

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İSTANBUL TUZLA İÇMELER BÖLGESİNDE TUZLU SU YAYILIMININ
JEOFİZİK YÖNTEMLERLE ARAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Mehmet RECEP**

Anabilim Dalı : JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ

Programı : JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ

OCAK 2005

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İSTANBUL TUZLA İÇMELER BÖLGESİNDE TUZLU SU YAYILIMININ
JEOFİZİK YÖNTEMLERLE ARAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Mehmet RECEP
Enstitü No : 505011189**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 10 Şubat 2005
Tezin Savunulduğu Tarih : 26 Ocak 2005**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Gülçin ÖZÜRLAN
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. İlyas ÇAĞLAR
Yrd. Doç. Dr. Tolga YALÇIN**

OCAK 2005

ÖNSÖZ

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

Bu çalışma konusunu öneren tez danışmanım, Sayın Doç. Dr. Gülçin ÖZÜRLAN'a, çalışmalarımı başından beri destekleyen tavrı, yüksek lisans öğrenimi ve tezin hazırlanması sırasında göstermiş olduğu yönlendirici ve değerli katkıları için içtenlikle teşekkür ederim.

Doğru akım verilerinin iki boyutlu modellenmesi amacıyla verilerin dönüşümü konusunda bana yardımcı olan ve tecrübelerini benimle paylaşan Prof. Dr. İlyas Çağlar'a, çalışma alanı ile jeolojik ve hidrojeolojik bilgilere ulaşmamda yardımcı olan Yrd. Doç. Dr. Tolga Yalçın'a teşekkür ederim.

Tezin oluşum sürecinde bir çok aşamada bana destek olan ve tez içerisinde yer alan şekillerin oluşturulmasında büyük emekleri bulunan o özel insana Müge Koray'a sonsuz teşekkürler. Ayrıca arazi çalışmalarına katılan değerli arkadaşlarım Müh. Ayça Sultan Ardalı, Y. Müh. Ümit Avşar, Müh. Muharrem Koç, Deniz Erol, Batuhan İnan, Burçak Özöter'e, kardeşim Mak.Y. Müh. Tarık Recep'e çok teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca bana emeği geçen bütün öğretmenlerim ile her türlü fedakarlığa katlanarak maddi ve manevi desteği sağlayan, beni yetiştiren aileme de teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Ocak, 2005

Mehmet RECEP

KISALTMALAR

AC	: Alternating Current
DC	: Direct Current
DES	: Düşey Elektrik Sondaj
EC	: Electrical Conductivity
emk	: Elektromotor Kuvvet
ppm	: Part Per Million
SP	: Self Potential
TDEM	: Time Domain Electromagnetics
TDS	: Total Dissolved Solids
TEM	: Transient Electromagnetic Method
TOT	: Turn Off Time
VLF-EM	: Very Low Frequency Electromagnetic Method

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 5.1 : VLF Verici İstasyonları Listesi (McNeill ve Labson, 1988).....	19
Tablo 6.1 : Yeraltı sularının içerdikleri TDS miktarına göre sınıflandırılması.....	37
Tablo 6.2 : İnceleme alanı içerisinde yeralan kaynak ve kuyulara ait bilgiler.....	38
Tablo 6.3 : Elektriksel iletkenliğin kaynak ve kuyularda değişimi.....	38
Tablo 6.4 : Kaynak ve kuyularda alınan su numunelerinde ölçülen iyon değerleri (Barut, 1993; Yalçın ve Tufan, 2003).....	39
Tablo 6.5 : Kaynak ve kuyulardan ölçülen değerlerin WHO ve TSE değerleri ile karşılaştırılması.....	40
Tablo 6.6 : Tuzla İçmeler bölgesinde yapılan jeofizik ölçümlerin dökümü	41
Tablo 6.7 : TEM-1 ve DES-3 verilerinin ortak ters çözüm sonuçları.....	47
Tablo 6.8 : TEM-2 ve DES-4 verilerinin ortak ters çözüm sonuçları.....	49
Tablo 6.9 : Sedimanter ortamda öz direnç değerlerinin yeraltı suyunun kalitesine ve tuzluluğuna bağlı olarak değişimi (Zohdy,1993)....	57

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Schlumberger diziliminin şematik olarak gösterimi	5
Şekil 2.2 : Schlumberger elektrot dizilimi. (AB/2, akım elektrotları arasındaki uzaklığın, MN/2 gerilim elektrotları arasındaki uzaklığın yarısını göstermektedir)	6
Şekil 3.1 : Farklı gerilim katsayılarına sahip jeolojik süreksizliklerin oluşturdukları SP anomalileri ve bunların yeryüzünde oluşturduğu SP konturlaşmaları. a) Düşey sınır, b) bir kuyudan yapılan sondaj, c) yatay sınır (Çağlar, 1991).....	9
Şekil 3.2 : Difüzyon geriliminin oluşması (Çağlar, 1991).....	10
Şekil 3.3 : SP kaydırma ölçü tekniği	10
Şekil 4.1 : 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)).....	12
Şekil 4.2 : TEM çalışma prensibi: Vericideki akım (üstte); uyarılmış elektromotor kuvvet (ortada); kaydedilen gerilim (altta) (Krivochieva ve Chouteau, 2002).....	13
Şekil 4.3 : Akımın kesilmesinden sonra uyartım akımlarının ilerleyen zamanla birlikte yer içindeki yayılımı (McNeill, 1990).....	14
Şekil 4.4 : Tem yönteminde verilerin kaydedildiği zaman pencerelerinin konumları.....	16
Şekil 4.5 : Vericide kaydedilen gerilim eğrisinin zamanın fonksiyonu olarak çizilmesi.....	17
Şekil 5.1 : Yeryüzündeki VLF Vericilerinin Dağılımı (Milsom, 1996).....	19
Şekil 5.2 : VLF vericisinin oluşturduğu birincil alan ve iletken yapının konumu.....	20
Şekil 5.3 : Düşey iletken ve manyetik alan bileşenlerinin görünümü (Milsom, 1996).....	21
Şekil 5.4 : a) Birincil alan (H _p) ve ikincil alan (H _s) birleşiminden oluşan toplam alan (H _R) ve alanlar arasındaki faz kaymasını gösteren vektör diyagramı. b) ikincil manyetik alanın vektörel bileşenleri; (H _{sx}) akım, (H _{sy}) ikincil voltaj.....	22
Şekil 5.5 : Polarizasyon elipsi parametreleri (McNeill and Labson, 1988).	23
Şekil 5.6 : Nüfuz derinliğinin frekansa ve öz dirence bağlı değişimi (Milsom, 1996).....	25
Şekil 6.1 : Çalışma alanı yer bulduru haritası.....	27
Şekil 6.2 : Çalışma alanındaki jeofizik profillerin ve istasyonların lokasyon haritası.....	29
Şekil 6.3 : Ghyben-Herzberg bağıntısına göre tuzlu su ara yüzeyinin gösterilmesi (Erguvanli ve Yüzer, 1985).....	30

Şekil 6.4 : Çalışma alanı genelleştirilmiş stratigrafik kesiti (Barut, 1993'den yeniden çizilmiştir).....	31
Şekil 6.5 : Tuzla İçmeler ve çevresi jeoloji haritası (Barut (1993)'den yeniden çizilmiştir).....	34
Şekil 6.6 : İnceleme alanı jeolojik kesiti.....	36
Şekil 6.7 : Yıllara göre iyon miktarı oranlarının değişimi.....	39
Şekil 6.8 : Ölçülen DES verilerinden elde edilen görünür öz direnç kesiti (andıran kesit).....	43
Şekil 6.9 : DES verilerinden elde edilen iki boyutlu yer modeli.....	44
Şekil 6.10 : TEM verileri ile elde edilen görünür öz direnç kesiti.....	45
Şekil 6.11 : DES verilerinin ters çözümünden oluşturulan yer elektrik kesiti.....	46
Şekil 6.12 : TEM-1 ve DES-3 noktalarında ölçülen verilerin ters çözümü ve bulunan yer modeli.....	48
Şekil 6.13 : TEM-2 ve DES-4 noktalarında ölçülen verilerin ters çözümü ve bulunan yer modeli.....	49
Şekil 6.14 : DES-1 ve TEM-3 verilerinin ayrı ayrı ve ortak ters çözüm sonuçları ile bulunan yer modelleri.....	50
Şekil 6.15 : DES-4 ve TEM-2 verilerinin ayrı ayrı ve ortak ters çözüm sonuçları ile bulunan yer modelleri.....	51
Şekil 6.16 : İnceleme alanında ölçülen VLF-Elektromanyetik gerçel (IP) ve Sanal (OP) bileşen haritaları.....	52
Şekil 6.17 : VLF-Elektromanyetik verilerini süzgeçlenmesiyle (Karus-Hjelt) oluşturulan eşdeğer akım yoğunluğu – derinlik kat haritası.....	54
Şekil 6.18 : İnceleme alanının doğal gerilim (SP) haritası.....	55
Şekil 6.19 : Ölçülen SP eğrisi ve hesaplanan model eğri.....	56
Şekil 6.20 : Çalışma alanında ölçülen görünür öz direnç değerlerinin üç farklı istasyondaki değişimi.....	59
Şekil 6.21 : Çalışma alanında ölçülen VLF-EM profillerine örnek.....	59
Şekil 6.22 : İnceleme alanını temsil eden hidrojeolojik model.....	60

SEMBOL LİSTESİ

a	: Verici halkanın yarıçapı (m)
$\mathbf{B}$	: Manyetik akı (Weber/m ²)
ΔV	: Gerilim farkı (V)
δ_{eff}	: Yaklaşık derinlik (m)
$\mathbf{E}$	: Elektrik alan şiddeti (mV/m)
$\mathbf{H}$	: Manyetik alan şiddeti (γ)
h	: Katman kalınlığı (m)
I	: Akım (A)
J	: Akım yoğunluğu (A/m ²)
K	: Kuzey
L	: Akım elektrotlarının orta noktaya olan uzaklığı (m)
l	: Gerilim elektrotlarının orta noktaya olan uzaklığı (m)
L_V	: Verici halkanın indüktansı (Henry)
μ	: Manyetik geçirgenlik (Henry/m)
R	: Direnç (Ohm)
$\mathbf{R}$	: Model ayrımlılık düzeyi
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)
$\mathbf{V}$	: Parametre özyöney düzeyi
χ	: Çakışma ölçütü
Z	: Empedans
z	: Derinlik (m)
ΔP	: Su basıncından kaynaklanan potansiyel farkı
ζ	: Absorbsiyon potansiyeli
ε	: Dielektrik katsayısı
η	: Viskozite
σ	: İletkenlik (mS/m)
ϕ	: Faz açısı (derece)
ω	: Açısal Frekans (radyan/sn)

İSTANBUL-TUZLA İÇMELER BÖLGESİNDE TUZLU SU YAYILIMININ JEOFİZİK YÖNTEMLERLE ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Yeraltı suları kentsel, endüstriyel ve tarım amaçlı su ihtiyacı temin edilen en değerli ve önemli kaynaklardır. Kullanılabilir düzeydeki tatlı su kaynaklarının oldukça sınırlı olması nedeniyle tanınması ve korunması gereği ortadadır. Ancak, yer altı suyu kirliliği, bir çok endüstri ülkesinde olduğu gibi Türkiye’de de son yıllarda görülmeye başlanan bir çevre sorunudur. Bu çalışmada yeraltı suyu kalitesini etkileyen bir kirlilik kaynağı olan tuzlanmanın, özellikle sahil bölgelerinde yeralan akiferlere olan etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, İstanbul Tuzla İçmeler bölgesinde kıyı akiferlerinde tuzlu su yayılımının belirlenebilmesi için jeofizik yöntemlerden yararlanılmıştır.

Elektrik ve elektromanyetik yöntemler, yerin öz direncinin inceleme alanındaki değişimlerini yansıtmadaki başarısı nedeni ile sık jeolojik yapıların araştırılmasında en çok kullanılan jeofizik yöntemlerdendir. Bu yöntemler tuzlu suya doymuş alanlar ile tatlı suya doymuş alanlar arasındaki yüksek öz direnç kontrastından yararlanarak kıyı bölgesindeki kirliliğin sınırlarını tespit etmede başarıyla kullanılabilmektedir. Bu çalışmada, Doğru akım öz direnç yöntemi ile Geçici Elektromanyetik Yöntem (TEM) kullanılarak öz direncin derinlikle değişimi araştırılmıştır. Buna ek olarak, Çok Alçak Frekanslı Elektromanyetik Yöntem (VLF-Elektromanyetik) kullanılarak iletkenliğin yanal yöndeki değişimleri ve Doğal Polarizasyon Yöntemi (SP) kullanılarak yeraltı suyu akış yönü incelenmiştir.

Çalışma alanında 7 farklı istasyonda DES (Düşey Elektrik Sondaj), 3 farklı istasyonda TEM, 15 profil boyunca VLF-Elektromanyetik ve 7 profil boyunca SP verileri toplanmıştır. Toplanan DES verilerinin bir boyutlu ters çözümü yapılarak çalışma alanının yerelektrik kesiti elde edilmiştir. Bununla birlikte yeraltı ile ilgili daha doğru bir model elde edebilmek için DES verilerin iki boyutlu modellenmesi bu çalışma kapsamında yapılmıştır. Ayrıca toplanan TEM ve DES verilerinin ortak ters çözümünden elde edilen yer modellerinin litoloji ile olan uyumu incelenmiştir. VLF-Elektromanyetik verilerinin süzgeçlenmesi ile eşdeğer akım yoğunluğu-derinlik kat haritaları elde edilmiş ve sonuçların jeoelektrik yöntemle elde edilen sonuçları desteklediği görülmüştür. Bölgede yeralan kuyulardan daha önceden yapılmış hidrokimyasal çalışmalarla yeraltı sularına ait toplam çözünmüş madde miktarı (TDS), elektriksel iletkenlik (EC) ve tuz iyonları değerleri elde edilmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda Tuzla İçmeler Bölgesinde Büyük İçme olarak adlandırılan alanın tuzlu su girişiminden etkilendiği saptanmıştır. Tuzlu su girişiminin görüldüğü akiferlerdeki öz direnç değerlerinin 2 – 9 ohm.m arasında olduğu görülmüştür. Bulunan sonuçların jeolojik, hidrojeolojik ve hidrokimyasal araştırmalarla uyumluluğu incelenmiş ve tüm bu bilgilere dayanarak yeraltını temsil eden hidrojeolojik model oluşturulmuştur.

INVESTIGATION SPREAD OF SALT WATER WITH GEOPHYSICAL METHODS IN İSTANBUL-TUZLA İÇMELER REGION

SUMMARY

Groundwater is one of the most important and valuable source for urban, industrial and agricultural irrigation. Because of the limited fresh water source it is very important to recognize and protect them. However, at recent years groundwater contamination in Turkey has begun to be a serious environmental problem as in many industrial countries. In this study, it is subjected that salinity, which is one of the contaminating source, affects the quality of groundwater. For this goal, the geophysical methods used to detect spread of the saltwater in the coastal aquifer at İstanbul-Tuzla İçmeler region.

Electrical and electromagnetic methods, with their success at detecting resistivity change of study area, are widely used geophysical methods for shallow geological investigations. Using the high resistivity contrast between saltwater affected and freshwater area these methods can determine contamination at coastal aquifer. In this study, variation of resistivity with depth investigated using direct current resistivity method and Transient Electromagnetic Method (TEM). In addition to this, Very Low Frequency Electromagnetic Method (VLF-Electromagnetic) and Self Potential (SP) method are used to investigate the conductivity variation at lateral distance and to determine the groundwater flow direction, respectively.

In the study area VLF-Electromagnetic measurement along 15 profile, SP measurements along 7 profile, VES (Vertical Electric Sounding) measurements at 7 stations and TEM measurements at 3 stations were carried out. Geo-electrical section of the study area obtained by inversion of VES data. In addition to this, to obtain more reliable subsurface model 2D modeling of VES data is done. Furthermore, geologic accordance of the obtained model are examined by using joint inversion results of TEM and VES data. Current density-depth cross-sections are obtained from filtered VLF-Electromagnetic data. The method complements the results of geo-electrical sounding. In the region, by using results of previous hydrochemical studies which done in the water wells, salt ions quantity, electrical conductivity (EC) and total dissolved solids quantity (TDS) are obtained. According to the results, saltwater intruded into the coastal aquifer in Büyük İçme in Tuzla İçmeler region. It was obtained that the resistivity values of the seawater-intruded aquifers vary within a range of 2-9 ohm.m. Consequently, harmony of the geophysical results with geologic, hydrogeologic and hydrochemical features that were already known investigated and using this knowledge a hydrogeologic model was constituted.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa no</u>
KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
2. DOĞRU AKIM ÖZDİRENÇ YÖNTEMİ	4
2. 1 Düşey Elektrik Sondaj	5
2. 2 Görünür Özdirencin Hesaplanması	6
3. DOĞAL POLARİZASYON YÖNTEMİ	8
3. 1 Doğal Polarizasyonun Kaynağı	8
3. 2 Doğal Polarizasyon Ölçmeleri	10
4. GEÇİCİ ELEKTROMANYETİK YÖNTEM	11
4. 1 Geçici Elektromanyetik Yöntemin Temel Kavramları	11
4. 2 Görünür Özdirencin Hesaplanması	13
4. 3 Yokuş Zamanı ve Araştırma Derinliği	15
5. ÇOK ALÇAK FREKANS ELEKTROMANYETİK YÖNTEM	18
5. 1 VLF-Elektromanyetik Kuram	20
5. 1. 1 Faz Kayması ve Eliptik Kutuplanma	21
5. 2 Verilerin Süzgeçlenmesi	23
5. 3 Araştırma Derinliği	24
6. İSTANBUL-TUZLA İÇMELER BÖLGESİNDE TUZLU SU YAYILIMININ JEOFİZİK YÖNTEMLERLE ARAŞTIRILMASI	26
6. 1 Tuzlu Su Girişimi: Problemin Tanımı	28
6. 2 Tuzla İçmeler Bölgesi Jeolojisi	30
6. 3 Tuzla İçmeler Bölgesi Hidrojeolojisi	33
6. 4 İnceleme Alanı Yeraltı Sularının Hidrokimyası	35
6. 5 Tuzla İçmeler Bölgesinde Uygulanan Jeofizik Araştırmalar	40
6. 6 Tuzla İçmeler Bölgesinde Ölçülen Verilerin Değerlendirilmesi	43
6. 6. 1 DES ve TEM Verilerinin Değerlendirilmesi	43
6. 6. 2 DES ve TEM Verilerinin Ters Çözümü	45
6. 6. 3 VLF-Elektromanyetik Verilerinin Değerlendirilmesi	50
6. 6. 4 Doğal Polarizasyon Verilerinin Değerlendirilmesi	53
6. 7 Tuzla İçmeler Bölgesi Yerelektrik Yapısı	54

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	61
KAYNAKLAR	64
ÖZGEÇMİŞ	68

1. GİRİŞ

İstanbul, hızla artan nüfusuyla ülkemizin büyük şehirlerinden biridir. Artan nüfusa paralel olarak, insanların taze su kaynaklarına olan ihtiyaçları da gün geçtikçe artmaktadır ve artan su ihtiyaçlarının karşılanması amacıyla yeraltı sularından yararlanılmaktadır. Yeraltı suları, kentsel, endüstriyel, tarım ve ev işlerinde veya içme amaçlı olarak kullanılabilir. Kullanılabilir düzeydeki tatlı su kaynaklarının oldukça sınırlı olması nedeniyle korunması ve kirletilmemesi gerekmektedir. Ancak, yeraltı suyu kirliliği, bir çok ülkede görüldüğü gibi ülkemizde de son yıllarda artan nüfusla birlikte görünmeye başlayan bir çevre sorunudur. Yeraltı suları için kirlilik kaynakları çok çeşitlidir. Bu tez çalışması kapsamında kıyı şeridinde yeralan İstanbul Tuzla ilçesi, İçmeler bölgesinde, yeraltı suyu kalitesini etkileyen bir kirlilik kaynağı olan tuzluluğun, boyutları ve yayılımı araştırılmıştır.

Tuzla İçmeleri İstanbul Anadolu yakasında Kadıköy'e 32 km. uzaklıktadır. Çok eski dönemlerden günümüze kadar gelen bu içmelerde iki doğal kaynak ve iki sondaj kuyusu bulunmaktadır. Uzun yıllardan beri bu kaynaklardan çıkan ve tuzluluğu ile tanınan sular, bir çok rahatsızlığın (bağırsak tenyaları, safra yolları ve böbrek rahatsızlıkları) tedavisinde kullanılmıştır. Bu kaynak ve kuyulardan kabul edilebilir limitlerin üstünde su çekilmesiyle birlikte tuzlu su karaya doğru girmekte ve tatlı su akiferlerini kirletebilmektedir. Aynı şekilde bunun tam tersi olarak, bu kuyulardan fazla miktarda su çekilmesi tatlı yeraltı suyunun bölgeye akışını hızlandırmakta ve bölgede yeralan kaynak ve kuyuların tuzluluğunu düşürebilmektedir. Bu çalışmada tuzlu su ile doymun alanlar ile tatlı su ile doymun alanlar arasındaki yüksek öz direnç kontrastından yararlanarak kıyı bölgesindeki kirliliğin sınırları, jeofizik yöntemlerden elektrik ve elektromanyetik yöntemler kullanılarak tespit edilmeye çalışılmıştır.

Elektrik ve elektromanyetik yöntemler, yerin öz direncinin inceleme alanındaki değişimlerini yansıtmadaki başarısı nedeni ile sıkı jeolojik yapıların araştırılmasında en çok kullanılan jeofizik yöntemlerdendir. Öz direnç, jeolojik birimlerin fiziksel özellikleri ve içerdikleri akışkanların kimyasal özellikleri ile ilişkilendirilerek,

jeolojik yorumlamada kullanılan önemli bir parametredir. Bu nedenle, tüm yer araştırmalarında, elektrik ve elektromanyetik yöntemler vazgeçilmez bir araç durumuna gelmiştir. Bu çalışma kapsamında inceleme alanında yer elektrik yöntemlerden doğal polarizasyon (SP) ve doğru akım öz direnç yönteminin, düşey elektrik sondaj (DES) tekniği kullanılarak uygulanmıştır. Elektromanyetik yöntemlerden ise; çok alçak frekanslı elektromanyetik yöntem (Very Low Frequency Electromagnetic Method - VLF-Elektromanyetik yöntem) ve geçici elektromanyetik yöntem (Transients Electromagnetic Method - TEM), çalışma alanında belirlenen bir ölçüm doğrultusu boyunca, yeraltı öz direnç (veya tersi olan iletkenliğin) değişiminin tespit edilmesi amacıyla uygulanmıştır.

Yer elektrik yöntemlerden öz direnç yöntemi galvanik bir yöntemdir. Bir çift akım elektrotu tarafından yer içine gönderilen elektrik akımının oluşturduğu gerilim farkının, yer yüzünde yine bir çift gerilim elektrotuyla ölçüldüğü bu yöntemde akım elektrotları arasındaki mesafe artırılarak akımın derinlere inmesi sağlanır. Düşey elektrik sondaj olarak isimlendirilen bu teknikte, iletkenliğin derinlikle değişimi hakkında bilgi edinilebilmektedir. Öz direnç yönteminin aksine SP yöntemi ise yer elektrik yöntemleri içinde, yer içine akım göndermeden çalışan tek yöntemdir. Bu yöntem ile doğal elektrokimyasal, elektrokinetik ve elektrofiltrasyon gibi olayların oluşturduğu yer içi akım akışının oluşturduğu doğal alan ölçülmektedir.

İndüktif birer yöntem olan VLF-EM ve TEM yöntemlerinin çalışma prensipleri, bir kaynaktan yayılan birincil manyetik alanların, yer içinde oluşturduğu ikincil manyetik alanların yer yüzünde ölçülmesine dayanmaktadır. Frekans ortamı elektromanyetik yöntemlerden olan VLF-EM yönteminde ölçüler alınırken ortamda birincil manyetik alanlar da bulunmaktadır. Kullanılan frekans bandına ve ortamın direncine göre belirli bir araştırma derinliğine sahip olan bu yöntem bir profil boyunca yanal süreksizliklerin araştırılmasında kullanılmaktadır. Zaman ortamı elektromanyetik yöntemlerden TEM yönteminde ise ölçümler sırasında birincil alanlar bulunmamaktadır. İlerleyen zamanla birlikte araştırma derinliğinin arttığı bu yöntem ile düşey yöndeki süreksizlikler araştırılmaktadır. Derin yer elektrik bilgisine gerek duyulan ortamlarda uygulamadaki kolaylığı bakımından tercih edilen yöntemlerdendir. Çalışma alanında uygulanan yöntemler ile ilgili ayrıntılı bilgiler ilerleyen bölümlerde anlatılmaktadır.

Bu tez çalışmasında birbirine göre farklı üstünlükleri bulunan çeşitli jeofizik yöntemler kullanılarak elde edilen veriler, her bir yöntem için farklı teknikler kullanılarak değerlendirilmiştir. Farklı fiziksel esaslara dayalı ancak aynı parametrelere duyarlı elektrik ve elektromanyetik yöntemlerden DES ve TEM yöntemlerinin ortak ters çözümleri yapılarak hem iletken hem de dirençli tabakaların tespiti için güvenilir çözümler elde edilmeye çalışılmıştır. Bulunan sonuçlar inceleme alanının jeolojik, hidrojeolojik ve jeokimyasal özelliklerinin ortaya çıkarılması amacıyla çeşitli araştırmacılar tarafından (Barut, 1993; Yalçın ve Tufan 2003) yapılan araştırma sonuçlarından elde edilen bilgiler ışığında değerlendirilerek, jeolojik ve hidrojeolojik verilerle entegrasyonu sağlanmıştır. Böylece Tuzla İçmeler bölgesi için tuzlu su yayılımı haritalanmaya, oluşan çevre probleminin boyutları belirlenmeye çalışılmıştır.

2. DOĞRU AKIM ÖZDİRENÇ YÖNTEMİ

Doğru akım öz direnç yöntemi yapay kaynaklı, aktif bir yer elektrik yöntemidir. Yeryüzüne yerleştirilen bir çift elektrotla yer içine akım gönderilerek yer uyartılır ve yerin tepkisi ölçülür. Öz direnç yöntemi Ohm yasasının arazide uygulanmasına dayanır. Yeryüzünde belli bir aralıkla çakılmış iki elektrottan yer içine belli bir büyüklükte akım gönderilerek, bu akımın oluşturduğu potansiyel farkı yer yüzeyinde ölçülür. Bilinen akım I (amper) ve ölçülen gerilim farkı ΔV (volt) kullanılarak, Ohm yasasına göre verdiğimiz akıma karşı yerin gösterdiği direnç R (ohm) saptanır.

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (2.1)$$

Yeryüzünde bir noktaya çakılı tek bir akım elektrotu ile öz direnci ρ olan homojen bir ortama akım verirse akım kaynaktan uzağa doğru ışınsal olarak yayılır. Kaynaktan uzağa doğru akımın ilerlemesi küresel bir yüzey üzerinde gerçekleşir. Akım ilerleyerek kaynaktan uzaklaştıkça bu yüzey genişler. Akımın yoğunluğu J , uygulanan akımın dağıldığı yüzeyin alanına bölünerek bulunur. Akım yoğunluğu kaynaktan uzaklaştıkça azalır. Yeryüzünde homojen izotrop bir ortamda bir nokta akım kaynağından akım verilmesi durumunda, akımın kaynaktan r kadar uzakta oluşturacağı potansiyel Ohm kanunundan yararlanılarak

$$E = \rho \cdot J \quad (2.2)$$

$$E = \rho \frac{I}{2\pi r^2} \quad (2.3)$$

$$E = -\frac{dV}{dr} \quad (2.4)$$

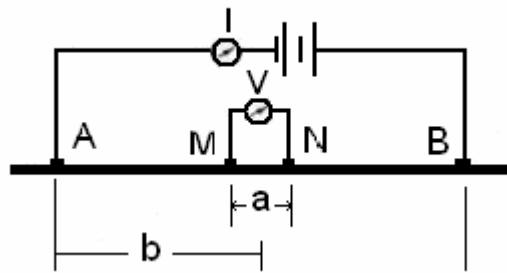
olduğundan nokta akım kaynağından r uzaklığındaki potansiyel

$$V_r = -\int \rho \frac{I}{2\pi r^2} dr = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (2.5)$$

şeklinde yazılabilir.

2.1 Elektrot Dizilimleri ve Düşey Elektrik Sondaj Tekniği

Doğru akım öz direnç yöntemiyle arazideki potansiyel farkını ölçmek için kullanılan bir çok elektrot dizilimi vardır. Bu dizilimlerde temel olarak iki akım iki de potansiyel elektrodu yer alır. Elektrotların arazideki yerleşimine göre her dizilim için farklı bir geometri oluşur (Şekil 2.1) ve her dizilimin farklı bir geometrik faktörü vardır. Bu dizilimlerin kendine özgü üstünlükleri bulunmaktadır. Bunlar arasında seçim yapılırken araştırma sahasının jeolojik özelliklerine, arazi koşullarının getirdiği kısıtlamalara uygun olmasına dikkat edilir. Uygulamada en çok kullanılan ölçüm düzenekleri Wenner ve Schlumberger dizilimleridir. Wenner diziliminde bütün elektrotlar eşit aralıklarla dizilmiştir ve bu ölçüm düzeni, düşey çözünürlüğü çok iyi ve yanal süreksizliklere olan duyarlılığı yüksek bir dizilimdir. Schlumberger dizilimi, Wenner dizilimine göre düşey çözünürlüğe ve yanal süreksizliklere biraz daha düşük duyarlılığa sahip olmasına rağmen, Düşey Elektrik Sondaj (DES) için daha uygundur. Schlumberger ölçüm düzenğinde gerilim elektrotları arasındaki mesafenin dar olması ve her ölçüm sonunda değiştirilmesine gerek kalmaması bu açılımın avantajlarından biridir.



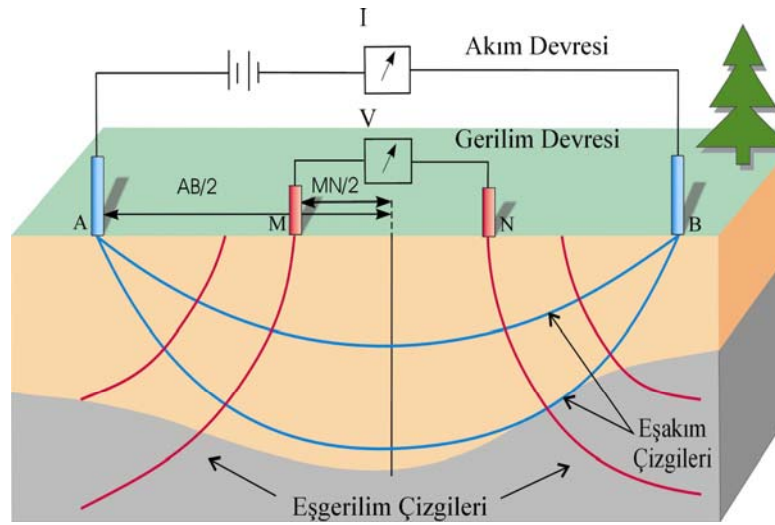
Şekil 2.1 Schlumberger diziliminin şematik olarak gösterimi.

DES ölçüm tekniği, jeolojik yapının katman derinliğinin hesaplanması ve yeraltı topografyasının belirlenmesi gibi yeryüzünden derinlere doğru yapılan araştırmalarda kullanılmaktadır. Derinlik sondajı için yapılan gerilim ölçmeleri en küçük elektrot aralığı ile başlar ve adım adım en yüksek elektrot aralmasına kadar sürdürülür. Her bir elektrot açıklığı için görünür öz direnç değeri; ölçülen rezistans, elektrot dizilimi

için verilen geometrik faktör ve elektrotlar arası açıklık kullanılarak hesaplanır. Schlumberger açılımında potansiyel elektrotları sabit bir aralamayla aynı yerde dururlar ve akım elektrotları arası arttırılarak DES ölçü tekniği uygulanır. Akım ve potansiyel elektrotları arasındaki açıklık oranı 1/5 i geçince potansiyel elektrotları aralığı da değiştirilir. DES tekniği ile ölçülen görünür öz direnç değerleri elektrot aralığının bir fonksiyonu olarak çizdirilir. Bu eğrilerden yararlanarak yeraltındaki tabaka sayısı ve öz direncin değişimi hakkında bilgi elde edilebilir. Yeraltındaki katmanların gerçek öz direnç değerleri ve kalınlıklarının elde edilebilmesi için ters çözüm tekniklerinden yararlanılır.

2.2 Görünür Öz direncin Hesaplanması

Arazide doğru akım öz direnç yöntemi uygulanırken, yere iki akım elektrodundan akım uygulanır ve iki potansiyel elektrodu yardımı ile akım akışının neden olduğu potansiyel farkı ölçülür (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Schlumberger elektrot dizilimi. (AB/2, akım elektrotları arasındaki uzaklığı, MN/2 gerilim elektrotları arasındaki uzaklığın yarısını göstermektedir) (Koray, 2003).

Tek nokta akım kaynağı için elde edilen bağıntıdan yararlanılarak M ve N noktaları arasındaki potansiyel farkı

$$dV_{MN} = V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right] \quad (2.6)$$

denklemleriyle verilebilir. Akım elektrotlarının orta noktaya olan uzaklığı $AB/2=L$ olarak ve gerilim elektrotlarının orta noktaya olan uzaklığı $MN/2=l$ olarak alınırsa (2.6) denklemindeki parantez içindeki ifade $L \gg l$ olduğu göz önünde bulundurularak yeniden düzenlenirse ve a ile gösterilirse

$$r = \frac{L^2}{8l} \quad (2.7)$$

olarak yazılır. Bunu (2.6) denkleminde yerine yazarsak ve bu potansiyel bağıntısından görünür öz direnç bağıntısı şu şekilde bulunur.

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} \frac{\pi L^2}{4l} \quad (2.8)$$

Burada denklemin sağ tarafındaki ikinci terim dizilimin geometrisinden kaynaklanmaktadır ve geometrik faktör (k) olarak isimlendirilmektedir. Buna göre,

$$k = \frac{\pi L^2}{4l} \quad (2.9)$$

olarak yazılırsa ve (2.9) ifadesi (2.8) numaralı denklemde yerine konulursa,

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} k \quad (2.10)$$

Schlumberger dizilimi için görünür öz direnç bağıntısı elde edilir. Yatay katmanlı bir ortamın yüzeyinde ölçülen direnç, bütün katmanların dirençlerinin toplamıdır ve yer içindeki her bir katmanın kendi öz direnci ve kalınlığına bağlıdır. Bu nedenle, karmaşık ortamlar üzerinde ölçülen değerin, dizilimin geometrik faktörüyle çarpılması ile elde edilen öz direnç değeri, görünür öz direnç olarak adlandırılır.

3. DOĞAL POLARİZASYON YÖNTEMİ

Elektrik yöntemler arasında yer içine akım göndermeden çalışan tek yöntem olan doğal polarizasyon (**S**elf **P**otansiyel – **SP**) yöntemi ilk olarak 1830’da İngiltere’de bakır sülfür yataklarının belirlenmesinde kullanılmıştır. SP yöntemi, yeryüzündeki doğal elektrik potansiyelin ölçülmesi esasına dayanmaktadır. Bu doğal potansiyelin oluşmasına sebep olan çeşitli mekanizmalar bulunmaktadır. Bunlar elektrokinetik, elektrokimyasal ve mineral potansiyelleri olarak sınıflandırılmaktadırlar. Elektrokimyasal etkilere en çok maden araştırmalarında rastlanırken, termoelektrik veya elektrokinetik etkilere ise jeotermal alanlarda ve volkanik olaylarda rastlanılmaktadır.

İlk başlarda özellikle madencilikte cevherleşme zonlarının tespit edilmesinde kullanılan bu yöntem daha sonraları bir çok araştırmacı tarafından jeotermal alanların araştırılması (Corwin ve Hoover, 1979), volkanik alanlardaki hidrotermal sistemlerin belirlenmesi (Di Maio ve Patella, 1994; Michel ve Zlotnicki, 1998), çevre ve mühendislik jeofiziği çalışmaları (Ogilvy ve diğ., 1969; Corwin, 1990) gibi çeşitli araştırmalarda kullanılmıştır.

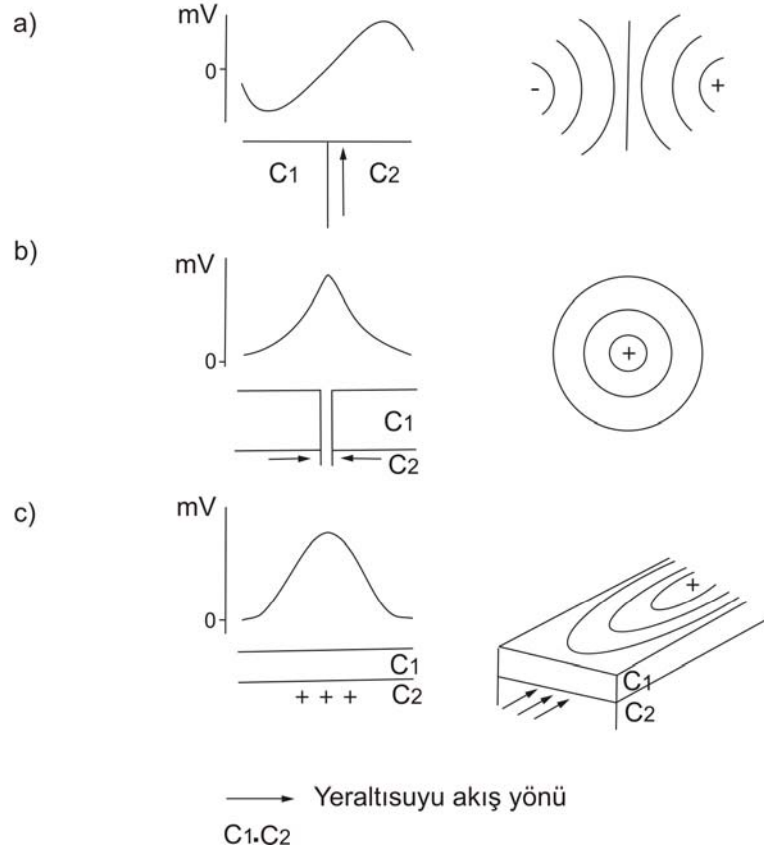
3.1 Doğal Polarizasyonun Kaynağı

Bir çok doğal potansiyel kaynağının oluşumunda etkili olan tek ortak koşul yeraltı suyunun varlığıdır. Potansiyel, suyun akışı, suyun elektrolit olarak davranması ve farklı minerallerin çözücü olması gibi pek çok nedenlerden dolayı oluşabilmektedir. Buna göre iletkenliği σ olan, η viskozitesine ve ϵ dielektrik katsayısına sahip bir çözeltinin kapiler veya geçirimli bir ortamdan geçerken oluşturduğu elektrik gerilim

$$\Delta V = -\frac{\zeta\epsilon}{4\pi\eta\sigma}\Delta P \quad (3.1)$$

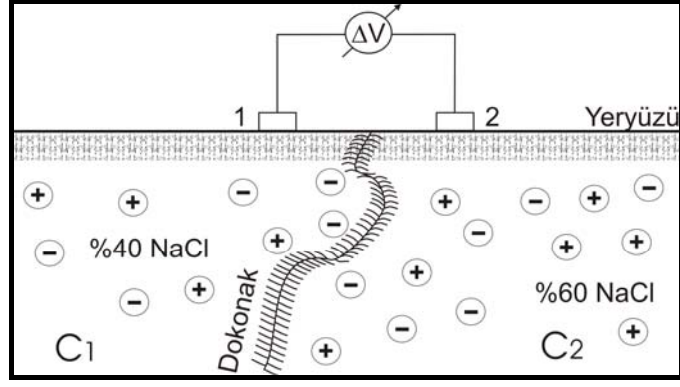
olarak verilmektedir. ΔV akıştan kaynaklanması nedeniyle elektrokinetik potansiyel veya “streaming” potansiyel olarak tanımlanmaktadır. Burada ΔP su basıncından

kaynaklanan (hidrolik) potansiyel farkı ve ζ absorpsiyon potansiyelini göstermektedir. Bu potansiyelin oluşumunda suyun jeolojik bir sınıra paralel mi yoksa, yeraltı su tablasının üzerinde mi aktığı önem kazanmaktadır. Farklı karakteristik gerilim katsayılarına sahip jeolojik süreksizlikler için, elektrokinetik potansiyelin davranışı Şekil 3.1 da verilmiştir. Potansiyeller suyun aktığı doğrultuda pozitif olmaya yönelirler çünkü elektrik yük aksi yönde akmaktadır.



Şekil 3.1 Farklı gerilim katsayılarına sahip jeolojik süreksizliklerin oluşturdukları SP anomalileri ve bunların yeryüzünde oluşturduğu SP konturlaşmaları. a) Düşey sınır, b) bir kuyudan yapılan sondaj, c) yatay sınır (Çağlar, 1991).

Ayrıca farklı konsantrasyonlardaki çözeltilerde yer alan anyon ve katyonların hareketlerinden dolayı ortaya çıkan gerilim, (-) ve (+) yük miktarlarının eşit olmak istemeleri nedeniyle çözeltilerin arayüzeyinde oluşan iyon alışverişlerinden (yük geçişleri) kaynaklanmaktadır. Bu şekilde ortaya çıkan gerilim doğal polarizasyon yönteminde difüzyon gerilimi olarak tanımlanmaktadır (Şekil 3.2).

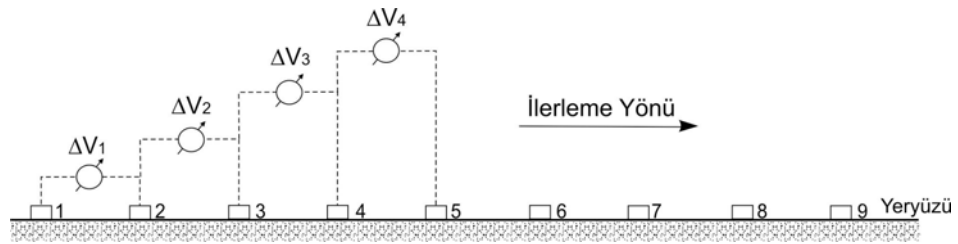


Şekil 3.2 Difüzyon geriliminin oluşması (Çağlar, 1991).

3.2 Doğal Polarizasyon Ölçmeleri

Doğal Polarizasyon ölçümleri polarize olmayan iki gözenekli çanak (poröz pot), elektrot giriş empedansı 10^8 ohm'dan büyük ve en az 1 mV ölçebilecek duyarlılıkta multimetre ve yeterli miktarda yalıtılmış kablo kullanılarak yapılmaktadır. Potansiyel elektrotu olarak kullanılan çanaklar içerisinde genellikle bakır sülfat çözeltisi bulunmaktadır.

Doğal polarizasyon yönteminde iki farklı ölçüm tekniği kullanılmaktadır. Kaydırma ve baza indirgeme olarak adlandırılan bu tekniklerde ölçümler belli profiller boyunca alınır. Bu tez kapsamında da kullanılan kaydırma ölçü tekniğinde (Şekil 3.3), bir doğrultu boyunca sabit aralıklı birinci ve ikinci noktalara yerleştirilen bir çift elektrot arasındaki gerilim farkı ölçülür ve ölçü değerleri iki ölçü noktasının ortasına atanır.



Şekil 3.3 SP kaydırma ölçü tekniği.

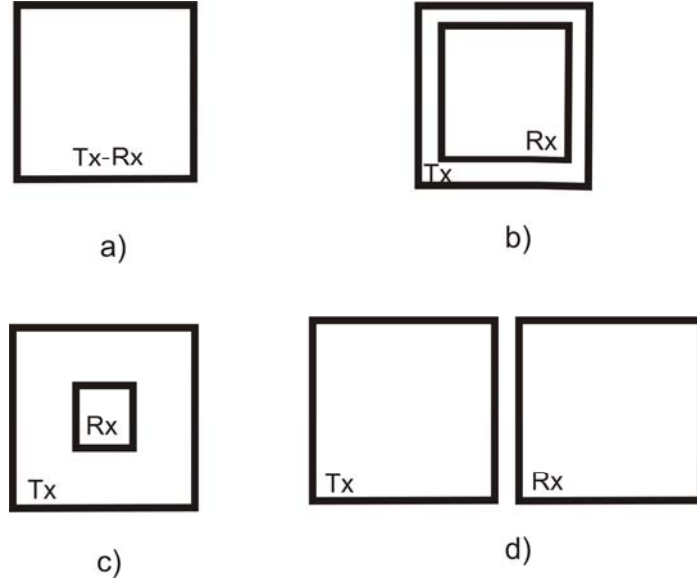
4. GEÇİCİ ELEKTROMANYETİK YÖNTEM

Zaman ortamı elektromanyetik yöntemler geleneksel galvanik yöntemlerle karşılaştırıldığında çevre ile ilgili çalışmalar ve mühendislik problemlerin çözümünü de içeren bir çok çalışmada etkili bir yöntem olarak kullanılabilmekte ve galvanik yöntemlere göre daha iyi sonuçlar üretebilmektedir. Bu yöntemin en büyük avantajı araştırmalar çok kısa bir süre içinde ve küçük alanlarda yapılabilmektedir. 80'li yılların öncesinde ilk olarak Rusya'da derin yapıların araştırılması için geliştirilen bu yöntem 1985'li yıllardan itibaren birçok jeolojik, mühendislik ve çevre ile ilgili araştırmalarda geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Birçok araştırmacı tarafından yayınlanan çalışmalarda, zaman ortamı elektromanyetik yöntem (Time Domain Electromagnetics – TDEM) ya da geçici elektromanyetik yöntem (**Transient Electromagnetic Method - **TEM**) olarak adlandırılan bu ölçüm düzeneğinin hidrojeolojik araştırmalarda (Fitterman and Stewart, 1986; McNeill, 1990; Sorensen, 1996; Meju et al., 2000) ve spesifik bir problem olan tuzlu su girişiminin tespit edilmesinde (Yuhr and Benson, 1995; Richards et al., 1995; Goldman et al., 1991; Hoekstra et al., 1996) etkili bir yöntem olarak kullanıldığı gösterilmiştir.**

4.1 Geçici Elektromanyetik Yöntemin Temel Kavramları

Geçici elektromanyetik yöntemin çalışma prensibi, yeryüzünde belli bir geometrik şekle sahip iletken bir tel üzerinden geçirilen akımın oluşturduğu birincil manyetik alanın yer içinde uyarttığı akımların zamanla sönümlenmesinden kaynaklanan ikincil manyetik alanların, yine yeryüzünde bulunan uygun bir alıcı kullanılarak ölçülmesine dayanmaktadır. Tipik bir TEM yöntemi dizilimi bir verici halkadan ve bir alıcı bobinden oluşmaktadır. Çalışmanın amacına ve bölgenin jeolojisine bağlı olarak seçilen farklı dizilim tipleri mevcuttur (Şekil 4.1). Bir güç kaynağından üretilen çok kuvvetli bir akım (1-10 A) yer üzerinde serili ve genellikle kare şeklinde olan bir verici halkaya gönderilir. Verici halka üzerine belirli bir akım uygulandığında, halka üzerindeki akım miktarı hemen en yüksek değerine ulaşamaz.

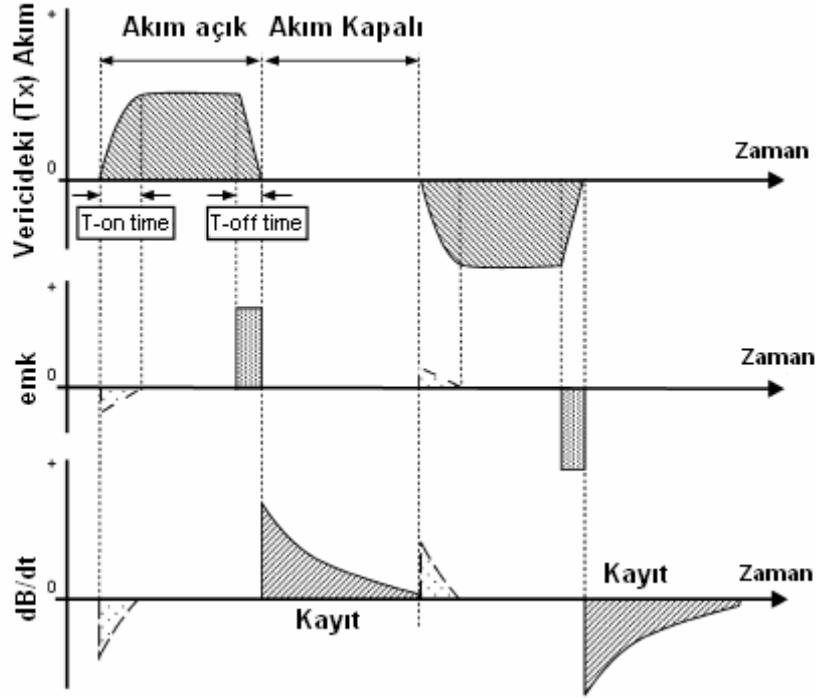
Aynı şekilde vericideki akımın aniden kesilmesiyle halka üzerindeki akım miktarı hemen sıfır değerine ulaşmaz. Akımın kesilme anı ile sıfır değerine ulaşması arasında geçen süreye yokuş zamanı (ramp time - turn off time) denir (Şekil 4.2). Vericideki akım değiştirilmiş (modified) simetrik bir kare dalga biçimindedir. Belirli zaman aralıklarıyla (periyotla) kesilen akım bir süre için sıfıra düşürülmekte ve hemen bundan sonra ters yönde akmaya başlamaktadır. Faraday yasasına göre verici halkadaki akımın aniden kesilerek sıfıra düşürülmesiyle birincil manyetik alanda



Şekil 4.1 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), (Tx: Verici (Transmitter), Rx: Alıcı (receiver)).

meydana gelen değişimler yer içindeki iletkenler üstünde bir elektromotor kuvvetin (emk) uyartılmasına neden olur. Bu uyartım akımları kendilerini oluşturan verici halkanın hemen yakınında verici kaynağın geometrisi ile aşağı ve yanlara doğru genişleyerek yayınırlar (Şekil 4.3). Akımın aniden kesilmesiyle oluşan elektromotor kuvvetin (emk) büyüklüğü iletken yapı üstündeki birincil manyetik alanın zamanla değişme miktarıyla orantılıdır. Bu yüzden pratikte vericideki yüksek miktardaki akımın kısa bir süre içinde sıfıra değerine düşürülüp kısa süreli büyük bir emk oluşturulması arzu edilir. Oluşturulan bu emk kuvvet iletken içinde, iletkenin biçimine boyutuna ve iletkenliğine bağlı olarak sönmümlenme özelliğine sahip uyartım akımlarının (Eddy currents) akmasına neden olur. Sönmümlenen akımlar, zamana bağlı değişme oranı alıcı bobin tarafından ölçülen ikincil manyetik alanı oluştururlar. İkincil manyetik alanın düşey bileşeninin zamana göre türevi, zamanın fonksiyonu

olarak ölçülen TEM yönteminde, alıcı halkada oluşan gerilim değerleri, kullanılan alıcı – verici

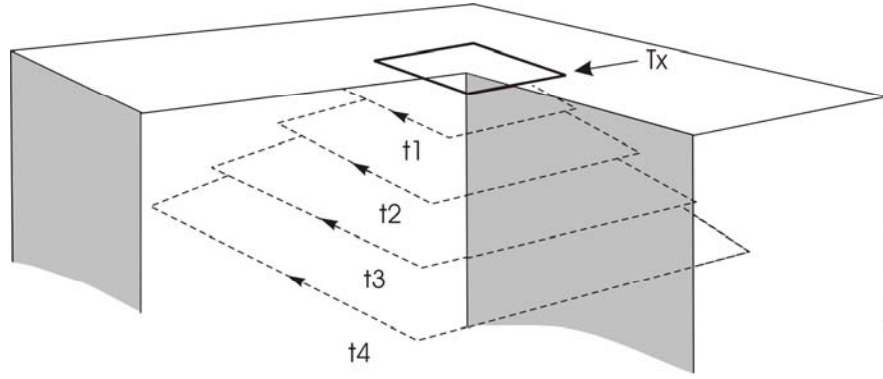


Şekil 4.2 TEM çalışma prensibi: Vericideki akım (üstte); uyartılmış elektromotor kuvvet (ortada); kaydedilen gerilim (altta) (Krivochieva ve Chouteau, 2002).

halkaların alanları ve birincil alanları oluşturan akımın büyüklüğü ile normalize edildiğinde, ikincil alanların içinde oluştukları ortamın özellikleri belirlenebilir. Alıcıda kaydedilen gerilimin (voltajın) bozunma (distortion) özellikleri, her biri sönümlenen (decaying) gerilimin büyüklüğünü ölçen ve kaydeden belirli sayıdaki zaman penceresi tarafından belirlenir. Ölçüdeki bozulmayı en aza indirmek için akımın zaman ile hızla değiştiği bölgede yer alan pencerelere erken zaman pencereleri denir ve bu pencereler çok dar bir yapıya sahipken sonraki pencereler akımın sönümlenmesi küçüldüğü için daha geniştir (Şekil 4.4). Bunun amacı sinyal/gürültü oranını arttırmaktır.

4.2 Görünür Özdirencin Hesaplanması

Alıcı bobinde ölçülen gerilim değerleri, akım yoğunluğunun büyüklüğü ve dağılımının yerin özdirencine bağlı olarak değişmesi nedeniyle yerelektrik yapısı hakkında bilgi vermektedirler.



Şekil 4.3 Akımın kesilmesinden sonra uyartım akımlarının ilerleyen zamanla birlikte yer içindeki yayılımı (McNeill, 1990).

Ölçülen gerilim değeri genellikle zamanın ve iletkenliğin matematiksel olarak karmaşık bir fonksiyondur. İletkenliği σ olan homojen yarı sonsuz bir ortamın gerilimi,

$$V = \frac{mI}{\sigma a^3} \left[3\text{erf}(\theta a) - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \theta a (3 + 2\theta^2 a^2) e^{-\theta^2 a^2} \right] \quad (4.1)$$

şekilde verilmektedir (Spies ve Eggers, 1986). Burada $\theta = (\mu_0 \sigma / 4t)^{1/2}$, e eşittir. μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliğini, m alıcı halkanın efektif alanını, a verici halkanın yarıçapını, erf hata fonksiyonunu ve I akımı göstermektedir. Ölçülen gerilim (voltaj) değerlerinin zamana karşı çizdirilmesiyle oluşturulan eğri erken zaman ve geç zaman olmak üzere iki bölümde incelenebilir (Şekil 4.5). Erken zaman olarak adlandırılan kısımda, uyartılan gerilim zamanla değişmemekte ve yeryüzünün yüzeye yakın kesimlerinin öz direnci ile orantılıdır. Erken zaman gerilim bağıntısı,

$$V^e = \frac{3mI}{\sigma a^3} \quad (4.2)$$

olarak verilmektedir. Geç zaman olarak adlandırılan kısımda ise ilerleyen zamanla birlikte akım yoğunluğunun maksimum olduğu kısım derinlere doğru yayılmakta, gerilim değerleri zamanın ($t^{5/2}$) ve en alttaki tabakanın öz direncine ($\rho^{3/2}$) orantılı olarak değişmektedir. Bununla birlikte geç zaman olarak belirtilen kısım için matematik işlemleri oldukça basitleşmekte ve voltaj değerlerinin zamanla değişimi

$$V^g = \frac{I\sigma^{3/2}\mu^{5/2}ma^2}{20\sqrt{\pi}t^{5/2}} \quad (4.3)$$

bağıntısı ile verilmektedir. Zamanın fonksiyonu olarak çizdirilen gerilim eğrileri yerelektrik yapısı ile ilgili bilgiler içersede bu eğrilerin yorumlanması güçtür. Bu nedenle ölçülen gerilim değerlerinin görünür öz direnç değerlerine çevrilmesi yorumlamada kolaylık sağlamaktadır. İletkenlik ile görünür öz direnç değerleri arasında $\rho=1/\sigma$ gibi bir ilişki vardır. Buna göre 4.2 ve 4.3 ile verilen denklemlerden görünür öz direnç ifadeleri çekilip yeniden düzenlenirse

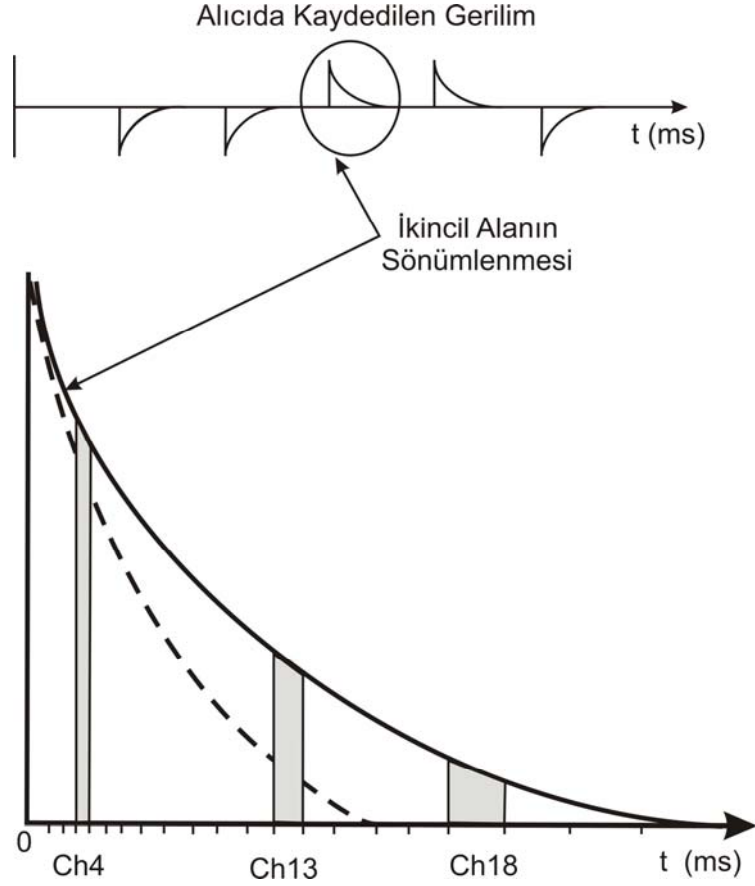
$$\rho_a^e = \frac{a^3V}{3mI} \quad (4.4)$$

$$\rho_a^g = \frac{I^{2/3}a^{4/3}m^{2/3}\mu_0^{5/3}}{20^{2/3}\pi^{1/3}t^{5/3}V^{2/3}} \quad (4.5)$$

asimtotik öz direnç denklemleri sırasıyla erken zaman (4.4) ve geç zaman (4.5) için bulunmuş olur (Spies ve Eggers, 1986).

4.3 Yokuş zamanı ve Araştırma Derinliği

Geçici elektromanyetik yöntemde, verici halkadaki akımın kesilmesi ile sıfır değerine inmesi arasında geçen zaman yokuş zamanı olarak tanımlanmaktadır. Bu zaman dilimi boyunca ortamda birincil alanlar tamamen kaybolmamakta ve ikincil manyetik alanlar ile birlikte bulunmaktadır. TEM yönteminde, ölçülen veriler yokuş zamanını da içermesine rağmen değerlendirme aşamasında veriler ayıklanarak, yalnız gerilim değerlerinin düzenli olarak azaldığı sadece ikincil alanlarından kaynaklanan verilerin oluşturduğu kısım (yokuş zamanı sonrası) kullanılmaktadır. Bu nedenle özellikle sığ derinliklerin araştırılmasında yokuş zamanının kısa tutulması istenir. Bunun için bu süreci kontrol eden verici halka indüktansı, verici halkadaki gerilim değeri ve uygulanan akım gibi parametreler değiştirilerek istenilen derinlikle ilgili bilgiler elde edilmeye çalışılır.



Şekil 4.4 TEM yönteminde verilerin kaydedildiği zaman pencerelerinin konumları.

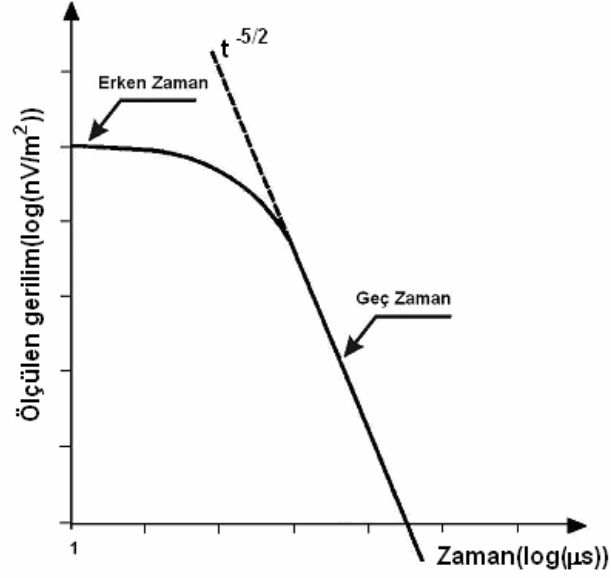
TEM yönteminde geçici elektrik alanın uzanacağı en büyük difüzyon derinliği doğrudan doğruya ortamın özdirenci, verici halkaya uygulanan akımın büyüklüğü ve sinyalin güvenilir olarak kaydedilebildiği (V/I) en büyük zaman (t) değeri ile değişmektedir. Verici halkadaki akımın büyüklüğü kullanılan cihazın özelliklerine göre değişmektedir ve belirli bir değerle sınırlıdır. Bu nedenle verici halkanın çapının büyütülmesi ile araştırma derinliği kontrol edilebilir. Buna göre genel bir yaklaşımla, bir kenarının uzunluğu L olan bir verici halka için güvenilir araştırma derinliği (h) aralığı $h_{min} > L/10$ ve $h_{max} < 3L$ arasındadır (Ranieri, 2000).

Geçici elektromanyetik veriler üzerinden hızlı bir yorum yapabilme amacıyla aşağıdaki derinlik bağıntıları kullanılabilir (Meju, 1995):

$$\delta_T = \left(\frac{2t\rho}{\mu_0} \right)^{1/2} \quad (4.6)$$

$$\delta_{eff}^{TEM} = \frac{\delta_T}{2.3} \quad (4.7)$$

Burada δ_T özdirence ve gecikme zamanına bağlı nüfuz derinliğidir. Ancak uygulamada bu derinliğe pratik olarak ulaşmak zordur. Bu nedenle δ_{eff} ifadesi etkin derinliği göstererek daha iyi bir yaklaşım yapılmasını ve hızlı bir yoruma gidilmesini kolaylaştırmaktadır. Bu tez içinde kullanılan TEM verileri için yaklaşık derinlik ifadesi (4.7) bağıntısı kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.5 Vericide kaydedilen gerilim eğrisinin zamanın fonksiyonu olarak çizilmesi.

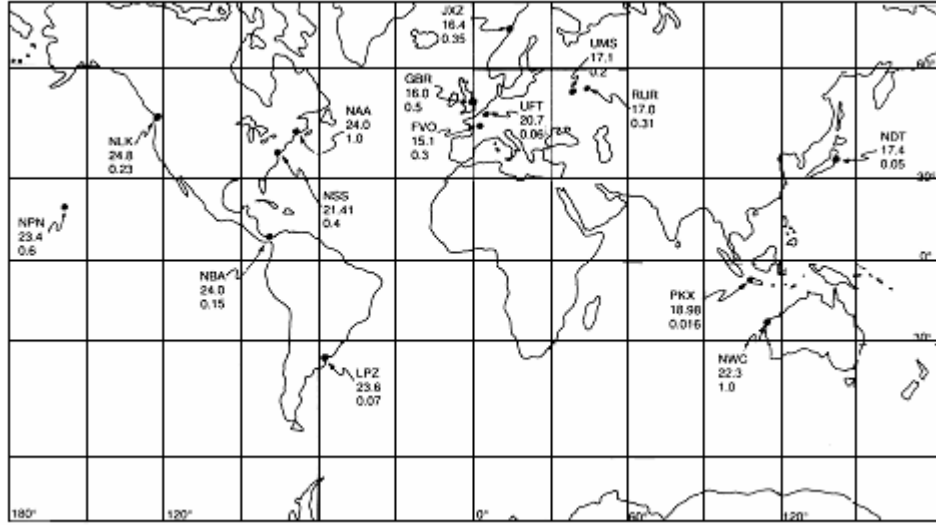
5. ÇOK ALÇAK FREKANS ELEKTROMANYETİK YÖNTEM

VLF yöntemi jeofizikte uzun yıllardır iyi elektriksel iletkenliğe sahip yapıların araştırılmasında kullanılan indüktif elektromanyetik yöntemlerden biridir. Bu yöntem VLF radyo vericilerinin oluşturduğu elektrik ve manyetik alanlardan yararlanmaktadır. Bu istasyonlar 15-30 kHz arasında değişen frekanslarda yayın yapan ve ilk olarak 1910-1920'li yıllar arasında sömürge güçlerinin uzak yerlerdeki işgal noktalarına mesaj yollamak amacıyla kurdukları istasyonlardır. Normal radyo yayınlarına bakıldığında oldukça düşük frekansa sahip oldukları için çok alçak frekanslı elektromanyetik yöntem (Very Low Frequency Electromagnetic Method – VLF-EM) adı verilmiştir. Bu düşük frekanslı sinyaller yer ile iyonosfer arasında hareket ederler ve tek yönlü olarak güvenilir bir iletişim sağlarlar. İlk olarak 1963 yılında Paal(1965)'in VLF frekanslarındaki radyo dalgalarının iletken mineral cevherlerinin araştırılmasında kullanılabileceğini tespit etmesinin ardından VLF vericileri sığ jeolojik yapıların haritalanmasında elektromanyetik kaynak olarak sıkça kullanılmaya başlamıştır.

VLF-Elektromanyetik vericileri dünyanın çeşitli yerlerinde konumlanmışlardır (Şekil 5.1). Kullanılan vericilerin listesi ve özellikleri Tablo 5.1' de verilmiştir. Bu vericiler 50-150 metre boyunda ve 100-1000 kW gücünde dikey antenlerdir. Bu istasyonlar düşey bir elektrik dipol olarak kabul edilirse bu istasyonlardan yayılan elektromanyetik dalga yayılım doğrultusuna dik bir elektrik alan (E_z) ve yatay bir manyetik alandan (H_x) oluşan bileşenlere sahiptir (Şekil 5.2). Vericiden serbest uzaydaki birkaç dalga boyu kadar uzaklıkta, bölgesel elektromanyetik alan bileşenleri düşey gelen düzlem dalgalar olarak kabul edilirler. Yeryüzünün sonlu iletkenliği ile olan etkileşiminden dolayı birincil yanal manyetik alan, yayılma yönünde yanal bir elektrik alan üretir. Homojen olmayan bir ortamda herhangi bir elektriksel iletkenlik değişimi için doğrultusu düzlem dalganın doğrultusuna dik olmayan düşey bir manyetik bileşen üretilir. Bu tepki farklı tür jeolojik yapıların araştırılmasında güçlü bir araçtır (Fischer et. al. 1983).

Tablo 5.1 VLF Verici İstasyonları Listesi (McNeill ve Labson, 1988)

Tanım	Frekans (kHz)	Güç (kw)	Bulunduğu Yer
FUO	15.1	500	Bordeaux, FRANCE
GBR	16.0	750	Rugby, ENGLAND
JXZ	16.4	350	Helgeland, NORWAY
UMS	18.3	1000	Moscow, USSR
NOT	17.4	200	Yosami, JAPAN
NSS	21.4	1000	Annapolis, MD
NWC	22.3	1000	Exmouth, AUSTRALIA
NPM	23.4	512	Pearl Harbour, HAWAİ
NAA	24.0	1000	HICutler, WA
NAU	28.5	100	Aguada, PR



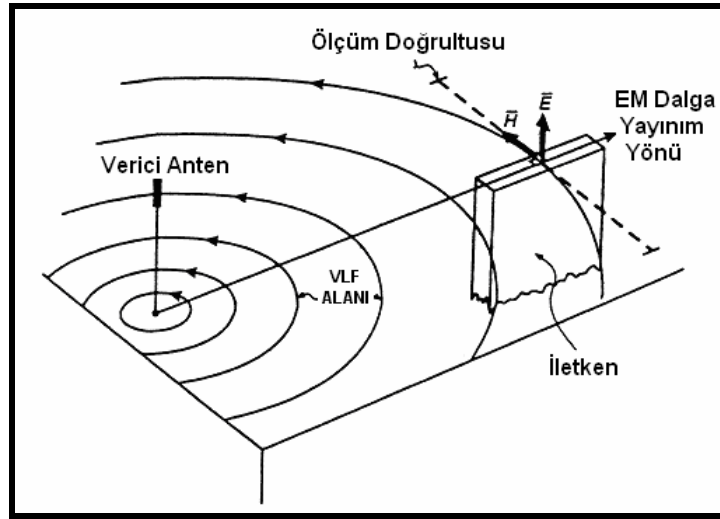
Şekil 5.1 Yeryüzündeki VLF Vericilerinin Dağılımı(Milsom, 1996)

VLF-Elektromanyetik yöntemi bugüne kadar bir çok araştırmacı tarafından çok çeşitli problemler için uygulama alanı bularak, kırık ve çatlaklar ile kesme bölgeleri içerisinde biriken yer altı suyu araştırmalarında (Palacky ve diğ., 1981; McNeill, 1990), karstik boşlukların aranmasında (Guerin and Benderitter, 1995), jeolojik haritalamalarda (McNeill and Labson, 1991), yeraltısuyu kirliliği araştırmalarında (Benson et al., 1997;

Karlık and Kaya, 2001) kullanılmıştır. Uygulamada oldukça hızlı, kolay ve ucuz bir yöntem olduğu için birçok araştırmada ön çalışmalar arasında yer almaktadır.

5.1 VLF-Elektromanyetik Kuram

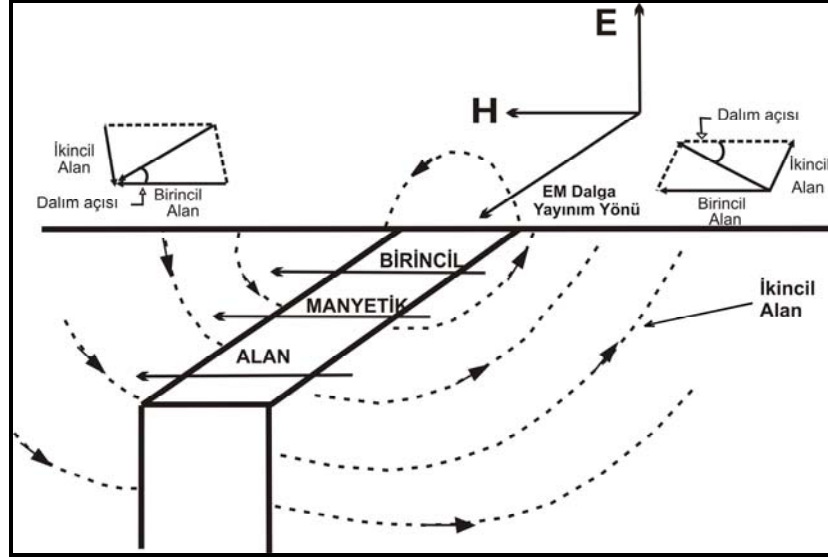
VLF kuramına göre anomalilerin iyi iletkenler içinde indüklenen elektrik akımlarından kaynaklandığı farzedilir. Bir radyo vericisinden yayılan birincil elektromanyetik alan (Şekil 5.2) yeryüzü ile iyonosferin alt katmanı arasında yayılma ve yansımadan sonra yer içinde yayınarak alıcı olarak düzenlenmiş bobine ulaşır.



Şekil 5.2 VLF vericisinin oluşturduğu birincil alan ve iletken yapının konumu.

Yeraltı homojen ise alıcıya ulaşan dalgaların özelliklerinde herhangi bir değişim olmaz. Ancak yeraltında iletken bir yapı varsa yayılan değişken manyetik alan bu iletken kütle üzerinde Eddy (girdap) akımları olarak bilinen değişken bir elektrik alan indükleyecektir. Bu Eddy akımları da iletken kütleden etrafa yayılan kendi ikincil elektromanyetik alanını üretir (Şekil 5.3). Bu durumda alıcıya ulaşan birincil alana bu ikincil alanda eklenir ve başlangıçta üretilen elektromanyetik dalganın özelliklerinden daha farklı genlik ve faza sahip bir toplam dalga algılanır. Gönderilen ve algılanan elektromanyetik dalgalar arasında bu türden bir fark yerin içinde bir iletkenin varlığını gösterir ve geometrisine ilişkin bilgiler sağlar. İndüklenmiş akımlar ve ikincil manyetik alanlar verici antene karşı dizilmiş düşey iletken içinde çok kuvvetli iken, birincil alan dalga cephelerine paralel dizilmiş iletken yapı için çok güçsüzdür. Bu yüzden bir

bölgenin tam anlamıyla araştırılabilmesi için farklı yerlerdeki birkaç istasyona gerek duyulabilmektedir.



Şekil 5.3 Düşey iletken ve manyetik alan bileşenlerinin görünümü (Milsom, 1996)

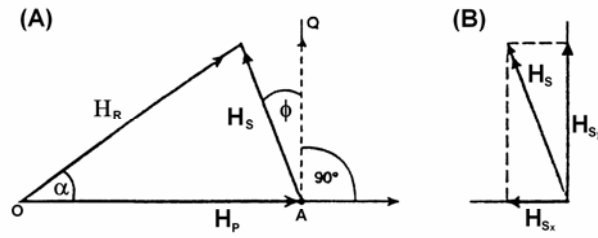
5.1.1 Faz Kayması Ve Eliptik Kutuplanma

Belli bir frekansa ($\omega/2\pi$) ve I_p şiddetine sahip bir alternatif akım, çevrede bir birincil manyetik alan H_p oluşturur. Birincil alan havada yayınarak doğrudan alıcıya ulaşır. Aynı şekilde birincil alan yer içinde de yayınır. Bu durumda yer bir devre gibi düşünülebilir. Yer içinde iletken bir yapı varsa yer bir ikincil elektromotor kuvvet (gerilim) üretir. Bu gerilimin frekansı kendini üreten akımın frekansıdır, ancak H_p alanını $\pi/2$ (90°) faz farkıyla izler. Birincil alan oluştuktan belli bir zaman sonra ikincil alan oluşur. Aradaki bu zaman farkına faz farkı (ϕ) denir. Fazdaki 90° gecikme fizik yasaları gereği, ϕ ise iletken yapıyı tanımlayan elektriksel değişirgenlerden (indüktans L ve öz direnç ρ) kaynaklanır. Eğer yeraltındaki yapı çok iyi bir iletken ise ($\rho \rightarrow 0$ ve $\phi \rightarrow \pi/2$), bu durumda ikincil alanın fazı birincil alanın fazından 180° geridedir. Eğer yapı kötü bir iletken ise ($\rho \rightarrow \infty$ ve $\phi \rightarrow 0$), bu durumda gecikme 90° olacaktır.

H_p verici antenden yayılan birincil manyetik alanı ve H_s ikincil manyetik alanı göstermek üzere; yatay yöndeki manyetik alan bileşeni H_x ve düşey yöndeki manyetik alan bileşeni H_z şu şekilde ifade edilir:

$$H_x = H_p \cos(\omega t) + H_s \cos(\omega t + \phi) \cos(\alpha) \quad (5.1)$$

$$H_z = H_s \cos(\omega t + \phi) \sin(\alpha) \quad (5.2)$$



Şekil 5.4: a) Birincil alan (H_p) ve ikincil alan (H_s) birleşiminden oluşan toplam alan (H_R) ve alanlar arasındaki faz kaymasını gösteren vektör diyagramı. b) ikincil manyetik alanın vektörel bileşenleri; (H_{sx}) akım, (H_{sy}) ikincil voltaj.

Burada ω açısal frekans değerini (radyan/sn), α toplam manyetik alanın yatay düzlem ile yaptığı açısı (radyan), ϕ birincil ve ikincil alanlar arasındaki faz açısını ifade etmektedir. Koordinat sistemi üzerinde H_x ordinat üzerinde ve H_z apsis üzerinde olmak üzere, H_x H_z 'ye karşılık bağımsız değişken olan zamanın fonksiyonu olarak çizdirilirse sonuç bir elips olur (Şekil 5.5). Bu elipsin uzun eksenine a ve kısa eksenine b denilirse elipssellik $e=b/a$ olarak tanımlanır. Yeraltındaki yapıya ilişkin çok yüksek bir iletkenlik söz konusu ise elips düz bir çizgi olurken, elipsselliğin 1 olduğu durumda elips bir çember şeklini alır. Eğim (tilt) açısı H_x eksenine ile elipsin uzun eksenine arasındaki açısı (θ) denir. VLF-EM yönteminde en genel ölçülen büyüklükler, manyetik alanın düşey bileşeninin yatay bileşene oranı (H_z/H_x) olarak isimlendirilebilecek büyüklüğün gerçel ($\text{Re}(H_z/H_x)$) ve sanal ($\text{Im}(H_z/H_x)$) bileşenidir. Bu büyüklükler yüzde (%) cinsinden birimsiz olarak ölçülür ve bunların eğim açısı ve polarizasyon elipsinin elipsselliği ile olan ilişkisi

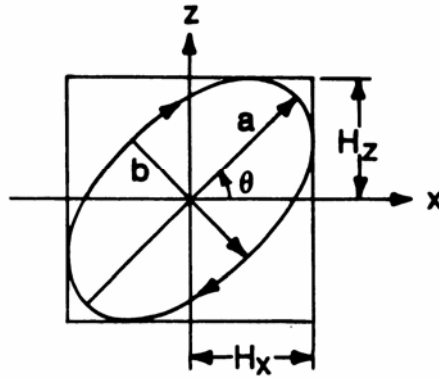
$$\tan(2\theta) = \frac{2(H_z / H_x) \cos \phi}{1 - (H_z / H_x)^2} \quad (5.3)$$

$$e = \frac{b}{a} = \frac{H_z H_x \sin \phi}{H_z e^{i\phi} \sin \theta + H_x \cos \theta} \quad (5.4)$$

$$\text{Re}(H_z/H_x) = 100 \times \tan \theta \quad (5.5)$$

$$\text{Im}(H_z/H_x) = 100 \times e \quad (5.6)$$

denklemleri ile verilmektedir (McNeill ve Labson, 1988).



Şekil 5.5 Polarizasyon elipsi parametreleri (McNeill and Labson, 1988).

5.2 VLF-Elektromanyetik Verilerinin Süzgeçlenmesi

VLF-EM yönteminde ölçülen veriler her bir profile karşılık grafik çizimi ve alansal verilerin konturlanması şeklinde gösterilir. Herhangi bir süzgeç uygulanmayan verilerin bu şekilde gösterimi ile ölçüm yapılan alana ilişkin doğrudan nitel bir yorum elde etmek mümkündür. Fraser (1969), manyetik polarizasyon elipsinin eğim açısı değerlerine uyguladığı süzgeç ile yatay bileşenleri hesaplamış ve veriyi pürüzsüz hale getirerek iletken yapılar üzerinde en yüksek değeri vermesini sağlamıştır. Fraser süzgeci uygulanan veride; normalde yorumlamaya yardımcı olmadığı ve resmi daha karmaşık gösterdiği için negatif değerler kontur haritasında gösterilmez. Bu filtre ile anomalilerin çözünürlüğü artmakta böylece onları tanımak kolaylaşmaktadır. Fraser süzgeci dalım açısı verisi üzerinde 90° faz kayması yaratır. Böylece geçiş noktaları ve bükülmeler

tepeciklere dönüştürülerek konturlanabilir değerler elde edilir. Fraser süzgeci DA (Doğru Akım) etkisini kaldırır ve uzun uzaysal dalga uzunluklarını bastırarak bölgesel anomalilerin çözünürlüklerini artırır.

VLF-EM verileri için uygulanabilecek bir başka sayısal süzgeç, Karous-Hjelt süzgecidir (Karous and Hjelt, 1983). Bu süzgeç ile aynı veri takımı farklı derinlikler için süzgeçlenerek eşdeğer bir akım yoğunluğunun derinlikle değişimi hakkında fikir elde edilebilir. Yüksek eşdeğer akım yoğunluğuna sahip bölgeler iyi iletken bir yapının olduğu alanları göstermektedir. Bu filtre ile iletkenin dalımı da tahmin edilebilmektedir. İletkenler üzerinde eş akım yoğunluğu dağılımının gerçel kısmı sadece pozitif değerler alır. İletkenin her iki yanında kalan negatif kısımlar genellikle süzgeçin uzunluğundan veya akım toplanması nedeniyle akım yoğunluğunun azalmasından kaynaklanır. Bununla birlikte akım dağılımının sanal bileşen kısmı daha karmaşıktır. Bazı durumlarda pozitif ve negatif akımlar hemen hemen eşit büyüklüktedir ve sonuçta toplam akım yoğunluğu neredeyse sıfırdır. Pozitif ve negatif akımların değişen oranı, toplanan ve indüklenen akımlar arasındaki orana bağlıdır. Lineer süzgeçler kullanılarak yapılan ters çözüm sabit bir derinlikteki eş akım yoğunluğu dağılımını tüm bir anomali profili için açıklar.

5.3 VLF-Elektromanyetik Yöntem Araştırma Derinliğinin Belirlenmesi

Verici antenden yayımlanan elektromanyetik dalganın yeryüzü üzerindeki herhangi bir noktadaki manyetik alan bileşeni değeri (H) ile gösterilirse ve düşey yönde ilerleyen elektromanyetik dalganın yeryüzüne ulaştığı bir $P(x,y,z)$ noktasındaki genlik değeri (H_M) ile gösterilirse elektromanyetik dalganın manyetik alan bileşeni;

$$H = H_M e^{i\omega t} e^{-(i\omega\mu\sigma)^{1/2} z} \quad (5.7)$$

olarak verilir. Bu denklemde $e^{i\omega t}$ dalganın zamana bağlı (sinüzoidal) hareketini ve $e^{-(i\omega\mu\sigma)^{1/2} z}$ terimi ise dalga enerjisinin genliğinin derinlikle azaldığını göstermektedir. Elektromanyetik dalga enerjisi uzaklıkla üstel olarak azalmaktadır. Enerjinin büyük bir kısmının kaybolduğu bir derinlikte dalganın sönümlendiği kabul edilir. Bu derinlik

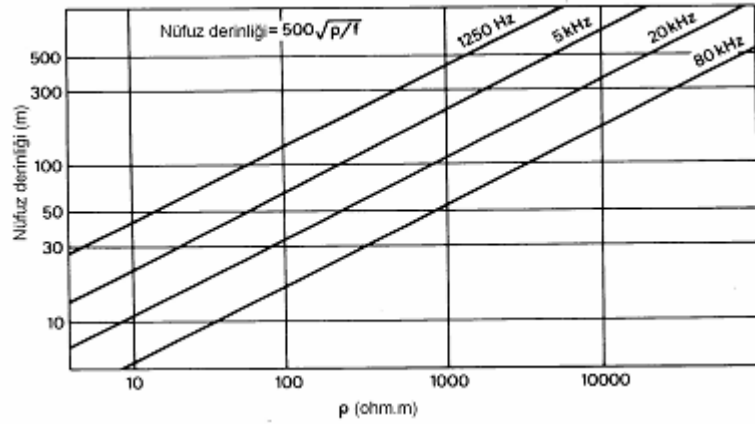
nüfuz derinliği olarak kabul edilir ve dalga genliğinin başlangıçtaki değerinin 1/e (%37) katına azaldığı derinlik olarak tanımlanır. Buna göre

$$H_M . e^{-kz} . e^{i\omega t} = H_M . e^{-1} . e^{i\omega t} \quad (5.7)$$

yazılırsa buradan $z=1/k$ için nüfuz derinliği

$$\delta = 503,2 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (5.8)$$

olarak hesaplanır. Nüfuz derinliği dalganın frekansına ve ortamın özdirencine bağlı olarak değişir. Değişik frekans ve özdirenç değerlerine göre nüfuz derinliğinin değişimi Şekil 5.6 da görülmektedir.



Şekil 5.6 Nüfuz derinliğinin frekansa ve özdirence bağlı değişimi (Milsom, 1996).

6. İSTANBUL-TUZLA İÇMELER BÖLGESİNDE TUZLU SU YAYILIMININ JEOFİZİK YÖNTEMLERLE ARAŞTIRILMASI

Doğal kaynaklar üzerindeki etkiler, son yıllarda artan nüfusun barınak, altyapı ve yeraltı sularına olan ihtiyaçlarına paralel olarak gün geçtikçe artmakta ve artmaya da devam etmektedir. Özellikle kıyı bölgelerinde yeraltı suyunun aşırı miktarda tüketilmesiyle, tuzlu su karaya doğru ilerleyerek tatlı su akiferlerine karışmakta ve yeraltı suyunun kalitesinin bozulmasına neden olarak önemli bir çevre problemi oluşturmaktadır. Oluşan kirliliğin çevre üzerindeki etkisinin belirlenmesi ve çevrenin korunması amacıyla ayrıntılı jeolojik, hidrojeolojik ve jeofizik bilgilere ihtiyaç duyulmaktadır. Tuzlu su içerdiği iyonlar nedeniyle yeraltı suyunun ve içine girdiği kayaçların öz direncini düşürmekte ve aynı jeolojik birim içinde bir elektrik sınır oluşturmaktadır. Bu nedenle jeofizik yöntemler arasında elektrik ve elektromanyetik yöntemler bu problemin araştırılmasında etkin olarak kullanılmaktadır (Yang ve diğ., 1999; Nowroozi, 1999; Yuhr ve Benson, 1995).

Çalışma alanı olarak seçilen Tuzla İçmeleri İstanbul Tuzla ilçesinde yer almaktadır. İlçe, Marmara Bölgesinde Kocaeli Yarımadası'nın güneybatısında yer alır. İstanbul'un Anadolu yakasındaki en uzak noktasıdır. Kuzey Batısında Pendik İlçesi, doğusunda Gebze İlçesi, güneyinde Marmara Denizi bulunur (Şekil 6.1). Tuzla İçmeleri, Büyük İçme ve Küçük İçme isimli bölgelerde yer alan doğal kaynaklarıyla uzun yıllardır yeraltı suyu temininde kullanılmaktadır. Tuzla bölgesinde yapılaşmanın ve nüfusun artmasıyla birlikte tatlı su kaynaklarına duyulan ihtiyaç açılan çeşitli kuyularla yeraltı sularından sağlanmaya başlamıştır. Tuzla İçmeleri bu yapılaşmadan payını almış ve bugün tamamen yerleşim alanı içinde kalmıştır. Bu durum yeraltı sularının kirlenmesine neden olmaktadır. Özellikle Tuzla İçmelerinin tesisleşmesinden ve İçmeler Otelinin açılmasından sonra, ilk başlarda sağlık sorunlarının tedavi edilmesi amacıyla kullanılan bu sular daha sonraları farklı amaçlar (temizlik, bahçe sulama vb.) içinde kullanılmaya başlamıştır. Bu nedenle zamanla kaynaklardan çıkan sular yetersiz kalmış ve ihtiyacı karşılamamaya başlamıştır. Artan talep bölgede açılan sondaj kuyuları ile giderilmeye çalışılmıştır.

İnceleme alanında yeralan bu kaynak ve kuyulardan bilinçsizce ve aşırı miktarda su çekilmesi, tatlı yeraltı suyunun bölgeye akışını hızlandırmakta ve çok eski zamanlardan beri tuzlu bir yapıya sahip olduğu bilinen bu suların kimyasal özelliklerinin değişmesine neden olmaktadır. Özellikle kıyı akiferlerinde yeraltı suyu işletmesi planlanırken, denize boşalımın belli bir kısmının işletme halinde de boşalmaya devam etmesinin sağlanması gerekmektedir.



Şekil 6.1 Çalışma alanı yer bulduru haritası

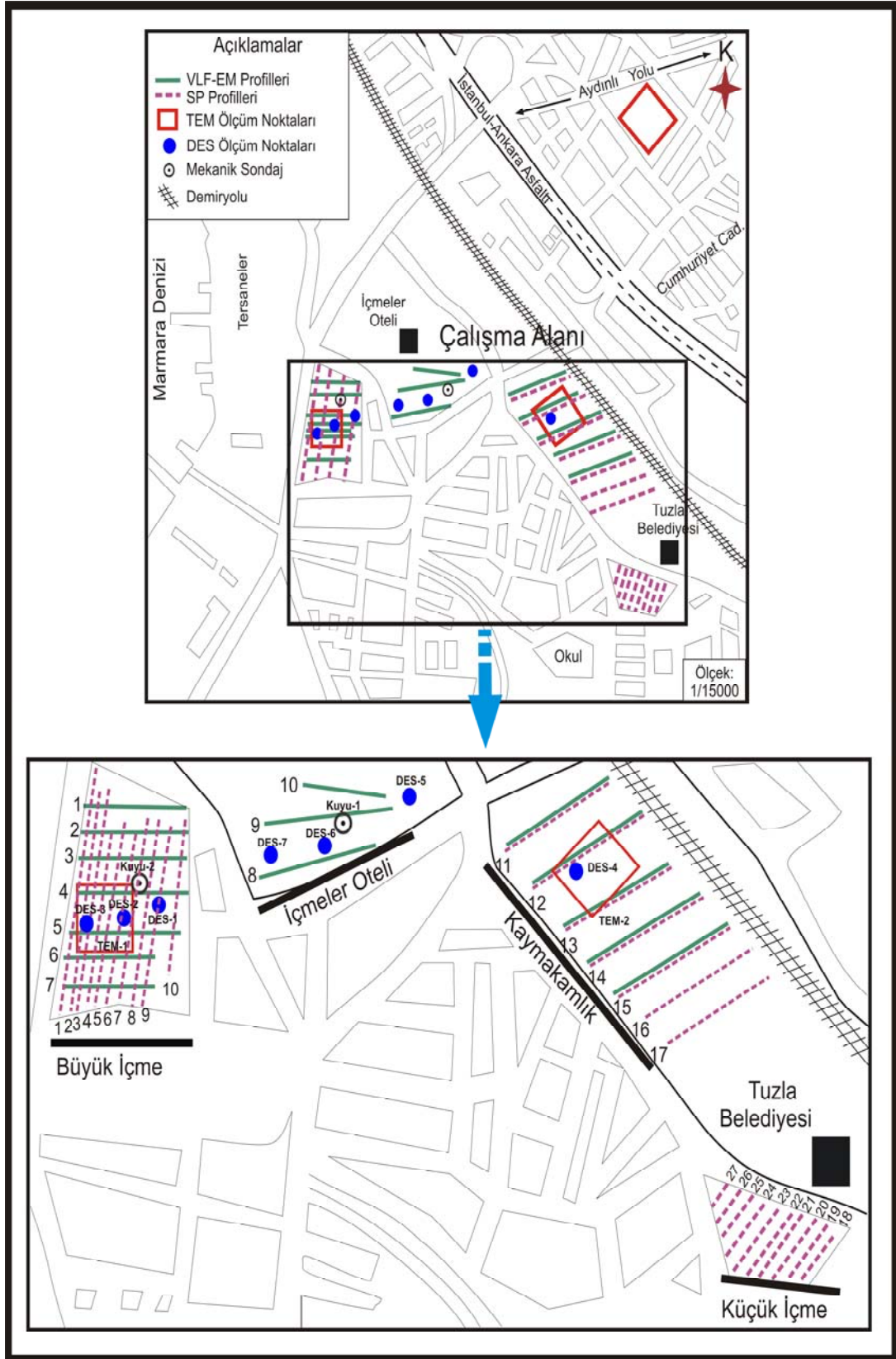
Yeraltını oluşturan jeolojik birimlerin öz dirençleri geniş bir aralık içinde değişmektedir. Özellikle magmatik ve metamorfik kayalar yüksek öz direnç değerleri gösterirken, sedimenter kayalar daha düşük öz direnç değerlerine sahiptirler. Magmatik ve metamorfik kayalarda öz direnç değerleri kaya yapısındaki çatlaklara ve bu çatlakların suyla dolma yüzdesine bağlı olarak değişirken, sedimenter kayalarda ise aynı zamanda gözenekliliğe (poroziteye) bağlı olarak değişim göstermektedir. Bununla birlikte ıslak zeminler ve taze yeraltı suyu da düşük öz direnç değerlerine sahiptir. Örneğin killi zeminler normalde kumlu zeminlere oranla daha düşük öz direnç değerleri gösterirler. Jeolojik birimlerdeki bu öz direnç farklılığı ve birimlerin öz direncinin geniş bir aralık içinde değişmesi porozite, suya doygunluk ve içerdiği çözünmüş tuzların miktarı gibi bir çok unsura

bağlıdır. Ayrıca yeraltı sularının öz direnci içerdikleri tuz miktarına bağlı olarak 10 ile 100 ohm.m arasında değişim göstermektedir. Deniz suyu ise 0.2 ohm.m gibi oldukça düşük bir öz direnç değerine sahiptir (Loke, 2000). Her ne kadar öz direnç değerleri geniş bir aralıkta değişiyor olsa da jeolojisi hakkında bilgi sahibi olunan bir bölge için öz direncin jeolojik birimlerle olan ilgisi ortaya konulabilmektedir. Bu nedenle jeofizik araştırmalar sonucunda elde edilen bilgiler, jeolojik ve hidrojeolojik çalışmalarla elde edilen bilgilerle karşılaştırılarak öz direnç, jeolojik birimler ve hidrojeolojik yapı arasında bir ilişki kurulabilir.

Bu çalışma kapsamında Tuzla İçmeler bölgesinde tuzlu suyun yayılımının araştırılması amacıyla düşey elektrik sondaj (DES), doğal gerilim (SP), çok alçak frekanslı elektromanyetik yöntem (VLF-EM) ve geçici elektromanyetik yöntem (TEM) ölçümleri uygulanmıştır. Tuzla İçmelerde ölçümler tuzlu su girişim sınırının belirlenmesi amacıyla deniz kıyısından karaya doğru uzanan Doğu-Batı yönlü profiller boyunca alınmıştır (Şekil 6.2). Çalışma alanının çok yoğun bir yerleşime sahip olması nedeniyle, ölçümler mümkün olduğu derecede profil doğrultusu boyunca boş bulunan alanlarda alınmıştır. Bu bölümde, bölgede yapılmış olan jeolojik ve hidrojeolojik çalışmalardan elde edilen bilgiler bu çalışma kapsamında yapılan jeofizik ölçülerin değerlendirilmesiyle elde edilen bilgilerle ilişkilendirilmiş ve topluca değerlendirilmiştir.

6.1 Tuzlu Su Girişimi: Problemin Tanımı

Yeraltı sularının toplandığı akiferlerdeki yeraltı su tablası genellikle topografyaya bağlı bir hidrolik eğimle denize ulaşmaktadır. Ancak denize yakın akiferlerde yeraltından fazla miktarda ve devamlı olarak su çekilmesi ile karadan denize doğru olan hidrolik eğim yön değiştirmekte, deniz suları akiferlere doğru kilometrelerce sokulmaktadır. Bu sorunun kontrol edilmesindeki en önemli unsur, kuyulardan çekilen su miktarı ile havzayı besleyen su miktarı arasındaki dengedir. Tatlı su ile tuzlu su arasındaki denge Ghyben-Herzberg bağıntısı ile tanımlanmaktadır. Bu bağıntı, tatlı yeraltı suyu ile tuzlu su arasında bir yüzey boyunca (girişim yüzeyi) yoğunluk farkından ileri gelen statik bir dengenin varlığına dayanmaktadır. Bu bağıntıya göre serbest bir kıyı akiferi içindeki tatlı su - tuzlu su ilişkisi Şekil 6.3'de verilmektedir. Burada A ve B noktasındaki hidrostatik basınçların eşit olduğu



Şekil 6.2 Çalışma alanındaki jeofizik profillerin ve istasyonların lokasyon haritası

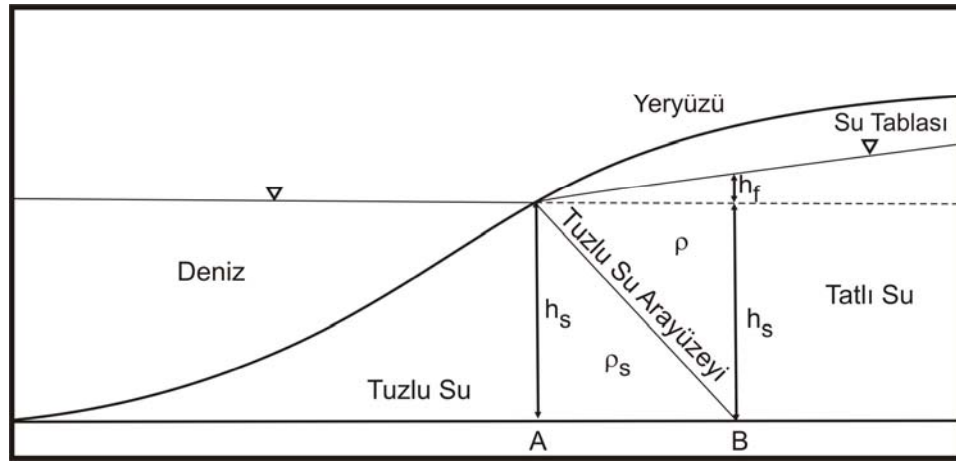
kabulüyle Ghyben-Herzberg bağıntısı;

$$h_s = \frac{\rho_f}{\rho_s \rho_f} h_f \quad (6.1)$$

şeklinde verilmektedir. Tatlı suyun yoğunluğu $\rho_f = 1 \text{ gr/cm}^3$ ve deniz suyunun ortalama yoğunluğu $\rho_s = 1.025 \text{ gr/cm}^3$ olarak alınırsa;

$$h_s = 40h_f \quad (6.2)$$

bulunur. Buna göre, bir kıyı akiferindeki herhangi bir noktada su tablasının deniz seviyesinden itibaren yüksekliği 1 metre düşürülürse tuzlu su girişi 40 metre yükselecektir (Erguvanlı ve Yüzer 1985).



Şekil 6.3 Ghyben-Herzberg bağıntısına göre tuzlu su ara yüzeyinin gösterilmesi (Erguvanlı, 1985).

6.2 Tuzla İçmeler Bölgesi Jeolojisi

İnceleme alanının jeolojisi ile ilgili bilgiler Barut (1993)'den derlenmiştir. İnceleme alanının jeolojisi oluşturan jeolojik birimler yaşıdan gence doğru Dolayoba Formasyonu, Sedefadası Formasyonu, İstinye Formasyonu, Kaynarca Formasyonu, Kartal Formasyonu, Belgrad Formasyonu ve Alüvyon olarak sıralanmaktadır. Tuzla İçmeler ve Çevresi genelleştirilmiş stratigrafik kesiti Şekil 6.4'de verilmektedir.

Devoniyen yaşlı Dolayoba Formasyonu, Aydınli Formasyonu üzerine uyumlu olarak gelmektedir. Üstten, laminalı, ince katmanlı ve pembe kireçli şeyllerle aralanmış Sedefadası Formasyonu ile örtülmüştür. İleri derecede rekristalize olmuş kireçtaşlarından oluşmuştur. Birim bazı yerlerde yama resifleri içerirken, bazı yerlerde de dolomitleşmiş olarak gözlenmektedir. Birim altta karbonatlı şeyllerle

başlayıp, üste doğru karbonat miktarı artarak kireçtaşlarına geçmiştir ve yer yer erime boşluklu karstik özellik göstermektedir.

Üst Sistem	Sistem	Alt Sistem Serisi	Kat	Formasyon	Simge	Kalınlık(m)	Litoloji
Paleozoyik	Senozoyik	Kuvaterner		Alüvyon	Q_{al}	0-10	Alüvyon
				Belgrad Form.	N_p	±5-50	Tabakasız, sarı, çimentosuz, fosilsiz
	Devoniyen	Alt Devoniyen	Emisyon	Kartal Formasyonu	D_{kr}	± 200-400	Grovak, Kireçtaşı Şeyl: Kahve ve koyu kahve, üst düzeyleri ince katmanlı bol fosilli
			Sigeniyen	Kaynarca Formasyonu	D_k	± 100	Yumrulu Kireçtaşı: Mavimsi gri, yeşilimsi gri, üst düzeyleri orta, alt düzeyleri kalın katmanlı, bol crlnold'li
			Jediniyen	İstinye Formasyonu	D_i	± 100	Kireçtaşı: Gri, mavi, ince sparit damarlı, fosilli
			Sedefad Form.	Sedefad Form.	D_s	± 50	Laminalı Kireçtaşı: Koyu gri, mavi, kırmızı, laminalı fosilsiz
	Siluriyen	Üst Siluriyen	Venlokiyen Ludloviyen	Dolayoba Formasyonu	S_d	± 150	Kireçtaşı: koyu gri, mavi, üst düzeyleri orta, alt düzeyleri kalın katmanlı, kalsli dolgulu, az fosilli

Şekil 6.4 Çalışma alanı geliştirilmiş stratigrafik kesiti (Barut, 1993'den yeniden çizilmiştir.)

Sedefadası Formasyonu inceleme alanında Küçük Mal Dağ eteklerinde tren yolu kenarında gözlenmektedir. Bu birim, genellikle aşınmış olarak bulunmaktadır. Kalınlığı yaklaşık 0-50 m arasında olduğu düşünülen devoniyen yaşlı birim,

Dolayoba Formasyonu üzerine uyumlu olarak çoğunlukla üzerine gelen birimle dereceli geçişlidir. Yanal olarak litolojisi belirgin değildir. Yerel karstik erimeli, lamine kireçtaşlarından oluşmaktadır. Birimde, mavi-siyah kireç, çamurtaşları ile şeyl ardalanması görülmektedir. Kireçtaşı düzeyleri tümüyle paralel laminalıdır. Şeylli düzeyler ise paralel, bazen de çapraz laminalıdır. Laminaların kalınlığı çoğunlukla 1-2 mm, bazı kısımlarda ise 7-8 mm'ye çıktığı görülmektedir.

Bölgede İstinye Formasyonu, Çakaldere sırtlarında, İçmeler, Tuzla istasyonu boyunca yüzeylenmektedir. Sedefada Formasyonu üzerinde uyumlu ve dereceli geçişli bulunmaktadır. Üstten Kaynarca Formasyonunun iri yumrulu kireçtaşları ile örtülmüştür. Yanal olarak geniş yayılım göstermektedir. Birim, siyah-mavi lamine kireçtaşı-şeyl, spart damarlı ve iri yumrulu kireçtaşlarından oluşmaktadır. Alt kısımlarda, ince katmanlı düzeyleri çok ince pembe şeyller ile ardalanmalıdır. Orta düzeyleri çapraz laminalı, üst düzeylere doğru kalın katmanlıdır. Birimde, yerel olarak karstik boşluklar, çatlaklı kalsit dolgular bulunmaktadır.

İnceleme alanında Kaynarca Formasyonu Sakız Tepe, Tuzla içmelerinde yüzeylenir. Tuzla İçmelerinin doğusunda kalınlığı 40-50 m arasında değişir. Altta ve üstte bulunan birimlerle uyumlu ve geçişlidir. Birimin alt düzeyleri grimsi mavi üstte doğru yeşilimsi gridir. Genellikle iri yumruludur. Killi kireçtaşları içinde, kireçtaşı oluşumları şeklinde gözlenen yumruların boyları birimin üst kısımlarına doğru uzar. Siyeniye yaşı birimin alt ara düzeyleri, yumrulu kireçtaşlarından oluşmuştur. Birimde karstik boşluklar bulunmaktadır.

Kartal Formasyonu, inceleme alanında Tuzla İçmelerinin güneydoğusundan başlayarak güneye doğru Kafkalı Tepe, Kanlımandıra Tepe ve eteklerinde yüzeylenmektedir. Kalınlığı yaklaşık olarak 100-400 m arasındadır. Birim, alttan Kaynarca Formasyonu üzerine uyumlu ve geçişli olarak gelmektedir. Üstten diskordans olarak Belgrad Formasyonu ile örtülmektedir. Birim altlarda grovak ve şeylden, orta kısımlarda kireçtaşı ara düzeyli, grovak şeyllerden, üstte doğru boz-kahve şeyllerden oluşmaktadır. Genellikle açık kahve ve koyu kahvedir. Birim içindeki grovaklar, yeşilimsi sarı, kahvedir. İnce kireçtaşı tabaka ve mercikleri ile ara katkılıdır. Tane boyu, üstte doğru küçülür ve yer yer şeyllere geçilir. Bazı düzeyleri kil dolguludur.

Belgrad Formasyonu inceleme alanında granit dokanağı boyunca kuzeyden güneye doğru, Büyük İçme tarafında ise güneydoğuya doğru geniş bir yayılım göstermektedir. Kalınlığı 0-50 m arasındadır. Kırmızı, sarı kil, kum ve çakıllardan oluşmuştur. Birim, yüzeylendiği çeşitli yerlerde ayrı litolojiyi göstermesine rağmen, tane boyları farklılık göstermektedir. Malzemesini Paleozoik arazilerden gelen arkoz, grovak kuvarsit, çört ve kireçtaşı parçaları oluşturmaktadır. Tane boyları, geldiği kaynak kayanın cinsine göre kil-silt, kum-çakıl ve seyrek olarak da blok boyutundadır. Birimde, tabana yakın kısımlarda kil görülmektedir. Kötü boylanmalı, az çimentolu olması nedeniyle dağılan bir özelliktedir. Birimde, genellikle düzenli bir katmanlaşma görülmemektedir. İçerdiği demir oksit miktarına göre sıklık eğilimi artmaktadır. Belgrad Formasyonu Paleozoyik birimleri diskordans olarak örtmektedir.

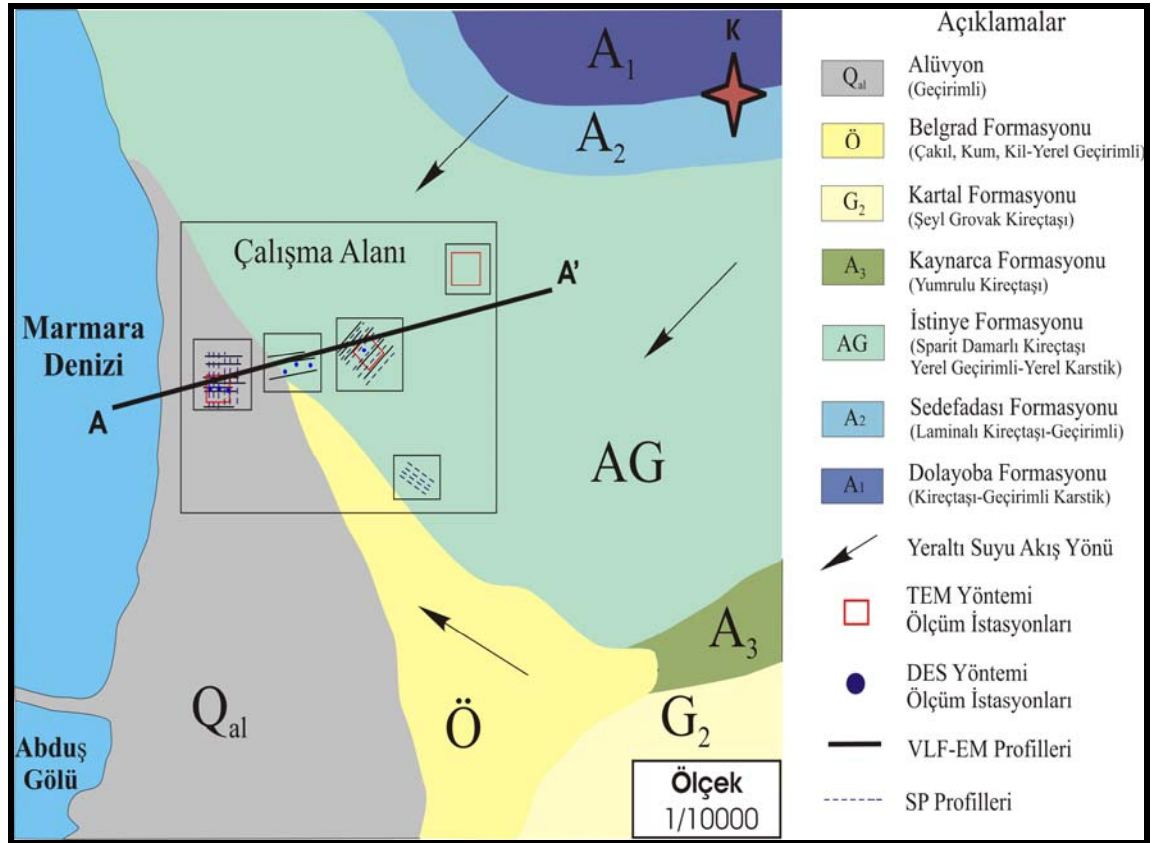
Alüvyon; inceleme alanında Büyük Dere ve Saz Dere civarında görülmektedir. Kalınlığı yaklaşık 0-10 m arasındadır. Bölgede akarsuların, derelerin bazı kısımlarında rastlanılan bu örtü niteliğindeki alüvyonlar akarsu boyunca bulunan kayaçların genellikle parçalanıp, taşınıp biriktirilmesi ile oluşmuştur. Kum, çakıl, kil ve mil boyutunda malzeme içermektedir. Tuzla alüvyon alanında, alüvyon düzlüğünü Umur Dere ve Yassıkaya Deresi oluşturmaktadır. Alüvyonun üst kısımlarında kil, alt kısımlarında ise ince kumlu bantlar yer almaktadır. Dolgunun alt düzeylerinde denizel çökeller bulunmaktadır. Alüvyon; krem, sarımsı, kahverengimsi, çakıl-kum-kil boyutlarında taşınmış kuvarsitlerden oluşmuştur (Barut, 1993) .

6.3 Tuzla İçmeler Bölgesi Hidrojeolojisi

İnceleme alanı ile ilgili hidrojeolojik bilgiler Barut (1993) ve Yalçın ve Tufan (2003)' den derlenmiştir. İnceleme alanında yeraltı suyu taşıyan önemli birimler, Siluriyen yaşlı Dolayoba Formasyonu. Devoniyen yaşlı Sedefadası, İstinye ve Kaynarca Formasyonları ve alüvyondur. Geçirimsiz birim ise Devoniyen yaşlı Kartal Formasyonudur. Bölgede yerel geçirimli örtü niteliğinde, Belgrad Formasyonu bulunmaktadır (Şekil 6.5).

Dolayoba Formasyonu, resifal ve mercan fosilli kireçtaşlarından oluşmuştur. Kalın katmanlı, yer yer masif özellik göstermektedir. Süreksizlikler boyunca karstik oluşumlar görülmektedir. Birim, içerdiği yeraltı suyu ile oluşan erime boşlukları ile ikincil porozite kazanmıştır. Litolojik özelliğine bağlı olarak, meydana gelmiş

süreksizlik düzlemleri boyunca hareket eden yeraltısuyu, bazı bağlantılı süreksizlik düzlemleri boyunca, birime akifer özelliği kazandırmıştır. Bölgede, kalınlığı 100-150 m arasında değişen birim, geniş yayılım göstermesi ile iyi bir beslenme alanı oluşturmaktadır. Yeraltısuyu kapasitesi açısından zengin bir akifer özelliğindedir. Ancak inceleme alanında bu birimin dar bir yayılım göstermesi, yerel olarak olumsuz bir etki yapmaktadır.



Şekil 6.5 Tuzla İçmeler ve çevresi jeoloji haritası (Barut (1993)'den yeniden çizilmiştir).

Sedefadası Formasyonu, karstik Dolayoba Formasyonu üzerindedir. Laminallı, ince katmanlı killi kireç taşından oluşmuştur. Birimin içerdiği kil miktarı ve laminallı yapısı, karstlaşmayı engellediği şeklinde değerlendirilebilir.

İstinye Formasyonu, kalsit damarlı ince, üst düzeylere doğru kalın katmanlı kireçtaşlarından oluşmaktadır. Yerel olarak geçirimsiz kireçtaşı şeyl düzeylerine rastlanmaktadır. Litoloji ve süreksizliklere bağlı oluşan karşılaşmanın arttığı yerlerde, yerel akifer özelliği taşımaktadır. Birimin alt düzeylerindeki ince katmanlı yapısının, yerel olarak resifal fasiyese geçtiği kısımlar, süreksizlik düzlemlerine bağlı karst sistemleri oluşturmuştur. Litolojik ve yapısal parametrelere bağlı artan karstik oluşumların ve beslenmenin uygun olduğu alanlar akifer özelliği taşımaktadır.

Kaynarca Formasyonu, iri yumrulu kireçtaşlarından oluşmuştur. Orta sertlikte, karstik, bol erime boşluklu, gözenekli, süreksizlik düzlemleri bulunan birim, hidrojeolojik açıdan iyi bir akifer olma özelliği taşımaktadır. Hidrojeolojik istifte en üstte, geçirimsiz birimin altında yer alan bu birimden derine doğru sızan sular, çok sayıda düdenlerin gelişmesine neden olmuştur.

Kartal Formasyonu, paleozoyik istifin en üstünde bulunur. Birimde, kil oranının yüksek oluşu, litolojik olarak birimin geçirimsiz özellik göstermesine neden olmaktadır. Birim şeyl, grovak ve kireçtaşı düzeylerinden oluşmaktadır. Kireçtaşı düzeyleri yeraltısuyu taşıyabilme özelliğindedir. Ancak genel anlamda, birime ait kireçtaşları akifer olma özelliğinde değildir.

Belgrad Formasyonu, genellikle gevşek kum-çakıl ve kil boyutunda tanelerden; seyrek olarak da kil ve çamurtaşı düzeylerinden oluşur. Kalınlığı Paleozoyik kayaların paleotopografya yüzeylerine bağlı değişmektedir. Çakıl ve kum boyutunun, yoğun olduğu kısımlar iyi bir yerel akifer özelliği taşır. Killi düzeylerin bulunduğu kısımlar geçirimsizdir. Kalınlığın az olduğu bölümler, doygun olmayan yeraltı suyunu veya tünnek akiferleri oluşturabilmektedir. Birimin yerel olarak oksitlenmiş olması kısmen de olsa, yeraltı sularının kirlenmesine neden olabilmektedir. Hidrojeolojik açıdan ince taneli, az geçirimli bir özellik taşımaktadır.

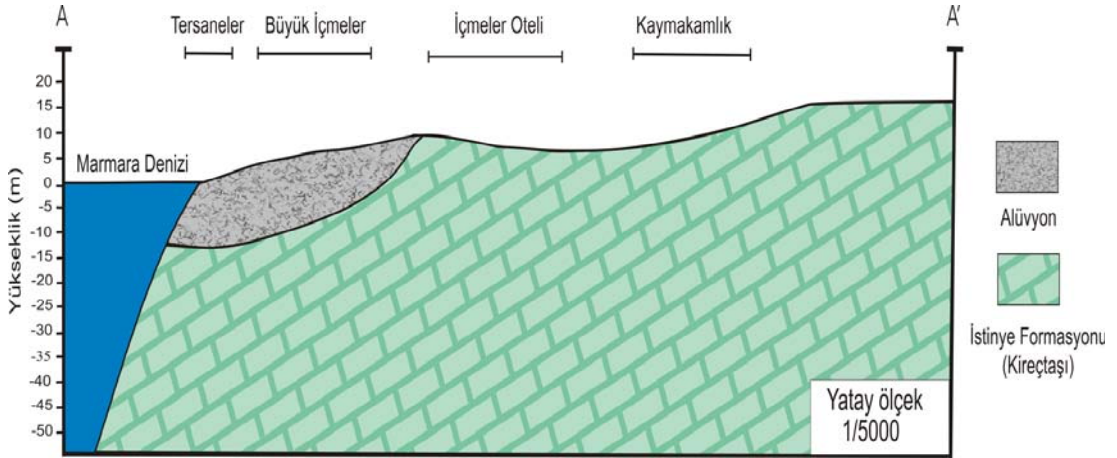
Alüvyon, geniş bir alanda dolgu alanını oluşturmaktadır. Çakıl, kum, kil ve mil boyutundaki, taşınmış malzemenin oluşturduğu bir birimdir. Hidrojeolojik açıdan geçirimli taneli ortamı temsil etmektedir. İnceleme alanında açılan kuyular, alüvyonlar içerisinde yer alır (Barut, 1993).

Ölçümlerin yapıldığı alan üzerinde A-A' doğrultusun boyunca alınan kesitten elde edilen inceleme alanı jeolojik kesiti Şekil 6.6'da verilmektedir. Buna göre ölçümlerin yapıldığı çalışma alanında hakim jeolojik birimler alüvyon ve kireçtaşlarından oluşmaktadır.

6.4 İnceleme Alanı Yeraltı Sularının Jeokimyası

Yeraltının çeşitli derinliklerinde bulunan sular, buralardaki değişik bileşimli kayalarla temas halindedir. Bu kayaların suda eriyebilme derecelerine göre az, ya da çok oranda erimiş madde yeraltı sularına karışır. Erimiş maddelerin miktarı,

yeraltı sularının kayalarla değme süresine, suyun hızına, sıcaklığına, kayacın cinsine ve ortamın basıncına bağlı olarak değişir. Yeraltı sularındaki erimiş madde miktarı



Şekil 6.6 İnceleme alanı jeolojik kesiti

belirli sınırları aşması halinde, yeraltı sularının kullanılma alanları da kısıtlanır. Yeraltı sularının içindeki kimyasal maddelerin özel yöntemler uygulanarak analiz edilmesi ve miktarlarının saptanması ile, bunların kullanılma yerinde, istenen koşullara uygun olup olmadıkları anlaşılabilir. Yeraltı sularının fiziksel özelliklerinin araştırılmasında elektriksel iletkenlik (EC), pH, sıcaklık, asidite ve alkalinite değerleri kullanılmaktadır.

Yeraltı sularının tuzlanmasında etkili olan genel tuz iyonları Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} 'dir. Özellikle deniz suyunun karaya sokulmasıyla meydana gelen tuzlanmada, yeraltı sularında bulunan Na^+ , Cl^- gibi iyonlar önem kazanmaktadır. Sodyum (Na^+) en fazla deniz suyunda bulunur. Yeraltı sularına en çok, plajiyoklasların ayrışması ve kil minerallerinin baz değişimi sonucu karışmaktadır. Magmatik ve metamorfik kayalar içinden çıkan bazı kaynaklarda yaklaşık 1-20 mg/l sodyum bulunur. Deniz suyunda bu miktar 10000 mg/l'a kadar yükselebilir. Yeraltı sularındaki klorür (Cl^-), deniz suyundan, evaporitlerden, yağmur ve kar sularından ya da atmosferden gelebilir. Bunların içinde yeraltı suyuna en fazla klorür veren kaynak deniz suyudur. Kıyılardan uzaklaştıkça yeraltı sularındaki klorür miktarı önemli oranda azalır. Yağmur suyunda 1 mg/l olan klorür, deniz suyunda 20000 mg/l' ye kadar yükselebilir.

Tuzluluğu ölçmede kullanılan iki ana yöntem vardır. Bunlar sudaki çözünmüş toplam madde miktarının (TDS) belirlenmesi ve suyun elektriksel iletkenliğinin (EC)

tespitidir. Suyun iletkenliği mikrosiemens/cm ($\mu\text{S}/\text{cm}$) cinsinden ölçölmektedir. Bir su örneğinin iletkenliği elektrik akımını taşıyabilme yeteneğinin ölçüsüdür. Sudaki toplam çözünmüş madde miktarı, özellikle su içindeki tuz miktarı arttıkça suyun elektriksel iletkenliği artar. Bir su örneğinin EC'si ölçölerek örnek içindeki toplam çözünmüş madde miktarı tespit edilebilir. Ölçölen EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$) değerlerini TDS (ppm)' ye çevirmek için, iletkenlik değerleri doğal sular için 0.54 ve 0.96 arasında bir katsayı ile çarpılır. Bu katsayının değeri ise çözünmüş madde cinsine bağlı olarak değişmektedir. Çözünmüş madde cinsinin bilinmediği durumlarda bu katsayı genellikle 0.67 olarak alınır (Nowroozi ve diğ., 1999).

$$\text{TDS (ppm)} = \text{EC } (\mu\text{S}/\text{cm}) \times 0.67 \quad (6.1)$$

Burada toplam çözülmüş madde miktarı (TDS) ppm (milyonda bir kısım) olarak verilmektedir. Çözünmüş madde miktarını belirtmek için en yaygın olan şekil, erimiş madde miktarının litrede miligram (mg/l) belirtilmesidir. (mg/l) ile (ppm) arasında

$$\text{ppm} = (\text{mg/l}) / d \quad (6.2)$$

şeklinde bir ilişki vardır. Burada d özgül ağırlığı ifade etmektedir. Özgür ağırlığın 1'e yakın olması durumunda $\text{ppm} = \text{mg} / \text{l}$ olarak alınabilmektedir. Yeraltı sularının TDS'ye göre sınıflandırılması Tablo 6.1 de verilmiştir.

Tablo 6.1 Yeraltı sularının içerdikleri TDS miktarına göre sınıflandırılması

Su Cinsi	Toplam Çözünmüş Madde (mg/l)
Tatlı Su	<1000
Az Tuzlu Su	1000-3000
Orta Tuzlu Su	3000-10000
Çok Tuzlu Su	10000-35000
Deniz Suyu	+/- 35000

İnceleme alanı içerisinde doğal kaynaklar ve sondaj kuyuları olmak üzere iki tip su kaynağı bulunmaktadır. İnceleme alanı içerisinde bulunan kaynaklar Büyük İçme ve Küçük İçme olarak isimlendirilmiştir. Büyük ve Küçük İçme'de kaynaklar alüvyondan boşalmakta olup debileri 2-10 l/sn olarak değişmektedir. İnceleme

alanında yeralan iki adet sondaj kuyusundan birincisi İçmeler Otel'i'nin içinde bulunan ve Kuyu-1 olarak isimlendirilen kuyu, diğeri ise Büyük İçme olarak isimlendirilen alanda yer alan ve Kuyu-2 olarak isimlendirilen kuyudur (Tablo 6.2).

Tablo 6.2 İnceleme alanı içerisinde yeralan kaynak ve kuyulara ait bilgiler

Kuyu & Kaynak Adı	Kuyu Derinliği (m)	Yeraltı Su Düzeyi (m)
Büyük İçme	2	1.9
Küçük İçme	2	1.9
Kuyu-1	22	11
Kuyu-2	160	4

Bu kaynak ve kuyulardan elde edilen bilgiler ve alınan su numuneleri üzerinde (Barut, 1993; Yalçın ve Tufan, 2003) yapılan çeşitli ölçümler sonucunda suların fiziksel ve kimyasal özellikleri araştırılmıştır. Barut (1993), meteoroloji gözlem istasyonlarından elde ettiği bölgenin yıllık yağış ve sıcaklık değişimlerinden yararlanıp, Penman ve Thornthwaite yöntemleri ile inceleme alanı için su bilançoları hazırlamıştır. Bu bilançolarla bulduğu yıllık yağış, buharlaşma, akış, depolama, sızma gibi değerleri kullanarak havza için beslenme ve boşalma değerleri hesaplamıştır. Özet olarak; Barut (1993) bu değerleri karşılaştırdığında boşalmanın beslenmeden daha fazla olduğunu, aradaki bu farkın yerleşim birimlerinin belgeli yada belgesiz olarak açtıkları kuyulardan fazla su çekmelerinden kaynaklandığını ve beslenme boşalma arasındaki farkın kıyıda alüvyona dağılmış halde bulunan deniz suyu ile karşılandığını belirtmiştir.

Yine bu su kaynak ve kuyularından alınan örnekler üzerinde yapılan EC ve laboratuvar ölçümlerinin sonuçları Tablo 6.3 ve Tablo 6.4' de verilmektedir.

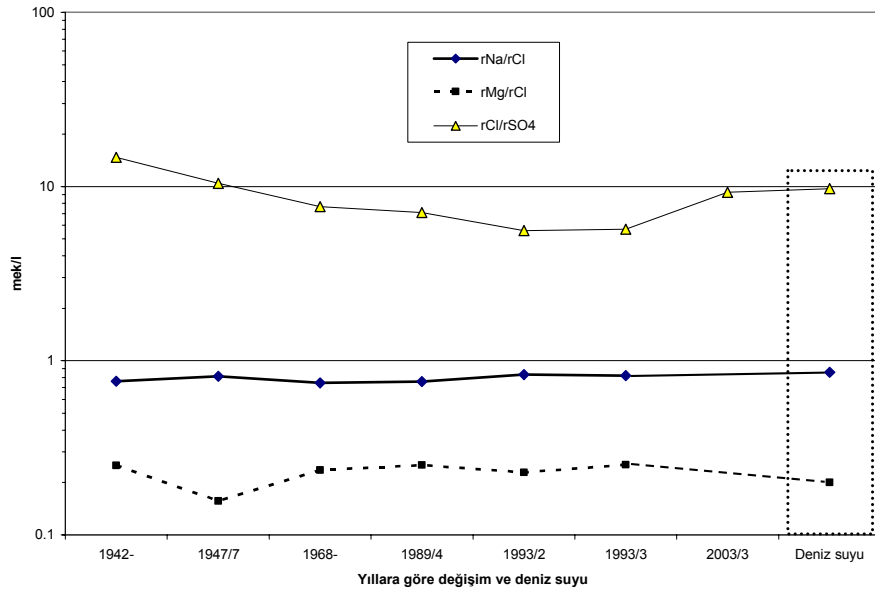
Tablo 6.3 Elektriksel iletkenliğin kaynak ve kuyularda değişimi

Ölçünün alındığı yıl	En düşük ve en yüksek EC değişimleri (µS/cm)			
	Büyük İçme	Küçük İçme	Kuyu-1	Kuyu-2
Barut (1993)	4000 - 4700	2000 - 2750	-	-
Yalçın ve Tufan (2003)	3930 - 6690	1900 - 3220	1590 - 1990	4220 - 8130

Tablo 6.4 Kaynak ve kuyularda alınan su numunelerinde ölçülen iyon değerleri
(Barut, 1993; Yalçın ve Tufan, 2003).

Ölçülen birimler (mg/l)	Ölçülen en düşük ve en yüksek değerler					
	Büyük İçme (kaynak)		Küçük İçme (kaynak)		Kuyu-1	Kuyu-2
	1993	2003	1993	2003	2003	2003
Cl	1226 - 1260	1102 - 2469	808 - 920	388 - 1028	269 - 1148	1024 - 2253
Na	660 - 666	-	471 - 500	-	-	-
SO ₄	299	220-360	198 - 209	95 - 175	110 - 290	200 - 330
HCO ₃	408 - 427	420-518	408 - 429	420 - 469	451 - 536	427 - 494
NO ₃	8.3 - 12.32	0-1	9.1 - 13.6	0 - 2	0 - 4	0 - 2
NO ₂	Yok	Yok	0.25	Yok	Yok	Yok

Barut (1993), elde ettiği analiz sonuçlarını Piper, Schoeller, Stiff diyagramlarıyla değerlendirmiş ve geçmiş dönemde yapılan analizlere göre bu suların magnezyum klorürlü bir özellikte iken günümüzde kaynak ve kuyu sularının, klorürce zengin, sodyum klorürlü sular sınıfında yer aldığını belirtmiştir. Buna karşılık Yalçın (2005), 1942-2003 yılları arasında alınan su numuneleri üzerinde yapılan ölçümlerden elde edilen iyon değerleri ve bunların bir birlerine olan oranlarını incelediğinde sodyum ve magnezyum iyonları oranının klor iyonu oranına göre ($r_{Mg/rCl}$, $r_{Na/rCl}$) değişim göstermediğini, bununla birlikte 1968-1993 yılları arasında sülfat oranının arttığını belirlemiştir (Şekil 6.7).



Şekil 6.7 Yıllara göre iyon miktarları oranının değişimi

Her iki çalışmayla elde edilen sonuçlar incelendiğinde özellikle Büyük İçme içinde yeralan kuyu ve kaynaklardaki suların; elektriksel iletkenlik (EC) ve özellikle klor (Cl) değerlerinin oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Bu sular için TDS değerleri (6.1) ile verilen denklemde katsayı faktörünün en düşük ve yüksek değerleri için hesaplanmıştır (Tablo 6.5). Elde edilen sonuçlar Tablo 6.1'den yararlanılarak değerlendirilmiştir. Sonuçta Büyük İçme içinde yeralan kuyu ve kaynaklardaki suların az tuzlu ve orta tuzlu sular sınıfında yer aldığı görülmüştür. Buradaki yeraltı sularının analiz değerleri Dünya Sağlık Teşkilatı (WHO) ve Türk Standartları Enstitüsü (TS-266) tarafından belirtilen değerlerle karşılaştırıldığında, özellikle sudaki klor ve TDS miktarının uluslararası standartlara göre çok yüksek değerlerde olduğu görülmüştür (Tablo 6.5).

Tablo 6.5 Kaynak ve kuyulardan ölçülen değerlerin WHO ve TSE değerleri ile karşılaştırılması

Madde (mg/l)	WHO		TSE		Büyük İçme ölçülen değerler			
	Uluslararası		Standart	Hedef	Kaynak		Kuyu-2	
	Standart	Hedef			En düşük	En yüksek	En düşük	En yüksek
Cl	600	200	600	200	1102	2469	1024	2253
SO ₄	400	200	400	200	220	360	200	330
TDS	1500	500			2122	6489	2278	7886
pH	6.5-9.2	7-8.5	7.0-8.5	6.5-9.2	6.9	7.6	6.9	8.1

6.5 Tuzla İçmeler Bölgesinde Uygulanan Jeofizik Araştırmalar

Çalışma alanında tatlı-tuzlu su sınırının belirlenmesi amacıyla kıyıda karaya doğru uzanan bir profil boyunca, tatlı suya doymun yüksek görünür özdeirence sahip ortam ile tuzlu suya doymun düşük görünür özdeirence sahip ortam arasındaki karışıklıktan yararlanan, aynı fiziksel parametrelere duyarlı fakat farklı çalışma prensiplerine sahip jeofizik yöntemlerden, DES, TEM, VLF-Elektromanyetik ve SP yöntemleri kullanılarak ölçümler alınmıştır. Ölçümler yoğun yapılaşmanın elverdiği ölçüde, Tuzla İçmeler tesisleri içinde ve bu tesislerin dışında yer alan boş alanlarda yapılmıştır. Yüksek gerilim hatları, otoyollar ve binalardan kaynaklanan gürültüler şehir içinde jeofizik çalışma yapılmasını güçleştirmekte ve veri kalitesini düşürmektedir. Bu nedenle bu noktalara mümkün olduğu kadar uzak yerler seçilerek ölçümler alınmıştır. Çalışma alanında yapılan ölçümlerle ilgili bilgiler Tablo 6.6 da

verilmektedir. 2003-2004 yılları arasında yaklaşık 25 km²'lik bir alanda toplam 10 istasyon ve 1379 noktada jeofizik ölçümler alınmıştır.

Çalışma alanında uygulanan DES ve TEM ölçümleri ile iletkenliğin derinlikle olan değişimi incelenmektedir. Her iki yöntemde derinlik sondajı yapmasına rağmen birbirlerine olan çeşitli üstünlükleri nedeniyle tercih edilmiştir. Ölçülerin alındığı alanların geniş DES açılımlarına izin vermemesi nedeniyle bu elektrik sondaj yöntemin ulaşmadığı derinliklere ait bilgiler, daha küçük boş alana ihtiyaç duyması ve daha derinlerden bilgi alması nedeniyle TEM yöntemi kullanılarak sağlanmıştır.

Tablo 6.6 Tuzla İçmeler bölgesinde yapılan jeofizik ölçümlerin dökümü

Elektrik-Elektromanyetik sondaj (sounding) ölçümleri		
DES	7 istasyon	
TEM	3 istasyon	
Elektrik-Elektromanyetik Kaydırma (profiling) ölçümleri		
VLF - Elektromanyetik	15 profil	814 nokta
SP	27 profil	565 nokta

Aynı şekilde, VLF-Elektromanyetik yöntemin araştırma derinliği ise kullanılan frekansa ve ortamın öz direncine bağlı olarak sınırlanmaktadır. Uygulamadaki kolaylığı ve ölçümlerin hızlı bir şekilde yapılması nedeniyle büyük alanlarda düşey süreksizlik ve yapılar hakkında ön bilgi elde etmek bu yöntem ile mümkündür. Bu yöntem ile bir doğrultu boyunca belirli aralıklarla yapılan ölçümler ile çalışma alanında profil boyunca iletkenliğin yanal yönde nasıl değişim gösterdiği araştırılmıştır. VLF-Elektromanyetik yöntemi ile benzer şekilde SP yönteminde de bir doğrultu boyunca belirli aralıklarla yapılan ölçümler sonucunda yeraltı suyunun akış yönü belirlenmeye çalışılmıştır.

Çalışma alanında Büyük İçme olarak adlandırılan alan içinde 3 noktada, Tuzla Oteli içinde 3 noktada ve Kaymakamlık olarak isimlendirilen alanda 1 noktada olmak üzere toplam 7 noktada DES ölçüsü alınmıştır. DES verileri METZ marka elektrik öz direnç cihazı kullanılarak ölçülmüştür. DES ölçümlerinde en büyük elektrot açılımı (AB/2) arazi koşullarının izin verdiği ölçüde 70 metre olarak gerçekleşmiştir. Ayrıca Büyük İçme, Kaymakamlık ve bu noktanın 300 metre kuzey batısında olmak

üzere toplam 3 noktada TEM ölçüsü alınmıştır (Şekil 6.2).

TEM yöntemi DES yöntemine 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 $50 \times 50 \text{ m}^2$ kare şeklinde verici halkalar kullanılmıştır. Veri kalitesini yükseltmek için, farklı (128-256) yığışım (stacking) ve kazanç (0.1-10) değerleri seçilerek ölçümler tekrarlanmış ve bu sayede sinyal/gürültü oranı arttırılmıştır. Veriler yüksek hassasiyet serisi seçilerek 35 pencere için 0.008 – 7.18 ms arasında toplanmıştır. Fakat değerlendirmede, birincil alanın etkisinin devam ettiği yokuş zamanı içinde kalan kısımlar ile sinyalin bozunmaya başladığı kısımlar atıldıktan sonra elde edilen ve ortalama olarak 0.2 – 3 ms arasında kalan veriler kullanılmıştır.

VLF-Elektromanyetik yöntemi hafif donanımı, uygulamadaki kolaylığı, ve verilerin toplanmasındaki çabukluğu ile son yıllarda oldukça sık kullanılan yöntemlerden biri olmuştur. İnceleme alanında yaklaşık uzunlukları 90-140 metre arasında değişen, birbirlerine uzaklıkları ortalama 20 metre olan ve konumları Şekil 6.2’ de gösterilen Büyük İçme, İçmeler Oteli ve Kaymakamlık olarak sınıflandırılan alanlarda toplam 15 profil boyunca Scintrex Envi cihazı kullanılarak VLF-Elektromanyetik verisi toplanmıştır. Ölçüm noktası aralıkları her bir profil için 2 metre olarak seçilmiştir. Veriler her noktada seçilen üç farklı frekans bandı (16.0 kHz, 23.4 kHz, 28.5 kHz) kullanılarak toplanmıştır. Ancak bu çalışmada inceleme amacına bağlı olarak, en iyi sonucu veren 28.5 kHz frekansında yayın yapan NMU istasyon vericisinden yayılan elektromanyetik dalgalar kaynak alan olarak kullanılmıştır. Özdirenç değerlerinin 10 ohm.m ile 200 ohm.m arasında değiştiği bir ortamda 28.5 kHz frekans bandı için araştırma derinliğinin 5.8 bağıntısından yaklaşık olarak 9 ile 46 metre arasında değiştiği hesaplanmıştır. Bu yöntem ile; düşey ikincil manyetik alanın, yatay toplam manyetik alana oranının gerçel (in-phase) ve sanal bileşenleri (out of phase) yüzde cinsinden ölçülmüştür.

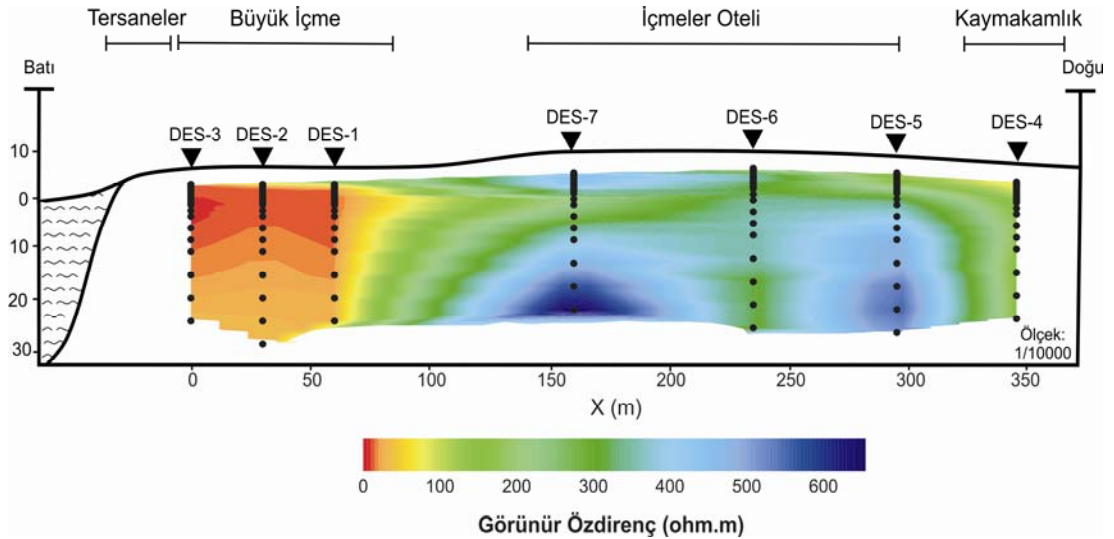
Son olarak çalışma alanında Kaymakamlık olarak adlandırılan alanda, toplam 7 profil boyunca 5 metre aralıklarla SP kaydırma yöntemi kullanılarak ölçümler alınmıştır. Ayrıca, bu çalışma kapsamında yapılan ölçümlere ek olarak 1994 yılında Transenergy tarafından ölçülmüş SP verileri kullanılmıştır. Böylece inceleme alanı

için oluşturulan SP haritaları incelenerek doğal gerilimi oluşturan mekanizmanın tanımlanması ve yeraltı suyunun akış yönü saptanmaya çalışılmıştır.

6.6 Tuzla İçmeler Bölgesinde Ölçülen Verilerin Değerlendirilmesi

6.6.1 DES ve TEM Verilerinin Değerlendirilmesi

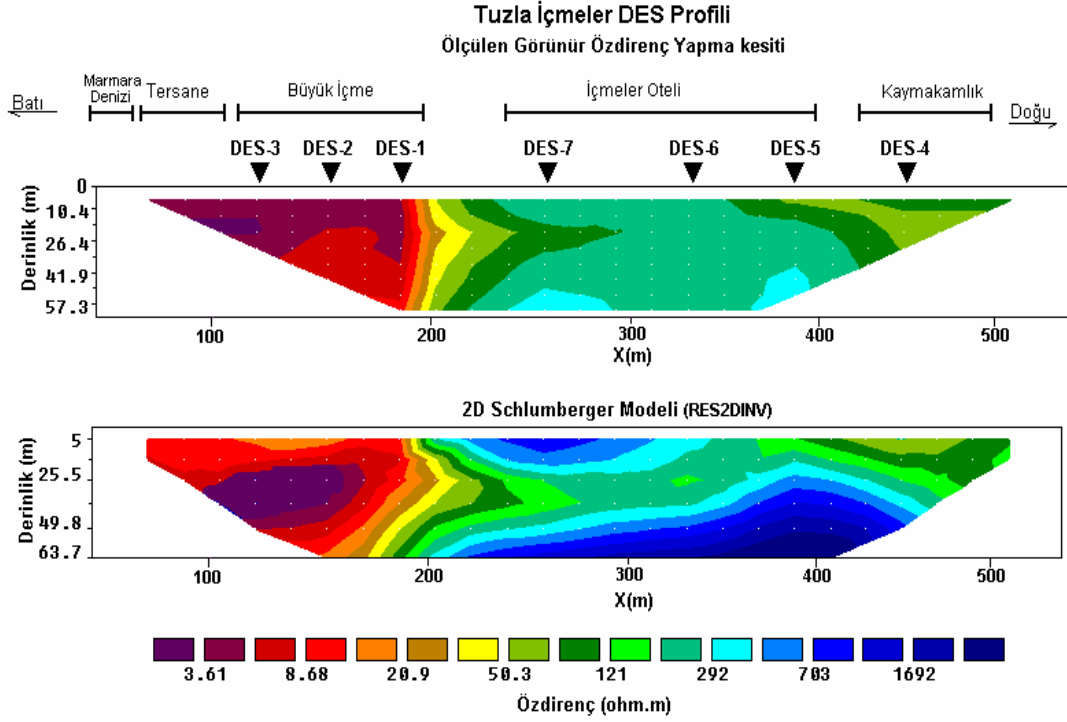
Ölçülen DES verilerinden oluşturulan andıran kesit incelendiğinde özdirenç değerlerinin 5 ohm.m'den yaklaşık 650 ohm.m gibi geniş bir aralıkta değişim gösterdiği görülmektedir. Özellikle denize yaklaşık 120 metre uzaklıkta bulunan Büyük İçme'de görünür özdirenç değerlerinin, açılımın (AB/2) 30 metre olduğu durumda 5-15 ohm.m arasında oldukça düşük değerler aldığı gözlenmektedir. Açılımın artmasıyla özdirenç değerlerin 35 ohm.m' ye kadar yükseldiği görülmektedir (Şekil 6.8). İçmeler Oteli ve Kaymakamlık olarak isimlendirilen bölgelerde ise görünür özdirenç değerleri Büyük İçme'ye oranla çok daha yüksek değerler almaktadır. Özellikle İçmeler Oteli içinde DES-5 ve DES-7 istasyonlarının bulunduğu noktalarda derinlik arttıkça özdirenç değerlerinin arttığı ve 400-650 ohm.m arasında değişim gösterdiği görülmektedir (Şekil 6.8).



Şekil 6.8 Ölçülen DES verilerinden elde edilen görünür özdirenç kesiti (andıran kesit).

Bir boyutlu ters çözüm yönteminde yeraltının yatay tabakalardan oluştuğu farz edilmektedir. Bu durumda özdirenç değerleri sadece derinlikle değişirken yanal yönde bir değişim olmamaktadır. Birçok durumda yeraltı oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir ve özdirenç değerleri yanal yönde de değişim göstermektedir. Yanal yöndeki bu özdirenç değişimleri görünür özdirenç değerlerinde de değişikliklere neden olur ve bu durum özdirençin sadece derinlikle değiştiğini varsayan bir boyutlu

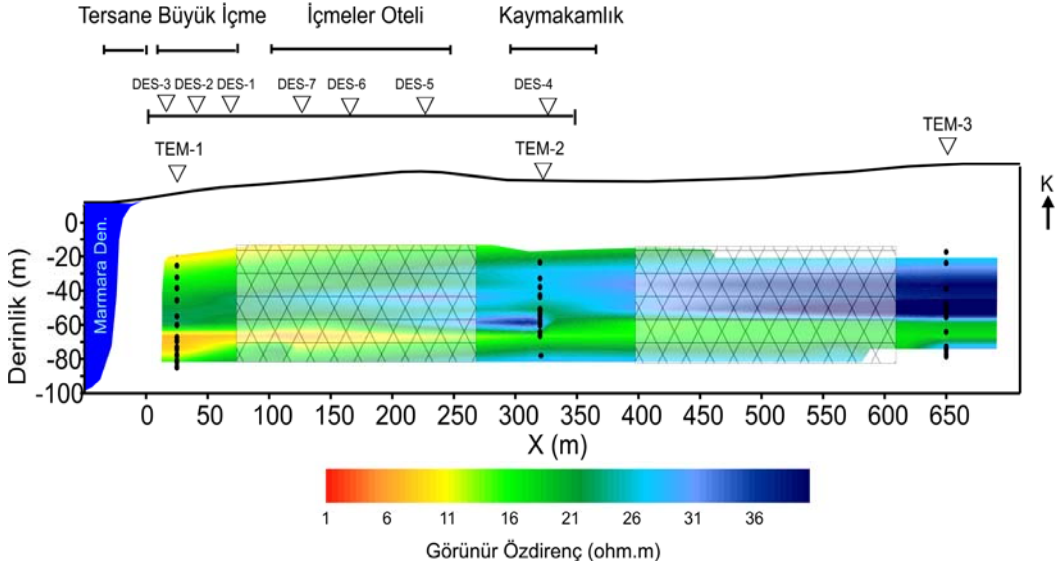
değerlendirmelerde yanlış yorumlamalara sebep olabilmektedir. Yeraltı ile ilgili daha doğru bir model, özdirencin ölçüm doğrultusu boyunca derinlikle birlikte yanıl yönde de değiştiği iki boyutlu (2D) modeldir. Bu nedenle inceleme alanında bir profil boyunca ölçülen DES verilerinin RES2DINV programı (Loke, 2000) kullanılarak değerlendirilmesiyle iki boyutlu modellemesi yapılmıştır (Şekil 6.9).



Şekil 6.9 DES verilerinden elde edilen iki boyutlu yer modeli

Görünür özdirencin hesaplanan yaklaşık derinliğe (Meju, 1995) karşı çizdirildiği TEM kesiti Şekil 6.10'da verilmektedir. DES yönteminde özdirenc değerleri çok geniş bir aralıkta değiştiğinden TEM kesitinin renk skalası için farklı değer aralığı seçilmiştir. Bu kesit incelendiğinde yaklaşık araştırma derinliğinin 20-100 metre arasında olduğu görülmektedir. İlk 20 metreye ait elektriksel bilginin olmamasının nedeni, bu derinliklere karşılık gelen verilerin erken zaman olarak adlandırılan ve birincil alanın etkisinin tam olarak ortadan kalkmadığı durumda ölçülen veriler olmasındandır. Oluşturulan kesit incelendiğinde görünür özdirenc değerlerinin 5-40 ohm.m arasında değiştiği görülmektedir. Büyük İçme içinde yeralan TEM-1 noktası için ölçülen görünür özdirenc değerleri incelendiğinde üstte görünür özdirenci 8-15 ohm.m arasında değişen iletken bir tabaka, altında 20-25 ohm.m'lik daha dirençli bir tabaka ve bunun altında ise ilk tabaka ile aynı görünür özdirenc değerlerine sahip iletken bir tabaka görülmektedir. TEM-2 ve TEM-3 noktaları incelendiğinde yaklaşık

derinliğin 20-50 metre olduğu aralıkta görünür öz direnç değerlerinde bir artışın olduğu ve 40 ohm.m'ye kadar yükseldiği görülmüştür. TEM-1 noktasında en altta yer alan düşük görünür öz dirençli tabaka TEM-2 ve TEM-3 noktalarında da varlığını



Şekil 6.10 TEM verileri ile elde edilen görünür öz direnç kesiti

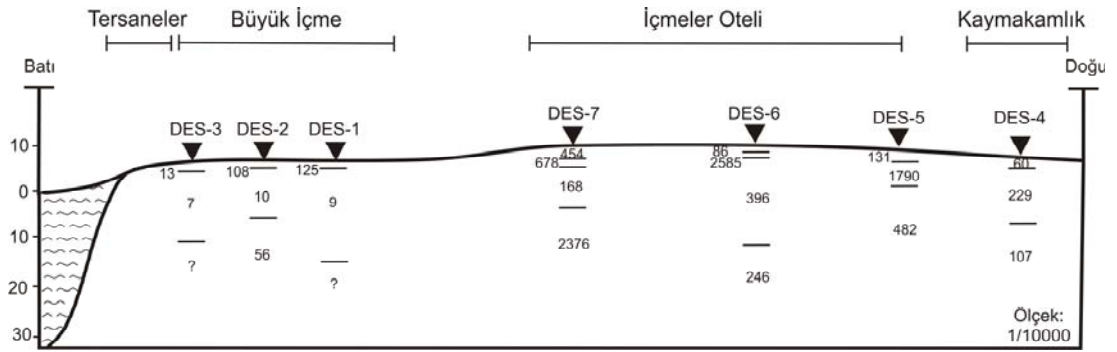
sürdürmektedir. Her iki yöntemle elde edilen görünür öz direnç kesitleri incelendiğinde Büyük İçme içinde öz direncin 5-35 ohm.m arasında değişim gösterirken kıyıdan uzaklaştıkça görünür öz direnç değerlerinde beklenen biçimde bir artışın olduğu görülmüştür.

6.6.2 DES ve TEM Verilerinin Ters çözümü

Arazide ölçülen verilerden hesaplanan görünür öz direnç değerleri yeraltını kalitatif olarak temsil eden değerlerdir. İnceleme alanında ölçülen DES ve TEM verilerinden jeolojik yapıyı temsil eden katman kalınlıkları ve gerçek öz direnç değerlerinin elde edilmesi amacıyla ters çözüm tekniği uygulanmıştır. Bu amaçla ölçülen 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 öz direnç verilerinden oluşturulan arazi eğrileri ile programa başlangıç modeli olarak girilen parametreler (öz direnç ve tabaka kalınlıkları) tarafından oluşturulan model eğriler, aralarında en iyi uyum sağlanana kadar yineleme (iterasyon) işlemi yapılmaktadır. Yineleme işleminin durdurulması önceden yineleme sayısının programa girilmesiyle belirlendiği gibi ölçülen eğri ile model eğri arasındaki çakışma ölçütü farkının belirli

bir değerin altına inmesi ile de gerçekleştirilebilir. Böylece gerçeğe en uygun yeraltı modeli elde edilmeye çalışılmaktadır.

İnceleme alanının jeolojik yapısı ve ölçülen görünür öz direnç değerleri ile oluşturulan kesitlerinden sağlanan yeraltı yapısı ile ilgili bilgilerden, ters çözüm uygulaması için iyi bir başlangıç modeli oluşturma amacıyla yararlanılmıştır (bakınız Şekil 6.8). DES verilerinin bir boyutlu ters çözümünden elde edilen yerelektrik kesiti Şekil 6.11’de verilmektedir.



Şekil 6.11 DES verilerinin ters çözümünden oluşturulan yer elektrik kesiti.

Tabakalı ortamlar için ortak ters çözüm tekniği daha öncede bir çok araştırmacı (Raiche ve diğ., 1985; Goldman ve diğ; 1994; Yang ve diğ., 1999) tarafından çeşitli problemlerin araştırılmasında uygulanmıştır. Tek bir yöntem kullanılarak tabaka kalınlık ve öz dirençlerinin hesaplanmasında çoğu zaman yöntemin doğasından kaynaklanan güçlükler çıkmaktadır. Örneğin DES yöntemi hem iletken hem de dirençli tabakalara karşı duyarlıdır. Fakat tabaka kalınlıkları azaldıkça bunların öz direnç ve kalınlıklarının belirlenmesinde eşdeğerlilik ciddi bir sorun oluşturmaktadır. Aynı şekilde TEM yöntemi iletken tabaka parametrelerinin tespit edilmesinde oldukça başarılı iken dirençli tabakalara karşı tamamen duyarsızdır. Bu yüzden DES ve TEM yöntemlerinin, ortak ters çözüm programında birlikte kullanılması, tabakalı ortam parametrelerinin yorumlanmasında daha iyi sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Bu sayede ters çözüm sonucunda, elde edilen model sonucu başlangıç modeline daha az bağlı, hata miktarı daha düşük ve eşdeğerlilik sorunu daha küçük bir problem olmaktadır.

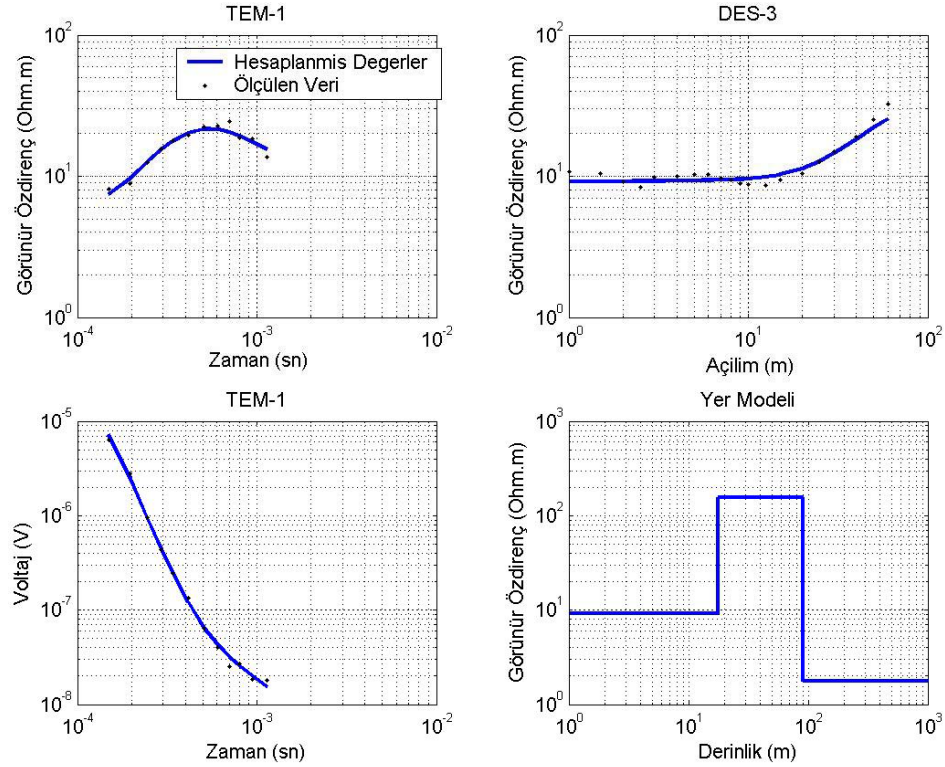
Bu amaçla bir boyutlu çözümün geliştirilmesi ve derinlikle öz direncin değişiminin belirlenmesi amacıyla Şekil 6.11’de verilen kesitin en doğusunda yer alan DES-4 noktasında ölçülen veri ile aynı noktada ölçülen TEM-2 verisi ve bu kesitin en

batısında DES-3 noktasında ölçülen veri ile aynı noktada ölçülen TEM-1 verisinin ortak ters çözümleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçların kullanılabilirliğinin belirlenmesi amacıyla sönümlenme katsayıları, parametre özyöneyleme düzeyi (V), model ayrımlılık düzeyi (R) ve çakışma ölçütü değerleri incelenmiştir. Denize en yakın nokta olan Büyük İçme içinde alınan TEM-1 ve DES-3 noktalarındaki ölçümlerin ortak ters çözüm sonuçları Şekil 6.12 ve Tablo 6.7’de verilmektedir. Parametre özyöneyleme düzeyi köşegen değerlerinden her biri (V_i) fiziksel parametrelerin logaritmalarının doğrusal birleşimidir. Bu düzey kullanılarak hangi özdeğerin hangi parametreyi veya parametreler arası ilişkiyi kontrol ettiği incelenebilir. Sönümlenme katsayı değeri 0.9’un üstünde ise o özdeğerin kontrol ettiği parametreyi iyi çözdüğü ve çözümün güvenilir olduğu, katsayı değerinin 0.8’in altında olması durumunda özdeğerin kontrol ettiği parametrelerin iyi çözülmediği ve tam olarak güvenilemeyeceği, sönümlenme katsayı değerin 0.1’in altında olması durumunda ise özdeğerin kontrol ettiği parametrelerin hiç çözülmediği söylenebilir (Raiche ve Diğ., 1985). Buna göre Tablo 6.7 incelendiğinde V_1 değerinin tam olarak çözüldüğü ve V_2 , V_3 değerlerinin ise oldukça iyi bir çözüme sahip olduğu sönüm katsayısı değerlerine bakılarak söylenebilir. V_4 ve V_5 değerlerinin 0.8 den küçük olması nedeniyle iyi bir çözüme sahip olmadığı ve bu değerlere tam olarak güvenilemeyeceği tablodan görülmektedir. Ayrıca V_i değerlerinin maksimum olduğu yerdeki değerlere ve negatif veya pozitif değer almasına bakarak çözülen model parametreleri ve birbirleriyle olan ilişkileri belirlenmiştir.

Tablo 6.7 TEM-1 ve DES-3 verilerinin ortak ters çözüm sonuçları

Model Parametreleri	Başlangıç Modeli	Çözüm	TEM-1 ve DES-3					(R) Model Ayrımlılık Değerleri	Standart Sapma
			Parametre Özyöneyleme Düzeyi						
			V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅		
ρ ₁	50	9	-0.958	-0.193	0.209	-0.002	-0.006	0.99	0.08
ρ ₂	150	154	-0.038	0.716	-0.111	-0.178	0.976	0.38	1.50
ρ ₃	100	2	-0.007	-0.038	0.015	0.982	0.182	0.45	1.40
h ₁	30	18	0.281	0.037	0.627	-0.058	0.099	0.98	0.26
h ₂	30	73	-0.026	-0.661	-0.741	0.002	-0.060	0.99	0.22
Sönüm Katsayısı			1	0.99	0.99	0.45	0.37	Çakışma Ölçütü	
Çözülen Model Parametresi			ρ ₁	$\frac{\rho_2}{h_2}$	$\frac{h_1}{h_2}$	ρ ₃	ρ ₂	1.75	

Örneğin V_3 için Tablo 6.7’de dördüncü ve beşinci satırdaki değerler yüksek ve aynı zamanda zıt işaretli değerler almışlardır. Bu sonuca göre çözülen model parametresi h_1/h_2 bölümü olarak belirlenmiştir. Bunların dışında model ayrırlılık matrisi (R) değerlerine bakıldığında birinci tabakanın öz direncinin ve kalınlığının çok iyi bir çözüme sahip olduğu, ikinci tabakanın kalınlığının iyi çözülmesine rağmen öz direncinin tek başına tam olarak çözülmediği görülmektedir. İkinci ve üçüncü tabaka öz direnç değerlerinin model ayrırlılık matrisi sonuçlarına göre birbirine bağımlı olarak çözüldüğü söylenebilir. Ayrıca standart sapma değerlerinin küçük olması ve çakışma ölçütünün (Şekil 6.12) küçük bir değerde olması göz önünde bulundurulursa ortak ters çözüm sonuçlarının güvenilebilir olduğu görülmektedir.

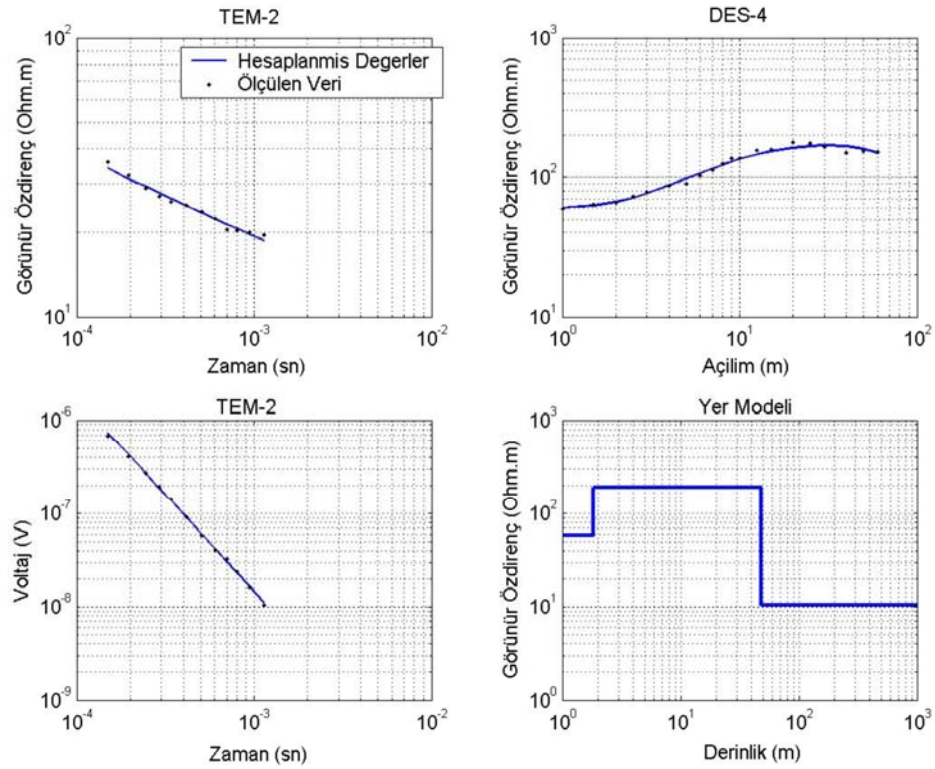


Şekil 6.12 TEM-1 ve DES-3 noktalarında ölçülen verilerin ters çözümü ve bulunan yer modeli.

Çalışma alanının en doğusunda yer alan ve Kaymakamlık olarak isimlendirilen alanda yapılan DES-4 ve TEM-2 noktalarındaki ölçümlerin ortak ters çözüm sonuçlarından elde edilen sonuçlar Tablo 6.8 ve Şekil 6.13’de verilmektedir. Sönüm katsayıları incelendiğinde tüm değerlerin 1’e yakın olduğu ve dolayısı ile çok iyi çözüldüğü kolaylıkla söylenebilir. Bununla birlikte ters çözüm sonucunda elde edilen

Tablo 6.8 TEM-2 ve DES-4 verilerinin ortak ters çözüm sonuçları

Model Parametreleri	Başlangıç Modeli	Çözüm	TEM-2 ve DES-4					(R) Model Ayrımlılık Değerleri	Standart Sapma
			Parametre Özyöneyley Dizeyi						
			V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅		
ρ ₁	225	59	-0.0398	0.875	-0.145	0.077	0.165	0.99	0.36
ρ ₂	150	193	-0.115	0.426	0.866	-0.718	0.136	0.99	0.41
ρ ₃	50	21	-0.659	-0.076	-0.208	-0.186	0.026	0.99	0.42
h ₁	30	2	0.013	-0.210	-0.036	-0.074	0.974	0.94	1.91
h ₂	50	45	-0.741	-0.041	0.074	0.662	-0.067	0.99	0.40
Sönüm Katsayısı			0.99	0.99	0.99	0.99	0.94	Çakışma Ölçütü	
Çözülen Model Parametresi			$\frac{1}{h_2\rho_2}$	$\frac{\rho_1}{\rho_2}$	ρ ₂	$\frac{h_2}{\rho_2}$	h ₁	1.9	

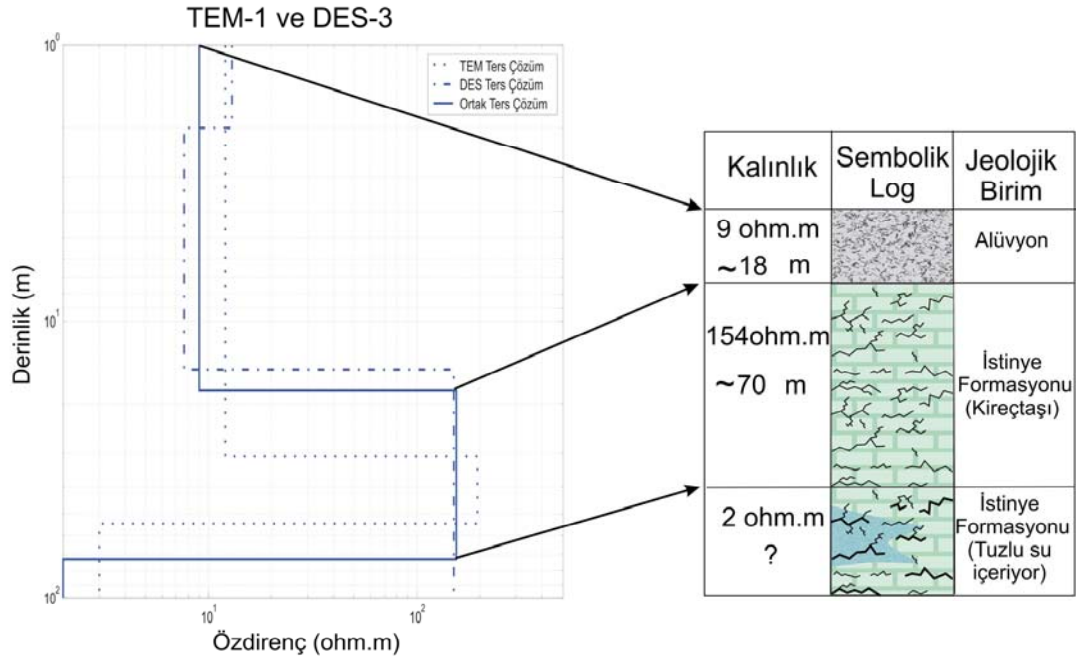


Şekil 6.13 TEM-2 ve DES-4 noktalarında ölçülen verilerin ters çözümü ve bulunan yer modeli

V dizeyi değerleri incelendiğinde ρ_1 , ρ_2 ve h_2 parametrelerinin birbirleriyle ilişkiliği olduğu belirlenmiştir (Tablo 6.8). Model ayrımlılık dizeyi (R) değerlerine bakıldığında ise tüm model parametrelerinin çözümünün tek olduğu görülmektedir.

Ayrıca tüm parametrelerin standart sapma değerlerinin küçük olması bulunan sonuçları desteklemektedir.

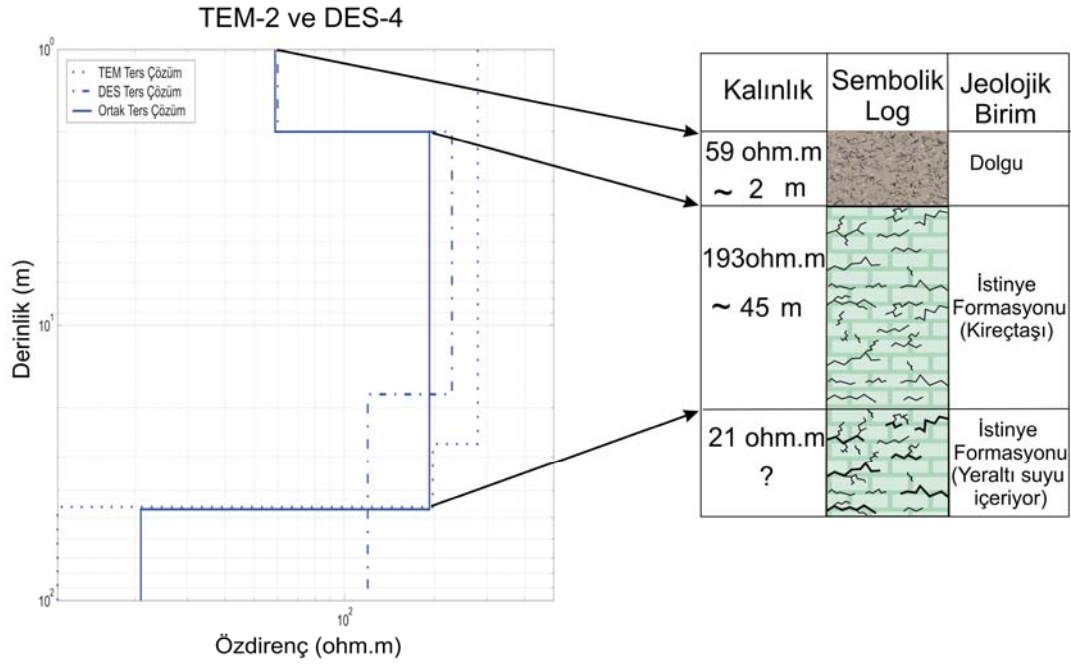
Her iki bölge için, tek bir yöntemle elde edilen ters çözüm sonuçlarına oranla ortak ters çözüm işleminin, yöntemlerin birbirlerine göre üstün yanlarından yararlanarak çözüm sonuçlarını geliştirdiği, tek ve ortak ters çözüm sonuçlarından elde edilen yer modellerinin karşılaştırılmasından da görülmektedir (Şekil 6.14 ve Şekil 6.15).



Şekil 6.14 DES-1 ve TEM-3 verilerinin ayrı ayrı ve ortak ters çözüm sonuçları ile bulunan yer modelleri.

6.6.3 VLF-Elektromanyetik Verilerinin Değerlendirilmesi

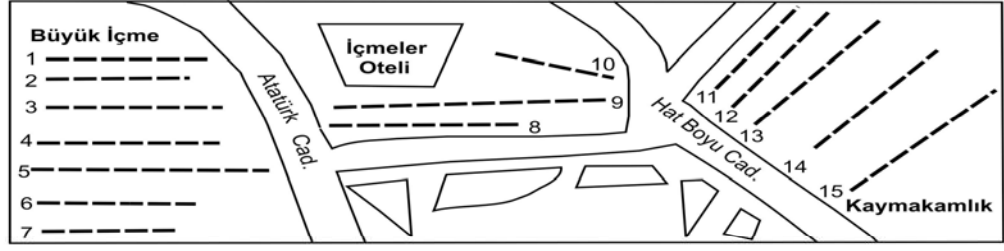
İnceleme alanında ölçülen verilerden elde edilen üç farklı frekans değeri için IP haritaları ve 28.5 kHz'lik verilere ait OP kontur haritası Şekil 6.16'da verilmektedir. Kaikkonen (1979) ortamda birincil manyetik alana dik iletken bir yapının bulunması durumunda OP bileşenlerinin genlik ve işaretlerinin değişim gösterdiğini belirtmiştir. Bu sonuç göz önünde bulundurularak elde edilen haritalar incelendiğinde Büyük İçme olarak adlandırılan alanda IP ve OP değerlerinin birbirine zıt işaretli olduğu görülmektedir.



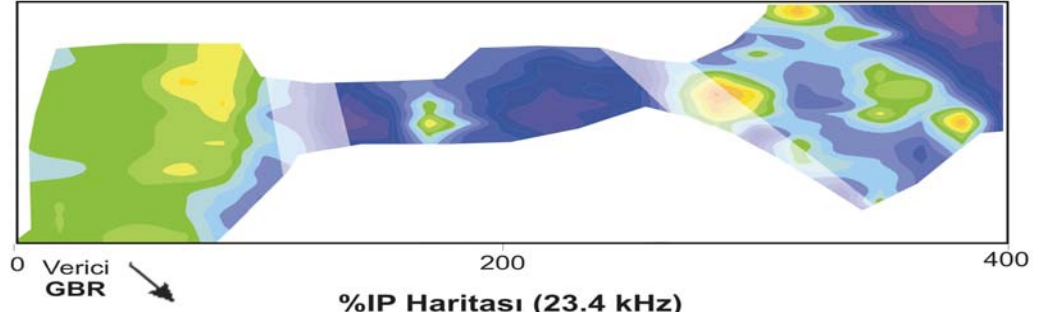
Şekil 6.15 DES-4 ve TEM-2 verilerinin ayrı ayrı ve ortak ters çözüm sonuçları ile bulunan yer modelleri.

İçmeler Oteli içinde ise IP ve OP değerlerinin genelde aynı işaretli ve IP değerlerinin OP ye göre biraz daha yüksek değerler aldığı görülmektedir. Kaymakamlık olarak adlandırılan alan ise İçmeler Oteli ile benzer özellikler göstermekte fakat IP değerleri daha düşük değerler almakta ve yer yer işaret değiştirdiği görülmektedir. Ayrıca oluşturulan harita incelendiğinde Büyük İçmeden İçmeler Oteli'ne doğru IP ve OP değerlerinde bir işaret değişimi dolayısı ile bir sıfır geçişi olduğu görülmektedir. VLF-Elektromanyetik yöntemin en karakteristik özelliği olan bu değişim, farklı iletkenliğe sahip iki ortamın olduğunu göstermektedir. Kaymakamlık olarak isimlendirilen alanda kısmen küçük kapanımlar şeklinde sıfır geçişleri görülmektedir. Buna sebep olarak, bu alanda verici anten ile ölçüm profilleri doğrultularının tam olarak birbirine dik olmaması nedeniyle, toplanan verilerin gürültü içermesinin neden olduğu düşünülmektedir.

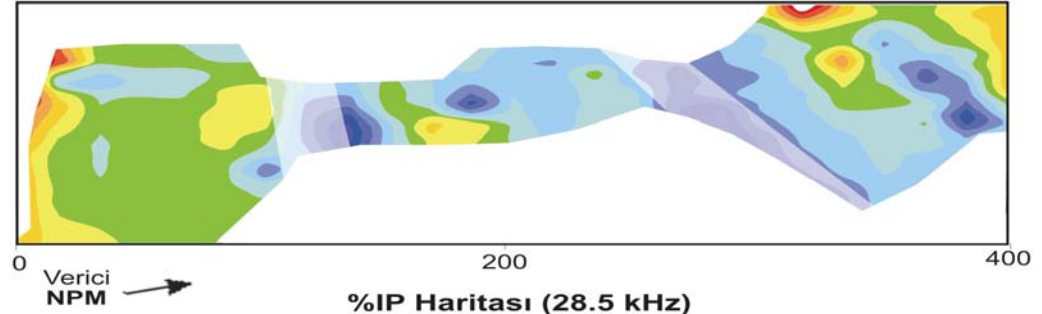
Ölçülen IP verilerine Karous-Hjelt süzgeci uygulanarak akım yoğunluğunun derinlikle değişimi incelenmiştir. Bu sayede iletkenliğin derinlikle değişimi hakkında bilgi edinilmeye çalışılmıştır.



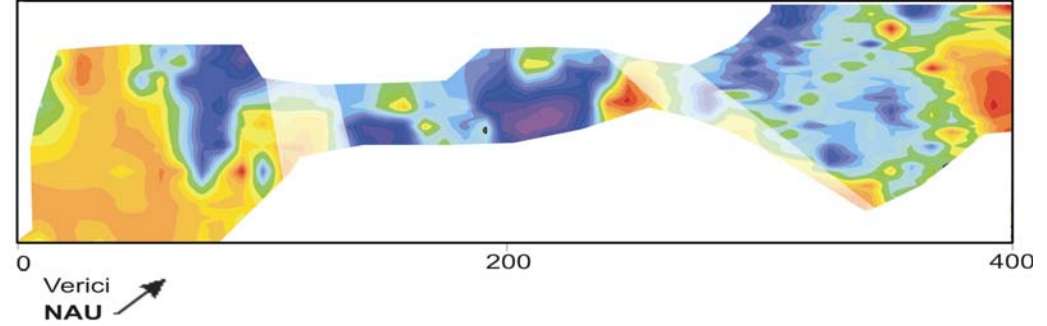
%IP Haritası (16 kHz)



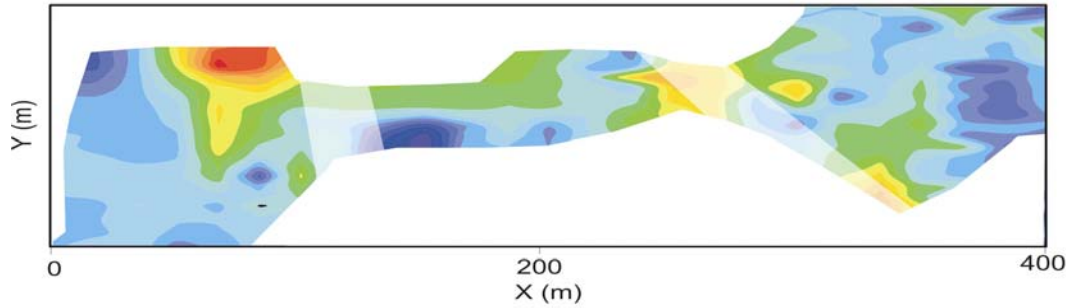
%IP Haritası (23.4 kHz)



%IP Haritası (28.5 kHz)



%OP Haritası (28.5 kHz)



%IP - OP

Şekil 6.16 İnceleme alanında ölçülen VLF-Elektromanyetik gerçel (IP) ve Sanal (OP) bileşen haritaları.

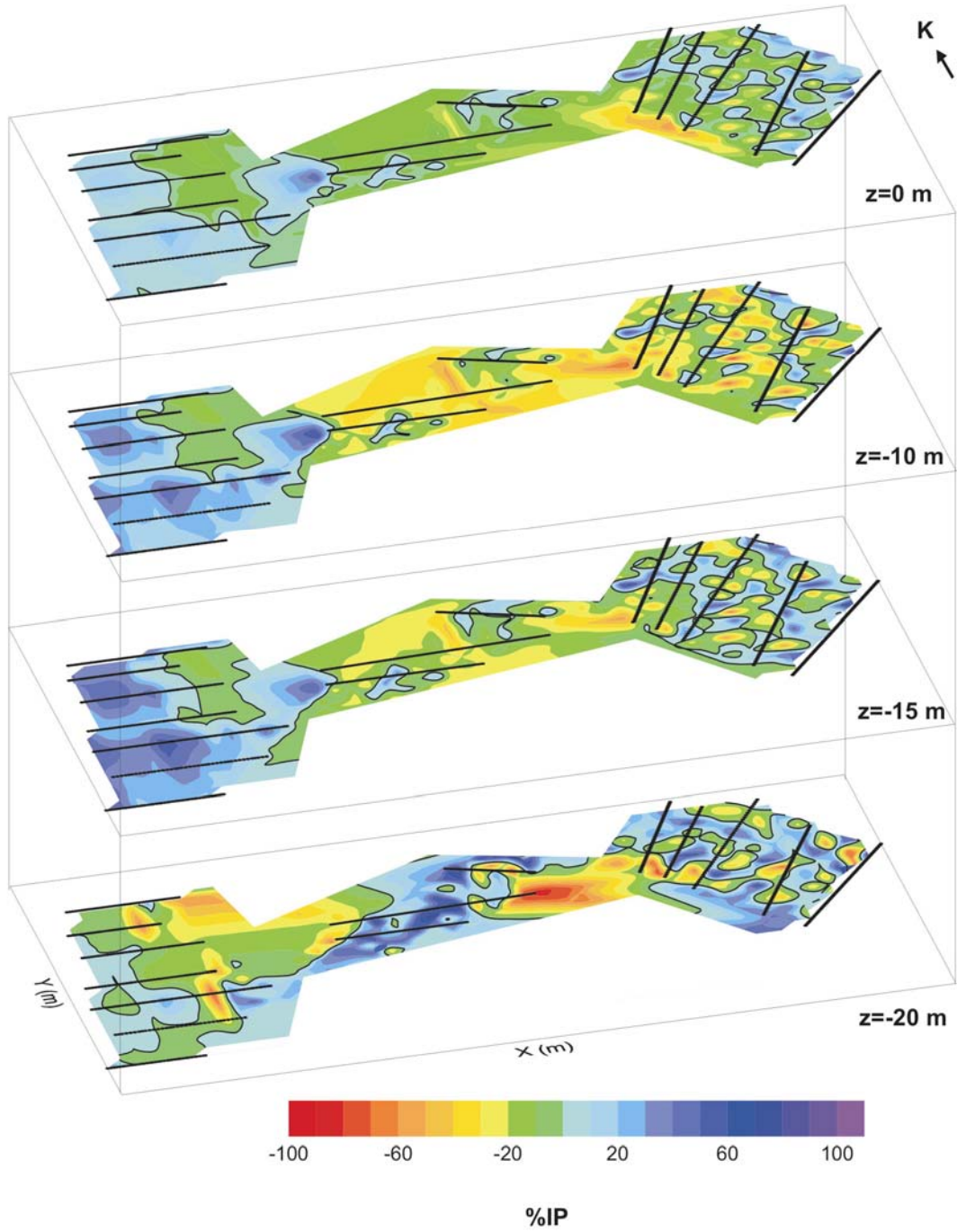
Farklı derinlikler için oluşturulan akım yoğunluğu haritası Şekil 6.17’de verilmiştir. Akım yoğunluğunun yüksek olduğu yerler iletken kısımları göstermektedir. Buna göre Şekil 6.17 incelendiğinde Büyük İçme olarak isimlendirilen bölgenin diğer iki bölgeye oranla daha iletken bir yapıda olduğu görülebilmektedir. Akım yoğunluğu değerleri bu bölgede genelde yüksek (pozitif) değerler göstermektedir. Özellikle 10 ve 15 metre derinliklerindeki akım yoğunluğu dağılımı haritaları incelendiğinde bu derinliklerdeki akım yoğunluğu değerlerinin daha yüksek değerler aldığı ve ortamın iletkenliğinin arttığı görülmektedir. İçmeler Oteli ve Kaymakamlık olarak isimlendirilen alanların ise sığ kesimlerde dirençli bir yapıda olduğu ve derinlikle birlikte iletkenliklerinin arttığı Şekil 6.17 incelendiğinde görülmektedir.

6.6.4 Doğal Polarizasyon Verilerinin Değerlendirilmesi

SP yöntemi ile elde edilen doğal polarizasyon haritaları Şekil 6.18 de verilmektedir. Bu haritalar incelendiğinde Büyük İçme içinde SP anomalilerinin genellikle eksi değerler aldığı ve güney – güneybatı yönünde bu değerlerin artış gösterdiği –65 mV’a kadar yükseldiği görülmektedir. Bu alanda görülen SP anomalilerine neden olarak, farklı tuz iyonu konsantrasyonuna sahip olan yeraltı sularındaki anyon ve katyonların hareketinin (difüzyonunun) neden olduğu düşünülmektedir.

Kaymakamlık olarak adlandırılan alanda ise SP değerlerinin pozitif değerler aldığı görülmektedir. Özellikle çalışma alanının güneyinde, doğudan batıya doğru SP değerlerinin oldukça yüksek (50 mV ve daha yüksek) olduğu görülmektedir. Bu anomaliye neden olarak yeraltı suyunun farklı gerilim katsayılarına sahip yatay bir sınır boyunca hareketi gösterilebilir.

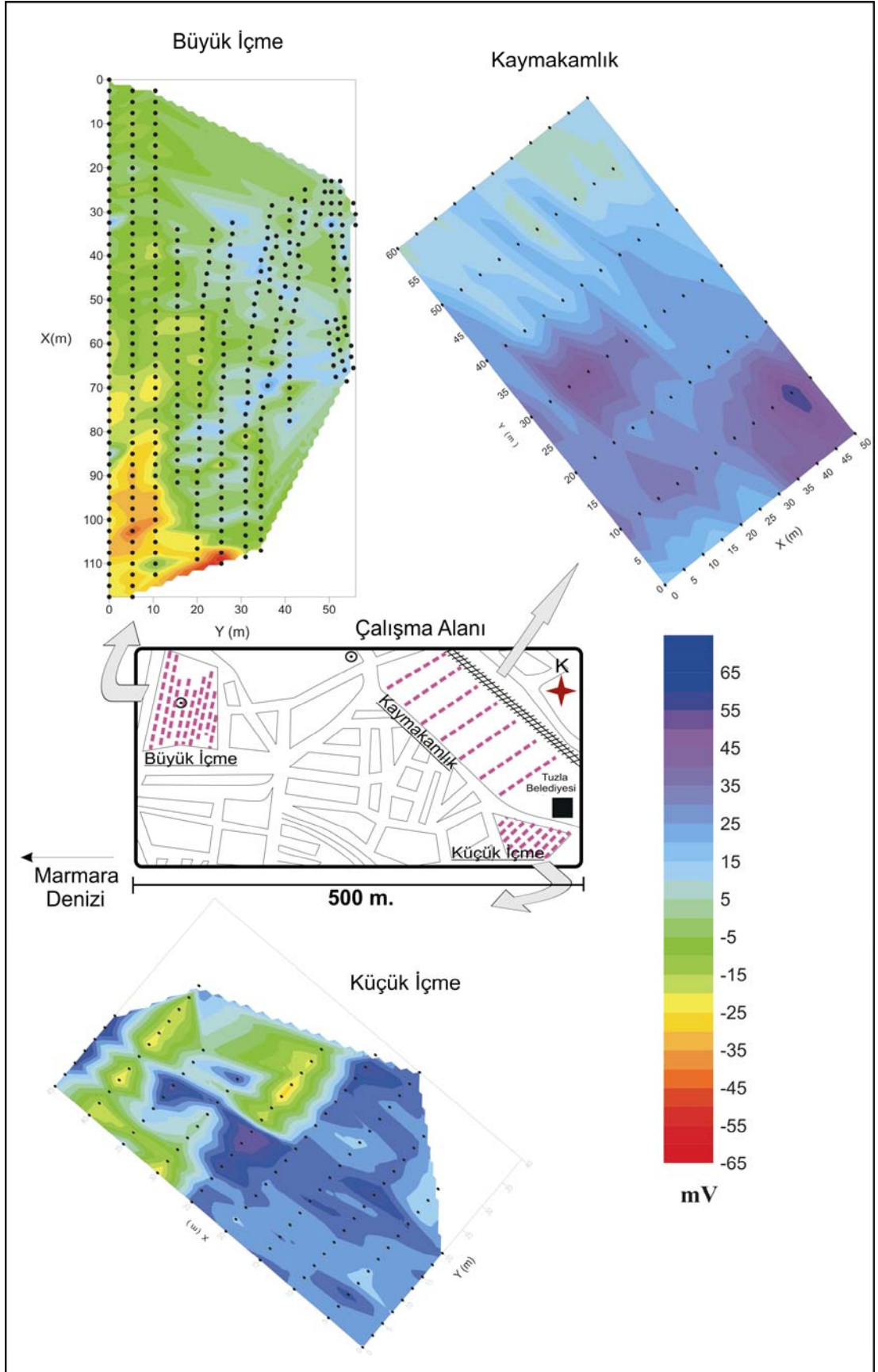
Küçük İçme içinde ölçülen SP anomalilerine bakıldığında ise 23 numaralı profilden itibaren, bu profile paralel olarak SP değerlerinin pozitif ve negatif değerleri birbirinden ayıran bir sınırla birbirinden ayrıldığı görülmektedir. Çalışma alanında görülen bu elektrokinetik kökenli anomaliye neden olarak, bölgede yer alan küçük bir fayın oluşturduğu kırıktan boşalan yeraltı suyunun neden olduğu söylenebilir. Küçük içme içinde ölçülen 23 nolu SP profili ve ACTFAULT programı (Köklü, 1996) kullanılarak oluşturulan model SP eğrisi Şekil 6.19’de verilmektedir. Model eğri oluşturulurken akma (streaming) gerilimi 125 mV, elektrokinetik kaynağın boyu 150 metre, yatay düzlemle yaptığı açı 90° (düşey fay), üst ve alt noktalarının yeryüzüne olan uzaklığı sırası ile 10 ve 50 metre olarak seçilmiştir.



Şekil 6.17 VLF-Elektromanyetik verilerini süzgeçlenmesiyle (Karous-Hjelt) oluşturulan eşdeğer akım yoğunluğu – derinlik kat haritası.

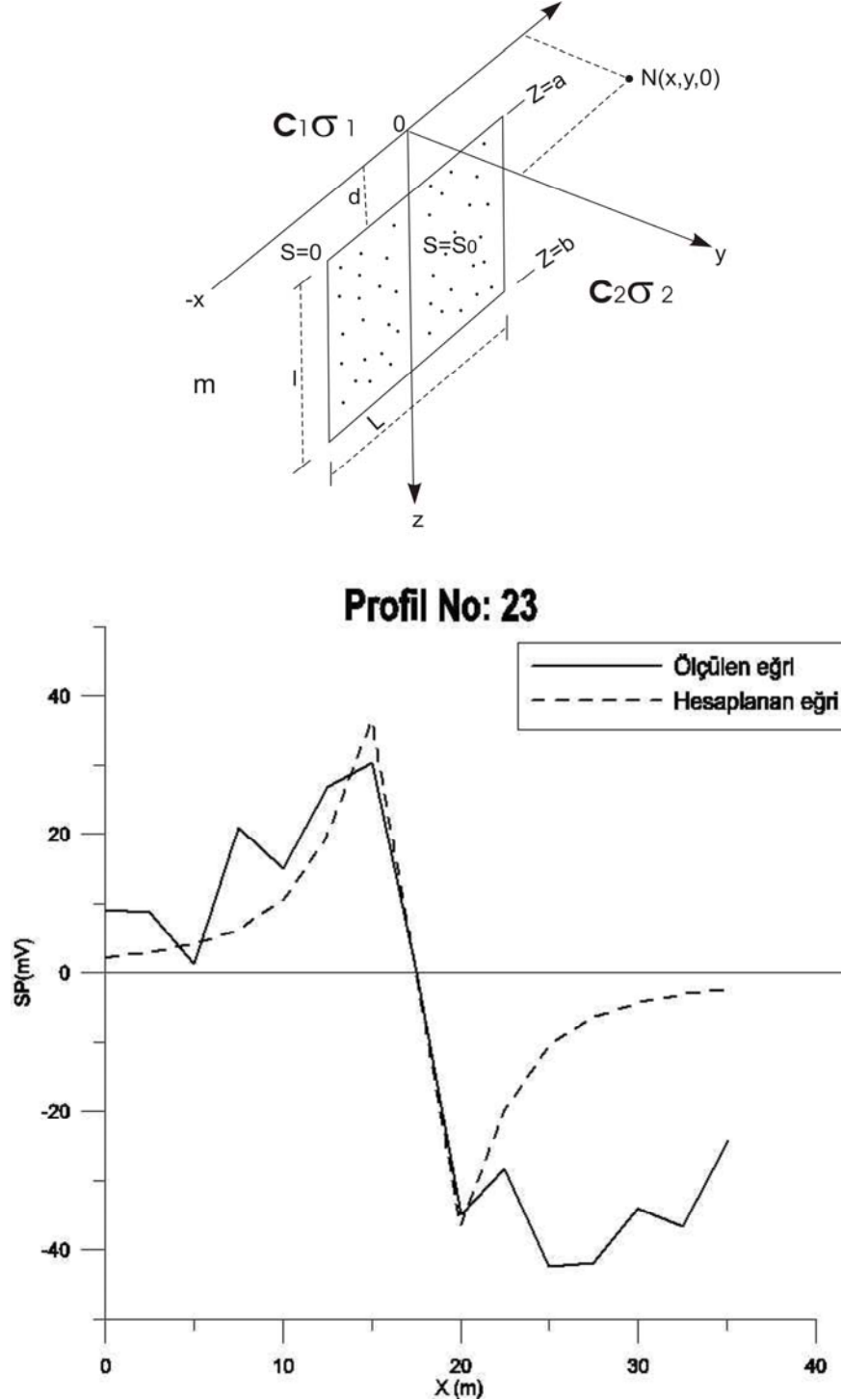
6.7 Tuzla İçmeler Bölgesi Yerelektrik Yapısı

Oluşturulan görünür öz direnç haritaları (Şekil 6.8 ve Şekil 6.10) incelendiğinde kıyı şeridine yakın olan Büyük İçmede öz direnç değerlerinin diğer iki alana oranla daha düşük değerler aldığı (10-35 ohm.m) görülmektedir. İnceleme alanının jeolojik kesiti incelendiğinde (Şekil 6.6) Büyük İçme içinde en üstte kalan birimin alüvyon dolgu



Şekil 6.18 İnceleme alanının doğal gerilim (SP) haritası

tabakası olduğu görülmektedir. İnce taneli malzemelerden oluşan bu birim hidrojeolojik açıdan geçirimli birim olarak tanımlanmıştır. Görünür öz direnç değerlerinin bu birimde oldukça düşük değer almasının sebebi yeraltı suyu içeriğinin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Büyük İçme içindeki DES-3 VE TEM-1



Şekil 6.19 Üstte; düşey arayüzey geometrisi. σ_1 ve σ_2 arayüzeyin iki tarafındaki iletkenlikler. $N(x,y,z)$ = yeryüzünde SP geriliminin hesaplandığı nokta (Çağlar, 1991). Altta; ölçülen SP eğrisi ve hesaplanan model eğri.

verilerinin ortak ters çözümünden (Tablo 6.7) elde edilen ilk tabaka öz direnci 9 ohm.m olarak bulunmuştur. Yine DES verilerinin iki boyutlu modellenmesi ile elde edilen Şekil 6.9 incelendiğinde Büyük İçme içinde öz direncin 3 ohm.m ye kadar düştüğü görülmektedir. Bu sonuçlar Zohdy (1993) tarafından yayınlanan, öz direnç

Tablo 6.9 Sedimanter ortamda öz direnç değerlerinin yeraltı suyunun kalitesine ve tuzluluğuna bağlı olarak değişimi (Zohdy, 1993).

Özdirenç (ohm.m)	Sedimentler	Yorum
0.5-2.0	Çok gözenekli kum veya doygun kil	Deniz suyu, çok tuzlu su; TDS: ~20000 mg/l
2.0-4.5	Gözenekli kum veya doygun kil	Tuzlu su; TDS: ~10000 mg/l
4.5-10.0	Kumlu doygun veya kumlu kil	Orta tuzlu su; TDS: ~10000 – 1500 mg/l
10.0-15.0	Kumlu kil veya kumlu çakıl	Az tuzlu su; TDS: ~5000 – 1500 mg/l
15.0-30.0	Kum, çakıl, biraz kil	Az kaliteli tatlı su; TDS: ~1500 – 700 mg/l
30.0-70.0	Kum, çakıl, daha az kil	Orta kaliteli; TDS: ~100 mg/l
70.0-100.0	Kum, çakıl, kilsiz	İyi kaliteli tatlı su; TDS: küçük
>100.0	Kaba kum, çakıl, kilsiz	Çok iyi kaliteli tuzlu su; TDS: çok küçük

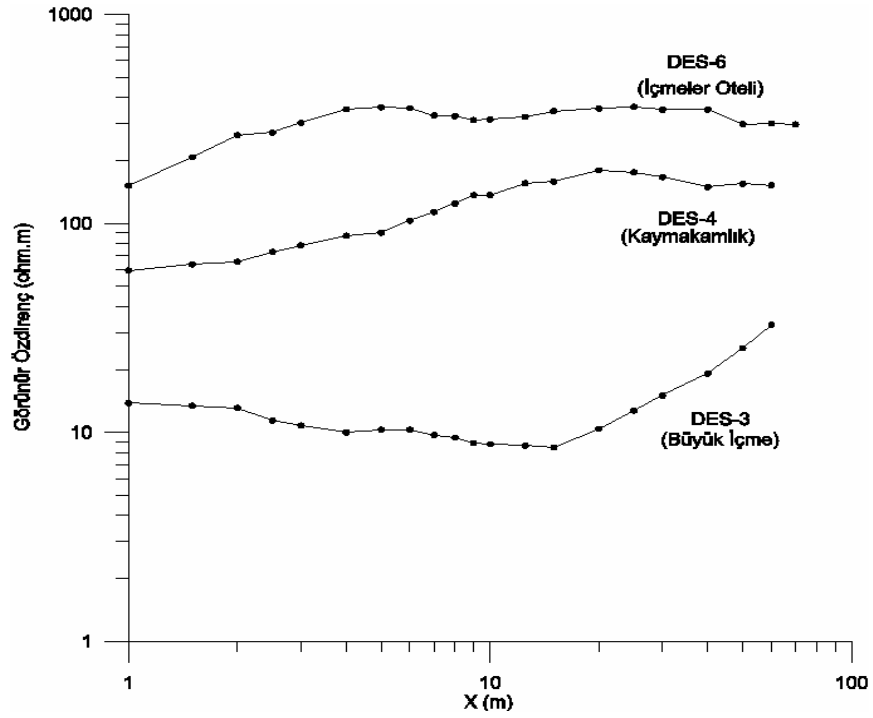
değerlerinin suyun kalitesinin ve tuzluluğun fonksiyonu olarak değişimini gösteren Tablo 6.9 da verilen değerlerle karşılaştırılırsa, tuzlu deniz suyunun alüvyonun iç kısımlarına doğru bir girişimde bulunduğu açık bir biçimde ifade edilebilir. Ortak ters çözüm sonuçlarına göre, alüvyon tabakasının altında öz direnci 150 ohm.m olan ve yaklaşık 70 m kalınlığında bir birim bulunmaktadır. Bu birimin altında ise ortak ters çözüm sonuçlarına göre 2 ohm.m gibi çok düşük öz dirençli bir birim yer almaktadır. Jeolojik kesit incelendiğinde alüvyon tabakasının altında bulunan jeolojik birimin İstinye Formasyonu olarak isimlendirilen kireçtaşı tabakası olduğu ve derinlere doğru uzandığı görülmektedir. Öz direnç değerlerinin bu formasyon içinde 150 ohm.m'den 2 ohm.m ye düşerek bir elektrik sınır meydana getirmesinin sebebi olarak Büyük İçme içinde yer alan K2 sondaj kuyusu gösterilebilir. Bu kuyudan aşırı miktarda yeraltı suyu çekilmesiyle, tuzlu deniz suyunun bu formasyon içine girmesi ve öz direncin düşmesine neden olması muhtemeldir.

Büyük içmenin doğusunda kalan İçmeler Oteli ve Kaymakamlık olarak isimlendirilen alanlarda görünür öz direnç dağılım değerleri incelendiğinde, öz direnç

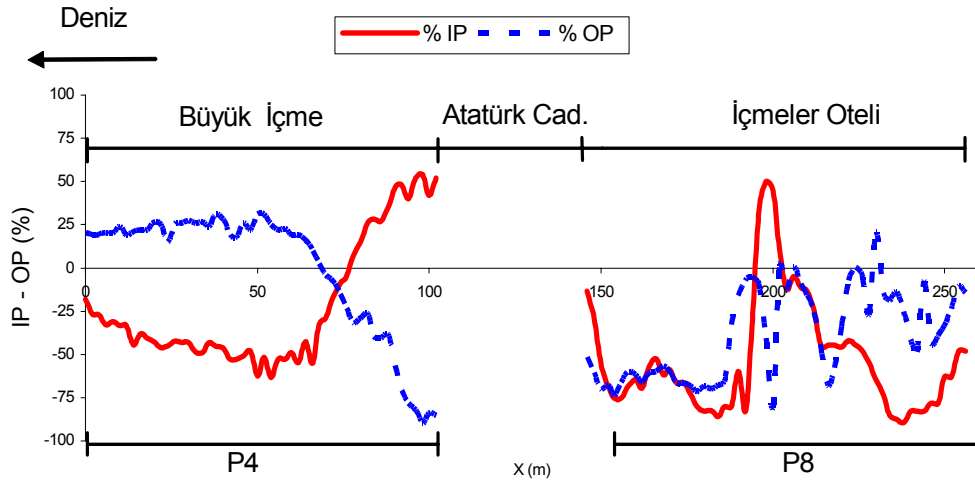
değerlerinin Büyük İçmeye oranla çok daha yüksek değerler aldığı görülmektedir. Jeolojik bilgilerden bu bölgenin İstinye Formasyonu olarak isimlendirilen birimden oluştuğu görülmektedir ve bu birim derinlere doğru uzanmaktadır. Formasyonun üst sıg kısımlarda ölçülen değerlerin derinlere göre daha düşük özdirence sahip olmasının nedeni formasyonun bu kısımlarının bozunmaya (alterasyona) uğramasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca Şekil 6.9 incelendiğinde İçmeler Otelinden Kaymakamlığa doğru uzanan ve görünür özdirenci 50-200 ohm.m arasında olan kısmın İstinye formasyonunun bozunmuş olan kısmını gösterdiği düşünülmektedir. İçmeler Oteli içinde açılan 22 m derinliğindeki K2 kuyusundan su alınması, bu sonuçları destekler nitelikte görünmektedir. Kaymakamlık içinde yapılan DES-4 ve TEM-2 verilerinin ortak ters çözümünden, derinlikle birlikte özdirencin düştüğü görülmüştür. Son tabakanın özdirencinin 21 ohm.m olması, yaklaşık 47 metre derinlikte İstinye Formasyonunu oluşturan kayacın bol çatlaklı olduğunu ve yeraltı suyu içerdiğini düşündürmektedir.

VLF-Elektromanyetik ile elde edilen haritalar incelendiğinde bunların DES yöntemi ile uyumlu olduğu görülmektedir. Akım yoğunluğu değerlerinin Büyük İçme içinde yüksek değerler alması bu alanın İçmeler Oteli ve Kaymakamlık olarak adlandırılan alana oranla daha iletken bir yapıda olduğunu göstermekte ve DES yöntemi ile elde edilen sonuçları desteklemektedir. VLF-Elektromanyetik ve DES yöntemiyle çalışma alanında yapılan ölçümlerden elde edilen eğrilere örnek Şekil 6.20 ve Şekil 6.21’de verilmektedir. Bu grafiklerden iletkenliğin kıyıdan karaya doğru değişimi görülebilmektedir.

Ayrıca SP yöntemi ile doğal gerilim değerlerini oluşturan kaynak mekanizmaları, Kaymakamlık ve Küçük İçme için elektrokinetik kökenli olarak Büyük İçme için ise difüzyon kökenli olduğu düşünülmektedir. Buna sebep olarak Büyük İçmede tuzlu deniz suyunun bu alandaki kaynak ve kuyuları etkilemesi ve dolayısıyla farklı tuz iyonu konsantrasyonuna sahip çözeltilerin iyon alışverişi gösterilebilir. Bu alanın özdirenc değerlerinin oldukça düşük olması ve su analizlerinden elde edilen bilgiler bu sonucu destekler niteliktedir.



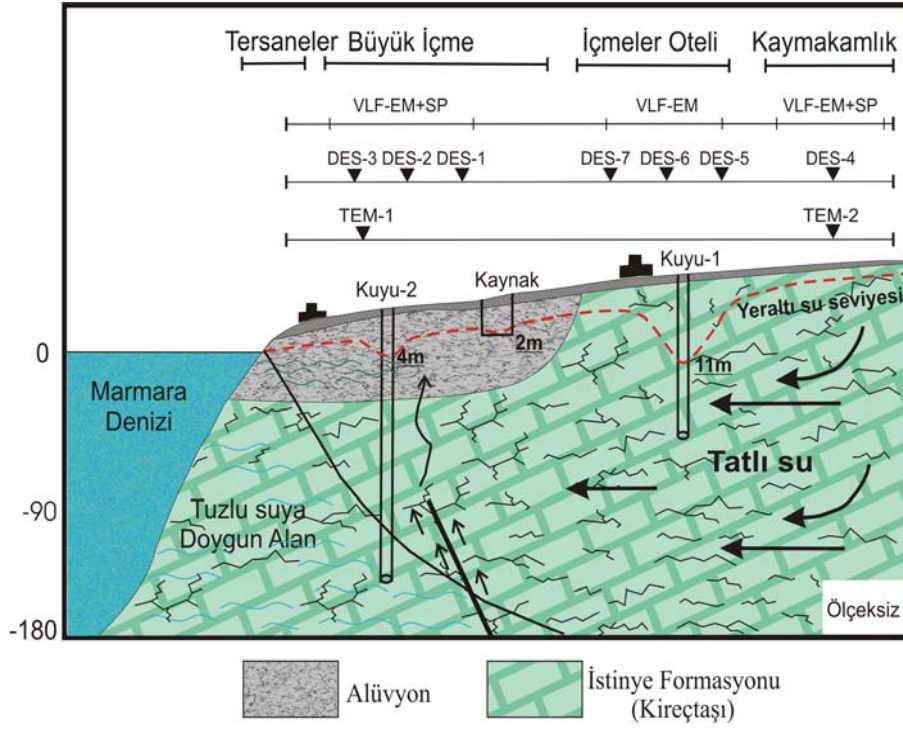
Şekil 6.20 Çalışma alanında ölçülen görünür öz direnç değerlerinin üç farklı istasyondaki Değişimi.



Şekil 6.21 Çalışma alanında 28.5 kHz frekansında ölçülen VLF-EM profillerine örnek

Jeolojik ve jeofizik verilerin değerlendirilmesiyle elde edilen sonuçlardan inceleme alanını temsil eden bir hidrojeolojik model oluşturulmuştur (Şekil 6.22). Bu modelde inceleme alanında jeofizik çalışmalardan elde edilen tatlı - tuzlu su sınırını ayıran arayüzey, yeraltı suyunun akış yönü, bölgede yer alan kaynak ve kuyular ve bu kuyulardaki yer altı su seviyeleri gösterilmektedir. İnceleme alanında haritalanan tuzlu su yayılımının ana kaynağı tuzlu su arayüzeyini kesen ve SP yöntemiyle

ortaya konulan fay şekilde gösterilmiştir. Sonuç olarak bölgede Şekil 6.7 den görüldüğü gibi denizden karaya bir tuzlu su girişi olmadığı izlenmektedir. Dolayısı ile jeofizik yöntemlerle saptanan faydan yayılan tuzlu su, tatlı yeraltı suyu ile karışıp jeolojik birim içinde yayılmaktadır.



Şekil 6.22 Sonuçlardan elde edilen hidrojeolojik model

7. SONUÇLAR VE TARTISMA

Kıyı akiferlerinde yeraltı suyu denize boşalırken tatlı yer altı suyu ile tuzlu deniz suyu arasında yoğunluk farkından ileri gelen arayüzey bulunmaktadır. Kıyı bölgelerinde yeralan akiferlerde açılan sondaj kuyularından kabul edilebilir limitlerin üstünde su çekilmesi, tuzlu deniz suyu ile temiz yeraltı suyu arasındaki statik dengenin bozulmasına neden olmaktadır. Bu durum deniz suyunun karasal alanların iç kesimlerine doğru ilerlemesine sebep olmakta ve temiz yeraltı suyu akiferlerini kirletmektedir. Aynı şekilde tatlı su akiferinin altında bulunan tuzlu su tabakası, kuyularla fazla miktarda tatlı su çekimi yapıldığında yukarı doğru hareket etmekte bu durum su kuyularında tuzlanmalara neden olmaktadır. Uzun yıllardan beri çeşitli araştırmacılar tarafından (Stewart ve Gay, 1986; Yang ve diğ., 1999; Nowroozi ve diğ., 1999) çalışma konusu olan bu çevre probleminin araştırılmasında elektrik ve elektromanyetik yöntemler başarı ile kullanılmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında çalışma alanı olarak seçilen İstanbul Tuzla İçmelerinde tuzlu su yayılımının belirlenmesi amacıyla VLF-Elektromanyetik, TEM, DES ve SP yöntemleri kullanılarak ölçümler alınmıştır. Yapılan bu jeofizik çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular şu şekilde verilmektedir;

1. Kıyıda karaya doğru uzanan profil boyunca yapılan DES ölçümleri sonucunda görünür özdirenç değerlerinin Büyük İçme içinde oldukça düşük değerler (5-20 ohm.m) aldığı görülmektedir (Şekil 6.8). Ölçülen DES verilerin ters çözümünden alüvyon dolgu tabakasının özdirencinin 7-10 ohm.m arasında olduğu görülmüştür. Ayrıca DES eğrilerinin iki boyutlu modellenmesi ile elde edilen yer modelinde bu birimin özdirencinin 3 ohm.m'ye kadar düştüğü görülmüştür. Ortak ters çözüm sonuçlarından yaklaşık kalınlığı 18 metre olarak bulunan bu birim hidrojeolojik açıdan geçirimli birimi oluşturmaktadır. Bir adet sondaj kuyusu ve doğal kaynağın bulunduğu Büyük İçmede özdirenç değerlerinin olması gerekenden daha düşük değerler alması tuzlu deniz suyunun alüvyon dolgu tabakası içinde ilerlemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

2. TEM ve DES yöntemlerinin ortak ters çözümünden, Büyük İçme içinde alüvyon dolgunun altında yeralan ve yaklaşık 90 metre derinliğe kadar 154 ohm.m öz dirence sahip İstinye Formasyonunun bu derinlikten sonra öz direncinin 2 ohm.m ye düşmesi, tuzlu suyun bu formasyon içinde ilerlediğini düşündürmektedir. Bu alanda yeralan ve Kuyu-2 olarak isimlendirilen 160 metre derinliğindeki sondaj kuyusundan aşırı miktarda su çekilmesi, tuzlu deniz suyunun bu formasyon içinde ilerlemesine neden olduğu düşünülmektedir.
3. İçmeler Oteli ve Kaymakamlık olarak tanımlanan alanlar içinde ölçülen görünür öz direnç değerleri incelendiğinde bu iki bölgenin Büyük İçme'ye oranla oldukça dirençli bir yapıda olduğu görülmektedir. Bununla birlikte bu alanlarda derinlikle birlikte görünür öz direnç değerlerinin azaldığı DES ve TEM ölçümlerinden görülmektedir. Kaymakamlık olarak alanda yapılan TEM ve DES ölçümlerinin ortak çözümünden yaklaşık 49 metre derinlikte İstinye Formasyonunun öz direncinin 21 ohm.m'ye düştüğü görülmektedir. Bu derinlikte bu formasyonun karstik ve çatlaklı bir yapıya sahip olduğu, bu nedenle yeraltı suyu içerdiği düşünülmektedir.
4. VLF-Elektromanyetik yöntem ile yapılan ölçümler sonucunda Büyük İçme olarak adlandırılan alanın Kaymakamlık ve İçmeler Oteli olarak adlandırılan alana oranla oldukça iletken bir yapıda olduğu görülmüştür. VLF-Elektromanyetik verilerinin süzgeçlenmesi ile eşdeğer akım yoğunluğu-derinlik kat haritaları elde edilmiş ve sonuçların jeoelektrik yöntemle elde edilen sonuçları desteklediği görülmüştür.
5. Büyük İçme içinde yeralan doğal kaynak ve Kuyu-2 den alınan su numunelerinden ölçülen EC değerlerinden hesaplanan TDS ve laboratuvar çalışmaları sonucunda ölçülen özellikle klor (Cl) iyonu miktarının içme suyu standartlarının oldukça üstünde olduğu görülmüştür. Bu durum jeofizik yöntemlerle elde edilen bulguları desteklemektedir.
6. Sonuç olarak tuzlu deniz suyunun deniz kıyısından itibaren karaya doğru yaklaşık 180 metre kadar ilerlediği ve Büyük İçme içinde yeralan kaynak ve kuyuları etkilediği toplanan jeofizik verilerden görülmektedir.
7. Bu çalışma ile elektrik ve elektromanyetik yöntemlerin tuzlu su girişiminin neden olduğu çevre kirliliği problemlerinin araştırılmasında kullanılabileceği görülmektedir. Tuzlu su girişimi ile oluşan düşük öz dirençli bölge ile temiz

yeraltı suyu içeren daha yüksek öz dirençli bölge arasındaki sınır, bu yöntemlerin kullanılması ile belirlenebilmektedir.

KAYNAKLAR

- Barut, İ. F.**, 1993. İstanbul Tuzla İçmelerinin Hidrojeolojik İncelemesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Benson, A. L., Payne, K. L., Stubben, M. A.**, 1997. Mapping groundwater contamination using DC resistivity and VLF geophysical methods – A case study, *Geophysics*, **62**, 80-86.
- Buselli, G., Lu, K.**, 2001. Groundwater contamination monitoring with multichannel electrical and electromagnetic methods, *Journal of Applied Geophysics*, **48**, 11 – 23.
- Corwin, R. F., Payne K. M.**, 1990. Self-Potential methods to investigate the water seepage flow through earthfill embankment dams. Geotechnical and Engineering Geophysics, Vol. 1, *SEG series: Investigations in Geophysics*, No. 5.
- Corwin, R. F., Hoover, B. D.**, 1979. The self - potential method in geothermal exploration. *Geophysics*, **44**, 226-245.
- Çağlar, İ.**, 1991. Jeofizikte Doğal Polarizasyon (SP) Yöntemi, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası.
- Erguvanlı, K., ve Yüzer E.**, 1984. Yeraltı Suları Jeolojisi (Hidrojeoloji), İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası.
- Fischer, G., LeQuang, B. V. And Müller, I.**, 1983. VLF ground surveys, a powerful tool for the study of shallow two dimensional structures: *Geophysical Prospecting*, **31**, 977-991.
- Fitterman, D. V., and 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.
- Goldman, M. M., Plooy D. A. And Eckard, M.**, 1994. On reducing ambiguity in the interpretation of transient electromagnetic sonding data. *Geophysical Prospecting*, **42**, 3-25.
- Goldman, M. M., Gilad, D., Ronen, A., and Melhoul A.** 1991. Mapping of seawater intrusion into the coastal aquifer of Israel by the time domain electromagnetic method. *Geoexploration* **28**, 152-175.
- Guerin, R., Benderitter, Y.**, 1995. Shallow karst exploraion using MT-VLF and DC resistivity methods, *Geophysical Prospecting*, **43**, 635-653.
- Hoekstra, P., Harthill, N., Blohm M. and Phillips D. R.**, 1996. Definition of a critical confining zone using surface geophysical methods, *SAGEEP* 1996, 387-391.

- Kaikkonen, P.**, 1979. Numerical VLF modelling, *Geophysical Prospect*, **27**, 815-835.
- Kaufman, A. A., and Keller G. V.**, 1983. Frequency and transient soundings, *Elsevier Publishing Company*.
- Karlık, G. And Kaya, M. A.**, 2000. 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., and Hjelt, S. E.**, 1983. Linear filtering of VLF dip angel measurements, *Geophysical Prospecting*, **31**, 782-794.
- Knight, J. H., and Raiche, A. P.**, 1982. Transient Electromagnetic Calculations using the Gaver-Stehfest inverse Laplace transform method, *Geophysics*, **47**, 47-51.
- Koray, M.**, 2003. Avcılar Bölgesi Sağ Yer altı Yapısının Jeofizik Yöntemlerle Araştırılması, İTÜ Bitirme Tezi.
- Köklü, A. K.**, 1996. Aktif faylar için SP anomalilerinin hesaplanması, İTÜ Bitirme Tezi.
- 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 environmental and engineering studies, www.geometrics.com.
- 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.**, 1994. Principles and application of time domain electromagnetic techniques for resistivity sounding, *Geonics Limited Technical Notes*, TN-27.
- 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**.
- McNeill, J. D. and Labson, V.**, 1991. Geological mapping using VLF Radio Fields. *In* Ward SH, Ed., *Electromagnetic methods in applied geophysics – Investigations in Geophysics*, Volume 3: *Soc. of Expl. Geophysics*.
- 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., Fenning, P. J., and Hawkins, T. R. W.**, 2000. Evaluation of small-loop transient electromagnetic soundings to locate the Sherwood Sandstone aquifer and confining formations at well sites in the Vale of York, England, *Journal of Applied Geophysics*, **44**, 217-236.
- Michel, S., and Zlotnicki, J.**, 1998. Self-potential and magnetic surveying of Lafournaise volcano correlations with faulting, fluid circulation, and eruptions, *Journal of Geophysical Research*, **94**, 12449-12461.
- Milsom, J.**, 1996. *Field Geophysics*, John Wiley & Sons.

- Nowroozi, A. A., Horrocks, S. B., Henderson, P.,** 1999. Saltwater intrusion into the freshwater aquifer in the eastern shore of Virginia: a reconnaissance electrical resistivity survey, *Journal of Applied Geophysics*, **42**, 1-22.
- Ogilvy, A. A., Ayed, M. A., ve Bogoslovsky, V. A.,** 1969. Geophysical studies of water leakages from reservoirs, *Geophysics*, **17**, 36-62.
- Paal, G.,** 1965. Ore prospecting based on VLF-radio signals, *Geoexploration*, **3**, 139-147.
- 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.
- 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.
- Richards, R. T., Troester, J. W., and Martinez, M. I.,** 1995. A comparision of electrical techniques used in reconnaissance of the groundwater resources under the coastal plain of the Isla de Mona, Puerto Rico, *SAGEEP 1995*, 251-260.
- Sang-Ho, Lee., et all.,** 2002. Geochemical and geophysical monitoring of salinewaterintrusion in Korean paddy fields, *Environmental Geochemistery and Health*, **24**, 277-291.
- Sorensen, K. I.,** 1996. Detailed regional hydrogeophysical investigations – The Sollbjerg Case, *SAGEEP 1996*, 343-351.
- Spies, B. R., and Frischknecht, F. C.,** 1988. Electromagnetic Sounding, in: Nabighian, M. N., *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics-Application, Part A, Soc. of Expl. Geophysics.*, **2**.
- Stewart, M., and Gay, M.C.** 1986, Evaluation of transient electromagnetic soundings for deep detection of conductive fluids: *Ground Water*, **24**, 351-356.
- Türkoğlu, E.,** 2003. Geçici elektromanyetik ve doğru akım elektrik öz direnç verilerinin ortak ters çözümü: Avcılar örneği, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yalçın, T., ve Tufan, S.,** 2003. İstanbul Tuzla İçmeler ve çevresinin Hidrojeolojisi (yayınlanmamış).
- 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.

Zohdy, A. A. R., Martin, P., Bisdorf, R. J., 1993. A study of seawater intrusion using direct-current soundings in the southeastern part of the Oxnard Plain, California. *Open-file Report 93-524*. U.S. Geological Survey.

ÖZGEÇMİŞ

Mehmet Recep, 1979 yılında İstanbul’da doğdu. İlkokulu, 1991 yılında Şişli 19 Mayıs İlköğretim Okulunda tamamladı. Şişli Lisesi’nin orta okul bölümünü bitirdikten sonra, Sakıp Sabancı Lisesi’nden 1997 yılında mezun oldu. Aynı yıl İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümünde lisans öğrenimine başladı. Buradan 2001 yılında jeofizik mühendisi olarak mezun olduktan sonra, aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans öğrenimine başladı. Bu tez ile birlikte jeofizik yüksek mühendisi olarak mezun olmaktadır.