

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GEÇİCİ ELEKTROMANYETİK VE DOĞRU AKIM ELEKTRİK  
ÖZDİRENÇ VERİLERİNİN ORTAK TERS ÇÖZÜMÜ : AVCILAR ÖRNEĞİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Müh. Erşan TÜRKOĞLU**

**Anabilim Dalı : JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ**

**Programı : JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ**

**NİSAN 2003**

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GEÇİCİ ELEKTROMANYETİK VE DOĞRU AKIM ELEKTRİK  
ÖZDİRENÇ VERİLERİNİN ORTAK TERS ÇÖZÜMÜ : AVCILAR ÖRNEĞİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Müh. Erşan TÜRKOĞLU  
Enstitü No : 505991042**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 16 Mayıs 2003  
Tezin Savunulduğu Tarih : 17 Nisan 2003**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Gülçin ÖZÜRLAN**

**Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. İlyas ÇAĞLAR**

**Yrd. Doç. Dr. Emin ULUGERGERLİ (A. Ü.)**

**NİSAN 2003**

## ÖNSÖZ

Geçici elektromanyetik ve doğru akım öz direnç verilerinin ortak ters çözümü hakkında bir tez çalışması yapmamı öneren, tez boyunca ilgi, bilgi ve tecrübesi ile bana yol gösteren ve bu tezin tamamlanması için gerekli koşulları sunan sayın hocam Doç. Dr. Gülçin Özürlan'a sonsuz teşekkürler.

Tezin savunulmasından sonra yaptıkları katkı ve yönlendirmelerinden dolayı Sayın Prof. Dr. İlyas Çağlar'a, geçici elektromanyetik yöntemi konusunda tecrübelerini benimle paylaşan, Avcılar'da alınan ölçümlerde yardımcı olan ve savunma sonrasında eleştiri ve önerileri ile tezime katkıda bulunan Sayın Yrd. Doç. Dr. Emin Uluggerli'ye, ters çözüm ve sinyal analizi konularında yardımlarını aldığım Sayın Doç. Dr. Argun Kocaoğlu ve Doç. Dr. Abdullah Karaman'a teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin her aşamasında elde ettiğim bulguları analiz etmemde bana yardımcı olan ve düşünceleriyle tezin şekillenmesinde katkısı olan değerli arkadaşım Volkan Tuncer'e, TÜBİTAK tarafından desteklenen 101Y074 no'lu proje çerçevesinde yapılan, arazi çalışmalarına katılan Ayça Ardalı, Mehmet Recep ve Sarper Geren'e, veri işlem aşamasında verilerin hazırlanması ve jeolojik bilginin derlenmesini sağlayan Müge Koray'a, Avcılar bölgesinde yapılan doğru akım öz direnç verilerini ve araştırma sondajı loglarını sağlayan Avcılar Belediyesi'ne, ayrıca İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezlerini Destekleme Programı tarafından sağlanan maddi desteğe teşekkür ederim.

Hayatım boyunca beni her konuda destekleyen ve bu tezin tamamlanabilmesi için maddi manevi her türlü desteği sağlayan ailem, eşim ve tüm dostlarım sağolsunlar.

Nisan 2003

Erşan TÜRKOĞLU

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                                       | <b><u>Sayfa no</u></b> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| <b>KISALTMALAR</b>                                                                                    | iii                    |
| <b>TABLO LİSTESİ</b>                                                                                  | iv                     |
| <b>ŞEKİL LİSTESİ</b>                                                                                  | v                      |
| <b>SEMBOL LİSTESİ</b>                                                                                 | vii                    |
| <b>ÖZET</b>                                                                                           | ix                     |
| <b>SUMMARY</b>                                                                                        | x                      |
| <b>1. GİRİŞ</b>                                                                                       | 1                      |
| <b>2. DOĞRU AKIM ÖZDİRENÇ YÖNTEMİ</b>                                                                 | 4                      |
| 2. 1 Ölçüm Düzenekleri                                                                                | 5                      |
| 2. 2 Yatay Tabakalı Ortamda Gerilim Dağılımı                                                          | 6                      |
| 2. 3 Görünür Özdirencin Hesaplanması                                                                  | 9                      |
| 2. 4 Araştırma Derinliği                                                                              | 10                     |
| <b>3. GEÇİCİ ELEKTROMANYETİK YÖNTEM</b>                                                               | 11                     |
| 3. 1 Geçici Elektromanyetik Kuram                                                                     | 11                     |
| 3. 1. 1 Görünür Özdirencin Hesaplanması                                                               | 17                     |
| 3. 1. 2 Yokuş Zamanı ve Araştırma Derinliği                                                           | 18                     |
| 3. 1. 3 Ölçüm Düzenekleri                                                                             | 20                     |
| 3. 2 TEM Ölçümlerinde Verici Halka Seçimi                                                             | 21                     |
| <b>4. TERS ÇÖZÜM</b>                                                                                  | 23                     |
| 4. 1 En Küçük Kareler Yöntemi                                                                         | 24                     |
| 4. 1. 1 Tekil Değer Ayrışımı Yöntemi ile En Küçük Kareler Çözümü                                      | 25                     |
| 4. 1. 2 Sönümlü En Küçük Kareler Yöntemi                                                              | 26                     |
| 4. 1. 3 Ağırlıklı Sönümlü En Küçük Kareler Çözümü                                                     | 27                     |
| 4. 2 Ortak Ters Çözüm                                                                                 | 28                     |
| 4. 3 Ters Çözüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi                                                        | 29                     |
| <b>5. YAPAY VERİLERİN TERS ÇÖZÜMÜ</b>                                                                 | 31                     |
| 5. 1 H Tipi Yer Modeli                                                                                | 32                     |
| 5. 2 K Tipi Yer Modeli                                                                                | 35                     |
| 5. 3 Yapay Veriler ile Halka Boyu Etkisinin İncelenmesi                                               | 39                     |
| <b>6. GEÇİCİ ELEKTROMANYETİK VE DOĞRU AKIM ÖZDİRENÇ VERİLERİNİN ORTAK TERS ÇÖZÜMÜ: AVCILAR ÖRNEĞİ</b> | 42                     |
| 6. 1 Avcılar Bölgesi Jeolojisi                                                                        | 42                     |
| 6. 2 Avcılar Bölgesi TEM Verilerinin Özellikleri                                                      | 46                     |
| 6. 3 Avcılar Bölgesi TEM ve VES verilerinin Değerlendirilmesi                                         | 47                     |
| 6. 3. 1 Görünür Özdirenc ve Yaklaşık Derinlik                                                         | 47                     |
| 6. 3. 2 TEM ve VES verilerinin Ters Çözümü                                                            | 49                     |

|                                         |    |
|-----------------------------------------|----|
| 6. 4 Avcılar Bölgesi Yerelektrik Yapısı | 54 |
| <b>7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA</b>          | 61 |
| <b>KAYNAKLAR</b>                        | 65 |
| <b>EKLER</b>                            | 68 |
| <b>ÖZGEÇMİŞ</b>                         | 76 |

## **KISALTMALAR**

|              |                                          |
|--------------|------------------------------------------|
| <b>AC</b>    | : Alternating Current                    |
| <b>AMT</b>   | : Audio Magnetotellurics                 |
| <b>CSEM</b>  | : Controlled Source Electromagnetics     |
| <b>DC</b>    | : Direct Current                         |
| <b>emk</b>   | : Elektromotor Kuvvet                    |
| <b>LOTEM</b> | : Long Offset Transient Electromagnetics |
| <b>MT</b>    | : Magnetotellurics                       |
| <b>RVR</b>   | : Roving Vector Receiver                 |
| <b>TDEM</b>  | : Time Domain Electromagnetics           |
| <b>TEM</b>   | : Transient Electromagnetic Method       |
| <b>TOT</b>   | : Turn Off Time                          |
| <b>VES</b>   | : Vertical Electrical Sounding           |

## TABLO LİSTESİ

|                                                                                                                                                                                                                                                                                       | <b><u>Sayfa No</u></b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| <b>Tablo 5. 1</b> : V matrisinin sayısal değerlerine karşılık gelen halka boyları.....                                                                                                                                                                                                | 32                     |
| <b>Tablo 5. 2</b> : H tipi yapay VES verisi ters çözüm sonuçları.....                                                                                                                                                                                                                 | 34                     |
| <b>Tablo 5. 3</b> : H tipi yapay TEM verisi ters çözüm sonuçları.....                                                                                                                                                                                                                 | 34                     |
| <b>Tablo 5. 4</b> : H tipi yapay TEM ve VES verilerinin ortak ters çözüm sonuçları.....                                                                                                                                                                                               | 35                     |
| <b>Tablo 5. 5</b> : K tipi yapay VES verisi ters çözüm sonuçları.....                                                                                                                                                                                                                 | 37                     |
| <b>Tablo 5. 6</b> : K tipi yapay TEM verisi ters çözüm sonuçları.....                                                                                                                                                                                                                 | 37                     |
| <b>Tablo 5. 7</b> : K tipi yapay TEM ve VES verilerinin ortak ters çözüm sonuçları.....                                                                                                                                                                                               | 38                     |
| <b>Tablo 5. 8</b> : H tipi (solda) ve K tipi (sağda) yapay yer modelleri ile yapılan ortak ters çözümün model ayrımlılık matrisinin köşegen değerleri kullanılarak incelenmesi.....                                                                                                   | 39                     |
| <b>Tablo 5. 9</b> : Farklı büyüklükteki verici halkalar ile üretilen K tipi yapay TEM verilerinin ters çözüm sonuçları.....                                                                                                                                                           | 40                     |
| <b>Tablo 5. 10</b> : Farklı büyüklükteki verici halkalar ile üretilen K tipi yapay TEM verilerinin ters çözüm sonuçlarının model ayrımlılık değerleri ( <b>R</b> ) ile karşılaştırılması. İçi dolu siyah halkalar model ayrımlılık matrisinin köşegen değerlerini göstermektedir..... | 40                     |
| <b>Tablo 6. 1</b> : T-1 ve D-1 verilerinin ortak ters çözüm sonuçları.....                                                                                                                                                                                                            | 52                     |
| <b>Tablo 6. 2</b> : T-7 ve D-7 verileri için model ayrımlılık matrisinin köşegen değerleri ve ortak ters çözümün sonuçlar üzerindeki etkisi.....                                                                                                                                      | 55                     |
| <b>Tablo 6. 3</b> : T-7 ve D-7 verilerinin ortak ters çözüm sonuçları.....                                                                                                                                                                                                            | 56                     |
| <b>Tablo 6. 4</b> : Tablo 6. 4 Avcılar'da görülen jeolojik birimlerin öz direnç aralığı.....                                                                                                                                                                                          | 60                     |
| <b>Tablo A. 2</b> : SIROTEM MK 3 cihazı kontrol ünitesi tarafından sağlanan dört farklı zaman serisi.....                                                                                                                                                                             | 72                     |

## ŞEKİL LİSTESİ

|                                                                                                                                                                                                                                             | <b><u>Sayfa No</u></b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| <b>Şekil 2. 1</b> : Schlumberger ve Wenner elektrot dizilimlerinin şematik gösterimi. A ve B akım elektrotlarını, M ve N gerilim elektrotlarını göstermektedir.....                                                                         | 5                      |
| <b>Şekil 2. 2</b> : Schlumberger elektrot dizilimi. AB/2, akım elektrotları arasındaki uzaklığın, MN/2 gerilim elektrotları arasındaki uzaklığın yarısını gösterir.....                                                                     | 9                      |
| <b>Şekil 3. 1</b> : Akımın kesilmesinden sonra farklı zamanlar için uyartım akımlarının yeriçindeki yayınımları ( McNeill, 1990 ).....                                                                                                      | 12                     |
| <b>Şekil 3. 2</b> : a) Verici halkadaki akım. b) Birincil manyetik alanın davranış biçimi. c) Birincil elektrik alanın davranış biçimi. d) Yeryüzünde ölçülen ikincil manyetik alan.....                                                    | 12                     |
| <b>Şekil 3. 3</b> : Geçici elektromanyetik yöntemin arazi uygulamasının genel olarak gösterimi.....                                                                                                                                         | 14                     |
| <b>Şekil 3. 4</b> : Manyetik alanın derinlik ile değişimi.....                                                                                                                                                                              | 15                     |
| <b>Şekil 3. 5</b> : Verici halkada ölçülen gerilim değerinin ortamın öz direnci ile değişimi.....                                                                                                                                           | 16                     |
| <b>Şekil 3. 6</b> : Homojen bir ortam (10 Ohm.m) için erken zaman ve geç zaman asimtotik eğrileri.....                                                                                                                                      | 19                     |
| <b>Şekil 3. 7</b> : TEM yöntemi ile yapılan ölçümlerde en çok kullanılan ölçüm düzenekleri. a) Tek halka (Single loop). b) İç içe iki halka (Coincident loop). c) Merkezi halka (Central loop). d) Ayrı ayrı iki halka (Separate loop)..... | 21                     |
| <b>Şekil 5. 1</b> : Ortak ters çözümün şematik gösterimi.....                                                                                                                                                                               | 31                     |
| <b>Şekil 5. 2</b> : H tipi yer model için oluşturulan yapay VES ve TEM verileri ile yapılan ayrı ayrı ters çözüm sonucunda bulunan yer modelleri.....                                                                                       | 33                     |
| <b>Şekil 5. 3</b> : K tipi yer model için oluşturulan VES ve TEM verileri ile yapılan ayrı ayrı ters çözüm sonucunda bulunan yer modelleri.....                                                                                             | 36                     |
| <b>Şekil 5. 4</b> : H tipi (solda) ve K tipi (sağda) yapay TEM ve VES verilerinin ayrı ayrı ve ortak ters çözüm sonuçlarında bulunan yer modellerinin karşılaştırılması.....                                                                | 36                     |
| <b>Şekil 5. 5</b> : Farklı büyüklükteki verici halkalar ile üretilen K tipi yapay TEM verileri ve ters çözüm sonuçları.....                                                                                                                 | 40                     |
| <b>Şekil 6. 1</b> : Avcılar jeoloji haritası (İBB, 2001).....                                                                                                                                                                               | 43                     |
| <b>Şekil 6. 2</b> : Avcılar bölgesinde ölçülmüş VES, açılmış mekanik sondajlar ve bu çalışma kapsamında ölçülen TEM yerlerini gösteren lokasyon haritası.....                                                                               | 43                     |
| <b>Şekil 6. 3</b> : Avcılar ve çevresinin genelleştirilmiş stratigrafik kesiti (Yüzer ve Eyüboğlu, 1998'den tekrar çizilmiştir).....                                                                                                        | 44                     |



|                                                                                                                                                                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 6. 4</b> : VES verileri ile elde edilen yaklaşık A-A'-A'' doğrultusundaki görünür öz direnç kesidi.....                                                                                                                                                                         | 48 |
| <b>Şekil 6. 5</b> : TEM verileri ile elde edilen yaklaşık A-A'-A'' doğrultusundaki görünür öz direnç kesidi.....                                                                                                                                                                         | 48 |
| <b>Şekil 6. 6</b> : Avcılar bölgesinde ölçülen TEM verilerinden elde edilen görünür öz direnç kat haritaları. Kat haritalarının sol taraflarında örnekleme zamanı (time window) ve sağ taraflarında bu örnekleme zamanının karşılık geldiği yaklaşık derinlik değerleri verilmiştir..... | 50 |
| <b>Şekil 6. 7</b> : T-1 ve D-1 istasyonlarında ölçülen verilerin ortak ters çözümü ve bulunan yer modeli.....                                                                                                                                                                            | 51 |
| <b>Şekil 6. 8</b> : T-1 ve D-1 verilerinin ayrı ayrı ve ortak ters çözüm sonuçları ile bulunan yer modelleri.....                                                                                                                                                                        | 52 |
| <b>Şekil 6. 9</b> : Farklı başlangıç modelleri için D-5 verisi ile yapılan ters çözümde bulunan yer modelleri.....                                                                                                                                                                       | 53 |
| <b>Şekil 6. 10</b> : T-5 ve D-5 istasyonlarında ölçülen verilerin ortak ters çözümü ve bulunan yer modeli.....                                                                                                                                                                           | 54 |
| <b>Şekil 6. 11</b> : T-7 ve D-7 istasyonlarında ölçülen verilerin ortak ters çözümü ve bulunan yer modeli.....                                                                                                                                                                           | 56 |
| <b>Şekil 6. 12</b> : T-5 ve D-5 verilerinin ortak ters çözümü ile bulunan yer modeli (solda) ile Avcılar ve çevresinin genelleştirilmiş stratigrafik kesitinin (Yüzer ve Eyüboğlu, 1998'den tekrar çizilmiştir) karşılaştırılması.....                                                   | 57 |
| <b>Şekil 6. 13</b> : Avcılar bölgesinde kuzeybatı-güneydoğu doğrultusunda, A-A'-A'' hattı boyunca TEM verilerinin ters çözümü ile elde edilen yerelektrik kesiti.....                                                                                                                    | 58 |
| <b>Şekil 6. 14</b> : Avcılar bölgesinde kuzeybatı-güneydoğu doğrultusunda, A-A'-A'' hattı boyunca TEM ve VES verilerinin ortak ters çözümü ile elde edilen yerelektrik kesiti.....                                                                                                       | 59 |
| <b>Şekil A. 1</b> : SIROTEM MK 3 cihazının alıcı ve verici kontrol ünitesi.....                                                                                                                                                                                                          | 69 |
| <b>Şekil A. 2</b> : Çok sarımlı alıcı (SIROTEM RVR).....                                                                                                                                                                                                                                 | 71 |

## SEMBOL LİSTESİ

|                                       |                                                               |
|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| <b>A</b>                              | : Yüzey alanı ( $m^2$ )                                       |
| <b>A</b>                              | : Alıcı halkanın efektif alanı ( $m^2$ )                      |
| <b>A<sub>0</sub></b>                  | : Katmanlı ortama ait çekirdek fonksiyonu                     |
| <b>A<sub>ij</sub></b>                 | : Kısmi türevler dizeyi                                       |
| <b>a</b>                              | : Verici halkanın yarıçapı (m)                                |
| <b>B</b>                              | : Manyetik akı (Weber/ $m^2$ )                                |
| <b>b</b>                              | : Verici halkanın yarıçapı (m)                                |
| <b><math>\beta</math></b>             | : Sönüm sayısı                                                |
| <b><math>\Delta V</math></b>          | : Gerilim farkı (V)                                           |
| <b><math>\Delta x</math></b>          | : Model parametrelerine uygulanacak düzeltmeleri içeren dizey |
| <b><math>\Delta y</math></b>          | : Gözlemsel veriler ile kuramsal veriler arasındaki fark      |
| <b><math>\delta_{eff}^{DC}</math></b> | : Yaklaşık derinlik (m)                                       |
| <b>E</b>                              | : Elektrik alan şiddeti (mV/km)                               |
| <b>f</b>                              | : Birinci matematiksel ifade                                  |
| <b>g</b>                              | : İkinci matematiksel ifade                                   |
| <b>H</b>                              | : Manyetik alan şiddeti ( $\gamma$ )                          |
| <b>H</b>                              | : Yalancı ters dizey                                          |
| <b>h</b>                              | : kalınlık (m)                                                |
| <b>I</b>                              | : Akım (A)                                                    |
| <b>I</b>                              | : Birim dizey                                                 |
| <b>J</b>                              | : Akım yoğunluğu (A/ $m^2$ )                                  |
| <b>J<sub>0</sub></b>                  | : Sıfırıncı dereceden Bessel fonksiyonu                       |
| <b>J<sub>1</sub></b>                  | : Birinci dereceden Bessel fonksiyonu                         |
| <b>K</b>                              | : Kuzey                                                       |
| <b>K(<math>\lambda</math>)</b>        | : Slichter çekirdek fonksiyonu                                |
| <b><math>\Lambda</math></b>           | : Özdeğerleri içeren dizey                                    |
| <b>L</b>                              | : Tabakanın boyu (m)                                          |
| <b>L</b>                              | : Laplace transformu                                          |
| <b>L</b>                              | : Akım elektrotlarının orta noktaya olan uzaklığı (m)         |
| <b>l</b>                              | : Gerilim elektrotlarının orta noktaya olan uzaklığı (m)      |
| <b>L<sub>V</sub></b>                  | : Verici halkanın indüktansı (Henry)                          |
| <b><math>\lambda</math></b>           | : Keyfi bir sabit                                             |
| <b><math>\mu</math></b>               | : Manyetik geçirgenlik (Henry/m)                              |
| <b>P</b>                              | : Katman kalınlıkları ve öz dirençleri içeren dizey           |
| <b>p</b>                              | : Laplace değişkeni                                           |
| <b>R</b>                              | : Direnç (Ohm)                                                |
| <b>R</b>                              | : Model ayrımlılık dizeyi                                     |
| <b>r</b>                              | : Akım kaynağına olan uzaklık (m)                             |
| <b><math>R(x_j-x_j^o)</math></b>      | : Yüksek dereceli türevler                                    |
| <b><math>\rho</math></b>              | : Öz direnç (Ohm.m)                                           |
| <b><math>\rho_a</math></b>            | : Görünür öz direnç (Ohm.m)                                   |

|                                     |                                                          |
|-------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| <b>S</b>                            | : Veri ayrımlılık düzeyi                                 |
| <b><math>\Theta(\lambda)</math></b> | : Stefanescu çekirdek fonksiyonu                         |
| <b><math>\sigma_n</math></b>        | : Verilerin hata oranı                                   |
| <b>T</b>                            | : Sönüm katsayıları düzeyi                               |
| <b><math>t</math></b>               | : Gecikme zamanı (s)                                     |
| <b><math>\tau</math></b>            | : Zaman sabiti                                           |
| <b><math>\tau_m</math></b>          | : Model parametrelerinin hata oranları                   |
| <b>U</b>                            | : Kısmi diferansiyel denklemin özel çözümlerinden birisi |
| <b>U</b>                            | : Veri özyöney düzeyi                                    |
| <b>V</b>                            | : Alıcı halkada oluşan gerilim farkı (V)                 |
| <b>V</b>                            | : Parametre özyöney düzeyi                               |
| <b>W</b>                            | : Kısmi diferansiyel denklemin özel çözümlerinden birisi |
| <b><math>\chi</math></b>            | : Çakışma ölçütü                                         |
| <b><math>x_j</math></b>             | : Model parametrelerini                                  |
| <b><math>y_i</math></b>             | : Gözlemsel veriler                                      |
| <b>Z</b>                            | : Empedans                                               |
| <b>z</b>                            | : Derinlik                                               |

## GEÇİCİ ELEKTROMANYETİK VE DOĞRU AKIM ELEKTRİK ÖZDİRENÇ VERİLERİNİN ORTAK TERS ÇÖZÜMÜ : AVCILAR ÖRNEĞİ

### ÖZET

Elektrik ve elektromanyetik yöntemler sığ jeolojik yapı araştırmalarında, yaygın olarak kullanılmaktadır. İki yöntemin ölçüm tekniklerinin birbirinden farklı olmasından dolayı her iki yöntemin karşılıklı üstünlükleri ve zayıflıkları mevcuttur. Bir boyutlu ters çözüm uygulamalarında, çözümün doğruluğu, verinin yanal süreksizliklerden etkilenmesi ve gürültü içeriğine göre değişmektedir. Bunun yanında, yöntemlerin uygulanmasında en önemli problemlerden biri olan eşdeğerlik sorunu, elektrik ve elektromanyetik verilerin ortak değerlendirilmesi ile azaltılmaktadır.

Geçici Elektromanyetik Yöntem (Transient Electromagnetic Method – TEM) ve Doğru Akım Öz direnç Yöntemi (Direct Current Resistivity Method – DC Öz direnç) ölçülen büyüklüklerin ve ölçme yöntemlerinin farklı fiziksel esaslara dayanmasından dolayı farklı iki jeofizik yöntemdir. Ancak elde edilen yerelektrik bilgiler doğrudan yer katmanlarının öz direnci ile ilişkilidir. DC öz direnç yönteminde, öz direncin derinlik ile değişiminin belirlenebilmesi amacıyla Düşey Elektrik Sondaj (Vertical Electrical Sounding – VES) ölçümleri yapılmaktadır. Dolayısıyla, TEM ve VES öz direnç verilerinin ortak çözümü, sonuçları iyileştirmekte ve eşdeğerliği en aza indirmektedir. Ayrıca TEM yönteminin göreceli olarak yanal süreksizliklerden daha az etkilenmesinden dolayı çözümler bir boyutlu kavramına daha uygun olmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, TEM ve VES verilerini sönümlü en küçük kareler ters çözüm yöntemini kullanarak ayrı ayrı ve ortak ters çözümlerini yapabilecek bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Bu program kullanılarak TEM ve VES verilerinin ayrı ayrı çözümleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar ortak çözüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Öncelikle, yapay veriler üzerinde denenilen yöntem, 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi sonrasında yer yapısı ile gündeme gelen Avcılar bölgesinde uygulanmıştır. Çalışma kapsamında Avcılar'ın çeşitli bölgelerinde 15 farklı noktada 50x50 ve 100x100 m<sup>2</sup> halkalar kullanılarak ölçülen TEM verilerinin aynı bölgelerde daha önce alınmış VES verileri ile ortak çözümleri yapılmıştır. Elde edilen bulguların bölgenin jeolojisi ve diğer jeofizik veriler ile entegrasyonu sağlanmıştır. TEM ve VES verilerinin ortak ters çözümü, eşdeğerlik problemini en aza indirdiği ve uygulama bölgesi olarak seçilen Avcılar'ın sığ yerelektrik yapısı hakkında ek bilgiler sağladığı görülmüştür.

## **JOINT INVERSION OF TRANSIENT ELECTROMAGNETIC AND DIRECT CURRENT ELECTRIC RESISTIVITY DATA : AVCILAR EXAMPLE**

### **SUMMARY**

Electrical and electromagnetic methods have been widely used for shallow geological investigations. Because of the differences in measurement techniques, each has its own merits and shortcomings. Interpretation reliability of one dimensional inversion applications is related to lateral distortions and noise content of the data. Furthermore, nonuniqueness is one of the most important problems encountered in practice. However, nonuniqueness can be reduced by joint interpretation of electrical and electromagnetic data.

Transient Electromagnetic Method (TEM) and Direct Current Resistivity Method (DC Resistivity) differ from each other in terms of physical basis of measurements and measured quantities but obtained geoelectrical information is directly related to resistivity of the layers. Vertical Electrical Sounding measurements have been done to obtain the variation of resistivity versus depth in DC resistivity method. Consequently, joint interpretation of TEM and VES data improves the results and reduces the nonuniqueness. Also, solution is much more reasonable to be interpreted as one dimensional since TEM data are relatively less sensitive to lateral discontinuities.

In this study, a computer program has been developed to invert TEM and VES data both separately and jointly using damped least squares inversion method. Using this program TEM and VES data have been separately and jointly inverted and a comparison of the results is presented. First, the method has been tested using synthetic data. Afterwards, it has been applied to data collected in Avcılar, which came to the agenda by its subsurface structure after the 17 August 1999 Kocaeli earthquake. In this study, 15 sets of TEM data have been measured using 50x50 and 100x100 m<sup>2</sup> transmitters, and have been jointly inverted with previously measured VES data. Finally, results have been integrated with regional geology and existing geophysical data. The results of this study indicated that the joint inversion of TEM and VES data has reduced the nonuniqueness and provided additional information about shallow geoelectrical structure of the Avcılar region.

## 1. GİRİŞ

Elektrik ve elektromanyetik yöntemler, yerin öz direncinin inceleme alanındaki fiziksel değişimleri yansıtmadaki başarısı nedeni ile son 50 yılda sığ 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.

Elektrik yöntemler, bir çift elektrot kullanılarak yer içine gönderilen doğru akımın (Direct Current-DC) yeryüzünde oluşturacağı gerilim farkının, yine bir çift gerilim elektrodu ile ölçülmesi ilkesine dayanmaktadır. Akım elektrotları arasındaki mesafenin artırılması ile akımın daha derinlere inmesi sağlanmakta ve yapılan ölçüme düşey elektrik sondaj (Vertical Electrical Sounding-VES) ölçümü denilmektedir. Belli başlı en çok kullanılan VES tiplerinden biri olan Schlumberger dizilimi kullanılarak yanal süreksizliklerden kaynaklanan etkiler azaltılabilir ve elde edilen yerelektrik bilgilerin bir boyutlu olduğu kabul edilir. VES yöntemi, arazi uygulamasının basitliği ve ölçülen verilerin değerlendirilmesinin kolaylığı nedeniyle en geniş uygulama alanı bulan jeofizik yöntemlerden biridir.

Elektromanyetik yöntemler, yerin değişken manyetik alanlar ile uyartılması ve bu uyartımdan kaynaklanan ikincil manyetik alanların yeryüzünde ölçülmesi ilkesine dayanır. Ölçümler alınırken ortamda birincil alanların olmadığı yöntemler, zaman ortamı yöntemleri olarak adlandırılırlar. Verici olarak yatay bir halka kullanan geçici elektromanyetik yöntem (Transient Electromagnetics-TEM), zaman ortamı ölçüm yapan yöntemlerden biridir. TEM yöntemi, uyartım sonucu yerde oluşan ikincil alanların yeryüzünde alıcı halkalar ile ölçülmesi şeklinde uygulanır. Elektronik ve bilgisayar teknolojisindeki gelişim, oldukça hassas ölçüm teknikleri gerektiren TEM cihazlarının taşınabilir ve kolay kullanılabilir şekilde tasarlanmalarına olanak sağlamıştır (örneğin, SIROTEM MK 3). VES ve TEM yöntemleri hakkında ayrıntılı bilgiler sırasıyla 2. ve 3. Bölümde yer almaktadır.

Sığ araştırmalarda yeterli sonuç alınabilmesine karşın, derin yerelektrik bilgisine ihtiyaç duyulan bölgelerde, kilometrelerce uzunlukta açılımların yapılmasını gerektiren VES yöntemi için yeterli büyüklükteki ölçüm alanının olması bir zorunluluktur. Ancak yeterli ölçüm alanı olsa bile sinyal/gürültü oranının artmasından dolayı uzun açılımlar yapmak mümkün olmamaktadır (Raiche ve diğ., 1985). Her iki yöntem ile yapılan ters çözümlerde görülen bir sorun, eşdeğerklik problemidir. İnce iletken bir tabakanın olması durumunda bu tabakanın özdirenci ve kalınlığı arasındaki oran tahmin edilebilirken, ince dirençli katman olması durumunda tabakanın özdirenci ve kalınlığının çarpımı tahmin edilebilir. Bununla birlikte, VES yönteminde özdirenci çok yüksek bir st tabaka, akımın daha aşağılara inmesini zorlaştırabilir ve olası bir iletken tabakanın belirlenmesini engelleyebilir. TEM ve VES yöntemleri aynı fiziksel parametrelere duyarlı olmasına rağmen doğru akım ve değişken manyetik alanlar farklı davranışlar gösterir (Gomez-Trevino ve Edwards, 1983). Değişken alanlar, özdirenci çok yüksek olan bir st tabakayı çok kolay geçerler ancak bu tabakayı az indklediklerinden dolayı dirençli katmanlar hakkında yeterli bilgiyi elde edemeyebilirler. Geçici elektromanyetik yöntemde görülen bu durum, ölçüm sistemine bir elektrik devresi eklemek suretiyle elektrik alanının da ölçülmesini sağlayan LOTEM (Long Offset Transient Electromagnetics) yöntemi kullanılarak giderilebilir (Strack, 1992). Dolayısıyla, farklı fiziksel esaslara dayalı ancak aynı parametrelere duyarlı elektrik ve elektromanyetik yöntemlerin ortak ters çözümlerinin yapılması ile hem iletken hem de dirençli tabakalar hakkında güvenilebilir bilgiler edinilebilir.

Elektrik ve elektromanyetik yöntemlerin ortak ters zm, Vozoff ve Jupp (1975) tarafından Manyetotellürik (MT) ve Schlumberger VES yöntemleri için, Gomez-Trevino ve Edwards (1983) tarafından kaynak kontrollü elektromanyetik (CSEM) ve Schlumberger VES yöntemleri için uygulanmıştır. Bu uygulamalar ile elde edilen başarı birçok araştırmacıya yol göstermiş ve yeni ortak ters çözüm sistemlerinin geliştirilmesine yol açmıştır (TEM ve VES, Raiche ve diğ., 1985; MT ve TEM, Hrdt, 1989; TEM ve VES, Eckard, 1993; AMT ve VES, Santos ve diğ., 1997; VES, TEM ve MT, Yang ve Tong, 1999).

Bu çalışmanın amacı, ortak ters çözüm (joint inversion) algoritmasının doğru akım elektrik ve geçici elektromanyetik (TEM) yöntemlerine uygulanmasıdır. Bu kapsamda TEM ve VES verilerinin ayrı ve ortak ters çözümlerinin yapılabilmesi için

Matlab programlama dilinde bir bilgisayar programı yazılmıştır. Bilgisayar yazılımının geliştirilmesinde TEM ve VES yöntemlerinin düz çözümlerini gerçekleştirmek için kullanılan alt programlar Eckard (1993)'ten alınarak Matlab programlama diline çevirilmiştir.

TEM ve VES verileri için ters çözüm ve her iki yönteme ait verilerin ortak ters çözümü ile ilgili bilgiler dördüncü bölümde anlatılmıştır. Ortak ters çözüm algoritması öncelikle yapay verilere uygulanmıştır. Beşinci bölümde yapay veriler ile elde edilen sonuçlar yer almaktadır. Buna göre, ayrı ayrı yapılan ters çözümler ile karşılaştırılmalı sunulan ortak ters çözüm sonuçlarının, gerçek modele daha yakın olduğu ve eşdeğerlik problemini büyük ölçüde azalttığı görülmüştür. Bunun yanı sıra verici halka boyunun istenen çözümün elde edilmesinde önemli bir rol oynadığı örnekler ile gösterilmiştir. Altıncı bölümde, TEM ve VES verilerinin ortak ters çözümü, 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminin odağına 120 km uzak bulunmasına rağmen uğradığı ağır hasar ile yerbilimcilerinin gündemine gelen Avcılar Bölgesi'nin sığ yer elektrik yapısının saptanması amacıyla tez çerçevesinde ölçülen verilere uygulanmıştır. Bu bölgede görülen ağır hasarın yerel koşullar ile olan ilişkilerinin ortaya çıkarılması amacıyla deprem yer tepkisi analizleri (Bozdağ ve Kocaoğlu, 2002; İmamoğlu ve Boztepe-Güney, 2002; Tezcan ve diğ., 2002) ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda, Avcılar bölgesinde görülen ağır hasarın yerel koşullar ile ilişkili olduğu vurgulanmaktadır.

Bu kapsamda, İTÜ Jeofizik Mühendisliği Bölümü'ne TÜBİTAK projesi ile kazandırılan SIROTEM MK 3 cihazıyla Avcılar Bölgesi'nde 15 ayrı noktada ilk TEM ölçümleri yapılmış, geliştirilen yazılımla değerlendirilmiş ve Avcılar Belediyesi tarafından daha önce yaptırılan araştırma sondajlarıyla ilişkilendirilerek bölgenin sığ yer elektrik yapısı elde edilmiştir. Bölgenin jeolojisi ve mevcut araştırma sondajlarıyla uyumlu sonuçların elde edildiği TEM ve VES verilerinin ortak ters çözümü ile ilgili sonuçlar ve tartışma yedinci bölümde sunulmuştur.



## 2. DOĞRU AKIM ÖZDİRENÇ YÖNTEMİ

Arazi uygulamasının basitliği ve ölçülen verinin değerlendirilmesindeki kolaylık nedeniyle uygulamalı jeofizikte en çok kullanılan yöntemlerden biri Doğru Akım Özdirenç Yöntemi'dir. Doğru akım özdirenç yönteminin temel ilkesi, bir çift elektrot kullanarak yeriçine gönderilen doğru akımın (DC) yeryüzünde oluşturacağı gerilim farkının, yine bir çift gerilim elektrodu ile ölçülmesidir. Ölçülen gerilim farkı ve yere gönderilen akım arasındaki ilişki 'Ohm Yasası' olarak bilinir ve aşağıdaki şekilde ifade edilir.

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

Yukarıdaki denklemde I (Amper) yere gönderilen akımı,  $\Delta V$  (Volt) yerde oluşan gerilim farkını ve R (Ohm) yerin direncini gösterir. Birim direncin gerekli olduğu durumlarda, yüzey alanı A (m<sup>2</sup>) ve boyu L (m) olan bir telin özdirenci,

$$\rho = \frac{\Delta V A}{I L} \quad (2.2a)$$

şeklinde hesaplanır. Bu bağıntı daha genel bir halde,

$$\rho = \frac{\Delta V}{J L} \quad (2.2b)$$

olarak yazılır. Burada J (akım yoğunluğu) birim yüzeyden geçen akım miktarını göstermektedir. Elde edilen elektriksel özellik  $\rho$  (Ohm.m), özdirenç olarak isimlendirilir.

Doğada bulunan kayaçların geniş bir özdirenç değerler aralığında yeralması nedeniyle tek başına özdirenç değerleri jeolojik birimlerin ayrımını sağlayamamaktadır. Ancak jeolojisi hakkında bilgi elde edinilen bir bölgede jeolojik formasyonlar ve bu formasyonların özdirençleri ile ilişki kurulabilmektedir.

## 2. 1 Ölçüm Düzenekleri

Doğru akım öz direnç ölçümlerinde kullanılan akım ve gerilim elektrotlarının dizilim şekline göre ölçülen büyüklüğün atanacağı geometrik konum değişmektedir. Uygulamada, yapılan ölçümlerin amacına göre doğru akım öz direnç yöntemi, düşey elektrik sondaj (Vertical Electrical Sounding-VES) veya kaydırma olarak adlandırılmaktadır. Kaydırma ölçümlerinde, elektrot aralıkları sabit tutularak ölçüm düzeneğini kaydırmak suretiyle tabakaların yanal yöndeki öz direnç değişimleri incelenir. VES yönteminde ise elektrot aralıkları sabit tutulmayıp sürekli açılmaktadır. Bu şekilde yapılan ölçümlerde amaç yeraltındaki katmanların öz direncinin derinlikle olan değişimini incelemektir.

Uygulamada en çok kullanılan belli başlı ölçüm düzenekleri Schlumberger ve Wenner dizilimleridir. Schlumberger diziliminde akım elektrotları arasındaki açıklık, gerilim elektrotları arasındaki açıklığının 3-10 katı kadar daha fazla tutulmaktadır. Wenner diziliminde ise akım ve gerilim elektrotları arasındaki açıklık eşit tutularak ölçüm işlemine devam edilmektedir (Şekil 2. 1).



Şekil 2. 1 Schlumberger ve Wenner elektrot dizilimlerinin şematik gösterimi. A ve B akım elektrotlarını, M ve N gerilim elektrotlarını göstermektedir.

Uygulamada kullanılan bu iki farklı düzeneğin seçimi, araştırma sahasının jeolojik özelliklerine bağlı olarak yapılmaktadır. Wenner ölçüm düzeninde ölçülen gerilim değerleri göreceli olarak daha büyük olduğundan dolayı tabakaların öz dirençleri iyi bir duyarlılıkla hesaplanabilmektedir. Ancak gerilim elektrotları arasındaki açıklığın fazla olması ve her ölçüm için gerilim elektrotlarının yer değiştirmesi sebebiyle ölçülen büyüklükler yanal değişimlerden etkilenmektedir ve bu etkiyi gidermek oldukça güçtür. Schlumberger ölçüm düzeninde ise gerilim elektrotları arasındaki açıklık akım elektrotları arasındaki açıklıktan çok küçüktür, ayrıca gerilim elektrotlarının her ölçüde yer değiştirmesi gerekli değildir. Dolayısıyla Schlumberger dizilimi, yanal öz direnç değişimlerinden Wenner dizilimi kadar etkilenmemektedir. Ancak Schlumberger dizilimi ile ölçülen gerilim değerleri, Wenner dizilimi ile ölçülen gerilim değerlerinden daha küçük olduğundan dolayı tabakaların öz direncinin hesaplanmasındaki duyarlılık Wenner diziliminden daha düşüktür.

Uygulamada bu sorun yüksek akım kullanılarak ölçülen gerilim değerin artırılması ile giderilmektedir.

## 2.2 Yatay Tabakalı Ortamda Gerilim Dağılımı

Düşey elektrik sondaj yönteminde yeryüzünde ölçülen gerilim farkı ile tabakaların öz dirençleri arasındaki ilişki bilinmeden sayısal bir değerlendirme yapma imkanı bulunmamaktadır. Bu ilişkiyi oluşturabilmek için yatay tabakalı bir yeryüzünde tek bir nokta akım kaynağı ile oluşturulan gerilim ifadesi için bazı temel kabuller yapmak gerekir.

- 1) Yeraltındaki tabakalar birbirlerinden yatay düzlemler ile ayrılmışlardır. En derin tabaka yarı sonsuz olmakla birlikte diğer tabakaların sınırlı kalınlıktadır.
- 2) Her tabaka kendi içinde elektriksel olarak homojen ve izotrop tur.
- 3) Akım kaynağı yeryüzündedir.
- 4) Gönderilen akım doğru akımdır.

Bu kabuller ışığında yeryüzünde oluşan gerilim farkı ifadesi (V) Laplace bağıntısını sağlar (Koefoed, 1979):

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (2.4)$$

burada r, akım kaynağına olan uzaklığı, z derinliği göstermektedir. Yukarıdaki kısmi diferansiyel denklem, özel çözümlerinin doğrusal bir ifadesi olarak yazılabilir.

$$V(r,z)=U(r) W(z) \quad (2.5)$$

Bu varsayımla (2. 5) bağıntısı (2. 4) bağıntısına yerleştirilir ve tüm terimler U ve W ile bölünürse,

$$\frac{1}{U} \frac{d^2 U}{dr^2} + \frac{1}{Ur} \frac{dU}{dr} + \frac{1}{W} \frac{d^2 W}{dz^2} = 0 \quad (2.6)$$

olur. Bu denklem,

$$\frac{1}{U} \frac{d^2 U}{dr^2} + \frac{1}{Ur} \frac{dU}{dr} = -\lambda^2 \quad (2.7)$$

ve

$$\frac{1}{W} \frac{d^2 W}{dz^2} = \lambda^2 \quad (2.8)$$

olması durumunda sağlanır.

Burada  $\lambda$ , keyfi bir sabittir. Yukarıdaki (2. 8) denkleminin çözümü,

$$W=C e^{-\lambda z} \text{ ve } W=C e^{+\lambda z} \quad (2.9)$$

olarak bulunur (Koefoed, 1979).

(2. 7) numaralı denkleme benzer denklemler Bessel fonksiyonları diye bilinen özel bir fonksiyonun geliştirilmesine yol gösterir.

$$U=C J_0(\lambda r) \quad (2.10)$$

Burada  $J_0$ , sıfırıncı dereceden birinci cins Bessel fonksiyonudur. (2. 9) ve (2. 10) denklemleri birleştirilerek,

$$V=C e^{-\lambda z} J_0(\lambda r) \text{ ve } V=C e^{+\lambda z} J_0(\lambda r) \quad (2.11)$$

(2. 7) numaralı diferansiyel denkleminin özel çözümleri bulunmuş olur. C ve  $\lambda$  keyfi sabitlerdir. (2. 11) denklemindeki çözümlerinin herbirinin bir çözüm olduğu bilinerek  $\lambda'$  ya sıfırdan sonsuza kadar değerler vererek ve C' yi  $\lambda'$  nın bir değişkeni olarak yazarak (2. 7) numaralı diferansiyel denklemin genel çözümü bulunur (Koefoed, 1979).

$$V = \int_0^{\infty} [\Phi(\lambda) e^{-\lambda z} + \Psi(\lambda) e^{+\lambda z}] J_0(\lambda r) d\lambda \quad (2.12)$$

Bu denklemde  $\Phi(\lambda)$  ve  $\Psi(\lambda)$ ,  $\lambda'$  nın keyfi fonksiyonlarıdır. Elektriksel olarak homojen bir ortama noktasal bir akım kaynağından I akımı verildiğinde oluşan gerilim,

$$V = \frac{I \rho_1}{2 \pi \sqrt{r^2 + z^2}} \quad (2.13)$$

şeklinde hesaplanır. Burada  $\rho_1$ , homojen ortamın öz direncini gösterir. (2. 13) denklemi Lipschitz integrali şeklinde yazılırsa (2. 12) denkleminde benzer.

$$\int_0^{\infty} e^{-\lambda z} J_0(\lambda r) d\lambda = \frac{1}{\sqrt{r^2 + z^2}} \quad (2.14)$$

(2.13) ve (2.14) denklemleri kullanılarak (2.12) numaralı denklemin genel çözümünün bulunması için aşağıda maddeler halinde verilen sınır koşullarının kullanılması gerekmektedir.

- 1) Yeraltındaki sınır düzlemlerinin herbirinde elektrik gerilim süreklidir.
- 2) Yeraltındaki sınır düzlemlerinin herbirinde akım yoğunluğunun düşey bileşeni sürekli olmalıdır.
- 3) Yüzey düzleminde akım yoğunluğunun düşey bileşeninin sıfır olmasından dolayı elektrik alan şiddeti akım kaynağının sonsuz küçüklükteki civarı hariç sıfırdır.
- 4)  $\rho_1 I / 2\pi \sqrt{r^2 + z^2}$  şeklindeki gerilim ifadesi akım kaynağının sonsuz küçüklükteki civarında sonsuza yaklaşır.
- 5) Gerilim sonsuz derinlikte sıfıra yaklaşır.

Yukarıda maddeler halinde verilen sınır koşullarının uygulanması ile (2.12) numaralı denklemin genel çözümü elde edilir (Koefoed, 1979)

$$V = \frac{\rho I}{2\pi} \int_0^{\infty} (1 + 2\Theta(\lambda)) J_0(\lambda r) d\lambda \quad (2.15)$$

Burada  $\Theta(\lambda)$  Stefanescu çekirdek fonksiyonu olarak bilinir. Bu fonksiyon tabakaların kalınlıkları ve öz dirençleri tarafından kontrol edilir. 2.15 numaralı bağıntıda,

$$K(\lambda) = 1 + 2\Theta(\lambda) \quad (2.16)$$

ifadesi kullanılırsa,

$$V = \frac{\rho I}{2\pi} \int_0^{\infty} K(\lambda) J_0(\lambda r) d\lambda \quad (2.17)$$

yeryüzünde oluşan gerilim ifadesi daha basit bir forma girer. Burada  $K(\lambda)$  Slichter çekirdek fonksiyonu olarak bilinir (Koefoed, 1979).

### 2.3 Görünür Özdirencin Hesaplanması

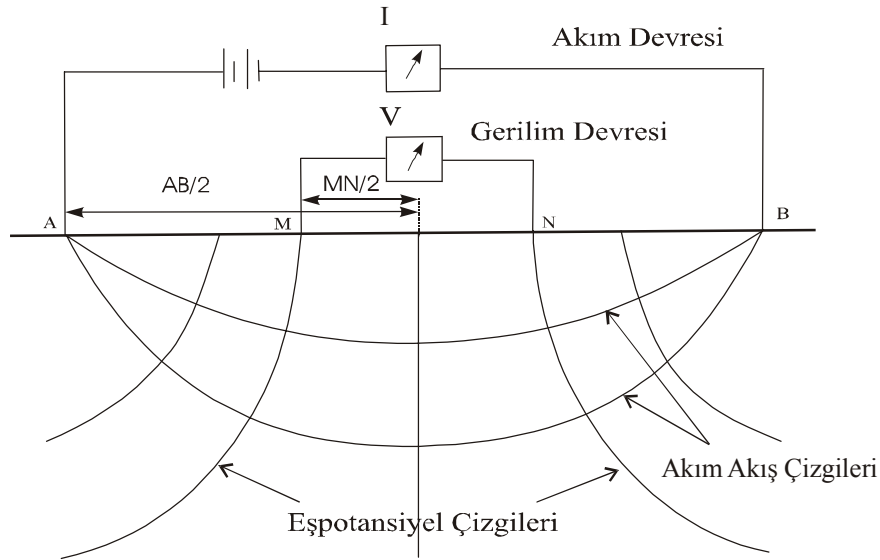
Kuramsal olarak homojen bir ortamda noktasal bir akım kaynağı tarafından yeryüzünde oluşturulan gerilim ifadesi,

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (2.18)$$

şeklinde verilir.

$$\rho = \frac{\Delta V 2\pi r}{I} \quad (2.19)$$

Yapılan ölçümlerde ölçülen büyüklük iki gerilim elektrodu arasındaki gerilim farkı olmasına rağmen asıl amaç tabakaların özdirencini hesaplamaktır. Bu nedenle (2.18) bağıntısı (2.19) bağıntısına dönüştürülerek özdirenc hesabı yapılmaktadır.



Şekil 2.2 Schlumberger elektrot dizilimi.  $AB/2$ , akım elektrotları arasındaki uzaklığın,  $MN/2$  gerilim elektrotları arasındaki uzaklığın yarısını gösterir.

Yukarıdaki bağıntılarda  $r$  ifadesi,

$$r = \frac{1}{\left[ \left( \frac{1}{L-l} - \frac{1}{L+l} \right) - \left( \frac{1}{L+l} - \frac{1}{L-l} \right) \right]} \quad (2.20)$$

şeklinde yazılır. Burada  $L$ , akım elektrotlarının orta noktaya olan uzaklığı ( $AB/2$ ),  $l$  gerilim elektrotlarının orta noktaya olan uzaklığıdır ( $MN/2$ ). Schlumberger elektrot dizilimi için  $L \gg l$  olduğundan dolayı,

$$r = \frac{L^2}{8l} \quad (2.21)$$

olarak yazılabilir. Bu ifade (2. 19) numaralı bağıntıda yerine konulursa,

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} \frac{\pi L^2}{4l} \quad (2.22)$$

ve

$$k = \frac{\pi L^2}{4l} \quad (2.23)$$

ifadesi (2. 22) numaralı denkleme konulursa,

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} k \quad (2.24)$$

Schlumberger tekniği için görünür özdirenç bağıntısı elde edilir. Burada k, akım ve gerilim elektrotlarının konumuna bağlıdır ve geometrik katsayı olarak isimlendirilmektedir.

#### 2. 4 Araştırma Derinliği

Schlumberger diziliminde yapılan ölçümlerin atanacağı derinliğin, AB/2 değeri kadar olduğu kabul edilir. Ancak uygulamada iletkenliğin artması veya azalması bu kurumsal öngörüğü bazı durumlarda etkisiz hale getirmektedir. Çünkü iletken ortamlarda akımın daha alt tabakalara inmesini sağlamak oldukça güçtür ve bu tür durumlarda araştırma derinliği AB/2 değerinin çok altında olabilmektedir. Dolayısıyla bir ters çözüm uygulamasına başlangıç modeli oluştururken doğrudan AB/2 değerleri yerine yaklaşık derinlik ifadesi kullanılabilir (Meju, 1995).

$$\delta_{eff}^{DC} = \frac{AB/2}{2.3} \quad (2.25)$$

### **3. GEÇİCİ ELEKTROMANYETİK YÖNTEM**

Doğadaki tüm malzemeler, zamanla değişen bir elektromanyetik alana maruz bırakıldıklarında, üzerlerinde bir elektromotor kuvvet (emk) indüklenmektedir. Kaynak alanın kesilmesi durumunda oluşan emk, ortamın geometrisine ve öz direncine bağlı olarak sönümlenmektedir. Sönümlenen bu emk, ortamda zamanla azalan bir manyetik alanın oluşmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla, zamana bağlı manyetik alan değişiminin yeryüzünde uygun bir alıcı halkayla ölçülmesi ile yerelektrik yapısı hakkında bilgi edinilebilir.

Jeofizik yöntemler içinde bu ilkeyi kullanan ve Geçici Elektromanyetik Yöntem (Transient Electromagnetics-TEM) ya da Zaman Ortamı Elektromanyetik Yöntem (Time Domain Electromagnetics-TDEM) olarak adlandırılan ölçüm düzeneği sığ (10-200 m.) ve orta (200-2000 m.) derinlikli yerelektrik yapısı araştırmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. TEM yöntemi diğer elektromanyetik yöntemlere nazaran değişik alıcı verici düzeneklerinin kullanılması ile amaca uygun araştırma yapabilme ve zaman ortamında ölçü alması ile tek bir ölçümde farklı derinliklere ait bilgilerin toplanabilmesi özellikleri ile öne çıkmış bir yöntemdir.

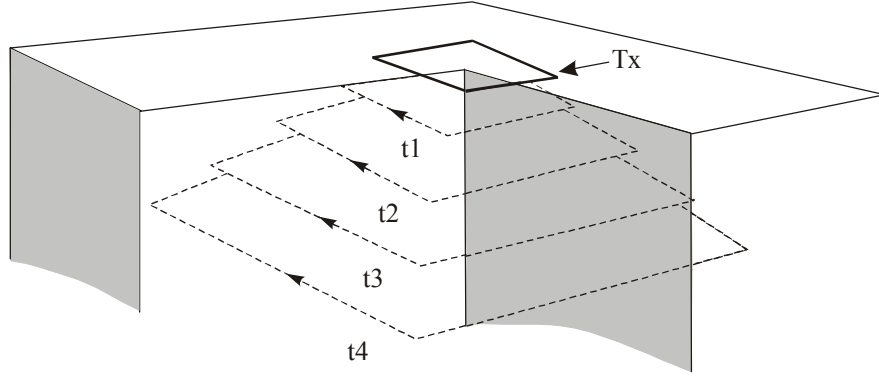
İlk olarak 1950'lerde Rusya, Amerika ve Kanada'da petrol, doğalgaz ve sıcak su araştırmalarında kullanılan yöntem, kuramsal ve uygulama esaslarının ortaya konmasından sonra (Kaufman ve Keller, 1983; Raiche, 1983; Ward ve Hohmann, 1988) çeşitli jeofizik problemler üzerine uygulanmıştır, örneğin; altın aramaları (Aktarakçı ve diğ., 1997), levha sınırlarının belirlenmesi (Chen, 1998), deniz suyu sokulumlarının haritalanması (Yang ve diğ., 1999), yeraltı suyu araştırmaları (Meju ve diğ., 2000) ve maden aramaları (Combrinck, 2001).

#### **3. 1 Geçici Elektromanyetik Kuram**

İletken bir tel üzerine bir miktar akım uygulandığında tel üzerindeki akım miktarı hemen en yüksek değerine ulaşamaz. Aynı ilkedan yola çıkarak, üzerinden akım geçen bir teldeki akımın kesilmesi durumunda, teldeki akım hemen sıfır değerine

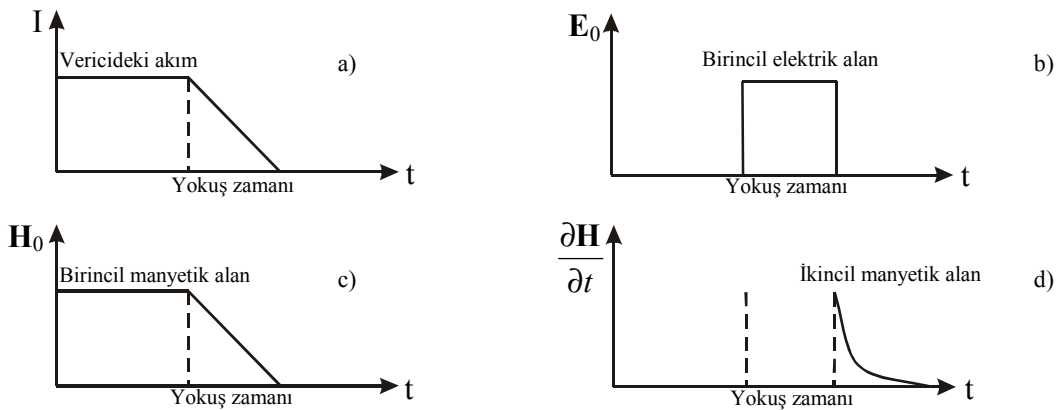


ulaşamaz. Akımın kesilmesi anı ile sıfır değerine ulaşması arasında geçen süreye yokuş zamanı (ramp time) denir. Yokuş zamanı boyunca akımdaki ani değişim birincil manyetik alanında aniden zamanla değişimine yol açar ve ortamda uyartım akımlarının (Eddy currents) akmasına neden olur (Şekil 3. 1).



Şekil 3. 1 Akımın kesilmesinden sonra farklı zamanlar için uyartım akımlarının yerindeki yayınımları (McNeill, 1990).

Uyartım akımları kendilerini oluşturan verici kaynağın geometrisi ile aşağı ve yanlara doğru genişleyerek yayınırlar ve zamanla içinden geçtikleri ortamın fiziksel ve geometrik özelliklerine bağlı olarak sönümlenirler. Sönümlenen bu akımların etkisiyle ortamda ikincil bir manyetik alan oluşur ve bu alan yeryüzünde uygun alıcı halkalar kullanılarak ölçülebilir. Alıcı halkada oluşan gerilim değerleri, kullanılan alıcı-verici halkalarının alanları ve birincil alanları oluşturan akımın büyüklüğü ile normalize edildiğinde, ikincil alanların içinde oluştukları ortamın elektriksel özellikleri belirlenebilir.



Şekil 3. 2 a) Verici halkadaki akım. b) Birincil manyetik alanın davranış biçimi. c) Birincil elektrik alanın davranış biçimi. d) Yeryüzünde ölçülen ikincil manyetik alan.

Geçici elektromanyetik yöntemde verici halkaya uygulanan akım Şekil 3. 2’de görüldüğü gibi belirli bir zamana kadar sabittir. Daha sonra akımın kesilmesi ile yokuş zamanı (ramp time) sonunda, halkadaki akım sıfır değerine ulaşır.

Zamanla değişen alanlar, Maxwell denklemleri ile tanımlanabilir. Maxwell’in birinci eşitliğine göre (Amperé yasası) içinden akım geçen bir tel civarında, uygulanan akıma dik doğrultuda bir manyetik alan oluşur.

$$\text{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} + \mathbf{J}_D \quad (3.1)$$

Burada  $\mathbf{H}$  manyetik alan şiddetini,  $\mathbf{J}$  iletimdeki akım yoğunluğunu ve  $\mathbf{J}_D$  yerdeğiştirmeden kaynaklanan akım yoğunluğunu göstermektedir.

Birincil manyetik alanın genel özelliğine bakıldığında (Şekil 3. 2) akım ile aynı davranışı gösterdiği görülmektedir. Belirli bir zamana kadar sabit bir büyüklükteki alan, akımın kesilmesi ile ani bir azalış göstermekte ve belirli bir süre sonra (ramp time) ortamda birincil alan yok olmaktadır. TEM yönteminde alıcı tarafından ölçümler yokuş zamanını da içermesine rağmen değerlendirme aşamasında alınan ölçümlerin sadece yokuş zamanı sonrası olanları kullanılmaktadır. Dolayısıyla diğer elektromanyetik yöntemlerin aksine TEM yönteminde yapılan ölçümlerde ortamda birincil alan bulunmamaktadır.

Manyetik alan şiddeti ( $\mathbf{H}$ ) ve manyetik akı yoğunluğu ( $\mathbf{B}$ ) arasındaki ilişki,

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (3.2)$$

şeklinde yazılır. Burada  $\mu$  manyetik geçirgenliği göstermektedir, ortam boşluk olması durumunda değeri  $\mu = 4\pi 10^{-7}$  Henry/metre olarak verilir.

Daire şeklinde  $a$  yarıçaplı bir halka üzerinden  $I$  gibi bir akım geçmesi durumunda halkanın merkezinde oluşacak manyetik alan,

$$\mathbf{B}_z^0 = \frac{\mu_0 I}{2a} \quad (3.3)$$

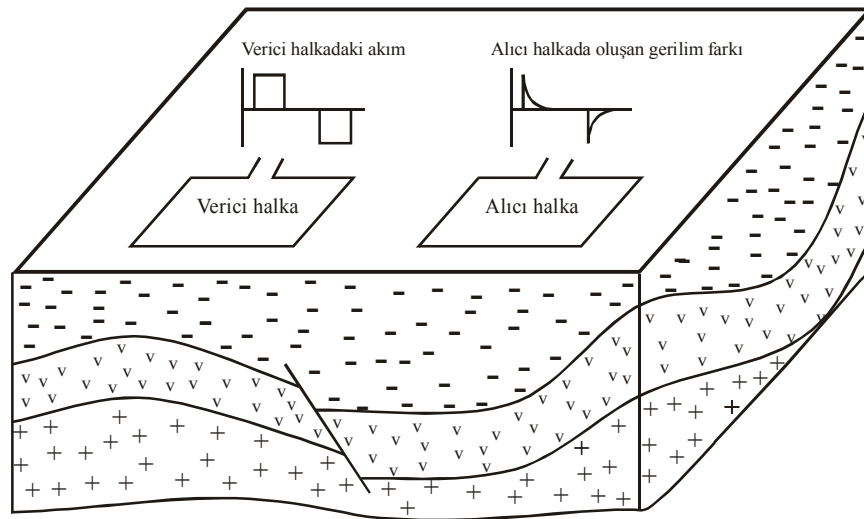
olarak hesaplanır. Burada  $\mathbf{B}_z^0$  halkanın merkezindeki birincil manyetik alanın düşey bileşenini,  $\mu_0$  boşluğun manyetik geçirgenliğini göstermektedir. Birincil alan, akım kaynağına olan uzaklıkla azalmaktadır. Birincil manyetik alanın derinlikle olan değişimi aşağıdaki şekilde verilebilir.

$$B_z = \frac{\mu_0 I}{2a \left( 1 + \frac{z^2}{a^2} \right)^{3/2}} \quad (3.4)$$

(3.3) ve (3.4) bağıntıları oran şeklinde yazılırsa,

$$\frac{B_z}{B_z^0} = \left( 1 + \frac{z^2}{a^2} \right)^{-3/2} \quad (3.5)$$

birincil manyetik alanın derinlikle olan değişimi irdelenebilir. Manyetik alanın derinlikle değişimi için üç farklı azalım olduğu Şekil 3. 4'te görülmektedir. Küçük derinlikler için manyetik alan fazla değişmemekte, derinliğin belirli bir değerden fazla olması durumunda manyetik alan aniden değişmeye başlamakta ve belirli bir derinliğin altında tekrar yavaş bir değişim göstermektedir.



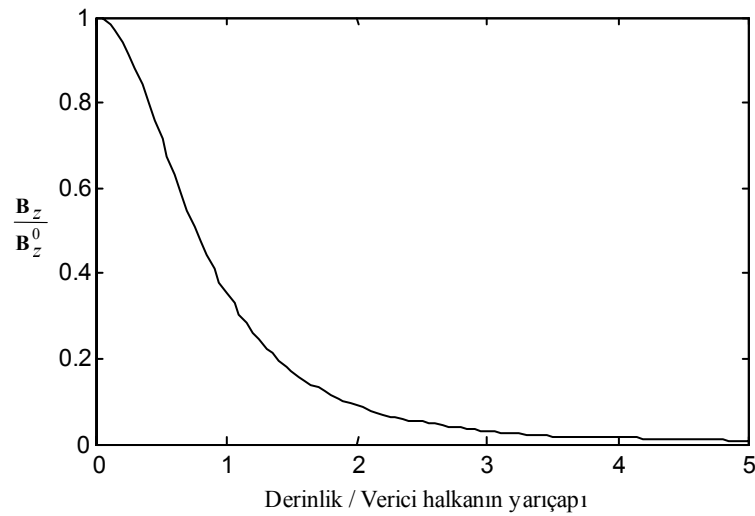
Şekil 3.3 Geçici elektromanyetik yöntemin arazi uygulamasının genel olarak gösterimi.

TEM yönteminde birincil manyetik alanın temel işlevi, birincil elektrik alanın yaratılmasıdır. Şekil 3. 2'de görüldüğü gibi manyetik alan sadece yokuş zamanı süresince değişmektedir. Maxwell'in ikinci eşitliğine göre (Faraday yasası) düzgün bir manyetik alan içinde hareket eden bir iletken üzerinde bir elektromotor kuvvet indüklenir. Bu yasaya farklı bir açıdan yaklaşırsak değişken manyetik alan, içinde yayındığı ortamda uyartım akımlarının etkisi ile birincil elektrik alanın oluşmasına neden olur (3. 6a). Manyetik alan şiddeti ve manyetik akı yoğunluğu arasındaki yapısal ilişki (3. 2) kullanılarak (3. 6a) ifadesi (3. 6b) biçimde yazılabilir.

$$rot\mathbf{E} = -\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t} \quad (3.6a)$$

$$rot\mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial\mathbf{H}}{\partial t} \quad (3.6b)$$

Birincil elektrik alan, kendini oluşturan alana dik olacağından dolayı, düşey eksene merkezlenmiş yatay halkalar şeklinde olmaktadır (Şekil 3. 1). Ayrıca birincil elektrik alanın değeri, yokuş zamanı süresince sabit olmaktadır (Şekil 3. 2). Çünkü elektrik alan, manyetik akı değişiminin oranına bağlıdır.



Şekil 3. 4 Manyetik alanın derinlik ile değişimi.

Birincil manyetik alanın zamanla değişmesi, ortamda uyartım akımlarının oluşmasına neden olur. Uyartım akımları, kendilerini oluşturan verici kaynağın geometrisine bağlı kalarak yanlara ve aşağı doğru yayınırlar (Şekil 3. 1). Yayınan bu akımlar, içinde bulundukları ortamın geometrisine ve öz direncine bağlı olarak sönmümlenirler. Sönmümlenen bu akımlar, ortamda kaynağı yer olan ikincil bir manyetik alanın ve ikincil bir elektrik alanın oluşmasına neden olur. İkincil geçici alanlar yeryüzünde uygun alıcılar kullanılarak algılanabilirler. TEM yönteminde yeryüzünde alıcı halka ile, ikincil manyetik alanın düşey bileşeninin zamana göre türevi zamanın fonksiyonu olarak ölçülmektedir. Merkezi halka sistemi kullanılması durumunda (Şekil 3. 7c)  $\rho$  öz direncine sahip yarı sonsuz homojen bir ortamın yüzeyinde oluşacak ikincil manyetik alanın düşey bileşeni aşağıdaki şekilde yazılır (Spies ve Frischknecht, 1991).

$$\mathbf{H}_z = \frac{I\rho t}{\mu_0 a^3} \left[ \left( \frac{1}{2\tau} - 3 \right) \operatorname{erf} \left( \frac{1}{2\sqrt{\tau}} \right) + \frac{3}{\sqrt{\pi\tau}} e^{-\frac{1}{4\tau}} \right] \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial \mathbf{H}_z}{\partial t} = -\frac{I\rho}{\mu_0 a^3} \left[ 3 \operatorname{erf} \left( \frac{1}{2\sqrt{\tau}} \right) - \frac{1}{\sqrt{\pi\tau}} \left( 3 + \frac{1}{2\tau} \right) e^{-\frac{1}{4\tau}} \right] \quad (3.8)$$

$\mathbf{H}_z$  bağıntısının (3. 7) zamana göre türevi (3. 8) şeklinde yazılır. Yukarıdaki bağıntılarda  $\tau$  zaman sabiti ve  $\operatorname{erf}$  hata fonksiyonudur (Abramowitz ve Stegun, 1964).

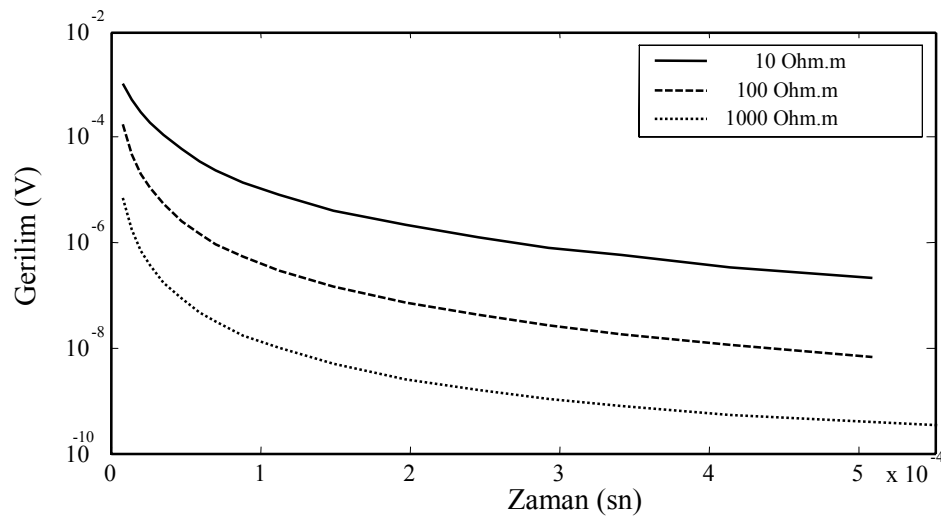
$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\xi^2} d\xi \quad (3.9)$$

$$\tau = \frac{t\rho}{\mu_0 a^2} \quad (3.10)$$

Alıcı halkada ölçülen gerilim değeri,  $\theta = (\mu_0 / 4t\rho)^{1/2}$  ve  $m$  alıcı halkanın efektif alanını göstermek üzere,

$$V = \frac{mI\rho}{a^3} \left[ 3 \operatorname{erf}(\theta a) - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \theta a (3 + 2\theta^2 a^2) e^{-\theta^2 a^2} \right] \quad (3.11)$$

şeklinde yazılır (Wait, 1951). İkincil manyetik alanın zamanla sönümlenme hızı yeryüzünde ölçülen gerilim değerlerini etkilemektedir. Sönümlenme hızı indüklenme miktarı ile ters orantılıdır. Bu nedenden dolayı iletken ortamlarda, dirençli ortamlara göre daha yüksek gerilim değerleri ölçülür ( Şekil 3. 5 ).



Şekil 3. 5 Verici halkada ölçülen gerilim değerinin ortamın öz direnci ile değişimi.

Tabakalı ortam olması durumunda yer tepkisi, akım kaynağının yokuş fonksiyonu olarak kabulü ile frekans ortamında hesaplanır. Daha sonra tekrar zaman ortamındaki tepki hesaplanabilir. Yarıçapı  $b$  olan bir verici halkanın, tabakalı bir ortamda oluşturacağı ikincil manyetik alanın yeryüzündeki yarıçapı  $a$  olan bir alıcı halka ile ölçülmüş olsun. Bu durumda oluşacak empedans ifadesi,

$$Z(t) = \frac{V(t)}{I} = -\pi\mu_0 ab \int_0^\infty \mathbf{L}^{-1}\{I(p)pA_0(\mathbf{P}, p, \lambda)\}J_1(\lambda a)J_1(\lambda b)d\lambda \quad (3.12)$$

şeklinde verilir (Knight ve Raiche, 1982). Burada  $\mathbf{P}$ , katman kalınlıklarını ve özdirençlerini içeren dize,  $p$  Laplace değişkeni,  $\lambda$  tümleme değişkeni,  $J_1$  birinci dereceden birinci cins Bessel fonksiyonu,  $A_0$  katmanlı ortama ait çekirdek fonksiyonudur ve aşağıdaki sınır koşullarının yardımı ile yinelemeli olarak çözülebilir.

- 1) Elektrik ve manyetik alanlar tabaka sınırlarında süreklidir.
- 2) Derinliğin sonsuza gitmesi durumunda elektrik ve manyetik alanlar sıfırdır.
- 3) Yüzeye yaklaştıkça elektrik ve manyetik alan en yüksek değerdedir.

Yüzey empedansı ifadesi (3.12) ile verilen denklem, doğrusal süzgeçler kullanılarak yapılan ters Hankel dönüşümleri (Andersen, 1979) sayesinde tamamen sayısal olarak hesaplanabilmektedir.

### 3.1.1 Görünür Özdirencin Hesaplanması

TEM yöntemiyle yapılan ölçümlerde, ölçülen gerilim değerlerinin zamanın fonksiyonu olarak çizilmesi ile yerelektrik yapısı ile ilgili bilgiler elde edilmektedir. Ancak uygulamada, gerilim eğrileri yerelektrik yapısını tanımlamasına rağmen yorumlama için yeterli anomaliler yaratamazlar. Bu yüzden ölçülen gerilim değerlerinin görünür özdirence çevrilmesi ile daha kolay bir değerlendirme yapılabilir. Özdirence ve zamana bağlı olarak gerilim eğrileri tam olarak hesaplanabilirken zamana ve gerilime bağlı özdirenç eğrilerinin  $t \rightarrow 0$ 'a ve  $t \rightarrow \infty$ 'a olmak üzere farklı iki çözümü bulunmaktadır (Kaufman ve Keller, 1983). Bu iki farklı özdirenç değeri, erken zaman görünür özdirenç (early-time apparent resistivity) ve geç zaman görünür özdirenç (late-time apparent resistivity) olarak

adlandırılır ve asimtotik erken zaman ve geç zaman bağıntıları ile hesaplanmaktadır (Şekil 3. 6).

$$V^{erken\ zaman} = \frac{3mI\rho}{a^3} \quad (3.13)$$

$$V^{geç\ zaman} = \frac{I\rho^{-3/2}\mu_0^{5/2}ma^2}{20\sqrt{\pi}t^{5/2}} \quad (3.14)$$

Elde edilen erken zaman (3. 13) ve geç zaman (3. 14) gerilim bağıntıları ve (3. 11) bağıntısı kullanılarak görünür öz direnç ifadeleri denklemlerden çekilirse,

$$\rho_a^{erken\ zaman} = \frac{a^3V}{3mI} \quad (3.15)$$

$$\rho_a^{geç\ zaman} = \frac{I^{2/3}a^{4/3}m^{2/3}\mu_0^{5/3}}{20^{2/3}\pi^{1/3}t^{5/3}V^{2/3}} \quad (3.16)$$

asimtotik öz direnç denklemleri sırasıyla erken zaman (3. 15) ve geç zaman (3. 16) için bulunmuş olur (Kaufman ve Keller, 1983). Bunun yanısıra tüm zamanlar için tek bir görünür öz direnç eğrisi (all-time resistivity curve) hesaplanması için doğrudan manyetik alan değerlerinin kullanılmasıyla sayısal yaklaşımlar geliştirilmiştir (Karlık ve Strack, 1990; Denghai ve Meju, 2000). Bu işlem ölçülen gerilim değerlerinin entegrasyonu ile yapılmaktadır ve bir doğrultu boyunca elde edilen tüm zaman eğrileri, elektrik açma ölçümlerinde olduğu gibi, ortama ilişkin ilk kalitatif değerlendirme için kullanılabilir.

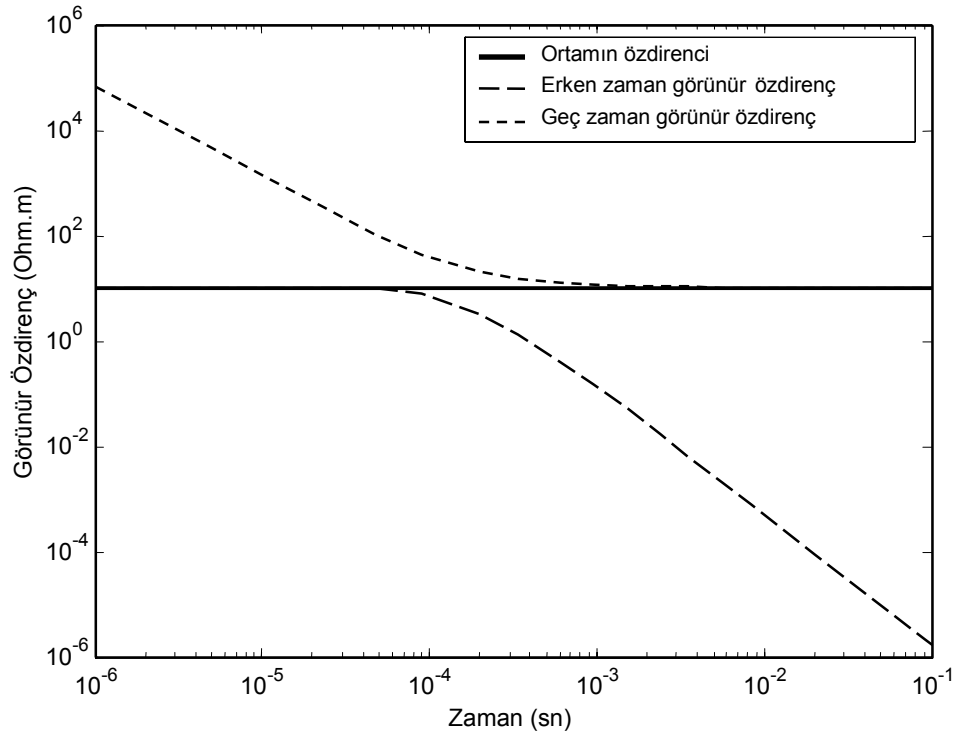
Yukarıda verilen öz direnç formülleri cihaz üreten firmaların kullandığı bazı referanslar ile farklı formlarda yazılabilir. Örnek olarak bu tez çalışmasında kullanılan SIROTEM MK 3 cihazı için yukarıdaki geç zaman görünür öz direnç ifadesi izleyen bağıntı ile verilmiştir (Fugro, 2002).

$$\rho_a^{geç\ zaman} = 6.32 \cdot 10^{-12} A^{2/3} a^{4/3} \left(\frac{V}{I}\right)^{-2/3} t^{-5/3} \quad (3.17)$$

Bu bağıntı,  $t > 0.00119a^2\rho_a$  olması durumunda uygulanabilir. Bu bağıntılarda  $A$  alıcı halkanın efektif alanını (SIROTEM RVR (Roving Vector Receiver) için  $10^4 \text{ m}^2$ ) ve  $a$  verici halkanın bir kenarının uzunluğunu göstermektedir.

### 3. 1. 2 Yokuş Zamanı ve Araştırma Derinliği

Üçüncü bölümde özetlendiği gibi, yokuş zamanı (ramp time), verici halka üzerindeki akımın kesilmesi ile sıfır değerine inmesi arasında geçen zamandır. Yokuş zamanının sonunda ortamda birincil alanlar bulunmamaktadır. TEM yöntemi ile yapılan ölçümlerin değerlendirilebilmesi için sadece ikincil alandan oluşan gerilim değerleri gereklidir. Dolayısıyla yokuş zamanı değerlendirilebilir veri grubunun belirlenebilmesi açısından oldukça önemli bir parametredir.



Şekil 3. 6 Homojen bir ortam (10 Ohm.m) için erken zaman ve geç zaman asimtotik eğrileri.

Uygulamada, çok sık (<10 m) bilgilerin elde edilebilmesi için yokuş zamanının kısa tutulması istenir. Yokuş zamanı, teldeki akım miktarı ve kullanılan telin direnci ile doğru orantılı, tele uygulanan gerilim değeri ile ters orantılıdır. Dolayısıyla bu parametrelerin büyüklüğünde değişiklikler yapmak suretiyle yokuş zamanı küçültülebilir ve istenen derinliğe ait bilgiler toplanabilir.

TEM yönteminde yapılan araştırmalarda kontrol edilmesi gereken diğer bir önemli parametre, yapılan ölçümlerdeki araştırma derinliğidir. Kuramsal olarak araştırma derinliği, verici halkaya uygulanan akımın büyüklüğü ve ortamın öz direnci ile bağlantılı olmasına rağmen aletsel kısıtlamalar nedeniyle akımın belirli bir değerin üzerine çıkarılabilmesi güçtür. Bu nedenle verici halkanın çapının büyütülmesi ile araştırma derinliği kontrol edilebilir. Genel bir yaklaşım yaparsak, elektromanyetik



gürültünün olmadığı ve yeterince uzun süre veri toplanabildiği bir ölçümde araştırmada derinliği, verici halkanın bir kenarının  $\frac{1}{4}$ 'ü ile 4 katı arasında değişir.

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

$$\delta_T = \left( \frac{2t\rho}{\mu_0} \right)^{1/2} \quad (3.18)$$

$$\delta_{eff}^{TEM} = \frac{\delta_T}{2.3} \quad (3.19)$$

Burada  $\delta_T$  özdirence ve gecikme zamanına bağlı nüfuz derinliğidir. Ancak uygulamada bu derinliğe pratik olarak ulaşmak zordur. Bu nedenle  $\delta_{eff}$  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 (3.19) bağıntısı kullanılarak hesaplanmıştır.

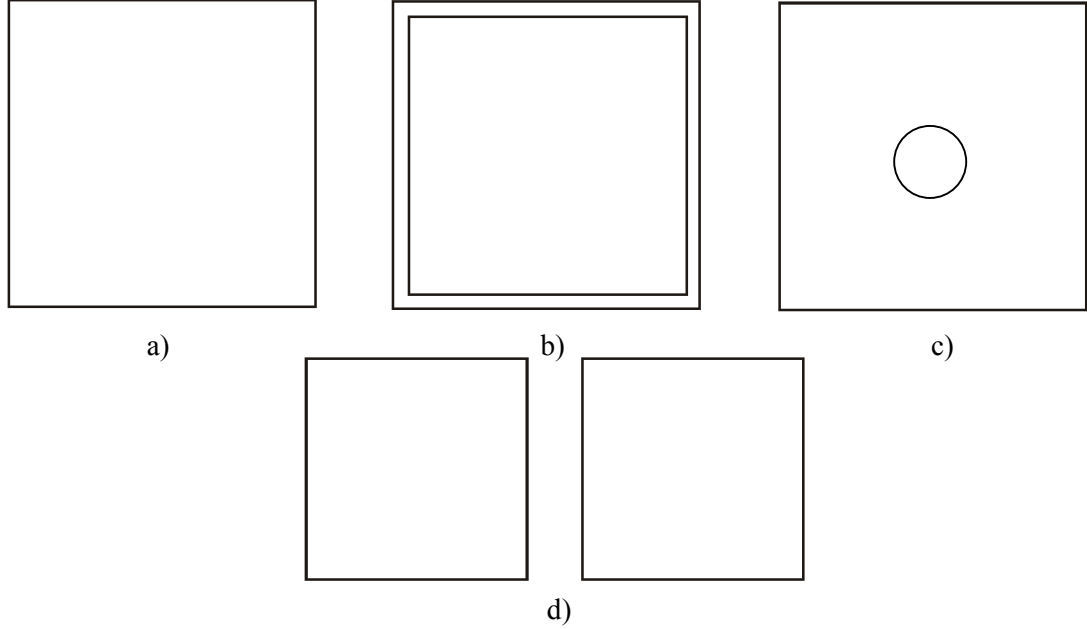
### 3. 1. 3 Ölçüm Düzenekleri

Geçici elektromanyetik ölçümlerinin alınması sırasında alıcı ve verici halkaların konumları bölgenin jeolojisine ve yapılan araştırmanın amacına bağlı olarak seçilmektedir. Uygulamada en çok kullanılan üç tip alıcı-verici düzeneği vardır.

Bunlardan birincisi, tek halka düzeneğidir. Tek halka (single loop) düzeneğinde, tek bir halka hem verici hem de alıcı olarak görev yapar (Şekil 3. 7). Genel olarak 50x50, 100x100 veya 200x200 m<sup>2</sup> verici halkalar kullanılır. 50x50 m<sup>2</sup>'den küçük halkaların kullanılması durumunda birden fazla devir (turn) yapılması gerekebilmektedir (Fugro, 2002). Alıcı ve verici halkalar için iki ayrı halkanın kullanılması ile oluşturulan düzeneğe iç içe iki halka (coincident loop) denir. Aynı lokasyona yerleştirilen alıcı ve verici halkaları kullanan düzeneklerde alıcı halkada en yüksek sinyal değerleri gözlenir (Fugro, 2002). Ancak yeraltında birden fazla iletken tabaka olması durumunda oldukça karmaşık bir anomali elde edilmektedir (Spies, 1986).

En çok kullanılan ikinci ölçüm düzeneği ayrı iki halka (separate loops) düzeneğidir. Bu düzende alıcı ve verici halkalar arasında bir açıklık bırakmak suretiyle düzeneğin istenilen yöne kaydırılmasıyla ölçüm alınmaktadır. Dalan bir iletkenin

dalımının takip edilebilmesinde oldukça iyi sonuçlar vermesine karşın arazide bu düzeneğin kurulması güçtür. Ayrıca, ölçülen sinyalin küçük olması ve nüfuz derinliğinin az olması bu düzeneğin diğer zayıflığıdır (Fugro, 2002).



Şekil 3. 7 TEM yöntemi ile yapılan ölçümlerde en çok kullanılan ölçüm düzenekleri. a) Tek halka (Single loop). b) İç içe iki halka (Coincident loop). c) Merkezi halka (Central loop). d) Ayrı ayrı iki halka (Separate loop).

En çok kullanılan üçüncü ölçüm düzeneği merkezi halka (central loop) düzeneğidir. Bu düzenekte alıcı halka verici halkanın merkezine yerleştirilir. Alıcı halka olarak çok devirli küçük alıcılar (örneğin, 50 cm çapında 300-2500 devir) kullanılmaktadır. Bu şekilde yapılan ölçümlerde, iletkenin lokasyonu en iyi şekilde tespit edilirken hem yanal hem de düşey yönde yüksek çözünürlüklü veriler ölçülebilir. Alıcı halkanın küçük ve taşınabilir olmasından dolayı ölçümler çok hızlı yapılabilmesine karşın yerel değişimlerden daha çok etkilenir.

Bu çalışma kapsamında yukarıda anlatılan yöntemler arasından merkezi halka (central loop) düzeneği kullanılmıştır. Alıcı olarak teknik özellikleri ekler kısmında verilen SIROTEM RVR kullanılmıştır. Bu düzeneğin kullanılarak yapılan ölçümlerde 3 kişilik bir grup ile yarım saatlik bir çalışma sonunda bir ölçü alımı tamamlanabilmektedir.

### 3. 2 TEM Ölçümlerinde Verici Halka Seçimi

TEM yönteminde yapılan araştırmalarda, kullanılacak verici halkaların boyları ve verici halka olarak kullanılan telin cinsi araştırma derinliğini ve veri kalitesini dolaylı

yoldan etkileyen önemli koşullardır. Daha önceki alt bölümlerde bahsedildiği gibi yokuş zamanı (bir başka deyişle, Transmitter Turn-Off Time-TOT) süresince ölçü alımı devam etmesine rağmen bu zaman süresince alınan ölçümler birincil alandan etkilendiklerinden dolayı değerlendirilmemektedir. Bu nedenle yokuş zamanının büyük olduğu durumlarda ilk bir kaç örnekleme zamanı için ölçülen veriler kullanılmamaktadır. Dolayısıyla yokuş zamanını kontrol eden parametreler değiştirilerek istenilen derinliklere ait bilgiler elde edilebilmektedir.

$$TOT = \frac{L_V I}{V} \quad (3.20)$$

$$L_V = 7.09 \cdot 10^{-7} b \left[ \ln \left( \frac{4.51b}{a} \right) - 1.75 \right] \quad (3.21)$$

Yukarıdaki bağıntıda,  $L_V$  verici halkanın indüktansını,  $b$  verici halkanın bir kenarının uzunluğunu,  $a$  telin çapını,  $I$  verici halka üzerine gönderilen akımı,  $V$  verici halkadaki gerilimi göstermektedir. (3.20) bağıntısında görüldüğü gibi yokuş zamanı, akımın ve indüktansın artmasıyla artmakta, verici halkadaki gerilimin artmasıyla azalmaktadır. SIROTEM MK 3 cihazı için çıkış gerilimi 24 V'tur. Dolayısıyla, kullanılan halkanın direnci artırılıp akım düşürülürse yokuş zamanı azaltılabilir. Ancak aynı cins tel kullanılması durumunda halkanın boyu küçültülerek verici halkanın indüktansı küçültülebilir (Verici halka boyutlarının belirlenmesi ile ilgili ayrıntılı açıklamalar 5. bölümde verilmektedir.). Bunun yanında, SIROTEM ACCELERATOR kullanılarak çıkış gerilimi 400 V'a çıkarılabilir ve verici halka değiştirilmeden yokuş zamanı 10-15 kat küçültülebilmektedir.

#### 4. TERS ÇÖZÜM

Matematiksel bağıntıların kullanılması ile önkestirim yapılarak belirlenen parametre değerlerinden kuramsal veri hesaplanması ve bu işin model parametrelerinin farklı değerleri için tekrarlanarak ölçülen verilere en yakın kuramsal verinin belirlenmesine düz çözüm (forward modelling) denilmektedir. Düz çözüm işlemlerinin sonuçları gerçek çözüme kaba bir yaklaşım yapılmasını sağlamakla birlikte son yirmi yılda bilgisayar teknolojisindeki hızlı gelişmenin bir sonucu olarak yerini ters çözüme bırakmıştır. Ters çözüm, verilerden fiziksel ve geometrik parametrelerin belirlenmesini sağlamaktadır. Veri ve parametre arasındaki ilişkiye bağlı olarak doğrusal ve doğrusal olmayan ters çözüm olarak iki ana grupta incelenebilir. Parametreler ile veri arasındaki ilişkinin doğrusal olması durumunda ters çözüm işleminin bir kez uygulanması ile bir çözüme ulaşılır ve çözüm tektir. İlişkinin doğrusal olmaması durumunda; ki jeofizikte birçok problem bu gruba girmektedir, model yanıtının birçok kez hesaplanması gerekir. Her yineleme için bulunan model parametreleri bir sonraki yineleme için başlangıç değeri olarak belirlenir ve yinelemelerin bittiği durumda çözüm elde edilir. Yineleme işleminin durdurulması için çeşitli yöntemler kullanılmasına rağmen önceden yineleme sayısının belirlenmesi, ölçülen veri ile kuramsal veri arasındaki hata oranının belirli bir değere inmesi ve iki ardışık yineleme arasındaki çakışma ölçütü farkının belirli bir değerin altına inmesi en çok kullanılan yöntemlerdir.

Doğrusal olmayan ters çözümün sonucu tek olmayıp başlangıç modeline, kullanılan veri grubunun gürültü içeriğine ve kullanılan matematiksel bağıntıya bağlı olarak farklı çözümler bulunabilir. Dolayısıyla, uygun bir başlangıç modeli, gürültü içeriği az olan bir veri grubu ve parametre ile veri arasındaki ilişkiyi en iyi ifade eden matematiksel bağıntı gerçekçi bir sonucun bulunması için önemlidir. Ancak ters çözüm işleminin duraylılığı gürültü içeriği farklı veri grupları ve farklı başlangıç modelleri kullanılarak sınanmalı ve elde edilen bulgular karşılaştırılmalıdır.

#### 4. 1 En Küçük Kareler Yöntemi

Tek bir çözümü olan ve sıfır hata oranı veren problemler doğrusal problemlerdir (Menke, 1984). Bu tür problemlerde veri grubu ile model parametreleri arasındaki doğrusal ilişki,

$$y_i = \mathbf{A}_{ij} x_j \quad (4.1)$$

şeklinde verilebilir. Burada  $y_i (i=1, \dots, n)$  gözlemsel verileri,  $x_j (j=1, \dots, m)$  model parametrelerini ve  $\mathbf{A}_{ij}$  model parametreleri ile veri arasındaki matematiksel ifadeyi gösterir. Eşitlik 4. 1 de verilen matematiksel ilişkinin ters yönde işletilmesi ile,

$$x_j = \mathbf{A}_{ij}^{-1} y_i \quad (4.2)$$

model parametreleri doğrudan bulunabilir.

Ancak jeofizikteki birçok problemde veri grubu ile model parametreleri arasındaki matematiksel ifade doğrusal olmadığından dolayı belirlenen bir başlangıç değeri civarında, birinci dereceden Taylor serisine açılarak doğrusal olmayan bir matematik ifade doğrusallaştırılabilir. Herhangi bir  $f$  fonksiyonunun  $x_j^\circ$  civarında Taylor serisi açılımı,

$$f(x_j) \cong f(x_j^\circ) + \frac{\partial f(x_j^\circ)}{\partial x_j} (x_j - x_j^\circ) + \mathbf{R}(x_j - x_j^\circ) \quad (4.3)$$

şeklinde yazılır. Yukarıdaki bağıntıda  $\mathbf{R}(x_j - x_j^\circ)$  ifadesi yüksek dereceli türevleri göstermektedir. Yüksek dereceli türevlerin ihmal edilmesi durumunda (4. 3) bağıntısı (4. 1) bağıntısına benzemektedir.

$$f(x_j) - f(x_j^\circ) = \left[ \frac{\partial f(x_j^\circ)}{\partial x_j} \right] [x_j - x_j^\circ] \quad (4.4)$$

Doğrusal bir hale dönüştürülen (4. 4) numaralı denklem daha genel bir biçimde yazılırsa,

$$y_i^{göz.} - y_i^{kur.} = \sum_{j=1}^m \frac{\partial f_i(x_j^\circ)}{\partial x_j} (x_j - x_j^\circ) \quad i=1, \dots, n \quad (4.5)$$

elde edilir. Yukarıdaki ifade en genel haliyle,

$$\Delta \mathbf{y} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} \quad (4.6)$$

şeklinde yazılır. Bu eşitlikte  $\mathbf{A}(n \times m)$  kısmi türevler dizeyi olarak adlandırılır ve sütunları model parametrelerine göre kısmi türevlerden oluşur.  $\Delta \mathbf{y}(n \times 1)$  gözlemsel veriler ile kuramsal veriler arasındaki farkı ve  $\Delta \mathbf{x}(m \times 1)$  model parametrelerine uygulanacak düzeltmeleri içeren serilerdir.

Elektrik ve elektromanyetik yöntemlerde model parametreleri büyüklük olarak geniş bir aralıkta olabilmesine rağmen gözlemsel veri üzerindeki etkileri doğrusal değildir. Bu nedenle ters çözüm işleminde parametre ve veri grubunun logaritmalarının alınarak işlemlerin yapılması doğrusal olmayan bir problemi bir adım daha doğrusallaştırmaktadır. Bu işlem aynı zamanda fiziksel olarak mümkün olmayan negatif büyüklüklerin (sismik hız, yoğunluk, öz direnç, tabaka kalınlığı vs) hesaplanmasını da engellemektedir.

Veri sayısı ile model parametreleri sayısının eşit olması durumunda ( $n=m$ ) denklem düzenekleri tam tanımlı (exact determined) olarak isimlendirilir. Bu durumda  $\mathbf{A}$  dizeyi kare bir dizeydir ve tekil olmaması durumunda tersi alınabilir.

$$\Delta \mathbf{x} = \Delta \mathbf{y} \mathbf{A}^{-1} \quad (4.7)$$

Bu durumda denklem düzeneğinin tek bir çözümü vardır. Veri sayısının model parametreleri sayısından fazla olması durumunda, ( $n > m$ ) denklem düzeneği fazla tanımlı (overdetermined) olarak isimlendirilir ve kısmi türevler dizeyinin karesi doğrudan alınamaz.  $\mathbf{A}$  dizeyinin tersinin alınabilmesi için yalancı ters dizey ifadesi kullanılır.

$$\mathbf{H} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \quad (4.8)$$

Yukarıdaki  $\mathbf{H}$  ifadesi 4.7 bağıntısında  $\mathbf{A}^{-1}$  dizeyi yerine konularak ters çözüm işlemi gerçekleştirilir.

#### 4. 1. 1 Tekil Değer Ayrışımı Yöntemi ile En Küçük Kareler Çözümü

En küçük kareler yönteminde  $\mathbf{A}$  dizeyinin tersinin alınabilmesi için determinantının sıfırdan farklı olması gerekir. Kısmi türevler dizeyinin determinantının sıfır veya sıfıra çok yakın olması durumunda Tekil Değer Ayrışımı (Singular Value

Decomposition-SVD) yöntemi, dikdörtgen bir dizey olan Jacobian dizeyini, üç dizeyin çarpımı şeklinde ifade eder ve bu dizeyler üzerinde yapılan işlemler ile  $\mathbf{A}$  dizeyinin tersinin alınması işini yapmış olur. SVD yönteminin bir diğer avantajı da model parametrelerinin çözünürlülüğü ve veri ayrırlılığı hakkında doğrudan bilgi vermesidir. Fazla tanımlı (over determined) bir denklem düzeneği olması durumunda  $\mathbf{A}$  dizeyinin tersi,

$$\mathbf{B} = \mathbf{V}\mathbf{A}^{-1}\mathbf{U}^T \quad (4.9)$$

olarak hesaplanır (Jackson, 1972).

Burada  $\mathbf{V}(m \times m)$  dizeyi parametre özyöneylemlerini ve  $\mathbf{U}(n \times m)$  dizeyi veri özyöneylemlerini içerir.  $\mathbf{A}$  dizeyi  $(m \times m)$  köşegeni parametre özdeğerlerini  $(\lambda_j)$  içeren dizeydir.  $\mathbf{V}$  dizeyi hangi özdeğerin hangi parametre ile ilişkili olduğunu gösterirken,  $\mathbf{U}$  dizeyi verilerin birbirleriyle olan bağımlılığını ve çözüme olan katkılarını göstermektedir.

#### 4. 1. 2 Sönümlü En Küçük Kareler Yöntemi

Ters çözüm işleminde kullanılan veri grubu, model parametrelerinin tamamını aynı kararlılıkta çözebilmek için yeterli olan bilgiyi içermemesi durumunda, özdeğeri küçük olan model parametrelerinin göstereceği büyük salınımlardan dolayı düzenek kararsız davranır ve çözümden uzaklaşır. Lanczos ters çözüm tekniğinde sistemi kararsız kılan sıfır veya göreceli olarak en küçük özdeğerler düzeneden çıkarılarak ters çözüm işleminin kararlı hale gelmesi sağlanır. Daha sonra her yineleme adımında kuramsal veri ile gözlemsel veri arasındaki çakışma oranı takip edilerek çıkarılan özdeğerler tekrar sisteme dahil edilerek optimum bir çözüm bulunmaya çalışılır. Küçük özdeğerlerden kaynaklanan duraysızlık sorununun üstesinden gelebilmek için en çok kullanılan yollardan biri de Marquardt-Levenberg algoritması olarak bilinir ve denklem düzeneğinin özdeğerlerine  $\beta$  gibi küçük bir sayı eklenerek düzeneğin kararlı hale gelmesi sağlanır (Lines ve Treitel, 1984).

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{V}(\mathbf{A} + \beta^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{U}^T \Delta \mathbf{y} \quad (4.10)$$

Eklenen sayının, büyük özdeğerler üzerinde çözümü etkileyecek bir ağırlığı olmamasının yanında küçük özdeğerlerden kaynaklanan salınımları sönümleyecek bir büyüklükte olması istenir. Sönüm sayısının büyük seçilmesi durumunda düzenek küçük adımlarla fazla yineleme yaparak çözüme ulaşır (en dik iniş yöntemi). Çok

küçük bir sönüm sayısı seçilmesi durumunda (Gauss-Newton yöntemi) çözüm çok hızlı gelişebilmesine rağmen özdeğerlerin çok küçük olması durumunda düzenek çözümden uzaklaşabilir (Başokur, 2001). Dolayısıyla en iyi çözümü elde edebilmek için başlangıç olarak makul bir sönüm sayısı alınması gereklidir. Doğru bir  $\beta$  sayısı, model parametreleri üzerinde en fazla değişimi yapabilecek kadar küçük ancak kuramsal veri ile ölçülen veri arasındaki çakışma ölçütünü artırmayacak kadar büyük olmalıdır. Özetle olabilecek en büyük adımlarla çözüme yaklaşmak için gerekli olan  $\beta$  değerleri en iyi değerlerdir. Bu çalışma kapsamında yazılan bilgisayar programında,  $\beta$  değeri başlangıç olarak nispeten büyük bir değer (en büyük özdeğerin yarısı) olarak alınmıştır. Bunun nedeni kötü bir model girilmesi durumunda düzeneğin kararlı davranmasını sağlamaktır. İlerleyen yineleme adımlarında  $\beta$  değeri küçültülerek tüm model parametrelerinin çözüme katkıları artırılır. Eğer düzenek bir önceki yineleme adımından daha büyük bir hata oranı veriyorsa daha büyük bir  $\beta$  değeri için  $\Delta x$  düzeltme serisi değerleri tekrar oluşturulur. Bu işlem, yeni bir kısmi türevler dizeyi oluşturulmasını gerektirmez (Başokur, 2001).

#### 4. 1. 3 Ağırlıklı Sönümlü En Küçük Kareler Çözümü

Gözlemsel veriler her zaman bir hata içerirler ve içerdikleri hata miktarının tersi ile orantılı olarak çözüme katkı sağlamaları istenir. Bunun yanında model parametreleri için de bir değişim aralığı kestirilebilir. Bu durumda (4. 6) numaralı ifade ,

$$\begin{bmatrix} \frac{y_1^{gözlemsel} - y_1^{kuramsal}}{\sigma_1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \frac{y_n^{gözlemsel} - y_n^{kuramsal}}{\sigma_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\tau_1}{\sigma_1} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \cdot & \cdot & \cdot & \frac{\tau_m}{\sigma_1} \frac{\partial f_1}{\partial x_m} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \frac{\tau_1}{\sigma_n} \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \cdot & \cdot & \cdot & \frac{\tau_m}{\sigma_n} \frac{\partial f_n}{\partial x_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{x_1 - x_1^o}{\tau_1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \frac{x_m - x_m^o}{\tau_m} \end{bmatrix} \quad (4. 11)$$

şeklinde yazılır. Burada  $\sigma$  verilerin ve  $\tau$  model parametrelerinin hata oranlarını göstermektedir. İstenilen bir model parametresinin hata oranı yüksek girilerek geniş bir aralıkta salınım yapmasına izin verilebilir. Bu durumun tersi uygulanarak istenilen bir model parametresinin dar bir aralık içinde değişmesi de sağlanabilir. Bu çalışmada tüm model parametrelerine yüzde kırk oranında ve veri grubuna yüzde yirmibeş oranında hata oranı atanmıştır.



## 4. 2 Ortak Ters Çözüm

Bu bölüme kadar anlatılan ters çözümü kararlı kılma yöntemleri ve uygulama biçimleri, temel olarak tek bir matematiksel ifade üzerine geliştirilmiştir. Bu matematiksel ifade belirli bir fiziksel büyüklüğün karakterize edildiği gözlemsel veriler ile o fiziksel büyüklüğün model parametreleri arasındaki ilişkisini göstermektedir. Ters çözümü geliştirmek amacı ile uygulanan bir diğer yöntem de ortak ters çözümdür (Joint Inversion). İki farklı ilkedeki veri grubunun ortak model parametreleri içermesi durumunda uygulanan çözüm tekniğine ortak ters çözüm denir. Bu durum temel olarak koşullu bir ters çözüm işlemi olarak da düşünülebilir. Başka bir deyişle, denklem düzeneği farklı iki matematiksel ifade kullanarak farklı iki veri grubu ile ilişkili tek bir model parametre serisi hesaplamaya çalışır. Bu durum doğal olarak ters çözüme ek bir bilgi sağlanması ve çözümün gelişmesi sonucunu doğurur. Ortak ters çözüm uygulamalarındaki başarı, sistemin ortak model parametrelerinin sayısı ve bu parametrelerin çözüme olan katkılarının ağırlığına bağlıdır. Bu uygulamalarda veri farkları serisi, kısmi türevler dizeyi ve parametre düzeltme serisi aşağıdaki şekilde yazılır.

$$\begin{bmatrix} \frac{y_1^{gözlemsel} - y_1^{kuramsal}}{\sigma_1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \frac{y_n^{gözlemsel} - y_n^{kuramsal}}{\sigma_n} \\ \text{---} \\ \frac{Y_1^{gözlemsel} - Y_1^{kuramsal}}{\sigma'_1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \frac{Y_n^{gözlemsel} - Y_n^{kuramsal}}{\sigma'_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\tau_1}{\sigma_1} \frac{\partial \mathbf{f}_1}{\partial x_1} & \cdot & \cdot & \frac{\tau_m}{\sigma_1} \frac{\partial \mathbf{f}_1}{\partial x_m} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \frac{\tau_1}{\sigma_n} \frac{\partial \mathbf{f}_n}{\partial x_1} & \cdot & \cdot & \frac{\tau_m}{\sigma_n} \frac{\partial \mathbf{f}_n}{\partial x_m} \\ \text{---} \\ \frac{\tau_1}{\sigma'_1} \frac{\partial \mathbf{g}_1}{\partial x_1} & \cdot & \cdot & \frac{\tau_m}{\sigma'_1} \frac{\partial \mathbf{g}_1}{\partial x_m} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \frac{\tau_1}{\sigma'_n} \frac{\partial \mathbf{g}_n}{\partial x_1} & \cdot & \cdot & \frac{\tau_m}{\sigma'_n} \frac{\partial \mathbf{g}_n}{\partial x_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{x_1 - x_1^\circ}{\tau_1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \frac{x_m - x_m^\circ}{\tau_m} \\ \text{---} \\ \frac{x_1 - x_1^\circ}{\tau_1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \frac{x_m - x_m^\circ}{\tau_m} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Yukarıdaki denklem düzeneğinde  $y$  birinci,  $Y$  ikinci veri grubunu,  $\sigma$  birinci ve  $\sigma'$  ikinci veri grubunun hata oranlarını ve  $\mathbf{f}$  birinci,  $\mathbf{g}$  ise ikinci matematiksel ifadeyi göstermektedir. Farklı ilkedeki ve ortak model parametreleri içeren yeni denklem

düzenekleri (4. 12) numaralı eşitliğe eklenerek istenildiği sayıda düzenek birbiri ile koşullu olarak çözülebilir.

#### 4. 3 Ters Çözüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Doğrusal olmayan problemlerde yineleme işleminin sonlandırıldığı durumdaki kısmi türevler dizeyi kullanılarak parametre ve veri çözünürlüğü incelenebilir. Ancak öncelikle yineleme işleminin nerede duracağı konusunda karar verilmelidir. Bu aşamada öncelikle gözlemsel veri ve kuramsal veri arasındaki çakışma ölçütünün tanımlanması gereklidir.

$$\chi = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [y^{gözlemsel} - y^{kuramsal}]^2 \right]^{1/2} \quad (4. 13)$$

Yineleme işleminin durdurulması,

- 1) Çakışma ölçütünün önceden belirlenen bir değerin altına inmesi,
- 2) Belirli bir yineleme sayısına erişilmesi,
- 3) Ardışık iki yineleme arasındaki çakışma farkının belirli bir değerin altına inmesi.

Koşullarından herhangi biri kullanılarak yapılabilir. Çakışma ölçütünün sağlanması durumunda sönümlü en küçük kareler yöntemi için model ayrırlılık dizeyi  $\mathbf{R}(m \times m)$ ,

$$\mathbf{T} = \text{diag} \left( \frac{\lambda_j^2}{\lambda_j^2 + \beta^2} \right) \quad (4. 14a)$$

ifadesi kullanılarak,

$$\mathbf{R} = \mathbf{V} \mathbf{T} \mathbf{V}^T \quad (4. 14b)$$

şeklinde yazılır (Başokur, 2001). Burada  $\lambda_j (j=1, \dots, m)$  özdeğerleri göstermektedir. Model ayrırlılık dizeyinin birim dizey olması durumunda çözüm tektir. Ayrıca model ayrırlılık dizeyi kullanılarak parametrelerin birbirleri ile olan bağımlılıkları kontrol edilir. Eşitlik 4. 14b’de verilen  $\mathbf{T}(l \times m)$  ifadesi sönüm katsayılarını içeren dizeydir ve 0 ile 1 arasında değişir. Ters çözüm sonuçlarının yorumlanma aşamasında, herhangi bir verinin ne kadar sönümlendiği hakkında bilgi verdiğinden dolayı, oldukça kullanışlı bir kontrol parametresidir. Veri ayrırlılık dizeyi  $\mathbf{S}(n \times n)$

veri grubu içerisinde yer alan herbir verinin birbirleriyle olan ilişkisini ve çözüme olan katkılarını gösterir. Sönümlü en küçük kareler yöntemi için SVD bileşenleri kullanılarak,  $\mathbf{S}$  dizeyi aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$\mathbf{S} = \mathbf{U}\mathbf{T}\mathbf{U}^T \quad (4.15)$$

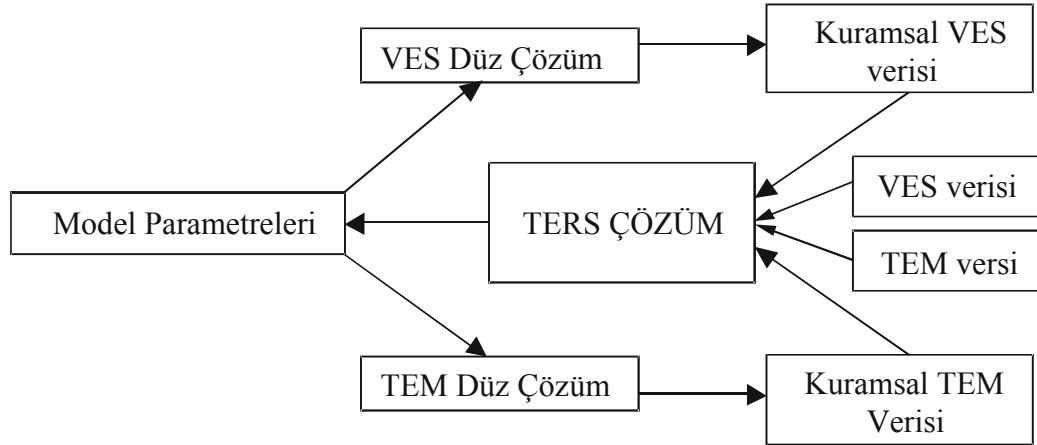
Parametre özyöneylemi dizeyi  $\mathbf{V}(m \times m)$  kullanılarak hangi özdeğerin hangi parametreyi veya parametreler kombinasyonunu kontrol ettiği incelenebilir (Raiche ve diğ., 1985). Veri özyöneylemi dizeyi  $\mathbf{U}(n \times m)$  belirli bir parametrenin çözüme ulaşması için hangi verileri daha çok kullandığını gösterir. Ters çözüm sonuçlarını değerlendirirken kontrol edilmesi gereken diğer bir parametre, çözüm sonucunda elde edilen parametrelerin varyanslarıdır. Varyans hesabı, doğrusal olmayan bir sistemin çözüm civarında doğrusallaştığı kabulü yapılarak, veri özyöneylemi dizeyi ve özdeğerler kullanılarak aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$Varyans = \sum_{j=1}^m \left( \frac{\mathbf{V}_{kj}}{\lambda_j} \right)^2 \quad (k=1, \dots, m) \quad (4.16)$$

Model parametreleri için hesaplanan varyans değerlerinin karekökleri alınarak standart sapma değerleri bulunur. Standart sapmanın büyük olması model parametresinin çözünürlüğünün düşük olduğunu göstermektedir.

## 5. YAPAY VERİLERİN TERS ÇÖZÜMÜ

Bu çalışma kapsamında, doğru akım öz direnç yöntemi ve geçici elektromanyetik yöntem ile ölçülen verilerin ayrı ayrı ters çözümlerinin ve ortak ters çözümlerinin yapılabilmesi için, bir bilgisayar yazılımı geliştirilmiştir. Bu yazılımda ters çözüm için gerekli olan türev dizeyleri sayısal türev alınarak oluşturulmuştur. Matlab programlama dilinde yazılan bilgisayar programı veri işleme kolaylığı, görsel üstünlükleri ve ters çözüme ait istatistiksel bilginin kontrol edilebilmesi açısından etkin bir programdır.



Şekil 5. 1 Ortak ters çözümün şematik gösterimi.

Ters çözüm sonuçlarının irdelenmesi, ortak ters çözümün sonuçlar üzerindeki etkisinin ve duraylılığının (stability) tartışılması amacıyla öncelikle yapay veriler ile ters çözüm yapılmıştır. Yapay modeller ile yapılan çalışmalarda, ayrı ayrı yöntemlerin birbirlerine göre üstünlük ve zayıflıkları da irdelenmiştir.

Yapay veriler ile yapılan ters çözüm sonuçları 5 yinleme (iteration) adımından sonra elde edilen bulguları göstermektedir. Çözümün doğruluğu ile ilgili istatistiksel göstergeler tek bir tabloda (örneğin, Tablo 5. 2) bir araya getirilip belli başlı çözünürlük göstergelerinin (başlangıç modeli, çözüm modeli, parametre özyöneyi, çözümün tekliği, standart sapma ve çakışma ölçütü) bir arada göz önünde bulundurularak yorum yapılabilmesi sağlanmıştır. Oluşturulan tablolarda parametre özyöneyleri matrisi (V), sayısal değerler yerine, Hördt, 1989'dan örnek alınarak, içi

dolu (pozitif değerler) ve içi boş (negatif değerler) halkalar ile gösterilmiştir. Halkaların büyüklüğü sayısal değerlerin büyüklüğü ile orantılı olup bu tez içinde kullanılan tüm gösterimlerde ölçek aşağıdaki gibidir.

Tablo 5. 1 V matrisinin sayısal değerlerine karşılık gelen halka boyları.

|                                                                                   |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  |  |
| 1                                                                                 | 0,5                                                                               | 0                                                                                 | -0,5                                                                                |
|                                                                                   |                                                                                   |                                                                                   | -1                                                                                  |

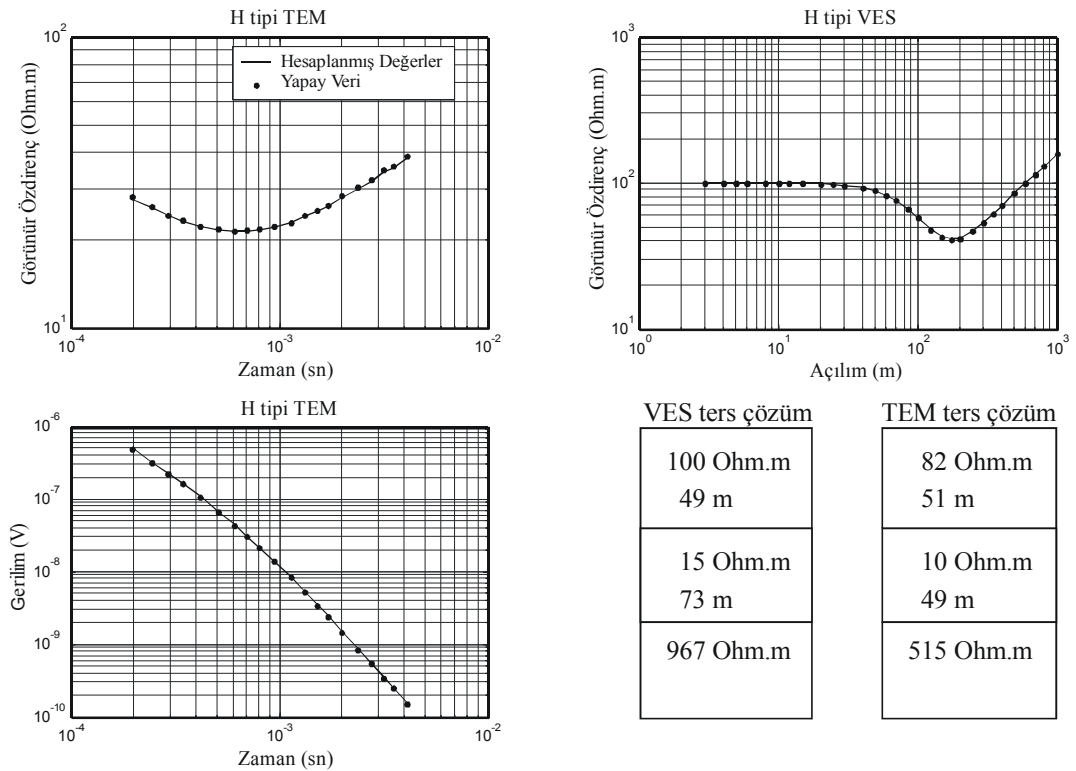
### 5. 1 H Tipi Yer Modeli

İki dirençli katman arasında bir iletken katman bulunan yer yapılarına H tipi yer yapıları denilmektedir. Ters çözüm denemeleri için ilk olarak H tipi bir yer modeli için yapay veriler oluşturulmuştur. Yapay veriler ile yapılan ters çözüm işlemlerinde veriler üzerine bir gürültü eklenme gereği duyulmamıştır. Bunun sebebi çalışmanın amacının yöntemlerin farklı gürültü içerikli veriler üzerinde yapabileceği çözümü değil yöntemlerin herbirinin ayrı ayrı ve birlikte sabit bir veri grubu üzerinde göstereceği çözüm yeteneğinin incelenmesidir. Oluşturulan H tipi VES verisi için yeteri kadar veri oluşturabilmek amacı ile 1000 m'ye kadar ( $AB/2 = 1000$  m) bir veri üretilmiştir (Şekil 5. 2). Aynı yer modeli için oluşturulan H tipi geçici elektromanyetik veri için  $50 \times 50$  m<sup>2</sup> verici halka ile merkezi halka düzeneği için 0.2-5 ms arasında bir veri oluşturulmuştur. TEM verilerinin gösteriminde, düşey eksen alıcı halkada ölçülen gerilim değerini gösterirken yatay eksen örnekleme zamanını göstermektedir. Gösterim ve anlama kolaylığı açısından elde edilen gerilim değerleri geç zaman görünür öz direnç değerlerine çevrilmiş ve ters çözüm sonuçları her iki grafik üzerinde gösterilmiştir (Şekil 5. 2).

H tipi yapay VES verisi için elde edilen ters çözüm sonuçları Tablo 5. 2'de verilmiştir. Bu tabloya bakıldığında en büyük özdeğer üst tabakanın öz direncini kontrol ettiği görülmektedir. 5 yinleme sonucunda bu parametre tam olarak çözülmüştür. Diğer parametreler, yöntemin hassasiyetine, başlangıç modeline ve kullanılan veri grubuna bağlı olarak tam olarak çözülememişlerdir (gerçek model değerlerine ulaşamamıştır). Ters çözüm sonuçları değerlendirilirken öncelikle birbiri ile ilişkili olan parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir. Daha sonra model çözünürlük matrisinin (**R**) köşegeninde yer alan değerlere bakılarak belirli bir model parametresinin ne kadar bir bağıllıkla çözüldüğü incelenebilir. H tipi yapay VES

verisinin ters çözüm sonucunda ikinci tabakanın kalınlığı ve öz direnci en büyük ikinci özdeğer tarafından kontrol edilmesine rağmen tam olarak çözülmemiş ancak bu iki parametrenin birbirine oranı çözülebilmektedir. Bununla birlikte model ayırmalılık değerlerine bakıldığında bu iki model parametresinin çözümünün tek olmadığı anlaşılabılır. Yani farklı bir başlangıç modeli için bu iki parametrenin ancak birbirine oranı çözülebilmektedir. Bu durum doğru akım öz direnç yönteminde karşılaşılan eşdeğerlik problemlerinden biridir ve giderilmesi için ek bilgiye ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca standart sapma değerleri ikinci tabakanın kalınlığı ve öz direnci için göreceli olarak daha yüksek çıkmıştır.

H tipi yapay TEM verisi için elde edilen ters çözüm sonuçlarında VES ters çözümü ile çözülemeyen model parametreleri ( $\rho_2$  ve  $h_2$ ) tam olarak çözülmüş (gerçek model değerlerine ulaşılmış) olmasına rağmen dirençli tabakalar ( $\rho_1$  ve  $\rho_3$ ) tam olarak çözülememiştir. Özellikle  $\rho_3$  parametresini kontrol eden özdeğere uygulanan sönümlendirme faktörü çok küçük olduğundan sonuç gerçek modelden oldukça uzak kalmıştır. Dirençli tabakalara ait model ayırmalılık değerleri de çözümün tek olmadığını vurgulamaktadır. Ayrıca model ayırmalılık değerinin küçük olduğu model parametreleri için standart sapma değerleri de yüksek çıkmıştır.



Şekil 5. 2 H tipi yer model için oluşturulan yapay VES ve TEM verileri ile yapılan ayrı ayrı ters çözüm sonucunda bulunan yer modelleri.

Tablo 5. 2 H tipi yapay VES verisi ters çözüm sonuçları.

| Model Parametreleri       | Gerçek Model | Başlangıç Modeli | Çözüm | H tipi VES                                                                        |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     | R - Model Ayrıklık Değerleri | Standart Sapma |
|---------------------------|--------------|------------------|-------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|----------------|
| $\rho_1$                  | 100          | 200              | 100   |  |  |  |   |                                                                                     | 1                            | 0.2            |
| $\rho_2$                  | 10           | 50               | 15    |  |  |  |   |  | 0.92                         | 6.3            |
| $\rho_3$                  | 1000         | 200              | 967   |  |  |  |  |  | 0.94                         | 5.7            |
| $h_1$                     | 50           | 80               | 49    |  |  |  |   |  | 0.99                         | 1.3            |
| $h_2$                     | 50           | 80               | 73    |  |  |  |   |  | 0.92                         | 6.2            |
| Sönüm katsayısı           |              |                  |       | 1                                                                                 | 1                                                                                 | 1                                                                                 | 1                                                                                  | 0.8                                                                                 | $\chi$                       |                |
| Çözülen model parametresi |              |                  |       | $\frac{1}{\rho_1}$                                                                | $\frac{h_2}{\rho_2}$                                                              | $\frac{1}{h_1}$                                                                   | $\frac{1}{\rho_3}$                                                                 | $\frac{1}{h_2 \rho_2}$                                                              | 0.4                          |                |

Tablo 5. 3 H tipi yapay TEM verisi ters çözüm sonuçları.

| Model Parametreleri       | Gerçek Model | Başlangıç Modeli | Çözüm | H tipi TEM                                                                          |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       | R - Model Ayrıklık Değerleri | Standart Sapma |
|---------------------------|--------------|------------------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|----------------|
| $\rho_1$                  | 100          | 200              | 82    |  |  |  |  |  | 0.62                         | 14             |
| $\rho_2$                  | 10           | 50               | 10    |  |  |  |   |  | 0.99                         | 2.7            |
| $\rho_3$                  | 1000         | 200              | 515   |  |  |  |  |  | 0.43                         | 18             |
| $h_1$                     | 50           | 80               | 51    |  |  |  |   |  | 0.98                         | 3.2            |
| $h_2$                     | 50           | 80               | 49    |  |  |  |   |  | 0.97                         | 4.5            |
| Sönüm katsayısı           |              |                  |       | 1                                                                                   | 1                                                                                   | 1                                                                                   | 0.9                                                                                  | 0.01                                                                                  | $\chi$                       |                |
| Çözülen model parametresi |              |                  |       | $\frac{1}{h_2 \rho_2}$                                                              | $h_1$                                                                               | $h_2 \rho_2$                                                                        | $\frac{\rho_1}{\rho_3}$                                                              | $\frac{1}{\rho_1 \rho_3}$                                                             | 0.2                          |                |

H tipi yer modeli için oluşturulan VES ve TEM verileri ile yapılan ters çözüm sonuçları birlikte irdelendiğinde (Şekil 5. 4) dirençli tabakaların VES yöntemi ile, iletken tabakaların TEM yöntemi ile daha iyi çözüldüğü görülmektedir (Gomez-Trevino ve Edwards, 1983). Dolayısıyla bu iki yöntemin ortak bir ters çözüm çatısı altında birleştirilmeleri çözümü geliştirecek ve belirsizlikleri ortadan kaldıracaktır. Bu amaçla aynı başlangıç modeli ve aynı veri grupları için ortak ters çözüm uygulanmıştır. Ortak ters çözüm sonuçları incelendiğinde tüm model parametreleri için gerçek model değerlerinin bulunduğu görülmektedir. Ayrıca model ayırmalık değerleri ve sönümlendirme katsayıları 1 veya 1'e çok yakın değerler olarak çözümün tek olduğunu işaret etmektedirler. Dolayısıyla model parametreleri arasında ilişkiler mevcut olsa bile sistemin çözüm yeteneğinin yüksek olmasından dolayı standart sapma değerleri de küçüktür (Tablo 5. 4).

Tablo 5. 4 H tipi yapay TEM ve VES verilerinin ortak ters çözüm sonuçları.

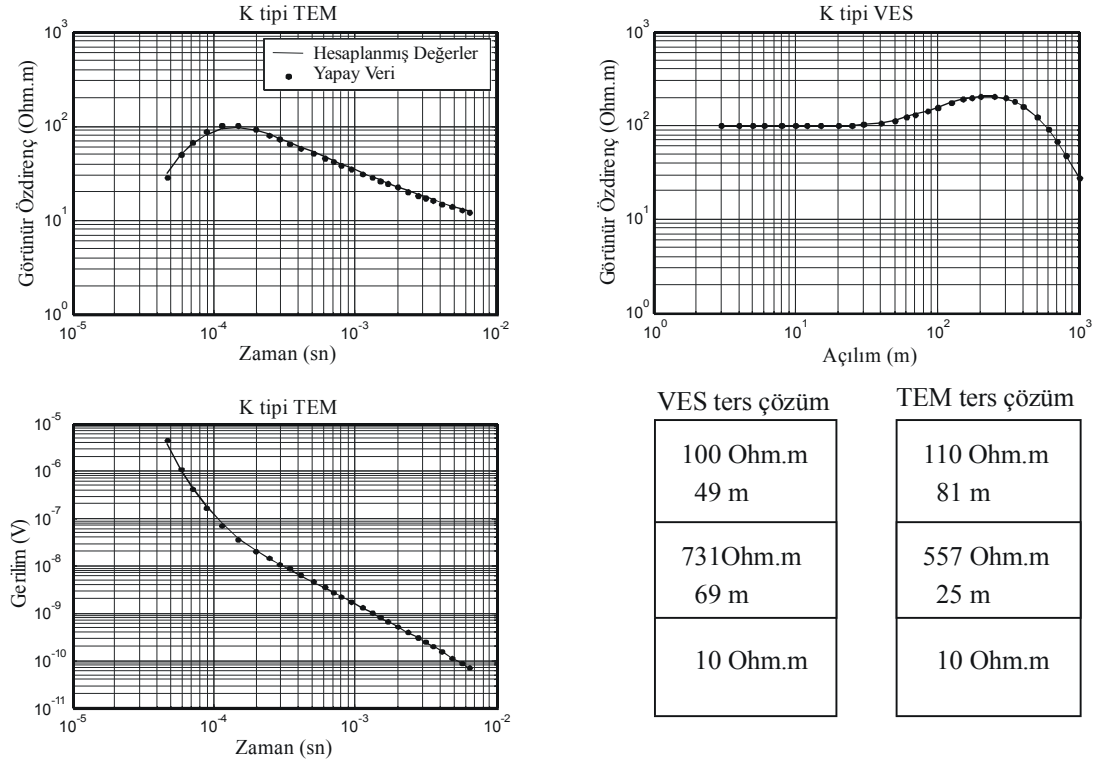
| Model Parametreleri       | Gerçek Model | Başlangıç Modeli | Çözüm | H tipi TEM ve VES                                                                   |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                       | R - Model Ayırmalık Değerleri | Standart Sapma |
|---------------------------|--------------|------------------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|----------------|
| $\rho_1$                  | 100          | 200              | 100   |  |  |  |  |                                                                                       | 1                             | 0.2            |
| $\rho_2$                  | 10           | 50               | 10    |  |  |  |  |  | 0.99                          | 0.9            |
| $\rho_3$                  | 1000         | 200              | 992   |  |  |  |  |  | 0.99                          | 3              |
| $h_1$                     | 50           | 80               | 50    |  |  |  |  |  | 1                             | 0.4            |
| $h_2$                     | 50           | 80               | 50    |  |  |  |  |  | 0.99                          | 1              |
| Sönüm katsayısı           |              |                  |       | 1                                                                                   | 1                                                                                   | 1                                                                                   | 1                                                                                   | 1                                                                                     | $\chi$                        |                |
| Çözülen model parametresi |              |                  |       | $\frac{h_2}{\rho_2}$                                                                | $\frac{1}{h_1\rho_1}$                                                               | $\frac{h_1}{\rho_1}$                                                                | $\frac{1}{h_2\rho_2}$                                                               | $\frac{1}{\rho_3}$                                                                    | 0.03                          |                |

## 5. 2 K Tipi Yer Modeli

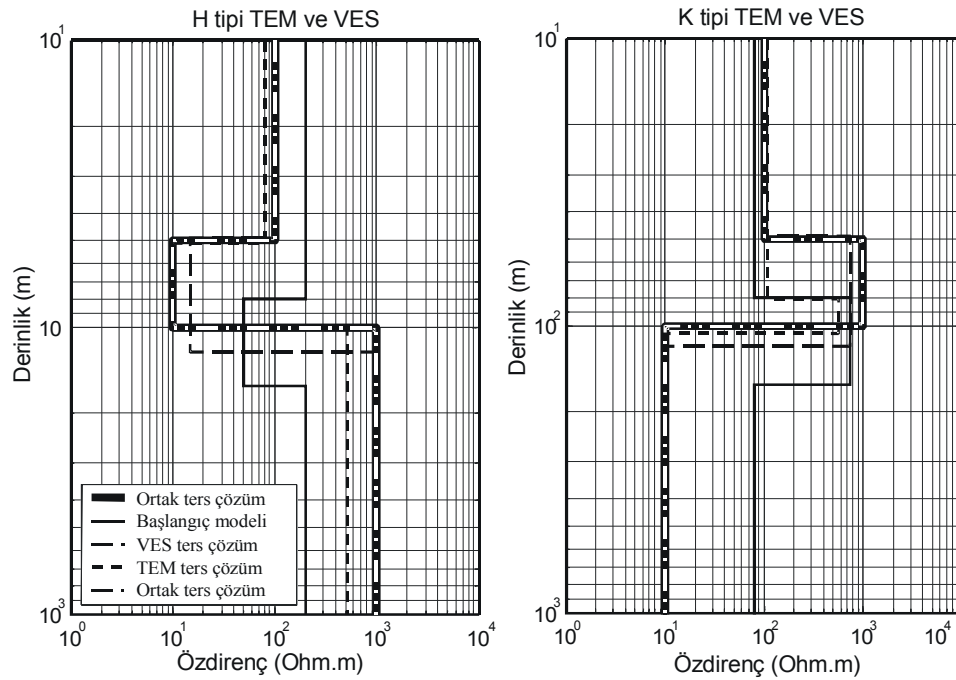
İki iletken katman arasında bir dirençli katman bulunan yer yapılarına K tipi yer yapıları denilmektedir. Ters çözüm denemeleri için ikinci olarak K tipi bir yer modeli için VES ve TEM verileri oluşturulmuştur. K tipi yapay TEM verisi 25x25 m<sup>2</sup> olan bir verici halka ile oluşturulmuştur (Şekil 5. 3). K tipi VES verisi H tipi yer



modelinde olduğu gibi 1000 m'ye kadar bir yapay veri oluşturulmuştur. K tipi VES verisi ile yapılan ters çözüm sonucunda  $\rho_1$ ,  $\rho_3$  ve  $h_1$  tam olarak çözülürken  $\rho_2$  ve  $h_2$  parametreleri birbirlerine bağlı olarak çözülmüştür. Ayrıca en büyük özdeğer bu iki parametrenin çarpımını kontrol etmektedir (Tablo 5. 5).



Şekil 5. 3 K tipi yer model için oluşturulan VES ve TEM verileri ile yapılan ayrı ayrı ters çözüm sonucunda bulunan yer modelleri.



Şekil 5. 4 H tipi (solda) ve K tipi (sağda) yapay TEM ve VES verilerinin ayrı ayrı ve ortak ters çözüm sonuçlarında bulunan yer modellerinin karşılaştırılması.

Tablo 5. 5 K tipi yapay VES verisi ters çözüm sonuçları.

| Model Parametreleri       | Gerçek Model | Başlangıç Modeli | Çözüm | K tipi VES                                                                        |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     | R - Model Ayrıklık Değerleri | Standart Sapma |
|---------------------------|--------------|------------------|-------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|----------------|
| $\rho_1$                  | 100          | 80               | 100   |  |  |  |   |                                                                                     | 1                            | 0.3            |
| $\rho_2$                  | 1000         | 750              | 731   |  |  |  |   |  | 0.75                         | 4              |
| $\rho_3$                  | 10           | 80               | 10    |  |  |  |  |  | 0.97                         | 1.5            |
| $h_1$                     | 50           | 80               | 49    |  |  |  |   |  | 0.98                         | 1              |
| $h_2$                     | 50           | 80               | 69    |  |  |  |   |  | 0.3                          | 6.5            |
| Sönüm katsayısı           |              |                  |       | 1                                                                                 | 1                                                                                 | 1                                                                                 | 1                                                                                  | 0.04                                                                                | $\chi$                       |                |
| Çözülen model parametresi |              |                  |       | $\frac{\rho_2 h_2}{\rho_1}$                                                       | $h_1 \rho_1$                                                                      | $h_1$                                                                             | $\frac{1}{\rho_3}$                                                                 | $\frac{h_2}{\rho_2}$                                                                | 0.2                          |                |

Tablo 5. 6 K tipi yapay TEM verisi ters çözüm sonuçları.

| Model Parametreleri       | Gerçek Model | Başlangıç Modeli | Çözüm | K tipi TEM                                                                          |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                       | R - Model Ayrıklık Değerleri | Standart Sapma |
|---------------------------|--------------|------------------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|----------------|
| $\rho_1$                  | 100          | 80               | 110   |  |  |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                       | 0.99                         | 0.3            |
| $\rho_2$                  | 1000         | 750              | 557   |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |  |  | 0.01                         | 6              |
| $\rho_3$                  | 10           | 80               | 10    |  |                                                                                     |  |                                                                                     |                                                                                       | 0.99                         | 0.4            |
| $h_1$                     | 50           | 80               | 81    |  |  |  |  |  | 0.96                         | 1              |
| $h_2$                     | 50           | 80               | 25    |  |                                                                                     |  |  |  | 0.14                         | 4.4            |
| Sönüm katsayısı           |              |                  |       | 1                                                                                   | 1                                                                                   | 1                                                                                   | 0.1                                                                                 | 0                                                                                     | $\chi$                       |                |
| Çözülen model parametresi |              |                  |       | $\frac{1}{h_1}$                                                                     | $\rho_1$                                                                            | $\frac{1}{\rho_3}$                                                                  | $h_2$                                                                               | $\rho_2$                                                                              | 2.6                          |                |

Tablo 5. 7 K tipi yapay TEM ve VES verilerinin ortak ters çözüm sonuçları.

| Model Parametreleri       | Gerçek Model | Başlangıç Modeli | Çözüm | K tipi TEM ve VES                                                                 |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                     | R - Model Ayrımlık Değerleri | Standart Sapma |
|---------------------------|--------------|------------------|-------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|----------------|
| $\rho_1$                  | 100          | 80               | 100   |  |  |  |  |  | 1                            | 0.2            |
| $\rho_2$                  | 1000         | 750              | 1000  |  |  |  |  |  | 1                            | 0.2            |
| $\rho_3$                  | 10           | 80               | 10    |  |  |  |  |  | 1                            | 0.4            |
| $h_1$                     | 50           | 80               | 50    |  |  |  |  |  | 1                            | 0.5            |
| $h_2$                     | 50           | 80               | 50    |  |  |  |  |  | 1                            | 0.5            |
| Sönüm katsayısı           |              |                  |       | 1                                                                                 | 1                                                                                 | 1                                                                                 | 1                                                                                 | 1                                                                                   | $\chi$                       |                |
| Çözülen model parametresi |              |                  |       | $\frac{\rho_2}{\rho_1}$                                                           | $\rho_1$                                                                          | $\frac{\rho_3 h_1}{\rho_2}$                                                       | $\rho_3$                                                                          | $\frac{h_1}{h_2}$                                                                   | 0.01                         |                |

Model ayrımlılık değerlerine ve sönüm katsayılarına bakıldığında VES yönteminin ikinci tabakanın kalınlığını çözme yeteneğinin az olduğu görülebilir. K tipi yapay TEM verisi ile yapılan çözümde ikinci tabakanın kalınlığı ve öz direnci en kötü çözülen model parametreleridir (Tablo 5. 6). Bu model parametreleri için VES ters çözümü gerçek değerlere daha yakın sonuçlar vermektedir. Ortak ters çözüm sonuçları incelendiğinde eşdeğerlik probleminin ortadan kalktığı ve tüm model parametrelerinin çözümünün tek olduğu görülür (Tablo 5. 7). Bunun yanında sönüm katsayılarına bakıldığında tamamı 1 değerini alarak tüm model parametrelerinin serbest olarak çözüme katkıda bulunduğunu göstermektedir.

H tipi ve K tipi yer modelleri için yapılan ters çözüm denemeleri sonucunda yöntemlerin her birinin ayrı ayrı ve ortak ters çözüm sonuçları karşılaştırılmıştır. Buna göre hem H tipi (solda) hem de K tipi (sağda) yer modelleri için elde edilen sonuçların geliştiği ve model parametrelerinin tek olarak ( $R \cong 1$ ) çözüldüğü görülmüştür (Tablo 5. 8). TEM yönteminin iletken tabakalar üzerindeki ayrımlılık yeteneği ve VES yönteminin dirençli tabakalar üzerindeki ayrımlılık yeteneği bir araya geldiğinde eşdeğerlik probleminin en aza indiği görülmüştür.

Tablo 5. 8 H tipi (solda) ve K tipi (sağda) yapay yer modelleri ile yapılan ortak ters çözümün model ayrımlılık matrisinin köşegen değerleri kullanılarak incelenmesi.

| Model Parametresi | VES | TEM | VES-TEM |
|-------------------|-----|-----|---------|
| $\rho_1$          | ●   | ●   | ●       |
| $\rho_2$          | ●   | ●   | ●       |
| $\rho_3$          | ●   | ●   | ●       |
| $h_1$             | ●   | ●   | ●       |
| $h_2$             | ●   | ●   | ●       |

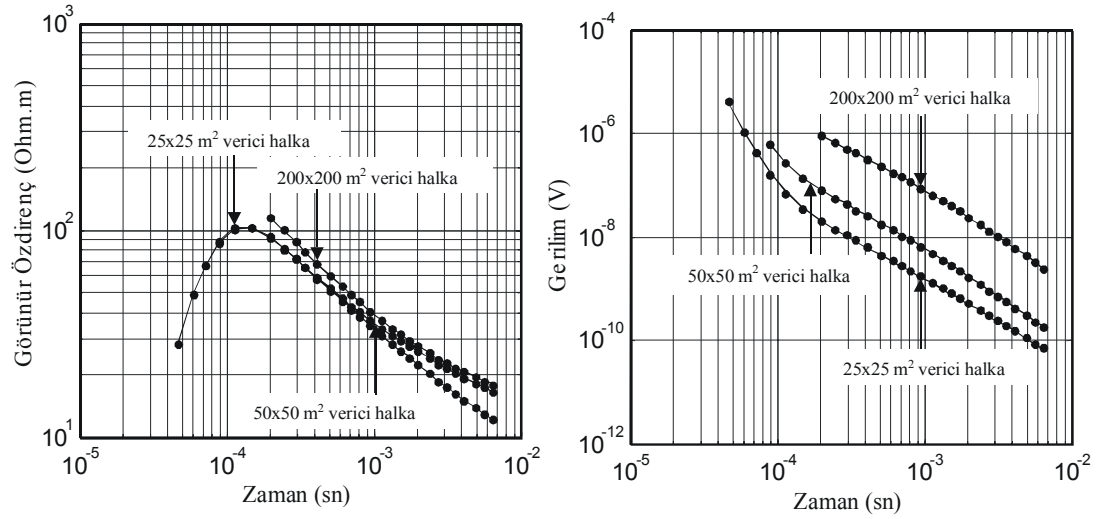
| Model Parametresi | VES | TEM | VES-TEM |
|-------------------|-----|-----|---------|
| $\rho_1$          | ●   | ●   | ●       |
| $\rho_2$          | ●   | ●   | ●       |
| $\rho_3$          | ●   | ●   | ●       |
| $h_1$             | ●   | ●   | ●       |
| $h_2$             | ●   | ●   | ●       |

Yapay veriler ile çalışırken ortak ters çözüm sonuçlarındaki yüksek başarı, model parametrelerinin her iki yöntem tarafından desteklenmesi ve tek boyutlu veri kullanılması ile ilişkilidir. Gerçek veriler ile çalışırken yanal sürekliliklerden kaynaklanacak ikinci ve üçüncü boyut etkileri çözümü etkileyebilmektedir. Bunun yanında, yöntemlerden birinin model parametrelerinden herhangi biri hakkında bilgi içermemesi durumunda çözümün göreceli olarak gelişeceğinin gözönünde bulundurulması gerekir. Ayrıca başlangıç modelinin kötü seçilmesi durumunda sonuç çözümden uzaklaşabilmektedir.

### 5. 3 Yapay Veriler ile Halka Boyu Etkisinin İncelenmesi

TEM ölçümlerinde tek bir cins telden oluşan verici halkaların kullanılması durumunda, büyük verici halkalar için yokuş zamanı da büyük olacaktır. Bu durumu göz önünde bulundurarak 25x25 m<sup>2</sup>, 50x50 m<sup>2</sup> ve 200x200 m<sup>2</sup> verici halkalar ile iki iletken katman arasında bir dirençli katman (K tipi yer modeli) olması durumu irdelenmiştir.

25x25 m<sup>2</sup>'lik verici halka ile üretilen K tipi yapay verinin ters çözümü sonucunda  $\rho_1$  ve  $\rho_3$  model parametrelerinin gerçek yer modeline tam olarak eşit oldukları görülmektedir (Tablo 5. 9). İkinci katmanın öz direnci tam olarak çözülmemiş olup farklı başlangıç değerleri için bu parametre farklı çözüm değerleri alabilmektedir. 50x50 m<sup>2</sup>'lik verici halka ile üretilen yapay veride ilk üç örnekleme zamanına ait veriler kullanılmamıştır. Bu durumda yapılan ters çözüm sonunda sadece  $\rho_3$  model



Şekil 5. 5 Farklı büyüklükteki verici halkalar ile üretilen K tipi yapay TEM verileri ve ters çözüm sonuçları

Tablo 5. 9 Farklı büyüklükteki verici halkalar ile üretilen K tipi yapay TEM verilerinin ters çözüm sonuçları.

| Gerçek Yer Modeli | Başlangıç Modeli | 25X25 m <sup>2</sup> | 50X50 m <sup>2</sup> | 200X200 m <sup>2</sup> |
|-------------------|------------------|----------------------|----------------------|------------------------|
| 100 Ohm.m         | 50 Ohm.m         | 100 Ohm.m            | 99 Ohm.m             | 88 Ohm.m               |
| 1000 Ohm.m        | 500 Ohm.m        | 627 Ohm.m            | 437 Ohm.m            | 590 Ohm.m              |
| 10 Ohm.m          | 50 Ohm.m         | 10 Ohm.m             | 10 Ohm.m             | 10 Ohm.m               |
| 50 m              | 25 m             | 49 m                 | 46 m                 | 39 m                   |
| 50 m              | 25 m             | 52 m                 | 54 m                 | 61m                    |

Tablo 5. 10 Farklı büyüklükteki verici halkalar ile üretilen K tipi yapay TEM verilerinin ters çözüm sonuçlarının model ayrımlılık değerleri (**R**) ile karşılaştırılması. İçi dolu siyah halkalar model ayrımlılık matrisinin köşegen değerlerini göstermektedir.

| Model Parametresi | 25x25 m <sup>2</sup> | 50x50 m <sup>2</sup> | 200x200 m <sup>2</sup> |
|-------------------|----------------------|----------------------|------------------------|
| $\rho_1$          | ●                    | ●                    | ●                      |
| $\rho_2$          | ●                    | ●                    | ●                      |
| $\rho_3$          | ●                    | ●                    | ●                      |
| $h_1$             | ●                    | ●                    | ●                      |
| $h_2$             | ●                    | ●                    | ●                      |

parametresi tam olarak çözülebilirken  $\rho_2$  model parametresinin gerçek model değerinden çok uzakta olduğu görülmektedir. Ayrıca  $\rho_2$  model parametresi için model ayrımlılık değeri ( $R=0.14$ ) çok küçüktür. Dolayısıyla ikinci tabakanın özdirenci olarak bulunan sonuç büyük oranda başlangıç modeline bağlıdır ve yöntemin bu model parametresini tek olarak çözebilme yeteneği bulunmamaktadır. 200x200 m<sup>2</sup>'lik verici halka ile üretilen yapay veride ilk altı örnekleme zamanına ait veriler kullanılmamıştır (Şekil 5. 5). Bu koşullar altında yapılan ters çözüm sonucunda üçüncü tabakanın özdirenci haricindeki tüm model parametreleri gerçek yer modelinden uzak kalmıştır. Bunun nedeni, kullanılan verinin 1. ve 2. katman hakkında yeteri kadar bilgi içermemesinden dolayı ters çözümün kararsız davranmasıdır. İkinci katmanın özdirenci 50x50 m<sup>2</sup>'lik yapay veri ile bulunan sonuca göre gerçek model değerine daha yakındır. Ancak bu model parametresine ait model ayrımlılık değeri 0.03'tür. Dolayısıyla ters çözüm sonunda bulunan değer tamamen başlangıç modeline bağlıdır denilebilir. Tablo 5. 10'da görüldüğü gibi çözümün tekliği büyük halkadan küçük halkaya doğru artmaktadır. Farklı boylardaki verici halkalar ile üretilen üç farklı yapay verinin TEM ters çözümlerinde bulunan yer modelleri gerçek yer modelini tam olarak bulamamasına rağmen aynı yer modeli için oluşturulan VES verisi ile yapılan ortak ters çözümlerde gerçek yer modeline ulaşılabilir.

Yapay verilerle yapılan çözümlerden elde edilen sonuçlardan biri de TEM yöntemi ile yapılan araştırmalarda verici halka boyunun sığ tabakaların çözünürlüğündeki önemidir. Sığ bir tabaka hakkında bilgi edinmek istenildiğinde uygun halka boyları seçilmelidir. Bu amaçla TEM ölçümlerinden önce jeolojik bilgilerin ışığında modelleme çalışmaları yapılarak en uygun halka boyu belirlenebilir. Ayrıca arazi öncesi çalışmalar sayesinde ölçüm süresi kısaltılabilir ve gereksiz iş gücü kayıpları da engellenebilir.

## **6. GEÇİCİ ELEKTROMANYETİK VE DOĞRU AKIM ÖZDİRENÇ VERİLERİNİN ORTAK TERS ÇÖZÜMÜ: AVCILAR ÖRNEĞİ**

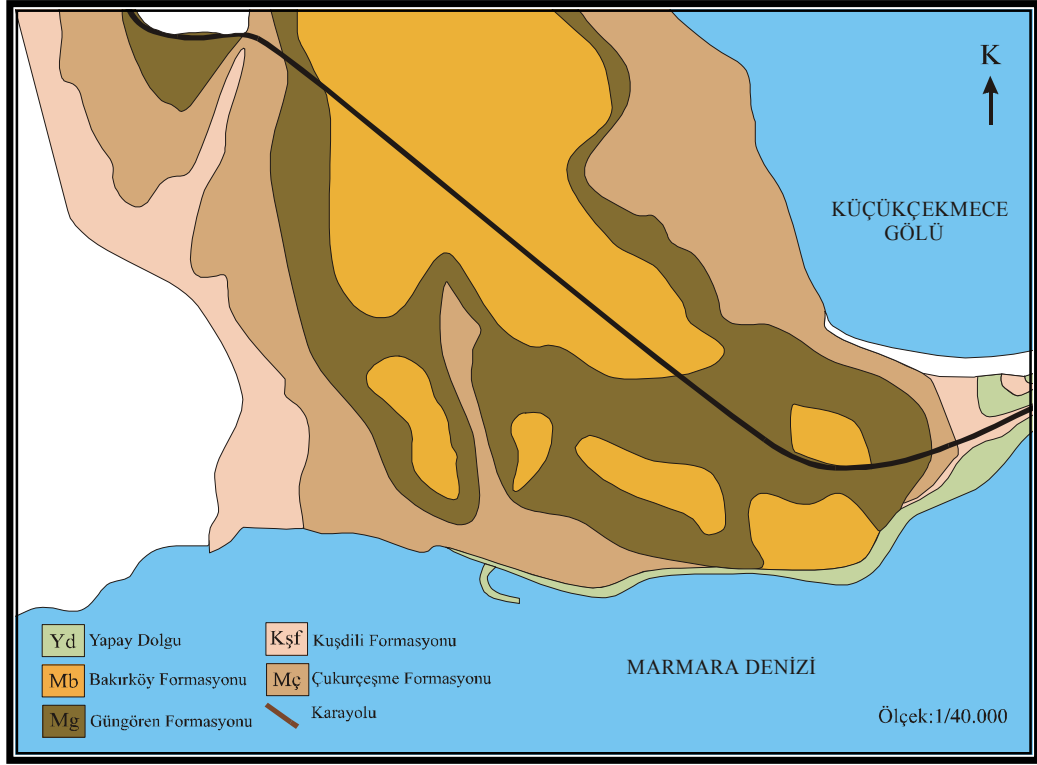
Geçici elektromanyetik yöntem (TEM) ve düşey elektrik sondaj yöntemi (VES) verilerinin ortak ters çözümü, 1999 Kocaeli depreminin odağına 120 km uzaklıkta bulunmasına rağmen uğradığı ağır hasar ile gündeme gelen Avcılar bölgesi için uygulanmıştır. İstanbul'a 27 km uzaklıkta bulunan ve E-5 karayolunun sınırları içinden geçtiği Avcılar İlçesi, doğusunda Küçükçekmece Gölü ve Küçükçekmece İlçesi, batısında Yakuplu ve Esenyurt Beldeleri, kuzeyinde Bahçeşehir Beldesi ve yine Küçükçekmece İlçesi, güneyinde ise Marmara denizi ile çevrelenmiş, 235000 kişilik nüfusu ile İstanbul'un en büyük ilçelerinden biridir. İlçede yerleşim son 50 yıl içinde hız kazanmıştır. Bölgede kurulan fabrikalar ve enerji tesisleri ile bir sanayi merkezi durumuna gelen Avcılar, zemin davranışı ile de gündeme gelmiştir. Son yıllarda Avcılar bölgesinde daha planlı ve modern bir yerleşim planının oluşturulabilmesi amacıyla zemin koşullarının belirlenmesi için bu bölgede çeşitli jeolojik (Yüzer ve Eyüboğlu, 1998; İBB, 2001) ve jeofizik araştırmalar (Bozdağ ve Kocaoğlu, 2002; İmamoğlu ve Boztepe-Güney, 2002; Tezcan ve diğ., 2002) yapılmıştır.

Bu çalışma kapsamında, Avcılar bölgesinin yerelektrik yapısının belirlenmesi amacı ile Eylül-Ekim 2002 tarihleri arasında bölgenin genel jeolojik özelliklerini aydınlatabilecek şekilde 15 farklı noktada TEM ölçümleri yapılmıştır (Şekil 6. 2). Elde edilen TEM verileri Avcılar Belediyesi tarafından yaptırılan VES verileri ile birlikte, bölgede yapılan daha önceki jeolojik ve jeofizik çalışmaların ışığında, değerlendirilmiştir. Ters çözüm sonuçlarının yorumlanabilmesi ve jeolojik birimler ile ilişkilerinin ortaya konabilmesi amacıyla öncelikle bölgenin genel jeolojik yapısına değinilecektir.

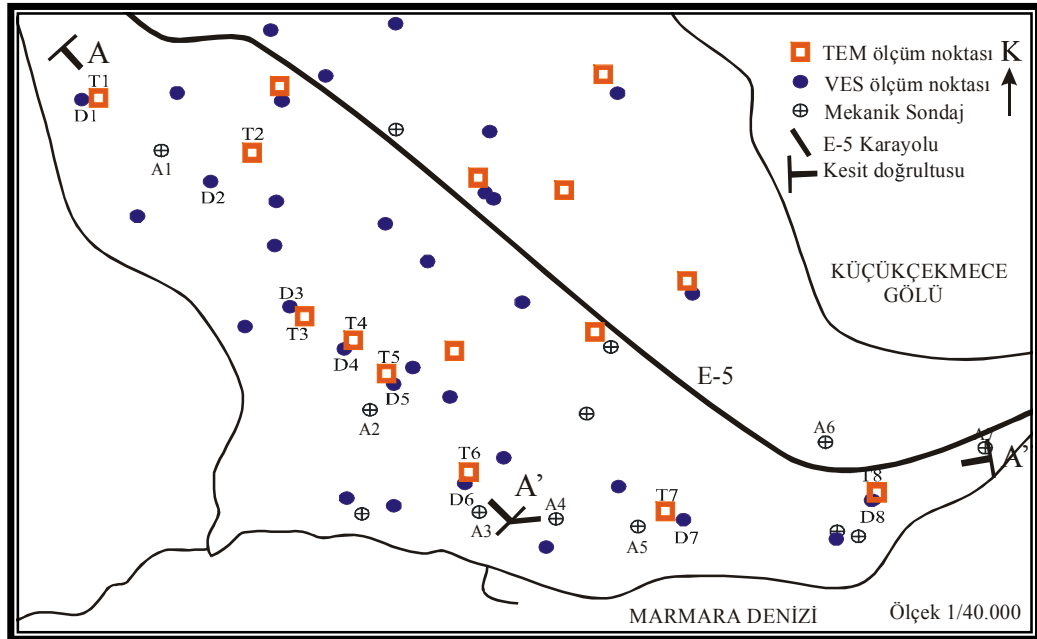
### **6. 1 Avcılar Bölgesi Jeolojisi**

İnceleme alanı olan Avcılar bölgesinde en alt seviyede Gürpınar Formasyonu olarak adlandırılan ve başlıca katı-sert kil, silt-silttaşlı litolojilerinden oluşan birim yer

almaktadır. Bu birim üzerine düşük açılı uyumsuzlukla Miyosen yaşı Çukurçeşme, Güngören ve Bakırköy Formasyonları gelmektedir. Bu formasyonların tümü, Kuvaterner yaşı alüvyon ve güncel dolgu tarafından uyumsuz olarak üstlenmektedir (Yüzer ve Eyüboğlu, 1998).



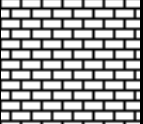
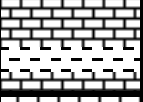
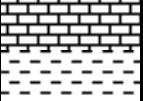
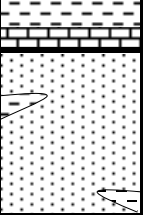
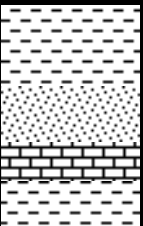
Şekil 6. 1 Avcılar jeoloji haritası (İBB, 2001).



Şekil 6. 2 Avcılar bölgesinde ölçülmüş VES, açılmış mekanik sondajlar ve bu çalışma kapsamında ölçülen TEM yerlerini gösteren lokasyon haritası.



Çanakkale’de Gelibolu Yarımadası’ndan, İstanbul’da Bakırköy’e kadar uzanan ve geniş bir alanda görülen Kırklareli formasyonu Küçükçekmece’nin kuzey ve kuzeydoğusunda yüzeylemiştir. İnceleme alanı Avcılar bölgesinin temelini kuran istif genel olarak resif karmaşığına ait kireçtaşları ve aynı ortamın farklı derinlikli kesimlerinde çökelmiş killi kireçtaşı-marn düzeylerinden oluşmaktadır. Kırklareli Formasyonuna ait kireçtaşlarının dayanımlılığı, içerdikleri kil oranına bağlı olarak değişmektedir. Formasyonun kil içeriğı arttıkça, kireçtaşlarının dayanımı azalmaktadır. Resifal kireçtaşları kırıklı ve karstik boşluklu yapıya sahiptirler (Herece ve Şentürk, 2000).

| Formasyon  | Yaş         | Kalınlık (m) | Litoloji                                                                                                                                                                  | Açıklamalar                                                                                                                                                              |
|------------|-------------|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|            | Kuvaterner  | ~ 2<br>~ 20  | <br> | Güncel dolgu ve bitkisel toprak.<br>Alüvyon.                                                                                                                             |
| Bakırköy   | Üst Miyosen | ~ 20         |                                                                                        | Orta-kalın tabakalı, yer yer erime boşluklu, kirli beyaz maktra fosilli kireçtaşı.                                                                                       |
| Güngören   |             | ~ 10         |                                                                                        | İnce kil ara seviyeli, mavimsi yeşil plastik kil.                                                                                                                        |
| Çukurçeşme |             | ~ 20         |                                                                                        | Yeşil kireçtaşı ara seviyeli, mavimsi yeşil plastik kil.                                                                                                                 |
| Gürpınar   | Oligosen    | ~230         |                                                                                        | Genellikle sarı, bol mikalı, seyrek çakıl ara seviyeli, kil mercekli, yer yer çapraz tabakalı, çakıllı ince kum.                                                         |
|            |             |              |                                                                                        | Açık kahve-bej, üst seviyeleri kuvars, çakıl ve bloklu, yer yer değişik boyutta kireçtaşı, çakıllı, seyrek kum ve silt ara seviyeli, karbonat topaklı çok katı-sert kil. |

Şekil 6. 3 Avcılar ve çevresinin genelleştirilmiş stratigrafik kesiti (Yüzer ve Eyüboğlu, 1998’den tekrar çizilmiştir).

Gürpınar Formasyonu, Büyükçekmece Gölü'nün doğusu, güneydoğusu, Gürpınar ve çevresinde yaygın biçimde yüzeylenmiştir. Birim, ince kum ve silt araseviyeli, yer yer kayma yüzeyli aşırı konsolide olmuş, çok katı-sert killerden oluşmaktadır. Formasyon, kuzeyden güneye Marmara Denizi yönünde kalınlaşmaktadır. Bölgede kalınlığı 220 metre civarındadır (Yüzer ve Eyüboğlu, 1998).

Gürpınar Formasyonu'nu oluşturan ana birimler, kiltaşları ve kum taşlarıdır. Kiltaşları ince-orta, kumtaşları orta-kalın katmanlıdır. Kiltaşları genellikle dayanımsız birimlerdir ve içerdikleri su oranının artmasıyla heyelan riski taşımaktadırlar. Oligosen yaşlı formasyon bölgedeki en yaşlı birimdir (Herece ve Şentürk, 2000).

Avcılar-Esenyurt arasındaki yoğun yapılaşmış sırtı çevreleyen ve Haramidere ile Ambarlı dere yamaçlarında yaygın ve sürekli olarak bulunan Çukurçeşme Formasyonu, gevşek kil, çimentolu veya çimentosuz, sarımsı – kahve renkli kil, kum ve silt aratabakaları içerir. Birimin alt bölümünü, yaygın olarak çakıllar oluşturur. Üst Miyosen yaşlı bu birimin kalınlığı 20 metre dolayındadır (Yüzer ve Eyüboğlu, 1998).

Güngören Formasyonu, Haramidere ve Ambarlı dere çevresindeki yamaçlarda genişleyip daralan bir zon şeklinde yüzeylenir. Marmara Deniz'ine bakan yamaçlarda Bakırköy Formasyonu ile geçişlidir. Az siltli çok seyrek ince çakıllı, silt ve kum bantlı, yer yer karbonatlı, marn ve kireçtaşı araseviyeli, yer yer fissürlü killer belirgin litolojiyi oluşturur. Bu formasyon düşük açılı bir uyumsuzlukla Çukurçeşme Formasyonu üzerine gelmekte, üst seviyelerinde artan karbonat içeriğine bağlı olarak Bakırköy Formasyonu ile geçiş göstermektedir. İnceleme alanında ortalama kalınlığı 10 metre dolayındadır (Yüzer ve Eyüboğlu, 1998).

Bakırköy Formasyonu Büyükçekmece ile Küçükçekmece arasındaki sırtlarda, Bakırköy, Avcılar, Gürpınar ve Zeytinburnu'nda yaygın olarak gözlenmektedir. Genel olarak silt boyutunda açık yeşilimsi, kahve renkli gevşek kumtaşı merceklerini de kapsayan birimin en belirgin özelliği, kalın ve bol erime boşluklu, Mactra fosilli kireçtaşı düzeyleridir (Herece ve Şentürk, 2000). Güngören Formasyonu ile geçişli olan ve daha genç çökeller tarafından uyumsuzlukla örtülen formasyonun kalınlığı ortalama 20 metre dolayındadır (Yüzer ve Eyüboğlu, 1998).

İnceleme alanındaki Haramidere vadisinde yaygın olarak görülen alüvyon, çevre kayaçların ayrışması ile oluşan değişik boyutlardaki çakıl, kum, silt ve kil gibi ayrık malzemeyi içerir. Çakıllar ince araseviyeli halindedir. Kalınlığı 20 metreye kadar olan alüvyon, bitkisel toprakla örtülüdür. Avcılar yerleşim alanındaki boş arazilerde ve Marmara Denizi sahilinde yaygın olarak bulunan ve inşaat temel kazılarında çıkan malzemenin oluşturduğu güncel dolgunun kalınlığı 3 metre dolayındadır (Yüzer ve Eyüboğlu, 1998).

## 6. 2 Avcılar Bölgesi TEM Verilerinin Özellikleri

Avcılar bölgesi hem jeolojik özellikleri bakımından hem de sık yerleşim olmasından dolayı gerekli jeofizik verinin toplanabilmesini kısıtlayan bir bölgedir. Avcılar bölgesinde yer alan jeolojik birimler genellikle kil, kum, silt ve killi kireçtaşlarından oluşmaktadır. Bu birimlerin elektrik özellikleri birbirine oldukça yakındır ve düşük öz direnç (5-50 Ohm.m ) göstermektedirler. Bu durum öz direnç ölçümlerinde tabaka ayrımını güçleştirmektedir. Avcılar Belediyesi tarafından yaptırılan öz direnç ölçümlerinde, formasyonların elektriksel iletkenlikleri yüksek olmasından ve yeteri kadar büyük açılımların yapılamamasından dolayı 15-20 m'nin altından bir bilgi edinilememiştir. Bunun yanında, bölgede faaliyet gösteren endüstri kuruluşlarından (elektrik üretim tesisi, dolum tesisi, ve irili ufaklı fabrikalar) kaynaklanan elektrik ve elektromanyetik gürültüler veri kalitesini düşürmektedir.

VES yöntemine göre daha küçük alanlarda (örneğin, 2500 m<sup>2</sup>) ölçüm alabilme, iletken bölgelerde yüksek ayrımlılık ve nispeten daha derin bilgi vermesi nedeniyle TEM yöntemi Avcılar bölgesinde uygulanmıştır. TEM verileri, teknik özellikleri EK-A'da verilen, SIROTEM MK 3 geçici elektromanyetik cihazı kullanılarak 50x50 m<sup>2</sup> ve 100x100 m<sup>2</sup> olan kare vericiler ile Avcılar'ın çeşitli bölgelerinde ölçülmüştür (Şekil 6. 2). Ölçümler alınırken yüksek gerilim hatlarından ve otoyollardan uzak bölgeler seçilmesine özen gösterilmiştir. Ayrıca, sinyal/gürültü oranını artırmak amacı ile, bir bölgeye ait verinin oluşturulabilmesi için birçok kez (128-256) ölçülen azalım eğrileri (decay curve) üst üste yığılmış (stacking) ve farklı kazanç (gain) ayarları için ölçümler tekrarlanmıştır. Elde edilen veriler ortalama olarak 0.2 – 5 ms arasında ve nV/A cinsindendir. Bu değerler alıcı alanına normalize edilerek V/(Am<sup>2</sup>) birimine dönüştürülmektedir.

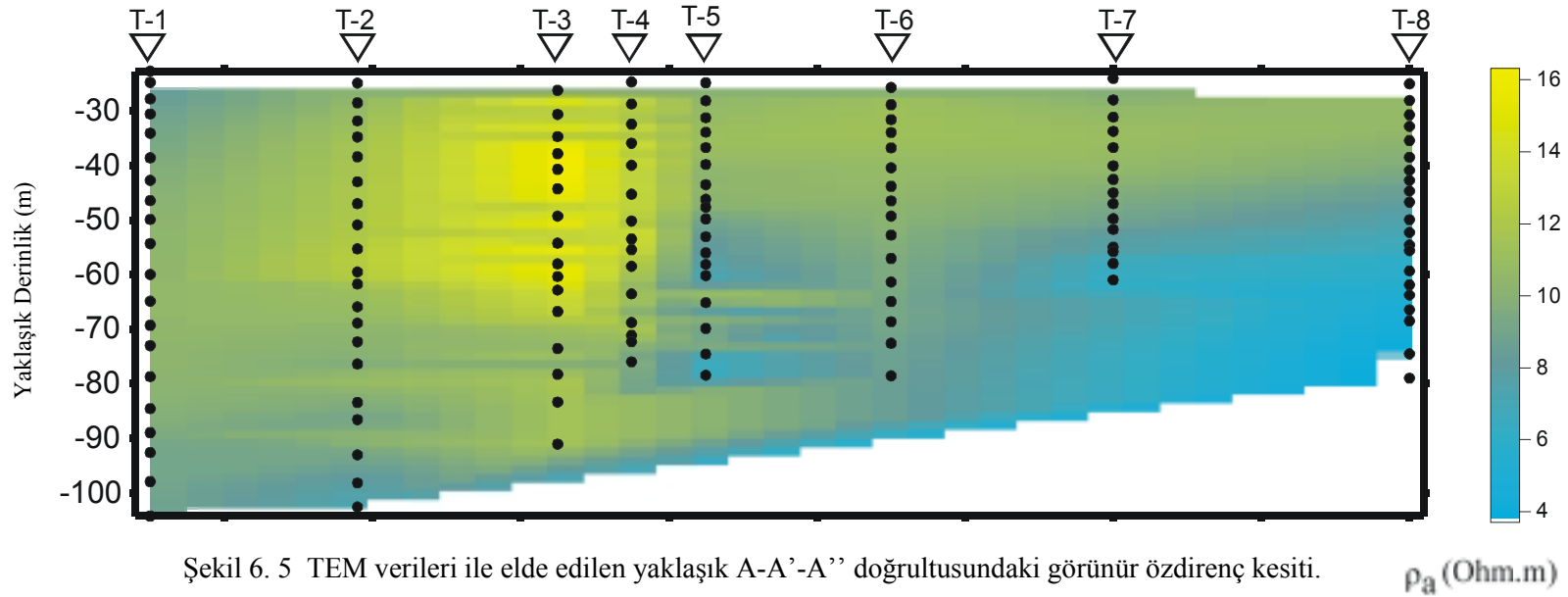
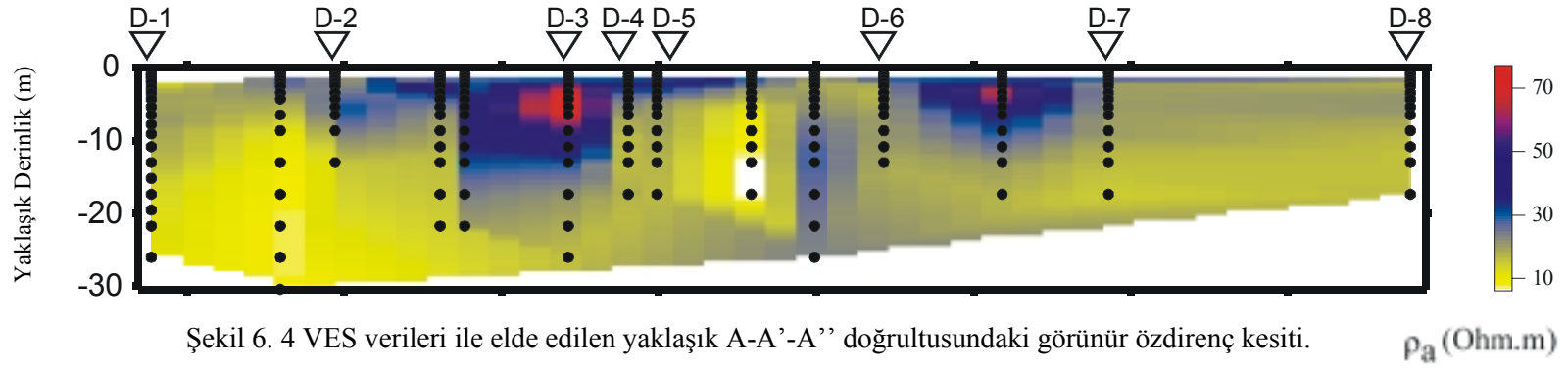
### **6. 3 Avcılar Bölgesi TEM ve VES Verilerinin Değerlendirilmesi**

Avcılar'da ölçülen TEM verileri ve Avcılar Belediyesi tarafından sağlanan öz direnç verilerinin ortak ters çözümleri yapılmadan önce her iki yöntem ile elde edilen görünür öz direnç bilgisi değerlendirilerek yöntemlerin genel bulguları karşılaştırılmaya çalışılmıştır. Bu nedenle öncelikle en yoğun TEM ve VES ölçüm istasyonunun bulunduğu kuzeybatı-güneydoğu hattı arasında Şekil 6. 2'de gösterilen A-A'-A'' doğrultusunda VES (Şekil 6. 4) ve TEM (Şekil 6. 5) verileri için görünür öz direnç kesitleri hazırlanmıştır. Bu kesitler üzerinde düşey eksen yaklaşık derinlik (Meju, 1995) olarak verilmiş ve her ölçüm istasyonu için belirli derinliklere karşılık gelen ölçümler siyah noktalar ile gösterilmiştir.

#### **6. 3. 1 Görünür Öz direnç ve Yaklaşık Derinlik**

Avcılar bölgesinde ölçülmüş VES verileri için elde edilen yaklaşık derinlik-görünür öz direnç kesidi incelendiğinde, yaklaşık derinliğin en yüksek değeri 30 metre olarak gözükmektedir. Ayrıca, kesidin üst kesimlerinde görülen yüksek öz dirençli anomalilerin genelde yüzeysel sığ etkilerden kaynaklandığı ve 15-20 m'nin altında belirgin görünür öz direnç değişimlerinin mevcut olmadığı anlaşılmıştır. Oluşturulan VES görünür öz direnç kesitinde, D-2 ve D-7 istasyonları arasında kalan bölgenin sığ kesimlerinde, görünür öz direncin göreceli olarak yükseldiği (40-80 Ohm.m), derin kesimlerdeyse görünür öz direncin azalım (5-20 Ohm.m) eğilimi gösterdiği görülebilir (Şekil 6. 4).

Yaklaşık derinlik bağıntısının TEM için uygulanması ile elde edilen görünür öz direnç kesitinde yaklaşık derinliğin 100 m'ye kadar ulaştığı görülmektedir (Şekil 6. 5). Oluşturulan TEM görünür öz direnç kesitinde ilk 25 m'ye ait elektriksel bilginin mevcut olmadığı görülmektedir. Bunun nedeni, 3. bölümde anlatıldığı gibi, bu derinliklere karşılık gelen verilerin olduğu zamanlarda, ortamda birincil alanların halen mevcut olmasıdır. Dolayısıyla TEM verileri ile elde edilen görünür öz direnç kesidinde yüzeydeki sığ dirençli yapılara karşılık geldiği sanılan yerel anomaliler mevcut değildir. Ancak ilk bakışta bölgenin elektriksel olarak düşey yönde iki birime ayrılabilceği söylenebilir. Üstteki birim, görünür öz direnci 10-16 Ohm.m arasında ve yaklaşık kalınlığı 50-60 m olan bir tabakadır. Bu tabakanın altında görünür öz direnci 4 Ohm.m'ye kadar düşen ikinci bir tabaka yer almaktadır.



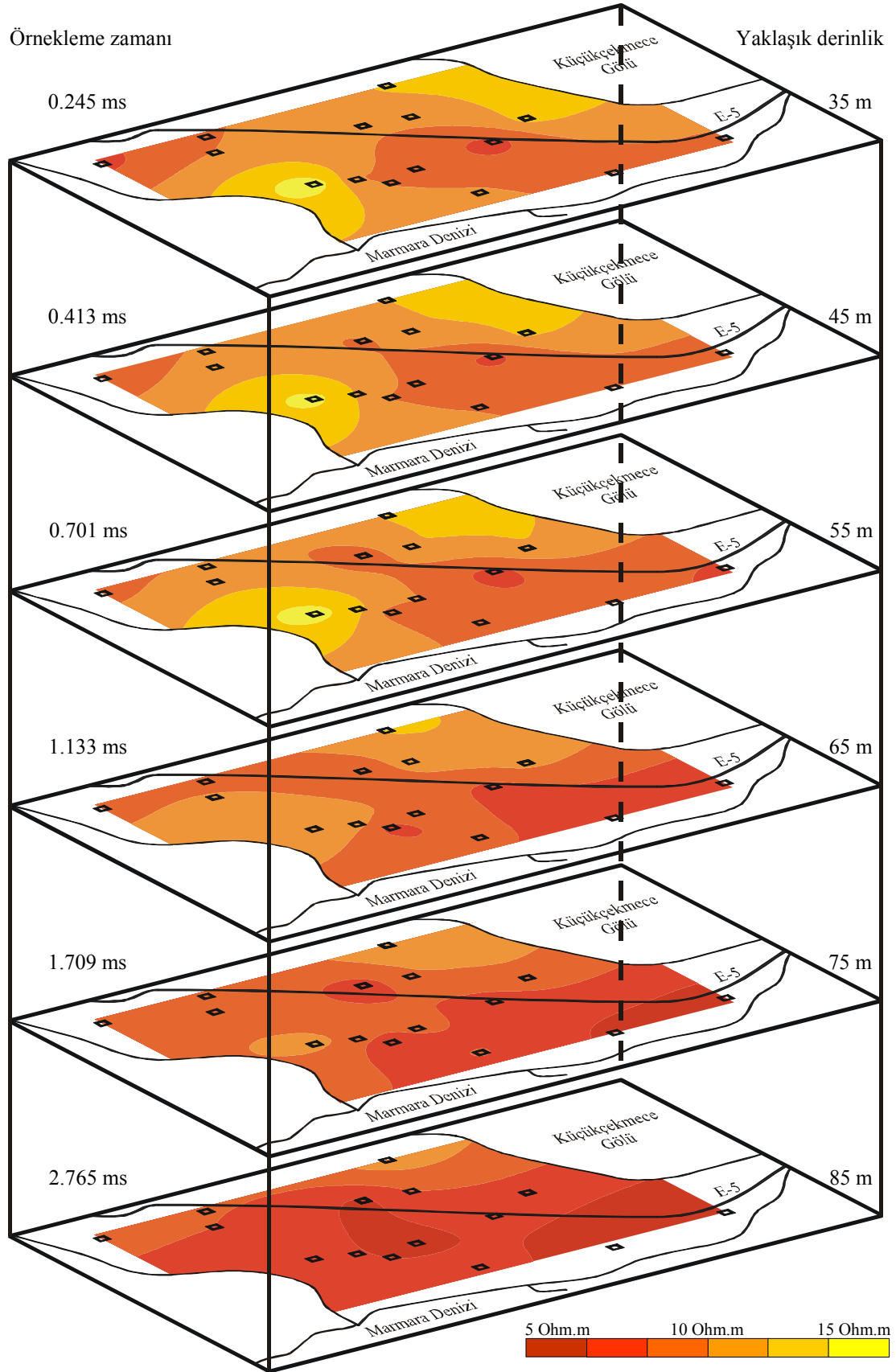
Ayrıca özellikle T-2 ve T-3 isimli istasyonlarda yerel bir görünür öz direnç artışı görülmektedir.

Her iki yöntem ile elde edilen görünür öz direnç kesiti boyunca genel olarak öz direncin derinlikle azaldığı sonucuna varılmıştır. Elde edilen bu bilgi kuzeybatı-güneydoğu doğrultusunda alınan kesite ait bir bilgidir. Dolayısıyla, bu yapının Avcılar'ın genelinde mevcut olup olmadığının araştırılması amacı ile TEM verileri kullanılarak belirli derinlikleri (35-45-55-65-75-85 metre) temsil eden örnekleme zamanları için görünür öz direnç kat haritaları çizilmiştir (Şekil 6. 6). Kat haritalarının üstünde siyah kareler ile Şekil 6. 2'de verilen TEM lokasyonları işaretlenmiştir. Oluşturulan görünür öz direnç kat haritası incelendiğinde düşey yönde görünür öz direnç azalımı belirgin bir biçimde görülebilir. Bunun yanında Avcılar'ın güney-güneybatı bölümlerinde iletkenliğin göreceli olarak daha yüksek olduğu göze çarpan bir diğer noktadır.

### **6. 3. 2 TEM ve VES Verilerinin Ters Çözümü**

Önceki bölümde görünür öz direnç ve yaklaşık derinlik verileri kullanılarak bölgenin genel jeoelektrik yapısı hakkında bilgi sağlanmıştır. Elde edilen genel jeoelektrik bilgiler sayesinde ters çözüm uygulaması için iyi bir başlangıç modeli oluşturulmaya çalışılmıştır. Sonuç olarak bulunan yer modelleri, hem ters çözüm istatistikleri açısından hem de bölgenin genel jeoelektrik ve jeolojik yapısına uyumu açısından irdelenmiştir. Bu nedenle Avcılar bölgesinde en uygun ölçüm yapabilme imkanının bulunduğu ve Şekil 6. 2'de gösterilen A-A'-A'' hattı üzerinde yeralan TEM ve VES verileri kullanılarak ortak ters çözüm yapılmıştır. Bulunan yer modellerini irdelemeden önce ters çözümün ayrımlılığını gösteren istatistiksel bilgilerin denetimi yapılmıştır.

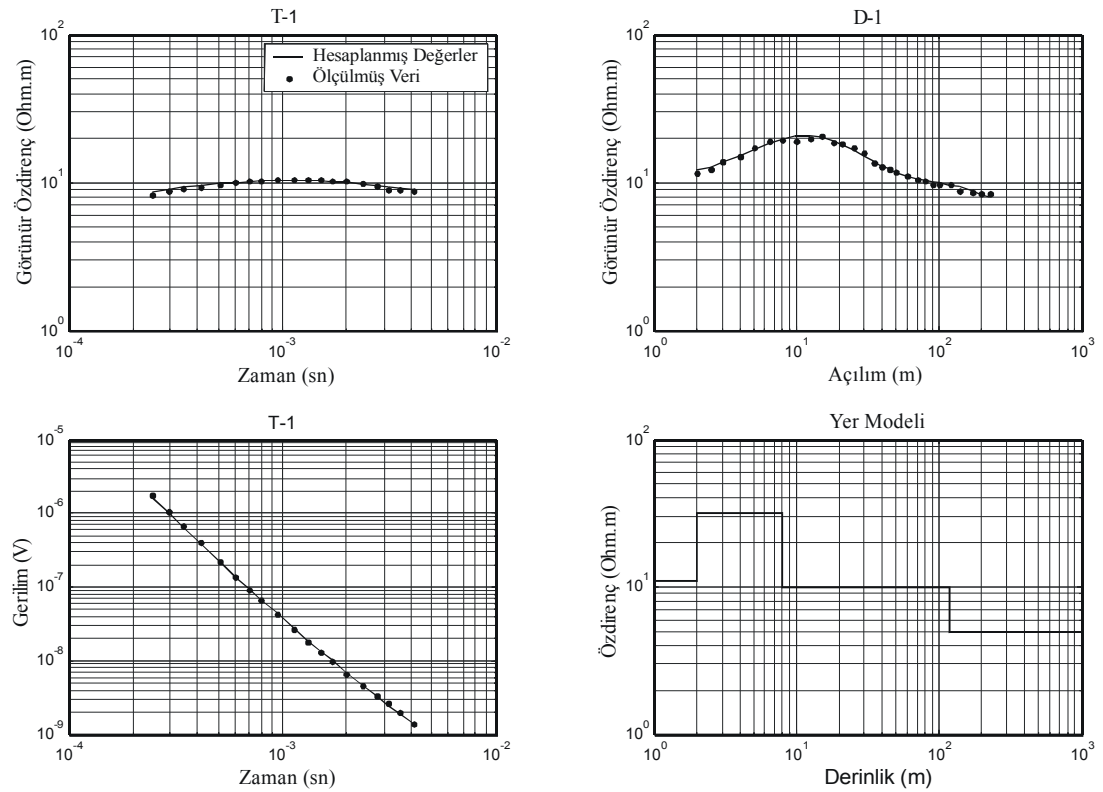
Avcılar'ın kuzeydoğu kesiminde ve oluşturulan yerelektrik kesitinin (Şekil 6. 14) en doğusunda yer alan D-1 istasyonunda ölçülmüş VES verisi incelendiğinde, yaklaşık 300 m'lik bir AB/2 açılımına ulaşılmasına rağmen 15 m'nin altında görünür öz direnç eğrisinin eğiminde bir değişim görülmemektedir. Bu bulgu bölgede 15 m'nin altında tek bir tabaka olabileceğini işaret etmektedir. Ancak aynı noktada yapılan T-1 isimli TEM ölçümünde 15 m'nin altında da bir formasyon sınırı olabileceği sonucu ortaya çıkmıştır (Şekil 6. 7). Dolayısıyla bu iki veri grubu kullanılarak yapılacak ortak ters



Şekil 6. 6 Avcılar bölgesinde ölçülen TEM verilerinden elde edilen görünür öz direnç kat haritaları. Kat haritalarının sol taraflarında örnekleme zamanı (time window) ve sağ taraflarında bu örnekleme zamanının karşılık geldiği yaklaşık derinlik değerleri verilmiştir.

çözümün sonuçları geliştireceği ve gerçek yer modeline daha yakın bir çözüm üreteceği beklenebilir.

Her iki yönteminde (TEM ve VES) ortak model parametresi olan üçüncü tabakanın öz direnci, en yüksek özdeğer tarafından kontrol edildiği, (V matrisinin ilk sütunu) ve diğer model parametreleri ile ilişkisinin olmamasından ( $R=1$ ) dolayı en iyi çözülen model parametresidir. Bunun yanında, sırasıyla  $\rho_2$ ,  $h_3$  ve  $\rho_1$  diğer parametrelerle ilişkilerinin az olması ve büyük özdeğerler tarafından kontrol edilmeleri nedeniyle iyi çözülen model parametreleridir. Bu parametrelerin çözünürlükleri ve çözümün tekliği Tablo 6. 1’de gösterilen ayrımlılık bilgileri kullanılarak test edilebilir. Örneğin ortak ters çözüm sonucunda, sönüm katsayıları ve parametrelerin model ayrımlılık değerlerinin ( $R$  model ayrımlılık matrisinin köşegen değerleri) tamamı bir veya bire çok yakın değerler almaktadır. Ayrıca model parametrelerinin standart sapmalarının küçük olması ve ölçülen veriler ile bulunan yer modelinden oluşturulan kuramsal veri arasındaki çakışma ölçütünün küçük bir değere inmesi (0.4), ortak ters çözüm sonuçlarının güvenilebilirliğini vurgulamaktadır (Şekil 6. 7).

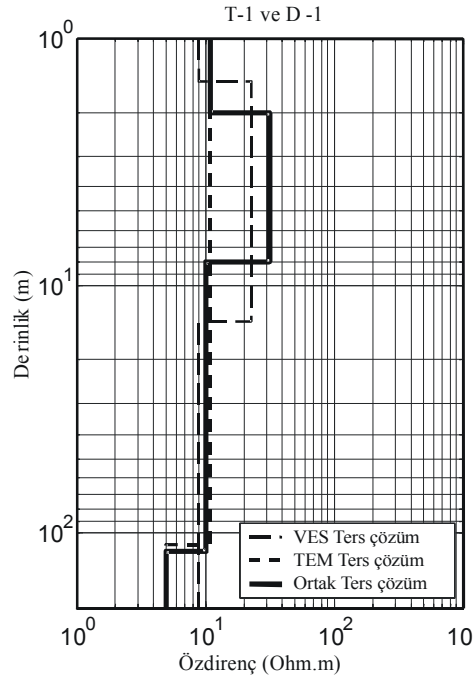


Şekil 6. 7 T-1 ve D-1 istasyonlarında ölçülen verilerin ortak ters çözümü ve bulunan yer modeli.



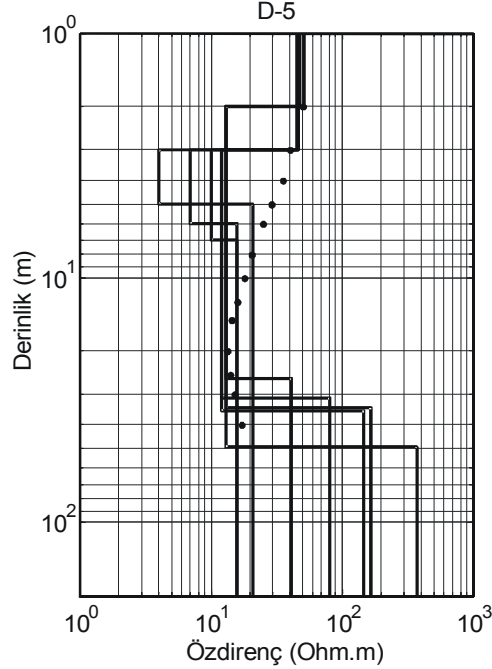
Tablo 6. 1 T-1 ve D-1 verilerinin ortak ters çözüm sonuçları.

| Model Parametreleri       | Başlangıç Modeli | Çözüm | T-1 ve D-1                                                                        |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                     |                                                                                     | R - Model Ayrıklık Değerleri | Standart Sapma |
|---------------------------|------------------|-------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|----------------|
| $\rho_1$                  | 15               | 11    |  |  |   |  |  |  |  | 0.99                         | 0.9            |
| $\rho_2$                  | 50               | 32    |  |  |   |  |  |                                                                                     |  | 0.99                         | 1.2            |
| $\rho_3$                  | 15               | 10    |  |  |   |  |  |                                                                                     |  | 1                            | 0.2            |
| $\rho_4$                  | 8                | 5     |  |  |   |  |  |  |  | 0.99                         | 2.3            |
| $h_1$                     | 8                | 2     |  |  |   |  |  |  |  | 0.97                         | 3.5            |
| $h_2$                     | 15               | 6     |  |  |   |  |  |  |  | 0.98                         | 2.9            |
| $h_3$                     | 80               | 111   |  |  |  |  |  |  |                                                                                     | 1                            | 0.5            |
| Sönüm katsayısı           |                  |       | 1                                                                                 | 1                                                                                 | 1                                                                                  | 1                                                                                 | 0.9                                                                               | 0.9                                                                                 | 0.9                                                                                 | $\chi$                       |                |
| Çözülen model parametresi |                  |       | $\rho_3$                                                                          | $\frac{1}{\rho_2}$                                                                | $\frac{1}{h_3}$                                                                    | $\rho_1$                                                                          | $\frac{1}{h_1 h_2}$                                                               | $\rho_4$                                                                            | $\frac{h_1}{h_2}$                                                                   | 0.4                          |                |



Şekil 6. 8 T-1 ve D-1 verilerinin ayrı ayrı ve ortak ters çözüm sonuçları ile bulunan yer modelleri.

Şekil 6. 14’de verilen yerelektrik yapısı kesitinde A’ bölgesinin kuzeydoğusunda T-5 ve D-5 ölçüm istasyonları yer almaktadır. Bu istasyonda alınan D-5 isimli VES verisi, açılımın kısa olması nedeni ile TEM verisi ile belirlenen en alttaki iletken tabaka hakkında bilgi içermemektedir (Şekil 6. 12). Bunun yanında, 4. Bölüm’de irdelenen H tipi yer modelinde görülen eşdeğerlik probleminin bir benzeri bu bölgedeki verilerde de bir güçlük olarak karşımıza çıkmaktadır. Şekil 6. 9’da görüldüğü gibi farklı başlangıç modelleri için çözüm de çok farklı olabilmektedir. Bununla birlikte D-5 verisinin dirençli 3. katman ile ilgili bilgisinin de yetersiz olmasından dolayı D-5 ters çözümü oldukça kararsız davranmakta ve  $\rho_3$  parametresine ait model ayrırlılık değeri 0.56’ya kadar düşerek çözümün tek olmaktan uzak olduğunu vurgulamaktadır. Bu durumun üstesinden gelmek amacı ile yapılan ortak ters çözümde  $\rho_3$  parametresi yüksek bir ayrırlılık ile çözülebilmektedir ( $R=0.99$ ). Ortak ters çözüm sonunda D-5 verisinin, hesaplanan yer modelinden üretilen kuramsal eğri ile çakışmasının iyi olmadığı ( $\chi=1.8$ ) görülmüştür. Bunun nedeninin VES ölçümlerinin yanal süreksizliklerden etkilenebilmelerinden kaynaklandığı sanılmaktadır.



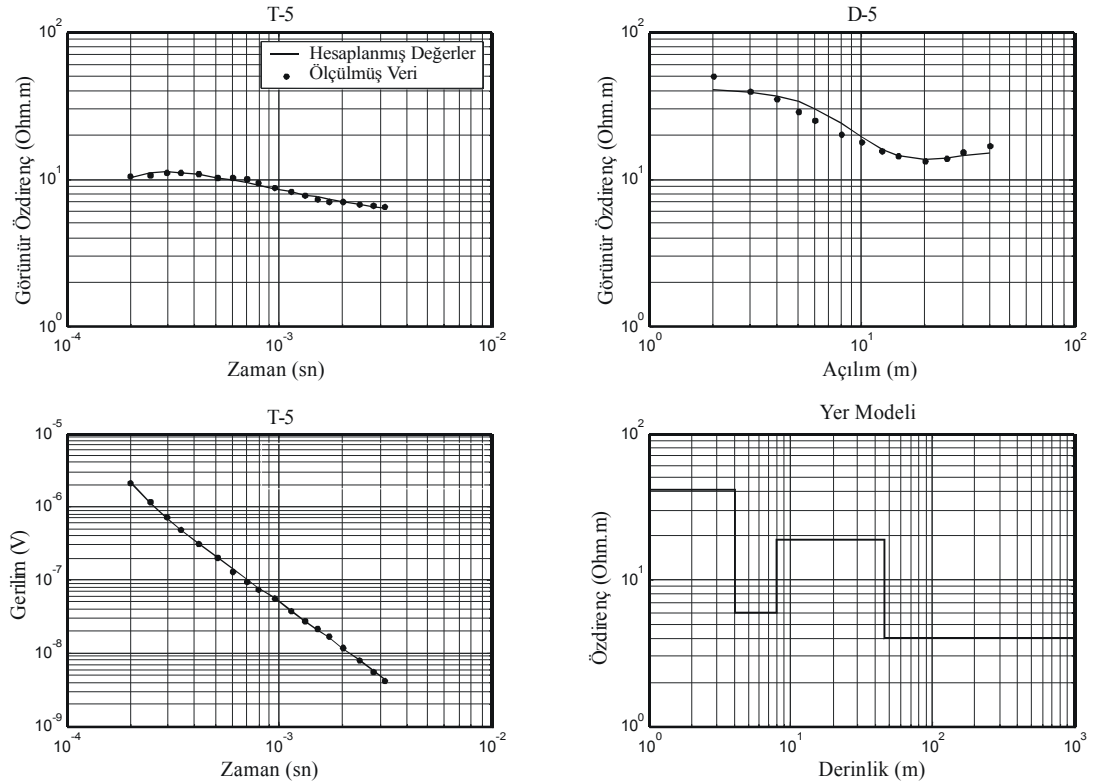
Şekil 6. 9 Farklı başlangıç modelleri için D-5 verisi ile yapılan ters çözümde bulunan yer modelleri.

Çalışma alanı içinde ortak ters çözüm uygulanan bir diğer veri grubu da T-7 ve D-7 istasyonlarıdır. T-7 ve D-7 istasyonlarında ölçülen verilerin ortak ters çözümü

sonucundaki V matrisi incelendiğinde neredeyse tüm model parametrelerin birbirlerine bağımlı olduğu görülmektedir (Tablo 6. 3). Ancak model ayrımlılık değerlerine bakıldığında tüm model parametrelerin çözümünün tek olduğu söylenebilir (Tablo 6. 2). Bu sonuç, parametreleri kontrol eden özdeğerler üzerine uygulanan sönümlendirme katsayılarının (T) 1'e yakın olması ve standart sapma değerlerinin küçük olmasıyla da desteklenmektedir.

#### 6. 4 Avcılar Bölgesi Yerelektrik Yapısı

Model parametrelerinin ortak olması durumunda ortak ters çözüm sonuçları oldukça güvenilir olmaktadır. Ancak ortak model parametreleri sayısının az olması durumunda bile yöntemlerin birbirlerine göre üstün yanlarının ortaya çıkıp ortak ters çözüm sonuçlarını geliştirdiği görülebilir. Örneğin, T-7 istasyonunda yapılan TEM ölçümü üstteki dirençli katman hakkında ve VES ölçümü alttaki iletken katman hakkında yeterli bilgi içermemektedir. Bu durum yöntemlerden herhangi birinin tek başına bu bölge için güvenilir bir sonuç bulmasını güçleştirmektedir. Ancak yapılan ortak ters çözüm sonucunda üç tabakaya ait tüm model parametreleri daha güvenilir bir şekilde çözülebilmektedir.



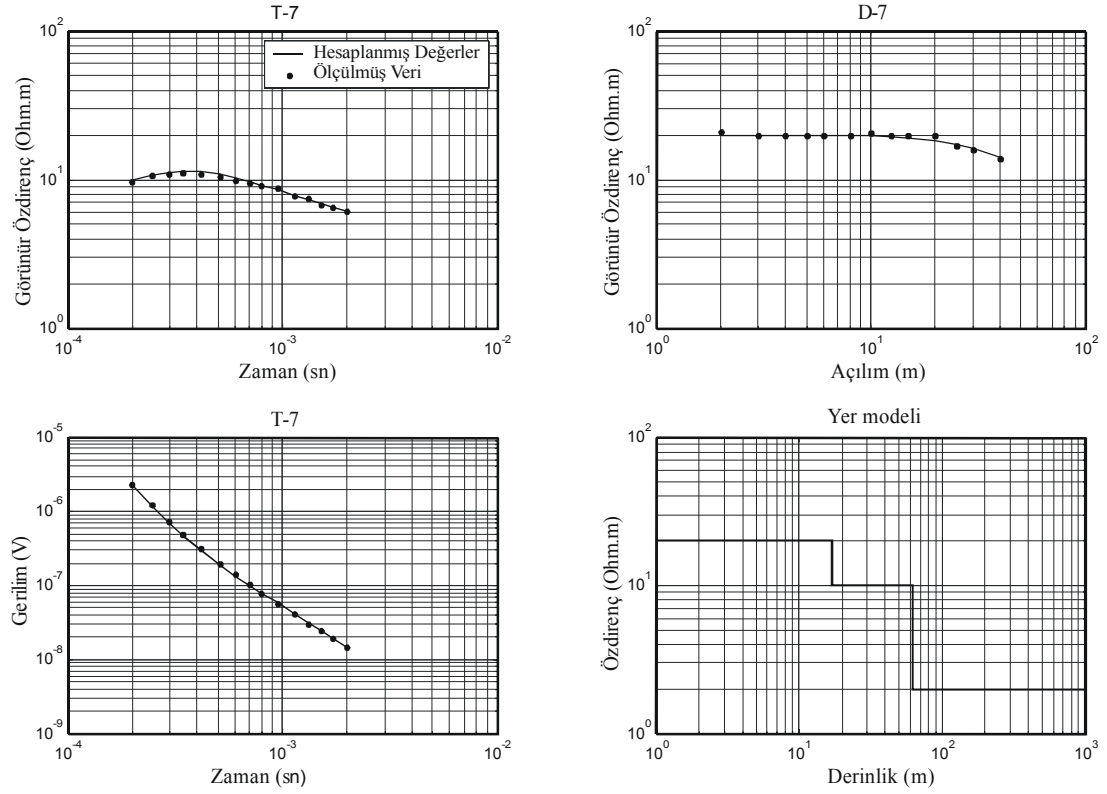
Şekil 6. 10 T-5 ve D-5 istasyonlarında ölçülen verilerin ortak ters çözümü ve bulunan yer modeli.

Tablo 6. 2 T-7 ve D-7 verileri için model ayrımlılık matrisinin köşegen değerleri ve ortak ters çözümün sonuçlar üzerindeki etkisi.

| Model Parametresi | VES | TEM | VES-TEM |
|-------------------|-----|-----|---------|
| $\rho_1$          | ●   |     | ●       |
| $\rho_2$          | ●   | ●   | ●       |
| $\rho_3$          |     | ●   | ●       |
| $h_1$             | ●   |     | ●       |
| $h_2$             |     | ●   | ●       |

Doğadaki kayaçların kimyasal yapılarına göre öz dirençlerinin geniş bir aralık içinde olmasından dolayı öz direncin jeolojik birimler ile genel geçer bir ilgisi mevcut değildir. Ancak jeolojisi hakkında bilgi sahibi olunan bir bölge için öz direncin jeolojik birimler ile ilgisi ortaya konulabilir. Bu doğrultuda inceleme alanında açılan araştırma sondajları ile tespit edilen formasyon bilgileri sondajlara en yakın noktalarda alınan elektrik ve elektromanyetik ölçüm sonuçları ile karşılaştırılarak bölgede yer alan jeolojik birimler ile öz direnç arasında bir benzerlik bulunmaya çalışılmıştır (Tablo 6. 4). Buna göre Şekil 6. 1’de verilen jeoloji haritası da dikkate alınarak T-3, T-4 ve T-5 ölçüm istasyonlarının bulunduğu bölgelerde sığ derinliklerde (5-10 m) görülen yüksek öz dirençli katmanların Bakırköy Formasyonu olarak anılabileceği görülmüştür (Şekil 6.12).

İnceleme alanında ölçülmüş VES verileri, sık yerleşim nedeniyle yeterli elektrot açılımının yapılamamasından ve formasyonların yüksek iletkenlik göstermesinden dolayı, TEM verileri ile aynı derinliklere ait bilgileri içermemektedir. Bu yüzden ortak ters çözüm sonuçları ve TEM ters çözüm sonuçları kullanılarak oluşturulan yerelektrik kesitleri karşılaştırılmıştır. TEM verilerinin ters çözümü ile elde edilen yerelektrik kesiti (Şekil 6. 13) genel olarak ortak ters çözüm sonucunda bulunan yerelektrik kesitine benzemesine rağmen özellikle üst kesimlerde dirençli birimlerin bulunduğu T-2, T-3, T-4 ve T-5 istasyonları için elde edilen sonuçların farklılıklar gösterdiği görülmektedir. Bunun nedeni dirençli ve sığ bir yapının üst kesimde yer almasıdır. Daha önceki bölümlerde değinildiği üzere TEM yöntemi dirençli

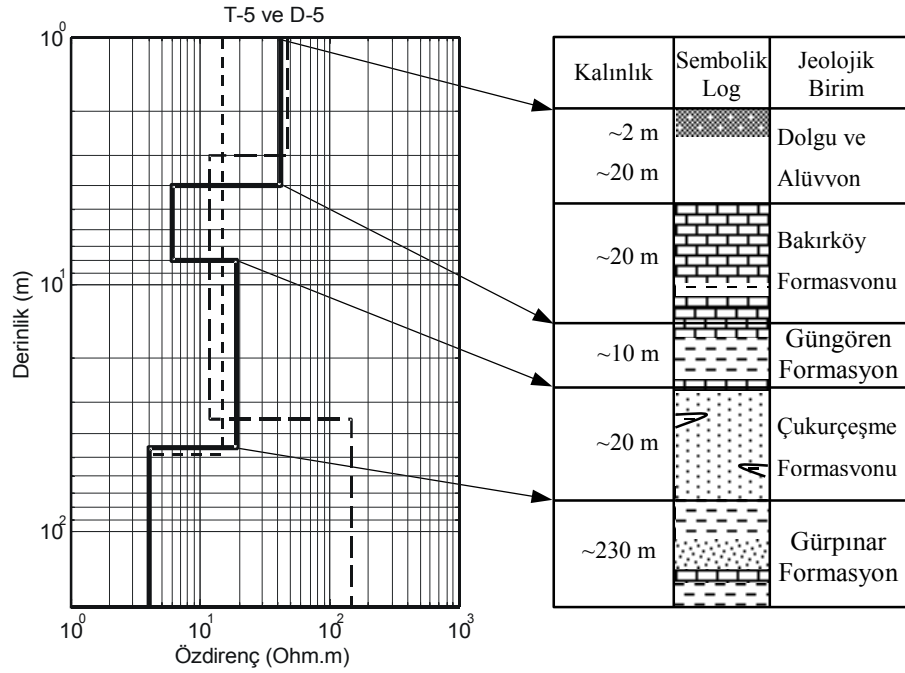


Şekil 6. 11 T-7 ve D-7 istasyonlarında ölçülen verilerin ortak ters çözümü ve bulunan yer modeli.

Tablo 6. 3 T-7 ve D-7 verilerinin ortak ters çözüm sonuçları.

| Model Parametreleri       | Başlangıç Modeli | Çözüm | T-7 ve D-7          |                      |                      |                        |                      | R - Model Ayrıklık Değerleri | Standart Sapma |
|---------------------------|------------------|-------|---------------------|----------------------|----------------------|------------------------|----------------------|------------------------------|----------------|
| $\rho_1$                  | 40               | 20    | ○                   | ○                    | ○                    | •                      | •                    | 0.99                         | 0.2            |
| $\rho_2$                  | 20               | 10    | ○                   | •                    | ●                    | ●                      | ●                    | 0.98                         | 0.7            |
| $\rho_3$                  | 10               | 2     | ○                   | •                    | ○                    | ○                      | ●                    | 0.93                         | 1.2            |
| $h_1$                     | 30               | 17    | ○                   | •                    | ○                    | ○                      | ○                    | 0.95                         | 1              |
| $h_2$                     | 20               | 45    | ○                   | ●                    | ○                    | ●                      | •                    | 0.99                         | 0.5            |
| Sönüm katsayısı           |                  |       | 1                   | 1                    | 1                    | 0.9                    | 0.9                  | $\chi$                       |                |
| Çözülen model parametresi |                  |       | $\frac{1}{h_1 h_2}$ | $\frac{h_2}{\rho_1}$ | $\frac{\rho_2}{h_2}$ | $\frac{1}{h_1 \rho_3}$ | $\frac{\rho_3}{h_1}$ | 0.3                          |                |

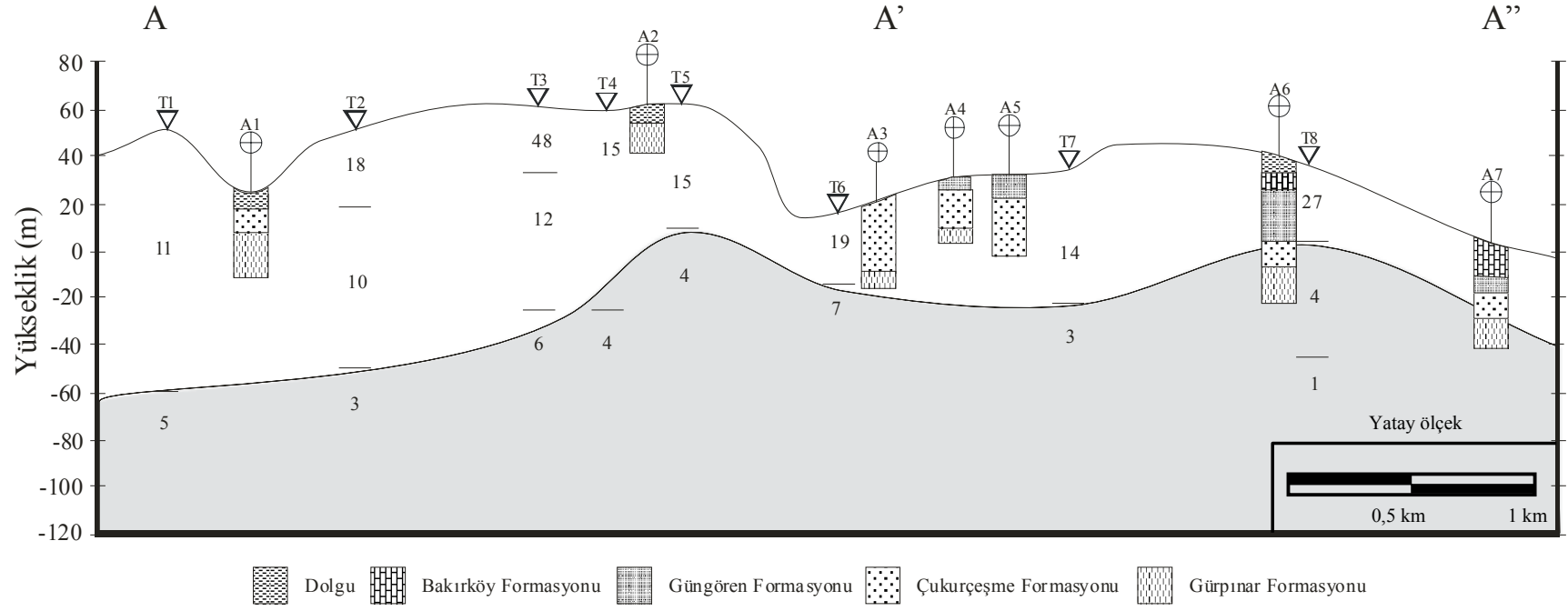
katmanları az miktarda indüklediğinden dolayı bu birimler hakkında yeterli bilgiyi içermemektedir. Ayrıca aletsel kısıtlamalar nedeni ile yokuş zamanının uzun olması ilk bir kaç zaman penceresi için ölçülen verilerin kullanılmasını engellemektedir.



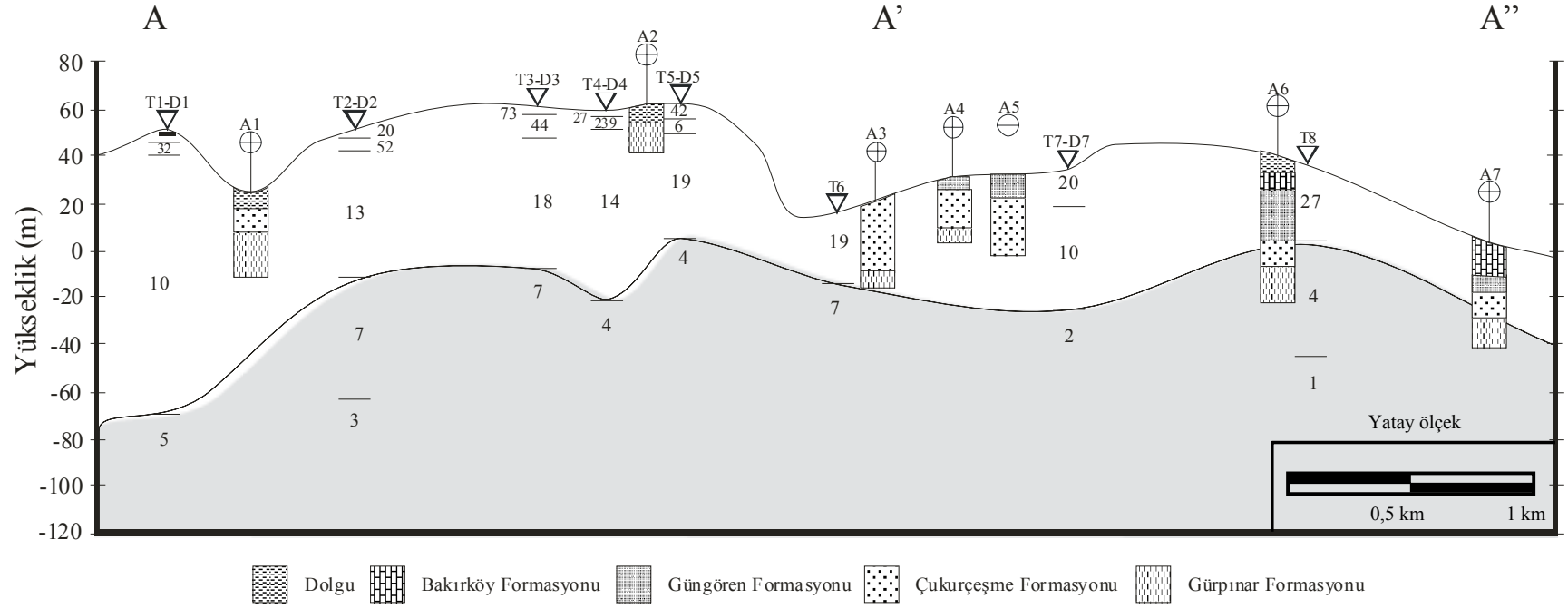
Şekil 6. 12 T-5 ve D-5 verilerinin ortak ters çözümü ile bulunan yer modeli (solda) ile Avcılar ve çevresinin genelleştirilmiş stratigrafik kesitinin (Yüzer ve Eyüboğlu, 1998'den tekrar çizilmiştir) karşılaştırılması.

Avcılar bölgesinde formasyonların jeolojik özellikleri yanal ve düşey yönde değişimler gösterebildiğinden dolayı T-6 ve T-8 istasyonlarının yer aldığı bölgelerde alınan VES ölçülerinin açılım yönünün farklı olmasından kaynaklandığı düşünülen anizotropi etkisinden dolayı bu bölgelerde ortak ters çözüm yapılamamıştır. Çünkü VES verileri akım ve gerilim elektrotlarının çakıldığı bölgenin lokal özelliklerine göre bir boyutlu tanımının dışına çıkabilmektedir. TEM yöntemi ile ölçülen veriler ölçme yönteminden dolayı bir boyutlu tanımına daha uygun bilgiler içermektedir. Bu nedenle A-A'-A'' kesiti boyunca oluşturulan elektrik öz direnç kesitinde (Şekil 6. 14) ortak çözüm yapılamayan noktalarda T-6 ve T-8 ters çözüm sonuçları tercih edilmiştir.

Avcılar'ın yerelektrik yapısının belirlenebilmesi amacıyla A-A'-A'' hattında alınan kesit boyunca yer alan TEM ve VES verileri kullanılarak elde edilen ortak ters çözüm sonuçları ile bir elektrik kesit (Şekil 6. 14) oluşturulmuştur. Ayrıca elde edilen bulguların karşılaştırılması amacı ile bölgede açılan araştırma sondajlarından elde edilen formasyon bilgileri de bu kesit üzerine işaretlenmiştir.



Şekil 6. 13 Avcılar bölgesinde kuzeybatı-güneydoğu doğrultusunda, A-A'- A'' hattı boyunca TEM verilerinin ters çözümü ile elde edilen yerelektrik kesiti.



Şekil 6. 14 Avcılar bölgesinde kuzeybatı-güneydoğu doğrultusunda, A-A'-A'' hattı boyunca TEM ve VES verilerinin ortak ters çözümü ile elde edilen yerelektrik kesiti.



Jeolojik bilgilere göre Bakırköy Formasyonu'nun altında kalan Güngören Formasyonu ile Çukurçeşme Formasyonu, litolojik özellikleri (kil-kum-çakıl) dikkate alındığında, elektriksel olarak benzer özellikler göstereceği beklenebilir. Bu durumun yapılan değerlendirmeleri etkilediği ve bu iki jeolojik birimin tek bir formasyon niteliği gösteren bir öz direnç aralığına girdiği sanılmaktadır.

Kil içeriğinin artmasıyla öz direncin düştüğü, kum ve çakıl içeriğinin baskın olmasıyla da öz direncin arttığı sonucuna varılabilir. Bu görüş T-6 ve T-5 istasyonları ile elde edilen bilgi ile doğrulanmaktadır. T-6 istasyonu incelendiğinde öz direnci 19 Ohm.m olan bir tabaka ve bunun altında öz direnci 7 Ohm.m olan diğer bir tabaka yer almaktadır. Bu bilgi aynı bölgede açılan araştırma sondajı ile karşılaştırıldığında Çukurçeşme Formasyonu için öz direncin 19 Ohm.m civarında olduğu söylenebilir. Ancak T-5 istasyonu yakınında yapılan araştırma sondajında (A-2) en alt birim Güngören Formasyonu olarak görülmesine rağmen elde edilen öz direnç bilgisi Çukurçeşme Formasyonu'nu işaret etmektedir. Dolayısıyla bu bölgede Güngören Formasyonunun ince bir tabaka olarak mevcut olduğu düşünülebilir.

Tablo 6. 4 Avcılar'da görülen jeolojik birimlerin öz direnç aralığı.

| Öz direnç aralığı (Ohm.m) | Jeolojik Birim        |
|---------------------------|-----------------------|
| 40 – 100                  | Bakırköy Formasyonu   |
| 6 – 10                    | Güngören Formasyonu   |
| 10 – 20                   | Çukurçeşme Formasyonu |
| 7>                        | Gürpınar Formasyonu   |

Kuzeybatı – güneydoğu kesiti boyunca sürekliliği devam eden, ancak yer yer kalınlığı ve öz direnci değişen Gürpınar Formasyonu bölgede yapılan TEM ve VES ölçümleri sonucunda bulunan en alt katman olarak görülür. Bu birim genel olarak aşırı konsolide olmuş kil ve kiltası olarak temsil edilir. Dolayısıyla bu birimin öz direncinin düşük olması beklenebilir. Ancak su içeriğinin hem düşey hem de yatay yönde artması ve azalması ile bu birim oldukça düşük öz direnç değerleri de alabileceği düşünülmektedir.

## 7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Doğru akım ile oluşturulan alanlar (Direct current fields-DC) ve değişken alanlar (Alternating current fields-AC) aynı elektriksel parametrelere duyarlı olmasına rağmen farklı davranırlar (Gomez-Trevino ve Edwards, 1983). Örneğin, oldukça dirençli bir tabaka DES yöntemi için bir iletim sorunu oluştururken, değişken alanlar dirençli ortamları çok kolay geçerler ve bu tabakaları az bir miktar indüklerler (Raiche ve diğ., 1985). Bu durumda bu iki farklı fiziksel prensibe dayanan ancak aynı elektriksel parametrelere duyarlı yöntemlerin ortak değerlendirilmesi çözümleri geliştirecektir. Bu ilkedен yola çıkarak AC alanları ve DC alanları kullanan iki yöntem olan TEM ve VES verileri birlikte değerlendirilmiştir. Bu tez kapsamında hem TEM hem de VES verilerinin ters çözümlerini yapabilecek bir bilgisayar programı yazılmıştır. Yazılan program Matlab programlama dilinde yazıldığından dolayı, veri işleme, görsel üstünlükler ve ters çözüm istatistiklerinin kontrolü açısından etkin bir programdır. Ters çözüm sonuçlarının duraylılığının sağlanabilmesi ve çözünürlüğün kontrol edilebilmesi için tekil değer ayrışımı kullanılarak sönümlü en küçük kareler ters çözümü uygulanmıştır. Öncelikle yapay veriler ile test edilen yöntem, 1999 Kocaeli depreminde uğradığı ağır hasar ile gündeme gelen Avcılar bölgesinde, tez kapsamında ölçülen verilere, uygulanmıştır. Bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular aşağıda sıralanmıştır:

1) Doğru akım öz direnç yöntemi ile yapılan ters çözüm sonuçlarında özellikle H tipi ve K tipi yer modellerinde tabakaların kalınlıkları ve öz dirençleri birbirlerinden bağımsız olarak çözülememektedir. Örneğin H tipi yer modelleri için kalınlık ve öz direnç arasındaki oran çözülebilirken, K tipi yer modelleri için kalınlık ve öz direncin çarpımı çözülebilmektedir. Dolayısıyla bağımlı model parametreleri hakkında yeterli bilgi olmaması durumunda çözüm tek olmaktan uzaktır. Ancak yapay veriler üzerinde uygulanan ortak ters çözüm sonuçları gerçek model değerlerine çok yakın çıkmış ve eşdeğerlik problemi büyük ölçüde ortadan kalkmıştır. Farklı verici halka boyları ile oluşturulan yapay verilerin çözümleri incelendiğinde TEM yönteminin katman çözünürlüğünün artmasında uygun halka

boyu seçiminin önemi ortaya çıkmaktadır. VES verileri ile ortak ters çözümlerinin yapılması durumunda çözümün gerçek yer modeline yaklaştığı ve halka boyu etkisinin azaldığı görülmüştür. Bu durum ortak ters çözüm uygulamalarında herbir yöntemin bir hakem gibi davranmadığının aksine çözümün her zaman daha iyiye gittiğinin bir ispatıdır.

2) Avcılar bölgesinde yapılan ölçümler değerlendirilirken öncelikle görünür öz direnç ve yaklaşık derinlik ifadeleri kullanılarak her iki yöntem ile elde edilen genel bulgular değerlendirilmiştir. Oluşturulan görünür öz direnç kesitlerine ve görünür öz direnç kat haritasına göre, Avcılar bölgesinde derinlik artışı ile iletkenlik artmaktadır. Ayrıca Avcılar'ın kuzeyine doğru iletkenlik azalmaktadır. Elde edilen bu ilk bilgiler ışığında ters çözümler için uygun başlangıç modelleri oluşturulmaya çalışılmıştır.

3) Uygulanan ters çözüm ve ortak ters çözüm sonuçları A-A'-A'' hattı boyunca alınan kesite işlenmiş ve yerelektrik yapısı ortaya konmuştur. Ayrıca jeolojik birimler ile karşılaştırma yapılabilmesi amacı ile araştırma sondajları da bu kesit üzerinde gösterilmiştir. Elde edilen jeoelektrik bilgi bölgenin jeolojik özellikleri ile ilişkilendirilerek jeolojik oluşumları tanımlayan öz direnç aralığı belirlenmeye çalışılmıştır (Tablo 6. 4). Buna göre yapılan elektrik (VES) ve elektromanyetik (TEM) ölçümleri sonucunda, T-3, T-4 ve T-5 istasyonları civarında kalınlığı 5-10 m arasında değişen 40-100 Ohm.m öz dirençli bir formasyon yer almaktadır. Bu birim jeolojik bilgiler ve araştırma sondajları ile karşılaştırıldığında Bakırköy Formasyonu olduğu sonucuna varılmıştır. Yerelektrik kesiti boyunca sürekli olduğu görülen 40-60 m kalınlığa ve 10-20 Ohm.m öz dirence sahip birimin Çukurçeşme Formasyonunun özelliklerini yansıtabileceği kanısına varılmıştır. Çukurçeşme Formasyonu ile Güngören Formasyonu jeolojik özellikleri açısından birbirine benzemektedir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda bu iki birimin aynı öz direnç aralığında olabileceği ve bu nedenle birbirinden ayıramadığı sonucuna varılmıştır. Bu bölgede görülen en alt tabaka 4-7 Ohm.m arasında değişen öz dirence sahiptir. A-2 araştırma sondajı bu derinliğe kadar inmemesine rağmen, T-6 istasyonu civarında mevcut olan A-3 ve A-4 araştırma sondajları ile 4-7 Ohm.m arasında öz dirence sahip olan birimin, bölgenin tamamında en alt tabaka olarak görünen, Gürpınar Formasyonu olabileceği düşünülmektedir. T-2, T-7 ve T-8 istasyonlarında görülen çok düşük öz direnç değerlerinin (1-3 Ohm.m) Gürpınar Formasyonu'nun su içeriği ve kimyasal

yapısı ile ilişkili olduğu sanılmaktadır. Ayrıca çok düşük öz direnç değerlerinin belirlendiği bölgeler sahile en yakın kesimler olduğundan dolayı tuzlu su giriminin olması düşük öz direncin nedenini diğer bir alternatif olarak açıklayabileceği düşünülmektedir.

4) Genel olarak, elektrik yöntemlerde yere uygulanan akımın her zaman en kısa yolu takip etmesinden dolayı iletken ortamlarda derin bilgilerin elde edilebilmesi için bir kaç kilometrelik açılımlara ihtiyaç vardır. Ancak aletsel yetersizlikler ve topoğrafik sorunlar nedeniyle her zaman bu kadar uzun açılımlar yapabilme imkanı olmayabilir. Bu tür durumlarda TEM ölçümleri, daha küçük bir ölçüm alanına gereksinim duyularak daha derin bilginin elde edilmesini sağlayabilir. Ayrıca uzun açılımlar yaparken karşımıza çıkan bir diğer önemli unsur da formasyonların elektriksel özelliklerinin yatay yönde değişmesi ve anizotropidir. Bu tür ortamlarda VES ölçümleri bir boyutlu tanımından uzaklaşmakta ve ters çözüm sonucunda bulunan yer modeli kabul edilebilir sınırların dışında kalabilmektedir. Ancak TEM ölçümlerinde alıcı ve verici halkanın sabit bir pozisyonda ölçüm yapmasından dolayı bir boyutlu tanımı daha gerçekçi olmaktadır.

5) Bu çalışma sonucunda elektrik ve elektromanyetik yöntemlerin birlikte kullanılması ile ayrı ayrı yöntemlerin fizik esasları nedeni ile alınamayan hem iletken hem de dirençli katmanlar hakkında güvenilebilir bilginin alınabileceği görülmüştür. Ayrıca şehiriçi çalışmalarında ve ölçüm sahalarının kısıtlı olduğu bölgelerde, TEM yöntemi kullanılarak derin elektrik yapısı hakkında bilgi elde edilebilir. Bunun yanında, elektrik ve elektromanyetik yöntemlerin birlikte kullanılması ve elde edilen bulguların bölgenin jeolojisi ile ilişkilendirilmesi ile hem uzun zaman alan hemde maddi açıdan daha masraflı olan mekanik sondaj sayısı azaltılabilir. Dolayısıyla bir bölgenin yeryapısının ortaya konmasında elektrik ve elektromanyetik yöntemlerin kullanılması iyi bir alternatif oluşturmaktadır. Ayrıca elde edilen bilginin tek bir noktadan ziyade bölgesel bilgileri yansıtması yöntemin bir diğer avantajıdır.

6) Avcılar'da yapılan deprem yer tepkisi çalışmalarında bölgede 50 m kalınlığında, 300 m/s S-dalgası hızına sahip bir birim ve bunun altında 200 m'ye kadar 500 m/s S-dalgası hızına sahip, yumuşak sediman katmanları olduğu belirlenmiştir (Bozdağ ve Kocaoğlu, 2002). Bu çalışma kapsamında bulunan yerelektrik modeli incelendiğinde, yerel olarak kalınlığı değişmesine rağmen ortalama 40-60 m kalınlığında ve 10-20 Ohm.m öz direncine sahip bir birim tespit

edilmiştir. Bu tabakanın altında ise en az 100 m'ye kadar devam ettiği düşünülen, öz direnci çok düşük birimin olduğu görülmektedir. Dolayısıyla 50 metreden sonra S-dalgası hızındaki artış, yerelektrik yapıda bir öz direnç artışı olarak kendini göstermemektedir. Bu çalışma kapsamında kullanılan ölçüm düzenekleri ile yaklaşık 25-120 m arasından bilgi sağlanabilmektedir. Bu nedenle bölgede planlanacak başka çalışmalarda kullanılacak verici çıkış gerilimi, akımı ve verici halka boyu büyütülerek daha sık ve daha derin kesimlerden bilgi sağlamanın mümkün olabileceği düşünülmektedir. Bunun yanında, bölgede alınmış ölçülerin değerlendirilmesinde yanal süreksizliklerden kaynaklanan bozucu etkiler ve anizotropi etkisi, bu çalışmanın kapsamı dışında bırakıldığından dolayı tabakaların yanal yönde değişimlerinin ayrıntılı olarak irdelenmesi bundan sonra Avcılar Bölgesi'nde yapılacak çalışmaların konusunu oluşturabileceği düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

- Abramowitz, M., and Stegun, I. A.,** 1964. Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables, National Bureau of Standards, *Applied Mathematics Series* 55.
- Aktarakçı, H. K., Harthill, N., and Blohm, M.,** 1997. Time-domain electromagnetic survey for gold exploration, Nevada, *Geophysics*, **62**, 1409-1418.
- Andersen, W. L.,** 1979. Numerical integration of related Hankel transforms of orders 0 and 1 by adaptive digital filtering, *Geophysics*, **44**, 1287-1305.
- Başokur, A. T.,** 2001. Doğrusal ve doğrusal olmayan problemlerin ters-çözümü, *TMMOB Jeofizik Mühendisleri Odası, Eğitim Yayınları No:4*.
- Bozdağ, H. E., and Kocaoğlu, A. H.,** 2002. Estimation of Earthquake Site Effects by Array Processing of Microtremors, *1<sup>st</sup> International Symposium of Istanbul Technical University the Faculty of Mines on Earth Sciences and Engineering*, May 16-18, Istanbul, **216**.
- Chen, C.-S.,** 1998. Mapping plate boundaries using TEM method along the Longitudinal Valley, Taiwan, *Geophysics*, **63**, 868-879.
- Combrinck, M.,** 2001. Transient electromagnetic exploration techniques: can they be applied to the landmine discrimination problem?, *African Earth Sciences*, **33**, 693-698.
- Denghai, B. and Meju, M.A.,** 2000, All-time apparent resistivity for Transient Electromagnetic method, 15th EM Induction Workshop Cabo Frio, Brazil August 19-26.
- Eckard, M.,** 1993. Joint Inversion von Gleichstromgeoelektrik und Transientenelektromagnetik, *Diplomarbeit, Universität zu Köln*.
- Fugro Instruments,** 2002. Time Domain EM Transmitter / Receiver System, *SIROTEM MK 3 User's Manual*, Sydney, Australia.
- Gomez-Trevino, E., and Edwards, R. N.,**1983. Electromagnetic soundings in the sedimentary basin of southern Ontario-A case history, *Geophysics*, **48**, 311-326.
- Herece, E. ve Şentürk, K.,** 2001. Hava Harp Okulu Yerleşim Alanı Zemininin Deprem Davranışı Açısından İncelenmesi Projesi (Proje Başkanı: Erdal Herece), *M. T. A. Genel Müdürlüğü – S. D. Üniversitesi, Ankara, Isparta*.
- Hördt, A.,** 1989. Ein Verfahren zur “Joint Inversion” angewandt auf “Long Offset Transient Electromagnetics” (LOTEM) und Magnetotellurik (MT), *Diplomarbeit, Universität zu Köln*.

- İmamoğlu, Ç., and Boztepe-Güney, A.,** 2002. Investigation of sedimentary resonance in Avcılar region, Istanbul, *1<sup>st</sup> International Symposium of Istanbul Technical University the Faculty of Mines on Earth Sciences and Engineering*, May 16-18, Istanbul, **216**.
- İstanbul Büyükşehir Belediyesi, Planlama ve İmar Daire Başkanlığı, Zemin ve Deprem İnceleme Müdürlüğü, Avrupa Yakası Grubu,** 2001. İstanbul Avrupa yakası güneyi 1/5000 ölçekli imar planlarına esas jeolojik, jeoteknik etüd raporu.
- Jackson, D. D.,** 1972. Interpretation of Inaccurate, Insufficient and Inconsistent data, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, **28**, 97-109.
- Karlik, G., and Strack, K.-M.,** 1990. "All-time" scheinbare Widerstandskurven für LOTEM, in Haak, V., and Homilius, J., (eds.), *Protokoll über das 13. Kolloquium "Elektromagnetische Tiefenforschung"*, Hornburg, NLfB, 135-144.
- Kaufman, A. A., and Keller G. V.,** 1983. Frequency and transient soundings, *Elsevier Publishing Company*.
- Knight, J. H., and Raiche, A. P.,** 1982. Transient Electromagnetic Calculations using the Gaver-Stehfest inverse Laplace transform method, *Geophysics*, **47**, 47-51.
- Koefoed, O.,** 1979. Geosounding Principles, 1, Resistivity sounding measurements, *Elsevier Publishing Company*.
- Lines, L. R., and Treitel, S.,** 1984. A review of least-squares inversion and its application to geophysical problems, *Geophysical Prospecting*, **32**, 159-186.
- 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.
- 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.
- Menke, W.,** 1984. Geophysical data analysis: discrete inverse theory, *Academic Press*.
- Raiche, A. P.,** 1983a. Comparison of apparent resistivity functions for transient electromagnetic methods, *Geophysics*, **48**, 787-789.
- 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.
- Santos, F. A. M., Dupis, A., Afonso, A. R. A., and Victor, L. A. M.,** 1997. 1D joint inversion of AMT and resistivity data acquired over a graben, *Journal of Applied Geophysics*, **38**, 115-129.
- Spies, B. R., and Eggers, D. E.,** 1986. The use and misuse of apparent resistivity in electromagnetic methods, *Geophysics*, **51**, 1461-1471

- 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**.
- Strack, K. M.,** 1992. Exploration with deep transient electromagnetics, *Elsevier Publishing Company*.
- Tezcan, S. S., Kaya, E., Bal. İ.E., Özdemir, Z.,** 2002. Seismic amplification at Avcılar, Istanbul, *Engineering Structures*, **24**, 661-667.
- Wait, J. R.,** 1951. The magnetic dipole over the horizontally stratified earth: *Can. J. Physics*, **29**, 577-592.
- Ward, S. H., and Hohmann, G. W.,** 1987. Electromagnetic theory for geophysical applications, in *Electromagnetic methods in applied geophysics*. Edited by Misac N. Nabighian, *SEG*, **1**, theory, p221.
- Vozoff, K., and Jupp, D. L. B.,** 1975. Joint inversion of geophysical data, *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, **42**, 977-991.
- Yang, C. H., and Tong, L. T.,** 1999. A study of joint inversion of direct current resistivity, transient electromagnetic and magnetotelluric sounding data. *TAO*, **10**, 293-301.
- 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.
- Yüzer, E. ve Eyüboğlu, R.,** 1998. Kentsel yerleşim planlamasında genelleştirilmiş bir mühendislik jeolojisi yaklaşımı (Avcılar-İstanbul), Kentleşme ve Jeoloji Sempozyumu, *Uluslararası Mühendislik Jeolojisi Türk Milli Komitesi TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi Avcılar Belediye Başkanlığı, İstanbul*, 233-248.



## **EK A. SIROTEM MK 3 CİHAZININ TEKNİK ÖZELLİKLERİ**

## EK A. SIROTEM MK 3 CİHAZININ TEKNİK ÖZELLİKLERİ

### A. 1 Giriş

SIROTEM MK 3, yeryüzüne serilen halka şeklindeki kablolar aracılığıyla, gönderilen elektromanyetik dalgaları kullanarak yeraltındaki iletken katmanların belirlenmesini sağlayan bir elektromanyetik cihazdır. Alıcı ve verici düzeneğinin tek bir sistem olarak bulunması ve harici vericiler kullanılmasına izin vermesi nedeniyle benzerlerine üstünlük sağlamıştır. Ölçülen veriler, verici halkadan geçen akıma normalize edilerek alet üzerinde bulunan LCD (Liquid Crystal Display) ile sayısal veya grafik olarak sunulabilmelerinin yanında 400 kayıta kadar hafızada saklanabilir ve istenildiği zaman geri çağırılabilir. Ayrıca ölçülen veriler, RS232 arayüzüyle bilgisayara veya yazıcıya gönderilebilir.



Şekil A. 1 SIROTEM MK 3 cihazının alıcı ve verici kontrol ünitesi.

#### A. 1. 1 Alıcı – Verici Halka Düzenekleri

SIROTEM MK 3 herhangi bir alıcı – verici halka düzeneği için sınırlandırılmamıştır. Ancak tek halka ve merkezi halka düzeneklerinin kullanılması durumunda, alıcı halka ile ölçülen gerilim değerlerinin yanısıra bu gerilim değerlerinin karşılık geldiği görünür öz direnç

değerleri de otomatik olarak hesaplanmakta ve hem sayısal hem de grafik olarak sunulabilmektedir.

### A. 1. 2 Verici Ünitenin Teknik Özellikleri

Verici ünitenin teknik özellikleri aşağıda sıralanmıştır.

- Dalga şekli : Çift kutuplu, açık ve kapalı zamanları eş süreli, kare biçimli.
- Tekrarlama oranı : Seçilen pencere sayısına bağlı olarak 25 Hz'den 0,12 Hz'e, 50 Hz korumalı veya 30 Hz'den 0,12 Hz'e 60 Hz korumalı.
- Çıkış akımı : Maksimum akım 10 A ve harici vericiler (external transmitter) kullanılarak artırılabilir. Ancak 1A'den daha az kullanılması tavsiye edilmemektedir.
- Voltaj çıkışı : Maksimum 24 V ve harici vericiler kullanmak suretiyle artırılabilir.

### A. 1. 3 Alıcı Ünitenin Teknik Özellikleri

Alıcı ünitenin teknik özellikleri aşağıda sıralanmıştır.

- Ölçüm bandı : 8 mikrosaniye'den 2 saniye'ye kadar.
- Pencere sayısı : 4 farklı ayar durumunda 53 pencereye kadar seçilebilir. Ayrıca başlangıç ve bitiş pencereleri isteğe bağlı belirlenebilir.
- Bant genişliği : 67 kHz.
- Voltaj hassasiyeti : 1 mikrovolt (kazanç=0,1).
- Sinyal yığılma (stacking) : 1 – 9999.
- Kazanç (gain) : 0,1 – 1 – 10 – 100 kat kadar.
- Cihaz gürültüsü : Maksimum 12 nV.
- Filtre : Pasif 8 kutuplu anti-alias.
- Ön gecikme : 0 – 9999 mikrosaniye.
- VLF sinyal koruma : 50 dB'den daha iyi.
- Temel sinyal koruma : 70 dB'den daha iyi.

#### A. 1. 4 SIROTEM RVR'nin Teknik Özellikleri

Arazi uygulamaları sırasında hem alıcı hem de verici halkaların yeryüzüne serilmesi, toplanması ve diğer ölçüm için tekrar hazırlanmaları oldukça zaman alan ve işgücü gerektiren bir iştir. Ancak bu sorun çok sarımlı alıcı antenler kullanılarak giderilmiştir. Sürekli olarak, karşılıklı dikey konumlu, üç kanalda (X, Y, Z) ölçüm yapabilen SIROTEM RVR (Roving Vector Receiver)'ın teknik özellikleri aşağıda sıralanmıştır.



Şekil A. 2 Çok sarımlı alıcı (SIROTEM RVR).

|                                          | <u>Z – ekseni</u> | <u>X ve Y ekseni</u> |
|------------------------------------------|-------------------|----------------------|
| • Çekirdek malzemesi                     | : Hava            | Hava                 |
| • Sarım sayısı                           | : 960             | 1440                 |
| • Sönümlenmemiş rezonans                 | : 17 kHz          | 24 kHz               |
| • Bant genişliği                         | : 11 kHz          | 16 kHz               |
| • Etkin kapasitans                       | : 165 pF          | 102 pF               |
| • Bobin direnci                          | : 362 Ohms        | 388 Ohms             |
| • Bobin indüktansı                       | : 525 mH          | 421.429 mH           |
| • Sönümlendirme direnci                  | : 28.2 kOhms      | 32.4 kOhms           |
| • Kritik sönümlendirilmiş grup gecikmesi | : 18 mikrosaniye  | 13 mikrosaniye       |

- Kararlılık zamanı : 72 mikrosaniye 52 mikrosaniye
- Çıkış gürültüsü : 79 mikrovolt RMS 103.88 mikrovolt RMS
- Etkin alan : 10.000 m<sup>2</sup> 10.000 m<sup>2</sup>
- O/P Koruması : Kısa devre koruması ve her verici kablo boyu için durağan.
- Sıcaklık : -30 °C'tan +50°C'a kadar.
- Enerji : ± 6-12 volt ve 50 mA.
- Boyut : 540 x 550 x 225 mm.
- Ağırlık : 15 kg.

## A. 2 Pencereleme Ayarları ve Veri Düzeni

SIROTEM MK 3 kontrol ünitesi, 4 farklı örnekleme ayarı ile istenilen hassasiyette ve uzunlukta veri kaydedebilme özelliğine sahiptir. Bu pencereleme ayarları kullanılarak kısa süreli kayıtların da birçok örnek ile temsil edilmesi sağlanabilir. Alet üzerinde mevcut örnekleme ayarları hakkında bilgiler aşağıdaki tabloda verilmektedir.

Tablo A. 1 : SIROTEM MK 3 cihazı kontrol ünitesi tarafından sağlanan 4 farklı zaman serisi.

| Zaman Serisi             | İlk Pencere (ms) | Son Pencere (ms) | Penceresi Sayısı |
|--------------------------|------------------|------------------|------------------|
| Bileşik Seri             | 0.050            | 1843             | 53               |
| Erken Zaman Serisi       | 0.050            | 383.78           | 53               |
| Standart Seri            | 0.487            | 1943.9           | 50               |
| Yüksek Hassasiyet Serisi | 0.008            | 92.045           | 53               |

RS232 arayüzü kullanılarak alet üzerinden bilgisayara alınan veriler SIROTEM MK 3'e özgün bir düzendedirler. İlk köşeli parantezli ifade veri özelliklerini, ikinci köşeli parantezli ifade okunan veri grubunu ve üçüncü köşeli parantezli ifade okuma değerlerinin standart sapma değerlerini göstermektedir.

Bu düzen aşağıdaki örnek veri üzerinde gösterilmiştir.

[0, 29-06-93, 12:26, 1, 0, 1, 22, 1, 7, 1, 1, 1, 0, 0, 128, 0, 0, 3.03, 11, 0, 1, 0, 0]  
[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23]  
[1, 1551 3, 6896 2, 4405 2, 3017 2...]

Yukarıdaki köşeli parantez içinde gösterilen sayıların arasındaki virgüller ile veri grubunun özellikleri birbirinden ayrılmıştır. Aşağıda sırasıyla virgüller ile ayrılan özelliklerin anlamları verilmiştir. İkinci köşeli parantez içinde gösterilen ifade ise okunan gerilim değerlerini göstermektedir. Örneğın, 1551 3 ifadesi  $1551 \times 10^3$  nV/A anlamına gelmektedir.

1) 0 = Veri özellikleri parantezi, 1 = Okunan verileri içeren parantez, 2 = Standart sapma değerlerini içeren parantez (0).

2) Tarih : ay-gün-yıl veya gün-ay-yıl (29-06-93).

3) Zaman : saat:dakika (12:26)

4) Çalışma tipi : 7 farklı çalışma tipi vardır (1).

0 = Noise

1 = Normal

2 = Cal. Low Short

3 = Cal. Low Long

4 = Cal. High Short

5 = Cal. High Long

6 = Ind. Cal. Short

7 = Ind. Cal. Long

5) Operatör numarası (0).

6) Başlangıç penceresi (1).

7) Bitiş penceresi (22).

8) Kazanç (1)

0 = 0.1

1 = 1

2 = 10

$$3 = 100$$

9) Ölçüm düzeneği : 7 farklı ölçüm düzeneği seçilebilir (7).

$$0 = \text{In Loop}$$

$$1 = \text{Single Loop}$$

$$2 = \text{Coincident Loop}$$

$$3 = \text{Displaced Loop}$$

$$4 = \text{Separate Loop}$$

$$5 = \text{Down Hole}$$

$$6 = \text{Fixed transmitter}$$

$$7 = \text{Other}$$

10) Kanal sayısı (1).

$$1 = Z$$

$$3 = X, Y, Z$$

11) Ölçüm numarası (1).

12) Grup numarası (1).

13) Koordinat 1 (0).

14) Koordinat 2 (0).

15) Yığma sayısı (128).

16) Ölçüm katsayısı (0).

17) Sferics sayacı (0).

18) Akım (3.03 A).

19) Kapanma zamanı (11 ns )

20) Örnekleme gecikmesi (0)

21) Zaman penceresi serisi : 4 farklı seri kullanılabilir (1).

$$1 = \text{Bileşik}$$

$$2 = \text{Erken zaman serisi}$$

3 = Standart seri

4 = Yüksek hassasiyet serisi

22) Verici halka alanı ( $0 \text{ m}^2$ ).

23) Alıcı halka alanı ( $0 \text{ m}^2$ ).



## **ÖZGEÇMİŞ**

Erşan Türkoğlu, 1978 yılında Kırklareli'nin Babaeski ilçesinde doğdu. İlkokulu, 1988 yılında Pancarköy İlköğretim Okulunda tamamladı. 1988-1991 yılları arasında Alpullu Lisesi orta okul kısmına devam etti. 1995 yılında Kırklareli Teknik Lisesi Elektrik bölümünden mezun oldu ve aynı yıl İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği bölümünde lisans öğrenimine başladı. 1999 yılında Jeofizik Mühendisi olarak mezun olduktan sonra aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi Jeofizik Mühendisliği bölümünde yüksek lisans öğrenimine başladı ve halen devam etmektedir.