyutlu (yatay sonsuz uzunlukta ve homojen tabakalardan oluşmuş) ortamlarda, empedanslar için;

$$\begin{aligned} Z_{xx} &= Z_{yy} = 0 \\ Z_{xy} &= -Z_{yx} \end{aligned} \quad (4)$$

koşulları sağlanır.

İki-boyutlu ortamlarda ise TE (Transverse Electric) ve TM (Transverse Magnetic) olarak adlandırılan iki mod gelişir. Elektrik alanın yönü, yer-elektrik doğrultuya paralel ise, bu doğrultuya dik yöndeki manyetik alan kutuplanır ve yapıdan etkilenir. Bu durum TE (Transverse Electric) modu olarak adlandırılır. Bu durumda, elektrik alanın yönü, doğrultu paralel yönü ifade eder ve dik koordinat sistemine göre bu yön x ise,

$$Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y} \quad (5)$$

olarak tanımlanır. Şayet durum bunun tam aksi yönde ise yani, manyetik alan doğrultuya paralel ise, jeolojik yapıya dik uzanan başka bir deyişle elektrik yapıya dik uzanan elektrik alan kutuplanır. Eğer, y doğrultuya dik yön ise, TM (Transverse Magnetic) modu;

$$Z_{yx} = \frac{E_y}{H_x} \quad (6)$$

olarak tanımlanır. Z_{xx} ve Z_{yy} bileşenleri ise sıfır olur.

MT yönteminde veriler, manyetik alanın üç bileşenini (H_x , H_y , H_z) ölçebilmek için kullanılan üç adet manyetik sensör, elektrik alanın iki bileşenini (E_x ve E_y) ölçmek için kullanılan 4 adet sensör, bir adet alıcı ile bunlara bağlı olarak çalışan bir adet bilgisayardan oluşan sistemle toplanır. Elektrik alanların ölçümü polarize olmayan potansiyel elektrotları ile (Cu-CuSO₄ veya Pb-PbCl) gerçekleştirilir. Manyetik alan birbirinden bağımsız, su geçirmez bir kaplama ile kaplanmış indüksiyon bobinleri ile ölçülmektedir.

MT yöntem ile ölçü alınırken sistemin sahaya yerleştirilmesi belli kurallara uygun olmalıdır. Arazide özellikle topografik koşullara göre birbirlerinden 25-100 m uzaklıkta bulunan elektrotlardan oluşan dipoller (E_x ve E_y), birbirine dik olma koşulunu sağlayacak şekilde araziye L , T veya + oluşturacak biçimde yerleştirilebilirler.

MT yöntemde Elektrik alan mV/km, Manyetik alan ise nT cinsinden ölçülür. Birbirine dik olan E ve H alanların birbirine oranıyla empedans hesaplanır, bu empedanslardan hesaplanan öz dirençlerin birimi ise Ohm.m cinsindedir.

2.1.2 Seri ve Paralel Empedans Tanımları

En sık kullanılan model, yer altının 2 boyutlu varsayımı ile öz direncin de 2 boyutta (yatay uzaklık ve derinlik) değiştiği kabulü ile yapılan modelleme çalışmaları olarak ifade edilebilir. Bu 2 boyutlu varsayımda 2 dik mod kavramı ortaya çıkar; birincisi elektrik alan jeolojik doğrultuya paralel olduğunda TE mod, diğerinde manyetik alan jeolojik doğrultuya paralel olduğunda TM mod'dur.

MT verilerinin 2 boyutlu modellerinde, TE ve/veya TM modları esas alınır. Standart ters çözüm algoritmaları, 2B modellerden, ölçülen MT verilerini tekrar elde etmek için, optimizasyon teknikleri kullanır (deGroot-Hedlin and Constable, 1990; Smith and Booker, 1991; Uchida, 1993; Ogawa

and Uchida, 1996; Rodi and Mackie, 2001). Bu optimizasyonu yapmasının nedeni, verilerin 3. boyuttan gelen bilgileri de içeriyor olmasıdır.

Bazı yaklaşımlar empedans tensörünün dört elemanını azaltmak için, 2 boyutlu TE ve TM polarizasyon modlarıyla karşılaştırılabilir bir çift empedans tanımı ortaya çıkarmıştır.

Tüm tensör elemanlarının kullanıldığı 3 boyutlu ters çözümde, model parametreleri ve cevap fonksiyonunun sayısı çok büyük olacağından standart teknolojik sistemlerle bunu yapabilmek hem çok zor hem de çok uzun zaman alacaktır (Romo, 2005).

Seri ve Paralel (S-P) Empedans dönüşümleri ile iki tamamlayıcı empedans ve iki açısız cevap fonksiyonu elde edilir. Bu yeni form, tüm tensörün yaptığı gibi üç boyutlu ortamdaki tüm bilgileri içerir. Bunu gerçekleştirirken, sadece seri ve paralel olmak üzere iki empedans fonksiyonu kullanılır. Bu iki fonksiyon, iki boyutlu modellerin TE ve TM modlarıyla doğrudan karşılaştırılabilir (Romo, 2005).

Ayrıca, bu empedanslar ve açısız fonksiyonlar, üçüncü boyut bilgilerini de içerdiğinden, herhangi bir ek işlem yapmaya ihtiyaç duyulmadan, 3 boyutlu modellemede de kullanılabilirler. Tensör elemanlarının aksine, seri ve paralel empedanslar, arazi uygulamasında kullanılan referans sisteminin yönüne de bağlı değildir. Bu da bize, alınan ölçülerin ayrıştırma analiz teknikleri kullanılarak eksen döndürme işlemlerini yapmaktan kurtaran bir kolaylık sağlamaktadır. Bunlara ek olarak, S-P empedans, orijinal tensör elemanlarına göre, ortalama bir değer olduğundan, gürültülerden arındırılmış değerler sunmaktadır. Ayrıca, bu parametrelerin ortalama değer olması, öz direnç eğrileri üzerinde görülen sabit kayma etkisinin de azalmasını sağlamaktadır (Romo, 2005).

2.1.3 Empedans Tensörü

Yer içerisinde alınan MT cevabı (EM alan ölçümü ile elektriksel iletkenlik bağlantısı içeren), genelde empedans tensörü ile gösterilir.

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} \quad (7)$$

Bu matematiksel form, ortamda ilerleyen elektrik akımlarının etkilerini özetler.

Vektör denkleminde (7) $E = ZH$, burada E- elektrik alan, H- manyetik alan ve Z ise empedans tensörüdür.

Genel olarak 3 boyutlu durumlarda, TE ve TM polarizasyon modları, akım sistemlerini tamamıyla açıklayamaz.

Bu durum, öz direnç değerini hesaplayabilmek için 4 tensör elemanını da kullanmayı gerektirir.

Bu da beraberinde bir ikilem yaratır:

- 3-B modelleme için tüm tensör elemanlarını kullanmak,
- 2-B modelde, TE ve TM modlarını kullanarak aynı yolla 3B modelin tanımlanmasında alternatif cevaplar elde etmek.

2.1.4 S-P Dönüşümü (Transformasyonu)

Romo ve diğerleri (2005), empedans tensörünü dört tane yeni tepki fonksiyonuna dönüştürür. Bunların iki tanesi empedans, diğer ikisi açılal fonksiyonlardır.

Bu seri ve paralel dönüşümler iki ana düşünceye dayanır. İlki 3-B tensör'ünü off diagonal bir şekle dönüştürmek için kompleks transformasyonu formüle etmeye dayanır. İkinci düşünce indirgenmiş empedansların, devre teorisinin seri ve paralel dengine benzer şekilde birleştirilmesine dayanır.

$$R_e E = R_e Z R_H^T R_h H \quad (8)$$

Burada;

$$R_e = \begin{pmatrix} \cos\theta_e & \sin\theta_e \\ -\sin\theta_e & \cos\theta_e \end{pmatrix} \quad (9)$$

Kompleks değişkenin dairesel fonksiyonlarının verdiği elemanlarla tek bir matristir.

Dönüşmüş empedans, aşağıdaki şekle indirgenir.

$$Z' = R_e Z R_H^T = \begin{pmatrix} 0 & Z_1 \\ Z_2 & 0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

θ_e , θ_h ve Z_1 , Z_2 terimleriyle 4 no'lu denklemin çözümü, orijinal tensor'un 4 elemanını dört yeni kompleks parametreye dönüştürür. İki empedans ve iki açı;

$$\{ Z_{xx}, Z_{xy}, Z_{yx}, Z_{yy} \} \Leftrightarrow \{ Z_1, Z_2, \theta_e, \theta_h \} \quad (11)$$

Başlıca empedanslar Z_1 ve Z_2 , devre teorisinin seri ve paralel benzerliğinde olduğu gibi birleştirilir. Dirençlerin seri dizildiği bir devrede, voltajlar toplanır ve sonuç eşdeğer direnci bulmak için ortak akıma bölünür. Dönüşen elektrik alan bileşenleri toplanır ve uygun eşdeğer seri empedansı elde edebilmek için uygun bir manyetik alan tarafından bölünür. Bu aşağıdaki gibi formüle edilebilir (Romo, 2005).

$$E_s = (Z_2 \ Z_1) R_{\phi}^T R_{\phi} \begin{pmatrix} H_1 \\ H_2 \end{pmatrix} \quad (12)$$

Burada $E_s = E_1 + E_2$ ve R_{ϕ} kompleks bir transformasyondur. Bu kez istenen E_s 'yi elde edebilmek için, manyetik alanı (H) dönüştürecek R_{ϕ} 'ye bakıyoruz. Bu seri empedansa gider (Romo, 2005).

$$Z_s = \frac{Z_2 - Z_1}{2 \cos \phi} = \frac{Z_2 + Z_1}{2 \sin \phi} \quad (13)$$

Benzer bir dönüştürme, doğrudan doğruya paralel empedans için de yapılır. Dirençlerin paralel dizildiği bir devrede, önce akımları toplayıp, ardından ortak voltaja bölersek, buradan eşdeğer direnci elde ederiz. Benzerlik, paralel empedansın manyetik alanları ekleyerek $H_p = H_1 + H_2$ elde edilebileceğini, daha sonra istenen H_p 'i üretmek için uygun bir elektrik alanına (E) bakılmalıdır. Bu paralel empedans olarak sonuçlanır (Romo, 2005).

$$Z_p = \frac{2 Z_1 Z_2 \cos \phi}{Z_2 - Z_1} = \frac{2 Z_1 Z_2 \sin \phi}{Z_1 + Z_2} \quad (14)$$

Bu noktada orijinal tensörün dört elemanı, dört kompleks parametreye dönüştürülmüş oldu.

$$\{ Z_{xx}, Z_{xy}, Z_{yx}, Z_{yy} \} \Leftrightarrow \{ Z_s, Z_p, \theta_e, \theta_h \} \quad (15)$$

Romo ve diğerleri (2005) açısız fonksiyonların θ_e , θ_h ortalamaları $\bar{\theta}$ ve farkları $\Delta\theta$ tarafından değiştirilmesinin daha uygun olacağını buldu.

Yani ;

$$\{ Z_{xx}, Z_{xy}, Z_{yx}, Z_{yy} \} \Leftrightarrow \{ Z_s, Z_p, \bar{\theta}, \Delta\theta \} \quad (16)$$

16'da gösterilen denklemlerin açık hali;

$$\begin{aligned}
Z_s &= \left(\frac{Z_{xx}^2 + Z_{xy}^2 + Z_{yx}^2 + Z_{yy}^2}{2} \right)^{1/2} \\
Z_p &= \sqrt{2} \left(\frac{Z_{yx}Z_{xy} - Z_{xx}Z_{yy}}{(Z_{xx}^2 + Z_{xy}^2 + Z_{yx}^2 + Z_{yy}^2)^{1/2}} \right) \\
\bar{\theta} &= \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{Z_{yy} - Z_{xx}}{Z_{xy} + Z_{yx}} \right) \\
\Delta\theta &= \arctan \left(\frac{Z_{xx} + Z_{yy}}{Z_{xy} - Z_{yx}} \right)
\end{aligned} \tag{17}$$

17'de verilen dört kompleks parametre, orijinal tensörün tam gösterimidir. Z_s (Seri Empedans) ve Z_p (Paralel Empedans) 'yi ilginç ve kullanışlı bir çift karşılık fonksiyon yapan bazı ek özellikleri vardır.

S-P empedansları, TE ve TM modlarının, 2B durumlarda birbirlerini tamamladığı gibi tamamlar. 13 ve 14 denklemleri, seri karşılığın en büyük empedansa daha hassas olduğunu gösterirken, devre benzerliğinde olduğu gibi paralel olan en küçüğe daha hassastır. Bu tamamlayıcı davranış, direkt S-P empedansların, yüzeylerin boyunca ve karşısından geçen akımlara karşı gösterdiği hassasiyete bağlıdır. Seri empedans, yüzeylerin arasından akan akımın sarj yapısı (charge-building) ile ilişkili galvanik etkilere karşı daha duyarlı iken; paralel empedans, yüzeyler boyunca akan akımın indüktif etkisine daha hassastır. Akımların izlediği yoldan dolayı, seri empedans TM gibi, paralel empedans ise TE gibi davranır.

Z_s ve Z_p 'nin en önemli özelliği, birey tensör elemanları ve TE - TM empedanslarda olduğu gibi ölçüm eksenlerine bağlı değildir. Bu yeni ifadede yön hassasiyeti, açısal ortalamaya $\bar{\theta}$ kayarken, açısal fark $\Delta\theta$ da dönmeden etkilenmez. Böylece yeni karşılık fonksiyonları, orijinal tensör elemanlarının ortalaması olduğu için onlardan daha sağlıklıdır.

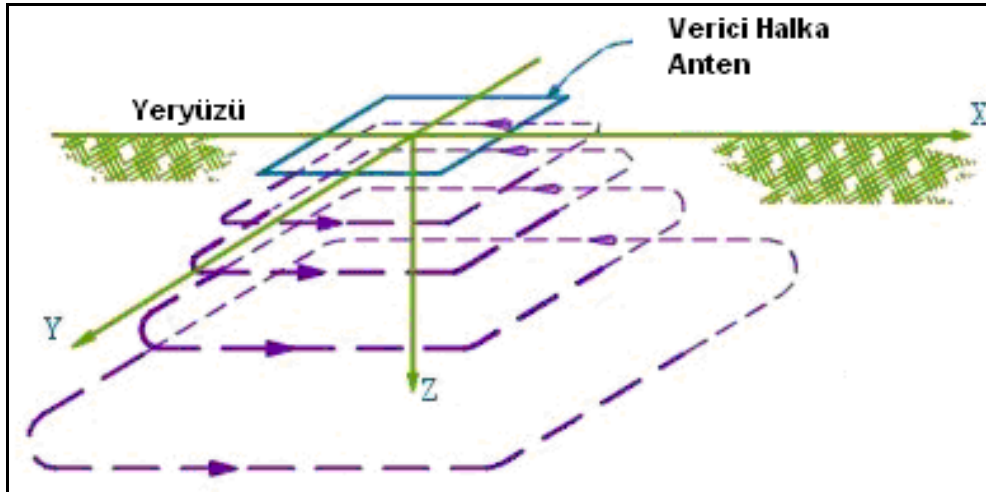
S-P empedansların hesaplanmasında ortalama alınması (13, 14 denklemler), görünür özdirenç eğrilerinin, birbirlerine TE-TM eğrilerinden daha yakın olmasını sağlamıştır. Böylece TE-TM eğrilerinde karşılaşılan sabit kayma bozukluğunun, S-P eğrilerinin içerdiği ortalama yüzünden önemli ölçüde düşürülmesi ek bir faydadır.

2.1.5 S-P Datanın 2 Boyuta Dönüştürülmesi

S-P parametreleri denklemde (17) de gösterildiği gibi, orijinal tensör elemanların basit fonksiyonlarıdır. Bu yüzden modelin parametrelerine bağlı olarak, kısmi türevlerin hesaplanması işlemi kolaydır. Bu dönüşüm, (ters) kodların kolaylıkla S-P dataları için uygun dönüşüm kodlarına dönüştürülmesini olası kılar.

2.2 TEM (Transient ElectroMagnetic) YÖNTEMİ

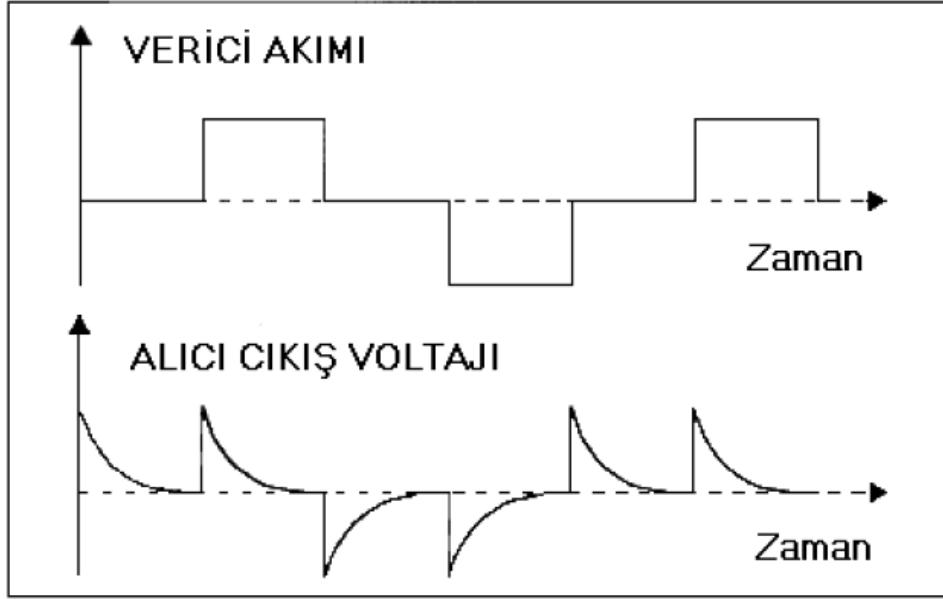
Genel olarak Geçici Elektromanyetik yöntem olarak adlandırılan bu yöntemde (Transient Electromagnetic (TEM) Method), yapılan ölçüler zamana bağlı olduğundan, Zaman Ortamı Elektromanyetik yöntem (Time Domain Electromagnetic (TDEM) Method) olarak da adlandırılır.



Şekil 3 TEM yönteminde arazi yerleşimi ve Eddy akımlarının akışı (McNeill, 1990)

TEM yönteminde ölçü düzeni birkaç farklı şekilde olabilmektedir. Bizim gerçekleştirdiğimiz bu çalışmada ise Şekil 3'te görülmekte olan in-loop model dizilim kullanılarak ölçüler alınmıştır. Dışta çoğunlukla tek kablodan oluşan fakat birden fazla sarımın da kullanılabilceği bir verici halka (loop) vardır. Bu sistemin tam orta noktasında ise, firmalar tarafından özel olarak üretilen çok sarımlı alıcı bobin bulunur. Bu bobinin, boyutu ve sarım sayısı sabit, dışarıda kullanılan verici halkanın ise hem boyu hem de sarım sayısı değişebilmektedir. Sığ yapıların araştırılması için verici loop boyunun birkaç metre olması yeterli iken, amaç derin yapıları araştırmak olduğunda ise bu loop boyu birkaç yüz metre olmalıdır.

TEM yönteminde, dıştan dolaştırılmış olan loop içinden kare dalga biçimli akım geçirilerek, yer içinde birincil elektromanyetik alan yaratılır. Akımın kesilmesiyle birlikte, bu birincil elektromanyetik alanın tetiklediği ikincil elektromanyetik alanlar ölçülür (Şekil 4).



Şekil 4 TEM yönteminde alıcı ve verici dalga biçimi (Kaya, 2002)

Ölçüm sistemi, eğrinin tümünün ölçülmesi yerine seçilen küçük zaman aralıklarında (pencerelerde) ölçü alma prensibine dayanır. Ölçüsü yapılan bu küçük pencerelerin erken olması sığ derinliklerden bilgi taşırken geç zaman da ölçülmesi ise derin yapılara ait bilgileri içerir.

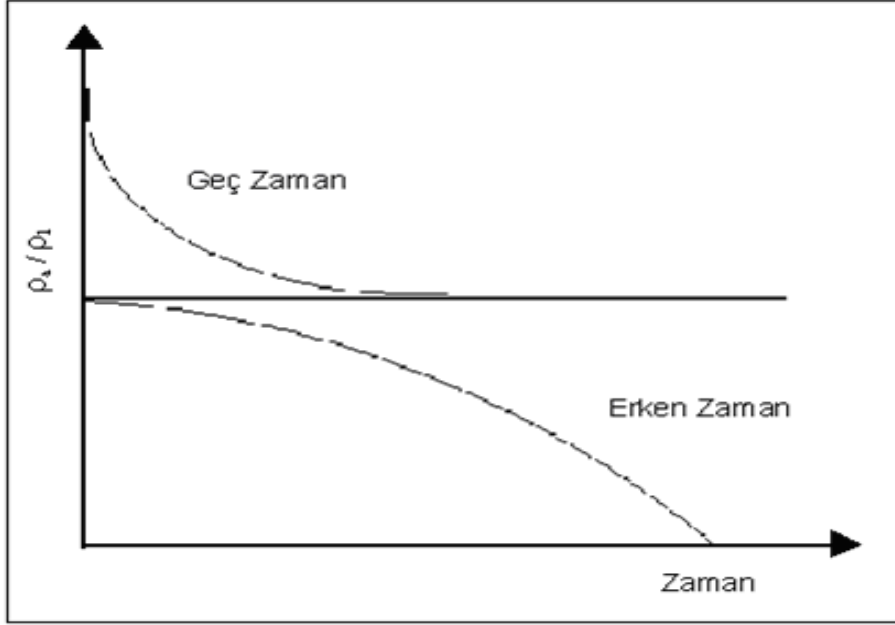
Akım yoğunluğunun en büyük olduğu derinlik,

$$\delta_{TEM} = \sqrt{\frac{2t}{\sigma\mu_0}} \quad (18)$$

bağıntısıyla hesaplanabilir. Bu eşitlikten görüldüğü gibi araştırma derinliği iletkenlikle ters orantılıdır. İletkenlik arttıkça araştırma derinliği azalır, iletkenlik azaldığında ise derinlik de artar. En sığ araştırma derinliği ilk örnekleme zamanının erken (küçük) olmasına bağlıdır. Araştırma derinliğini arttırmak için, son örnekleme zamanının olabildiğince geç (büyük) olması gerekmektedir.

TEM yönteminde ölçüm yapılan tüm zaman aralıkları için tek bir görünür öz direnç hesaplamak mümkün değildir. Bundan dolayı, erken zaman (early time) ve geç zaman (later time) olarak tanımlanan iki dilimde asimptotik bağıntılar kullanılarak iki tür görünür öz direnç eğrisi hesaplanır.

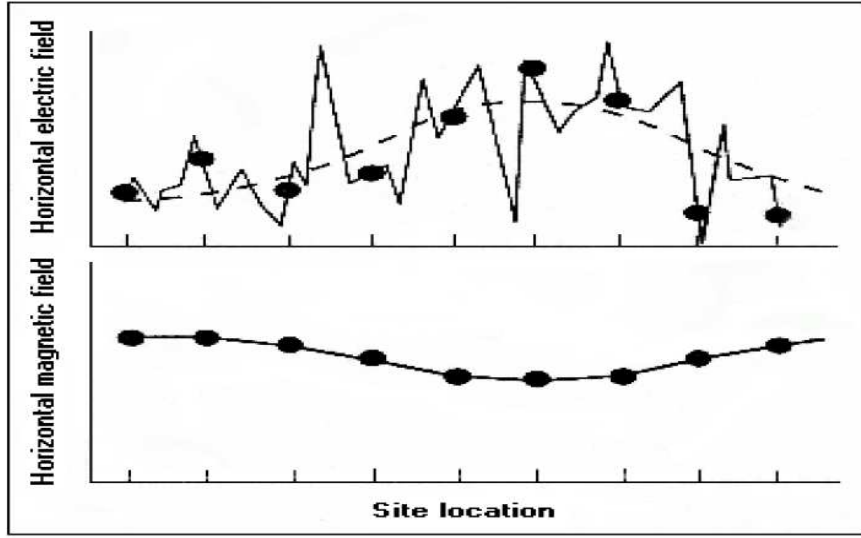
Erken ve geç zamanlarda görünür öz direnç asimptotik eğrileri, aşağıdaki şekilde gösterilmiştir (Şekil 5).



Şekil 5 Homojen ortam üzerinde erken ve geç zamanlar için görünür öz dirençler (Spies ve Eggers, 1986)

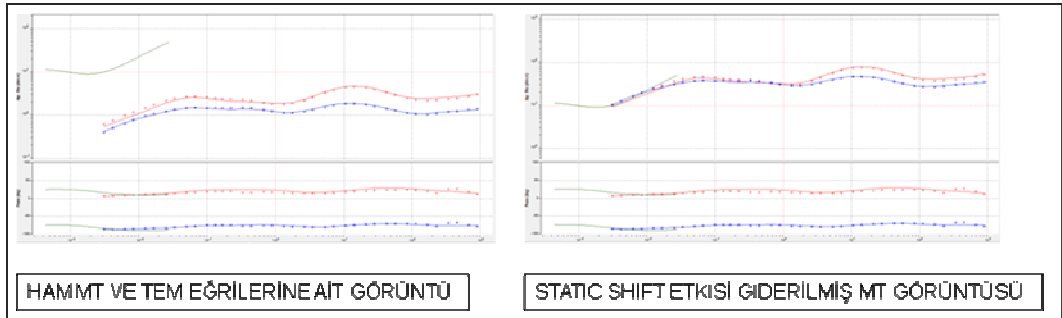
2.2.1 Sabit Kayma

Sabit kayma, static shift ve durağan kayma olarak da adlandırılmaktadır. MT yöntemde sabit kayma, galvanik etkiden dolayı oluşmaktadır. Yüksek frekanslı dalgalar sığ derinliklerde soğrulacağından, derinlerdeki kütleler yüksek frekanslardan etkilenmezler. MT frekans aralığında yüksek frekanslarda sadece yüzeye yakın kütlelerin etkisi vardır. Yüzeylemiş ya da yüzeye çok yakın bir kütle, yüksek frekanslar tarafından algılanır ve oluşan galvanik etki düşük frekanslar üzerine de yansır. Böylece tüm MT eğrisi üzerinde sabit kayma oluşur (Kaya, 2002).



Şekil 6 Elektrik ve manyetik alan genliğindeki değişimler (Utada ve Munekane, 2000)

Aşağıdaki örnekte (Şekil 7), MT-401 istasyonuna ait sabit kayma etkisinin düzeltilmesi görülmektedir. TEM eğrisi ile MT eğrisinin TE ve TM modları arasında kaymayı düzeltmek için TE modundaki eğriyi 16.95'lik bir sabit kayma etkisi, TM modunda ise 25.11'lik bir sabit kayma etkisi görülmektedir.



Şekil 7 MT-401 İstasyonuna ait Sabit Kayma etkisinin düzeltilmesi.

2.3 ELEKTRİK ÖZDİRENÇ (DAÖ) YÖNTEMİ

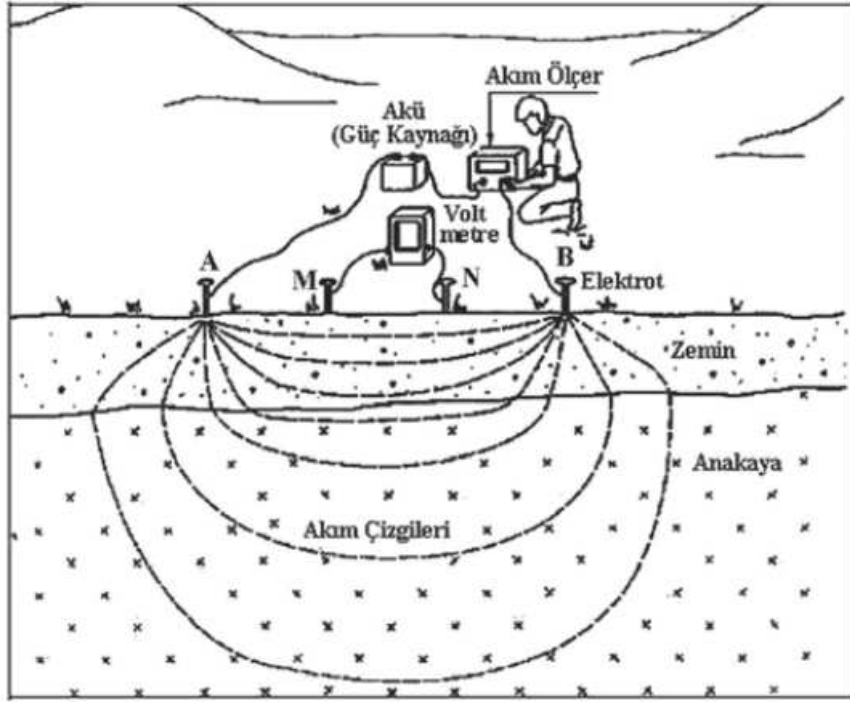
Yeraltındaki yapıların elektriksel özelliklerinin farklı olmasından yararlanarak, yüzeyden iki ayrı noktadan bir çift elektrot ile yer içine gönderilen akımın, diğer iki elektrotta meydana getireceği potansiyel farkın ölçülmesi ilkesine dayanan, yapay kaynaklı bir yöntemdir. Ölçülen bu potansiyel farklardan yararlanarak yeraltı yapısı ortaya çıkarılabilir.

DES yönteminde yer yüzeyinden yapılan potansiyel ölçüleriyle yer altı katmanlarının derinlik ve öz direnç değerleri saptanır. Bu yöntemin ilk makaleleri Stefanescu ve Schlumberger (1930) tarafından yazılmıştır. Pekeris (1940); yeraltı katmanlarının saptanması amacıyla doğrudan yorum yöntemini sunmuştur. Vazoff (1958), bir-boyutlu yer elektrik kesiti için sayısal analiz yöntemi geliştirmiştir. Zohdy (1965) yardımcı nokta kartları yöntemini geliştirmiştir. Koefoed ve diğ. İle Wiener-Hopf en küçük kareler yöntemini kullanarak süzgeçlerin katsayılarını saptamışlardır. Ghosh (1971) görünür öz direnç standart eğrilerinin hesaplanmasında kullanılan ters süzgeç katsayılarını hesaplamıştır.

Düşey elektrik sondajı (DES), uygulamalı jeofiziğin en eski yöntemlerinden biridir. Buna karşılık günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yeraltının, yatay ya da düşey yöndeki elektriksel iletkenlik farklarından yararlanarak kayaçların türleri, formasyonların belirlenmesi, jeolojik ve tektonik yapının ortaya konması, elektrik yöntemlerin uygulamasındaki temel amaçtır. Bu amaç doğrultusunda araziden elde edilen görünür öz direnç değerleri, çeşitli değerlendirme yöntemleri (abak çakıştırma, modelleme v.b.) yardımıyla değerlendirilerek ortamlara ait öz direnç değerleri hesaplanır (Aşcı, 2004).

Aletlerin ekonomik olması, bilgi ve deneyim birikiminin fazla olması ve arazide rahatça uygulanabilir olması yöntemin yaygın olarak kullanılmasında en önemli faktörler olarak öne çıkmaktadır.

Dünyada kullanılan en yaygın yapay kaynaklı öz direnç yöntemidir. Bu yöntemde çözümü istenen problemlerin farklı olması halinde farklı ölçü alım teknikleri geliştirilmiştir. Sabit bir noktadan simetrik açılım yaparak yerin düşey yöndeki değişimini izlemek amacıyla geliştirilen düşey elektrik sondajı (DES), yanal süreksizliklerin araştırılması için geliştirilen yatay kaydırma (profil) ölçümü, hem yanal hem düşey yöndeki değişimlerin saptanması amacıyla geliştirilen sondaj profili tekniği öz direnç yönteminde kullanılan ölçüm tekniklerinden bazılarıdır.



Şekil 8 Özdirenç yönteminin arazi uygulaması (Robinson ve Coruh,1988)

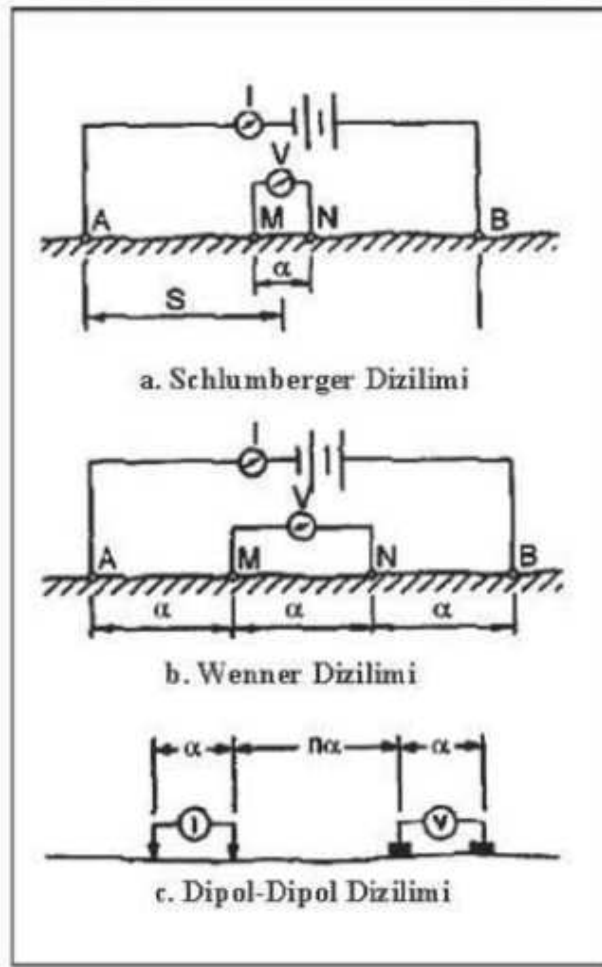
Düşey elektrik sondajı, yer altı yapısını derinlere doğru incelemek amacıyla, sabit bir merkez noktasına göre simetrik olarak yerleştirilen akım elektrotlarının, alınan her ölçüden sonra artan aralıklarla yanlara doğru kaydırmak suretiyle yapılır. Akım elektrotları arasındaki uzaklığın artırılması, akımın derinlere inmesine dolayısıyla daha derinlerdeki yapıların özdirenç özellikleri hakkında bilgi toplanmasını sağlar. Böylece sabit bir noktanın düşey yöndeki değişimi belirlenmiş olur. Ancak, uygulamada akım elektrotları arasındaki mesafe, potansiyel elektrotları arası mesafeye göre çok büyük olduğu zaman okunan potansiyel fark alet duyarlılığının altında kalabilmektedir. Bu durumda, potansiyel elektrotları arası mesafeyi arttırmak gerekir. Bu da özdirenç eğrisinde sıçramalara yol açar. Bu şekilde parçalı olan arazi eğrisi tek parça haline getirilmelidir.

Profil ölçümü, bir hat boyunca yanal süreksizliklerin belirlenmesi amacıyla uygulanır. Araştırılmak istenen derinliğe göre belirlenmiş sabit bir elektrot aralığı ile kurulan dizilim, her ölçüden sonra profil boyunca kaydırılarak ölçme işlemi sürdürülür. Bu ölçü tekniği daha çok kırıkçatlakların, fayların yerlerinin belirlenmesinde ve dayk gibi yapıların araştırılmasında kullanılır.

Sondaj-Profil ölçümü, bu ölçümde sondaj ve profil ölçü teknikleri birlikte kullanılır. Bir hat boyunca belirlenmiş noktalar üzerinde ölçülmüş DES değerleri birlikte sunulur. Bu yöntem ile yeraltında hem yanal hem de düşey yöndeki özdirenç dağılımı belirlenir.

Wenner elektrot dizilimi, yanal süreksizliklerin belirlenmesi için kaydırma ölçü tekniği kullanılarak oldukça hassas bir şekilde çözümler sunmaktadır. Ölçme işlemi elektrot arası mesafe değişmeden profil boyunca kayarak veya ölçü noktası etrafında simetrik biçimde açılarak devam eder. Yanal yöndeki değişimler bu dizilimle daha kolay saptanır. Ancak, bu dizilim geometrisinde araştırma derinliği diğer dizilim tertiplerine göre daha azdır (akım elektrotları arasındaki uzaklığın yaklaşık üçte birine kadar derinlikten bilgi alınabilir). Nüfuz derinliği az olduğundan sığ yapıları yüksek çözünürlükle belirleyebilmektedir (Wightman ve diğ., 2003). Daha fazla kablo ve personel gerektirmesi dizilimin diğer dezavantajıdır. Dizilimin gürültüye karşı daha az duyarlı olması ise avantajıdır.

Dipol - Dipol elektrot dizilimi, nüfuz derinliği en fazla olan dizilimdir. Ayrıca düşey süreksizliklerin belirlenmesinde oldukça duyarlıdır. Dizilim, düşey yapıların haritalanmasında iyi sonuçlar vermektedir.



Şekil 9 Elektrik özdirenç ölçümlerinde elektrot dizilimleri (Wightman ve diğ.,2003)

Düşey elektrik sondajında elde edilen özdirenç değerleri, tüm açılım türlerinde çift logaritmik kağıda çizilir. Böylece, hem akım elektrotları arasındaki küçük-büyük değerler hem de özdirençlerdeki tüm değişimler aynı anda ve aynı ortamda görülmesi sağlanır.

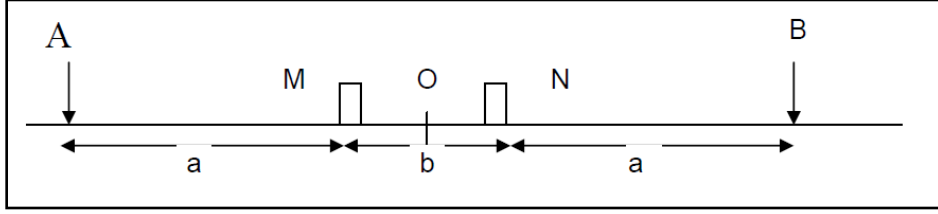
Jeofizik ölçümlerde, genel dizilim yerine akım ve potansiyel elektrotlarının yerleri değiştirilerek türetilmiş özel dizilimler kullanılır. Bu dizilimlerin özellikleri göz önünde bulundurularak karşılaşılan jeolojik probleme göre sonuca gitmede en etkili olan dizilim seçilir. Klasik elektrot dizilimlerinden birkaçı, simetri merkezine göre bir çizgi boyunca dizilen Schlumberger ve Wenner dizilimleridir. Bir başka yaygın kullanılan dizilim turu Dipol-Dipol'dür. Schlumberger elektrot dizilimi, genellikle düşey elektrik sondaj(DES) ölçüm tekniği ile birlikte kullanılır ve yatay veya yataya yakın tabaka sınırlarının derinlik ve özdirençlerinin belirlenmesinde kullanılır. Araziye uygulanması oldukça pratiktir ve bu nedenle çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu dizilim, Wenner dizilimine göre derinlerden daha kolay bilgi alınmasını sağlamaktadır.

Yer altı eğer homojen olmasaydı, yüzeyde bir noktadan yere verilen akımın yine yüzeyde farklı bir noktada meydana getireceği potansiyel, Ohm kanunundan yararlanarak kolayca hesaplanabilir. Fakat yeraltı; hemen hemen hiçbir durumda homojen bir yapı göstermez. Yeraltı genelde, fiziksel, kimyasal, litolojik farklılıklar gibi bir çok etkene bağlı olarak heterojen bir yapı gösterir. Bu tür heterojen yapıya sahip yerlerde, yere verilen akımın yeryüzünde herhangi bir noktada oluşturacağı potansiyeli analitik olarak hesaplamak oldukça karmaşık işlemler gerektirir. Bunun için farklı yöntemler olmasına karşın, en çok tercih yöntem, Laplace denkleminin sınır şartlarına bağlı olarak kullanılan çözümdür..

Özdirenç (Rezistivite) yönteminde yere A ve B gibi iki noktadan akım gönderilir, M ve N gibi iki nokta arasında oluşan potansiyel fark ölçülür. Bu potansiyel fark;

$$V_M - V_N = \Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right] \quad (19)$$

ile verilir.



Şekil 10 Schlumberger Elektrot dizilimi (Altunkaynak, 2005)

Burada geometrik faktör;

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{a} - \frac{1}{a+b} - \frac{1}{a+b} + \frac{1}{a}} = \pi \left(\frac{a^2}{b} + a \right) \quad (20)$$

İle verilir.

Bu dizilim sisteminde görünür özdirenç;

$$\rho_{aS} = \pi \left(\frac{a^2}{b} + a \right) \frac{\Delta V}{I} \quad (21)$$

Şeklinde ifade edilir.

İNCELEME ALANININ JEOLJİK ve JEOFİZİK ÖZELLİKLERİ

3.1 Çalışma Alanının Jeolojisi

3.1.1 Stratigrafi

İnceleme alanında temeli Üst Kretase yaşlı Dağardı melanji oluşturmaktadır. Temel biriminin üzerine taban konglomerasıyla açısız uyumsuzlukla Miyosen yaşlı volkano tortul kaya topluğu gelmektedir. En üstte Kuvaterner yaşlı çökeller daha yaşlı birimleri açısız uyumsuzlukla örtmektedir.

Üst Kretase-Eosen

İnceleme alanının temelini oluşturan serpantinleşmiş peridotitler, gabro-diyabaz, şarabi renkli pelajik çökeller, çört, çamurtaş, mikritik kireçtaş, kristalize kireçtaş ve mermer bloklarından oluşan birim, ilk kez Akdeniz ve Konak (1979) Dağardı melanji (Kdm) olarak tanımlanmış olup oluşum ve yerleşim yaşı olarak Üst Kretase Eosen aralığı önerilmiştir.

Miyosen

İnceleme alanında Üst Kretase yaşlı ofiyolitik melanjin üzerine uyumsuz olarak oturan Miyosen yaşlı birimler alttan üste doğru, taban konglomerası, gösel çökeller, tuf, beyaz renkli dasitler, piroklastik kayalar ve gaz boşluklu bazaltlardan oluşmaktadır.

Taban Konglomerası (Tmk): Kırmızı kahverengi renkli, konglomera, metamorfik kayaç (kuvarsit, gnays, şist) çakıllarından oluşan iyi yuvarlaklaşmış, kötü boylamlı ve sıkı silis çimentoludur. Üst kesimlere doğru ince taneli çakıltaşları ve kumtaşlarına geçer.

Gösel Çökeller (Tmg): Yanal ve düşey yönde geçişli alttan üste doğru siltaşı, tuf, tüfit, marn, killi kireçtaş, kireçtaş, borat çökelleri, tuf, tüfit, kıltaşı yer yer de opalli silisifiye kireçtaş düzeylerinden oluşmaktadır.

Tuf (Tmt): Beyaz renkli, dasitik tüflerden oluşur, dasit dayk, apofiz ve domları tarafından yoğun olarak kesilmiştir. Genellikle kristal tuf özellikleri, yer yer de litik özellikler sunmaktadır.

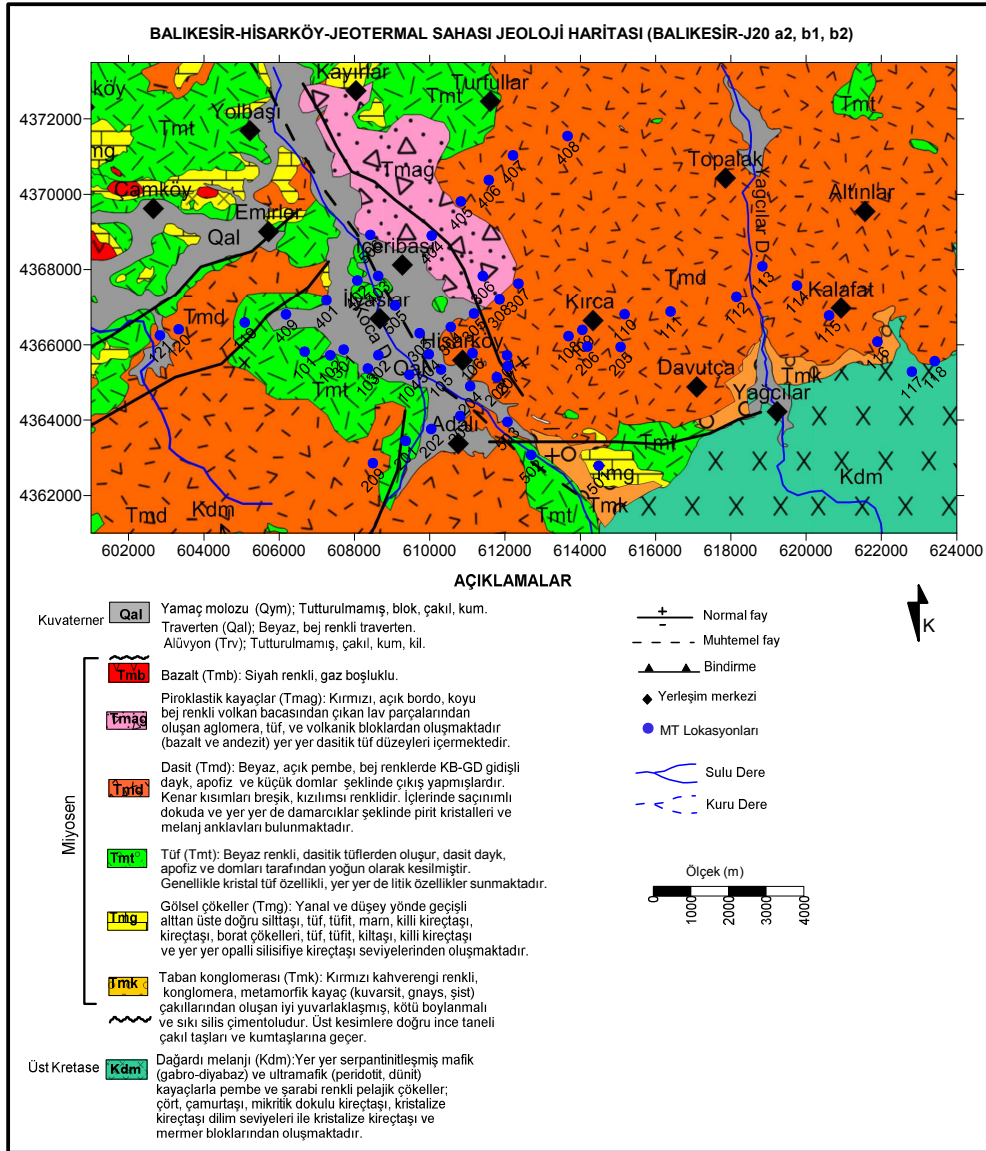
Dasit (Tmd): Beyaz, açık pembe, bej renklerde KB-GD gidişli dayk, apofiz ve küçük domlar şeklinde çıkış yapmışlardır. Kenar kısımları breşik, kızılımsı renklidir. İçlerinde saçınımlı dokuda ve yer yer de damarcıklar şeklinde pirit kristalleri ve melanj ait anklavlar bulunmaktadır.

Piroklastik Kayalar (Tmag): Kırmızı, açık bordo, koyu bej renkli volkan bacasından çıkan lav parçalarından oluşan aglomera, tuf ve volkanik bloklardan oluşmaktadır. (bazalt ve andezit) yer yer dasitik tuf düzeyleri içermektedir.

Bazalt (Tmb): Siyah renkli, gaz boşluklu.

Kuvaterner

Çalışma sahasında Kuvaterner'de daha yaşlı birimlerin üzerine açılal uyumsuzlukla oturan kötü boylanmış blok ve çakıllı yamaç molozu ve kum – kil – çakıldan oluşan güncel alüvyonlar bulunmaktadır.



Şekil 11 Çalışma alanının jeolojisi (Burçak ve diğ.,2006).

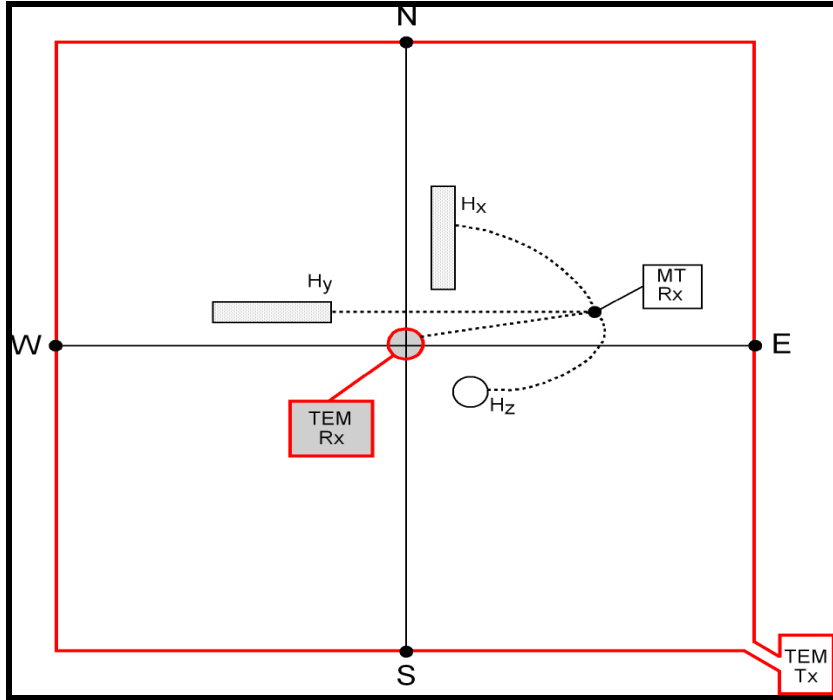
3.1.2 Yapısal Jeoloji

İnceleme alanında iki ana fay hattı bulunmaktadır. Birincisi Okçular-Hisarköy-Kıran Tepe den geçer ve KB-GD doğrultuludur, ikincisi ise sahanın güneyinden geçer ve yaklaşık D-B doğrultuludur. Bu fayların kuzeybatısındaki blok alçalmaktadır. Güneydeki büyük fay, daha genç olan KB-GD doğrultulu faylarla ötelenmiştir. Bu fayların da güney blokları çökmüştür. Saha güneyde sınırlanan ve kuzeybatıya doğru derinleşen bir graben görünümündedir.

3.2 İNCELEME ALANININ JEOFİZİK ÖZELLİKLERİ

Bu çalışmada, tüm MT istasyonlarında, statik düzeltme işlemini gerçekleştirebilmek için aynı noktalarda TEM ölçüleri de alınmıştır. Her ne kadar seri ve paralel empedansların statik kayma etkisini azalttığı söylene de tamamen ortadan kaldırmamaktadır. Bundan dolayı bilinen en klasik metot olan TEM yöntemi ile statik düzeltme işlemi gerçekleştirilmiştir.

Zaman serisi olarak kayıt edilen manyetotellürik verileri, Fourier dönüşümü yapılarak, frekans ortamına dönüştürüldükten sonra matematiksel işlemler burada gerçekleştirilmiştir. Her ölçü datası için EDI formatında dosyalar oluşturulmuş ve iki empedans elde edilmiştir. MT yöntemindeki merkezle aynı merkeze denk gelecek şekilde TEM ölçü düzeni kullanılmıştır (Şekil 12). TEM yönteminde, üç farklı frekansta ölçüler alınmış ve bir istasyon için tek bir veri kümesi (elektromanyetik alanın zamana göre türevi) elde edilmiştir. Bu veri kümesinden elde edilmiş görünür özdirenç değerleri kullanılarak elde edilmiş olan bir boyutlu (1-B) modeller yorumlanmıştır. TEM verilerinin yorumu ile elde edilen modeller kullanılarak, kuramsal MT değerleri hesaplanmıştır. Kuramsal 1-B MT empedans değerleri, MT verisinin yüksek frekans aralığını da kapsayacak şekilde hesaplanmıştır. Ölçülen MT görünür özdirenç değerleri, kuramsal veriye yüksek frekanslarda uyum sağlayacak şekilde kaydırılarak, sabit kayma etkisi giderilmiştir.



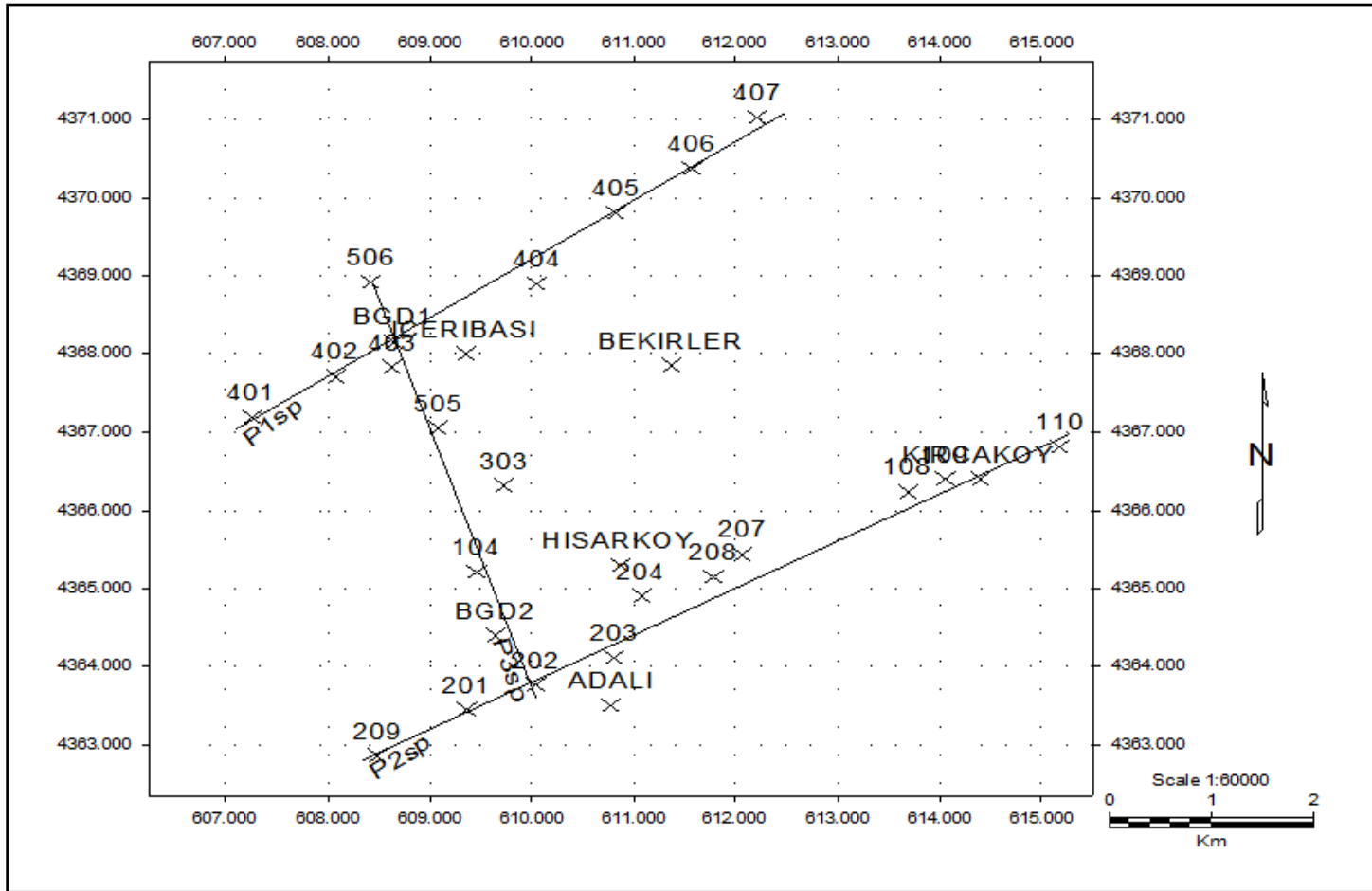
Şekil 12 MT ve TEM için aynı noktada yerleşim (Kılıç, 2009).

3.3 Modelleme

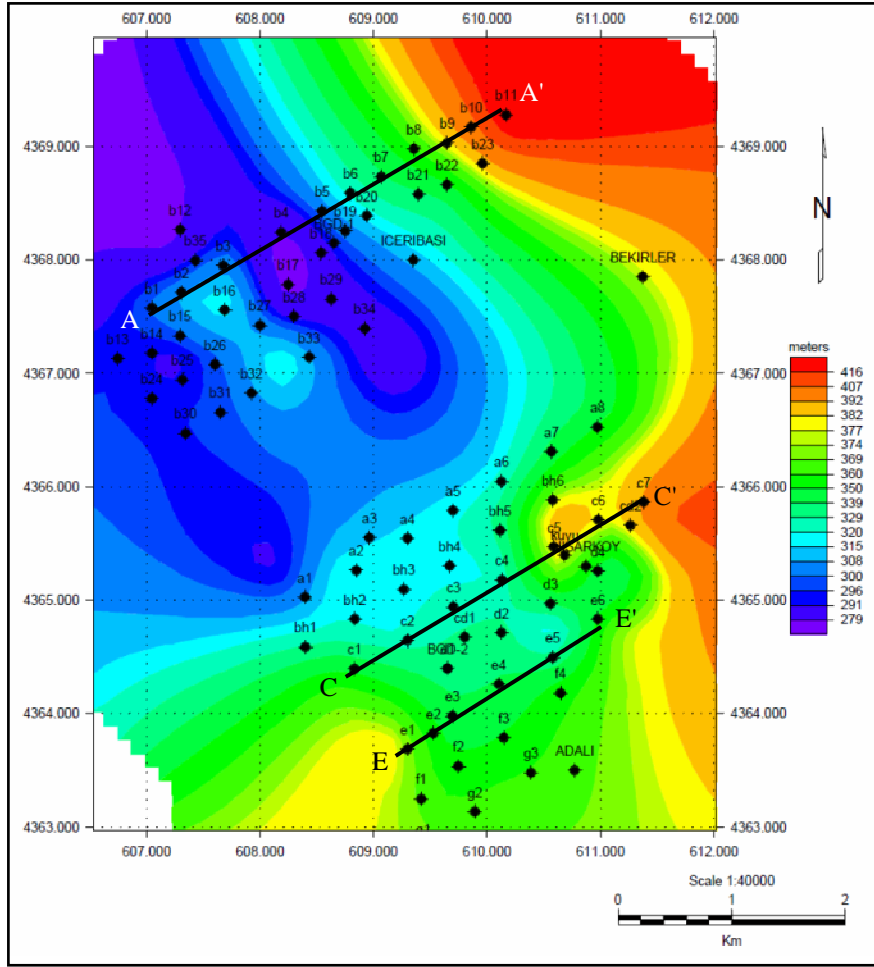
Yeraltına ait gerçek özdirenç dağılımını belirlemek için, tüm profillere iki-boyutlu (2-B) ters çözüm işlemi uygulanmış ve 2-B yer elektrik modelleri elde edilmiştir. Bu yer elektrik kesitlerindeki özdirenç dağılımları, bölgenin jeolojik yapısına ait bilgileri taşır. Bu ters çözüm ve modelleme işlemlerini gerçekleştirmek için, WinGlink® adlı paket program kullanılmıştır. Bu yazılım, veri hazırlama, 1-B ve 2-B modeller elde etme, kesit hazırlama ve veri sunumu işlemlerini kullanıcının görsel denetimine sunmaktadır. Kesitler üzerinde değişiklikler yapmaya izin vermektedir.

Mackie vd. (1997) tarafından geliştirilen yazılımda, sonlu farklar ağı ile verilen elektrik yapı kesiti üzerinden “Network Analogy” (Madden 1972; Jupp and Vozoff 1977) hesaplama yöntemi ile 2-B model için düz çözüm yapılmaktadır. Sonlu farklar ağında hücrelerin kalınlık ve genişlikleri kullanılan frekanslara ve ölçülen görünür özdirençlere veya kestirilen ortalama ortam özdirençine bağlı olarak seçilmektedir. Jeolojik yapılarının özdirençleri göz önüne alınarak, ağı oluşturan hücrelere istenilen özdirenç değerleri atanarak elektriksel yapılar oluşturulur. Ağ üzerinden yapılan düz çözüm işlemi ile Seri ve Paralel empedanslar kullanılarak, kuramsal Cagniard (1953) görünür özdirenç ve empedansın faz değerleri elde edilmiştir.

Sahada, Manyetotellürik (MT) ve DES yöntemleri kullanılarak arazi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemlerde, yer altına ait özdirenç değişimleri modellenmiş ve sahanın tektonik, jeolojik ve jeotermal potansiyeli hakkında bilgiler üretilmiştir. MT ve DES arazi çalışmalarını gösteren lokasyon haritaları Şekil 13 ve 14’te görülmektedir.



Şekil 13 MT Lokasyon Haritası



Şekil 14 DES Lokasyon Haritası

3.4 İki yöntemin (S-P / TE-TM) karşılaştırılması

Her iki yöntemle elde edilmiş kesitler Şekil 11 ve Şekil 12'de beraber verilmiştir. Her iki kesitte de sondaj lokasyonları ve derinlikleri gösterilmektedir. Sondaj sonucu elde edilen litoloji incelendiğinde, BGD-1 Kuyusunda 600 m'ye kadar kesilen jeolojik birimler, BGD-2 kuyusunda 650 m'ye kadar takip edilmiştir. BGD-2 kuyusunda, temel olarak adlandırabileceğimiz Serpantinleşmiş birimlere girilmeden sondaj sonlandırılmıştır. Buradan anlaşılacağı üzere, örtü birimler, BGD-2 kuyusunun bulunduğu lokasyonda, BGD-1 kuyusundan daha kalındır.

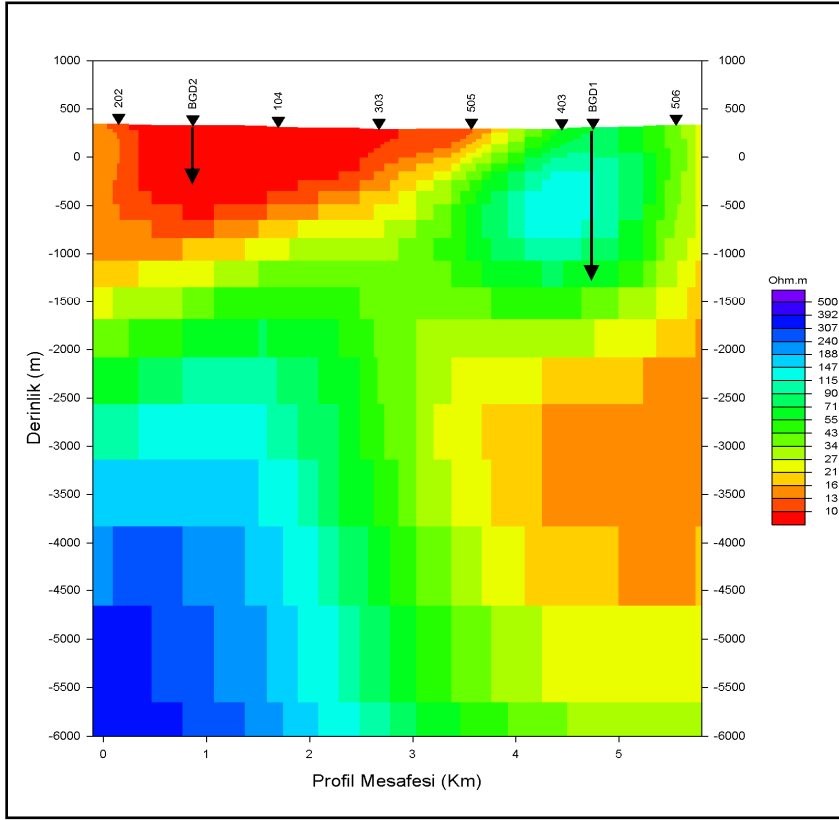
Bu iki sondaj lokasyonu MT - P3 profili üzerinde bulunmaktadır. Bu profilin her iki yöntemle (Seri - Paralel Empedans ve TE-TM moduna göre çözüm) oluşturulmuş modelleri aşağıda gösterilmiştir. Her iki metotla elde edilen kesitlerde, BGD-2 sondaj lokasyonunun olduğu bölge, hemen hemen aynı öz direnç değerlerine ve dağılımına sahiptir. Fakat BGD-1 kuyusunun olduğu bölgede birbirlerinden çok farklı dağılımlar sergilenmiştir.

S-P empedanslarla elde edilen kesitte, örtü birimler ile temel birimler arasında olması gereken ayrımın sağlanamadığı görülmektedir. Bunun yanı sıra, yaklaşık 2000 m'de başlayan ve yaklaşık 5000 m'ye kadar devam eden ve ısı anomalisi olarak yorumlanabilecek bir anomali mevcuttur. Fakat, burada yapılmış olan 1574 m derinlikli sondajdan elde edilen kuyu dibi sıcaklığı 80°C iken, BGD-2 adıyla andığımız ve 650 m derinlikli sondajdaki kuyu dibi sıcaklığı 100°C olarak ölçülmüştür. Bu durum bize, buradaki anomalinin ısı ile ilişkili bir anomali olmadığını göstermektedir.

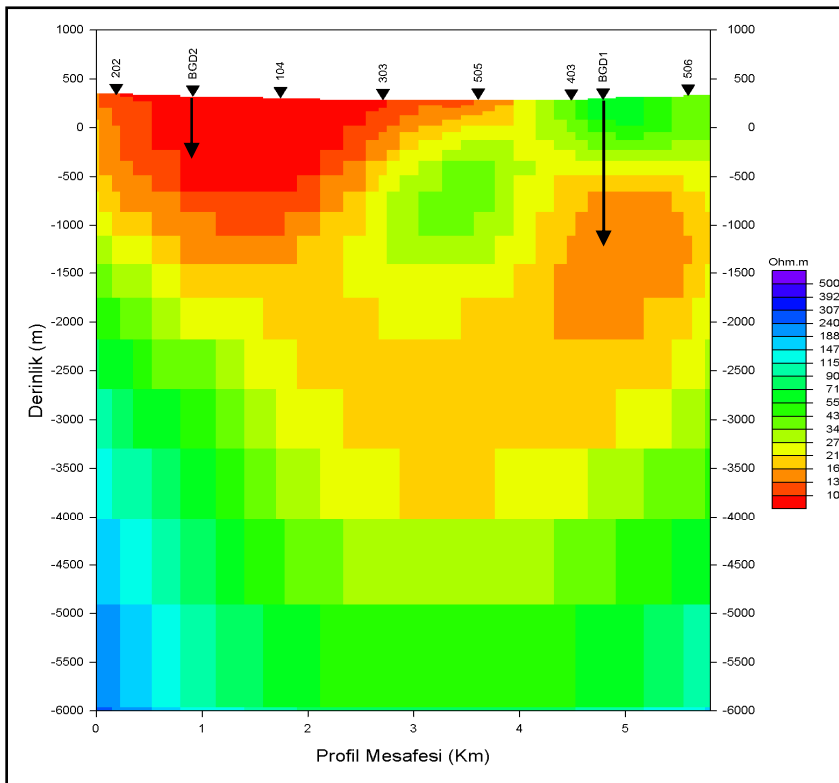
TE-TM modlarına göre oluşturulmuş model incelendiğinde ise, aynı bölgede böyle bir anomali görülmemektedir. Ayrıca, BGD-1 kuyusunun olduğu bölgede, örtü birimler ile temel niteliğindeki birimler arasındaki öz direnç ayrımını oldukça iyi yapmıştır.

Bunların yanı sıra, sahada yapılmış ayrıntılı jeoloji haritasındaki fayları, MT ettiğimiz kesitlerde yerlerine koyulduğu zaman, TE-TM modlarıyla oluşturulmuş kesitler, yapıyı daha iyi temsil etmektedir. Çünkü, oluşturulmuş MT profili, iki ayrı fayın üzerinden geçmektedir. Bu fayların etkilerini TE-TM modlarıyla oluşturulmuş modelde daha iyi görmekteyiz. S-P empedanslarla oluşturulmuş modelde ise sadece tek bir fay sistemi görülmektedir.

Tüm bu nedenlerden dolayı, TE-TM modlarıyla elde edilen modeller, S - P empedanslar kullanılarak elde edilen modellere göre jeolojik modellerle daha uyumludur. Bu aynı zamanda, muhtemel doğruya yakınlık anlamında da TE-TM modlarıyla elde edilmiş modellerin bir adım daha öne çıkmasını sağlamaktadır. Bu nedenle, bu sahayla ilgili tüm kesitlerde, TE-TM modlarıyla elde edilmiş modeller kullanılarak saha yorumlanmaya çalışılmıştır.



Şekil 15 S-P Empedans kullanılarak elde edilmiş P3 Profiline Ait Kesit



Şekil 16 TE-TM modu kullanılarak elde edilmiş P3 Profiline Ait Kesit

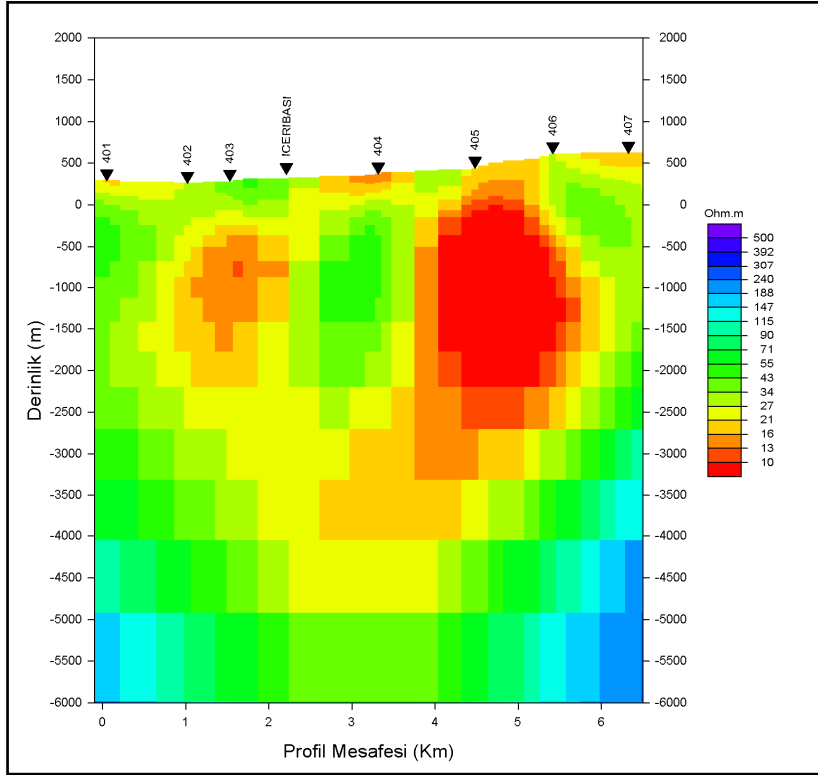
3.5 P1 Profilinin Yorumlanması

P1 profili güneybatıdan kuzeydoğuya doğru uzanan ve yaklaşık 6,5 km uzunlukta olup , 7 adet MT istasyonundan oluşan bir profildir. Profil, havzanın kuzey doğu sınırında bulunmaktadır. Mevcut jeotermal kaynakların uzağında olması, havzada bulunabilecek diğer alanların araştırılmasına dönük oluşturulmuştur.

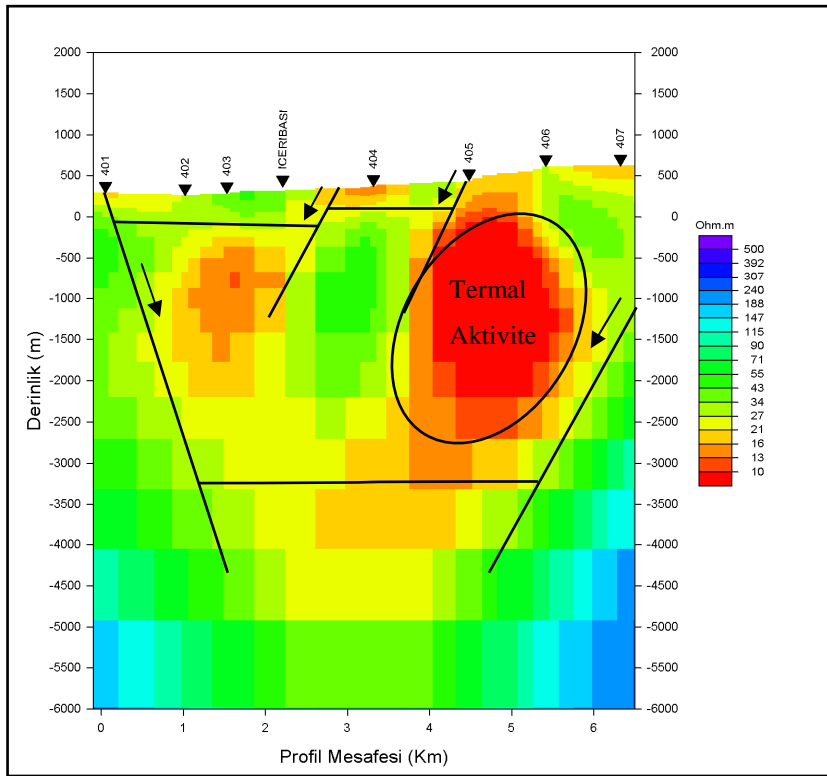
Profil boyunca 7 adet MT istasyonu kullanılarak ters çözüm yapılmıştır. Ters çözümde 83x87 bloktan oluşan model ağı kullanılmıştır. % 2.83 RMS hata ile ters çözüm sonucu elde edilmiş 2B özdirenç modeli Şekil 17'de görülmektedir. Şekil 18'de yorumlanmış yapı kesiti, Şekil 19'da TM ve Şekil 20'de TE mod için ölçülen ve modelden hesaplanan görünür özdirenç ve faz yapma kesitleri görülmektedir.

Model incelendiğinde, jeotermal aktivite olarak yorumlanabilecek anomali, profilin doğusunda bulunan ve derinliği 1000-3000 m arasında olan düşük özdirençli bölgedir. Profilin batısında bulunan anomali ise, sahadaki melanj birimlere bağlı olarak oluşan düşük özdirençli kapanımdır. Normal şartlarda, bu kadar düşük özdirenç vermesi beklenmeyen bu melanj birimlerin (mafik-ultramafik kayalar, serpantin), burada düşük özdirençli olması, termal aktiviteye bağlı olarak gelişebilecek yüksek iletkenlik ve alterasyona bağlı olarak dane boyutunun küçülmesidir.

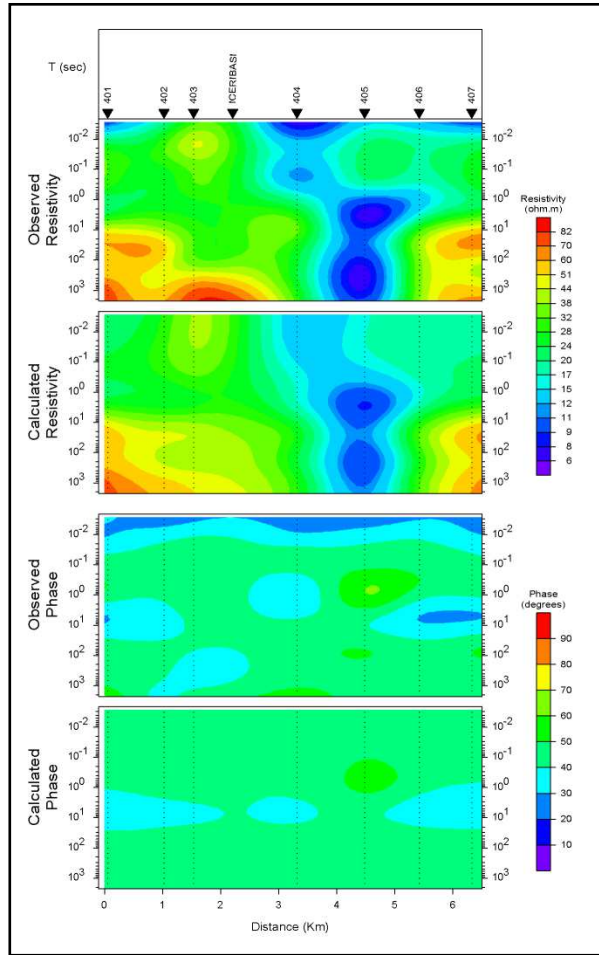
Bu profilde yapılmış olan sondaj, termal aktiviteye çok uzakta planlanmıştır. bu lokasyon şayet 2,5 km daha doğuda yapılmış olsaydı, kuvvetle muhtemel çok daha yüksek sıcaklık elde edilecekti. Fakat, buradaki melanjın düşük özdirençli olması, o bölgenin termal etki olarak algılanmasına ve sondaj planlamasının yanlış bölgeye yapılmasına sebep olmuştur.



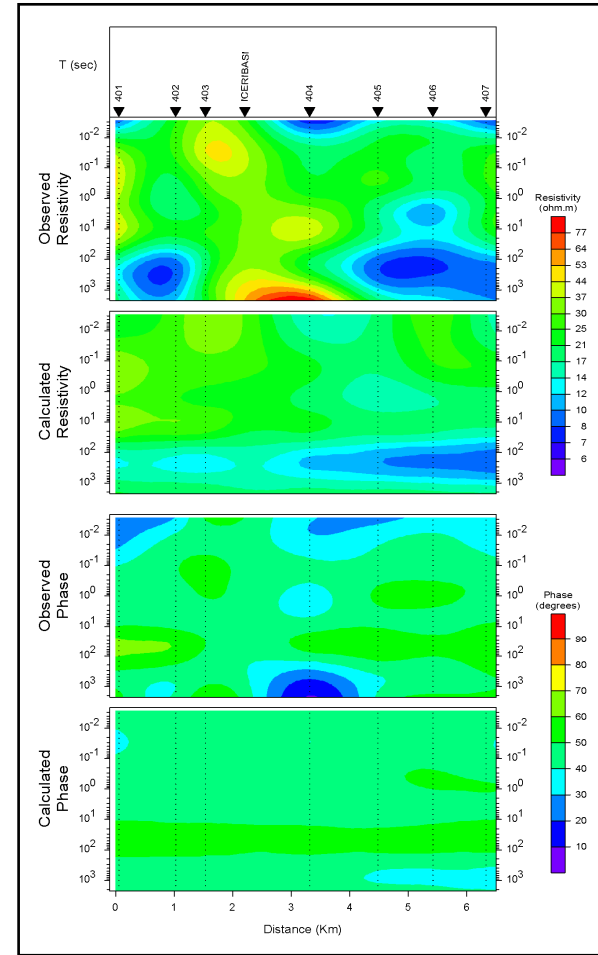
Şekil 17 P1 Profili Boyunca 2-B Ters Çözüm Sonucunda Elde Edilen Özdirenç Modeli.



Şekil 18 P1 Profili Yorumlanmış Özdirenç Modeli.



Şekil 19 P1 Profili Boyunca TM Modu İçin Ölçülen Ve Hesaplanan Görünür Özdirenç Ve Faz Yapma Kesitleri.



Şekil 20 P1 Profili Boyunca TE Modu İçin Ölçülen Ve Hesaplanan Görünür Özdirenç Ve Faz Yapma Kesitleri.

3.6 P2 Profilinin Yorumlanması

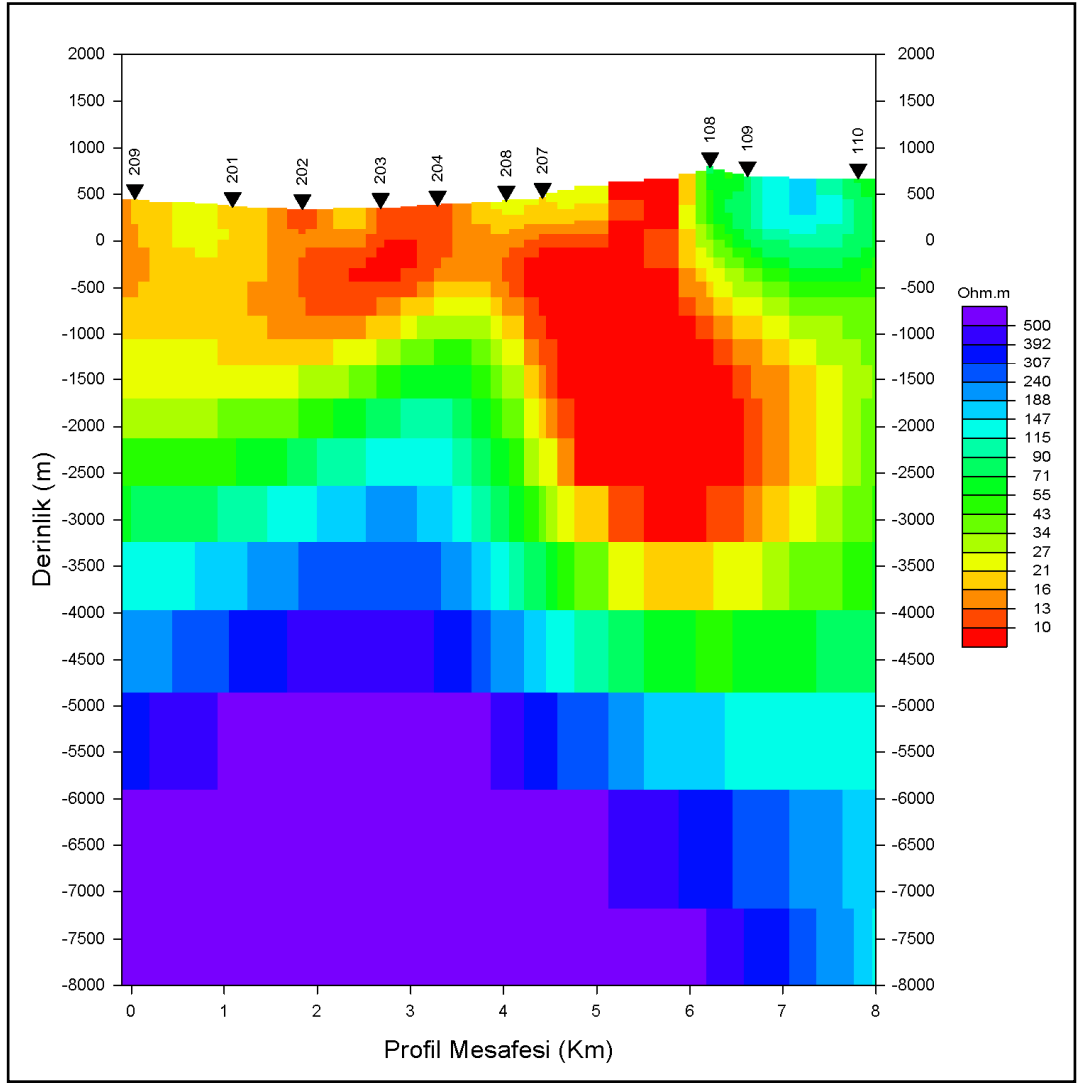
P2 profili güneybatıdan kuzeydoğuya doğru uzanan ve yaklaşık 8,5 km uzunlukta olup , 10 adet MT istasyonundan oluşan bir profildir. P2 profili, P1 profiline göre yaklaşık 5 Km güneyde ve bu profile paralel olarak oluşturulmuştur.

Profil boyunca 10 adet MT istasyonu kullanılarak ters çözüm yapılmıştır. Ters çözümde 89x98 bloktan oluşan model ağı kullanılmıştır. % 2.99 RMS hata ile ters çözüm sonucu elde edilmiş 2B özdirenç modeli Şekil 21'de görülmektedir. Şekil 22'de yorumlanmış yapı kesiti, Şekil 23'te TM ve Şekil 24'te TE mod için ölçülen ve modelden hesaplanan görünür özdirenç ve faz yapma kesitleri görülmektedir.

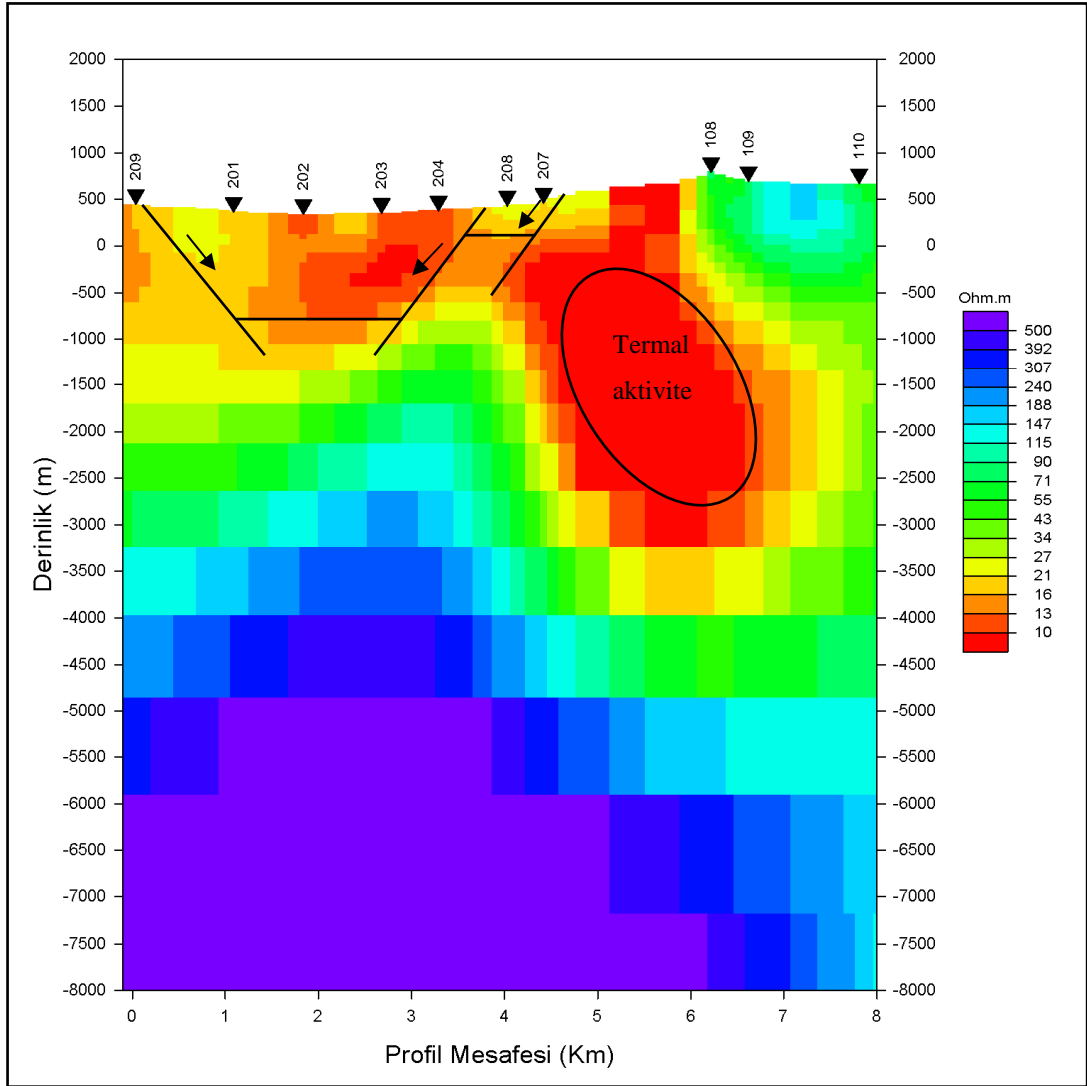
Bu profil, tam olarak Hisarköy kaplıca alanının üzerinden geçmektedir. Bu bölgede yapılmış olan tüm kuyular sığ derinlikli yapılmıştır. genellikle temel birimlerin içinde ilerleme sağlanamadan neojen örtü içersinden, soğuk sularla karışma uğramış sıcak sulara ulaşılmıştır.

Fakat bu bölgede de bir önceki profilde olduğu gibi, termal aktivite daha doğudadır. Güncel çökel havzayı doğudan sınırlayan yüksek tepelerin, termal aktivitenin bulunduğu bölgedir. Bundan dolayı tüm sondaj planlamalarının, bu dağlara doğru yaklaştırılması gerekir.

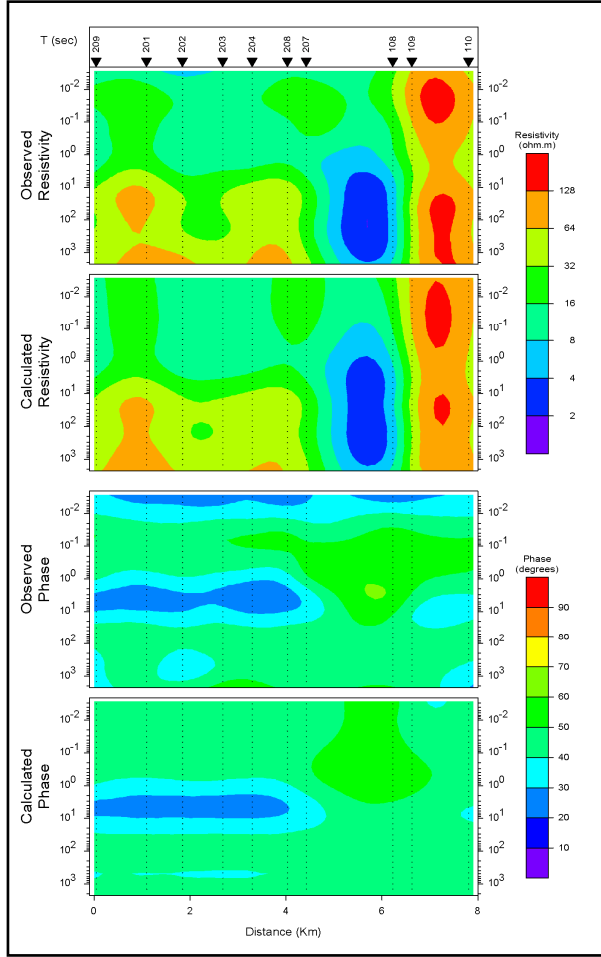
Bu profilin doğusundaki derinleşme, kırık sistemine bağlı olarak değil, bölgedeki termal etkiyle oluşmuş olan düşük özdirençli kapanıma bağlı olarak ortamın farklı davranıyor olmasından kaynaklanan bir görüntüdür. Bu bölgede de yapılacak olan sondajlar, daha doğuya kaydırılması durumunda yüksek sıcaklıklar elde etmek mümkün olacaktır.



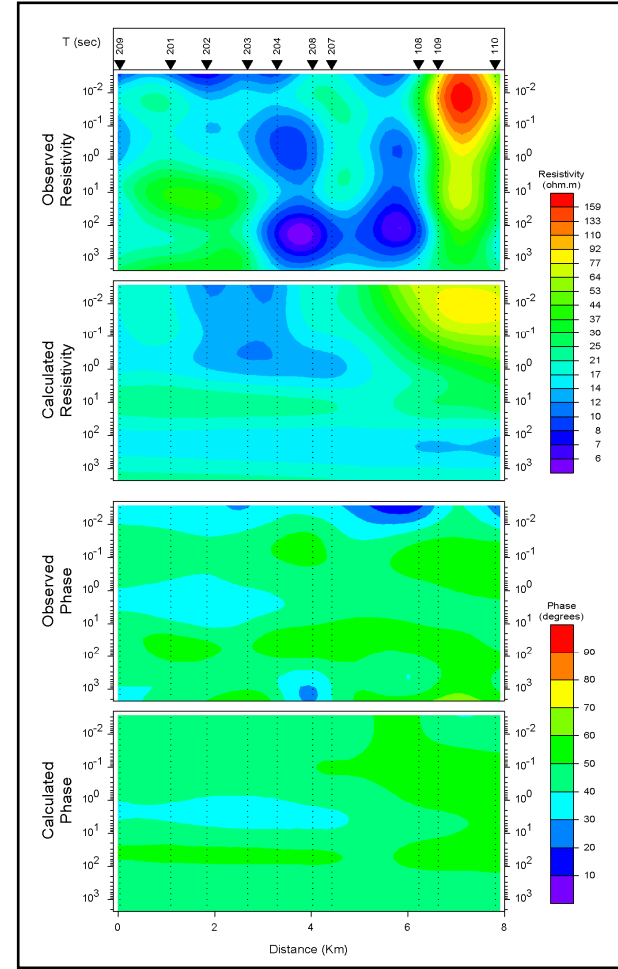
Şekil 21 P2 profili boyunca 2-B ters çözüm sonucunda elde edilen öz direnç modeli.



Şekil 22 P2 Profili Yorumlanmış Öz direnç Modeli.



Şekil 23 P2 Profili Boyunca TM Modu İçin Ölçülen Ve Hesaplanan Görünür Özdirenç Ve Faz Yapma Kesitleri.



Şekil 24 P2 Profili Boyunca TE Modu İçin Ölçülen Ve Hesaplanan Görünür Özdirenç Ve Faz Yapma Kesitleri.

3.7 P3 Profilinin Yorumlanması

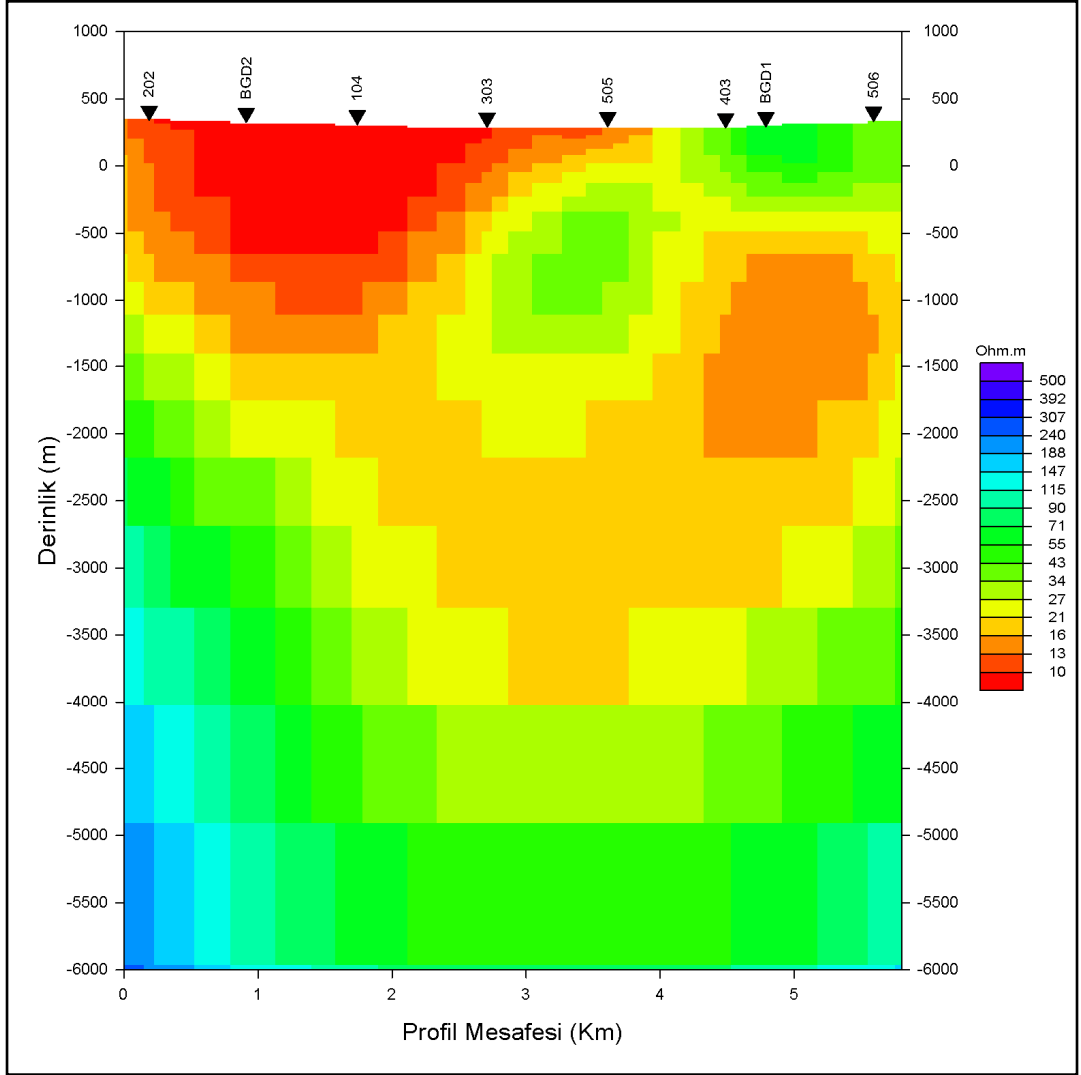
P3 profili güneydoğudan kuzeybatıya doğru uzanan ve yaklaşık 5.5 km uzunlukta olup , 6 adet MT istasyonundan oluşan ve önceki iki profili dik kesecek şekilde oluşturulmuş bir profildir. Bu profil, Adalı'nın 1 Km kadar batısından başlayıp, kuzeyde İçeribaşı'nın 1.5 Km batısında bitmektedir.

Profil boyunca 6 adet MT istasyonu kullanılarak ters çözüm yapılmıştır. Ters çözümde 64x83 bloktan oluşan model ağı kullanılmıştır. % 2.53 RMS hata ile ters çözüm sonucu elde edilmiş 2B özdirenç modeli Şekil 25'te görülmektedir. Şekil 26'da yorumlanmış yapı kesiti, Şekil 27'de TM ve Şekil 28'de TE mod için ölçülen ve modelden hesaplanan görünür özdirenç ve faz yapma kesitleri görülmektedir.

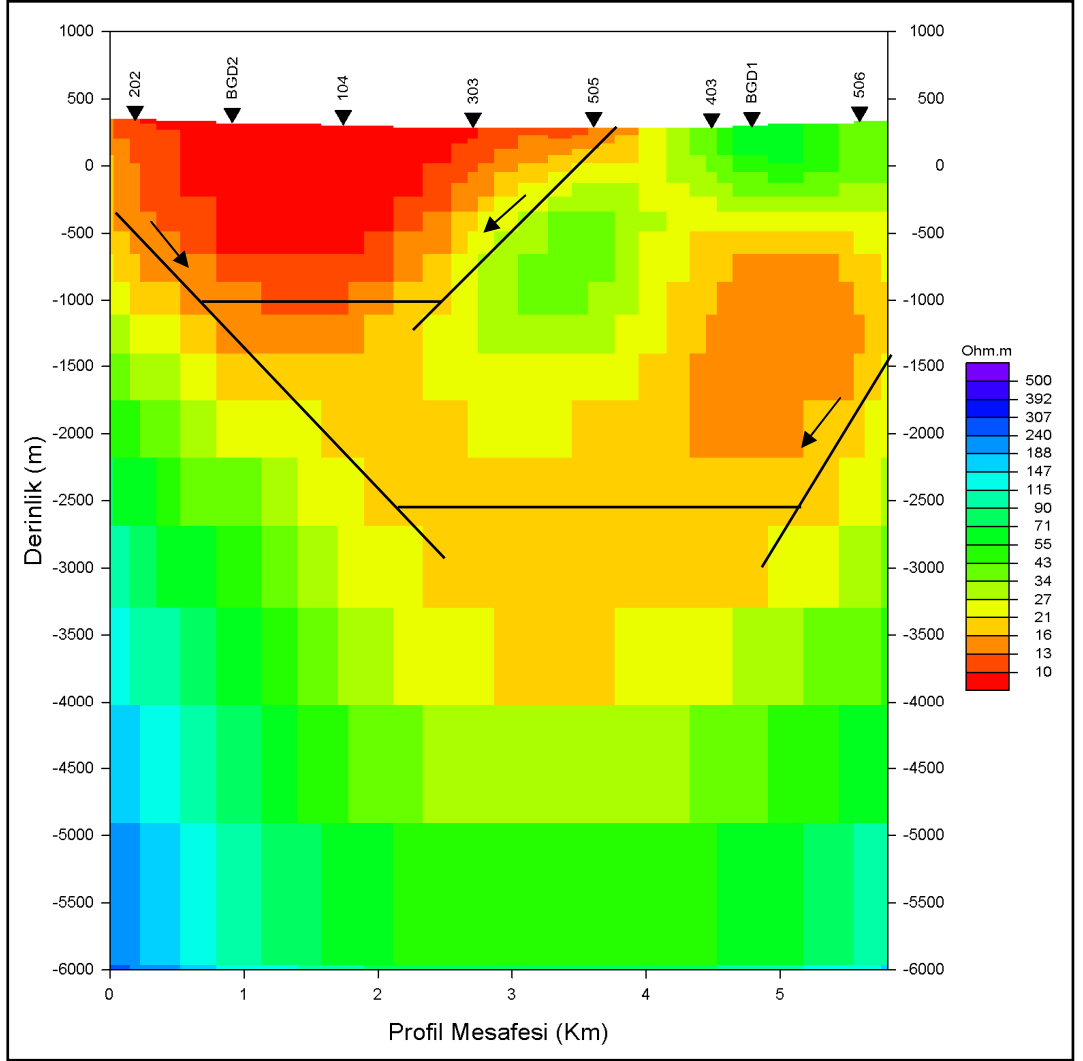
Bu profil, önceki iki profili dik kesecek şekilde oluşturulmuştur. Diğer iki profile göre, tamamen neojen havza içerisinde kalmıştır. Kesitin sağında (kuzeyde) birinci profildeki mafik-ultramafik kayalardan kaynaklanan düşük özdirençli bölge görülmektedir. Güneyde ise hem neojen havzanın etkisiyle hem de Hisarköy bölgesinde bulunan jeotermal aktiviteye bağlı olarak gelişen düşük özdirençli bölge görülmektedir. Her üç profil incelendiğinde, örtü nitelikli birimlerin en kalın olduğu bölge, bu profilin güney kısmında olduğu görülmektedir.

Bu durum, jeotermal amaçlı yapılacak sondaj çalışmalarının bu bölge yakınlarında olması daha doğru olacaktır. Çünkü, ideal bir jeotermal sahada, ısıtıcı ve akışkanın yanı sıra, ısının korunabilmesi için gereken örtü birimlerin varlığı da önemlidir.

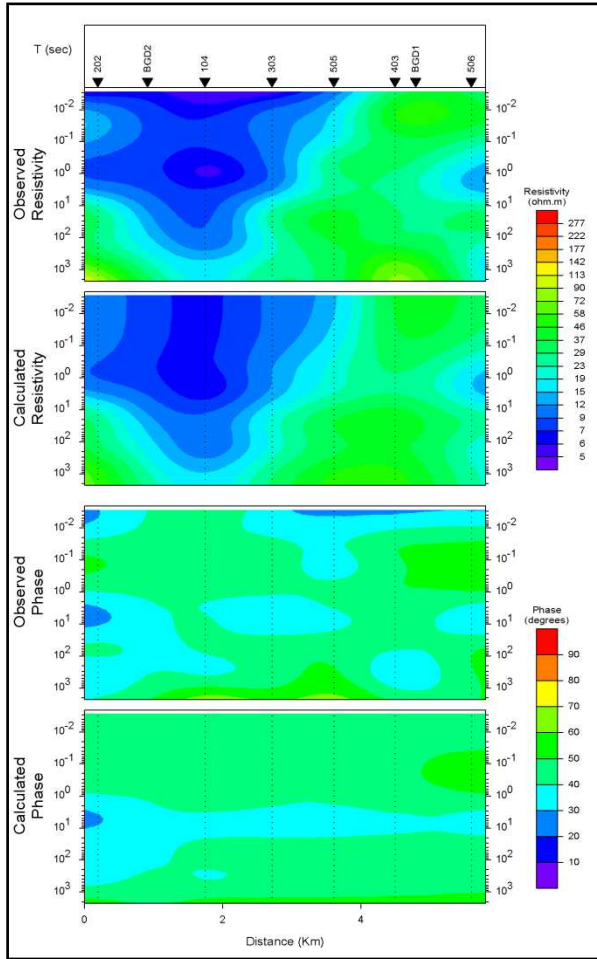
Bu profil sayesinde, neojen havza içerisindeki gömülü faylar ve neojen birimlerin kalınlığı hakkında daha fazla bilgi elde edilmiştir.



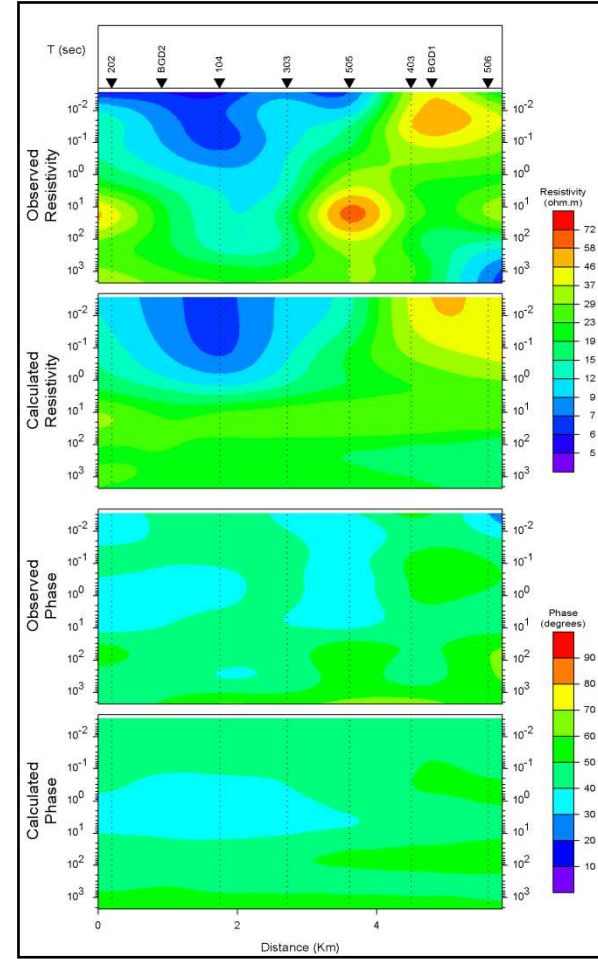
Şekil 25 P3 profili boyunca 2-B ters çözüm sonucunda elde edilen öz direnç modeli.



Şekil 26 P3 Profili Yorumlanmış Özdirenç Modeli.



Şekil 27. P3 MT Profili Boyunca TM Modu İçin Ölçülen Ve Hesaplanan Görünür Özdirenç Ve Faz Yapma Kesitleri.



Şekil 28 P3 MT Profili Boyunca TE Modu İçin Ölçülen Ve Hesaplanan Görünür Özdirenç Ve Faz Yapma Kesitleri.

3.8 DES Kesitlerinin Yorumlanması

Düşey elektrik sondaj çalışmaları iki bölgede yoğun bir şekilde uygulanmıştır. Bunlardan ilki Hisarköy Kaplıcalarını ortalayacak şekilde planlanan bir karelej çalışma şeklinde oluşturulmuş olan profiller boyunca alınmış ölçülerdir.

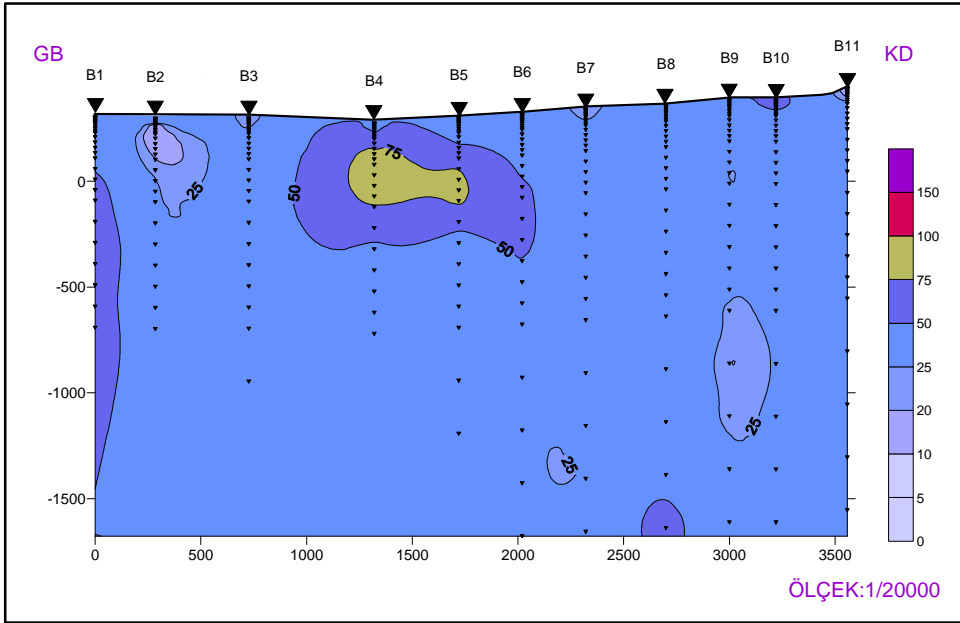
Bir diğeri ise bölgedeki ikincil önemli sayılabilecek anomali bölgesi olan en kuzeyde İçeribaşı Köyü civarındaki anomaliye yönelik olarak planlanan ve yine karelej çalışma şeklinde oluşturulan profiller boyunca alınmış olan ölçülerden ibarettir.

Bu çalışmalar ışığında görünür eş özdirenç kesitleri ve alınmış olan ölçülerin bir boyutlu değerlendirilmesiyle sahaya ait 3 farklı profilde elektrik yapı kesitleri oluşturulmuştur. Bu kadar sık alınmış ölçüler olmasına karşın 3 profilde kesitler hazırlanmasının nedeni, bir çok noktada, DES eğrisinin elektrik temel diye nitelendireceğimiz yüksek özdirençli birimin etkisine girmeden, hala düşüş eğiliminde olmasına rağmen kesilmiş olmasıdır. Normal şartlar altında, tüm DES çalışmalarında eğrinin elektrik temel diye nitelendirilebilecek birimlere girilene kadar devam edilip, ilgili birimin yüksek özdirençli etkisinin eğri üzerindeki yükseliş trendini başlattıktan sonra kesilmesi gerekir. Fakat bu çalışmada ölçülerin alınması esnasında yaşanan aksaklıklar nedeniyle eğriler kısa kalmış ve elektrik temele girilemeden kesilmiştir. Bundan dolayı, birçok nokta ve profil değerlendirmeye alınmamıştır.

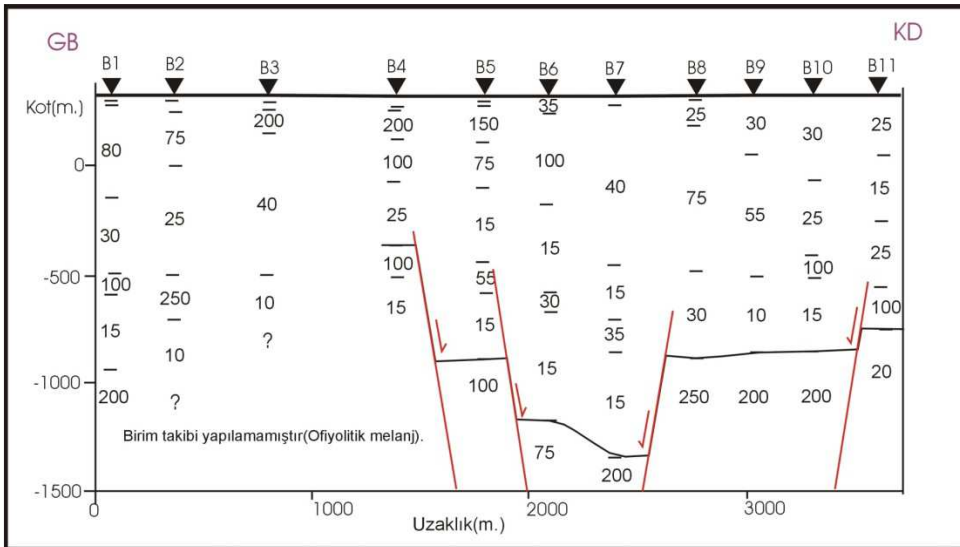
Sahaların her ikisi de oldukça faylı bir yapıya sahiptir. Bu fayların varlığı jeotermal açıdan olumlu bir durumdur. Şöyle ki, yapılacak olan mekanik sondajlar istenilen derinlikte hedeflenen fayı kesmesi durumunda alınabilecek olan akışkanın miktarı en yüksek debi ve sıcaklığa sahip olmaktadır. Bu açıdan faylı yapının önemi çoktur.

Görünür Özdirenç kesitlerinde en düşük özdirenç değeri 5 ohm-m'nin altına inmektedir. Değerlendirme sonucu elde edilen elektrik yapı kesitlerinde ise 10 ohm-m 'den daha düşük değerler karşımıza çıkmaktadır. Aktivitenin daha fazla olduğu yerlerde bu değerler en düşük hale geldiği gözlenmektedir. Özellikle Hisarköy Kaplıcası civarındaki kesitlerde bu daha belirgin bir hal almaktadır.

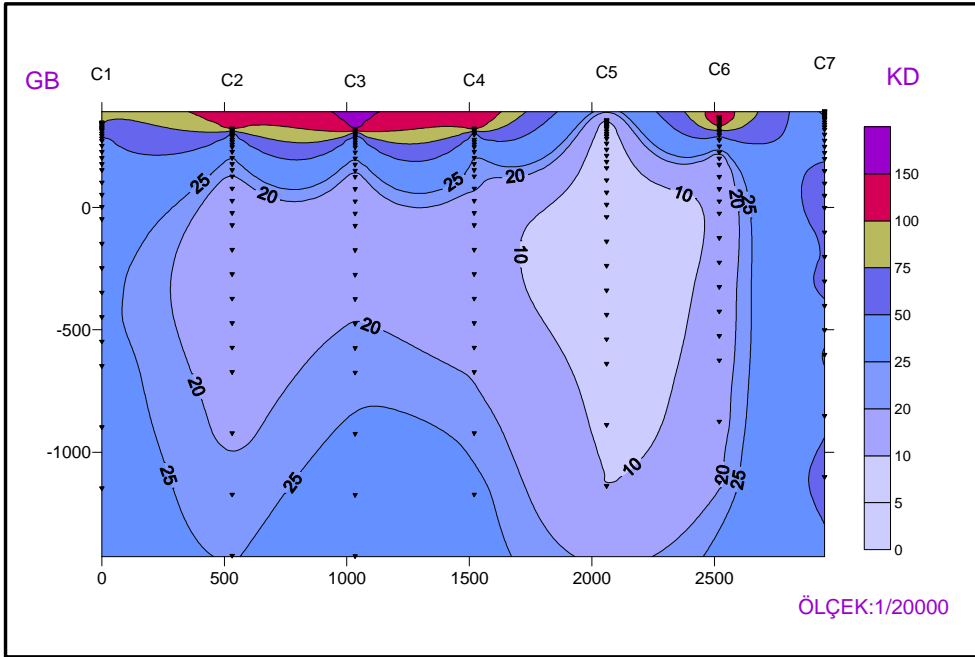
Açılımlar ($AB/2$ açıklığı) genel olarak 1000 ile 2000 metre arasında değişmektedir.



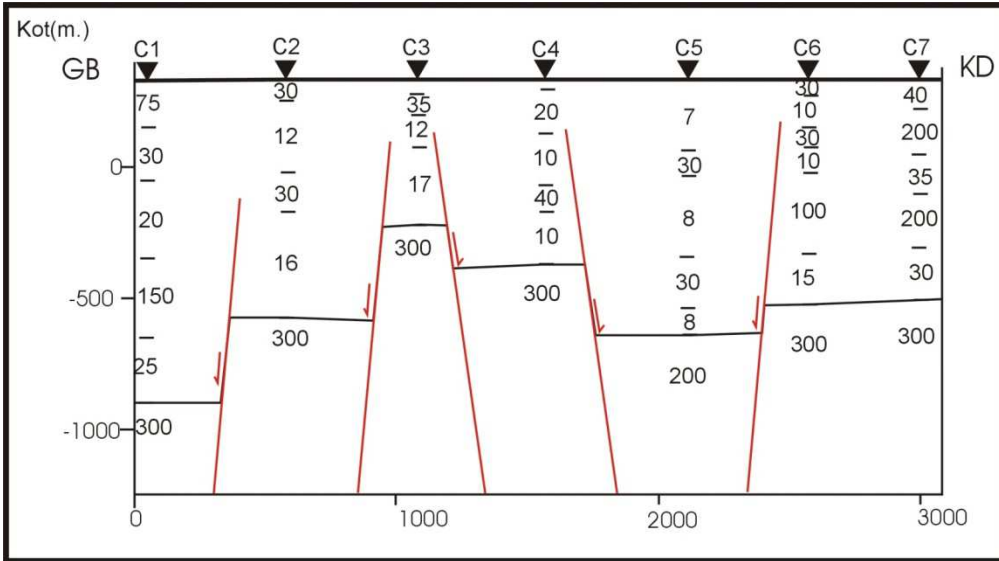
Şekil 29 B Profili Görünür Eş öz direnç Kesiti



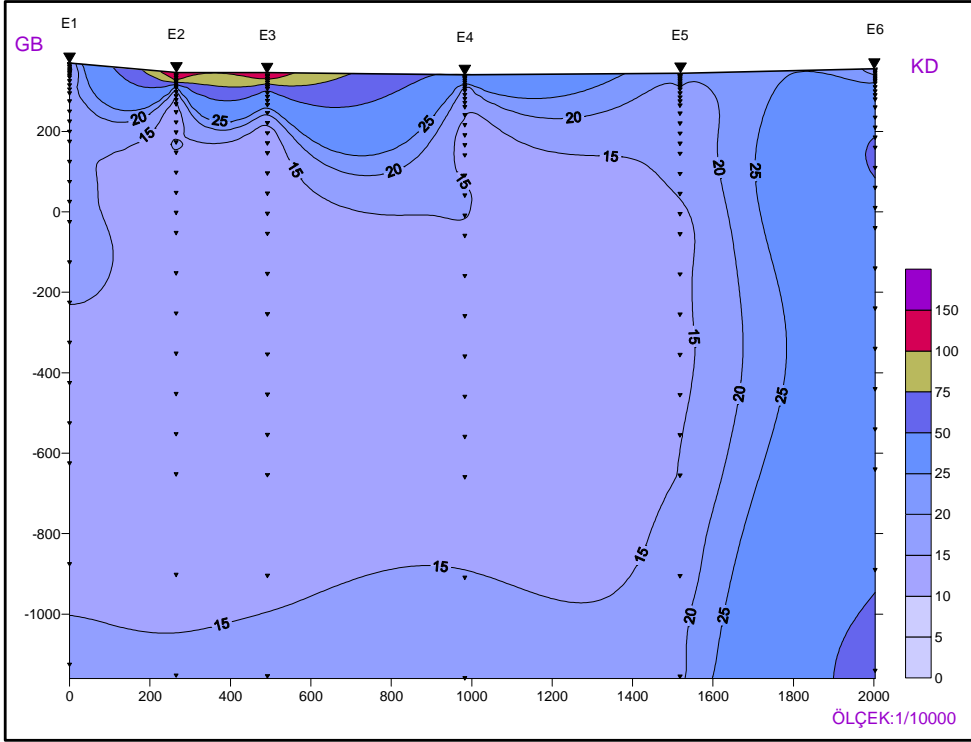
Şekil 30 B Profili Elektrik Yapı Kesiti



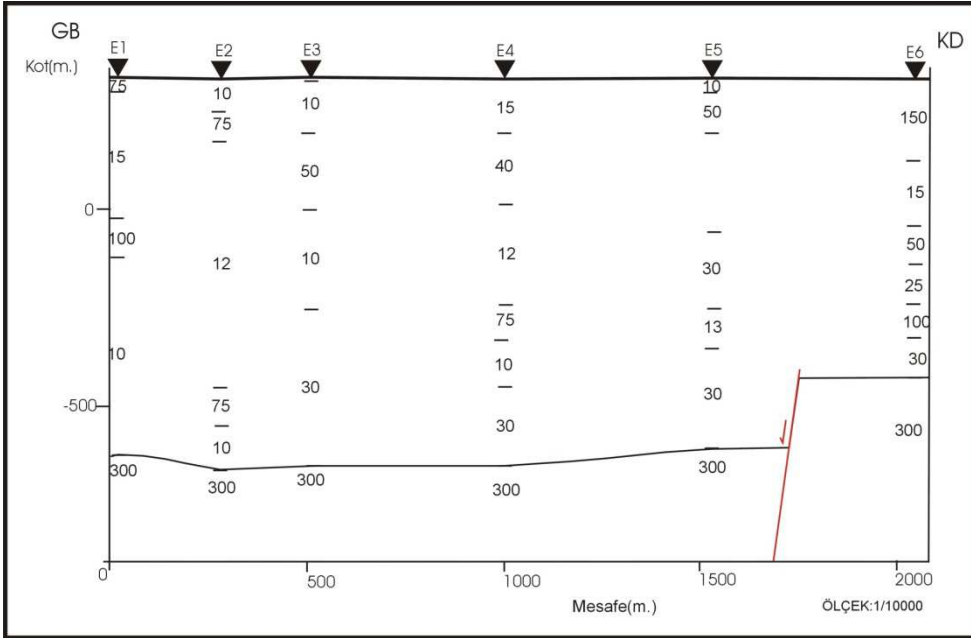
Şekil 31 C Profili Görünür Eş öz direnç Kesiti



Şekil 32 C Profili Elektrik Yapı Kesiti



Şekil 33 E Profili Görünür Eş öz direnç Kesiti



Şekil 34 E Profili Elektrik Yapı Kesiti

3.9 DES ve MT Seviye Haritalarının Birlikte Yorumu

Sahaya ait 4 adet DES ve 8 adet MT seviye haritası hazırlanmıştır. DES verileri genellikle 1000 m açılımda kesilmiştir. Bundan dolayı 1000 m'den daha derin oluşturulacak seviye haritalarında yanlışmalara sebep olabileceğinden DES seviye haritaları, 1000 m ile sınırlandırılmıştır.

Sığ seviyeler için hazırlanmış olan seviye haritalarında, daha çok sahadaki neojen birimler görülmektedir. Bu haritalarda da kesitlerde olduğu gibi, Adalı ne Hisarköy bölgelerinin en kalın neojen istifeye sahip olduğu görülmektedir.

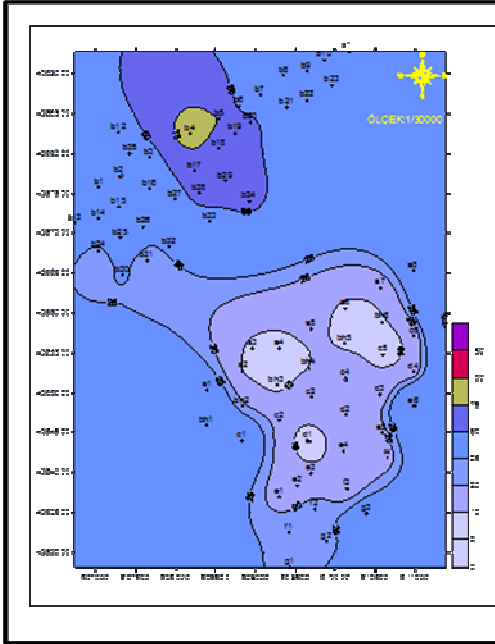
Güneyde Kırcaaköy batısında, kuzeyde Bekirler'in kuzeyinde karşımıza çıkan düşük öz dirençli kapanımlar, 3000 m 'ye kadar devam etmektedir. Buradaki MT anomalisi varlığına karşın DES anomali vermemiştir. Bunun nedeni, DES ölçülerinin yeterince derinden bilgi getiremiyor oluşudur. Ayrıca buradaki topografik zorluklar nedeniyle DES ölçüleri olması gerekenden kısa olmuştur (1000 m açılımlı).

Tüm kesitler üst üste koyulup bakılacak olursa, sahadaki süreksizlik ve fay zonları da takip edilebilmektedir.

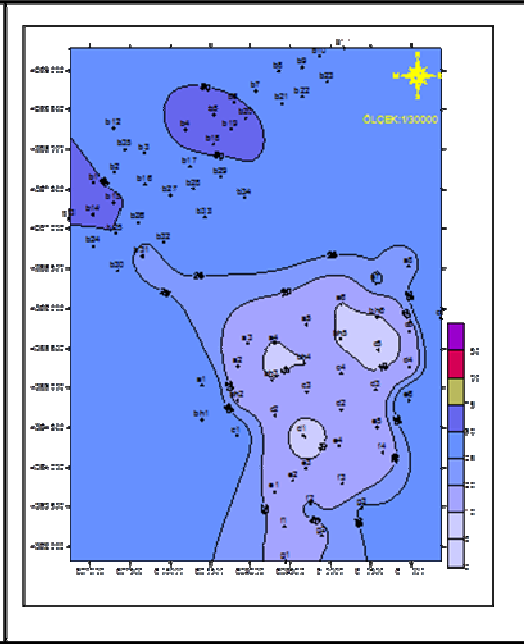
Özellikle sahanın kuzey doğusunda ve güneybatısında sahayı sınırlandıran iki büyük fay sistemi görülmektedir. Bunların yanı sıra, sahayı kuzeydoğu - güneybatı doğrultulu ve sahanın güneydoğusunun derinleşmesine sebep olan bir fay sistemi görülmektedir.

Ayrıca, Adalı'nın güneyinden başlayıp kuzeye doğru eğimli ve yine Adalı - Hisarköy bölgesinin derinleşmesini sağlayan fay sistemi görülmektedir. sığ seviye haritalarında bu fay net bir şekilde görülemezse de, derin seviye haritalarında yöne ve sahada oluşturduğu derinleşme net bir şekilde izlenebilmektedir. İçeribaşı çevresinde görünen düşük öz dirençli bölge, o bölgede bulunan mafik-ultramafik kayalardan oluşan melanj'a bağlı oluşmuştur.

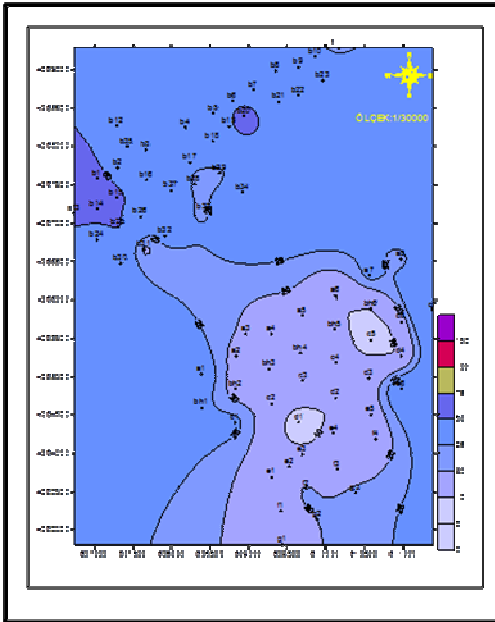
Sahada yapılmış olan sondajları da göz önüne alacak olursak, seviye haritalarındaki anomalilerden, Adalı - Hisarköy bölgesi, sahadaki en ideal jeotermal aktivitenin bulunduğu bölge olarak göze çarpmaktadır. Jeotermal aktivitenin, en sığ seviye haritasından başlayıp (250 metre) en derin seviye haritasına (5000 metre) kadar etkisinin takip edilebildiği bir bölgedir.



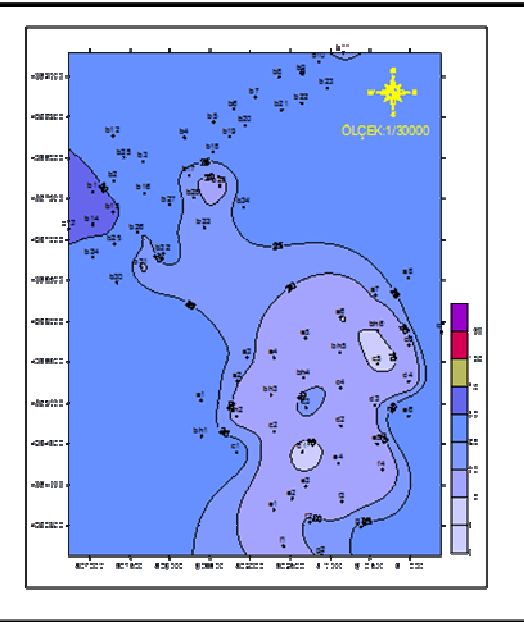
Şekil 35 250m.DES Görünür Eş özdirenç Seviye Haritası



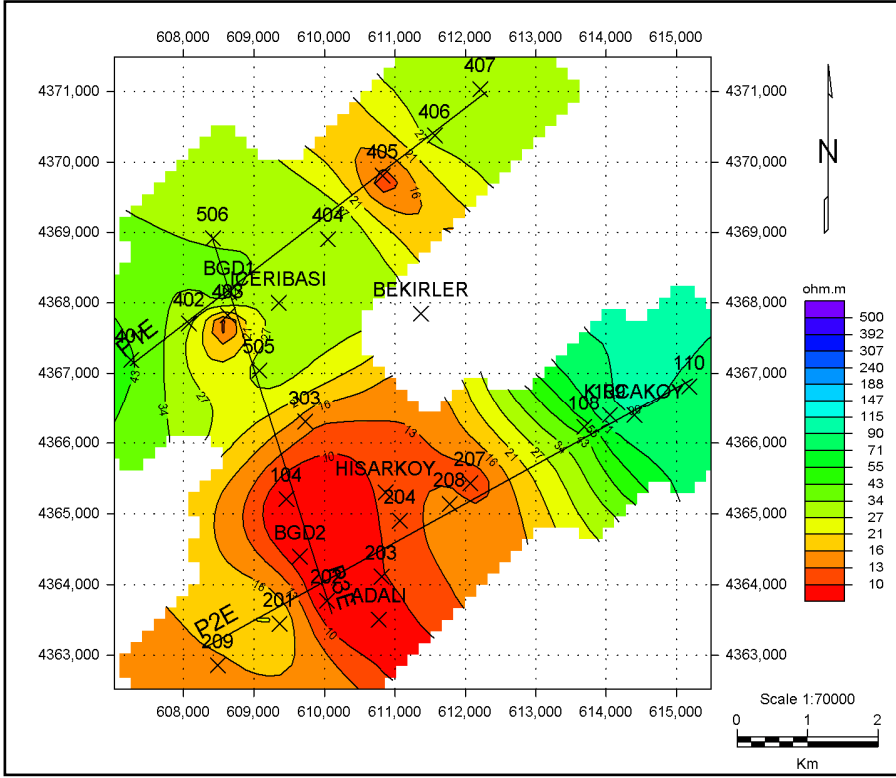
Şekil 36 500m.DES Görünür Eş özdirenç Seviye Haritası



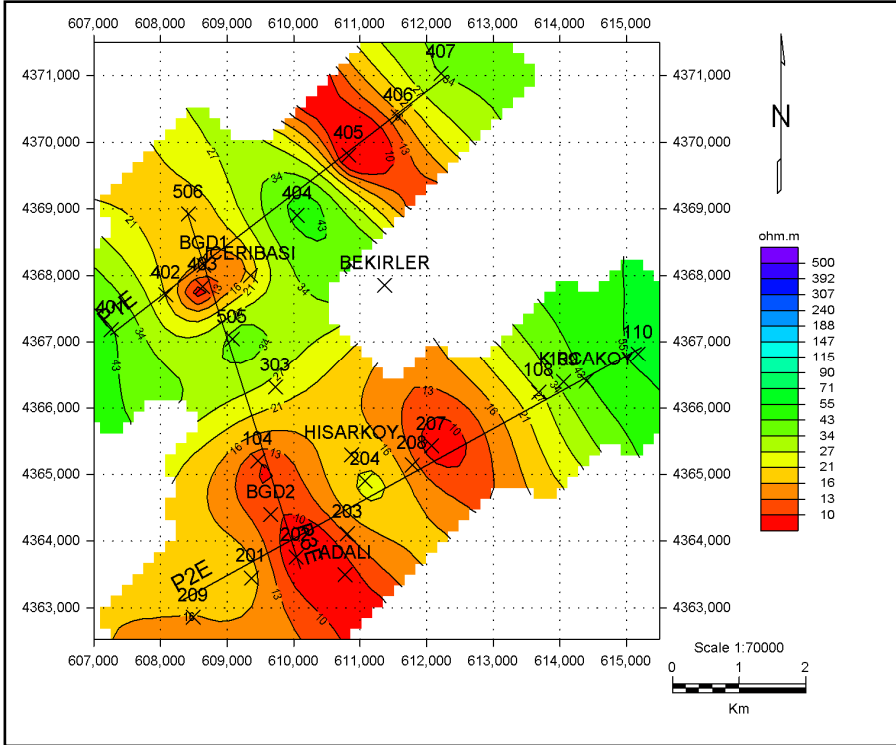
Şekil 37 750m.DES Görünür Eş özdirenç Seviye Haritası



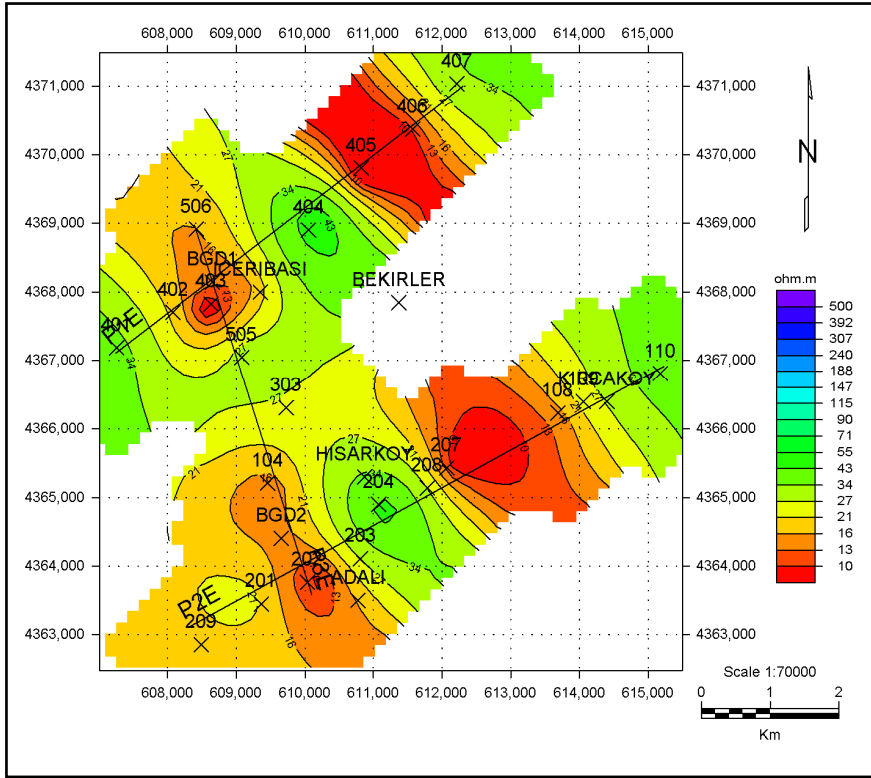
Şekil 38 1000m.DES Görünür Eş özdirenç Seviye Haritası



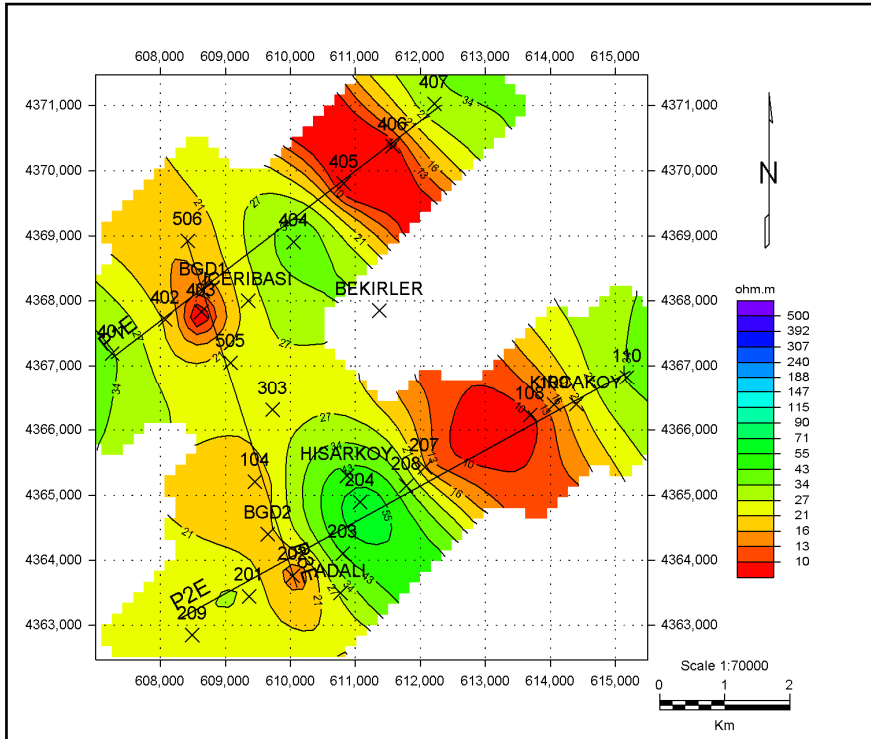
Şekil 39 500m.MT Eş özdirenç Seviye Haritası



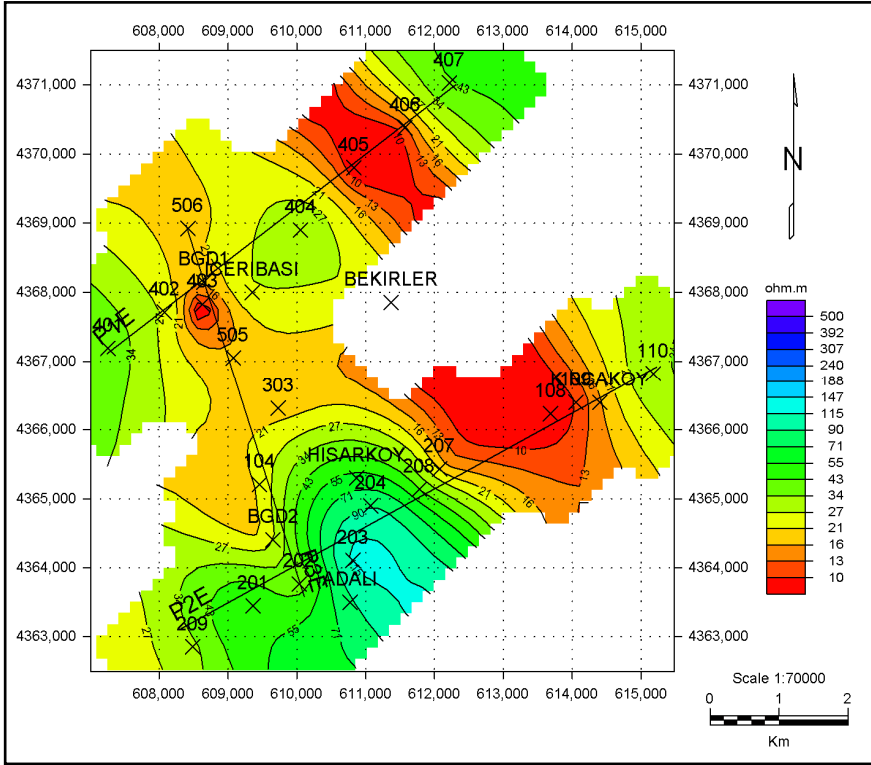
Şekil 40 1000m.MT Eş özdirenç Seviye Haritası



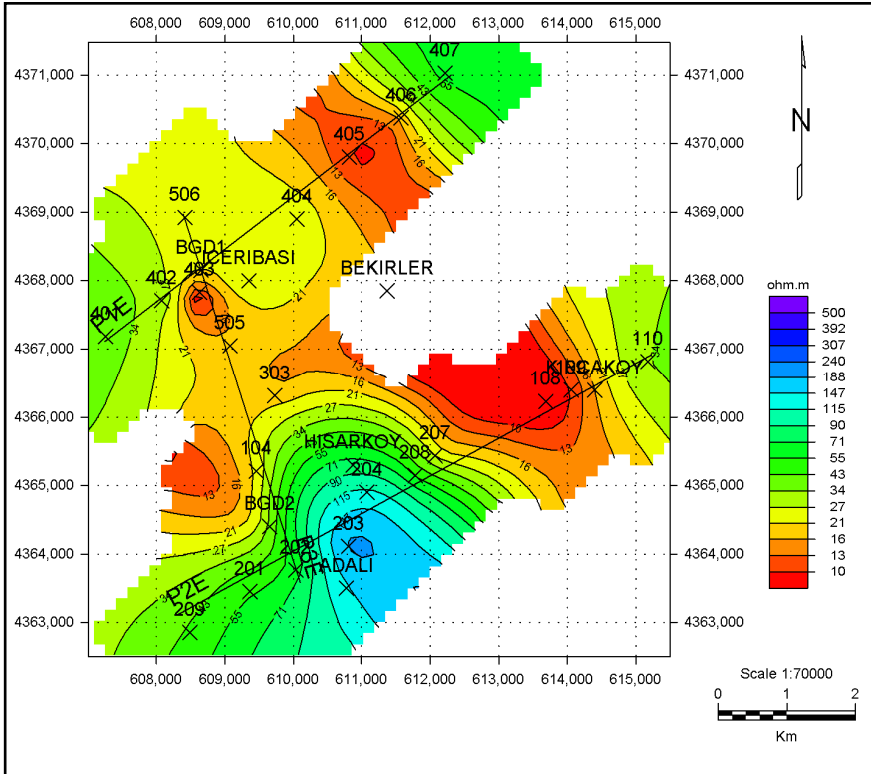
Şekil 41 1500m.MT Eş özdirenç Seviye Haritası



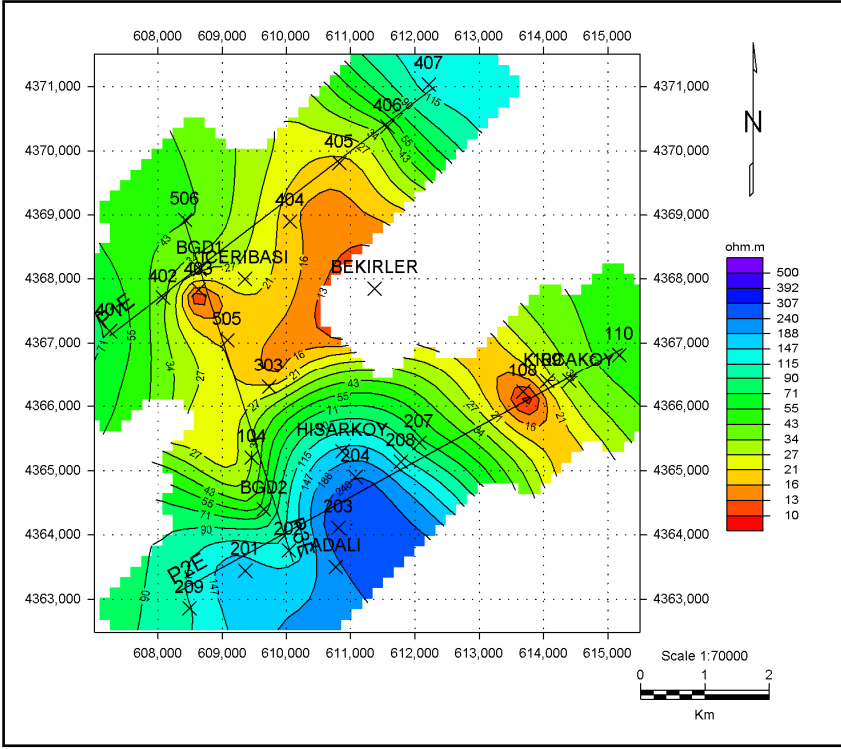
Şekil 42 2000m.MT Eş özdirenç Seviye Haritası



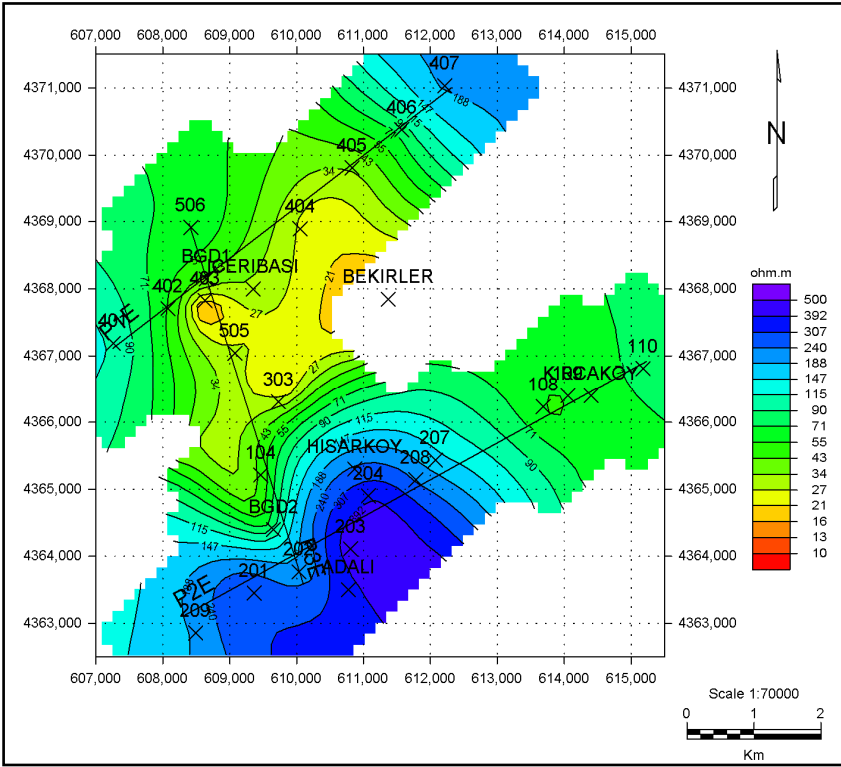
Şekil 43 2500m.MT Eş özdirenç Seviye Haritası



Şekil 44 3000m.MT Eş özdirenç Seviye Haritası



Şekil 45 4000m.MT Eş öz direnç Seviye Haritası



Şekil 46 5000m.MT Eş öz direnç Seviye Haritası

SONUÇLAR

Jeotermal sahalarda, örtü kaya kalınlığı, hazne kayanın derinliği ve yönelimi, ısı kaynağının yeri ve boyutlarının belirlenmesinde elektrik ve elektromanyetik yöntemler en etkili jeofizik yöntemlerdir. Jeotermal aktivitenin, birimlerin elektriksel iletkenlik-özdirenç değerlerinde meydana getirdiği değişim, bu tür araştırmalarda, özdirenç duyarlı yöntemleri bir adım öne çıkartmaktadır. Elektrik yöntemlerdeki geometrik faktör etkisinin MT yöntemde olamaması, bu yöntem için önemli bir avantajdır. Bunun yanı sıra Manyetotellürik yöntemin derinden bilgi alabiliyor olması ve bunun diğer derin jeofizik yöntemlere göre daha düşük maliyetli olması tercih edilirliliğini iyice arttırmıştır. Ayrıca, diğer özdirenç yöntemlerde, 2 boyutlu değerlendirmeye uygun veri toplanması ve 2 boyutlu kesitler hazırlanması çok zahmetli olmasına karşın, bu durum MT yönteminde çok daha kolaydır. Bu da yöntem için önemli bir avantajdır.

Diğer yöntemlere göre çok daha yeni olan MT yöntemde de farklı geliştirme çalışmaları yapılmaktadır. Bunlardan bir tanesi, bizim de bu çalışmanın değerlendirme aşamasında faydalanmak istediğimiz, Romo ve diğ. tarafından geliştirilmiş olan Seri ve Paralel Empedans tanımlarıdır. Bu yöntemle, klasik yöntemlere göre, döndürme açısının belirlenmesi ve eksenlerin bunlara göre döndürülmesi, ayrıştırma analizlerinin gerçekleştirilmesi gibi uzun süreli işlemlerin yapılması zorunluluğunu ortadan kaldırmak amaçlanmıştır.

Bu çalışmada, öncelikle Seri ve Paralel empedanslar kullanılarak model üretilmiştir. Ardından klasik yöntem olan TE ve TM modlarıyla da aynı kesitler üretilmiştir. Ürettiğimiz bu iki kesiti, sahaya ait jeolojik ve sondajdan elde edilen verileri kullanarak karşılaştırdık. Yaptığımız bu çalışma sonucunda, TE-TM moduyla üretilen kesitlerin, Seri ve Paralel Empedanslarla üretilen kesitlerden daha iyi çakışmalar sağladığı ve sahayı daha iyi temsil ettiği ortaya çıkmıştır. Bu nedenle, Seri ve Paralel empedanslar kullanarak değil, TE - TM moduyla elde ettiğimiz kesitler kullanılmıştır. Seri ve Paralel empedanslar kullanılarak üretilen kesitler, belki bu saha için doğru çözümler üretememiş olabilir. Fakat geliştirilmesi halinde bir çok sahada iyi çözümler üreterek TE-TM moduyla yapılan değerlendirmelerdeki bir çok zahmetli işten (ayrıştırma analizi, döndürme işlemi, vb) kurtulmamıza yardımcı olacaktır.

Bu çalışma kapsamında Hisarköy Kaplıca alanının jeotermal potansiyeli MT yöntemi ile araştırılmıştır. Farklı doğrultularda oluşturulmuş üç doğrultu boyunca ölçülen MT verilerinin 2B ters çözümü sonucu elde edilen özdirenç modelleri yorumlanmış ve aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- Çalışma sahası oldukça kırıklı bir yapıya sahiptir. Hem güneydoğu-kuzeybatı uzanımlı fayların varlığı hem de güneybatı-kuzeydoğu uzanımlı fayların varlığı gözlenmiştir. Bu fayların bazıları sahayı oldukça derinleştirmekte ve yer yer derinliğin 3000 metrelere yaklaştığı gözlenmektedir.

- Bölgede iki farklı sahada jeotermal aktivitenin varlığına rastlanmıştır. Bunlardan en önemlisi, zaten kaplıca olarak da işletilen, ayrıca şehir ısıtmacılığında da kullanılan

Hisarköy bölgesidir. Bölgede yapılmış olan eski sondaj çalışmalarının tamamı sığ olmuştur. Bu çalışmayla daha derin sondaj planlamalarıyla daha yüksek sıcaklığa ulaşılması muhtemeldir. Hisarköy - Adalı ve Hisarköy - Kırcaaköy arası, sondaj yapılabilecek önemli bölgelerdir. Hisarköy - Kırcaaköy aralığında sondaj yapılmak istenmesi durumunda 208 no'lu MT noktasında yaklaşık 1000 m derinlikli bir sondaj yapılabilir. Daha derin bir sondaj yapılmak istenmesi durumunda ise Hisarköy Adalı arasında 203 no'lu MT noktasında derinliği yaklaşık 2000 m olan bir sondaj yapılabilir.

- Bir diğer bölge Bekirler'in kuzeyi, İçeribaşı'nın kuzeydoğusunda bulunan bölgedir. Bu bölge de jeotermal olarak etkin görülmektedir. Derin yapılacak mekanik sondajla yüksek sıcaklıkların elde edilebileceği bir bölgedir. Bu bölgenin dağlık olması, sondaj yapılacak bölgeler içerisinde ikinci plana düşmesine sebebiyet vermektedir. Eğer bu bölgede de bir sondaj yapılmak istenirse, 404 nolu MT noktasının 300 m kuzeydoğusuna, derinliği yaklaşık 2000 m olan bir sondaj yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Akdeniz, N., Konak, N., 1979. Menderes Masifinin Simav dolayındaki kaya birimleri ve metabazik, metaultramafik kayaların konumu, TJK Bülteni, 22,175-183.
- Altunkaynak, Ö., 2005, Elektrik öz direnç ve manyetik yöntemler ile arkeolojik yapıların saptanması, Yüksek lisans tezi, Isparta
- Aşcı, M., Özçep, F., Yas, T., Alpaslan, N., 2004, Görünür Öz direnç (Schlumberger) Verilerinin Sönümlü en küçük kareler Tekniğiyle Modellenmesi, İstanbul Üniv. Müh. Mim. Fak. Yerbilimleri Dergisi, 17(2), 111-118, İstanbul.
- Başokur, A.T., 2008, Manyetotellürik Yöntemde Temel Kavramlar Kitabı. (<http://geop.eng.ankara.edu.tr/>)
- Bingöl, E., Delaloye, M. ve Ataman, 1982, Granitik Intrusions in western Anatolia: a contribution to the geodynamic study of this area. *Ecloga geol. Helv.* 75/2. 437-446.
- Bingöl, E., 1977, Batı Anadolu'nun jeotektonik evrimi. MTA Dergisi, 86, 14-34.
- Burçak, M., Kılıç, A.R., Hacısalihoğlu, Ö., Beker, K. ve Özkan, H., 2006, MTA Batı Anadolu jeotermal sahaları geliştirme ve ısı kaynağı araştırmaları proje verileri.
- Cagniard, L., 1953, Basic theory of the magnetotelluric method of geophysics prospecting: *Geophysics*, 18, 605-635.
- Candansayar, M.E., 2008, Two-dimensional inversion of magnetotelluric data with consecutive use of conjugate gradient and least-squares solution with singular value decomposition algorithms. *Geophysical Prospecting*, Vol. 56, P.141 – 157.
- DeGroot-Hedlin, C. and Constable, S., 1990, Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, 55, 1613-1624
- Ercan, T., Satır, M., Sevin, D. ve Türkecan, A., 1996, Batı Anadolu Tersiyer ve Kuvaterner yaşlı volkanik kayalarda yeni yapılan radyometrik yaş ölçümlerinin yorumu. MTA Dergisi, 119, 103-112.
- Ghosh, D.P., 1971, Inverse filter coefficients for the computation of apparent resistivity standard curves for a horizontally stratified earth. *Geophysical Prospecting*, 19, 769-775.
- Groom, G.W., Bailey, R.C., 1989, Decomposition of magnetotelluric impedance tensors in presence of local three-dimensional galvanic distortion, *J. Geophys. Res.* 4, 1913-1925.
- Jupp, D.B.L and Vozoff, K., 1977, Two-dimensional magnetotelluric inversion, *Geophys. J.R.ast. Soc.* 50, 333-352.
- Kaya, C., 2002, Frekans düzğünlenmiş empedans fonksiyonu ile manyetotellürik verilerde statik-kayma düzeltmesi, doktora tezi. Ankara Üni. Fen Bilimleri Enst. Ankara.
- Keller, G.V. and Frischknecht, F.C., 1966, *Electrical Methods in Geophysical Prospecting*. Pergamon Press, London.
- Kılıç, A., 2006, Senirkent heyelan alanının rezistivite ve sismik yöntemlerle araştırılması, Yüksek lisans tezi. Isparta

- Kılıç, A.R., 2009, Gediz-Şaphane (Kütahya) Arasındaki Bölgenin Jeotermal Özelliklerinin Jeofizik (Manyetotellürik ve Doğru Akım Özdirenç) Yöntemleriyle Araştırılması. Yüksek lisans tezi. Cumhuriyet Üni. Fen Bilimleri Enst. Sivas
- Mackie, R.L., Livelybrooks D.W., Madden T.R., Larsen J.C., 1997, A magnetotelluric investigation of the San Andreas Fault at Carrizo Plain, California, *Geophys. Res. Lett.* 24, 1847-1850.
- Madden, T. R., 1972, Transmission Systems and Network Analogies to Geophysical Forward and Inverse Problems. Massachusetts Inst Of Tech Cambridge Dept Of Earth And Planetary Sciences
- Mcneill, J.D., 1990, Use of electromagnetic methods for groundwater studies. In Wards, S. H., Ed., *Geotechnical and environmental geophysics, Volume:1 Soc. Of Expl. Geophysics.*, 191-218
- Ogawa, Y. and Uchida, A., 1996, A two-dimensional magnetotelluric inversion assuming Gaussian statik shift. *Geophys. J. Int.*, 126, 69-76
- Pekeris, C., L., 1940, direct method of interpretation in resistivity prospecting, *Geophysics*, 5,31-46.
- Raiche, A. P., 1983, Comparison of apparent resistivity functions for transient electromagnetic methods *Geophysics* 48, 787
- Robinson, E.S. and Çoruh, C., 1988, Basic exploration geophysics.
- Rodi, W. and Mackie, R.L., 2001, Nonlinear Conjugate Gradients Algorithm For 2-D Magnetotelluric Inversion, *Geophysics* 66, 174-187.
- Romo, J.M., Trevino, E.G., Esparza, F.J., 2005, Series and parallel transformations of the magnetotelluric impedancetensor: theory and applications, *Science Direct* 150, 63-83
- Siyam, N. W. A., 2002, Elektrik ve elektromanyetik verilerin genetic algoritma ile birleşik ve ardışık ters çözümü, Doktora tezi. Ankara Üni. Fen Bilimleri Enst. Ankara.
- Smith, J.T. and Booker, J. R., 1991, Rapid inversion of two- and three- dimensional magnetotelluric data: *J. Geophys. Res.*, 96, 3905-3922
- Smith, J.T., 1995, Understanding telluric distortion matrices: *Geophys.J.Int.* 122 219-226.
- Spies, B. R. and Eggers, D. E., 1986, The use and misuse of apparent Resistivity in electromagnetic methods: *Geophysics*, 51, 1462-1471.
- Stefanescu, S., S., and Schlumberger, C., and M. 1930, Sur La Disrtribution electrique potentialle autour d'une prise de terre ponctuelle dans un terrain a couches horizontales, homoganes et isotropes. *J. Phys.Radium* 7, 132-141.
- Swift, C. M., 1967, A magnetotelluric investigation of an electrical conductivity anomaly in the southwestern United States. Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA
- Şahin, H., Mutlu, M., 2000, Balıkesir – Bigadiç- Hisarköy sahası jeotermal enerji aramaları rezistivite etüdü raporu, M.T.A. Rapor no :10305
- Tichonov, A. N., 1950, On determining electrical charecteristics of the deep layers of the earth's crust: *Doklady*, 73, 295-297.
- Uchida, T., 1993, Smooth 2-D inversion for magnetotelluric data based on statistical criterion ABIC. *J. Geomag.Geolectr.*, 45, 841-858

- Uchida, T., 1997, 2-D inversion of Papua New Guinea magnetotelluric data with smoothness regularization. *J. Geomag. Geoelectr.*, 45, 841-858.
- Utada, H. and Munekane, M., 2000, On galvanic distortion of regional three-dimensional magnetotelluric impedances. *Geophys. J.Int.*, 400, 385-398
- Ulugergerli, E.U. ve Özürlan, G., 2005, Manyetotellürik Yöntem, Jeofizik Mühendisliğinde Elektromanyetik Yöntemler Kitabı.
- Ünlü, M. R., 1972, Bigadiç (Balıkesir) Hisarköy Kaplıcaları civarının jeotermal enerji olanakları, MTA Rapor No:5196
- Vozoff, K., 1958, Numerical resistivity analysis: horizontal layers. *Geophysical Exploration*, 23, 536-556.
- Vozoff, K., 1972, The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins: *Geophysics*, 37, 98-141.
- Vozoff, K., 1991, The magnetotelluric methods, in: M.N. Nabighian (Ed.), *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, vol. 2 Applications, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK, 641-711
- Wightman, W.E., Jalinos, F., Sirles, P., Hanna, K., 2003, Application of geophysical methods to highway related problems, Federal Highway Administration, 716p.
- WinGlink[®], MT Sounding, Version 2.20.01-2007-03-20 MTA Genel Müdürlüğü
- Zohdy, A.A.R., 1965, The auxiliary point method of electrical sounding interpretation and its relationship to the Dar Zarrouk parameters, *Geophysical Exploration*, 30, 644-660.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel bilgiler

Adı Soyadı Sultan BOSTAN
Doğum Yeri ve Tarihi Akçaabat, 08/12/1977
Medeni Hali Evli
Yabancı Dil İngilizce
İletişim Adresi MTA Genel Müdürlüğü Jeofizik Etütler Dairesi
Başkanlığı, 06800 Çankaya - ANKARA
E-posta Adresi sultanbostan@yahoo.com

Eğitim ve Akademik Durumu

Lise Akçaabat Lisesi, 1995
Lisans İstanbul Teknik Üniversitesi, 2002
Yüksek Lisans Cumhuriyet Üniversitesi, 2013

İş Tecrübesi

MTA Jeofizik Mühendisi, 2004 -

EK -1
MTA DATALARININ KULLANIMI İÇİN ALINMIŞ KURUM İZİNİ

