İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇATALCA – İSTANBUL BÖLGESİ'NDE YERALTISUYU ARAŞTIRMASI VE HİDROJEOLOJİK YAPISININ JEOFİZİK YÖNTEMLERLE ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Müh. Müge KORAY

Anabilim Dalı : JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ

Programı : JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ

OCAK 2006

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇATALCA – İSTANBUL BÖLGESİ'NDE YERALTISUYU ARAŞTIRMASI VE HİDROJEOLOJİK YAPISININ JEOFİZİK YÖNTEMLERLE ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Müge KORAY
Enstitü No : 505031402

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06.01.2006
Tezin Savunulduğu Tarih : 15.12.2005

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Gülçin ÖZÜRLAN

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. İlyas ÇAĞLAR

Yrd. Doç. Dr. Tolga YALÇIN

OCAK 2006

ÖNSÖZ

Bu çalışma konusunu öneren tez danışmanım, Sayın Doç. Dr. Gülçin ÖZÜRLAN'a, destek ve moral veren tavrı ile çalışmanın gerçekleşmesi sırasında hiçbir yardımı esirgemediği ve her konuda yol gösterdiği için teşekkür ederim.

Jeofizik ölçmeler dersi kapsamında alınan VLF ve Wenner Kaydırma verilerini kullanımıma sunan Yard. Doç. Dr. Turgay İŞSEVEN'e, çalışma alanının jeolojik ve hidrojeolojik bilgilerine ulaşmamda yardımcı olan Yrd. Doç. Dr. Tolga YALÇIN'a, arazi çalışmalarının yürütülmesine izin veren ve ulaşımı sağlayan başta Maden Müh. Hasan ÖZDEN olmak üzere Akyol Mıcır ve Mermer Sanayi Ticaret A. Ş. çalışanlarına teşekkür ederim.

Tezin oluşum sürecinde bir çok aşamada mesafeleri engel tanımayıp imdadıma koşan arkadaşım Jeofizik Yük. Müh. Mehmet Recep'e, arazi çalışmalarında bana yardımcı olan arkadaşlarım Jeofizik Yük. Müh. Ayça Ardalı ve jeofizik mühendisleri Dilek İnkun ve Duygu Kıyan'a teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteniğini esirgemeyen tüm aileme ve arazi çalışmalarında yardımcı olan abim Altuğ ve babam Ünal Koray'a da sonsuz teşekkürler...

Ocak, 2006 Müge KORAY

İÇİNDEKİLER

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

1. GİRİŞ **1**
2. GEÇİCİ ELEKTROMANYETİK YÖNTEM **4**
2. 1 Görünür Özdirencin Hesaplanması 7
2. 2 Araştırma Derinliği 9
3. DOĞRU AKIM ÖZDİRENÇ YÖNTEMİ **10**
3. 1 Ölçüm Teknikleri 11
3. 1.1 Düşey elektrik sondaj (DES) 11
3. 1.2 Kaydırma ölçümleri 12
3. 2 Görünür Özdirencin Hesaplanması 13
4. ÇOK ALÇAK FREKANS ELEKTROMANYETİK YÖNTEM **15**
4. 1 Ölçülen Büyüklükler 17
4. 2 Süzgeçleme 19
4. 3 Araştırma Derinliği 20
5. ÇATALCA - İSTANBUL BÖLGESİ'NİN JEOLOJİK, HİDROJEOLOJİK VE JEOKİMYASAL DEĞERLENDİRİLMESİ **21**
5. 1 Çalışma Alanının Jeolojisi 21
5. 1.1 Mahya şisti 22
5. 1.2 Kırklareli kireçtaşı 23
5. 1.4 Danişment formasyonu 23
5. 1.5 Alüvyon 23
5. 2 Çalışma Alanının Hidrojeolojisi 24
5. 2.1 Akiferler 24
5. 2.1.1 Çok zayıf akifer 24
5. 2.1.2 Zayıf akifer 24
5. 2.1.3 Yerel çatlaklı (karbonatlı) akifer 24
5. 2.1.4 Yerel taneli akifer 25
5. 2.2 Yeraltısuyu beslenimi ve boşalımı 25

5. 2.3 Karst hidrojeolojisi (karstlaşma) 26
5. 2.3.1 Bölgesel karstlaşma 27
5. 3 Çalışma Alanının Jeokimyası 27
6. ÇATALCA - MURATBEY BÖLGESİ HİDROJEOLOJİK YAPISININ JEOFİZİK YÖNTEMLERLE ARAŞTIRILMASI 31
6. 1 Giriş 31
6. 2 Karst Hidrojeolojisi Araştırmalarında Jeofizik Modelleme 34
6. 3 Çatalca – Muratbey Karstik Kaynağı Hidrojeolojik Yapısının Jeofizik Yöntemlerle Araştırılması 36
6. 3.1 DES verilerinin değerlendirilmesi 38
6. 3.2 TEM verilerinin değerlendirilmesi 42
6. 4 Çatalca Bölgesi'ndeki Süreksizlik, Kırık Araştırması 44
6. 4.1 TEM yöntemi ile iki boyutlu (2B) yaklaşım 46
6. 4.2 Elektromanyetik ve elektrik kaydırma verilerinin ortak değerlendirilmesi 47
7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA 53
KAYNAKLAR 55
ÖZGEÇMİŞ 59

KISALTMALAR

DC : Direct Current
DES : Düşey Elektrik Sondaj
EC : Electrical Conductivity
pH : Potentia Hidrojenii (hidrojen iyonu konsantrasyonunun logaritması)
TDEM : Time Domain Electromagnetics
TEM : Transient Electromagnetic Method
VLF-EM : Very Low Frequency Electromagnetic Method

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 4.1. VLF Verici İstasyonları Listesi (McNeill ve Labson, 1988)..... 15

Tablo 5.1. İçilebilir suların Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri (Kaynak suları yönetmeliği, Ekim 1997) 28

Tablo 5.2. Muratbey Karstik kaynağının anyon değişimi (Duman, 2003)..... 30

Tablo 5.3. Taşocağı içi su kuyusunun anyon değişimi (Duman, 2003)..... 30

Tablo 6.1. Çatalca taşocağı civarında yapılan jeofizik ölçümlerin dökümü..... 35

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1 : TEM yöntemi ile en sık kullanılan dizilim şekilleri. (a)Tek halka (Single loop). (b) iç içe iki halka (Coincident loop). (c) Merkezi halka (In loop). (d) Ayrık iki halka (Separate loop), (T_X:Verici (Transmitter), R_X:Alıcı (receiver))……..... 4

Şekil 2.2 : Akımın kesilmesinden sonra çeşitli zamanlardaki akım çizgileri ile aşağı ve yanlara doğru yayınımları (McNeill, 1990'dan değiştirilerek alınmıştır)..... 5

Şekil 2.3 : TEM çalışma prensibi: Vericideki akım (üstte); sonsuz dirençli ortamda dB/dt tepkisi (ortada); iletken ortamda kaydedilen dB/dt tepkisi (altta)……..... 6

Şekil 2.4 : Çatalca'da 45 pencerelik merkezi halka (in loop) TEM verisi…..... 6

Şekil 2.5 : Vericide kaydedilen gerilim eğrisinin zamanın fonksiyonu olarak çizilmesi…….....……..….... 8

Şekil 3.1 : Schlumberger dizilimi şematik gösterimi……..... 12

Şekil 3.2 : Wenner dizilimi şematik gösterimi. ……..... 13

Şekil 3.3 : Akım ve potansiyel elektrotları arasındaki uzaklıklar……..... 13

Şekil 4.1 : VLF vericilerinden yayılan birincil manyetik alan……..... 16

Şekil 4.2 : Düşey iletken ve manyetik alan bileşenlerinin görünümü (Milsom, 1996)..... 16

Şekil 4.3 : Ölçülen düşey ve yatay manyetik alan doğrultuları (Pedersen, 2002)..... 17

Şekil 4.4 : Birincil alan (Hp) ve ikincil alanın (Hs) birleşiminden oluşan toplam alan (Hr) ve alanlar arasındaki faz kaymasını gösteren vektör diyagramı……..……..... 18

Şekil 4.5 : Kutuplanma elipsini etkileyen değişkenler (McNeill ve Labson, 1988)……..... 18

Şekil 5.1 :Çatalca bölgesi genelleştirilmiş stratigrafik kesiti (Duman, 2003).…..... 21

Şekil 5.2 :Çatalca bölgesi jeoloji haritası (Duman, 2003)..... 22

Şekil 5.3 : Kaynakların Hidrojeolojik modellemesi (Kesit ölçeksizdir) (Duman, 2003)..... 26

Şekil 5.4 : Kırklareli kireçtaşında yüzeyde gözlenen erime boşlukları..... 27

Şekil 5.5 : Muratbey karstik kaynağında ölçülen bazı kimyasal değerler. (a) elektrik iletkenlik (EC), (b) pH, (c) Nitrat (NO_3), (Duman, 2003)..... 28

Şekil 5.6 : Muratbey taşocağı içindeki kuyudan ölçülen bazı kimyasal değerler. (a) elektrik iletkenlik (EC), (b) pH, (c) Nitrat (NO_3) (Duman, 2003)..... 29

Şekil 6.1 : Çatalca Bölgesi'nde çalışma alanları yer bulduru haritası, karstik kaynak yeraltısuyu araştırması (çalışma alanı 1), süreksizlik ve kırık araştırması (çalışma alanı 2)..... 33

Şekil 6.2 : Boşluklarında su içeren ve içermeyen kireçtaşı birimi için elde edilen kuramsal eğriler, (a) TEM görünür özdirenç-zaman eğrileri, (b) TEM voltaj-zaman eğrileri, (c) DES görünür özdirenç-açılım eğrileri, (d)

kuramsal yer elektrik model..... 37
Şekil 6.3 : Su içeren kireçtaşı formasyonu üzerinde elde edilen eğriler, a) Tem-2 görünür özdirenç-zaman eğrisi, (b) Tem-1 (ocakiçi) ve Tem-7 (ekili alan) Voltaj Eğrileri, (c) Des-4 görünür özdirenç eğrisi, (d) kuramsal yerelektrik modeli, e) Des-3 ve Tem-3 görünür özdirenç eğrileri..... 38
Şekil 6.4 : a) A kesiti boyunca ölçülen DES eğrileri, b) A profili görünür özdirenç andıran kesiti, c) 1B Ters çözüm sonuçları kesiti, d) 2B yerelektrik Kesiti, e) jeolojik kesit (Kesitin doğrultusu Şekil 5.2'de gösterilmiştir)..... 40
Şekil 6.5 : a) B kesiti boyunca ölçülen DES eğrileri, b) görünür özdirenç andıran kesiti, c) jeolojik kesit (Kesitin doğrultusu Şekil 5.2'de gösterilmiştir)..... 41
Şekil 6.6 : a) C kesiti efektif özdirenç – derinlik kesiti, b) 1B Ters çözüm sonuçları kesiti, c) DES-TEM ortak ters çözüm sonuçları kesiti, d) jeolojik kesit (Kesitin doğrultusu Şekil 5.2'de gösterilmiştir)..... 43
Şekil 6.7 : Taşocağı içinde yapılan TEM ölçümü ters çözüm sonucu..... 44
Şekil 6.8 : Akifer tabakası ve fay üzerinde ölçülen TEM voltaj eğrileri (Sørensen ve diğ., 2004)..... 45
Şekil 6.9 : Model deney kullanarak fay zonu benzeştirimi. Kuramsal TEM görünür özdirenç eğrileri (Damron, 1986)..... 45
Şekil 6.10 : Wenner kaydırma ölçümleri kuramsal düşey kontakt eğrisi (Telford ve diğ, 1976) (üstte), Yermodeli (altta)..... 46
Şekil 6.11 : VLF-EM verisi kuramsal düşey kontakt eğrisi (Telford ve diğ, 1976) (üstte), Yermodeli (altta)..... 46
Şekil 6.12 : C kesiti (TEM) üzerinde ölçülen Tem-6, Tem-7 ve Tem-8 görünür özdirenç eğrileri. Eğrilerdeki sıçramaların Şekil 6.9'daki analog model ile benzeştiği dikkat çekicidir..... 47
Şekil 6.13 : Çakıltepe'de alınan ölçülerden elde edilen eğriler, (a) Wenner kaydırma profilleri, (b) VLF-EM profili, (c) Jeolojik kesit (Kesitin doğrultusu Şekil 5.2'de gösterilmiştir)..... 48
Şekil 6.14 : VLF-EM verileri, (a) %IP/OP ham veri değerleri, (b) Fraser süzgeci uygulanmış değerleri, (c) Karous – Hjelt süzgeci uygulanmış değerleri……..... 49
Şekil 6.15 : a) 19 kHz frekansında ve b) 16 kHz frekansında ölçülen VLF-EM verisi Karous - Hjelt eşdeğer akım yoğunluğu haritası, c) jeolojik kesit(Kesitin doğrultusu Şekil 5.2'de gösterilmiştir)..... 51
Şekil 6.16 : VLF-EM verileri için yaklaşık derinlik kestirimi, (a) kuramsal derinlik (Coney, 1976), (b) 19 kHz ve 16 kHz frekansları için VLF-EM verileri, (c) yaklaşık derinlik bilgisi..... 52

SEMBOL LİSTESİ

a	: Verici halkanın yarıçapı (m)
ΔV	: Gerilim farkı (V)
δ_{eff}	: Yaklaşık derinlik (m)
E	: Elektrik alan şiddeti (mV/m)
H	: Manyetik alan şiddeti (γ)
h	: Katman kalınlığı (m)
I	: Akım (A)
J	: Akım yoğunluğu (A/m^2)
AB/2	: Akım elektrotlarının orta noktaya olan uzaklığı (m)
MN/2	: Gerilim elektrotlarının orta noktaya olan uzaklığı (m)
μ	: Manyetik geçirgenlik (Henry/m)
R	: Direnç (Ohm)
r	: Akım kaynağına olan uzaklık (m)
ρ	: Özdirenç (ohm.m)
ρ_a	: Görünür özdirenç (ohm.m)
t	: Gecikme zamanı (s)
V	: Alıcı halkada oluşan gerilim farkı (V)
h	: Derinlik (m)
ε	: Dielektrik katsayısı
σ	: İletkenlik (S/m)
ϕ	: Faz açısı (derece)
ω	: Açısal Frekans (radyan/sn)

ÇATALCA – İSTANBUL BÖLGESİ'NDE YERALTISUYU ARAŞTIRMASI VE HİDROJEOLOJİK YAPISININ JEOFİZİK YÖNTEMLERLE ARAŞTIRILMASI

Günümüzde, sanayileşmenin, kentleşmenin ve buna bağlı olarak nüfusun artmasıyla yeraltısuyu araştırmaları ve hidrojeolojik haritalamanın önemi açığa çıkmaktadır. Yeraltısuyuna duyulan ihtiyaç, en değerli doğal kaynağın insanlar tarafından bilinçsizce kullanılarak dış etmenlerle kirletilerek kalitesinin bozulmasına yolaçılmaktadır. Çatalca – İstanbul Bölgesi'nde su ihtiyacı bölgedeki yeraltısuyu kaynaklarından sağlanmaktadır. Ancak bölgede mevcut olan taşocaklarının kullandığı kimyasallarla kirletilmeye yüz tutmuştur. Tez çalışması kapsamında, Çatalca Muratbey Bölgesi'nde karstik kaynaklardaki suların sınırlarının ve kalitesinin araştırılması amacıyla bölgede hidrojeolojik amaçlı jeofizik yöntemlerden elektrik ve elektromanyetik yöntemler uygulanmıştır. Ayrıca Çakıltepe'de jeolojik bilgiler ışığında süreksizliklerin araştırılması amacıyla da lisans dersi kapsamında alınan elektrik ve elektromanyetik verilerden de yararlanılarak sonuca gidilmiştir.

Elektrik ve elektromanyetik yöntemler sığ jeolojik yapı araştırmalarında, yaygın olarak kullanılmaktadır. İki yöntemin ölçüm tekniklerinin birbirinden farklı olmasından dolayı yöntemlerin karşılıklı üstünlükleri ve tamamlayıcı özelliklerinden yararlanılmıştır. Elektromanyetik yöntemlerden, Geçici Elektromanyetik Yöntem (Transient Electromagnetic Method – TEM), Çok Alçak Frekanlı Elektromanyetik Yöntem (Very-Low Electromagnetic Method – VLF-EM) ve Doğru Akım Özdirenç Yöntemler ile (Direct Current Resistivity Method) Düşey Elektrik Sondaj (DES) ve Wenner kaydırma ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen yerelektrik bilgiler doğrudan yer katmanlarının özdirenci ile ilişkilidir. Bu nedenle DES ve TEM yöntemlerinin ortak çözümü yapılarak bölgeye ait ilk defa yerelektrik bilgisi elde edilmiştir.

Çatalca – Muratbey Bölgesi'nde 11 istasyonda DES (Düşey Elektrik Sondaj), 8 istasyonda TEM, Çatalca – Çakıltepe'de 1 profil boyunca VLF-Elektromanyetik ve 3 profil boyunca Wenner kaydırma verileri toplanmıştır. Toplanan DES ve TEM verilerinin bir boyutlu ters çözümü yapılarak çalışma alanının yerelektrik kesitleri hazırlanmıştır. Bölgenin doğusunda yapılan 3 istasyon DES ve 1 istasyon TEM ölçümlerinde sağlıklı sonuçlar alınamadığından dolayı hazırlanan kesitlerde kullanılmamıştır. Bununla birlikte yeraltı ile ilgili daha gerçekçi bir model elde edebilmek için DES verilerin iki boyutlu modellemesi bu çalışma kapsamında yapılmıştır. Ayrıca TEM ve DES verilerinin ortak ters çözümünden elde edilen yer modellerinin litoloji ile olan uyumu incelenmiştir. Bölgede bulunan kaynaktan daha önceden yapılmış olan analiz sonuçları (2001-2002) ile yakın zamanda (2004-2005) taşocağı içinde açılmış olan kuyudan ve kuyu açılımı sonrasında kaynaktan alınan suyun analizleri karşılaştırılmıştır. Buna göre kuyu açılımından sonra ölçülen nitrat (NO_3)ve elektriksel iletkenlik (EC) değerlerinin standartlar dışında kaldığı görülmüştür. Bu sonuç, su kirliliğinin başlangıcı olarak yorumlanabileceği düşünülmektedir. Wenner kaydırma ve VLF-EM verileriyle Çakıltepe'deki süreksizliğin lokasyonu ve eğimi jeolojik bilgilerle uyumlu olarak tespit edilmiştir.

Ayrıca VLF-Elektromanyetik verilerinin süzgeçlenmesi ile eşdeğer akım yoğunluğu-derinlik kat haritaları elde edilmiş ve sonuçların jeoelektrik yöntemle elde edilen sonuçları desteklediği görülmüştür. Bununla beraber farklı frekanslarda yapılan ölçümlerden yararlanılarak bölgedeki süreksizlik için derinlik yaklaşımı yapılmıştır. Sonuç olarak, bölgede alınan jeofizik ölçümlerin jeolojik, hidrojeolojik ve hidrokimyasal araştırmalarla elde edilen sonuçları ilişkilendirilerek bölgenin hidrojeolojik yapısı, kırık ve süreksizlikleri belirlenmiştir.

INVESTIGATION OF GROUNDWATER IN ÇATALCA – İSTANBUL REGION AND INVESTIGATION OF HYDROGEOLOGICAL STRUCTURE WITH GEOPHYSICAL METHODS

The importance of groundwater researchs and hydrogeologic maping are increasing day by day due to the effect of industrialization, urbanization and augmentation of the populatin related to it. The need for ground water causes this most precious resource, to be used in insensible methods, and to be polluted by humans. The need of ground of water in Catalca-Istanbul Region is provided by the resources nearby. But it's getting polluted by the current mines, which uses unhealthy chemicals. Within the thesis study, the electric and electromagnetic methods are used for the research about the quality and limitations of ground water resources in Catalca Muratbey Region. In addition, electrical and electromagnetics data that are measured by graduate students for investigation of the discontinuities according to geological data are used in Çakıltepe.

The electric and electromagnetic methods are used often in shallow geologic structural researchs. Because the difference of measurement ways of these two methods, their advantages over each other and their complementary characteristics are used. Transient Electromagnetic Method(TEM), Very-Low Electromagnetic Method(VLF-EM), and Direct Current Resistivity (DC) methods with Vertical Electrical Sounding andWenner measurement are made as electromagnetic methods. The geoelectrical data obtained is directly related to the resistivity of ground layers. Therefore, The first geoelectrical data is obtained by making the collective resolvement of DES and TEM methods.

The data, of DES at 11 stations, of TEM at 8 stations, of VLF-EM along 1 profile at Catalca-Cakıltepe, and of Wenner along 3 profiles are obtained in Catalca-Muratbey Region. By making one-dimensional joint inversion of TEM data, the geoelectrical section of working area is obtained. In addition, for having a more realistic model of underground, two-dimensional modelization of DES data are made. Furthermore, the congruity between ground models, which are obtained by the common joint inversions of TEM and DES datas, and lithology are examined. Sample analysis which were collected from the source between the years at 2001-2002 and data of well and source after than from drilling well in mining site between the years at 2004-2005 are composed. According to this comparison, It's seen that nitrate and electrical cunductivity values are out of standarts after the openning of the pit. This result may be considered as the beginning of water pollution. Due to Wenner and VLF-EM datas, the location and slope of the discontinuity at Cakıltepe are determined. Furtherfore, current density – depth maps are obtained with filtering of VLF-EM data and its results are supported the results that are obtained with geoelectrical methods. By making measurements in different frequencies, a depth approach could be made for the discontinuity in this region. As a result, the hydrogeologic structure, fracture and discontinuities of the region is defined according to the geologic, hydrogeologic and hydrochemical researchs based on geophysical measurements.

1. GİRİŞ

Çatalca Bölgesi, Marmara Bölgesi'nin Trakya Alt Bölgesinde, İstanbul iline bağlı ve İstanbul belediye sınırlarına yeni dahil edilmiş, yüzölçümü 1593 km^2 olarak İstanbul'un alan olarak en büyük ilçesidir. Çatalca Bölgesi'ndeki çalışmalar Muratbey Bölgesi ve Çakıltepe olmak üzere iki lokasyonda yürütülmüştür. Muratbey Bölgesinde, İstanbul sınırlarına yeni katılmasıyla birlikte artan nüfusuyla birlikte su ihtiyacı ve yeraltısuyu kaynaklarının önemi her geçen gün artmaktadır. Kırklareli kireçtaşı formasyonunun hakim olduğu bölgede su ihtiyacı, formasyonun jeolojik özelliğinden kaynaklanarak oluşan karstik erime boşluklarında biriken sulardan oluşan karstik kaynaklardan yararlanılmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, Çatalca Bölgesi'nde yeralan karstik bir kaynağın jeofizik yöntemlerle araştırılarak hidrojeolojik yapısının elde edilmesidir. Araştırma alanında bulunan taşocağı ve onun dışında kalan ekili alanlarda ölçüm yapma zorluğu nedeniyle sınırlı sayıda ölçüm yapılmıştır. Hidrojeolojik haritalamalarda ana unsurlardan biri olan süreksizlik/kırık araştırması amacıyla yine aynı bölgede yaklaşık 3 km uzaklıktaki bir kırık ile ilgili değerlendirmeler bu çalışma kapsamına alınmıştır.

Bu yüksek lisans tezi kapsamında Çatalca-Muratbey Bölgesi'nde 11 istasyon doğru akım elektrik yöntem ile düşey elektrik sondaj (DES) ve 8 istasyonda geçici elektromanyetik yöntem (TEM) ölçümleri yapılmıştır. DES verilerinin RES2DINV programı (Loke, 2000) ile iki boyutlu (2B) ve Türkoğlu (2003) tarafından yazılan TEM verilerinin ters çözümünü hesaplayan programı ile değerlendirilmesiyle bölgeye ait yerlektrik kesitleri hazırlanmıştır. Ayrıca Çatalca – Çakıltepe'de önceden yapılan 1 profil boyunca VLF-Elektromanyetik ve 3 profil boyunca Wenner kaydırma verileri değerlendirmeye alınmıştır.

Doğru akım elektrik yönteminde amaç, yeriçinin yerelektrik yapısının ortaya çıkarılmasıdır. Bu yöntemin temek prensibi, akım elektrodları yardımıyla yere akım göndererek gerilim elektrodları ile yerde oluşan potansiyel farkının ölçülmesi ve akım-gerilim ilişkisini (Ohm Yasası) kullanarak yerin direncinin bulunmasıdır. Yerin

direnci ile elde edilen yerelektrik bilgiler doğrudan yer katmanlarının iletkenliği ile ilişkilidir. Elektrik yöntemlerde araştırma derinliği, kullanılan elektrodlar arasındaki mesafe ile orantılı olarak değişmektedir. Araştırma kapsamında elektrik yöntemlerden farklı elektrod dizilimlerine sahip Düşey Elektrik Sondaj (DES) ve Wenner kaydırma ölçümleri yapılarak yerin yerelektrik özellikleri incelenmiştir. Uygulanan tüm yöntemler hakkındaki detaylı bilgiler ilerleyen bölümlerde yeralmaktadır.

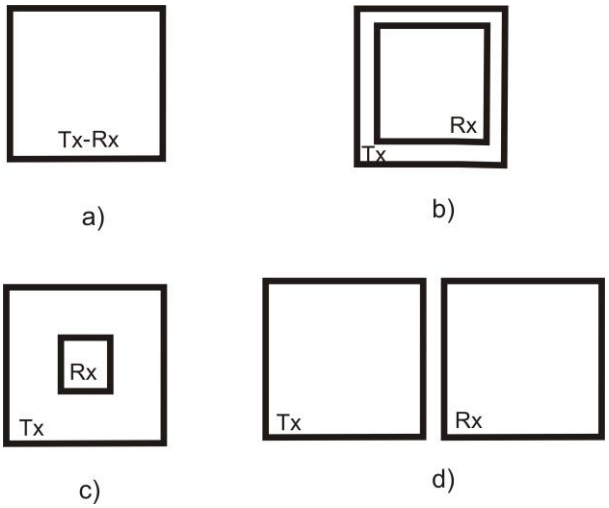
Elektromanyetik yöntemlerin esası ise, yeriçinde iletken zonların olması durumunda yeryüzünden gönderilen birincil manyetik alanların yeriçinde indüklenerek ikincil alan oluşturması ve bu alanların yeryüzünden ölçülmesine dayanmaktadır. Ölçümler sırasında zaman ortamı elektromanyetik yöntemlerden biri olan geçici elektromanyetik yöntem (Transient ElectroMagnetic – TEM) ile frekans ortamı elektromanyetik yöntemlerden biri olan çok düşük frekanslı elektromanyetik yöntem (Very-Low Frequency ElectroMagnetic Method – VLF-EM) kullanılmıştır. Zaman ortamı elektromanyetik yöntemlerden TEM yönteminde, ikincil manyetik alanın zaman içindeki sönümü ölçülmektedir. Ölçümler sırasında birincil alanlar bulunmamaktır. İlerleyen zamanla birlikte araştırma derinliğinin arttığı bu yöntemde düşey yöndeki özdirenç dağılımı araştırılmaktadır. Derin yerelektrik bilgisine gerek duyulan ortamlarda uygulamadaki kolaylığı bakımından tercih edilen yöntemlerdendir. Frekans ortamı elektromanyetik yöntemlerden biri olan VLF-EM yönteminde ise ölçümlerde ikincil manyetik alanların yanı sıra birincil manyetik alanlar da bulunmaktadır. Ölçülen toplam alanla başta olan manyetik alan arasındaki fark iletkenlik hakkında bilgi vermektedir. Kullanılan frekans bandına ve ortamın direncine göre belirli bir araştırma derinliğine sahip olan bu yöntem bir profil boyunca yanal süreksizliklerin araştırılmasında kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, yukarıda sözü edilen doğru akım elektrik yöntemi ikinci bölümde, geçici elektromanyetik yöntem üçüncü bölümde ve çok alçak frekanslı elektromanyetik yöntem ise dördüncü bölümde anlatılmıştır. Beşinci bölümde bögenin jeolojisi, hidrojeolojisi ve jeokimyasal verileri yeralmaktadır. Altıncı bölümde Çatalca-Muratbey Bölgesinde yapılan jeofizik araştırma ve değerlendirmeler verilmiştir. Öncelikle ölçülen jeofizik verilerin doğruluğu ve gerçeğe yakınlığının test edilmesi amacıyla karst hidrojeolojisinde jeofizik modelleme yapılmıştır. İnceleme alanındaki jeolojiye uygun olarak ortamdaki bir

yeraltısuyunun varlığının özdirence etkisi incelenmiştir. Bölgede yapılan elektrik-elektromanyetik ölçülerden elde edilen verilerin bir boyutlu (1B), iki boyutlu (2B) ve ortak ters çözümleri yapılarak ortama ait yerelektrik yapı ortaya konmuştur. Bu çalışma ile bölgede ilk kez 110 metre derinliğe kadar iletkenlik bilgisi elde edilmiştir. Bulunan sonuçlar inceleme alanının jeolojik, hidrojeolojik ve jeokimyasal özelliklerinin ortaya çıkarılması amacıyla çeşitli araştırmacılar tarafından (Nasuf, 2001; Duman, 2003) yapılan araştırma sonuçlarından elde edilen bilgiler ışığında değerlendirilerek, jeolojik ve hidrojeolojik verilerle entegrasyonu sağlanmıştır. Sonuç olarak tüm bu araştırma sonuçlarının beraber değerlendirilmesi ile bölgedeki yeraltısuyu dolaşımı, taşocağı içindeki patlatlamaların havzanın su kaynaklarına etkileyip etkilemediği ve bölgedeki süreksizlikler araştırılmıştır.

2. GEÇİCİ ELEKTROMANYETİK YÖNTEM (TEM)

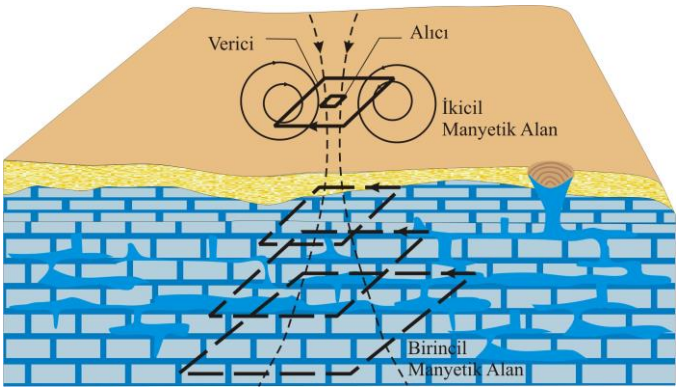
Zaman ortamı elektromanyetik yöntemlerden (Time–Domain ElectroMagnetics Method – TDEM) biri olan Geçici Elektromanyetik Yöntem (Transient ElectroMagnetics Method – TEM), gerek sığ gerekse derin kesimlerin araştırılmasında kullanılan indüktif bir yöntemdir. Arazide uygulama kolaylığı, ekonomik oluşu ve yüksek çözünürlüğünden dolayı jeofizik araştırmalarda sıkça tercih edilmektedir. TEM yöntemi, yerin iletkenlik değişiminin belirlenmesi amacıyla yeryüzündeki yapay bir kaynaktan verilen akımın belirli bir süreyle kesilmesinden oluşan uyartım akımlarının zamanla sönümlenmesinden kaynaklanan ikincil manyetik alanların alıcı tarafından ölçülmesine dayanmaktadır. Yöntemin etkili ve başarılı olarak kullanıldığı alanlar arasında hidrojeolojik araştırmalar (Sørensen ve Auken, 2004; Fitterman ve Stewart, 1986; McNeill, 1990) ve süreksizlik araştırmaları (Fontes ve diğ., 2003) sayılmaktadır. Yöntemin uygulanması aşamasında farklı alıcı-verici düzenekleri kullanılmaktadır (Şekil 2.1). Bu düzenekler



Şekil 2.1: TEM yöntemi dizilim şekilleri. (a)Tek halka (single loop). (b) iç içe iki halka (coincident loop). (c) Merkezi halka (in loop). (d) Ayrık iki halka (separate loop), (T_X:Verici (Transmitter), R_X:Alıcı (receiver))

çalışmanın amacına ve incelenen bölgenin jeolojisine bağlı olarak seçilmektedir. Sıkça kullanılan merkezi halka düzeneğinde, verici halkanın merkezine yerleştirilen çok döngülü sargı alıcı görevi görürken, tek halka sisteminde ise, alıcı olarak akımın

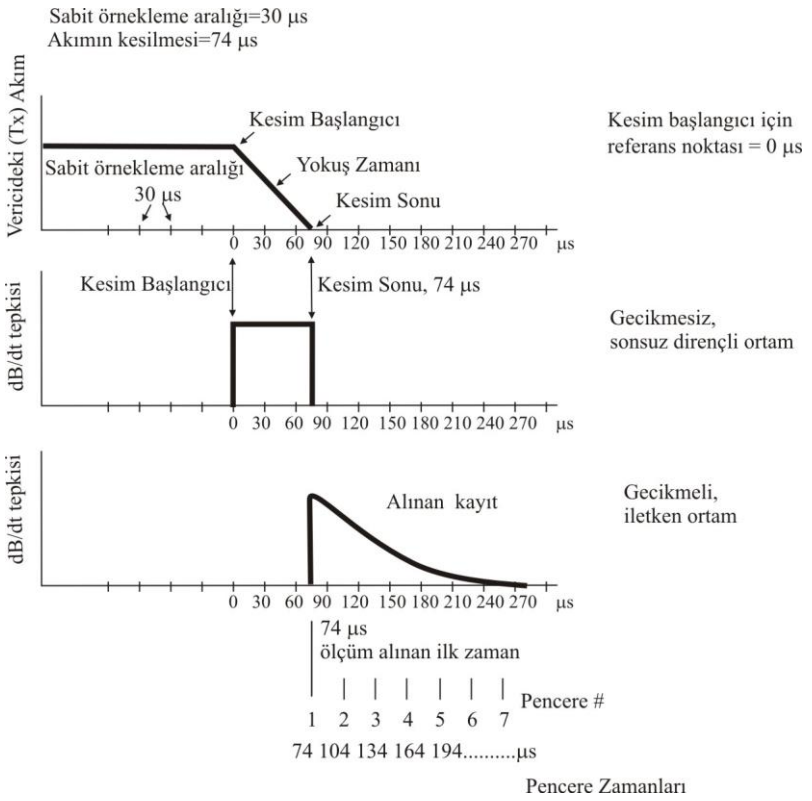
kesilmesinden sonra verici halka kullanılmaktadır. Vericiden yeriçine gönderilen akımın kesilmesi durumunda bir manyetik alan oluşmaktadır. Bu alan ortamda iletken bulunması durumunda, iletken içinden yayıldığında ikincil elektrik akımlarını (Eddy currents) oluşturmaktadır. Oluşan akımlar kendilerinin oluşturan verici halkanın hemen yanında verici kaynağın geometrisi ile yanlara ve aşağıya doğru ilerlemektedir (Şekil 2.2). Ancak, iletken tele akım verildiğinde nasıl akım değeri anında maksimum değere ulaşamazsa, kesilmesi durumunda da hemen sıfır değerine ulaşmamaktadır (Şekil 2.3a). Akımın kesim anı ile sıfır değerine ulaşması arasında geçen zamana yokuş zamanı (ramp-time – turn-of-time) denir. Yokuş zamanı ortamın iletkenliğine bağlı olarak uzamakta veya kısalmaktadır. Sığ derinliklerin



Şekil 2.2: Akımın kesilmesinden sonra çeşitli zamanlardaki akım çizgileri ile aşağı ve yanlara doğru yayınımları (McNeill, 1990'dan değiştirilerek alınmıştır).

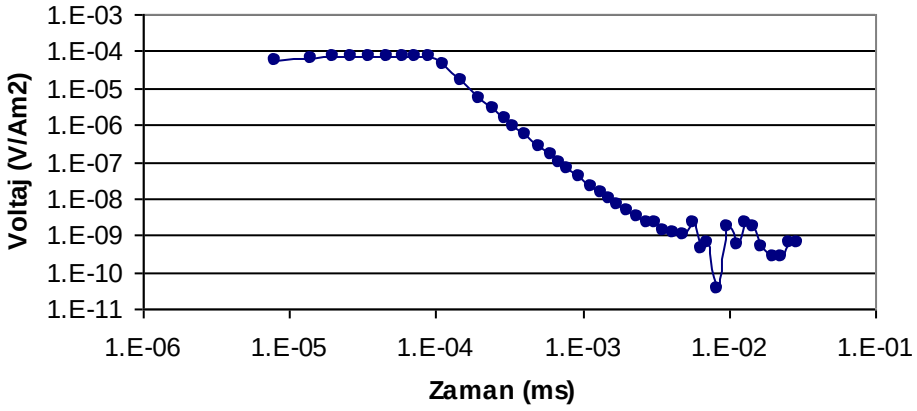
araştırılmasında yokuş zamanının kısa tutulması sağlanmaktadır. Yöntemde, ikincil manyetik alanın zamana bağlı türevi, zamanın fonksiyonu olarak ölçülmektedir. Ortamın sonsuz dirençli olduğu varsayılırsa Şekil 2.3b'de görüldüğü gibi sönümlenme birden bire olacaktır. Ancak, ortamın iletkenliği ve iletken ortamlarda akımın sönümlenmesinden dolayı gecikmeler oluşmaktadır. Böylelikle oluşan ikincil manyetik alanların zamanla azalması ölçülmektedir (Şekil 2.3c).

Alıcıda kaydedilen gerilimin bozunma özellikleri, her biri sönümlenen gerilimin büyüklüğünü ölçen ve kaydeden belirli sayıdaki zaman pencereleri tarafından belirlenir. Şekil 2.4'te arazide ölçülen bir kayıt görülmektedir. Maksimum pencere sayıları kullanılan cihazın teknik özelliğine göre değişmektedir. Şekilde 45 zaman



Şekil 2.3: TEM çalışma prensibi: Vericideki akım (üstte); sonsuz dirençli ortamda dB/dt tepkisi (ortada); iletken ortamda kaydedilen dB/dt tepkisi (altta), (Krivochieva ve Chouteau, 2002'den değiştirilerek alınmıştır.)

penceresine karşılı gelen merkezi halka (in loop) TEM verisi görülmektedir. Zamana karşılık gerilim değerlerinin çizdirildiği bu eğride ilk 9 veri yokuş zamanına denk gelmektedir. Yokuş zamanı verileri birincil manyetik alanı da içerdiğinden



Şekil 2.4: Çatalca'da 45 pencerelik merkezi halka (in loop) TEM verisi

değerlendirme aşamasında gözardı edilmektedir. Benzer şekilde, derinlere doğru gidildikçe sönümlenen manyetik alan ortamdaki çevresel etkilerden (elektrik güç

kaynakları, taşıtlar, binalar…vb.) dolayı bozulmaya uğramakta ve veride saçılmalar görülmektedir. Bozulan bu değerler de değerlendirmeye tabii tutulmamaktadır.

Ölçülerdeki bozulmayı en aza indirgeyerek ve akımın zamanla beraber hızla değiştiği derinlikteki pencerelere erken zaman pencereleri denmektedir. Derinlerde ise akım sönümlenmesinin daha yavaşladığı, dolayısıyla genliğinin azaldığı pencerelere ise geç zaman pencereleri denmektedir. Burada sinyal/gürültü oranı artmakta ve bu bölümlerin kaydedilerek değerlendirilmesiyle de daha derinlere ait bilgiler edinilmektedir.

2.1 Görünür Özdirencin Hesaplanması

TEM yönteminde alıcı ile ölçülen gerilim değerleri yorumlama aşamasında kolaylık ve anlaşılabilirliği açısından görünür özdirenç değerlerine çevrilmektedir. Böylece derinlikle değişimi belirlenmektedir. Jeolojik yapı veya istiflerin araştırılması için yapılan çalışmalarda ölçümler kaydırılarak yapıldığında özdirencin yanal değişimi de belirlenebilmektedir. Ölçülen gerilim değerinin matematiksel olarak ifadesi (Spies ve Eggers, 1986),

$$V = \frac{mI}{\sigma a^3}\left[3erf\,(\theta a) - \frac{2}{\sqrt{\pi}}\theta a(3+2\theta^2 a^2)e^{-\theta^2 a^2}\right] \tag{2.1}$$

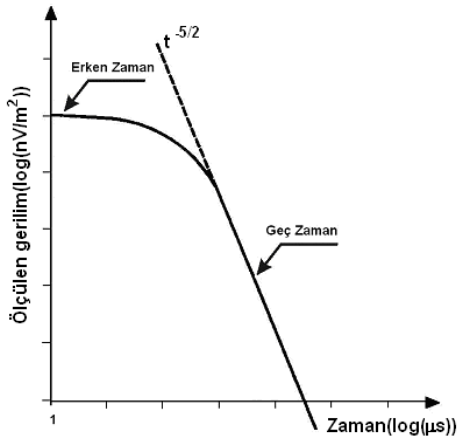
şeklindedir. Bağıntıda $\theta = (\mu_0 \sigma / 4t)^{1/2}$ ve erf hata fonksiyonu olmak üzere,

$$\text{erf}\,(\theta a) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^{(\theta a)} e^{-t^2}\,dt \tag{2.2}$$

olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca μ_0, boşluğun manyetik geçirgenliğini; m, alıcı halkanın efektif alanını; a, verici halkanın yarıçapını ve I uygulanan akımı göstermektedir. TEM yönteminde ölçülen gerilim eğrisi, erken ve geç zaman olmak üzere iki kısımda incelenmektedir (Şekil 2.5). Erken zaman diliminde, gerilim değerleri zamanla birlikte değişmemekte ve sığ derinliğin özdirenç bilgisini taşımaktadır. Erken zaman gerilim bağıntısı;

$$V^e = \frac{3mI}{\sigma a^3} \tag{2.3}$$

olarak verilmektedir. Bunun yanında, daha derin kısımlardan alınan bilgileri içeren geç zaman dilimi ise, akım yoğunluğunun maksimum seviyeye ulaştığı kesimdir.



Şekil 2.5: Vericide kaydedilen gerilim eğrisinin zamanın fonksiyonu olarak çizilmesi

Geç zamanda, gerilim değerleri zamanın ($t^{-5/2}$) ve son tabaka özdirencine ($\rho^{-3/2}$) bağlı olarak değişmektedir. Geç zaman gerilim bağıntısı,

$$V^g = \frac{I\sigma^{3/2}\mu^{5/2}ma^2}{20\sqrt{\pi}t^{5/2}} \tag{2.4}$$

bağıntısı ile verilmektedir. Yukarıdaki gerilim bağıntılarından yola çıkarak görünür özdirenç değerleri (Spies ve Eggers, 1986),

$$\rho_a^e = \frac{a^3V}{3mI} \tag{2.5}$$

$$\rho_a^g = \frac{I^{2/3}a^{4/3}m^{2/3}\mu_0{}^{5/3}}{20^{2/3}\pi^{1/3}t^{5/3}V^{2/3}} \tag{2.6}$$

olarak verilmektedir.

Yöntemde tabakalara ait özdirenç dönüşümü belirlenmesinde efektif özdirenç değerleri de kullanılmaktadır. Bunun için (Meju, 1995),

$$\rho_{eff} = 2.3\ \rho_a e^{(1-\alpha)} \tag{2.7}$$

yaklaşımı kullanılabilir. Burada α=0,15-0,2 arası bir değerdir. Bu dönüşüm, ölçülen verinin daha basit ve hızlı olarak yorumlanmasını sağlamaktadır.

2.2 Araştırma Derinliği

Araştırma derinliğini etkileyen en önemli faktörlerden biri yokuş zamanıdır. Yokuş zamanı, akım miktarı ve telin direnci ile doğru orantılı iken, uygulanan gerilim değeriyle ters orantılıdır. Bu parametrelerin değiştirilmesiyle istenen sığ veya derinlere ait bilgiler edinilmektedir. Ayrıca kullanılan halkanın çapı da araştırma derinliğinde önemli bir rol oynamaktadır. Verici halka kenar uzunluğu veya çapının büyütülmesiyle araştırma derinliği artmaktadır. Dolayısıyla hedeflenen derinliğe ve arazi koşullarına bağlı olarak halka boyu seçilmektedir. Buna göre, halka kenar uzunluğunun L olduğu varsayılırsa, genel bir yaklaşımla araştırma derinliği (h) aralığı h_{min}>L/10 ve h_{max}<3L arasındadır (Ranieri, 2000). Belirli bir zaman için akım yoğunluğunun maksimum olduğu derinlik bağıntısı (Meju, 1995);

$$\delta_T = \left(\frac{2t\rho}{\mu_0} \right)^{1/2} \qquad (2.8)$$

şeklindedir. Uygulamada gerek aletsel faktörler gerekse ortamın iletkenliğinden dolayı bu derinliğe ulaşmak zordur. Bu nedenle (Meju,1995) tarafından daha iyi bir yaklaşım olan,

$$\delta_{eff}^{TEM} = \frac{\delta_T}{2.3} \qquad (2.9)$$

bağıntısı kullanılarak, araştırma derinliği uygun bir katsayı ile ölçeklendirilmiştir.

3. DOĞRU AKIM ÖZDİRENÇ YÖNTEMİ

Doğru akım özdirenç yöntemi galvanik (yerle bağlantısı olan) bağlantılı ve yapay kaynaklı bir jeofizik yöntemdir. Yer içinin jeolojik yapısının özdirencine (elektrik özellik) göre haritalanmasını sağlamaktadır. Yöntemin çalışma esası, iki noktadan yere sabitlenmiş olan akım elektrodları ile yere akım uygulanarak, diğer iki noktadan sabitlenmiş gerilim elektrodları arasında oluşan gerilim farkının ölçülmesine dayanır. Böylelikle yüzeyden yapılan gerilim ölçümleriyle, yer altı katmanlarının derinlik ve özdirenç bilgileri saptanır. Ölçülen gerilim farkı tüm elektrodlar arasındaki uzaklığa ve ortamın jeolojik yapısına bağlı olarak değişir. Ayrıca elektrodların bulunduğu noktalarda ölçülen gerilim farkını etkileyen faktörlerdendir. Elektrodlar arası mesafenin arttırılmasıyla daha derinlere ulaşılmakta dolayısıyla daha derin katmanların özdirenç bilgilerine ulaşılabilmektedir. Gerilim farkı (ΔV) ile uygulanan akım (I) arasındaki ilişki Ohm yasası ile gösterilmekte ve yerin gösterdiği direnç (R) saptanmaktadır.

$$R = \frac{\Delta V}{I} \tag{3.1}$$

Bağıntıda, gerilim farkı, volt; akım, amper ve direnç, Ohm; cinsinden ifade eder.
Özdirenci ρ olan, sonsuz izotrop bir ortama herhangi bir yerindeki nokta kaynaktan akım verildiği düşünülürse, kaynaktan R uzaklığındaki noktalarda akım yoğunluğu Ohm Yasası gereğince;

$$J = \frac{E}{\rho} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial V}{\partial R} \tag{3.2}$$

olmalıdır. Burada, J akım yoğunluğu, E elektrik alan, V gerilim, R kaynaktan olan uzaklıktır. Akım yoğunluğu, akımın geçtiği kesit yüzölçümüne oranı olarak tanımlandığına göre,

$$J = \frac{I}{A} = \frac{Amper}{m^2} \tag{3.3}$$

şeklindedir. Kaynaktan R uzaklığında olan noktaların bir küre yüzeyi oluşturduğu göz önüne alınarak, (3.1)ve (3.2) denklemlerinin sağ yanlarını birbirlerine eşitlenmesi ile,

$$\frac{I}{4\pi R^2} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial V}{\partial R} \tag{3.4}$$

ve (3.3) denkleminin gerilim için düzenlenmesi ile

$$\partial V = -\frac{\rho I}{4\pi R^2} \cdot \partial R \tag{3.5}$$

elde edilir. Her iki tarafın integrasyonu, nokta akım kaynağının izotrop ortam için kendisinden R uzaklığında oluşturduğu gerilimi vermektedir;

$$V = \frac{\rho I}{4\pi R} + C \tag{3.6}$$

C integrasyon sabitidir. Kaynaktan çok uzak noktalarda gerilimin sonlu bir değeri olamayacağından C integrasyon sabiti sıfır olmalıdır. Gerçekte yeryuvarı hava ile sınırlı olduğundan, ortamın yarısonsuz alınması gerekmektedir. Bu durumda gerilim denklemi,

$$V = \frac{\rho I}{2\pi R} \tag{3.7}$$

ile verilmektedir.

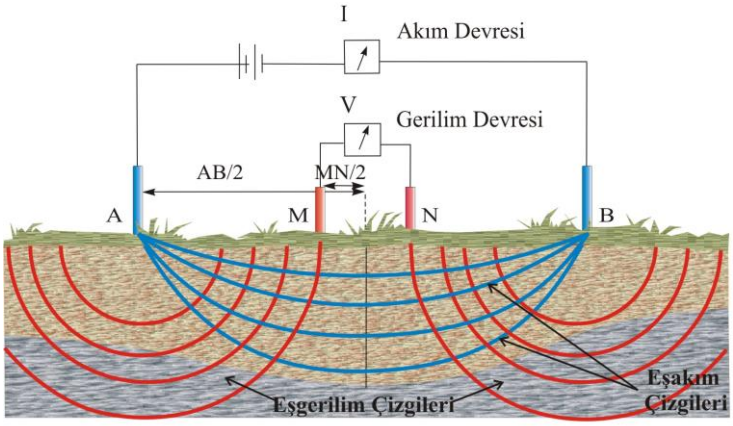
3.1 Ölçüm Teknikleri

Elektrotların ölçüm sırasındaki çeşitli konumlarına göre geliştirilen ölçü alım teknikleri, elektrot açılımları olarak da adlandırılır. Özdirenç yönteminde, yerin özdirenç değişimlerinin belirlenmesi amacıyla düşey elektik sondaj (delgi) ve kaydırma ölçümleri yapılmaktadır.

3.1.1 Düşey Elektrik Sondaj (DES)

Düşey Elektrik Sondaj (DES) tekniği ile düşey yöndeki özdirenç değişimi incelenmektedir. Bunun için kullanılan farklı birçok elektrod dizilimi mevcuttur.

Bölgenin jeolojik özellikleri ve arazi koşullarının getirdiği kısıtlamalar göz önüne alınarak kullanılacak dizilim seçilir. DES ölçümleri sabit bir nokta merkez seçilerek, her ölçüm sonucunda bu noktanın iki tarafında elektrodların bir çizgi boyunca açılım yapılmasıyla uygulanır. Bu teknik için en ideal dizilim Şekil 3.1'de şematik olarak



Şekil 3.1: Schlumberger dizilimi şematik gösterimi

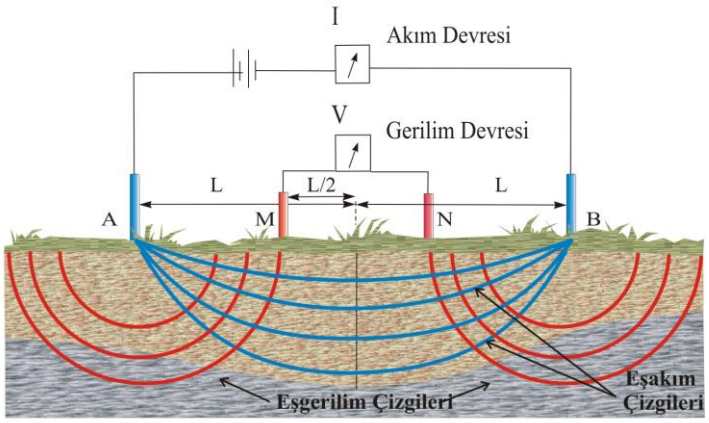
gösterilen Schlumberger dizilimidir. Dizilimin tercih edilmesindeki en önemli sebeplerden biri, gerilim elektrodları arasının her ölçüm sonunda yer değiştirilerek mesafenin arttırılmasına gerek duyulmamasıdır. Bu özellik ölçümlerde gerek zaman gerekse iş gücü açısından büyük avantaj sağlar. Ölçümler en küçük elektrod açıklığı ile başlar ve belirli aralıklarla arttırılarak devam ettirilir. Ölçülen maksimum AB/2 değeri maksimum araştırma derinliğini göstermektedir. Ölçülen her veri akım elektrodları arası mesafenin yarısına (AB/2) karşılık görünür özdirenç değeri olarak çizdirilir. Buradaki görünür özdirenç değeri, dirence, dizilime ait geometrik faktöre ve elektrodlar arası açıklık kullanılarak hesaplanır.

Düşey Elektrik Sondaj (DES) tekniği ile nitel yorumlama yapmak mümkündür. Nicel yorumlama yapılabilmesi için verilere ters çözüm uygulanır. Sonuç olarak tabakalı ortamlara ait gerçek özdirenç ve kalınlık değerlerine ulaşılır. Ortamın homojen ve izotrop katmanlardan oluştuğu varsayılırsa, bir boyutlu (1B) ters çözüm yapılırken, yanal ve düşey yönde değişimlerin söz konusu olduğu durumlarda ise iki boyutlu (2B) ters çözümlerin yapılması gerekmektedir.

3.1.2 Kaydırma Ölçümleri

Kaydırma ölçümleri ile yanal süreksizliklerin araştırılması yapılmaktadır. Bunun için, elektrod dizilimine bağlı olarak elektrodlararası uzaklık araştırılmak istenen

derinliğe göre sabit tutulmakta ve bir doğru boyunca elektrodlar belirli örnekleme aralıklarında kaydırılır. Bu teknik için genellikle yanal süreksizliklere karşı duyarlı olan Wenner dizilimi tercih edilmektedir. (Şekil 3.2). Dizilimin bir üstünlüğü de düşey çözünürlüğünün çok iyi olmasıdır. Schlumberger diziliminden farklı olarak



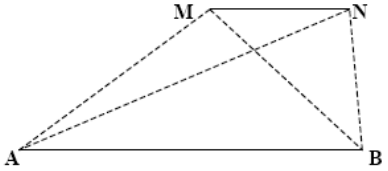
Şekil 3.2: Wenner dizilimi şematik gösterimi

AB/2 değerleri her ölçüm için aynı mesafedir ve bu değer araştırma derinliğini gösterir (L). Ölçülen değerler ölçüm lokasyonlarına karşılık görünür özdirenç değeri olarak çizdirilir.

3.2 Görünür Özdirencin Hesaplanması

Düşey elektrik sondaj ölçümlerinde kullanılan yol, *A* ve *B* akım elektrodları yardımıyla yere akım verilmesi, *M* ve *N* gerilim elektrotları ile de gerilim farkının ölçmesidir. Elektrodların konumlarını genel olarak gösterimi Şekil 3.3'de verilmiştir.

İzotrop ve yarısonsuz bir ortam üzerinde *M* noktasındaki gerilim (3.6) bağıntısı kullanılarak,



Şekil 3.3: Akım ve potansiyel elektrotları arasındaki uzaklıklar

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi}\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM}\right) \tag{3.8}$$

ve *N* noktasındaki gerilim,

$$V_N = \frac{\rho I}{2\pi}\left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN}\right) \tag{3.9}$$

olarak hesaplanmaktadır. Arazi uygulamalarında *M* ve *N* noktaları arasındaki gerilim farkı ölçüldüğünden,

$$V_M - V_N = \Delta V = \frac{\rho I}{2\pi}\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}\right) \tag{3.10}$$

yazılabilir. Bilinen uzaklık değerlerinden, geometrik faktör olarak adlandırılan k değeri ise,

$$k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}\right)} \tag{3.11}$$

olduğundan dolayı özdirenç aşağıda bağıntıyla bulunmaktadır;

$$\rho = k\frac{\Delta V}{I} \tag{3.12}$$

Bağıntıda, k, geometrik faktör farklı dizilimler için bilinen elektrodlararası uzaklık değerlerine göre ayrıca hesaplanır. Buna göre, Schlumberger dizilimi için geometrik faktör,

$$k = \pi\left(\frac{(AB/2)^2}{MN} - \frac{MN}{4}\right) \tag{3.13}$$

iken, Wenner dizilimi için ise,

$$k = 2\pi L \tag{3.14}$$

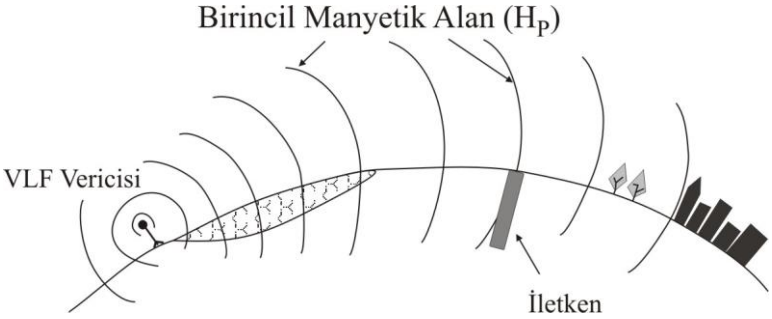
olarak hesaplanmaktadır.

4. ÇOK ALÇAK FREKANS ELEKTROMANYETİK YÖNTEM (VLF-EM)

Çok alçak frekans elektromanyetik yöntem (Very Low Frequency ElectroMagnetic Method – VLF-EM) 3. bölümde anlatılan TEM yöntemi gibi indüktif bir yöntemdir. Bu özelliği ile kullanımının kolay ve hızlı olması özellikle sığ kesimlerdeki iletkenlik aramalarında tercih edilmesini sağlar. Yöntemde, verici olarak dünya üzerinde çeşitli lokasyonlarda bulunan ve haberleşme amacıyla kurulan 15 – 30 kHz frekans aralığında yayın yapan radyo vericileri kullanılır. Vericilerin yaydığı sinyaller yer ile iyonosfer arasında hareket eder. Yapılan ölçümlerde güvenilir bir sonuca ulaşmak için en az iki vericiden yayılan sinyaller kaydedilebileceği gibi farklı birçok alıcı – verici doğrultuları için de ölçüm yapmak mümkündür. Ölçümlerde 15 – 30 kHz frekansında yayın yapan vericilerin listesi Tablo 4.1'de verilmiştir. Bu vericiler 50 - 150 metre boyunda ve 100 – 1000 kW gücünde dikey antenlerdir. Vericilerde oluşan birincil manyetik alan (H_p) yatay yönde yayılır (Şekil 4.1). Yayılan alanların araştırma yapılan ölçü noktası civarındaki iletken bölgelerde uyarttıkları akımların,

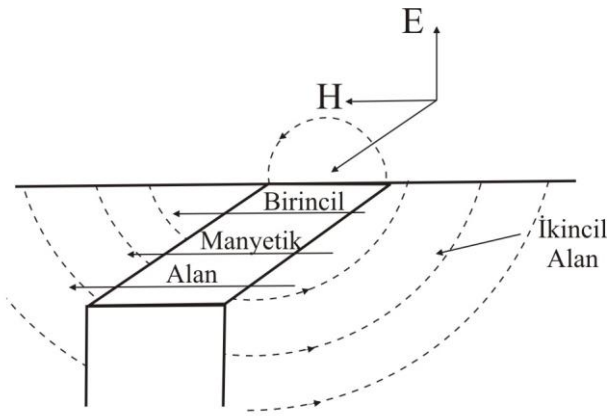
Tablo 4.1: VLF Verici İstasyonları Listesi (McNeill ve Labson, 1988)

Tanım	Frekans (kHz)	Güç (kw)	Bulunduğu Yer
FUO	15.1	500	Bordeaux, Fransa
GBR	16.0	750	Rugby, İngiltere
JXZ	16.4	350	Helgeland, Norveç
MHW	19.0	250	Criggeon, İngiltere
ICV	20.3	500	Tavalora, Italya
NSS	21.4	1000	Annapolis, Amerika
NWC	22.3	1000	Exmouth, Avusturalya
NPM	23.4	512	Pearl Harbour, Hawai
NAA	24.0	1000	Cutler, Amerika
NAU	28.5	100	Aquada, Porto Rico



Şekil 4.1: VLF vericilerinden yayılan birincil manyetik alan

bileşke vektörün yön ve şiddetini değiştirmesiyle oluşan yeni sinyallerin kaydedilmesiyle yerin elektrik özellikleri saptanır. Bir başka deyişle, ortamda bir iletken olması durumunda yayılan manyetik alan iletken içinde Eddy akımlarını oluşturmaktadır. Bu akımlarda iletkenden yayılan ikincil manyetik alanları üretmekte ve alıcıyla kaydedilen birincil manyetik alanlara yeni oluşan bu ikincil manyetik alanlar eklenmektedir. Dolayısıyla, başlangıçta olan alan ile farklı genlik ve faza sahip olan toplan alan farkı iletkenin varlığı hakkında bilgi verir (Şekil 4.2).



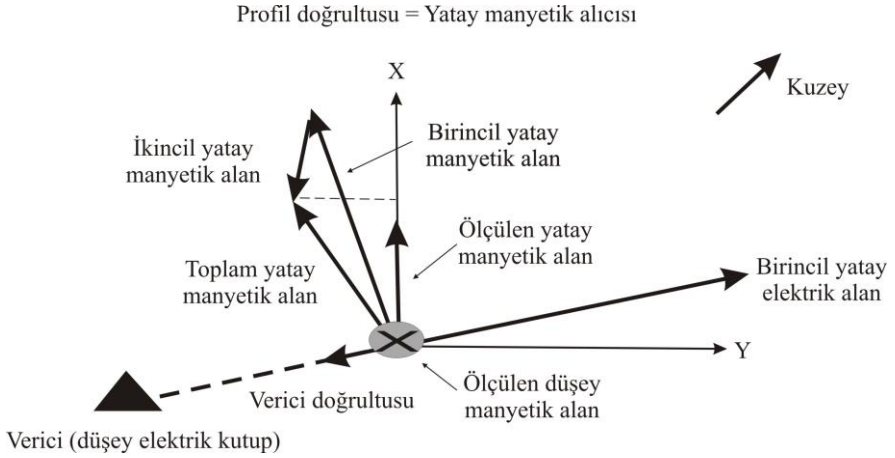
Şekil 4.2: Düşey iletken ve manyetik alan bileşenlerinin görünümü (Milsom, 1996)

VLF-EM yönteminde genel olarak yanal yöndeki elektriksel iletkenliğin değişiminin belirlenmesi amacıyla bir profil boyunca belirli aralıklarla kaydırma ölçümleri veya alansal ölçümler yapılır. Araştırılmak istenen iletkenin doğrultusu, verici istasyon ile aynı doğrultuda seçilmelidir. Bunun nedeni, indüklenmiş akımlar ve ikincil manyetik alanların vericiye arşı dizilmiş olan iletkende çok güçlü iken, birincil manyetik alanlara paralel dizilmiş iletken üzerinde çok güçsüz olmasından kaynaklanmaktadır. Bu sebepten dolayı en az iki istasyonda ölçüm yapılarak bölgenin detaylı olarak incelenmesi sağlanır. Kırık ve çatlaklı bölgeler içinde biriken yeraltısuyu

araştırmaları (Palacky ve diğ., 1981; McNeill, 1990), karstik boşlukların aranması (Guerin ve Benderitter, 1995) ve yeraltısuyu kirliliğinin araştırılması (Benson ve diğ., 1997; Karlık ve Kaya, 2001) VLF-EM yönteminin kullanım alanları arasında sayılmaktadır.

4.1 Ölçülen Büyüklükler

VLF-EM yönteminde ölçülen en genel büyüklük, manyetik alanın düşey bileşeninin yatay bileşene oranının gerçel (real component) ve sanal (imaginary component) bileşenleridir (Şekil 4.3). Bu büyüklükler yüzde (%) cinsinden ifade edilir ve birimsizdir. Yöntemde ölçülen diğer büyüklükler ise, dalganın eğim açısı (wave-tilt) ve toplam manyetik alan şiddetidir. Diğer frekans ortamı elektromanyetik yöntemlerde olduğu gibi alan şiddetinin genlik değişimi ve faz farkı gözlemlenir.

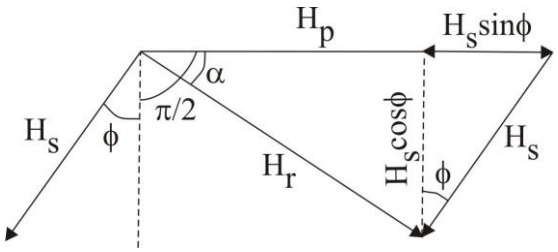


Şekil 4.3: Ölçülen düşey ve yatay manyetik alan doğrultuları (Pedersen, 2002)

İletken ortamda ilerleyen elektromanyetik dalganın bileşenleri arasında faz kayması (phase-shift) görülür. Ancak, ortamda iletken yapının olmadığı durumlarda ise, ölçülen toplam alan sadece yatay birincil alandır. Dalga eğimi sıfırdır ve fazı da birincil alanın fazıdır, yani faz farkı görülmemektedir. Ortamda bulunan bir iletken yapının varlığı aynı zamanda ikincil alanların kaynağıdır. Ölçülen toplam alan genlik değeri, yönlenme ve faz bakımından birincil alandan farklılık gösterir. Genel olarak sıfırdan farklı dalga eğimi ve faz kayması gözlemlenir (Şekil 4.4). Faz kayması bağıntısı,

$$\theta p - \theta s = (\pi/2 + \phi) \qquad (4.1)$$

şeklinde verilmektedir.



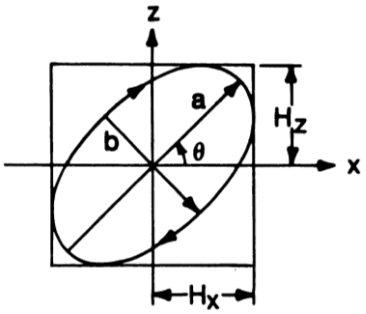
Şekil 4.4: Birincil alan (Hp) ve ikincil alanın (Hs) birleşiminden oluşan toplam alan (Hr) ve alanlar arasındaki faz kaymasını gösteren vektör diyagramı (Telford ve diğ., 1976)

Fazdaki 90° gecikme fizik yasaları (induction coupling) gereği oluşurken, ϕ ise iletken yapıyı tanımlayan elektriksel parametrelerin değişmesini sağlayan değişkenlerden (indüktans L ve özdirenç ρ) kaynaklanmaktadır. Eğer yeraltındaki yapı çok iyi bir iletken ise ($\rho \to 0$ ve $\phi \to \pi/2$), bu durumda ikincil alanın fazı birincil alanın fazından 180° geridedir. Ancak yapı kötü bir iletken ise ($\rho \to \infty$ ve $\phi \to 0$), bu durumda da gecikme faz farkı 90° olacaktır.

İkincil alan, birincil alana eklendiğinde toplam alan düşey düzlemde kutuplanma elipsini izler. Alıcı tarafından ölçülen ise eğim ve polarizasyon elipsinin elipselliğidir (ellipticity). Eğim (tilt) açısı H_x ekseni ile elipsin uzun ekseni arasındaki açıya (θ) denir.

$$\text{Eğim} \cong \frac{H_z^i}{H_p} 100 \text{ (\% cinsinden)} \qquad (4.2)$$

Manyetik alanın yatay bileşeni (H_x) ve düşey bileşeni (H_z) koordinat sistemi üzerinde gösterildiğinde oluşan eğri elips şeklini almaktadır (Şekil 4.5). Bu elipse kutuplanma elipsi denir. Elipsellik, elipsin kısa ekseninin (b), uzun eksenine (a) oranıdır. Yeraltındaki iletkenliğin çok yüksek olması durumunda b değeri çok küçüldüğünden b/a değeri 0'a yaklaşır ve elips düz bir çizgi halini alırken, düşük bir iletkenlikte



Şekil 4.5: Kutuplanma elipsini etkileyen değişkenler (McNeill ve Labson, 1988)

b/a değeri 1'e yaklaşır ve elips çember şeklini almaktadır. Ölçülen yüzde cinsinden alan oranlarının, eğim açısı ve polarizasyon elipsinin elipselliği ile olan ilişkileri,

$$\tan(2\theta) = \frac{2(H_z / H_x)\cos\phi}{1-(H_z / H_x)^2} \tag{4.3}$$

$$e = \frac{b}{a} = \frac{H_z H_x \sin\phi}{\left[(H_z e^{i\phi}\sin\theta + H_x \cos\theta)\right]} \tag{4.4}$$

şeklindedir. Yöntemde ölçülen manyetik alan oranının gerçel bileşen (IP) ve sanal bileşen (OP) değerlerinin, eğim açısı ve elipsellikle olan ilişkisi izleyen bağıntılarda verilmiştir.

$$IP = Re(H_z/H_x) \cong 100\times\tan\theta \tag{4.5}$$

$$OP = Im(Hz/Hx) \cong 100\times e \tag{4.6}$$

4.2 Süzgeçleme

VLF-EM yönteminde, yapıların derinliğine ve tam olarak lokasyonuna ait bilgilerin net olarak sağlanamaması yöntemin sınırlamalarından biridir. Ancak son yıllarda geliştirilen süzeçleme işlemleriyle bu sorun büyük ölçüde giderilir. Uygulanan süzgeçlerden biri olan Fraser süzgeci (Fraser, 1969), gerçel bileşen verilerinin sayısal bir süzgeç yardımıyla iletken üzerinde en büyük değerleri almasını sağlar. Fraser süzgeci alçak geçişli bir süzgeç olup, veriyi 90° kaydırmakta ve yumuşatmaktadır. Verinin, band geçişli süzgeç şekli ile uyumlu belirtilerini belirginleştirirken, diğerlerini bastırır. Dolayısıyla, süzgeç şekline benzeyen belirtiler negatif değerler alır ve yorumlamada ise sadece pozitif değerler gözönüne alınmaktadır.

Diğer bir süzgeç olan Karous-Hjelt süzgecinde (Karous ve Hjelt, 1983) ise, manyetik alan bileşenleri bir derinlik değerine atanarak görünür bir akım yoğunluğu değerlerinin elde edilmesini sağlamaktadır. Süzgeçleme işlemi sonucunda görsel olarak düşey iletkene ait bir eşdeğer akım yoğunluğu haritası üretildiğinden dolayı Fraser süzgecine göre daha fazla tercih edilmektedir. Ayrıca, bu süzgeç ile iletkenin dalımı da tahmin edilebilmektedir. İletken üzerinde eşdeğer akım yoğunluğu dalımının gerçel kısmı sadece pozitif değerler alırken, sanal bileşen kısmı ise daha

karmaşık olmaktadır. Bazı durumlarda pozitif ve negatif akımlar hemen hemen eşit büyüklüklerdir ve sonuçta toplam akım yoğunluğu neredeyse sıfır olmaktadır.

4.3 Araştırma Derinliği

Vericiden yayılan manyetik alan bileşeni (H) ve vericiden uzaktaki bir A(x,y,z) noktasındaki genlik değeri (H_M) ile gösterilirse; elektromanyetik dalganın manyetik alan bileşeni;

$$H=H_M e^{i\omega t}e^{-(i\omega\mu\sigma)1/2z} \tag{4.7}$$

şeklindedir. Bağıntıda $e^{i\omega t}$ dalganın zamana bağlı hareketini ve $e^{-(i\omega\mu\sigma)1/2z}$ ise, dalga enerjisinin genliğinin derinlikle azaldığını göstermektedir. Enerjisinin çoğunun sönümlendiği ve başlangıçtakinin 1/e katı genliğe sahip olduğu bu derinlik, nüfuz derinliği olarak kabul edilmektedir. Buna göre;

$$H_M e^{-kz} e^{i\omega t} = H_M e^{-1} e^{i\omega t} \tag{4.8}$$

olduğu kabul edilirse, buradan;

$$e^{-kz} e^{-1} \Rightarrow z = 1/k \tag{4.9}$$

ile gösterilirken,

$$k = (-i\omega\mu_0\sigma)^{1/2} = \frac{1}{4}(1-i)(\omega\mu_0\sigma)^{1/2} \tag{4.10}$$

değerine eşittir. Bağıntıda, μ_0, boşluğun manyetik geçirgenliği ($4\pi x10^{-7}$ H/m); ω, açısal frekans (radyan/sn) ve σ ise, iletkenliktir (Siemens/m). O halde derinlik (δ);

$$\delta = (2/\omega\mu_0\sigma)^{1/2} \tag{4.11}$$

bağıntısıyla bulunmaktadır. Nüfuz derinliği olarak bilinen bu değer;

$$\delta = 503.2\sqrt{\frac{\rho}{f}} \tag{4.12}$$

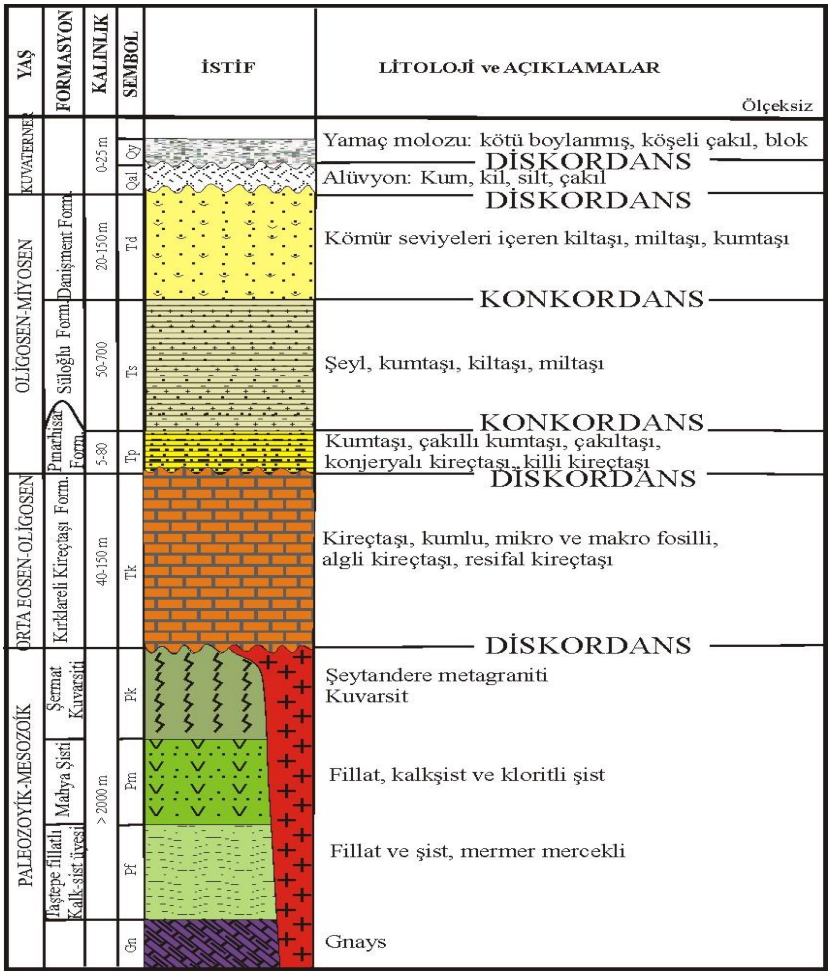
bağıntısıyla hesaplanabilir. Bağıntıda ρ (ohm.m), özdirenci gösterirken f (Hz) frekansı göstermektedir.

5. ÇATALCA - İSTANBUL BÖLGESİ'NİN JEOLOJİK, HİDROJEOLOJİK VE JEOKİMYASAL ÖZELLİKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde, Çatalca ilçe merkezine bağlı bulunan Muratbey ve Çakıltepe Bölgesi çalışma alanının jeolojisi ve Muratbey Bölgesi'ndeki resifal kireçtaşlarından boşalan karstik kaynak ile açılan kuyunun hidrojeolojik ve jeokimyasal değerlendirilmesi Duman (2003); Yalçın ve Duman (2003) ve MTA (2004)'ten aktarılarak sunulmuştur.

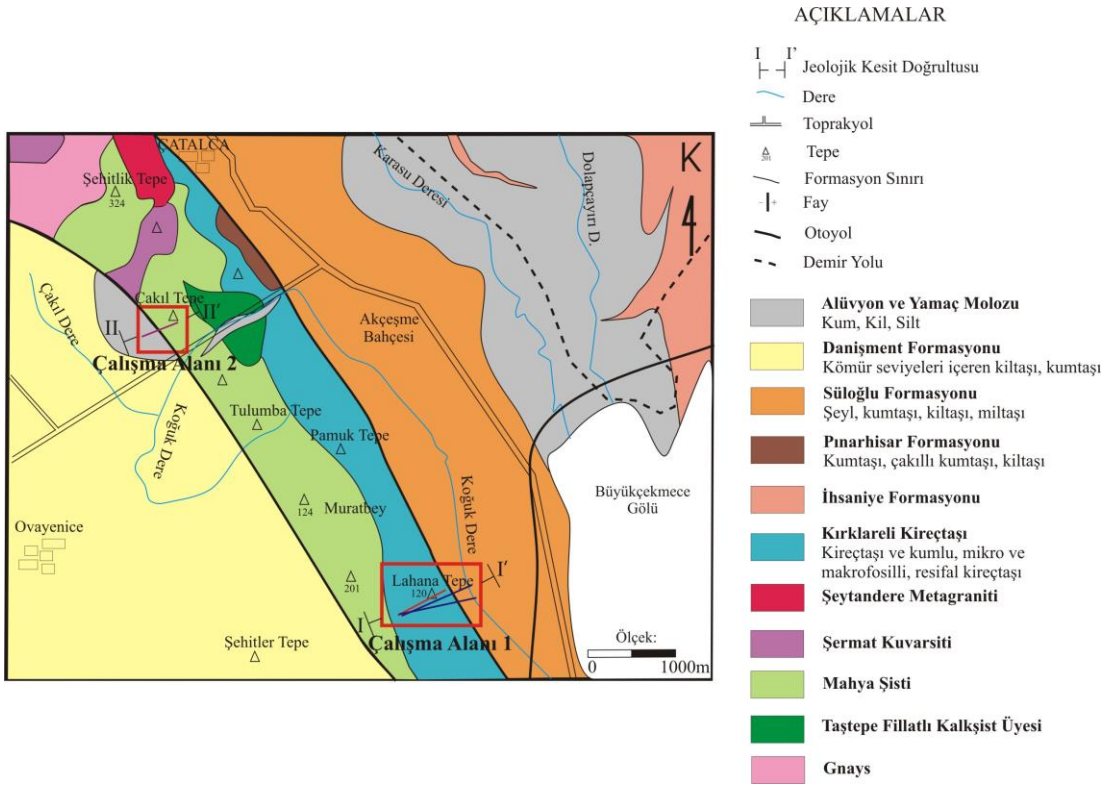
5.1 Çalışma Alanının Jeolojisi

Çatalca'da yapılan çalışmalar iki lokasyonda yürütülmüştür. Çatalca Bölgesi'nin genelleştirilmiş stratigrafik kesiti Şekil 5.1'de verilmektedir. Muratbey Bölgesi'nin



Şekil 5.1:Çatalca bölgesi genelleştirilmiş stratigrafik kesiti (Duman, 2003)

jeolojisini oluşturan birimler yaşlıdan gence doğru, Mahya Şisti ve Kırklareli kireçtaşı formasyonudur. Mahya şisti formasyonu KB-GD doğrultulu uzanımıyla kuzeyinde yeralan diğer bir çalışma alanı olan Çakıltepe'de de etkisini göstermektedir. Çakıltepe'de ayrıca sığ kesimde alüvyon birimleri ile ilk 20 metreden sonra Danişment formasyonu ile görülmektedir. Her iki lokasyonuda kapsayan Çatalca jeoloji haritası Şekil 5.2'de yeralmaktadır.



Şekil 5.2: Çatalca bölgesi jeoloji haritası (Duman, 2003)

Bölgede bulunan jeolojik birimlerle ilgili ayrıntılar Duman (2003) ve MTA (2004)'ten aktarılmıştır.

5.1.1 Mahya Şisti

Çalışma alanında Çakılköy ile bu köyün kuzeyindeki Şehitlik Tepe arasında ve Çatalca – Muratbey köyü hattı güneybatısında uzanana formasyon yaygın mostralar vermektedir. Mahya Şisti, gri-koyu gri renkli fillit ve gri-yeşilimsi gri renkli klorit şistlerden oluşur. İçerisinde yer yer kalkşist ve koyu gri-siyah renkli çört izlenir. Sık kıvrımlı olan birimde fillitler yapraklanmalı ve yapraklanma yüzeyleri beyaz mika pulludur. Beyaz mikaların zengin olduğu kesimlerde mika-fillit, kuvarsın zengin olduğu kesimlerde de kuvars-fillit egemen kaya türleridir. Kalsitin artmasıyla kalk-fillit ve kalk-şistlere geçilir. İnce kesit olarak incelendiğinde, mikro kıvrımlı doku ve

kink bandlarının oluştuğu görülmüştür. İçerisinde bol mika, kuvars, muskovit-serisit, feldispat, opak mineral, biotit ve klorit mineralleri bulunmaktadır.

5.1.2 Kırklareli Kireçtaşı

Birime çalışma alanındaki Muratbey civarında rastlanmaktadır. Bu köyün yakın çevresindeki Lahana Tepe, Pamuk Tepe ve Sarıkaya Tepe gibi yükseltileri oluşturmaktadır. Birim beyaz, grimsi beyaz, sarımsı beyaz, krem renkli, açık gri, ortalama kalın katmanlı, genelde hafif eğimli yada yatay tabakalı, sert, fosilli ve kavkılı olduğu kesimleri erime boşluklu, alt kesimlerinde killi, kumlu, bol nümmülit ve mikro fosilli, yer yer yama resif özelliğindeki resifal kireçtaşlarından oluşmaktadır.

Çatalca–Muratbey Köyü arasındaki alanda bu birim resifal kireçtaşları ile temsil edilmektedir. Birim altta kumlu kireçtaşı; beyazımsı sarı renkli, gevşek dokulu, mikro fosilli, algli kireçtaşları şeklindedir. Üst seviyelerde ise sert, sıkı dokulu, resifal özelliktedir. Kırklareli kireçtaşı içindeki resifler çoğunlukla yama resifleri şeklinde, yer yer de set resifi şeklindedir.

5.1.3 Danişment Formasyonu

Birim Çatalca'da Şehitler Tepe, Ihlamur Tepe, Ayazma Tepe ve Yenice Tepe gibi yükseltileri oluşturmaktadır. Çalışma alanında ise Çakıltepe civarında görülmektedir. Formasyon; altta genellikle yeşil, yeşilimsi gri ve sarımsı gri, ince-orta tabakalı kumtaşı, şeyl ve marn ardalanmasından oluşur. Yer yer çalıktaşı, kumtaşı ve kiltaşı-marn-şeyl yoğunlaşması gözlemlenir. Çakıllar yuvarlak olup, kuvars, kuvarsit, volkanit, radyolarit, kuvars kumtaşı ve granit kökenlidir. Birimin üst bölümüne doğru kiltaşı, marn, tüf ve şeyller kızılımsı kahve-kırmızı renklere dönüşmeye başlamaktadır.

5.1.4 Alüvyon

Harita alanı içinde görülen kayda değer tek alüvyon mostrası Koğuk dere üzerinde gelişmekte olup, tutturulmamış kum, kil, silt, çakıl boyutunda kırıntılardan oluşmaktadır. İnceleme alanı içerisinde Çakıl Köyü'nün batı ve güneybatısında yüzeylenen yamaç molozları Kırklareli kireçtaşı ve gnaystan türeyen kaba bloklar ile

metamorfik kayalara ait kaba çakıllarının kum matriks içinde düzensiz yığışması şeklindedir.

5.2 Çalışma Alanının Hidrojeolojisi

Çatalca – Muratbey Bölgesi'nin büyük bir bölümü taşocaklarının bulunduğu bölgede Büyükçekmece gölü ile bağlantılı olan Koğuk deresi ve kolları tarafından drene edilmektedir. Koğuk deresi bölgenin en önemli akarsuyudur. Ayrıca çalışma alanının yaklaşık 500 metre kuzeyindeki Muratbey karstik kaynağı ile taşocağı içinde su kuyusu bulunmaktadır. Çatalca – Çakıltepe Bölgesi'nde ise kuyu veya kaynak bulunmamaktadır.

Çalışma alanı içerisinde su düzeyi ölçümleri sonucu eş yeraltısu seviyesi 40 ile 140 kotu arasında değişmektedir.Yeraltısuyu akım yönü Pamuk Tepe ve Muratbey civarında kuzedoğuya yani diğer bir ifadeyle Koğuk dere'ye doğrudur ve buralarda hidrolik eğim, yani suyun giriş ve çıkış noktaları arasındaki yükseklik farkı ortalama olarak 1/10 ile 1/15 arasında değişmektedir. Bölgenin hidrojeolojisine ait bilgiler Duman (2003)'den alınmıştır.

5.2.1 Akiferler

Muratbey çalışma alanında yeralan jeolojik birimlerin litolojik ve yapısal özellikleri gözönüne alınarak dört tür akifer ayırtlanmıştır.

5.2.1.1 Çok Zayıf Akifer

Granit ve gnayslardan oluşan bu akifer türü oldukça az çatlak içermektedir. Genellikle geçirimsiz bir yapıda olup, nadiren yüzeyde çok az miktarda olmak üzere su taşımaktadır.

5.2.1.2 Zayıf Akifer

Mahya şisti, Taştepe fillatlı kalkşist üyesi ve Şermat kuvarsitinden oluşan Paleozoyik-Mesozoyik yaşlı metamorfik birimler (Istranca grubu) çatlaklı olduğu yerlerde yerel çatlaklı akifer niteliğini kısmen taşımaktadır. Çoğu yerde geçirimsiz olup, nadiren geçirimli olduğu yerlerde az miktarda su taşımaktadır.

5.2.1.3 Yerel Çatlaklı (Karbonatlı) Akifer

Bölgede kumlu, mikro ve makro fosilli, algli ve resifal kireçtaşından oluşan Eosen yaşlı Kırklareli kireçtaşları çatlaklı, geçirimli, karbonatlı yapıdadır. Bu akifer türü

içerisindeki yeraltısuyu, karstik yapının oluşturduğu boşluklarda bulunmaktadır. İnceleme alanı içerisinde yaralan Karstik kaynaklar bu akifer türü içerisinde bulunmaktadır.

5.2.1.4 Yerel Taneli Akifer

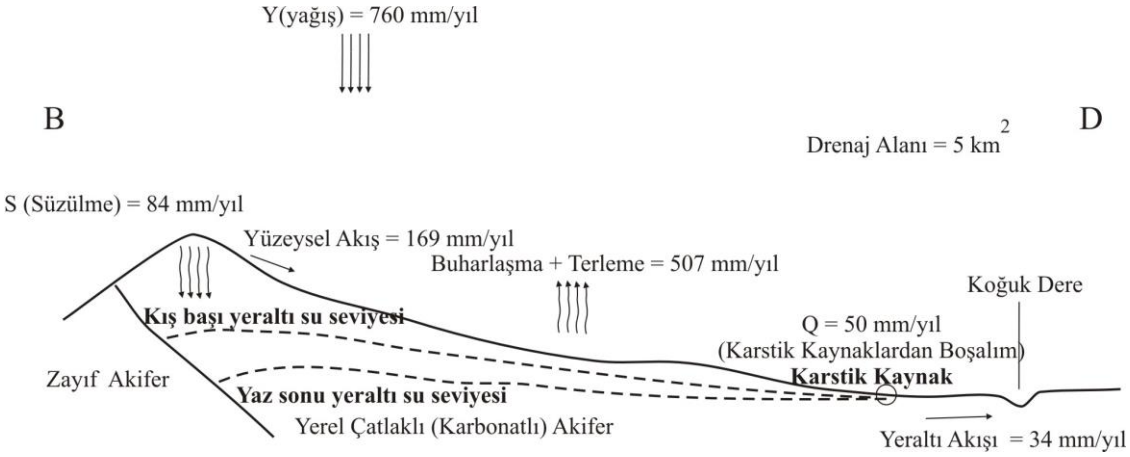
Şeyl, kumtaşı, kiltaşından oluşan Süloğlu formasyonu, kiltaşı-miltaşı ve kumtaşından oluşan Danişment formasyonu, yerel taneli akifer niteliğindedir. Kum-kumtaşı birimleri akifer niteliğinde olup, killi kısımları pratik olarak geçirimsiz birimleri oluştururlar.

5.2.2 Yeraltısuyu Beslenimi ve Boşalımı

Muratbey Bölgesi'nde yeraltısuyu beslenimi yağış, yüzeysel akış ve akiferlerden sağlanmaktadır. Suni boşalımı ise, bölgedeki kuyudan gerçekleşmektedir. Çalışma alanı içinde bulunan Muratbey karstik kaynağı ve civarda bulunan diğer kaynaklarla birlikte kireçtaşı beslenim alanı yaklaşık 5 km^2'dir. Bögede edinilen hidrojeolojik sonuçlara göre (Duman, 2003) yıllık toplam yağış miktarı 760 mm ve en yüksek boşalım miktarı ise 768 lt/dak. olarak bilinmektedir. Bu değerler göz önüne alındığında süzülme denkleminden;

$$I = \frac{Q(mm^3 / yıl)}{P(mm / yıl).A(mm^2)} \qquad (5.1)$$

Süzülme miktarının, toplam yağışın %11,1 olduğu hesaplanmaktadır. Bağıntıda I, süzülmeyi; Q, kaynaklardan yıllık boşalımı; P, yağışı ve A, drenaj alanını göstermektedir. Penman su bilançosuna göre yıllık yağışın %66.7'si buharlaştığı bilindiğinde, %33,3'ü de akışa geçen su miktarıdır. Dolayısıyla, süzülme %11,1 olduğuna göre, akışa geçen suyun 2/3'ünün yüzeysel, 1/3'ünün ise yer altı akışı olduğu söylenebilmektedir (Şekil 5.3).



Şekil 5.3: Kaynakların Hidrojeolojik modellemesi (Kesit ölçeksizdir), (Duman 2003)

5.2.3 Karst Hidrojeolojisi (Karstlaşma)

Kelime anlamıyla karst, kayaç ve minerallerde görülen yapı bozukluklarını tarif etmek amacıyla kullanılmaktadır. Karst, kireçtaşı gibi karbonatlı ve jips gibi sülfatlı olan eriyebilir yapılarda görülmektedir. Bölgedeki yer altı ve yerüstü drenaj düzeni ve biçimin belirlemektedir.

Atmosferden yere düşen yağmur suyu havada, akış durumundaki yağmur suyu sızıntıya geçtikçe özellikle bitkilerin aksiyonlarından ötürü CO_2 bakımından zenginleşmiş toprağın yapısındaki CO_2 ile reaksiyona girer. CO_2 gazı su içerisinde çözüldüğünde seyreltik karbonik aside (H_2CO_3) dönüşür. Karbonik asid kireçtaşının ve dolomitin yapısındaki Ca^{++} ve Mg^{++} katyonlarını alarak, kayaçların yapısına zarar verir. Daha sonra çözücü olan bikarbonatı(HCO_3^-) yapısına katar.

$$CaCO_3=Ca^{2+}+CO_3^{2-} \quad (5.1)$$

$$CO_3^{2-} + H_2O = HCO_3^- + OH \quad (5.2)$$

$$CO_2 + H_2O = H_2CO_3 \ (H_2CO_3= HCO_3^-+H^+) \quad (5.3)$$

$$CaCO_3+H^+= Ca^{2+} + HCO_3^- \quad (5.4)$$

Özet olarak;

$$CO_2 + H_2O+ CaCO_3= Ca^{2+}+2\ HCO_3^- \quad (5.5)$$

CO_2 içeriğindeki değişim kireçtaşının çözünme derecesini azaltır veya artırmaktadır. Eğer yeraltısuyu akış durumunda iken, kar suyu gibi diğer daha düşük CO_2 içerikli bir akış ile karışırsa çözünme kapasitesi elde eder ve bu noktada kireştaşı içerisinde

delikler açabilir. Kireçtaşının uzunca bir zaman dilimi süresince su tarafından çözünmesi, mağaralar, pasajlar gibi iri çaplı delikler içeren kaya kütlelerinin oluşması ile sonuçlanmaktadır.

5.2.3.1 Bölgesel Karstlaşma

Karstlaşma olayına Muratbey çalışma alanında rastlanmaktadır. İnceleme alanındaki boşluklu ve geçirimli resifal Kırklareli kireçtaşları içerisinde erime boşlukları yeralmaktadır (Şekil 5.4). Yeraltısuyu bu boşluklar içerisinde Koğuk deresine doğru B-D yönelimli olarak ilerlemektedir.



Şekil 5.4: Kırklareli kireçtaşında yüzeyde gözlenen erime boşlukları

5.3 Çalışma Alanının Jeokimyası

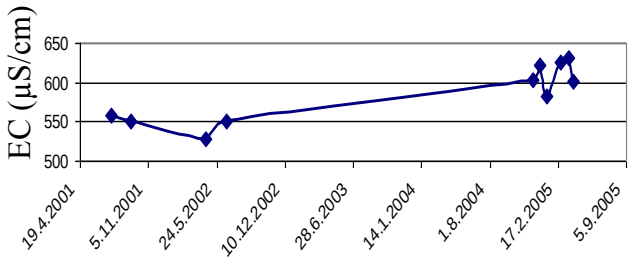
Çatalca – Muratbey bölgesi inceleme alanının yaklaşık 500 metre kuzeyinde yeralan Muratbey karstik kaynağı ile bölgedeki taşocağı içinde 2004 yılı sonunda açılan kuyunun jeokimyası alınan su örnekleri ile incelenmiştir. Su örneklerinin analizi İTÜ Maden Fakültesi laboratuvarında yapılmıştır (Duman, 2003). Taşocağındaki kuyunun açılımından önce ve sonra kuyu ile kaynaklardan elde edilen sonuçlar Kaynak suları yönetmeliğinin müsaade ettiği değerlerle (Tablo 5.1) karşılaştırılarak, suların kirliliği araştırılmıştır. Bölgede kaynaklardan alınan su örneklerinin analiz sonuçları grafiksel olarak Şekil 5.5'te verilerek taşocağı içindeki kuyu açılımının kimyasal değerler yönünden kaynak üzerindeki etkisi incelenmiştir. Şekilde yeralan grafiklere ait değerler Duman (2003) ve Yalçın (2005)'ten alınarak çizdirilmiştir. Verilere göre elektriksel iletkenlik (EC), pH ve nitrat değerlerinin kuyu açılımından sonra

Tablo 5.1: İçilebilir suların fiziksel ve kimyasal özellikleri (Kaynak suları yönetmeliği, Ekim 1997)

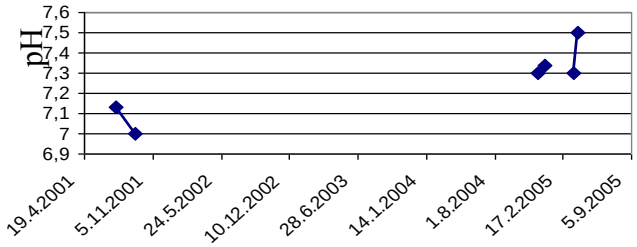
Maddenin Adı	**Tavsiye Edilen Miktar**	**İzin Verilebilecek En Yüksek Değer**
Ca (mg/l)	75	200
Mg (mg/l)	50	150
Na (mg/l)*	20	150
K (mg/l)*	10	12
HCO_3^- (mg/l)	-	-
Cl^- (mg/l)	200	600
SO_4^{-2} (mg/l)	200	400
Fe (mg/l)	0,3	1,0
Pb (mg/l)	-	0,05
Zn (mg/l)	5,0	15
Cu (mg/l)	1,0	1,5
Ni (mg/l)*	-	0,05
Nitrat (mg/l NO_3)	-	45
Nitrit (mg/l NO_2)	Bulunmamalı	-
pH	7,0-8,5	6,5-9,2
Sıcaklık (ºC)*	12	25
EC (µS/cm)	750** (400*)	2200**

* : Avrupa Topluluğu Standartlarına (EC) göre
**: TS 266'ya göre

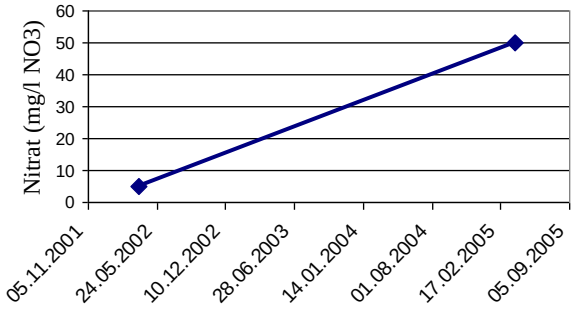
a)



b)



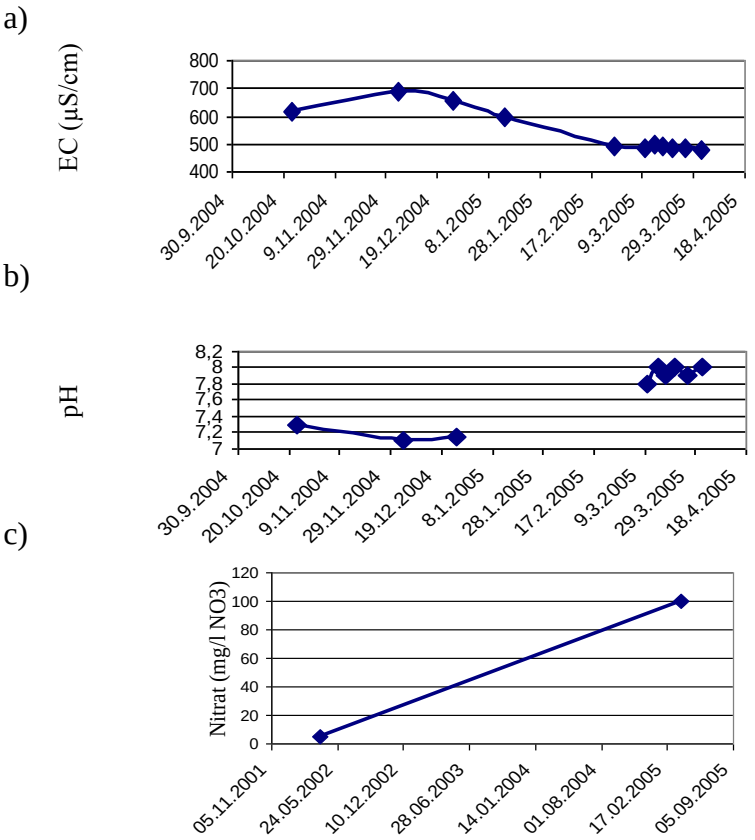
c)



Şekil 5.5: Muratbey karstik kaynağında ölçülen bazı kimyasal değerler. (a) elektrik iletkenlik (EC), (b) pH, (c) Nitrat (NO_3), (Duman, 2003; Yalçın, 2005; kişisel görüşme)

arttığı görülmektedir. Taşocağı içindeki kuyu açılımından önce (2002 yılı) 5 mg/lt değerinde olan nitrat değerinin 2005 yılında 45 mg/lt sınırını geçerek 50 mg/lt'ye yükseldiği tespit edilmiştir. Bu da, su kirliliğinin bir göstergesidir. Taşocağında yapılan çalışmalarda patlayıcı olarak ANFO (Amonyum nitrat - fuel oil) kullanılmaktadır. Açılan kuyu ile birlikte nitrat suya karışmaktadır. Su içindeki kimyasal değerlerin sınırı geçmesi ve su kirliliğinin başlangıcı olarak görülmesinden dolayı şu anda Muratbey karstik kaynağına alternatifler aranmaktadır. Kuyu içinden alınan su örneklerinin grafiksel olarak gösterimi Şekil 5.6'da yeralmaktadır. Grafiklere ait değerler Duman (2003) ve Yalçın (2005)'ten alınarak çizdirilmiştir. Buradaki analizlerde özellikle pH değerlerinin standart sınırlarına daha yakın olduğu görülmektedir. Kaynakla benzer olarak nitrat değeri de ciddi boyutlara ulaşmıştır.

Muratbey karstik kaynağındaki anyon değişimleri Tablo 5.2'de ve kuyuya ait analizler Tablo 5.3'te verilmiştir. Tablolardan da görüldüğü gibi elde edilen değerlerde önemli bir yükselme yoktur ve değerler içilebilir sular için tavsiye edilen değerlerin altında kalmıştır.



Şekil 5.6: Muratbey taşocağı içindeki kuyudan ölçülen bazı kimyasal değerler. (a) elektrik iletkenlik (EC), (b) pH, (c) Nitrat (NO_3), (Duman, 2003; Yalçın, 2005; kişisel görüşme)

Tablo 5.2: Muratbey Karstik kaynağının anyon değişimi (Duman, 2003; Yalçın ve Duman, 2003)

Tarih	Cl (klor)	SO_4 (Sülfat)	HCO_3 (Bikarbonat)
20.07.2001	32.53	21	280.6
14.09.2001	40.29	46	298.9
22.04.2002	34.44	28	-
22.06.2002	32.45	26	-
04.12.2004	34.2	23	244
25.12.2004	34.2	24	271
14.01.2005	34.1	24	268
26.02.2005	37	29	305

Tablo 5.3: Taşocağı içi su kuyusunun anyon değişimi (Duman, 2003; Yalçın, 2005; kişisel görüşme)

Tarih	Cl (klor)	SO_4 (Sülfat)	HCO_3 (Bikarbonat)
23.10.2004	32.8	19	164
04.12.2004	30	16	183
25.12.2004	30	18	189
14.01.2005	31.4	23	213
26.02.2005	28.6	20	183

6. ÇATALCA - İSTANBUL BÖLGESİ'NDE YERALTISUYU ARAŞTIRMASI VE HİDROJEOLOJİK YAPISININ JEOFİZİK YÖNTEMLERLE ARAŞTIRILMASI

6.1 Giriş

Çatalca Bölgesi'nde araştırma yapılan alanda boşluklu ve geçirimli resifal Kırklareli kireçtaşları içerisinde erime boşlukları yeralmaktadır. Bölgenin su ihtiyacını karşılayan yeraltısuyu bu boşluklar içerisinde Koğuk deresine doğru çatlaklar ve boşluklar boyunca hareket ederek ilerlemektedir. Bölgede, Duman (2003) tarafından hidrojeolojik ve jeolojik özellikleri araştırılan iki adet karstik kaynak bulunmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, Çatalca – Muratbey Bölgesi karstik kaynağının hidrojeolojik yapısının jeofizik yöntemlerden elektrik ve elektromanyetik yöntemlerle araştırılmasıdır. Beşinci bölümde değinildiği gibi, karbonatlı kayaçlarda suyun çözünme kapasitesiyle kayaçlarda "karstik boşluklar" oluşmaktadır. Çatalca Bölgesi karstik kaynakların bulunduğu bir bölgedir.

Yeraltını oluşturan kayaçların özdirenç değerleri geniş bir aralıkta değişmekle birlikte jeolojisi hakkında bilgi sahibi olunan bir bölgede jeofizik modelleme ile elde edilen özdirenç yapısının jeolojik birimlerle ilgisi ortaya konulabilmektedir. Buradan hareketle yeraltısuyu araştırmalarında kayaçların fiziksel özelliklerinden yola çıkılarak hidrojeolojik ve jeolojik parametreler arasındaki ilişki kurulabilmektedir. Bunun en önemli nedeni, aynı jeolojik birim içerisinde yeraltısuyu içeren kısım ile içermeyen kısım arasında elektrik iletkenlik farklılıkları bulunmasıdır. Örneğin, kireçtaşı formasyonlarında genelde yüksek özdirenç değerleri gözlenirken, çatlaklı veya gözenekli kireçtaşının yeraltısuyu içermesi durumunda özdirenç değerleri oldukça düşük değerler alabilmektedir. Bu nedenle jeofizik yöntemler arasında elektrik ve elektromanyetik yöntemler yeraltısuyu araştırmalarında (McGrath ve diğ., 2002; Smith ve Randazzo, 2003; Sumanovac ve Weisser, 2001), yeraltısuyu kirlilik araştırmalarında (Benson ve diğ., 1997), mineralizasyon zonlarının araştırılmasında (Phillips ve Richards, 1975), karstik yapıların araştırılmasında (Guerin, ve Benderitter, 1995) kullanılmaktadır. Ülkemizde elektrik yöntemler yeraltısuyu ve Tuzlusu girşiminin araştırılması amacıyla uzun zamandır kullanılmaktadır. Son

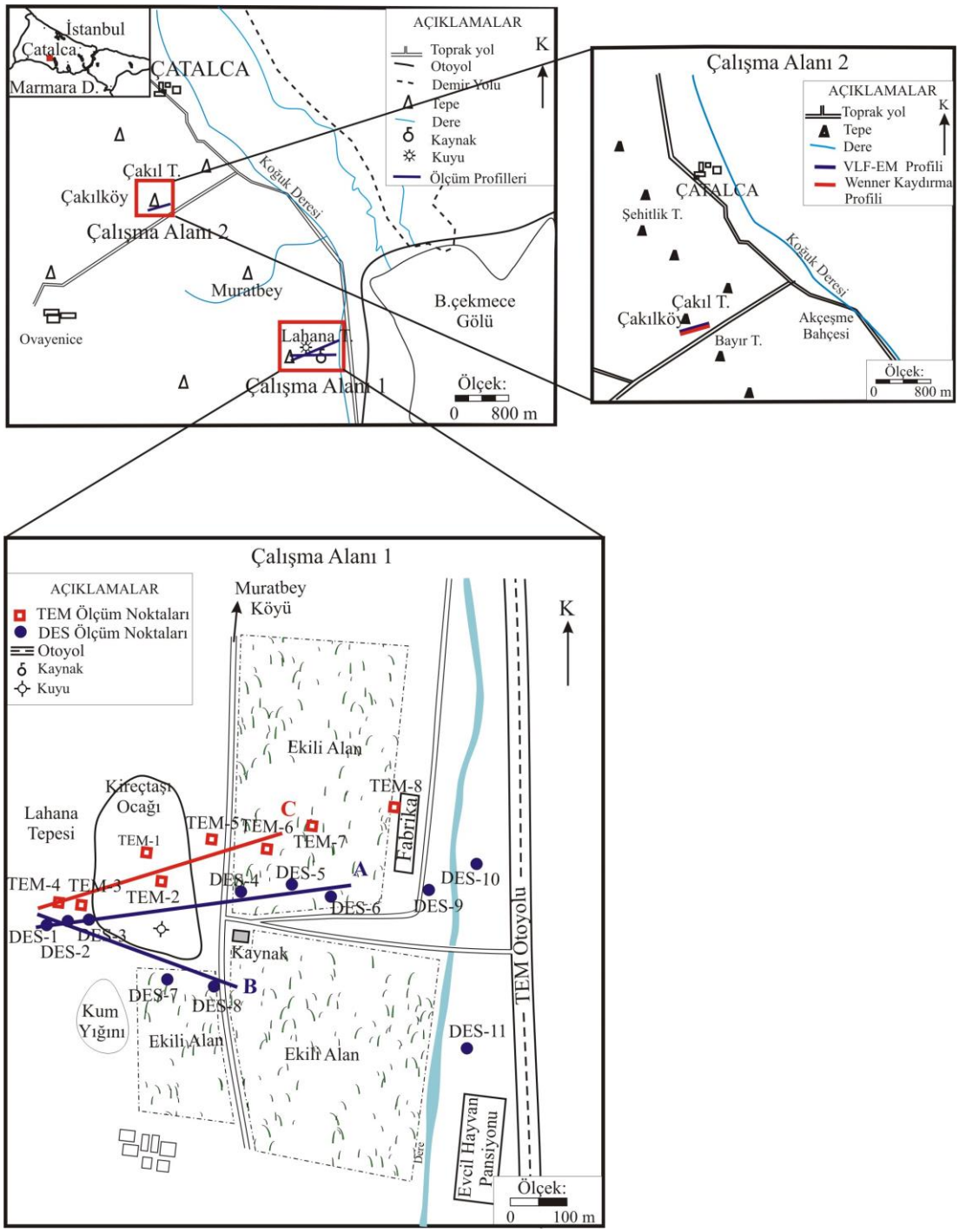
yıllarda bu alanda yeni uygulanmaya başlanan geçici elektromanyetik (TEM) uygulamaları başlamıştır. Bunlara örnek olarak, Recep (2005)'in İstanbul Tuzla İçmeler Bölgesi'nde Tuzlu su yayılımının jeofizik yöntemlerle araştırılması ve Ardalı (2005)'in Tuzla bölgesi jeolojik süreksizlik yapılarının elektrik-elektromanyetik yöntemlerle araştırılması verilebilir.

Bu araştırma kapsamında Çatalca Bögesi'nde yeraltısuyu ve hidrojeolojik yapının araştırılması için düşey elektrik sondaj (DES) ve geçici elektromanyetik yöntem (TEM) ölçümleri yapılmıştır. Yöntemlerin birbirini destekleyici ve tamamlayıcı özelliklerinin bulunması, alanda her iki yöntemin de kullanılmasının temel amaçlarındandır. DES ve TEM yöntemleri aynı fiziksel parametreye duyarlı olduklarından sonuçların birbirini desteklemesi nedeniyle güvenilir sonuçlar beklenmiştir.

Çatalca Bölgesi'nde iki farklı lokasyonda jeofizik araştırmalar yapılmıştır (Şekil 6.1). Bu alanlardan ilki karstik kaynak yeraltısuyu araştırmalarının yapıldığı Muratbey Bölgesi (çalışma alanı 1), diğeri ise süreksizlik ve kırık zonlarının araştırıldığı Çakıltepe (çalışma alanı 2)'dir.

Muratbey Bölgesi yerleşim alanında yaklaşık 450 hane bulunmakta ve su ihtiyacının bir kısmı çalışma alanı içinde yeralan kaynaktan sağlanmaktadır. Bölge güneybatısında 330 metreye kadar yükselen tepelerin yamacına yerleşmiştir. Bunlardan biri de 120 metre yüksekliğindeki ve ölçüm alanı içinde yeralan Lahana Tepesidir. İnceleme alanına ulaşım İstanbul-Tekirdağ E5 Karayolu üzerinden, İstanbul şehir merkezine yaklaşık 50 km uzaklıkta bulunan Çatalca sapağından sonra İstanbul Trakya Serbest Bölgesi karşısından güneybatıya ayrılan ve Büyükçekmece Gölü'ne paralel olarak devam eden yol ile, sapağa yaklaşık 10 km uzaklıktaki inceleme alanına ulaşılmaktadır. Diğer bir lokasyon olan Çakıltepe Bölgesinde ise, yüksekliği 233 metre olan Çakıl Tepe ve kuzeyinde Çatalca merkez yer almaktadır.

Muratbey Bölgesi'nde çalışma alanının en önemli özelliği yerleşim alanı dışında olmasıdır. Dolayısıyla ölçülerde yüksek gerilim hatları, otoyollar ve binalardan kaynaklanan ve gürültü olarak nitelendirilebilecek bozucu etkilerden uzak kalınmıştır. Çalışma alanında 6 noktada DES ölçümleriyle KD-GB doğrultulu A kesiti (DES), 5 noktada DES ölçümleriyle KB-GD doğrultulu B kesiti (DES) ve 7 noktada TEM ölçümleriyle yine KD-GB doğrultulu C kesiti (TEM) oluşturulmuştur.



Şekil 6.1: Çatalca Bölgesi'nde çalışma alanları yer bulduru haritası, karstik kaynak yeraltısuyu araştırması (çalışma alanı 1), süreksizlik ve kırık araştırması (çalışma alanı 2).

Çalışma alanının batısında yeralan Koğuk Deresi civarında üç DES ve bir TEM ölçümü yapılmakla birlikte jeolojik haritada faylanma görülen bu alanda sağlıklı sonuçlar elde edilemediğinden kesitlerde gösterilmemiştir. TEM yöntemi DES tekniğine göre daha küçük alanlarda ölçüm alabilme, iletken bölgelerde yüksek ayrımlılık ve uygulamadaki kolaylığı ile, geniş açılımların yapılamadığı yerlerde

derin elektromanyetik sondaj bilgisinin toplanması için oldukça uygundur. TEM verileri SIROTEM MK-3 geçici elektromanyetik cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Tüm ölçümler için 50×50 m^2'lik kare şeklinde verici halkalar kullanılmıştır. Veri kalitesini yükseltmek için, farklı (256-512) yığma (stacking) ve 0.1 ile 100 arasında değişen kazanç (gain) değerleri seçilerek ölçümler tekrarlanmış ve sinyal/gürültü oranı arttırılmıştır. TEM verileri en fazla 45 pencere için 0.008 – 29 ms arasında toplanmıştır.

Çakıltepe Bölgesi'nde jeolojik haritada yeralan bir kırığın araştırılması amacıyla bir profil boyunca Scintrex Envi cihazı kullanılarak bu çalışma öncesinde ölçülen VLF-EM yöntemi ve elektrik kaydırma verileri değerlendirmeye alınmıştır. Bu profilde iki frekansta (16.0 kHz ve 19.0 kHz) ölçülen verilerin aralıkları 5 metredir. Veriler her noktada seçilen kullanılarak toplanmıştır. Bu yöntem ile toplam manyetik alanın düşey bileşeninin yatay bileşene oranının gerçel (in-phase) ve sanal (out-phase) bileşenleri ölçülmüştür. Alınan tüm ölçümler toplu halde Tablo 6.1.'de verilmiştir.

Tablo 6.1: Çatalca Bölgesi'nde yapılan jeofizik ölçümlerin dökümü

Elektrik-Elektromanyetik sondaj (sounding) ölçümleri	
DES (Schlumberger Dizilimi)	11 istasyon
TEM	8 istasyon (72 kayıt)
Elektrik-Elektromanyetik Kaydırma (profiling) ölçümleri	
VLF – Elektromanyetik Yöntem	1 profil (51 nokta) – Lisans dersi kapsamında alınmıştır.
Elektrik kaydırma (Wenner Dizilimi)	3 profil (60 nokta) – Lisans dersi kapsamında alınmıştır.

6.2 Karst Hidrojeolojisi Araştırmalarında Jeofizik Modelleme

Hidrojeoloji, yeraltında bulunan suyun fiziksel ve kimyasal özelliklerini, suyun hareketini ve birimler içerisindeki bulunuş şeklini inceleyen bilim dalıdır (Erguvanlı ve Yüzer, 1973). Günümüzde, sanayileşmenin, kentleşmenin ve nüfusun artmaşıyla yeraltısuyunun önemi açığa çıkmaktadır. Hidrojeolojik araştırmaların amacı, yeni su kaynaklarının saptanması, en iyi şekilde yararlanabilmek için plan geliştirmesi ve kirlilik probleminden yeraltısuyunun korunması için etkileyici ölçümler geliştirilmesidir. Jeofizik yöntemlerin hidrojeolojik araştırmalarda kullanılma

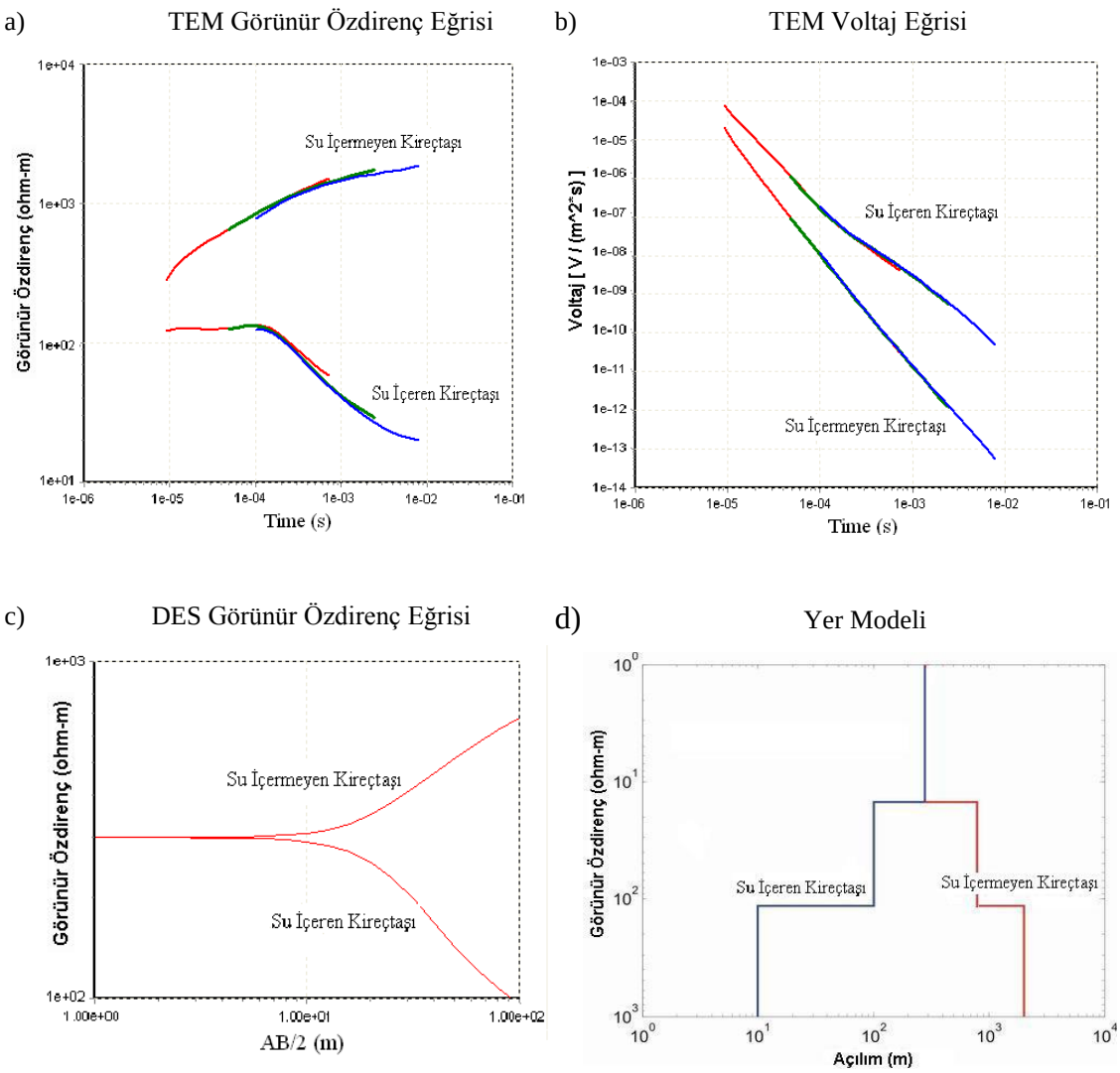
nedenleri yüksek kalitede ve güvenilir sonuçlar üretmesi, akifer yapılarının ve çevrelerindeki jeolojik yapının ve süreksizliklerin saptanmasıdır. Akiferler, geçirimli ve geçirimsiz birimler hidrojeolojik yapının önemli elementleridir. Suların etkisiyle eriyebilen kayaçlar akifer olma açısından diğer akiferlerden farklılık gösterirler (Erguvanlı ve Yüzer, 1973). Bu kayaçlar içinde suların birikmesi ve yararlanılması bakımından diğer akiferlerden farklıdır. Bu nedenle, yeraltısuyu jeolojisinde (hidrojeoloji) eriyen kayaçların hidrojeolojisi (karst hidrojeolojisi) ayrı bir önem taşımaktadır. Yeraltısuları yeriçinde üç ana biçimde bulunurlar (William ve Stanislav, 1993); (1) sağlam ve sağlam olmayan sedimanların ince taneleri arasındaki gözeneklerde, (2) sağlam kayaçların içindeki farklı kırıklar ve çeşitli orijin boşluklarında (örneğin; eriyebilir kayaçlardaki karstik boşluklar) ve (3) akiferler içerisinde bulunmaktadır. Su kullanımı için yeraltısuyunun önemli bir kaynağı bu hidrojeolojik yapılardır. Bu yapılar arasındaki sınır genelde sedimanlar ve kristalize kayaçlar arasındaki sınırlardır. Bu sınırların tespiti için hız ve yoğunluk gibi fiziksel parametreler (Galperin ve diğ, 1993) ve yaygın olarak kullanılan özdirenç (Sharma, ve Baranwal, 2004) bilgisinden yararlanılmaktadır.

Bölgede, kireçtaşı birimlerinde düşey kesit üzerinde dört farklı tipte tabakalaşma görülebilmektedir. Bunlar; yüzeye yakın toprak örtü, kuru boşluklu kireçtaşı, su içeren boşluklu kireçtaşı ve katı boşluksuz kireçtaşı birimleridir. Buna bağlı olarak birimlerin özdirenç aralıklarının da farklılık göstereceği beklenmektedir. Birimlere ait modellemenin yapılması amacıyla EMMA programı (The HGG Group, 2001; Auken ve diğ., 2002) kullanılmıştır. Jeofizik araştırmalarda kullanılmak üzere interaktif modellemeye ve analiz programına sahip, kullanıcı dostu ve MS Windows'ta çalışan, Bir Boyutlu (1B), grafiksel bir programdır. Program, yapılan modellemeleri, çözünürlük ve proje dizaynı bakımından üst seviyeye çıkarmak amacıyla geliştirilmiştir. EMMA elektrik, elektromanyetik ve dizilim sistemleri için 1B modelleme yapmaktadır. Bunlar, zaman ortamı, frekans ortamı, özdirenç, magnetotellürik ve kuyu logları olabilir. Program, gürültülü verinin model çözünürlüğü üzerine etkisini, verilerin filtrelenmesini sağlamakta ve TEM verilerinin yorumlanmasını kolaylaştırmaktadır. Her bir model parametresindeki (özdirenç, kalınlık, derinlik) standart sapma, standart sapma faktörü (STDF) olarak hesaplanır. Arazi çalışmalarından önce EMMA 1B düz çözüm programı ile TEM yöntemi için su içeren ve içermeyen kireçtaşı birimleri olmak üzere iki farklı model için voltaj-

zaman ve görünür özdirenç-zaman eğrileri elde edilmiştir (Şekil 6.2). Böylece arazi aşamasında ölçülen eğrilerin hangi birimleri temsil ettiği daha veri işlem aşamasına geçilmeden saptanabilmektedir. İnceleme alanındaki hidrojeolojik yapının modellenmesi için Şekil 6.2d'de görülen yerelektrik modeller kullanılarak DES ve TEM eğrileri hesaplanmıştır. İlk model olarak, sığ kesimde boşluklarında su içermeyen kireçtaşı ve onun altında boşluklarında su içeren kireçtaşı birimi bulunmaktadır, derinlik arttıkça özdirencin düştüğü varsayılmıştır. Bu katmanlar model hesaplamalarında sırasıyla 300 ohm-m, 100 ohm-m ve 10 ohm-m özdirenç değerleriyle sembolize edilmiştir. Diğer bir model içinde derinlere gidildikçe sık dokulu ve çatlaksız kireçtaşı birimin olduğu varsayılmıştır. Bu modelde özdirenç değerleri sırasıyla 300 ohm-m, 800 ohm-m ve 2000 ohm-m ile sembolize edilmiştir. TEM ölçümlerinde yeraltısuyunun iletkenliğine bağlı olarak azalan ve artan özdirenç eğrileri elde edilmiştir (Şekil 6.2a). Voltaj değerlerinin zamana karşı değişimi çizdirildiğinde, dirençli ortamlarda manyetik alan değerleri hızla sönümlenirken, iletken ortamlarda sönümlenmenin daha yavaş olduğu ve iletkenliğin artışı ile birlikte sönümlenme eğrisinin eğiminin azaldığı görülmektedir (Şekil 6.2b). DES modelleme ile elde edilen eğriler TEM modellemede elde edilen görünür özdirenç eğrileri ile uyumlu bir görünüm sergilemektedir (Şekil 6.2c).

6.3 Çatalca-Muratbey Karstik Kaynağı Hidrojeolojik Yapısının Jeofizik Yöntemlerle Araştırılması

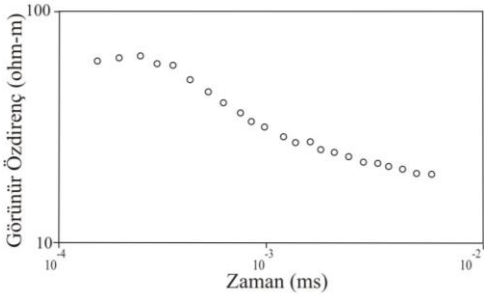
Çatalca-Muratbey Bölgesi'nde uygulanan DES ve TEM yöntemleri ile elde edilen verilerin değerlendirilmesi ile bölgedeki karstik kaynağın yapısı hakkında bilgi edinilmesi amaçlanmıştır. Gerek ölçülen ham veriler gerekse değerlendirmeler sonucu elde edilen modeller kesitler biçiminde gösterilerek yorumlanmaya gidilmiştir. Bölgede ölçülen TEM ve DES verilerine karakteristik örnek oluşturması amacıyla Şekil 6.3'te ölçülen veriler gösterilmiştir. Şekil 6.3a'da gösterilen ölçümlerden elde edilen görünür özdirenç eğrisi, Şekil 6.2a'da görülen kuramsal eğri ile son derece uyum içerisindedir. Aynı biçimde ölçülen voltaj eğrileri (Şekil 6.3b) kuramsal voltaj eğrileri ile uyumlu bir biçimde su içeren ve içermeyen kireçtaşı için farklı sönümlerle karakterize olmaktadır. Bilindiği gibi DES ölçümleri açılımın fonksiyonu olarak yapılırken, TEM yönteminde zamanın fonksiyonu olarak yapılmaktadır. Dolayısıyla eğrilerin karşılaştırılması için Meju (2002)'nin önerdiği



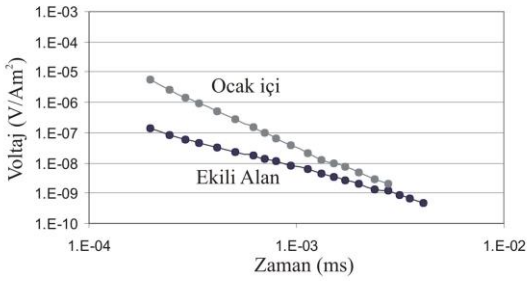
Şekil 6.2: Boşluklarında su içeren ve içermeyen kireçtaşı birimi için elde edilen kuramsal eğriler, (a) TEM görünür özdirenç-zaman eğrileri, (b) TEM voltaj-zaman eğrileri, (c) DES görünür özdirenç-açılım eğrileri, (d) kuramsal yer elektrik model

zaman-uzaklık bağıntısı kullanılarak her bir elektrod açılımı (AB/2) değerleri zamana çevrilmiş ve TEM verileriyle aynı grafik üzerinde gösterilmiştir (Şekil 6.3d). Böylece yöntemlerin hangi zaman aralıklarından bilgi alabildiği kıyaslamasını yapmak daha kolaylaşmıştır. Bu teknikle daha fazla açılım yapılabilmesi de mümkündür, ancak bölgede ekili alanların fazlalığı buna izin vermemiştir. Ancak TEM yöntemi ile açılımdan bağımsız zaman ile araştırılmak istenen derinlik belirlenebilmektedir.

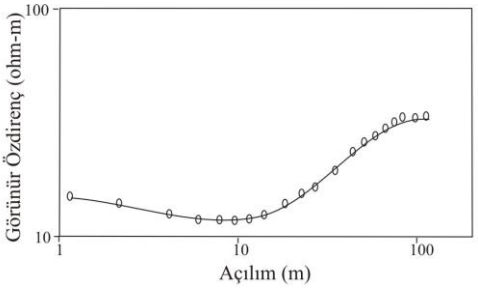
a) Tem-2 Görünür Özdirenç Eğrisi



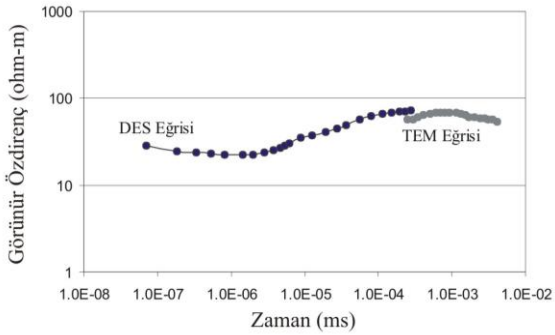
b) Tem-1 (ocakiçi) ve Tem-7 (ekili alan) Voltaj Eğrileri



c) Des-4 Görünür Özdirenç Eğrisi



d) Des-3 ve Tem-3 Görünür Özdirenç Eğrisi



Şekil 6.3: Su içeren kireçtaşı formasyonu üzerinde elde edilen eğriler, a) Tem-2 görünür özdirenç-zaman eğrisi, (b) Tem-1 (ocakiçi) ve Tem-7 (ekili alan) Voltaj Eğrileri, (c) Des-4 görünür özdirenç eğrisi, d) Des-3 ve Tem-3 görünür özdirenç eğrileri.

6.3.1 DES Verilerinin Değerlendirilmesi

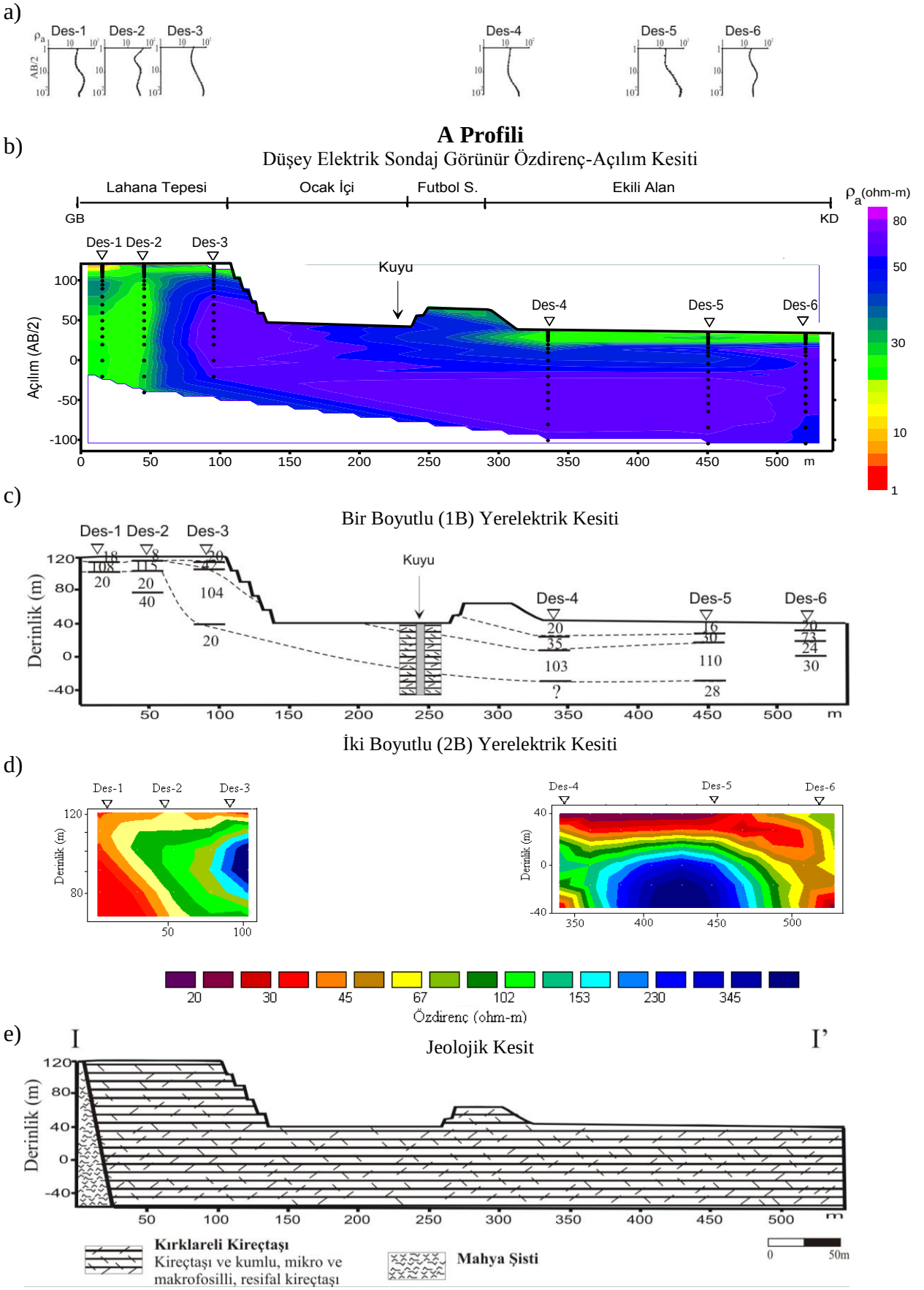
Elektrik özdirenç yöntemi DES tekniği ile ölçülen verilerden oluşturulan (Şekil 6.1 altta) A profili için görünür özdirenç-açılım kesiti, bir boyutlu ve iki boyutlu ters çözüm ile elde edilen yerelektrik kesitleri bu çalışma kapsamında oluşturulan Duman (2003)'ün hazırladığı jeolojik haritadan çizilen jeolojik kesitle karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Bu profilde yaklaşık 120-340. metreler arasında taşocağı yeralmaktadır. Taşocağı içerisinde de kuyu bulunmaktadır. Taşocağı içinde yüzeyde sert kireçtaşı tabakası bulunduğundan elektrod çakma güçlüğünden dolayı burada sadece TEM ölçümleri (iki istasyon) yapılmıştır.

A profili, Lahana Tepesi'nden ekili alana kadar olan alan içerisinde yapılan toplam 6 ölçüm noktasını içermektedir. Elektrodlar arası açılımın (AB/2) 140 metre olduğu DES ölçümleri görünür özdirenç eğrileri Şekil 6.4a'da gösterilmiştir. 540 metre uzunluğundaki A profili boyunca kot farkı gözönüne alınarak görünür özdirenç andıran kesiti hazırlanmıştır (Şekil 6.4b). Burada ilk üç istasyonun (Des-1, Des-2,

Des-2) yeraldığı yaklaşık 110 metrelik doğrultu boyunca andıran kesitte yanal bir özdirenç değişimi gözlemlenmektedir. Buna karşın, taşocağının ve kuyunun bulunduğu yaklaşık 200 metrelik bölüm sonrası Des-4, Des-5 ve Des-6 istasyonlarının bulunduğu bölge yatay katmanlı bir görünüm arzetmektedir.

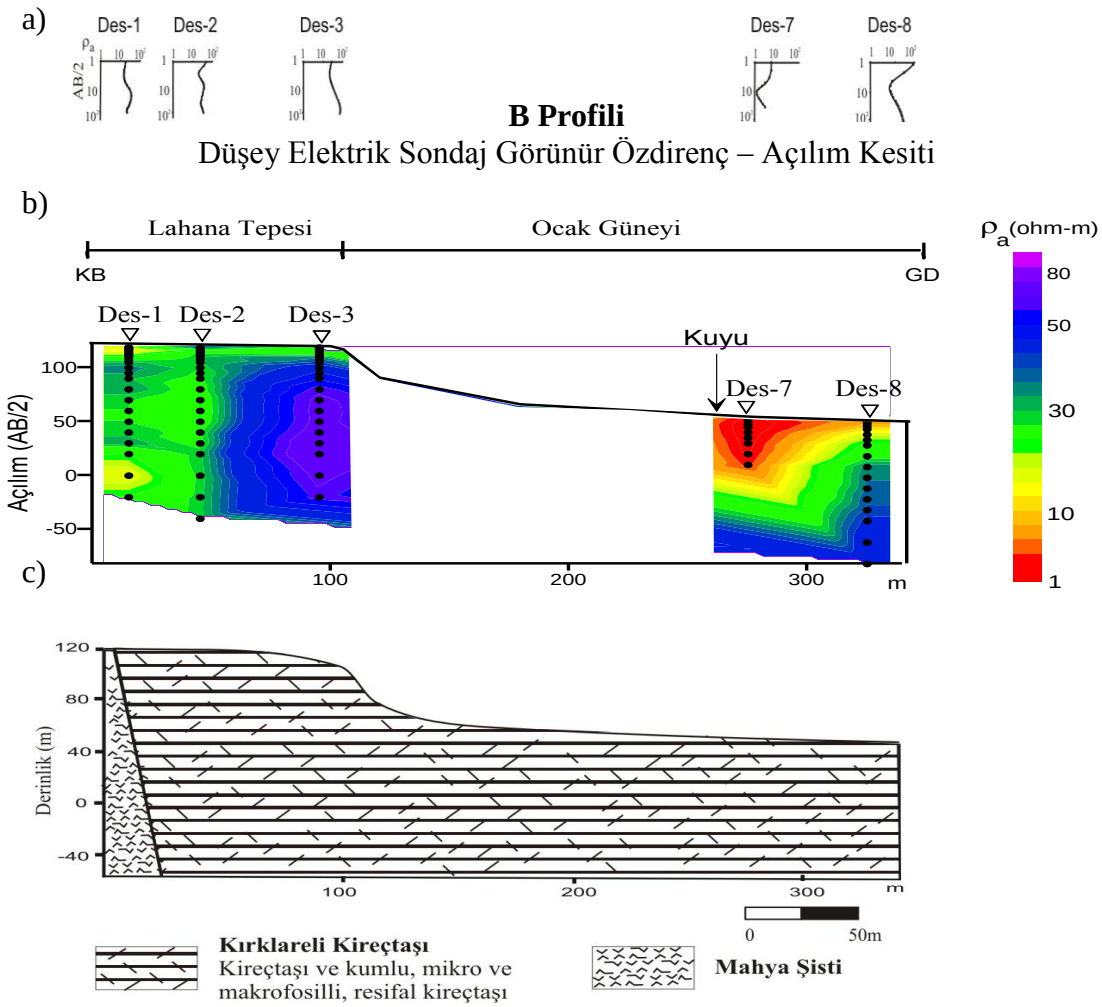
Verilerin değerlendirilmesi için Türkoğlu (2003) tarafından yazılan DES ve TEM verilerinin ayrı ayrı ve ortak bir boyutlu ters çözümünü hesaplayan program kullanılmıştır. Bu programda, ölçümler sonucunda elde edilen görünür özdirenç verilerinden oluşturulan arazi eğrileri ile programa başlangıç modeli olarak girilen parametreler (özdirenç ve tabaka kalınlıkları) tarafından oluşturulan model eğriler, yani ölçülen ve kuramsal eğriler arasında en iyi uyum sağlanana kadar yineleme (iterasyon) işlemi yapılmaktadır. Şekil 6.4c'de bulunan bir boyutlu ters çözüm ile elde edilen yerelektrik kesitinde andıran kesitteki özdirenç değişimleri ile uyumlu bir sonuç elde edilmiştir. Yapılan ters çözüm çalışmalarında en düşük RMS değeri %1.37 iken en yüksek değer %5.83 olarak hesaplanmıştır. Bu kesite göre, ayrışmış zondan oluşan üst tabakanın özdirenci 20-35 ohm-m arasında değişirken, kireçtaşı formasyonunun özdirencinin 75-110 ohm-m arasında değişmektedir. Kuyudaki sondaj kolonuna göre ocak içinde deniz seviyesinden 45 metre derinliğe kadar kireçtaşı birimi bulunmaktadır ki bu kolon sayesinde özdirenç verisi olmayan ocak içindeki formasyon hakkında da bilgi edinilebilmiştir (Şekil 6.4c). Sondaj kolonunun sağında ve solunda yeralan Des-3 ve Des-4 istasyonlarındaki bir boyutlu ters çözüm sonuçlarında görülen katman özdirençleri (104 ve 103 ohm-m) birbiriyle uyumludur. Bu katman altındaki düşük özdirencin kireçtaşı içerisinde kil yapısının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Yalçın, 2005; kişisel görüşme). Gerek andıran kesitte gerekse bir ve iki boyutlu ters çözümde net olarak izlenen yanal özdirenç değişiminin Şekil 6.4d'de görülen şist kireçtaşı kontağından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yine andıran kesit ve bir boyutlu ters çözüm kesitinde (Des-4, Des-5 ve Des-6 istasyonlarının) yatay katmanlı görünüm iki boyutlu ters çözüm yerelektrik kesitinde de elde edilmiştir. Bu görünüm kireçtaşı katmanı içerisinde bulunan çatlaklı ve boşluklu ortam içerisindeki yeraltısuyu nedeniyle elde edilmiştir.

Jeoloji haritasından alınan I-I' kesitine göre bölgenin GB'sında Mahya Şisti formasyonu yeralırken, daha sonra Kırklareli kireçtaşı formasyonuna girildiği görülmektedir (Şekil 6.4e). Bölgede yeralan kireçtaşı formasyonunun tanımlayıcı özelliklerinden biri resifal yapılı yani suda yaşayan canlıların kireçtaşı yapısındaki



Şekil 6.4: a) A kesiti boyunca ölçülen DES eğrileri, b) A profili görünür özdirenç andıran kesiti, c) 1B Ters çözüm sonuçları kesiti, d) 2B yerelektrik Kesiti, e) jeolojik kesit (Kesitin doğrultusu Şekil 5.2'de gösterilmiştir).

karbondan yararlanarak kendi evciklerini oluşturarak istif oluşturmalarıdır. Kireçtaşının karbonatlı yapısından dolayı ortamda bulunan suyla birlikte bu evcikler eriyerek zamanla içerisinde su bulunan erime boşlukları oluşturmakta ve bu da özdirenç değerini düşürmektedir. İnceleme alanında ölçülen DES verilerinden oluşturulan B profili görünür özdirenç-açılım kesiti Şekil 6.5'te görülmektedir.



Şekil 6.5: a) B kesiti boyunca ölçülen DES eğrileri, b) görünür özdirenç andıran kesiti, c) jeolojik kesit (Kesitin doğrultusu Şekil 5.2'de gösterilmiştir).

Taşocağı içinde 2004 yılı sonlarında açılan kuyunun etkisi bu kesitte daha belirgin olarak görülebilmektedir. Çünkü Des-7 istasyonu kuyudan 20 metre uzaklıktadır. B profilinde ilk 100 metrede yeralan üç istasyon A profili ile aynıdır, ancak A profilinin aksine kuyu sonrasında yatay katmanlı bir görünüm gözlenmemektedir. Bunun nedenini taşocağındaki patlatmalar sırasında kullanılan nitratın yarattığı kirlilik olduğu düşünülmektedir. Nitekim yapılan laboratuar analizleri sonucunda nitrat değerinin ocak içinde sınır değerinin çok üstüne çıktığı görülmüştür (Yalçın, 2005, kişisel görüşme). Bu tür bir ortamda nitrat kirliliğinin iletkenlik artışına veya

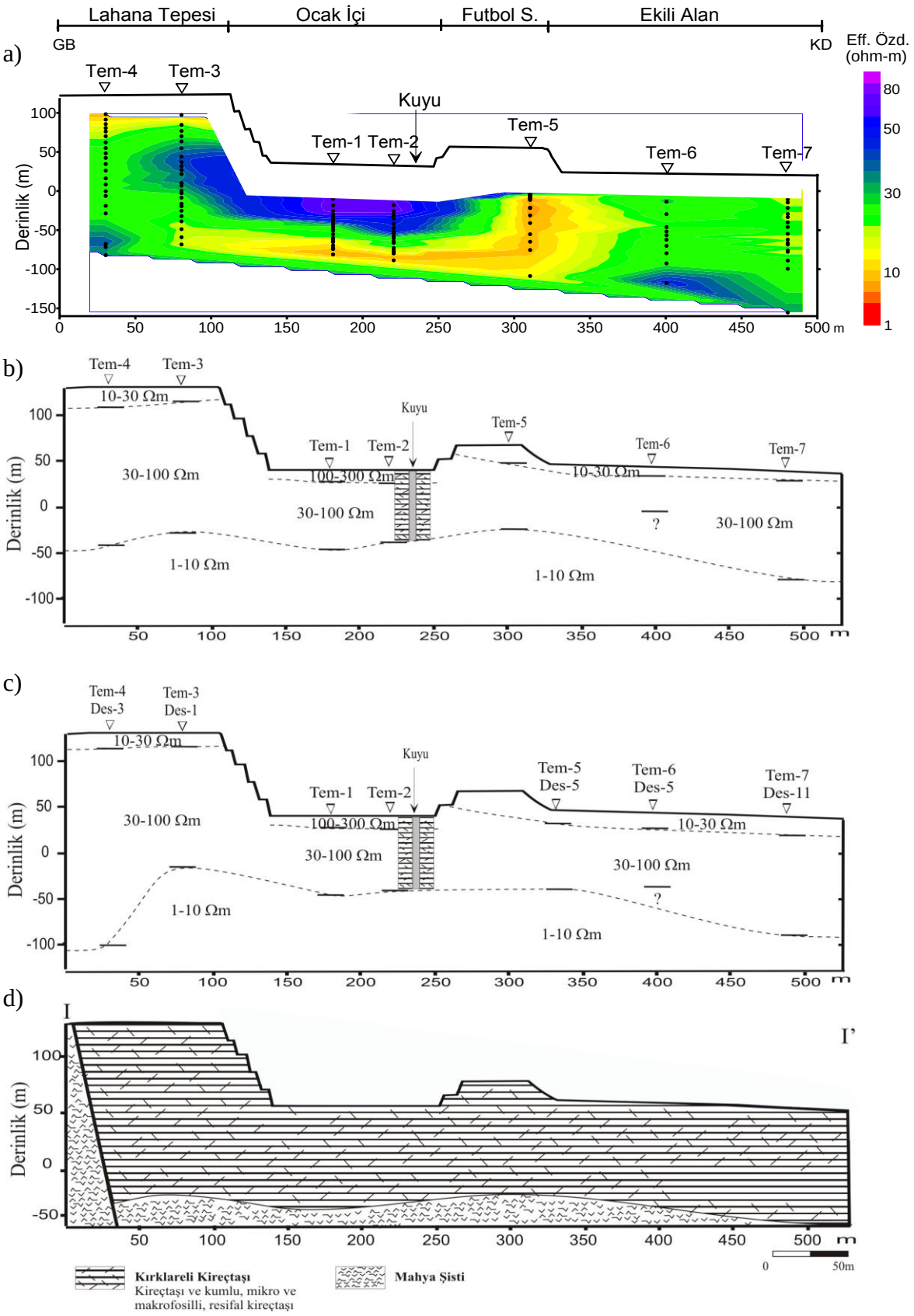
özdirenç düşüşüne neden olduğu literatürde yeralan herhangi çalışmada rastlanmamakla birlikte Des-7 noktasında düşük özdirenç patlatma nedeniyle açığa çıkan kimyasal malzeme veya nitrat kirliliğinden kaynaklanıyor olabileceği düşüncesi ağır basmaktadır. Nitrat değerlerinin de aşırı yükselişi bölgede yeraltısuyu kirlilik başlangıcının bir göstergesi olarak yorumlanabilir. Benzer biçimde taşocağından 500 metre uzaklıkta yeralan karstik kaynak nitrat kirliliği nedeniyle kullanıma kapatılmıştır.

6.3.2 TEM Verilerinin Değerlendirilmesi

Çatalca-Muratbey Bölgesi'nde Lahana tepesinden başlayıp taşocağını içine alan ve ekili alan bitimine kadar uzanan doğrultu boyunca oluşturulan TEM profili (C profili) için elde edilen efektif özdirenc-efektif derinlik kesiti (Meju, 1995) Şekil 6.6a'da görülmektedir. Bu profilde ilk 30-35 metreye ait efektif özdirenç bilgisinin olmamasının nedeni, bu derinliklere karşılık gelen verilerin erken zaman olarak adlandırılan ve birincil alanın etkisinin tam olarak ortadan kalkmadığı durumda ölçülen veriler olmasındandır. Bu profilde TEM yönteminin yeryüzeyine halka serilerek indüksiyon yöntem avantajı kullanılarak ocak içinde de ölçüm alınabilmiştir. TEM yöntemi ile elde edilen bu kesitte elde edilen sonuçlar doğrudan su içeren tabakadan başlamaktadır. Şekil 6.6b'de görülen bir boyutlu ters çözüm ve Şekil 6.6c'de görülen DES ve TEM verilerinin ortak ters çözümünde birbirine benzer sonuçlar elde edilmiştir. Burada 30 ila 100 ohm-m ile karakterize olan yeraltı katmanı sondaj kolonundan da anlaşıldığı gibi yeraltısuyu içermektedir. Taşocağı içine ait TEM verisinin ters çözüm sonucu ile kuyudan alınan sondaj kolonu karşılaştırıldığında, kireçtaşı formasyonunun ölçü alınan kottan itibaren 89 metrelik kalınlığı ters çözüm sonucunda 92 metre olarak bulunmuştur. (Şekil 6.7). En alt katmanda 1-10 ohm-m değerleri ile ondülasyonlu jeolojik kesitte görülen Mahya şistinin etkisi görülmektedir.

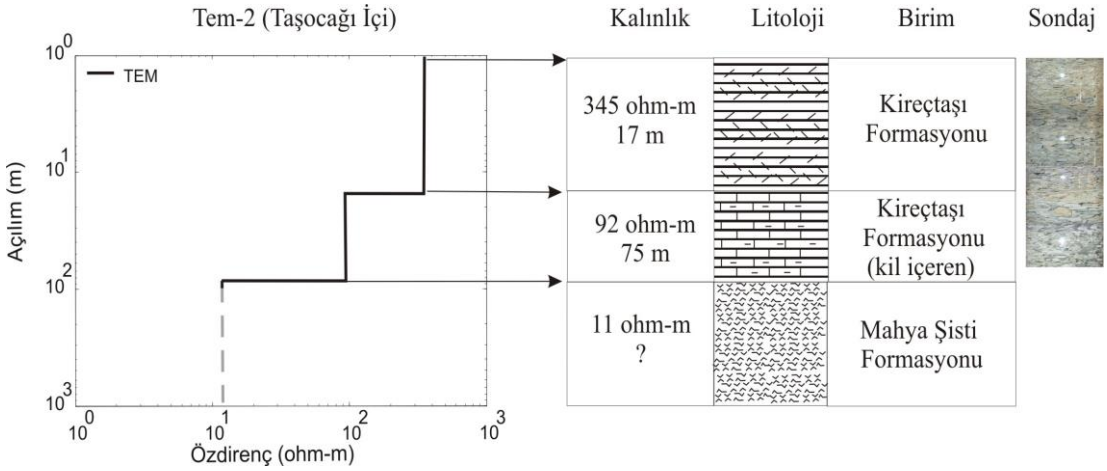
Bölgede yapılan araştırmada A ve C profilindeki değerlendirmeleri özetlemek gerekirse, A profilinde elde edilen bir boyutlu ters çözüm sığ derinlikleri (ilk 60 metre) C profilinde elde edilen değerlendirmeler orta ve daha derin (150 metre derinliğe kadar) çözümlemeleri içermektedir. Bilindiği gibi TEM ve DES verilerinin ortak ters çözümü her iki yöntemin sahip olduğu eşdeğerlik (non-uniquess) sorununu

C Profili



Şekil 6.6: a) C kesiti efektif özdirenç – derinlik kesiti, b) 1B Ters çözüm sonuçları kesiti, c) DES-TEM ortak ters çözüm sonuçları kesiti, d) jeolojik kesit (Kesitin doğrultusu Şekil 5.2'de gösterilmiştir).

ortadan kaldırarak gerçeğe en yakın çözümü vermektedir. Bu nedenle yeraltısuyu araştırmalarında, tuzlu su yayılımının saptanmasında ve hidrojeolojik yapının saptanmasında kullanılmaktadır (Yang ve diğ., 1999; Yuhr ve Benson, 1995). DES ve TEM ölçümlerinden elde edilen değerlendirmeler sonucu ortaya çıkan yerelektrik yapı Duman (2003)'ün yaptığı çalışmadan elde ettiği sonuçlarla uyumludur. Buna göre, yerel çatlaklı (karbonatlı) akifer olarak belirlenen kireçtaşı katmanları bu çalışmada 30 ila 100 ohm-m özdirenç aralığında temsil edilmiştir. 1-10 ohm-m aralığındaki şist katmanına göre daha yüksek özdirenç değerine sahip olmasına rağmen aslında masif halde çok yüksek özdirenç değeri gösteren kireçtaşları boşluk ve çatlaklarında yeraltısuyu barındırdıklarında özdirençleri düşmektedir.

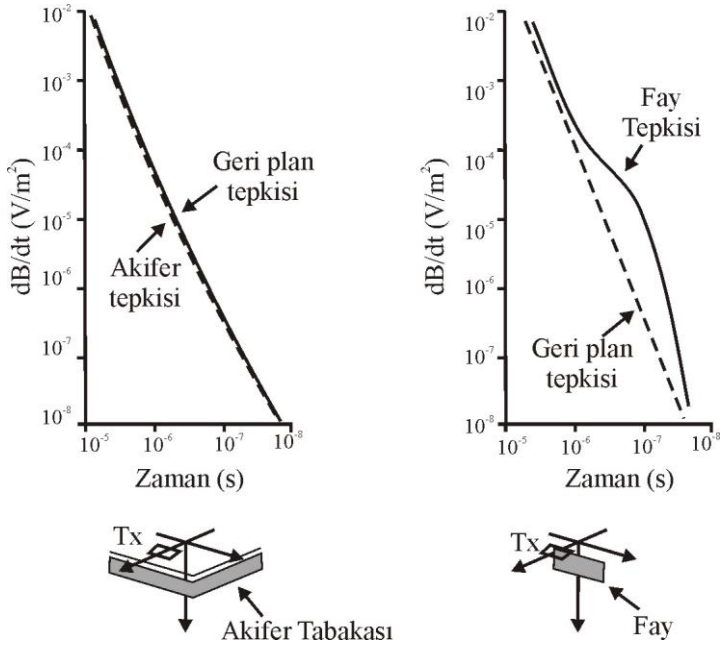


Şekil 6.7: Taşocağı içinde yapılan TEM ölçümü ters çözüm sonucu.

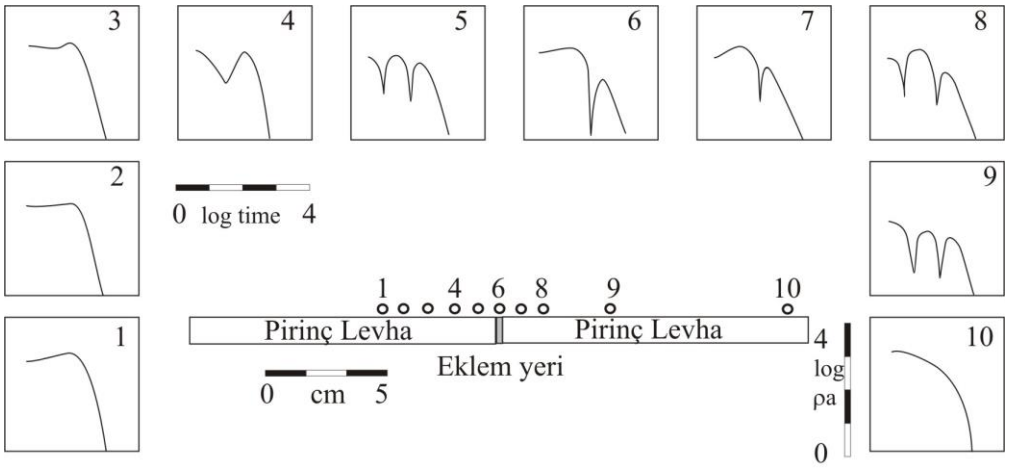
6.4 Çatalca Bölgesi'ndeki Süreksizlik, Kırık Araştırması

Bölüm 6.2.1.'de de görüldüğü üzere bir bölgede yeraltısuyu bulunması ölçümlerde önemli bir rol oynamaktadır. Ölçümler yapıldığında bazen kaydedilen sinyaller teoriden beklenen sinyallere göre değişiklik göstermektedirler (Strack, 1992). Bu sinyallere bozulmuş sinyaller (distorted signals) denir. Suyun bulunmasıyla birlikte TEM voltaj eğrilerinde geri planla beraber bir azalma görülürken (Şekil 6.8), bölgede bir süreksizliğin bulunması bütün jeofizik yöntemlerde olduğu gibi TEM yönteminde de daha belirgin bir anomaliye neden olmaktadır. Süreksizlik bölgesinde TEM yönteminin vereceği tepkiyi incelemek amacı ile bir deney yapılmıştır (Damron, 1986). Bunun için iki pirinç levha arasındaki eklem yeri kırık zonu olarak varsayılmış ve görünür özdirenç tepkilerine bakılmıştır (Şekil 6.9). Buna göre, erken

zaman eğrileri iletkenle ilgili olarak asimetriktir. Kırık zonuna yaklaştıkça (3 ve 4. eğriler) ilk olarak orta zaman değerlerinde bir sıkışma görülür. Alıcı, fay lokasyonunu kestiğinde ve geçtiğinde, anomalinin karakter değiştirerek daha yavaşladığı görülmektedir (6 ve 10. eğriler). Eğrilerin kırık zonunun etkisinden kurtulması için, etki alanına girmesine göre daha fazla mesafe gerekmektedir.

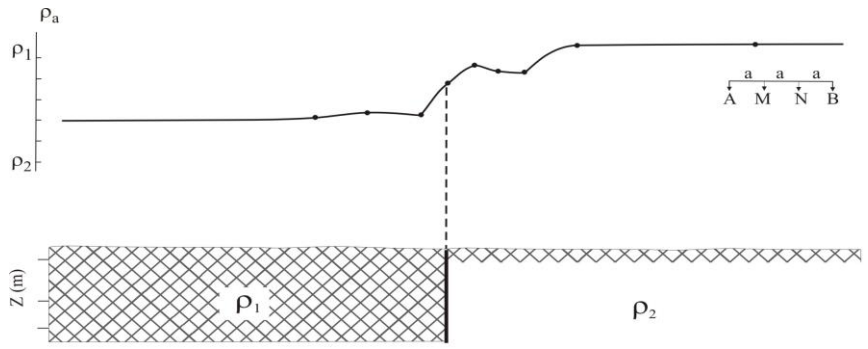


Şekil 6.8: Akifer tabakası ve fay üzerinde ölçülen TEM voltaj eğrileri (Sørensen ve diğ., 2004).



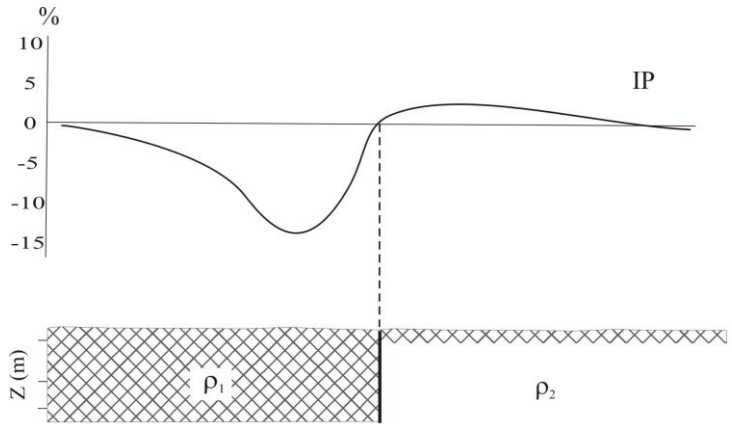
Şekil 6.9: Model deney kullanarak fay zonu benzeştirimi. Kuramsal TEM görünür özdirenç eğrileri (Damron, 1986).

Bölgede süreksizliğin varlığı Wenner kaydırma yönteminde de belirgin olarak görülebilmektedir (Şekil 6.10). Ölçülen anomalinin orta noktasından inilen bir dikle süreksizliğin lokasyonu belirlenebilmektedir. Profilin başlangıcı düşey kontakttan



Şekil 6.10: Wenner kaydırma ölçümleri kuramsal düşey kontakt eğrisi (Telford ve diğ, 1976) (üstte), Yermodeli (altta).

önce yeralan birimin görünür özdirencini (ρ_1) temsil ederken, kontakt sonrası ölçülen özdirenç yan formasyonun görünür özdirencini (ρ_2) temsil etmektedir. Bir diğer jeofizik yöntem olan ve çalışma alanında da süreksizlik araştırmaları için kullanılan VLF-EM yönteminin kırık zonu üzerinde verdiği kuramsal eğri Şekil 6.11'de görülmektedir (Telford ve diğ., 1976). Buna göre kırık zonu üzerinde IP (gerçel



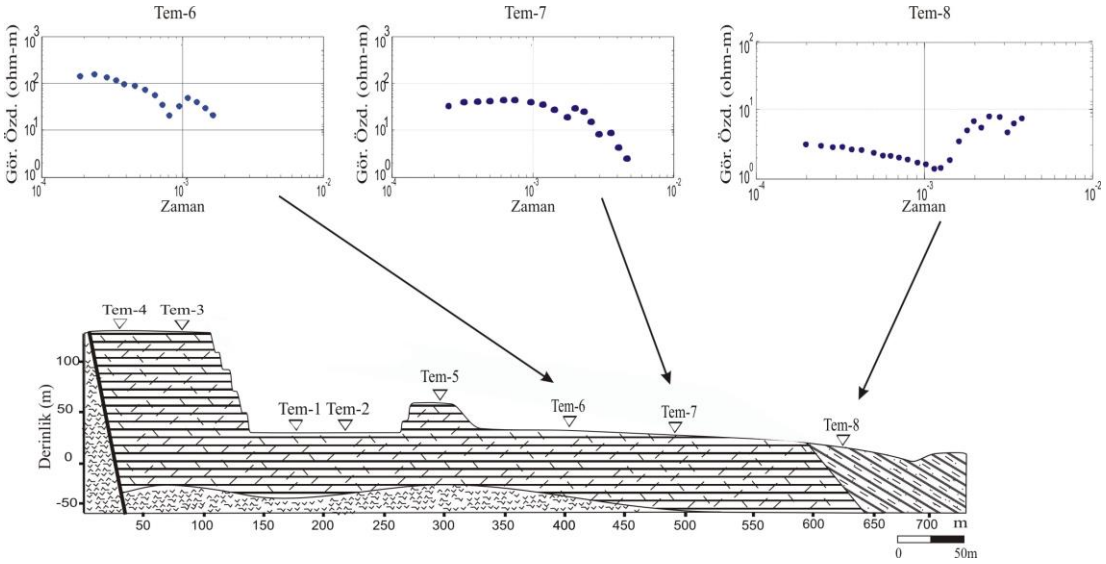
Şekil 6.11: VLF-EM verisi kuramsal düşey kontakt eğrisi (Telford ve diğ, 1976) (üstte), Yermodeli (altta)

bileşen) değerlerinde önce sıfır geçişi daha sonrada değerlerde işaret değişimi görülmektedir. İletken tabaka üzerinde IP değerlerinin pozitif veya negatif olması ölçüm doğrultusuna bağlı olarak değişim gösterebilmektedir.

6.4.1 TEM Yöntemi ile İki Boyutlu (2B) Yaklaşım

Muratbey çalışma alanında yapılan TEM ölçümlerinde, kesit üzerinde alınan 405. metredeki Tem-6, 480. metredeki Tem-7 ve 630. metredeki Tem-8 istasyonlarında ölçülen görünür özdirenç eğrilerinde Damron (1986)'da yeralan deney sonuçları ile benzer eğrilere rastlanmıştır (Şekil 6.12). Jeolojik kesitin devamında farklı bir formasyona girilmesiyle birlikte Tem-8 verisi gibi özdirenç eğrisi karakteristiğinin de

değiştiği görülmektedir. İleriki çalışmalarda yapılabilecek TEM verilerinin çok boyutlu (2B, 3B) değerlendirilmesi ile bölgede bir süreksizliğin varlığı veya lokasyonu hakkında daha net bilgiler elde edilebilecektir.

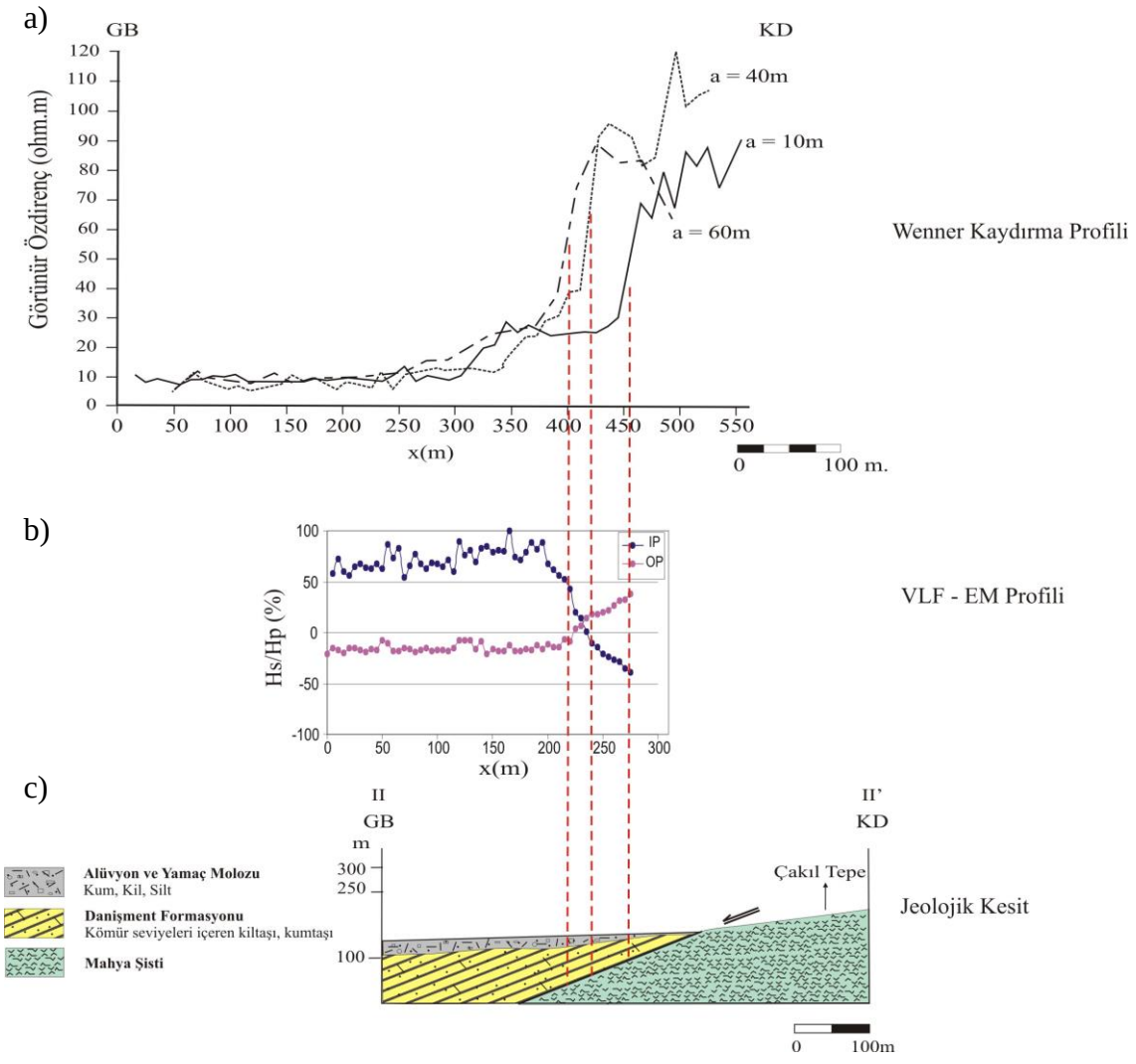


Şekil 6.12: C kesiti (TEM) üzerinde ölçülen Tem-6, Tem-7 ve Tem-8 görünür özdirenç eğrileri. Eğrilerdeki sıçramaların Şekil 6.9'daki analog model ile benzeştiği dikkat çekicidir.

6.4.2 Elektromanyetik ve Elektrik Kaydırma Verilerinin Ortak Değerlendirilmesi

Çatalca – Çakıltepe'de süreksizlik araştırmaları için üç profil Wenner kaydırma ve bir profil VLF-EM yöntemleri uygulanmıştır. Ölçülen üç Wenner kaydırma ve VLF-EM profilinin lokasyonu yaklaşık doğrultu üzerindedir. Wenner diziliminde üç farklı elektrod açılımı uygulanarak farklı derinlikler için alanın detaylı araştırılması amaçlanmıştır. Bölgenin jeolojisi göz önünde bulundurularak bölgede yeralan fayın belirlenebilmesi amacıyla profil doğrultuları fayı dik kesecek şekilde GB-KD doğrultulu olarak seçilmiştir. Bu sayede fayın yaratacağı anomali veriler üzerinde gözlemlenmeye çalışılmıştır. Wenner kaydırma ölçümlerinde elektrod açılımları 10, 40 ve 60 metre olan üç profilin uzunluğu 500 ve 550 metre uzunluğundadır. Tüm profiller aynı şekil üzerinde gösterilerek eğriler üzerinde kayma olup olmadığı dolayısıyla fayın eğiminin incelenmesi amaçlanmıştır (Şekil 6.13a). Eğrilerin orta noktalarından dik indirildiği takdirde fayın KD-GB eğimli bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Bölgeye ait jeolojik kesitteki fayın eğimi Wenner kaydırma ile yapılan değerlendirmeyi doğrular niteliktedir (Şekil 6.13c). Fayın GB bölümünde

ölçülen yaklaşık 10 ohm-m özdirence sahip birimin alüvyon ve altında kiltaşı ve kumtaşı seviyeli Danişment formasyonuna ait olduğu söylenebilir. Farklı derinlik bilgisi içeren açılımlarda ortalama olarak aynı özdirencin elde edilmesi iki birim arasındaki elektrik sınırın ayırdedilememesinden kaynaklanmaktadır. Buna karşılık, faylanmadan sonra KD'ye doğru ölçülen yüksek özdirenç değerleri Mahya Şisti formasyonuna denk gelmektedir. Çatalca – Muratbey Bölgesi'nde de çok daha düşük özdirençle (~ 10 ohm-m) görülen aynı formasyonun, bu bölgede yüksek değer almasının nedeninin su içermemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

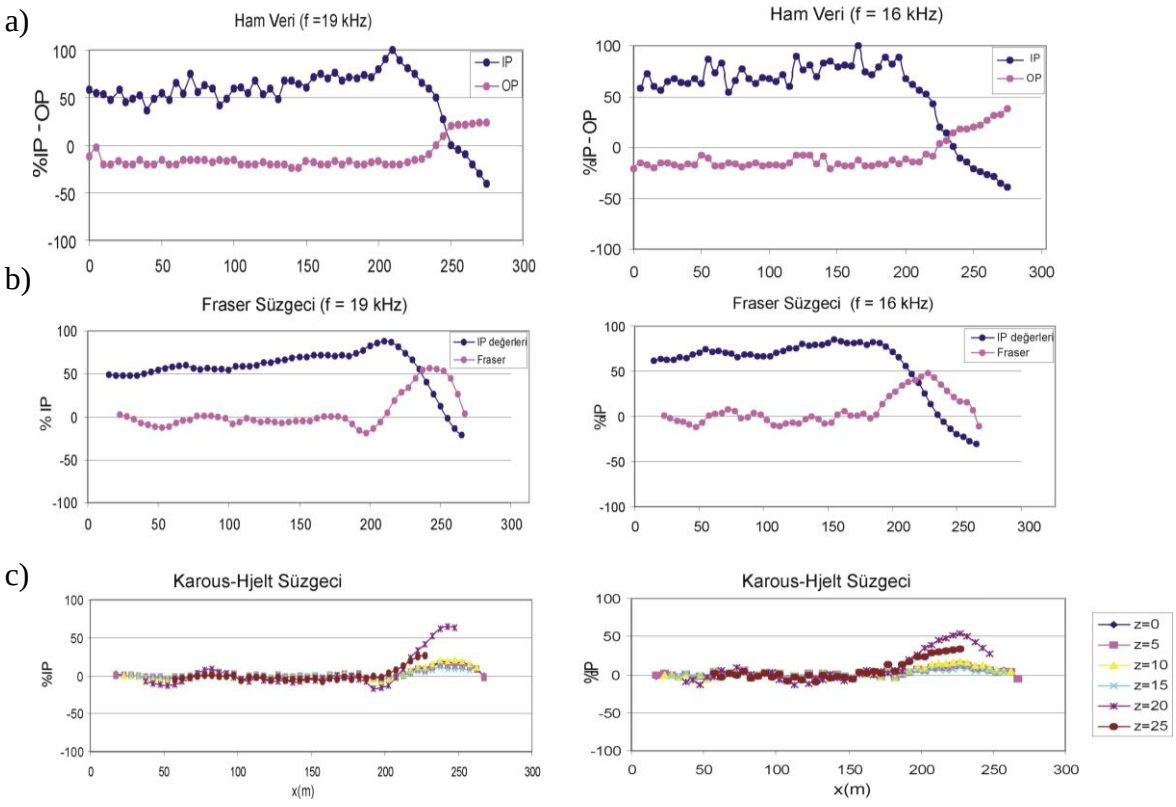


Şekil 6.13: Çakıltepe'de alınan ölçülerden elde edilen eğriler, (a) Wenner kaydırma profilleri, (b) VLF-EM profili, (c) Jeolojik kesit (Kesitin doğrultusu Şekil 5.2'de gösterilmiştir).

Wenner kaydırma ölçümlerinde olduğu gibi, aynı profil üzerinde VLF-EM ölçümleri alınarak % IP – OP grafiği oluşturulmuştur (Şekil 6.13b). Ölçümlerde süreksizliğin

detaylı incelenmesi ve farklı derinliklerden bilgi alınabilmesi amacıyla iki frekansta kayıt alınmıştır. Şekilde, 16 kHz frekansı ile GB-KD doğrultulu ölçülen VLF-EM verisi gösterilmiştir. Ölçümlerde frekans değeri azaldıkça daha derinlerden bilgi alınmaktadır. Buna göre, 16 kHz frekans bandı ile yapılan ölçümler diğer kullanılan frakans olan 19 kHz'lik frekans bandına göre daha derinlere ait bilgileri içermektedir. Formasyon sınırı üzerinde görülen anomalinin nedeni, bu bölgede iletkenlik değişiminden dolayı manyetik alan şiddetinde oluşan değişimin kaydedilmesidir. Formasyonlar arasındaki iletkenlik değişimi IP işaretinin değişimi olarak verilere yansımaktadır. Jeolojik bilgiler ışığında, iletken yapı üzerinde IP değerlerinde önce sıfır geçişi sonra negatif değerler aldığı görülmektedir.

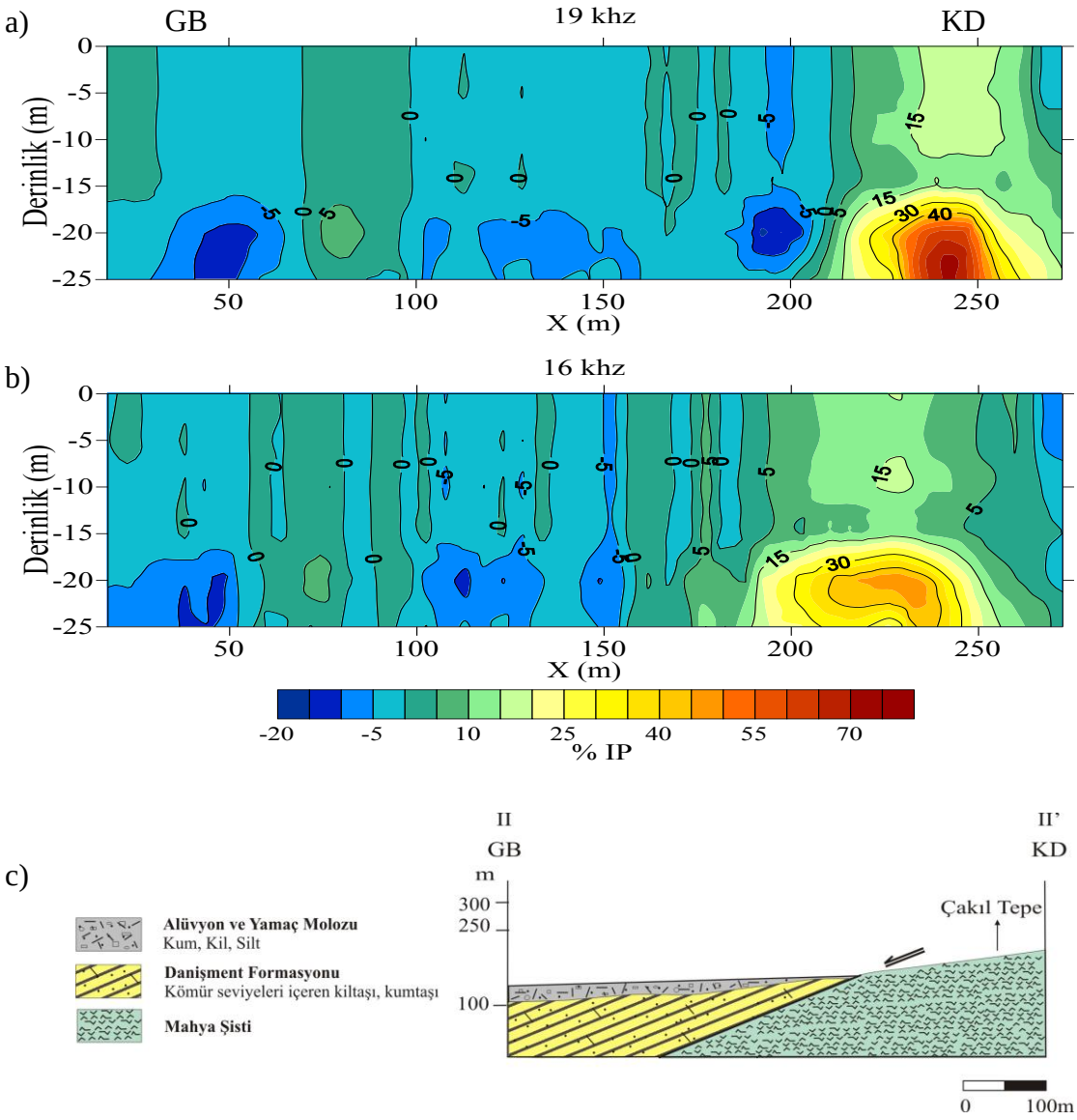
VLF-EM yönteminin uygulanmasında elde edilen eğrilerde gürültü olarak nitelendirilen bozucu etkilerden kaynaklanan sapmalar görülmektedir (Şekil 6.14a).



Şekil 6.14: VLF-EM verileri, (a) %IP/OP ham veri değerleri, (b) Fraser süzgeci uygulanmış değerleri, (c) Karous – Hjelt süzgeci uygulanmış değerleri

Veriler bu tür bozucu etkilerin giderilmesi amacıyla süzgeçleme işlemine tabi tutulmaktadır. Bu süzgeçlerden biri olan alçak geçirir özelliğindeki Fraser süzgeci ile, veri 90° kaydırılır ve iletken üzerinde en yüksek değeri alması sağlanır. Böylece

yorum yapmak kolay hale gelmektedir. Fraser süzgecinden geçirilmiş olan her iki frekansa ait veriler Şekil 6.14b'de gösterilmiştir. Buna göre, 19 kHz ile ölçülen sığ derinliğe ait veri için yaklaşık 250. metreden sonra bir iletkenlik değişiminin varlığından söz edilebilirken, 16 kHz ile ölçülen daha derinlere ait veride ise 240. metreden sonra bu değişimden söz etmek mümkündür. Şekil 6.13c'de görülen jeolojik kesite göre fayın eğimli bir yapısı olduğu görülmektedir. Aynı profil üzerinde iki farklı frekansta farklı metrelerde sıfır geçişine ve maksimum IP değerlerinin gözlemlenmesi bu eğime bağlanmaktadır. Yöntemde ayrıca Karous – Hjelt süzgeci uygulanarak manyetik alan değerlerinin belirli derinliklere atanması ve akım yoğunluğu değerlerinin elde edilmesi de sağlanmıştır (Şekil 6.14c). Yüksek eşdeğer akım yoğunluğuna sahip bölgeler iyi iletken bir yapının varlığı göstermektedir. Görüldüğü gibi iletken üzerinde eşdeğer akım yoğunluğu değerleri sadece pozitif değerler almaktadır. Bu grafiklere göre sığ derinliklerde (19 kHz verisi) 250. metreden, daha derinlerde ise (16 kHz verisi) 240. metreden sonra değerlerin artmasıyla birlikte iletkenliğin varlığı fayın eğimini jeolojik bilgilere göre de doğrular niteliktedir. Eğer Karous – Hjelt süzgeciyle farklı derinlik bilgilerini ayrı ayrı gösteren bu grafik bilgilerini bir kesit üzerinde topluca göstermek gerekirse, eşdeğer akım yoğunluğu haritaları elde edilmektedir (Şekil 6.15). Böylece farklı jeolojik birimlerin ayırımını yapmak daha kolaylaşıp netlik kazanmaktadır. Haritaya bakıldığında iletken bölgede IP değerlerinin pozitif değerler aldığı görülürken, daha dirençli olan 0 - ~200. metreler arasında ise IP değerlerinin negatif (-) değerler aldığı görülmektedir. Üstte yeralan 19 kHz akım yoğunluğu haritasında 210. metre civarında IP değerlerinin pozitif olduğu görülürken, altındaki 16 kHz ile elde edilen haritaya göre 190. metre yakınlarında akım yoğunluğunun arttığı görülmektedir. Her iki harita için anomalilerin farklı metrelerde oluşu bölgede yeralan fayın eğiminden kaynaklanmaktadır. Buna göre; profilin başlangıç noktasından anomali gösteren noktaya kadar yeralan dirençli formasyonun, bu metreden sonra yerini daha iletken birime bıraktığı söylenebilir. Bölgeye ait jeolojik kesitten de yararlanıldığında (Şekil 6.13c) bölgede alüvyondan Mahya Şistine bir geçiş olduğu görülmektedir.



Şekil 6.15: a) 19 kHz frekansında ve b) 16 kHz frekansında ölçülen VLF-EM verisi Karous - Hjelt eşdeğer akım yoğunluğu haritası, c) jeolojik kesit (Kesitin doğrultusu Şekil 5.2'de gösterilmiştir).

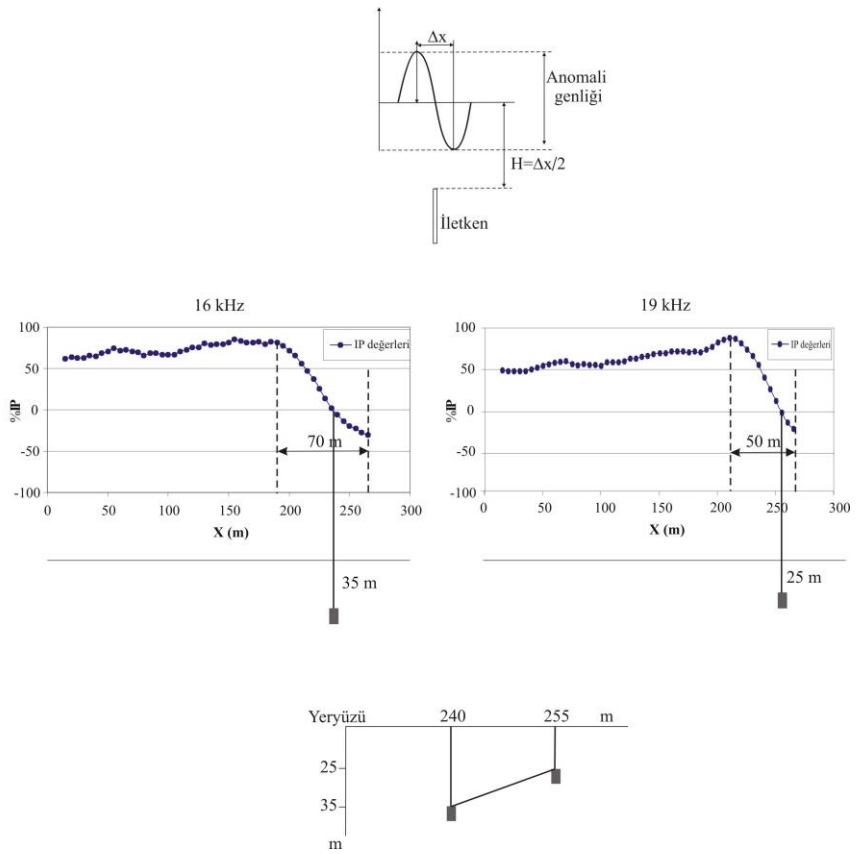
VLF-EM yönteminin zayıf noktalarından biri net bir derinlik bilgisi içermemesidir. Ancak bu çalışmada geçmiş yıllarda uygulanan bir yaklaşım kullanılarak yaklaşık bir derinlik bilgisi elde edilmiştir (Coney, 1976) (Şekil 6.16a). Bunun için %IP değerlerinden yararlanılmaktadır. %IP değerlerinin maksimum ve minimum aldığı değerler arasındaki uzaklık 2x olarak tanımlanırsa, iletken yapı derinliğinin h=x derinlikte olduğunu söylemek mümkündür. Buna göre; 16 kHz için maksimum ve minimum %IP değerinin ölçüldüğü noktalar arası 70 metre olduğundan iletkenin yeri sıfır '0' geçişinin olduğu 240. metrede ve derinliği 35 metre olarak tanımlanmaktadır (Şekil 6.16b). Aynı işlem 19 kHz için yapıldığında ise; %IP değerleri arası mesafenin 50 metre olduğu görülmüştür. Dolayısı ile iletken yerinin yine profil üzerinde, ancak

bu sefer 265. metrede ve derinliğinin 25 metre olduğu görülmüştür. Her iki frekans için metrelerin ve derinliklerin farklı olması fayın eğimli olduğunun bir göstergesi olarak düşünülebilir (Şekil 6.16c).

a)

b)

c)



Şekil 6.16: VLF-EM verileri için yaklaşık derinlik kestirimi, (a) kuramsal derinlik (Coney, 1976), (b) 19 kHz ve 16 kHz frekansları için VLF-EM verileri, (c) yaklaşık derinlik bilgisi.

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu yüksek lisans tezi kapsamında Çatalca-İstanbul Bölgesi'nde bulunan karstik yeraltısuyu kaynağı hidrojeolojik yapısı jeofizik yöntemlerden elektrik ve elektromanyetik yöntemlerle araştırılmıştır. Biri karstik kaynaklarda yeraltısuyu ve süreksizlik araştırmalarının yapıldığı Muratbey Bölgesi, diğeri ise süreksizlik, kırık araştırmalarının yapıldığı Çakıltepe Bölgesi olmak üzere jeofizik ölçümler iki ayrı bölgede gerçekleştirilmiştir. Muratbey Bölgesi civarında karstik özellik gösteren ortamda bulunan yeraltısuyu bölgenin su ihtiyacını karşılamaktadır. Karbonatlı eriyebilir özellikteki kireçtaşlarının asidik özellikteki yağış suları tarafından eritilmesiyle, karstik sistemler oluşmaktadır. Yeraltısuları, bu sistemin oluşturduğu mağara, kanal ve çatlaklarda hareket etmektedir. Bu tür ortamlar hidrojeolojik açıdan oldukça önemlidir.

Muratbey Bölgesi hidrojeolojik amaçlı çalışmalarda çeşitli araştırmacılar tarafından inceleme alanı olmuştur (Nasuf ve diğ., 2001; Duman, 2003). Çatalca-Muratbey'de jeoloji, hidrojeoloji ve jeokimyasal sonuçları baz alarak bölgedeki ilk jeofizik ölçümler gerçekleştirilmiştir. Jeofizik yöntemler kapsamında düşey elektrik sondaj (DES) ve geçici elektromanyetik yöntem (TEM) uygulanmıştır. Araştırmalar sonucunda bölgenin hidrojeolojik yapısı, kırık ve süreksizlikleri elektrik ve elektrik yöntemlerin ortak kullanımıyla birbirlerine göre olan üstünlükleri ve tamamlayıcı özelliklerinden yararlanılarak belirlenmiştir.

Çatalca Bölgesi'nde yapılan jeofizik çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular izleyen biçimde sunulabilir:

1) DES ve TEM yöntemleri için karstik bir kaynağın hidrojeolojik özelliklerini belirleme amacıyla yapılan modelleme çalışmalarda yeraltısuyu bulunan kireçtaşı katmanlarının düşük özdirençle sembolize olduğu ortaya konmuştur. İnceleme alanında yapılan ölçümlerin kuramsal verilerle uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

2) Çatalca-Muratbey Bölgesi'nde DES ve TEM ölçümlerinin değerlendirilmesi ile elde edilen sonuçlara göre inceleme alanında yüzeyden 20 metre derinliğe kadar ayrışmış bir zon tespit edilmiştir (8 ila 20 ohm-m). Bunun altında yeralan kireçtaşı katmanı yeraltısuyu içermektedir (30 ila 100 ohm-m). Duman (2003) tarafından yapılan hidrojeolojik çalışmalar sonucunda, bölgenin hidrojeolojik açıdan geçirimli birim olarak tanımlanan erime boşluklu kireçtaşı birimlerinden oluştuğu tespit edimiştir. Jeofizik çalışmalar sonucunda elde edilen yerelektrik sonuçları da bunu destekler niteliktedir. Bölgede 30-100 ohm-m arasında değişen özdirenç aralığının Kırklareli kireçtaşı formasyonunu karakterize ettiği düşünülmektedir. TEM yöntemi verileri ile kireçtaşı formasyonunun 92 metre bulunan kalınlığı alınan sondaj kolonu ile uyumlu olarak bulunmuştur.
3) Çatalca-Çakıltepe'de yapılan Wenner kaydırma ölçümleriyle bölgede bulunan fayın eğimli yapısı jeoloji ile uyumlu olarak tespit edilmiştir.
4) Çatalca-Çakıltepe'deki VLF-EM yöntem ölçümlerinde gerçel ve sanal bileşenlerdeki "sıfır" geçişinin jeolojik haritada ve arazide yüzeyde görülen kırığı işaret ettiği net olarak anlaşılmıştır. Bu süreksizlik-kırık doğrudan yeraltısuyu araştırmasının yapıldığı yerde bulunmamasına rağmen hidrojeolojik araştırmaların ve akiferlerin ana unsuru olması nedeniyle bu çalışma kapsamına alınmıştır. Sözü edilen süreksizlik/kırık üniversitemizdeki öğrenci uygulamalarında sıkça çalışma alanı olmakla birlikte üzerinde ilk kez VLF-EM ölçümleri gerçekleştirilmiş ve bugüne kadar elde edilen tüm jeofizik yöntemlerle elde edildiği gibi karakteristik bir kırık anomalisi elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

Ardalı, S. A., 2005. Tuzla bölgesi jeolojik süreksizlik yapılarının elektrik-elektromanyetik yöntemlerle araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi,* İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Auken, E. Nebel, L., ve Sørensen, K., Breiner, M., Pellerin, L., ve Christensen, N., B., 2002. EMMA – A geophysical training and education tool for electromagnetic modeling and analysis, *JEEG*, **7**, 57-68.

Benson, A.K., Payne, K. L., Stubben, M. A., 1997. Mapping groundwater contamination using dc resistivity and VLF geophysical methods – A case study, *Geophysics*, **62-1**, 80-86.

Coney, D. P., 1976. Model of VLF-EM method of geophysical prospecting, *Geoexploration*, **15**, 19-35.

Damron, L., A., 1986. Physical modeling of lateral variations of resistivity in transient electromagnetics, *M. Sc. Thesis* T-30008, Coloado School of Mines.

Duman, H., 2003. Çatalca (istanbul) – Muratbey Köyü Karstik Kaynaklarının hidrojeolojik, Y*üksek Lisans Tezi,* İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Erguvanlı, K., ve Yüzer E., 1973. Yeraltı Suları Jeolojisi (Hidrojeoloji), Özarkadaş Matbaası.

Fitterman, D. V., ve Stewart M. T., 1986. Transient electromagnetic sounding for groundwater, *Geophysics*, **51,** 995-1005.

Fraser, D. C., 1969. Counturing of VLF-EM data, *Geophysics*, **34**, 958 – 967.

Fontes, S. L., Meju, M. A., Ulugergerli, E., Germano C., Terra, C. R., 2003. The use of transient electromagnetic method to locate aquiferous fracture-zones and karst features in carbonate formations underneath > 100 m overburden in Minas Gerais state, Brazil, *SBGF 2003*.

Galperin, A. M., Zaytsev V. S. ve Norvatov Y. A., 1993. Hydrogeology and engineering geology, Rotterdam: A. A. Balkema.

Guerin, R., Benderitter, Y., 1995. Shallow karst exploraion using MT-VLF and DC resistivity methods, *Geophysical Prospecting*, **43**, 635-653.

Karlık, G. ve Kaya, M. A., 2001. Investigation of groundwater contamination using electric and electromagnetic methods at an open waste – disposal site: a case study from Isparta, Turkey, *Environmental Geology*, **40(6)**, 725-731.

Karous, M., ve Hjelt, S. E., 1983. Linear filtering of VLF dip angel measurements, *Geophysical Prospecting*, **31**, 782-794

Kaynak Suları Yönetmeliği, 1997. Doğal Kaynak, Maden ve İçme Suları ile Tıbbi Suların İstihsali, Ambalajlanması ve Satışı Hakkında Yönetmelik.

Krivochieva, S., and Couteau, M., 2002. Whole space modelling of a layered earth in time domain electromagnetic measurements, *Journal of Applied Geophysics*, **50**, 375-390.

Loke, M. H., 2000. Electrical imaging surveys for enviromental and engineering studies, www.geometrics.com, 12.07.2005.

McGrath, R. J., Styles, P., Thomas, E., ve Neale, S., 2002. Integrated high-resolution geophysical investigations as potential tools for water resource investigations in karst terrain, *Environmental Geology*, **42**, 552-557.

McNeill, **J. D., 1990.** Use of electromagnetic methods for groundwater studies. *in* Ward SH, Ed., Geotechnical and environmental geophysics, 1, *Soc. of Expl. Geophysics.*, 191-218.

McNeill, J. D., and Labson, V. F., **1988.** Electromagnetic Sounding, in: Nabighian, M. N., Electromagnetic Methods in Applied Geophysics-Application, Part B, *Soc. of Expl., Geophysics.*, 2.

Meju, M. A., 1995. Simple effective resistivity-depth transformations for infield or real-time data processing, *Computers and Geosciences.*, **21,** 985-992.

Meju, M. A., 2002. Geoelectromagnetic exploration fr natural resources: models, case studies and challenges, *Surv. Geophys.*, **23**, 133-205.

Milsom, J., 1996. Field Geophysics, John Wiley & Sons.

MTA, 2004. İstanbul Metropolü Batısındaki (Küçükçekmece-Silivri-Çatalca Yöresi) Kentsel Gelişme Alanlarının Yer Bilim Verileri, *Özel Yayın Serisi-3*, Ankara.

Nasuf, E., Yiğitbaş, E., Kuzu, C., Örgün, Y., Yalçın, T., 2001. May Yapı Limited Şirketi İstanbul ili Çatalca ilçesinde bulunan IR 577 ruhsat no'lu Muratbey kalker madeni ocağında yapılan üretim faaliyetleri sonucu Büyük Çekmece Göl havzasinin kirletilip kirletilmediğinin etüdü, *İTÜ Maden Fakültesi Vakfı Projesi,* 35 s.

Palacky, G. J., Ritsema, I., L., and De Jong, S. J., 1981. Electromagnetic prospecting for groundwater in precambrien terrains in the Republic of Upper Volta, *Geophysical Prospecting*, **29**, 932-955.

Pedersen, L. B., 2002. Measurements with the VLF instrument, Department of Earth Sciences, Uppsala University.

Phillips, W. J., ve Richards W.E., 1975. A study of the efectiveness of the VLF method for the location of narrow-mineralized fault zones, *Geoexploration,* **13**, 215-226.

Raiche, A. P., Jupp, D. L. B., Rutter, H., and Vozoff, K., 1985. The joint use of coincident loop transient electromagnetic and Schlumberger sounding to resolve layered structures, *Geophysics*, **50**, 1618-1627.

Ranieri, G., 2000. TEM-Fast: A useful tool for hydro-geologist and environmental engineers, *Annali di Geofisica*, **43**, 1447 – 1 458.

Recep, M., 2005. İstanbul Tuzla İçmeler Bölgesi'nde tuzlu su yayılımının jeofizik yöntemlerle araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi,* İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Sharma, S. P. Ve Baranwal, V. C., 2004. Delineation of groudwater-bearing fracture zones in a hard rock area integrating very low frequency electromagnetic and resistivity data, *Journal of Applied Geophysics,* **57**, 155-166.

Smith, D.L. ve Randazzo A.F., 2003. Application of electrical resistivity measurements to a evaluation of a potential landfill site in a karstic terrain, *Envronmental Geology*, **43**, 743-751.

Sørensen, K. I. ve Auken, E., 2004. SkyTEM – a new high-resolution helicopter transient electromagnetic system, *Exploration Geophysics,* **35**, 191-199.

Spies B. R., ve Eggers, D. E., 1986. The use and misuse of apperent resistivity in electromagnetic methods, *Geophysics*, **51**, 1462-1471.

Strack, K. M., 1992. Exploration with deep transient electromagnetics, Elsevier Publishing Company.

Sumanovac, F. ve Weisser, M., 2001. Evaluation of resistivity and seismic methods for hydrogeological maping in karst terrains, *Journal of Applied Geophysics*, **47**, 13-28.

Telford, W. M., Geldart, L. P. ve Sheriff, R. E., 1976. Applied Geophysics, Cambridge University Press, Cambridge, 2. baskı, 860 pp.

The HydroGeophysics Groups, 2001. Department of earth sciences University of Aarhus, Denmark, www.hgg.geo.au.dk, 25.08.2005.

Türkoğlu, E., 2003. Geçici elektromanyetik ve doğru akım elektrik özdirenç verilerinin ortak ters çözümü: Avcılar örneği, *Yüksek Lisans Tezi,* İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

William, E., K., ve Stanislav, M., 1993. Applied Geophysics in Hydrogeological and Engineering Practice, Elsevier Science Publishers B.V.

Yalçın, T. ve Duman, H., 2003. Çatalca (İstanbul) – Muratbey ve Akçeşme Karstik Kaynaklarının Hidrojeolojik İncelenmesi, Yerbilimleri, Sayı No: 43, ISSN 1019-1003.

Yalçın, T., 2005. Kişisel Görüşme.

Yang, C. H., Tong, L. T., and Huang, C., 1999. Combined application of DC and TEM to sea-water intrusion mapping, *Geophysics*, **64**, 417-425.

Yuhr, L., and Benson R.C., 1995. Saltwater intrusion: concepts for measurements and a regional characterisation for Broward County, Florida, *SAGEEP* 1995, 231-242.

ÖZGEÇMİŞ

Müge Koray 1981 yılında İstanbul'da doğdu. 1993 yılında Acıbadem İlkokulu'nu bitirdikten sonra 1998 yılında Üsküdar Çamlıca Kız Lisesi'nden mezun oldu. Aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi Jeofizik Mühendisliği bölümüne kayıt yaptırdı. Bölümü 2003 yılında derece ile (Bölüm üçüncüsü) bitirdikten sonra aynı yıl İstanbul Teknik Üniveristesi Jeofizik Mühendisliği Anabilim dalı Yüksek lisans programına kayıt yaptırdı. Halen aynı bölümde öğrenimine devam etmektedir.