

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GEÇİCİ ELEKTROMANYETİK VE DOĞRU AKIM ÖZDİRENÇ YÖNTEM
VERİLERİNİN OCCAM TERS ÇÖZÜMÜ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Müh. Duygu KIYAN

Anabilim Dalı : Jeofizik Mühendisliği

Programı : Jeofizik Mühendisliği

OCAK 2009

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GEÇİCİ ELEKTROMANYETİK VE DOĞRU AKIM ÖZDİRENÇ YÖNTEM
VERİLERİNİN OCCAM TERS ÇÖZÜMÜ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Duygu KIYAN
(505051403)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 29 Aralık 2008

Tezin Savunulduğu Tarih : 19 Ocak 2009

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Gülçin ÖZÜRLAN (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Argun KOCAOĞLU (İTÜ)
Prof. Dr. Aysan GÜRER (İÜ)**

OCAK 2009

ÖNSÖZ

Çalışmamın gerçekleşmesinde çarpıcı fikirleriyle değerli katkıları bulunan, sakın görünüşümün altında yatan telaşlı Duygu'yu motive eden, tez sürecinde desteğini sürekli yanımda hissettiğim Sevgili Hocam Prof. Dr. Gülçin Özüran'a çok teşekkürler. Bu çalışmanın başlangıç sürecinden şu ana kadar getirdiği öneri ve eleştirileriyle yanımda olan, özellikle yaklaşık 6 ayımı alan TEM düz çözüm algoritmasının geliştirilmesi sırasında algoritmayı anlamamda yardımcı olan, programlama bilgisini benimle paylaşan ve süreci kısaltan Doç. Dr. Argun Kocaoğlu'na çok teşekkür ediyorum. Geçici elektromanyetik yöntemi konusunda tecrübelerini bana aktaran, Çanakkale–Dardanos yerleşkesinde alınan ölçümlerde yardımcı olan, öneri ve eleştirileriyle tezime katkıda bulunan Yrd. Doç. Dr. Emin Uluggerli'ye çok teşekkür ediyorum.

Arazi çalışmalarında yanımda olan çalışma arkadaşım Kemal Mert Önal'a yardımlarından ötürü çok teşekkürler. Bununla kalmayıp son aylardaki telaşlı çalışma ve yazı aşamamda gösterdiği eşsiz yardımları için çok teşekkürler.

Benimle aynı süreci paylaşan sevgili arkadaşım ve aynı zamanda çalışma arkadaşım Karolin Fırtana'ya çok teşekkürler.

Hayatımın önemli parametrelerinden aileme ve dostlarıma geniş gönüllülüklerinden ötürü teşekkürler....

Aralık, 2008

Duygu KIYAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KISALTMALAR.....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
SEMBOL LİSTESİ.....	xii
ÖZET.....	xiv
SUMMARY.....	xvi
1. GİRİŞ	1
2. GEÇİCİ ELEKTROMANYETİK YÖNTEM.....	3
2.1 Elektromanyetik Teori.....	4
2.1.1 Maxwell denklemleri.....	4
2.1.2 Elektromanyetik dalga denklemleri.....	6
2.1.3 Elektromanyetik dalga denklemlerinin çözümü	7
2.2 Yöntemin Fizik Esası	12
2.2.1 Geçici elektromanyetik kuram.....	14
2.2.2 Yokuş zamanı etkisi.....	17
2.2.3 Gaver-Stehfest sayısal ters çözüm tekniği	19
2.3 Görünür Özdirenç	21
2.4 Araştırma Derinliği	23
3. DOĞRU AKIM ÖZDİRENÇ YÖNTEMİ	25
3.1 Yatay Katmanlı Ortam	25
3.2 Schlumberger Dizilimi İçin Görünür Özdirencin Hesaplanması	28
4. TERS ÇÖZÜM.....	31
4.1 Doğrusal Ters Çözüm.....	32
4.2 OCCAM Ters Çözümü.....	34
4.3 Ortak Ters Çözüm	36
5. YAPAY VERİLERİN TERS ÇÖZÜMÜ	37
5.1 A Tipi Yer Modeli.....	38
5.2 Q Tipi Yer Modeli.....	40
5.3 H Tipi Yer Modeli.....	42
5.4 K Tipi Yer Modeli.....	44
6. ÖLÇÜLEN VERİLERİN TERS ÇÖZÜMÜ; TUZLU SU GİRİŞİM PROBLEMİ	47
7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	55
KAYNAKLAR	57
ÖZGEÇMİŞ.....	61

KISALTMALAR

AC	: Alternating Current
DAÖ	: Doğru Akım Özdirenç
MT	: Manyetotellürik
RMS	: Root Mean Square
RVR	: Roving Vector Receiver
TDEM	: Time Domain Electromagnetic Method
TEM	: Transient Electromagnetic Method
UXO	: Unexploded Ordnance
VES	: Vertical Electrical Sounding

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 6.1 : TEM ölçümleri özellikleri.....	48
--	----

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

- Şekil 2.1 :** Elektrik/manyetik alanın **(a)** zamana ve **(b)** uzaklığa bağlı değişimi (Ward ve Hohmann, 1988).....8
- Şekil 2.2 :** Homojen bir yarı ortam için (100 Ωm) 50 m yarıçaplı dairenin merkezinde oluşan manyetik alan (h_z) ve türevinin ($\partial h_z/\partial t$) davranışı. Akımın basamak fonksiyonu biçiminde kesildiği kabulü yapılmıştır (Ward ve Hohmann, 1988).....11
- Şekil 2.3 :** **(a)** Verici halkadaki akım ve birincil manyetik alan, **(b)** birincil elektrik alan, **(c)** yeryüzünde ölçülen ikincil manyetik alan, **(d)** Akımın kesilmesinden hemen sonra ve **(e)** geç zamanlarda uyartım akımlarının yerindeki yayılımı (McNeill, 1990'dan uyarlanmıştır)....12
- Şekil 2.4 :** TEM yöntemi ölçüm düzenekleri. **(a)** Merkezi halka, **(b)** Ayrı ayrı iki halka, **(c)** Tek halka, **(d)** İç içe iki halka. T_x , verici halkayı; R_x , alıcı halkayı; d , alıcı ve verici halka arasındaki uzaklığı ifade etmektedir (Ward ve Hohmann, 1988'den uyarlanmıştır).....13
- Şekil 2.5 :** Gaver-Stehfest sayısal ters Laplace dönüşümü (nokta ile) ile klasik ters Laplace dönüşümünün (çizgi ile) karşılaştırılması.....21
- Şekil 2.6 :** **(a)** Manyetik alan düşey bileşeninin zamana göre türevinin (the impulse response) farklı öz dirence sahip homojen ortamlar için davranışı. Bu eğrilerden hesaplanan görünür öz direnç eğrileri **(b)** Siyah eğri, iki katmanlı bir yer modeli ($\rho_1=100 \Omega\text{m}$, $\rho_2=10 \Omega\text{m}$ ve $h=40 \text{ m}$) için elde edilen görünür öz direnç eğrisini temsil etmektedir....23
- Şekil 5.1 :** **(a)** A tipi yer modeli için üretilen yapay TEM verisi ve bu model için hesaplanan kuramsal eğri (düz mavi çizgi), **(b)** ters çözüm sonucunda elde edilen yer modeli.....38
- Şekil 5.2 :** **(a)** A tipi yer modeli için üretilen yapay DAÖ verisi ve bu model için hesaplanan kuramsal eğri (düz mavi çizgi), **(b)** ters çözüm sonucunda elde edilen yer modeli.....39
- Şekil 5.3 :** **(a)** A tipi yapay TEM ve DAÖ verileri ve bu model için hesaplanan kuramsal eğri (düz mavi çizgi), **(b)** TEM ve DAÖ verileri ortak ters çözümü sonucunda elde edilen yer modeli.....39
- Şekil 5.4 :** **(a)** Q tipi yer modeli için oluşturulan yapay TEM verisi ve bu model için hesaplanan kuramsal eğri (düz mavi çizgi), **(b)** ters çözüm sonucunda elde edilen yer modeli.....40
- Şekil 5.5 :** **(a)** Q tipi yer modeli için üretilen yapay DAÖ verisi ve bu model için hesaplanan kuramsal eğri (düz mavi çizgi), **(b)** ters çözüm sonucunda elde edilen yer modeli.....41
- Şekil 5.6 :** **(a)** Q tipi yapay TEM ve DAÖ verileri ve bu model için hesaplanan kuramsal eğri (düz mavi çizgi), **(b)** TEM ve DAÖ verilerinin ortak ters çözümü sonucunda elde edilen yer modeli.....41
- Şekil 5.7 :** **(a)** H tipi yer modeli için oluşturulan yapay TEM verisi ve bu model için

hesaplanan kuramsal eğri (düz mavi çizgi), (b) ters çözüm sonucunda elde edilen yer modeli.....	42
Şekil 5.8 : (a) H tipi yer modeli için üretilen yapay DAÖ verisi ve bu model için hesaplanan kuramsal eğri (düz mavi çizgi), (b) ters çözüm sonucunda elde edilen yer modeli.....	43
Şekil 5.9 : (a) H tipi yapay TEM ve DAÖ verileri ve bu model için hesaplanan kuramsal eğri (düz mavi çizgi), (b) TEM ve DAÖ verilerinin ortak ters çözümü sonucunda elde edilen yer modeli.....	43
Şekil 5.10 : (a) K tipi yer modeli için oluşturulan yapay TEM verisi ve bu model için hesaplanan kuramsal eğri (düz mavi çizgi), (b) ters çözüm sonucunda elde edilen yer modeli.....	44
Şekil 5.11 : (a) K tipi yer modeli için üretilen yapay DAÖ verisi ve bu model için hesaplanan kuramsal eğri (düz mavi çizgi), (b) ters çözüm sonucunda elde edilen yer modeli.....	45
Şekil 5.12 : (a) K tipi yapay TEM ve DAÖ verileri ve bu model için hesaplanan kuramsal eğri (düz mavi çizgi), (b) TEM ve DAÖ verilerinin ortak ters çözümü sonucunda elde edilen yer modeli.....	45
Şekil 6.1 : Çanakkale ve yakın çevresi jeoloji haritası. (MTA (2002)'den uyarlanmıştır).....	48
Şekil 6.2 : Çanakkale TEM verilerinin etkin öz direnç-etkin derinlik dönüşüm kesiti.....	49
Şekil 6.3 : TEM-7 noktasına ait verilerin (a) ters çözümü ve (c) bulunan yer modeli. (b) Modele ait RMS hata eğrisi. Son yinelemeye ait Lagrange çarpanı ve en küçük rms değeri eğri üzerinde yuvarlak içi boş nokta ile işaretlenmiştir.....	50
Şekil 6.4 : Çanakkale, Dardanos yerleşkesinde TEM ve DAÖ ölçüm noktalarını ve çalışma alanında açılmış 2 adet su kuyusunun yerlerini gösteren lokasyon haritası.....	52
Şekil 6.5 : TEM verilerinin OCCAM ters çözümü ile elde edilen yer modelleri.....	53
Şekil 6.6 : TEM verilerinin OCCAM ters çözümü sonucunun kesit olarak sunumu.....	53

SEMBOL LİSTESİ

A	: Yüzey alanı (m^2)
A	: Alıcı halkanın efektif alanı (m^2)
A_0	: Katmanlı ortama ait çekirdek fonksiyonu
A_{ij}	: Kısmi türevler dizeyi
a	: Verici halkanın yarıçapı (m)
B	: Manyetik akı (Weber/ m^2)
b	: Verici halkanın yarıçapı (m)
ΔV	: Gerilim farkı (V)
Δx	: Model parametrelerine uygulanacak düzeltmeleri içeren dizey
Δy	: Gözlemsel veriler ile kuramsal veriler arasındaki fark
δ_{eff}	: Etkin derinlik (m)
E	: Elektrik alan şiddeti (mV/km)
H	: Manyetik alan şiddeti (γ)
H	: Yalancı ters dizey
h	: kalınlık (m)
I	: Akım (A)
J	: Akım yoğunluğu (A/m^2)
J_0	: Sıfırıncı dereceden Bessel fonksiyonu
J_1	: Birinci dereceden Bessel fonksiyonu
K	: Kuzey
$K(\lambda)$	: Slichter çekirdek fonksiyonu
L	: Laplace transformu
λ	: Keyfi bir sabit
μ	: Manyetik geçirgenlik (Henry/m)
P	: Katman kalınlıkları ve öz dirençleri içeren dizey
p	: Laplace değişkeni
R	: Direnç (Ohm)
r	: Akım kaynağına olan uzaklık (m)
$R(x_j - x_j^o)$	: Yüksek dereceli türevler
ρ	: Öz direnç (Ohm.m)
ρ_a	: Görünür öz direnç (Ohm.m)
$\Theta(\lambda)$	: Stefanescu çekirdek fonksiyonu
σ_n	: Verilerin hata oranı
t	: Gecikme zamanı (s)
τ	: Zaman sabiti
U	: Kısmi diferansiyel denklemin özel çözümlerinden birisi
V	: Alıcı halkada oluşan gerilim farkı (V)
W	: Kısmi diferansiyel denklemin özel çözümlerinden birisi
χ	: Çakışma ölçütü
x_j	: Model parametreleri
y_i	: Gözlemsel veriler

Z : Empedans
 z : Derinlik

GEÇİCİ ELEKTROMANYETİK VE DOĞRU AKIM ÖZDİRENÇ YÖNTEM VERİLERİNİN OCCAM TERS ÇÖZÜMÜ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

ÖZET

Elektrik ve elektromanyetik yöntemler, sığ ve derin jeolojik yapı araştırmaları, hidrojeolojik haritalama, deniz suyu girişiminin haritalanması, yeraltı suyu araştırmaları ve doğal kaynak (mineral, jeotermal, hidrokarbon) araştırmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Geçici elektromanyetik (Transient Electromagnetic Method–TEM) ve doğru akım öz direnç yöntemleri (Direct Current Resistivity Method–DC Resistivity) yer içindeki elektrik iletkenliğinin değişimini araştırmaktadır. Bu çalışma kapsamında, her iki yöntem verilerinin ayrı ayrı ve ortak ters çözümü gerçekleştirilmiştir. OCCAM ters çözüm tekniği kullanılarak MATLAB platformunda bir program geliştirilmiştir. Testlerde doğru akım öz direnç verileri Schlumberger dizilimi için, geçici elektromanyetik verileri Gaver-Stehfest tekniği ile, merkezi halka (central-loop) ve tek halka (single-loop) ölçü düzenekleri kullanılarak üretilmiştir. Düz çözüm programı bilimsel yazında var olan diğer kodlarla karşılaştırılmıştır. Geliştirilen ters çözüm programı A, Q, H ve K tipi yer modelleri için üretilen yapay verilerle test edilmiştir. Yapay verilerle gerçekleştirilen testler, katman sayısı ile ilgili ön-bilgiye (a priori-information) ihtiyaç duymayan algoritma kullanılarak elde edilen OCCAM yer modelleri (smooth-model) yerinin derinlikle birlikte öz direnç değişimini temsil ettiğini göstermiştir.

Geliştirilen yazılımın gerçek verilerle test edilmesi için Çanakkale-Dardanos bölgesinde tuzlu su girişiminin haritalanması amacıyla 16 noktada merkezi halka ve tek halka geçici elektromanyetik ölçümleri ve 7 noktada doğru akım öz direnç ölçümleri yapılmıştır. 8 noktada alınan TEM verisi geliştirilen OCCAM ters çözüm programında değerlendirilmiştir. Geçici elektromanyetik yöntem verilerinin OCCAM ters çözümü, klasik ters çözüm sunumuna göre yumuşak ve sürekli bir görünümle bölgeye dair daha gerçekçi bir sonuç vermektedir.

INTERPRETATION OF TRANSIENT ELECTROMAGNETIC AND DIRECT CURRENT RESISTIVITY DATA USING OCCAM INVERSION

SUMMARY

Electric and electromagnetic methods increasingly are being employed for shallow and deep geologic structures investigations, hydrogeological surveys, saline water intrusion mapping, groundwater investigations and natural resources (mineral, hydrocarbon and geothermal) investigations.

Transient electromagnetic (TEM) and direct current resistivity (DC Resistivity) methods investigate variations in electrical conductivity of the subsurface. In this study, an inversion code has been developed in the MATLAB platform for both transient electromagnetic and DC resistivity data using OCCAM inversion algorithm. To calculate the TEM response of a layered earth for central-loop and coincident-loop configurations, the Gaver-Stehfest algorithm was used in the forward modelling. The forward modelling code was tested and verified with existing codes in the literature. The inversion code was tested with synthetic data. The synthetic data sets were generated for the four types of three layer models: A, Q, H and K. The tests showed that the smooth-model inversion reproduced general trend of the depth and resistivity of the true models without need for a priori assumptions about the number of layers.

Application of the method to the field data were taken in Çanakkale-Dardanos campus for mapping saline water intrusion. To overcome this problem, transient electromagnetic method in the central loop and single loop was used. 16 transient electromagnetic and 7 DC resistivity soundings were collected and 8 TEM soundings data were interpreted by means of OCCAM type 1D inversion. The OCCAM inversion of TEM data gave a smooth and continuous resistivity variation of the area compared with the conventional inversion.

1. GİRİŞ

Elektrik ve elektromanyetik yöntem verileriyle yeriçindeki elektrik öz direnç değişiminin araştırılması amacıyla bir boyutlu nicel değerlendirme aracı olarak ters çözüm algoritmaları yaygın olarak kullanılmaktadır. Dirençli ara katmanların çözümünde başarılı elektrik yöntemlerle iletken katmanlara duyarlı elektromanyetik yöntemlerin birlikte kullanımı sonucu araştırılmak istenen bölgedeki yerelektrik yapı yüksek çözünürlükle ortaya çıkarılmaktadır.

Son yıllarda, elektrik ve elektromanyetik yöntem verilerinin uygulama ve yorumlanmasında istikrarlı olarak gelişmeler kaydedilmektedir. İlerleyen bilgisayar teknolojisi, yaygın olarak kullanılan bir boyutlu modelleme çalışmalarının yanı sıra iki ve üç boyutlu modelleme çalışmaları ile verilerin değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Ancak uzun zaman alan çok boyutlu modelleme çalışmalarının sayısının hızla artmasına rağmen bir boyutlu değerlendirme teknikleri güncelliğini korumaktadır.

Bilimsel yazında, geleneksel olarak geçici elektromanyetik yöntem (Transient Electromagnetic Method, TEM) ve doğru akım öz direnç (Direct Current Resistivity, DAÖ) verilerinin bağımsız ve ortak ters çözümleri için Marquardt ters çözüm tekniği yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Bu klasik ters çözüm tekniğinden farklı olarak, yeriçinin iletkenlik dağılımını yumuşak geçişlerle ve daha gerçekçi bir şekilde yansıtan OCCAM ters çözümü ilk olarak Constable ve diğ. (1987) tarafından manyetotellürik (MT) ve DAÖ yöntemleri için gerçekleştirilmiştir. Literatürde OCCAM ters çözümü kullanılarak yapılan çalışmalara klasik ters çözüm çalışmaları kadar sık rastlanmamaktadır. deGroot-Hedlin ve Constable (1990) tarafından, MT verilerinin iki boyutlu OCCAM ters çözümü gerçekleştirilmiş, Qian ve diğ. (1997) OCCAM tekniği kullanarak, havadan elektromanyetik yöntem verilerini değerlendirmişlerdir. Chen (1999) tarafından tuzlu su girişiminin araştırılması amacıyla ölçülen TEM verileri OCCAM ters çözüm tekniği kullanılarak geliştirilen program ile değerlendirilmiştir. Vedanti ve diğ. (2005), birinci türevlerin sayısal olarak hesaplandığı Constable (1987)'den farklı olarak, birinci ve ikinci türevlerin

analitik olarak hesaplanması ile etkin bir boyutlu OCCAM algoritması geliştirmişlerdir. Değiştirilmiş bu algoritma Schlumberger dizilimi için üretilen yapay verilerle de denenmiştir. OCCAM ters çözümü kullanılarak TEM verilerinin değerlendirildiği güncel çalışmalardan biri, Kuzey Almanya'daki yeraltı suyu rezervuarlarının araştırılması için Tezkan ve diğ. (2007) tarafından gerçekleştirilen çalışmadır.

Bu çalışmanın amacı, geçici elektromanyetik ve doğru akım öz direnç verilerinin değerlendirilmesi amacıyla bir boyutlu OCCAM ters çözüm algoritmasının geliştirilmesidir. Bu kapsamda, MATLAB ortamında her iki yönteme ait verilerin bağımsız ve ortak ters çözümlerini gerçekleştiren bir program geliştirilmiştir. Bu yazılımda, TEM düz çözümü Gaver-Stehfest tekniği kullanılarak (Knight ve Raiche, 1982; Raiche, 1984), DAÖ düz çözümü Slichter çekirdek fonksiyonu hesabının Pekeris yineleme bağıntısı ile gerçekleştirilmiştir. TEM yönteminde merkezi halka ve tek halka düzenekleri için iki ayrı formülasyon (Knight ve Raiche, 1982; Raiche, 1984) kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır.

Bu çalışma kapsamında geliştirilen yazılım ile ilgili bilgilerden önce yöntemlerin fizik esasları ve dayandığı kuramlar ikinci ve üçüncü bölümde verilmektedir. Çalışmanın konusunu oluşturan ters çözüm ile ilgili bilgiler dördüncü bölümde, yapay ve ölçülen verilerle yapılan testler sırasıyla beşinci ve altıncı bölümde yer almaktadır.

Geliştirilen algoritmanın gerçek verilere uygulanması amacıyla, TEM ve DAÖ verilerinin başarılı sonuçlar verdiği ve ülkemiz için ciddi sorunlardan biri olan kıyılardaki tuzlu su girişiminin haritalanması seçilmiştir. Bu amaçla, Çanakkale-Dardanos yerleşkesindeki tuzlu su girişi ile ilgili olarak, SIROTEM Mk 3 cihazıyla 2 profilde, 16 noktada alınan TEM ve 7 noktada alınan DAÖ verileri bu çalışma kapsamında geliştirilen program ile değerlendirilmiştir. Profil 1'de ölçülen TEM verilerinin OCCAM ters çözüm sonuçları altıncı bölümde yer almaktadır.

2. GEÇİCİ ELEKTROMANYETİK YÖNTEM

Elektromanyetik yöntemler, frekans ortamı ve zaman ortamı başlıkları altında iki gruba ayrılmaktadır. Bu bölümde, geçici elektromanyetik yöntem (transient electromagnetic method) veya diğer bir ifadeyle zaman ortamı elektromanyetik yöntem (Time-Domain Electromagnetic Method) konu edilmiştir. Yöntemin fizik esası ve kuramı, tez kapsamında geliştirilen düz çözüm programında kullanılan Gaver-Stehfest algoritması ve TEM yöntemi görünür özdirenç tanımları ile yöntemin ilgilendiği araştırma derinliği konuları bölümün içeriğini oluşturmaktadır.

İlk olarak 1950'lerde Rusya, Amerika ve Kanada'da petrol, doğalgaz ve sıcak su araştırmalarında kullanılan yöntem, kuramsal ve uygulama esaslarının tam olarak ortaya konmasından itibaren (Knight ve Raiche, 1982; Kaufman ve Keller, 1983; Ward ve Hohmann, 1988) çok çeşitli jeofizik problemler üzerine uygulanmaya başlanmıştır. Son yirmi yılda gelişen cihaz teknolojisi ile modelleme çalışmalarında kaydedilen ilerlemeler TEM yönteminin uygulamadaki kullanımını arttırmıştır. Yöntem, maden yataklarının aranması (Buselli ve O'Neill, 1977), jeolojik yapıların araştırılması (Jorgensen ve diğ., 2005), kırık ve süreksizliklerin belirlenmesi (Kalscheuer ve diğ., 2007), çevre jeofiziği araştırmaları (Frischknecht ve Raab, 1984; Fitterman ve diğ., 1990; Hoekstra ve Blohm, 1990), petrol ve doğalgaz aramaları (Spies, 1983) ve patlamamış savaş gereçlerinin (UXO) yerlerinin belirlenmesi (Holladay ve diğ., 2006) gibi geniş bir uygulama alanına sahiptir.

Fitterman ve Stewart (1986)'ın yeraltı suyu araştırmalarında TEM yönteminin kullanılabilirliğine dair teorik çalışmayı ortaya koymalarından günümüze kadar tüm dünya çapında, özellikle tuzlu su girişi (Mills ve diğ., 1988; Kafri ve diğ., 1997; Kafri ve Goldman; 2005; Nielsen ve diğ., 2007; Duque ve diğ., 2008; Kafri ve diğ., 2007; Kafri ve diğ., 2008) başta olmak üzere yeraltı suyu kirliliğinin belirlenmesi ve benzeri çeşitli hidrojeolojik problemlerin çözümü için de TEM yöntemine başvurulmaktadır (Buselli ve diğ., 1990; McNeill, 1990; Christensen, 1995; Meju ve diğ., 1999; Danielsen ve diğ., 2003; Auken ve diğ., 2003; Carrasquilla ve Ulugergerli, 2006; MacNeil ve diğ., 2007; Auken ve diğ., 2008).

2.1 Elektromanyetik Teori

2.1.1 Maxwell denklemleri ve malzeme denklemleri

Bir ortamda yayınan elektromanyetik dalgalar ve oluşan alanlar arasındaki ilişkilerle ilgili tüm esaslar, birinci dereceden doğrusal diferansiyel denklemlerle ifade edilen Maxwell denklemleriyle tanımlanabilmektedir. Maxwell denklemleri birbirinden bağımsız olup, malzeme ilişkileri kullanılarak birbirleriyle ilişkilendirilebilirler.

Maxwell denklemleri ampirik eşitlikler olup, Faraday ve Amper gibi araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmalara dayanmaktadır (Ward ve Hohmann, 1988). Maxwell denklemlerinde yeralan zaman ortamı temel alanları (elektrik alan şiddeti (e), manyetik akı yoğunluğu (b), manyetik alan şiddeti (h), elektrik akım yoğunluğu (j)) küçük harf simgesi ile gösterilirken, frekans ortamında büyük harf ile gösterilmektedir. Elektromanyetik kuramı oluşturan denklemler zaman ortamında,

$$\nabla \times \vec{e} + \frac{\partial \vec{b}}{\partial t} = 0 \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \vec{h} - \frac{\partial \vec{d}}{\partial t} = \vec{j} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{b} = 0 \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{d} = \vec{q} \quad (2.4)$$

şeklinde verilmektedir. Burada,

e: elektrik alan şiddeti (electric field intensity) [V/m],

b: manyetik akı yoğunluğu (magnetic induction) [Wb/m²],

h: manyetik alan şiddeti (magnetic field intensity) [A/m],

j: elektrik akım yoğunluğu (electric current density) [A/m²],

d: dielektrik yerdeğiştirme (dielectric displacement current) [C/m²] ve

q: elektrik yük yoğunluğu (electric charge density) [C/m³]

şeklinde tanımlanmaktadır. Maxwell'in birinci eşitliğine göre (Faraday yasası), zaman içerisinde değişen bir manyetik alan kendine dik doğrultuda bir elektrik alan oluşturmaktadır. Bağlantı (2.2) ile gösterilen Amper yasası, manyetik alanların

elektrik akım yoğunluğuna dik yönde oluştuğunu ve ortamdaki toplam akımın iletim akımları ve yerdeğiştirme akımlarının toplamından oluştuğunu ifade etmektedir. (2.3) ve (2.4) denklemleriyle tanımlanan Gauss yasaları, manyetik akı yoğunluğu ve elektrik yerdeğiştirmeyi tanımlamaktadır. (2.3) ifadesi, manyetik alanın diverjansının sıfır olduğunu yani herhangi bir kapalı yüzeyden çıkan toplam manyetik akı değerinin sıfır olduğunu belirtmektedir. (2.4) ifadesi, yerdeğiştirme akımlarının diverjansının elektrik yük yoğunluğuna eşit olduğunu ve elektrik yüklerden kaynak olarak elektrik alan çizgilerinin çıktığını belirtmektedir. Yukarıda ifade edilen Maxwell denklemleri malzeme denklemleri gözönüne alınarak frekans ortamında çözümlenebilirler:

$$\vec{D} = \epsilon(\omega, \vec{E}, \vec{r}, t, T, P, \dots) \cdot \vec{E} \quad (2.5)$$

$$\vec{B} = \mu(\omega, \vec{H}, \vec{r}, t, T, P, \dots) \cdot \vec{H} \quad (2.6)$$

$$\vec{J} = \sigma(\omega, \vec{E}, \vec{r}, t, T, P, \dots) \cdot \vec{E} \quad (2.7)$$

Burada, ϵ , μ ve σ sırasıyla, ortamın dielektrik permitivitesini, ortamın manyetik geçirgenliğini ve ortamın iletkenliğini açısal frekansın (ω), elektrik alan şiddetinin ($\vec{E}$), uzaklığın ($\vec{r}$), zamanın (t), sıcaklığın (T) ve basıncın (P) fonksiyonu olarak tanımlamaktadırlar (Ward ve Hohmann, 1988).

Tüm ortamlar için, zaman, sıcaklık yada basınçtan bağımsız; tekdüze, tektip (isotropic), doğrusal ve ortamın elektriksel özelliklerin etkisi altında olduğu varsayımı yapılmaktadır. Ayrıca ortamın manyetik geçirgenliğinin boşluğun manyetik geçirgenliğine eşit olduğu varsayımları yapılarak, olayın geliştiği ortamı tanımlayan malzeme denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilmektedir:

$$\vec{d} = \epsilon \vec{e} \quad (2.8)$$

$$\vec{b} = \mu \vec{h} \quad (2.9)$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{e} \quad (2.10)$$

2.1.2 Elektromanyetik dalga denklemleri

İletken bir ortamda ilerleyen elektromanyetik dalganın özellikleri dalga denklemleri ile tanımlanabilmektedir. (2.1) ve (2.2) bağıntılarının her iki tarafının döneğeleri bulunarak ve bununla birlikte malzeme denklemleri (2.8), (2.9) ve (2.10) kullanılarak,

$$\nabla \times \nabla \times \vec{e} + \mu \nabla \times \frac{\partial \vec{h}}{\partial t} = 0 \quad (2.11)$$

$$\nabla \times \nabla \times \vec{h} - \varepsilon \nabla \times \frac{\partial \vec{e}}{\partial t} = \sigma \nabla \times \vec{e} \quad (2.12)$$

ifadeleri elde edilmektedir. $\vec{e}$ ve $\vec{h}$ vektörleri ve bunların birinci ve ikinci türevleri sürekli ise, $\nabla \times$ operatörü $\partial/\partial t$ işleci ile yerdeğştirilebilir. Bu durumda, (2.11) ve (2.12) denklemleri,

$$\nabla \times \nabla \times \vec{e} + \mu \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{h}) = 0 \quad (2.13)$$

$$\nabla \times \nabla \times \vec{h} - \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{e}) = \sigma \nabla \times \vec{e} \quad (2.14)$$

şeklini almaktadır.

$$\nabla \times \nabla \times \vec{a} \equiv \nabla \nabla \cdot \vec{a} - \nabla^2 \vec{a} \quad (2.15)$$

(2.15) özdeşliği kullanılarak ve tektürel alanlar için $\nabla \cdot \vec{e} = 0$ ve $\nabla \cdot \vec{h} = 0$ tanımlamaları gözönünde bulundurularak (2.13) ve (2.14) denklemleri,

$$\nabla^2 \vec{e} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{e}}{\partial t^2} - \mu \sigma \frac{\partial \vec{e}}{\partial t} = 0 \quad (2.16)$$

$$\nabla^2 \vec{h} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{h}}{\partial t^2} - \mu \sigma \frac{\partial \vec{h}}{\partial t} = 0 \quad (2.17)$$

şeklinde yazılabilir. (2.16) ve (2.17) denklemleri zaman ortamı için elektromanyetik dalga denklemlerini tanımlamaktadır. Tümüyle tanımlı dalga denklemleri için birçok sayıda varsayımlar yapılabilmektedir. Bu varsayımlar yarı-duraylı yaklaşımlar olup frekans ortamı dalga denklemleri olarak düşünölebilirler. Zamana bağılı dalga denklemlerinin Fourier dönüşümü alınarak,

$$\nabla^2 \vec{E} + (\mu\epsilon\omega^2 - i\omega\mu\sigma)\vec{E} = 0 \quad (2.18)$$

$$\nabla^2 \vec{H} + (\mu\epsilon\omega^2 - i\omega\mu\sigma)\vec{H} = 0 \quad (2.19)$$

Helmholtz denklemleri olarak isimlendirilen bağıntılar elde edilmektedir. Parantez içinde yeralan ifadeler yerdeğiştirme akımları ile iletim akımları arasındaki farkı tanımlamaktadır. Düşük frekanslar için (<100 kHz) dielektrik katsayısının etkisi ihmal edilecek kadar az olduğundan, (2.18) ve (2.19) denklemleri, yarı-duraylı yaklaşım olarak isimlendirilen kabul ile,

$$\nabla^2 \vec{E} - i\omega\mu\sigma\vec{E} = 0 \quad (2.20)$$

$$\nabla^2 \vec{H} - i\omega\mu\sigma\vec{H} = 0 \quad (2.21)$$

haline dönüşmektedir. (2.20) ve (2.21) bağıntılarının ters Fourier dönüşümü alınıp zaman ortamına geçilirse;

$$\nabla^2 \bar{e} - \mu\sigma \frac{\partial \bar{e}}{\partial t} = 0 \quad (2.22)$$

$$\nabla^2 \bar{h} - \mu\sigma \frac{\partial \bar{h}}{\partial t} = 0 \quad (2.23)$$

difüzyon denklemlerine dönüşmektedirler.

2.1.3 Elektromanyetik dalga denklemlerinin çözümü

Dalga denklemleri ikinci dereceden doğrusal diferansiyel denklemlerdir. Ward ve Hohmann (1988) iki bölümden oluşan bir çözüm önermişlerdir. İlk olarak, düzlem dalgaları için ω açısal frekansında, zaman bağımlı sinüzoidal bir dalga ($e^{i\omega t}$) tanımlamaktadırlar:

$$\bar{e} = \bar{e}_0^+ e^{-i(kz-\sigma t)} + \bar{e}_0^- e^{i(kz+\sigma t)} \quad (2.24)$$

$$\bar{h} = \bar{h}_0^+ e^{-i(kz-\sigma t)} + \bar{h}_0^- e^{i(kz+\sigma t)} \quad (2.25)$$

Burada, $k = \alpha - i\beta$ şeklinde verilmektedir. Yarı-duraylı yaklaşımda, iletim akımları yerdeğiştirme akımlarından daha baskın olduğundan α ve β benzer büyüklükler olup, $\alpha = \beta = (\omega\mu\sigma/2)^{1/2}$ şeklinde tanımlanmaktadır.

(2.24) bağıntısında yer alan $\bar{e}_0^+$ ve $\bar{e}_0^-$ terimleri, t=0 zamanında pozitif ve negatif z eksenini boyunca yayınan elektrik alanının genliğini göstermektedir. Dalganın pozitif z eksenini boyunca yayınıyor olduğu düşünülürse;

$$\bar{e} = \bar{e}_0^+ e^{-i\alpha z} e^{-\beta z} e^{i\omega t} \quad (2.26)$$

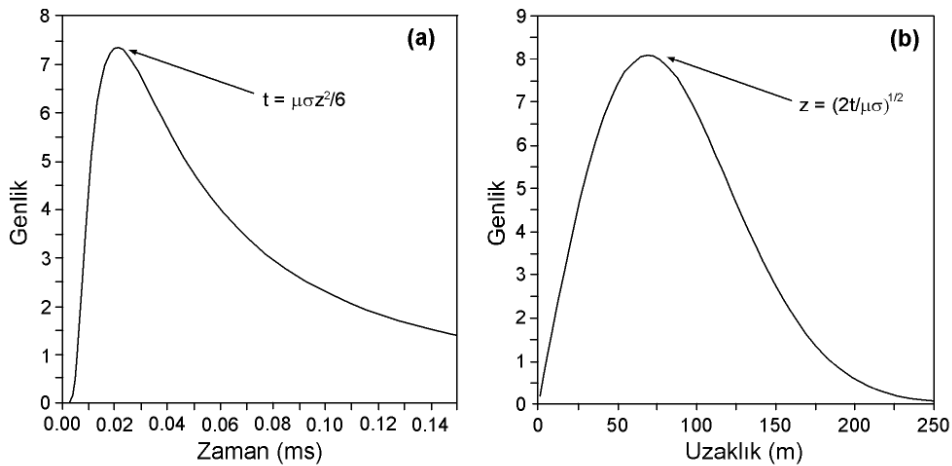
$$\bar{h} = \bar{h}_0^+ e^{-i\alpha z} e^{-\beta z} e^{i\omega t} \quad (2.27)$$

denklemleri elde edilmektedir. $e^{-\beta z}$ ifadesi elektromanyetik dalganın sönümünü temsil etmekte ve dalga yayılım mesafesiyle üstel olarak azalmaktadır. Elektromanyetik dalganın genliğinin yüzeydeki değerinin 1/e'sine düştüğü derinlik,

$$\delta = \left[\frac{2}{\omega \mu \sigma} \right]^{1/2} = 503.2 \left[\frac{1}{f \sigma} \right]^{1/2} \quad (2.28)$$

nüfuz derinliği (skin depth) olarak tanımlanmaktadır. Bu ifadeden, elektromanyetik dalganın sönümünün frekansa ve ortamın iletkenliğine bağlı olduğu görülmektedir. İkinci çözüm, (2.24) ve (2.25) denklemlerinin pozitif kısımlarının Fourier dönüşümü alınarak türetilmektedir. Yeryüzünde (z=0) elektrik ve manyetik alanların zamana göre türevlerinin davranışını tanımlayan ifade izleyen şekildedir:

$$\begin{pmatrix} \bar{e} \\ \bar{h} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{e}_0^+ \\ \bar{h}_0^+ \end{pmatrix} \frac{(\mu \sigma)^{1/2}}{2\pi^{1/2} t^{5/3}} e^{-\mu \sigma z^2 / 4t} \quad (2.29)$$



Şekil 2.1 : Elektrik/manyetik alanın (a) zamana ve (b) uzaklığa bağlı değişimi (Ward ve Hohmann, 1988).

Şekil 2.1a ve Şekil 2.1b’de elektrik/manyetik alanın zamana ve uzaklığa bağlı olan değişimi sunulmaktadır. Şekil 2.1a’da görüldüğü üzere, manyetik alanın maksimum genliğe ulaştığı zaman değeri, (2.29) denkleminin zamana göre türevi sıfıra eşitlenerek, aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir:

$$t_{\max} = \frac{\mu\sigma z^2}{6} \quad (2.30)$$

Şekil 2.1b’de manyetik alanın maksimum değerine ulaştığı derinlik (girim derinliği, penetration depth) değeri, (2.29) denkleminin uzaklığa göre türevi sıfıra eşitlenerek,

$$z_{\max} = \left(\frac{2t}{\mu\sigma} \right)^{1/2} \quad (2.31)$$

şeklinde elde edilmektedir. Burada, σ homojen ortamın öz direncini, t , saniye cinsinden zamanı ve μ ise ortamın manyetik geçirgenliğini temsil etmektedir. Bu hesaplamalarda (Şekil 2.1a) ortamın öz direnci $100 \Omega\text{m}$, (Şekil 2.1b) zaman değeri 0.03 ms alınmıştır. (2.31) bağıntısının zamana göre türevi alınırsa akım yoğunluğunun en yüksek olduğu noktada elektromanyetik dalganın yeriçine doğru hareket hızını gösteren ifade,

$$V = \frac{dz_{\max}}{dt} = \frac{1}{(2\mu\sigma t)^{1/2}} \quad (2.32)$$

elde edilmektedir. Bağıntı (2.31)’de görüldüğü üzere girim derinliği $t^{1/2}$ ile orantılıdır. Nüfuz derinliğinin frekans ortamındaki ifadesi olan (2.28) bağıntısı (2.31) ile eşdeğer olup $1/\omega^{1/2}$ ile orantılıdır.

TEM yönteminde, değişken akım için çeşitli kaynak türleri kullanılabilir. Uygulamada kolaylık açısından kare şeklinde vericiler kullanılırken, kuramsal çalışmalarda daire şeklindeki verici ilmekler tercih edilmektedir. Tekdüze bir ortamda, dairesel biçimdeki halkanın merkezinde yapılan ölçümler için manyetik alan şiddetinin düşey bileşeni (step response),

$$h_z = \frac{I}{2a} \left[\frac{3}{\sqrt{\pi\theta a}} e^{-\theta^2 a^2} + \left(1 - \frac{3}{2\theta^2 a^2} \right) \text{erf}(\theta a) \right] \quad (2.33)$$

denklemleri ile ifade edilmektedir (Ward ve Hohmann, 1988). Burada, erf hata

fonksiyonu olup, $erf(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-x^2} dx$ ve $\theta = \sqrt{\frac{\mu_0 \sigma}{4t}}$ şeklinde verilmektedir.

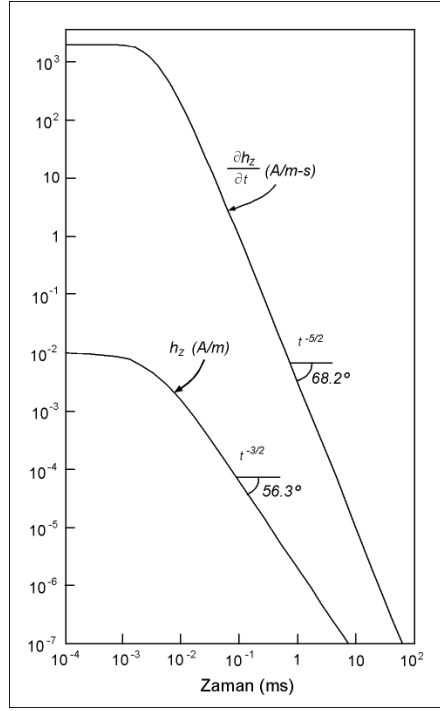
Denklem (2.33)'ün zamana göre türevi, (impulse response), dairesel halkanın merkezinde oluşan manyetik alan şiddetinin düşey bileşeninin zaman içindeki sönümü Ward ve Hohmann (1988) tarafından izleyen biçimde verilmektedir:

$$\frac{\partial h_z}{\partial t} = -\frac{I}{\mu_0 \sigma a^3} \left[3 erf(\theta a) - \frac{2}{\pi^{1/2}} \theta a (3 + 2\theta^2 a^2) e^{-\theta^2 a^2} \right] \quad (2.34)$$

(2.33) ve (2.34) bağıntılarıyla tanımlanan, manyetik alan şiddetinin düşey bileşeninin ve türevinin davranışı Şekil 2.2'de görülmektedir. Manyetik alan şiddeti geç zamanlarda $t^{-3/2}$ ile orantılı olarak sönümlenirken, manyetik alanın türevi, $t^{-5/2}$ ile azalış göstermektedir. Bağıntı (2.33) ve (2.34)'de verilen θ değeri geç zamanlar için çok küçük değerler almaktadır. Bu durumda her iki denklem için izleyen yaklaşımlar kullanılabilmektedir:

$$h_z \approx \frac{I \sigma^{3/2} \mu_0^{3/2} a^2}{30 \pi^{1/2}} t^{-3/2} \quad (2.35)$$

$$\frac{\partial h_z}{\partial t} \approx \frac{I \sigma^{3/2} \mu_0^{3/2} a^2}{20 \pi^{1/2}} t^{-5/2} \quad (2.36)$$



Şekil 2.2 : Homojen bir yarı ortam için ($100 \Omega m$) 50 m yarıçaplı dairenin merkezinde oluşan manyetik alan (h_z) ve türevinin ($\partial h_z / \partial t$) davranışı. Akımın basamak fonksiyonu biçiminde kesildiği kabulü yapılmıştır (Ward ve Hohmann, 1988).

TEM yönteminde, uygun bir alıcı bobin ile azalan eğri niteliğinde manyetik alanın düşey bileşenin zamana göre türevi ölçülmektedir. Bu nedenle, manyetik alan şiddeti ve manyetik akı yoğunluğu arasındaki yapısal ilişkiden yola çıkarak ($\vec{b} = \mu_0 \vec{h}$),

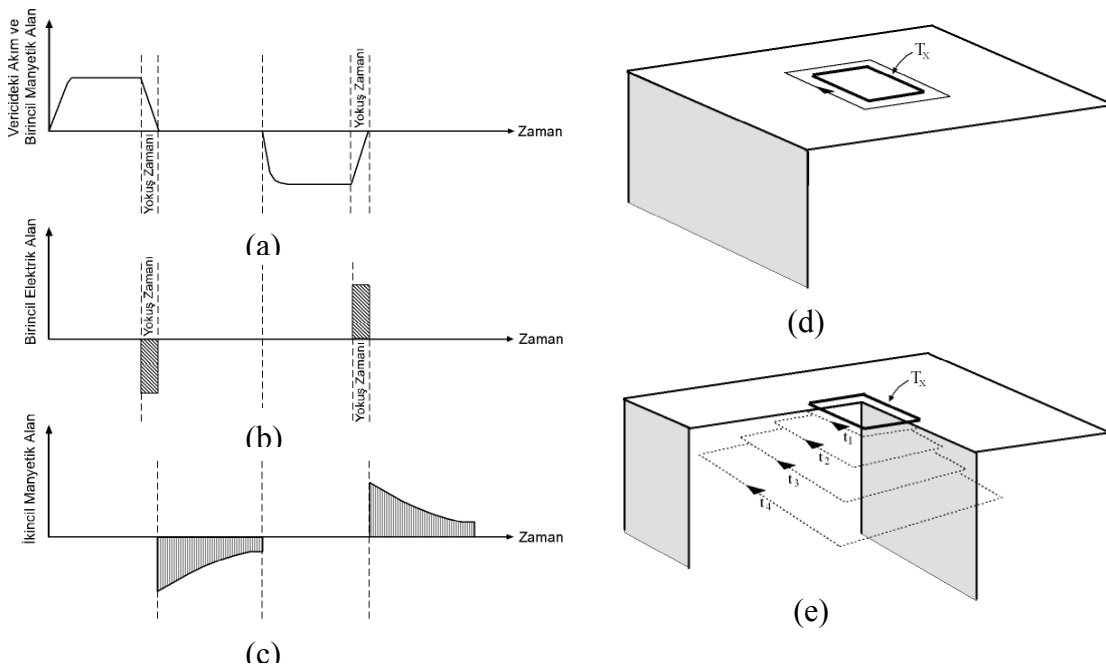
$$b_z \approx \frac{I \sigma^{3/2} \mu_0^{5/2} a^2}{30 \pi^{1/2}} t^{-3/2} \quad (2.37)$$

$$\frac{\partial b_z}{\partial t} \approx \frac{I \sigma^{3/2} \mu_0^{5/2} a^2}{20 \pi^{1/2}} t^{-5/2} \quad (2.38)$$

denklemleri elde edilebilmektedir.

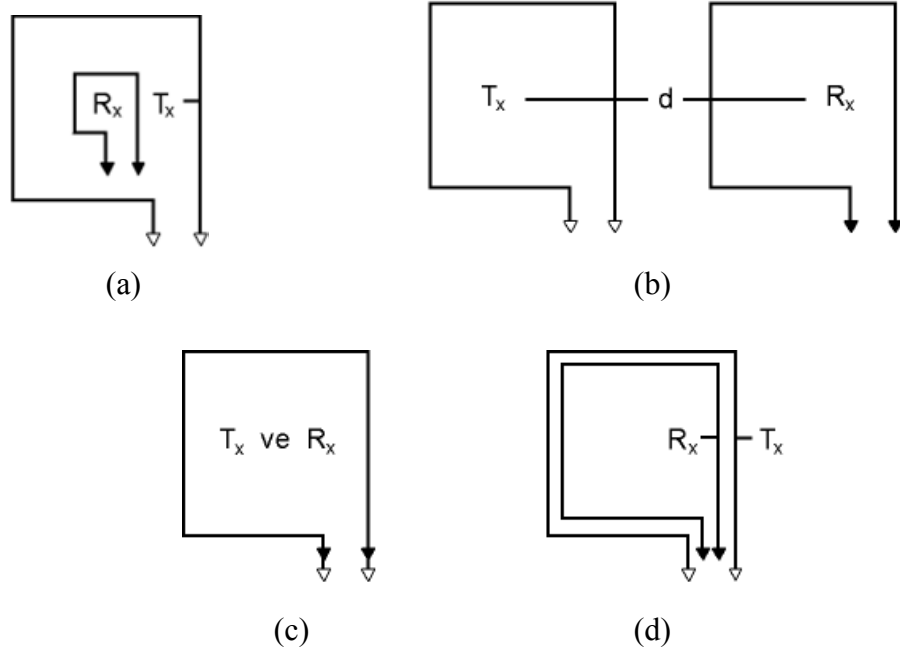
2.2 Yöntemin Fizik Esası

TEM yöntemi, verici ilmeğe (halkaya) uygulanan akımın belirli bir zaman sonra kesilmesi ile oluşan birincil manyetik alanın (Şekil 2.3a), yerinde oluşturduğu elektromanyetik alanların ölçülmesi esasına dayanmaktadır. Akımın kesilmesi ile verici ilmek üzerindeki akım değerinin sıfır değerine ulaşması arasında geçen süre olan yokuş zamanı (ramp time) önemli bir parametredir. Verici ilmeğe uygulanan akım Şekil 2.3a'da görüldüğü üzere belirli bir zamana kadar sabittir. Vericiye uygulanan akımın kesilmesiyle, yokuş zamanı sonunda ilmekteki akım değeri sıfır değerine ulaşır. Yokuş zamanı boyunca gerçekleşen akımdaki bu ani değişim, birincil manyetik alanın ani değişimine yol açarak ortamda, içinde bulundukları ortamın geometrik ve fiziksel özelliklerine bağlı olarak aşağı ve yanlara doğru genişleyen uyartım akımlarının (Eddy currents) akmasına neden olur (Şekil 2.3e). Yerin sonlu iletkenliğe sahip olması nedeniyle zaman içinde sönümlenmeye başlayan uyartım akımları ortamda ikincil bir manyetik alan oluşturmaktadır. Yokuş zamanı sonunda oluşan ve sadece yerin elektrik iletkenliğine bağlı olan bu ikincil manyetik alan (Şekil 2.3c) yeryüzünde uygun alıcılarla zamanın fonksiyonu olarak ölçülebilmektedir (McNeill, 1990).



Şekil 2.3 : (a) Verici ilmekteki (halkadaki) akım ve birincil manyetik alan, (b) Birincil elektrik alan, (c) Yeryüzünde ölçülen ikincil manyetik alan, (d) Akımın kesilmesinden hemen sonra ve (e) Geç zamanlarda uyartım akımlarının yerindeki yayılımı (McNeill, 1990'dan uyarlanmıştır).

Uygulamada TEM yöntemi ölçüm sistem, bir verici ve alıcı üniteden oluşmaktadır. Alıcı ve verici ilmeklerin konumları ve boyutları araştırmanın amacına bağlı olarak seçilmektedir. Uygulamada en çok kullanılan üç farklı alıcı-verici düzeneği Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4 : TEM yöntemi ölçüm düzenekleri. **(a)** Merkezi ilmek, **(b)** Ayrı ayrı iki ilmek, **(c)** Tek ilmek, **(d)** İç içe iki ilmek. T_x , verici ilmeği; R_x , alıcı ilmeği; d , alıcı ve verici ilmek arasındaki uzaklığı ifade etmektedir (Ward ve Hohmann, 1988'den uyarlanmıştır).

Bunlardan birincisi, merkezi ilmek (central loop veya in-loop) ölçüm düzenegidir (Şekil 2.4a). Alıcı, verici ilmeğin merkezine yerleştirilmektedir. Alıcı olarak çok sarımlı (300-2500 devir) küçük alıcılar (50 cm çapında) kullanılmaktadır. Bu ölçüm düzenegi kullanılarak, iletkenin yerleşimi en iyi şekilde belirlenebilirken, hem yanal hem düşey yönde yüksek çözünürlüklü veriler elde edilebilmektedir. Alıcının taşınabilir olması ölçüm hızını arttırırken, yerel değişimlerden etkilenen bir ölçü düzenegidir.

İkinci ölçüm düzenegi, iki ayrı ilmeğin birlikte kullanıldığı düzenektir. Verici ilmek ile alıcı arasında belirli bir mesafe bırakılarak ölçüm yapılmaktadır (Şekil 2.4d). En çok kullanılan üçüncü ölçüm düzenegi, tek ilmek (single-loop) düzenegidir. Bu düzenekte verici ilmek aynı zamanda alıcı ilmek olarak kullanılmaktadır (Şekil 2.4a). Uygulamada genellikle, 50×50 , 100×100 ve 200×200 m² kare şekilli vericiler

kullanılmaktadır. $50 \times 50 \text{ m}^2$ 'den küçük ilmeklerin kullanılması durumunda birden fazla sarım yapılması gerekmektedir. Verici ve alıcı halka aynı yerde olduğu durumda alıcı ilmek en yüksek sinyal değerleri gözlenmesi ölçüm düzeneğinin üstünlüğü olarak gösterilebilirken, yeryüzünde birden fazla iletken tabaka olması durumunda oldukça karmaşık bir anomali elde edilebiliyor olması durumu bir zayıflık olarak karşımıza çıkmaktadır.

2.2.1 Geçici elektromanyetik kuram

Katmanlı bir ortamda, yarıçapı a olan verici halka (Tx) ile eş merkezli b yarıçaplı alıcı halka (Rx) üzerinde oluşan elektrik alan ifadesi,

$$E(\omega) = \frac{1}{2} i \omega \mu a I \int_0^{\infty} \left\{ A_0(P, \omega, \lambda) e^{s_0(z+z^1)} + B_0(P, \omega, \lambda) e^{-s_0(z-z^1)} \right\} J_1(\lambda a) J_1(\lambda r) d\lambda \quad (2.39)$$

şeklinde verilmektedir (Knight ve Raiche, 1982). Alıcı halkanın j 'inci katmanda gömülü olduğu varsayıldığı durumda (2.39) denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$E(\omega) = \frac{1}{2} i \omega \mu a I \int_0^{\infty} \left\{ A_j(P, \omega, \lambda) e^{s_j(z)} + B_j(P, \omega, \lambda) e^{-s_j(z)} \right\} J_1(\lambda a) J_1(\lambda r) d\lambda \quad (2.40)$$

Burada (2.40) bağıntısında tanımlanan değişkenlere ek olarak,

$$s_0 = \lambda \text{ ve } s_j = (\lambda^2 - i \omega \mu \sigma_j)^{1/2}$$

tanımlanmaktadır. Ayrıca I , vericideki akım; r , alıcı ve verici merkezleri arasındaki uzaklık; σ_j , j 'inci katmanın iletkenliği olup, $A_0(P, \omega, \lambda)$ ve $B_0(P, \omega, \lambda)$ katmanlı ortama ait sınır koşulları kullanılarak çözülecek olan çekirdek bağıntılardır. Alıcı halkadaki gerilim değerini bulmak amacıyla, alıcı halka etrafında oluşan alanın azimutal bileşeninin integrali alındığında, eş merkezli alıcı-verici ölçüm düzeneği için $2\pi b$ faktörü elde edilmekte ve aşağıdaki bağıntı ile

$$V = 2\pi b \cdot E(\omega) \quad (2.41)$$

ifade edilmektedir. Bu durumda, empedans ifadesi ($Z = V/I$),

$$Z(p) = \pi\mu ab \int_0^{\infty} A_0(P, p, \lambda) J_1(\lambda a) J_1(\lambda b) d\lambda \quad (2.42)$$

bağıntısı ile verilmektedir. Zaman ortamında çözümü bulmak için (2.42) denkleminin ters Laplace dönüşümü uygulanır ve empedans ifadesi $t > 0$ için,

$$Z(t) = \pi\mu ab \int_0^{\infty} L^{-1} \{A_0(P, p, \lambda)\} J_1(\lambda a) J_1(\lambda b) d\lambda \quad (2.43)$$

biçiminde verilmektedir. Bağıntı (2.43)'te verilen p , $-i\omega$ 'ye karşılık gelen Laplace dönüşüm değişkenidir. Katmanlı ortama ait çekirdek fonksiyonu, A_0 , aşağıdaki sınır koşulları yardımı ile yinelemeli olarak çözülebilir:

- 1) Elektrik ve manyetik alanlarının tanjansiyal bileşenleri her katman sınırında ($z = d_j$) süreklidir:

$$E_j = E_{j+1} \quad \text{ve} \quad \frac{\partial E_j}{\partial z} = \frac{\partial E_{j+1}}{\partial z}$$

(2.40) denkleminin uyguladığımızda,

$$A_j e^{s_j d_j} + B_j e^{-s_j d_j} = A_{j+1} e^{s_{j+1} d_j} + B_{j+1} e^{-s_{j+1} d_j} \quad \text{ve}$$

$$s_j (A_j e^{s_j d_j} - B_j e^{-s_j d_j}) = s_{j+1} (A_{j+1} e^{s_{j+1} d_j} - B_{j+1} e^{-s_{j+1} d_j})$$

şekline dönüşmektedir.

- 2) Derinliğin sonsuza gitmesi durumunda ($z \rightarrow \infty$) elektrik ve manyetik alan değeri sıfır olmaktadır ($A_{N+1} = 0$ ve $B_0 = 0$). A_0 çekirdek fonksiyonunun hesaplanabilmesi için elektrik alan, E_j , değerleri aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$E_j = e^{-2s_j h_j} \quad \text{ve} \quad F_j = \frac{E_j (R_j + F_{j+1})}{1 + R_j F_{j+1}}$$

Burada h_j , katman kalınlıklarını temsil ederken; R_j , j'inci katmandaki yansıma

katsayısı olup, $R_j = \frac{s_j - s_{j+1}}{s_j + s_{j+1}}$ bağıntısı ile tanımlanmaktadır.

- 3) Yüzeye yaklaştıkça elektrik ve manyetik alan en yüksek değerlerini almaktadır. Sınır koşulları uygulandığında, N katmanlı ortam için,

$$F_{N+1} = 0 \text{ ve } F_N = R_N F_N$$

yazılabilir. A_0 çekirdek fonksiyonu değeri,

$$A_0 = \frac{R_0 + F_1}{1 + R_0 F_1} \quad (2.44)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır.

Bağıntı (2.43)'te, değişken dönüşümleri yapılarak yinelemeli bir şekilde hesaplanabilmektedir. Dönüşüm değişkeni p yerine q değişkeni kullanılmaktadır. Burada $q = \mu\sigma_1\rho/\lambda^2$ olarak tanımlanmaktadır. Hesaplamaların daha hızlı bir biçimde yürütülmesi için izleyen tanımlamalar yapıldığında,

$$\xi = \lambda a, \quad K_j = \sigma_j / \sigma_1, \quad \gamma_j = s_j / \lambda, \quad H_j = h_j / a, \quad \tau = t / \sigma_1 \mu a^2$$

R_j ve E_j tanımlamaları,

$$R_j = \frac{\gamma_j - \gamma_{j+1}}{\gamma_j + \gamma_{j+1}} \quad (2.45)$$

$$E_j = e^{-2\xi\gamma_j} H_j \quad (2.46)$$

şekline dönüşmektedir. Gerekli değişken dönüşümleri yapıldıktan sonra zaman ortamı empedans ifadesi (2.43),

$$Z(t) = \frac{\pi b}{\sigma_1 a^2} \int_0^\infty G(\xi^2 \tau, \xi H_j K_j) J_1(\xi) J_1(\xi b / a) \xi^2 d\xi \quad (2.47)$$

şeklinde yeniden yazılabilmektedir. Burada, G , A_0 'ın q 'ya göre ters Laplace dönüşümünü göstermektedir. Uygulamada, iç içe iki halka ve merkezi halka ölçüm düzenekleri için empedans ifadesi sırasıyla (2.48) ve (2.49) denklemleriyle verilmektedir. İç içe iki halka ölçüm düzeneğinde alıcı ve verici halkaların aynı büyüklükte olmasından dolayı ($a = b$) (2.47) denklemi,

$$Z(t) = \frac{\pi b}{\sigma_1 a} \int_0^\infty G(\xi^2 \tau, \xi H_j, K_j) [J_1(\xi)]^2 \xi^2 d\xi \quad (2.48)$$

eşitliği ile gösterilmektedir. Merkezi halka ölçüm düzeneği için, $J_1(\xi b/a) \sim \frac{1}{2} \xi b/a$,

$$Z(t) = \frac{A_R}{2\sigma_1 a^3} \int_0^\infty G(\xi^2 \tau, \xi H_j, K_j) J_1(\xi) \xi^3 d\xi \quad (2.49)$$

yaklaşımı kullanılarak, empedans bağıntısı ifade edilmektedir. Buradaki A_R alıcı halkanın etkin alanını göstermektedir.

2.2.2 Yokuş zamanı etkisi

Bir önceki bölümde, kaynak olarak akımın basamak fonksiyonu olması durumu incelenmiştir. Teorik çalışmalarda akımın basamak fonksiyonu olarak kesilmesi kabulü yapılırken, uygulamada yokuş zamanı etkisi (ramp time effect) hesaplamalara katılmaktadır. Eşitlik (2.43) ile verilen empedans bağıntısı genelleştirilirse;

$$Z(t) = -\pi \mu a b \int_0^\infty L_p^{-1} \{I(p) p A_0(P, p, \lambda)\} J_1(\lambda a) J_1(\lambda b) d\lambda \quad (2.50)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir (Raiche, 1984). Burada $I(p)$, normalize edilmiş ve Laplace dönüşümü alınmış kaynak fonksiyonudur. Yerin basamak fonksiyonuna verdiği tepkiyi incelerken, $I(p) = -p^{-1}$ olmaktadır.

(2.50) denklemini, her iki ölçüm düzeneği için $Q(\xi, K)$ gibi bir geometrik faktör tanımla daha genel bir şekilde aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

1) Tek halka ölçü düzeneği için,

$$Q(\xi, K) = J_1^2(\xi) \quad (2.51)$$

2) Alıcı olarak düşey dipol (vertical dipole receiver) kullanılması durumunda,

$$Q(\xi, K) = \frac{A_R}{2A_T} \xi J_1(\xi) J_0(K, \xi) \quad (2.52)$$

Burada A_R , alıcı halkanın etkin alanını; A_T , verici halkanın etkin alanını; r , alıcı ve verici merkezleri arasındaki uzaklık olmak üzere, $K = r/a$ şeklinde ifade edilmektedir. Merkezi halka ölçüm düzeneği için, $r = 0$ olacağından, $J_0(K, \xi) = 0$ olmaktadır. Bu durumda, (2.52) denklemi aşağıdaki gibi yeniden ifade edilebilmektedir:

$$Q(\xi, K) = \frac{A_R}{2A_T} \xi J_1(\xi) \quad (2.53)$$

Böylece, (2.50) bağıntısı ile verilen empedans ifadesi izleyen biçimde yazılabilmektedir:

$$Z(p) = -\pi\mu a b \int_0^{\infty} L_p^{-1} [I(p) p A_0] Q(\xi, K) d\xi \quad (2.54)$$

Akımın yokuş fonksiyonu olarak kesilmesi durumu izleyen ifade ile verilmektedir,

$$I(t) = \begin{cases} 1 & t < t_1 \\ \frac{t_2 - t_1}{t_2 - t_1} & t_1 < t < t_2 \\ 0 & t > t_2 \end{cases} \quad (2.55)$$

Bu durumda, (2.55) eşitliğinin Laplace dönüşümü,

$$L_p [I(t)] = \frac{1}{p} \left[1 - \frac{e^{-pt_1}}{\delta p} + \frac{e^{-pt_2}}{\delta p} \right] \quad (2.56)$$

şeklinde verilmektedir. Burada, $\delta = t_2 - t_1$ değerine sahip olup, (2.54) denklemi,

$$Z(t) = -\pi\mu a \int_0^{\infty} [G_0(t) + G_1(t) + G_2(t)] Q(K, \xi) d\xi \quad (2.57)$$

şeklinde yazılabilmektedir, burada;

$$\begin{aligned} G_0 &= L_p^{-1} (A_0) \\ G_1 &= L_p^{-1} [p^{-1} A_0 e^{-pt_1}] \\ G_2 &= L_p^{-1} [p^{-1} A_0 e^{-pt_2}] \end{aligned}$$

olarak tanımlanmaktadır. G_0 , $t > t_1$ durumunda ihmal edilebilir olduğundan, (2.57) denklemi yukarıdaki eşitlikler kullanılarak aşağıdaki gibi yeniden yazılabilmektedir:

$$Z(t) = \pi\mu a \int_0^{\infty} L_p^{-1} [A_0 (1 - e^{-\delta p} / \delta p)] Q(K, \xi) d\xi \quad (2.58)$$

Bu denklemde, yeralan ters Laplace dönüşümü Gaver-Stehfest tekniği kullanılarak hesaplanmaktadır. Ancak sayısal hesaplamalarda ortaya çıkan zorlukların giderilmesi için (2.59) denklemi ile tanımlanan ifade (2.58) denkleminde yerine koyulduğunda (2.60) denklemi elde edilmektedir:

$$F(t, \xi) = -L_p^{-1} \left| \frac{A_0}{p} \right| \quad (2.59)$$

$$Z(t) = \frac{\pi\mu\alpha}{\delta} \int_0^{\infty} [F(t - \delta, \xi) - F(t, \xi)] Q(K, \xi) d\xi \quad (2.60)$$

Bir önceki bölümde anlatıldığı üzere (p, t) dönüşüm çifti $(q, \xi^2 \tau)$ dönüşüm çifti ile yer değiştirilerek, ters Laplace dönüşümü q 'ya göre alınmaktadır. Aşağıdaki eşitlik ifadesi kullanılarak,

$$L_q^{-1}[f(p)] = \frac{\xi^2}{\sigma\mu\alpha^2} F(\xi^2 \tau) \quad \text{ve} \quad F(\xi^2 \tau) = -L_p^{-1} \left| \frac{A_0(p)}{p} \right| = -L_q^{-1} \left| \frac{A_0(q)}{q} \right|$$

bağıntıları elde edilmektedir. Burada, L_q^{-1} q 'ya göre ters Laplace operatörünü göstermektedir. $\alpha = \delta/t$ tanımı kullanılarak,

$$\tau' = (t - \delta)/\sigma\mu\alpha^2 = (1 - \alpha)\tau \quad \text{ve} \quad G(\xi^2 \tau, \alpha, P) = F(\xi^2 \tau') - F(\xi^2 \tau)$$

ifadeleri elde edilebilmektedir. Böylece, iç içe iki halka ve merkezi halka ölçü düzenekleri için alıcı halkada oluşacak empedans ifadesi sırasıyla izleyen biçimde verilmektedir:

$$Z(t) = \frac{\pi\mu\alpha}{\delta} \int_0^{\infty} G(\xi^2 \tau, \alpha, P) J_1^2(\xi) d\xi \quad (2.61)$$

$$Z(t) = \frac{\pi\mu\alpha}{2\delta} \frac{A_R}{A_T} \int_0^{\infty} G(\xi^2 \tau, \alpha, P) J_1(\xi) \xi d\xi \quad (2.62)$$

2.2.3 Gaver-Stehfest sayısal ters çözüm tekniği

Bu çalışma kapsamında, çekirdek fonksiyonunun ters Laplace dönüşümü Gaver-Stehfest yöntemi kullanılarak sayısal olarak hesaplanmıştır (Knight ve Raiche, 1982). Hesaplamada kullanılan bağıntılar,

$$f(t) \cong [ln(2)/t] \sum_{j=1}^J d(j, J) F[j ln(2)/t] \quad (2.63)$$

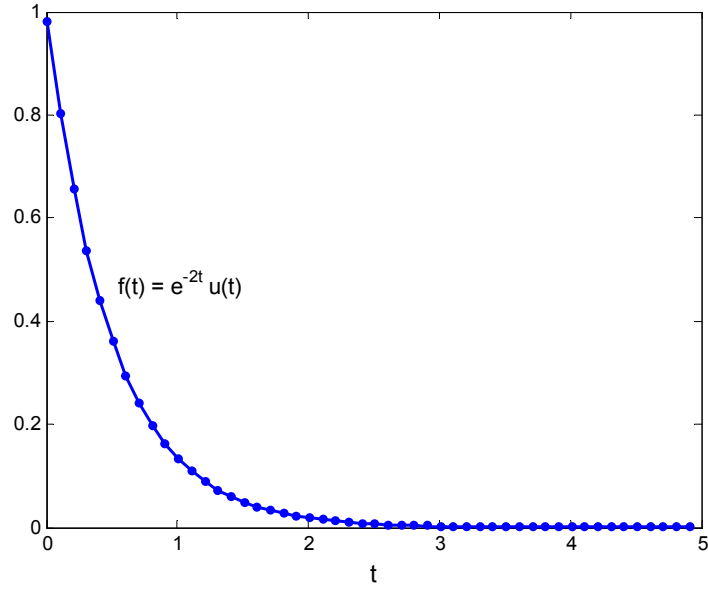
$$d(j, J) = (-1)^{j+M} \sum_{k=m}^{\min(j, M)} \frac{k^M (2k)!}{(M-k)! k! (k-1)! (j-k)! (2k-j)!} \quad (2.64)$$

şeklinde. Burada F , $t > 0$ değerleri için $f(t)$ fonksiyonunun Laplace dönüşümünü, J bir çift sayı, $M=J/2$, m ise $(j+1)/2$ değerinin tamsayı değeri olarak eşitliğe katılmaktadır. Bu çalışmada, $J = 14$ değeri en iyi sonucu vermiştir.

Gaver-Stehfest sayısal ters Laplace dönüşüm tekniğinin kullanımına örnek olarak, ters Laplace'ı bilinen $f(t) = e^{-2t}u(t)$ fonksiyonunu gözönüne alalım. Bu fonksiyonun Laplace dönüşümü izleyen şekildedir:

$$F(s) = \frac{1}{s+2} \quad (2.65)$$

Şekil 2.5'te, farklı t değerleri için yukarıda sözü edilen $F(s)$ fonksiyonun ters Laplace dönüşümü alındıktan sonraki davranışı (düz çizgi ile) ve karşılaştırma amacıyla Gaver-Stehfest sayısal ters Laplace dönüşümünden sonraki hali (nokta ile) gösterilmiştir. $F(s)$ fonksiyonunun Gaver-Stehfest tekniği ile ters Laplace dönüşümü alınırken, fonksiyon $(ln/2)/t$ değerlerinde hesaplanmış ve $d(j, J)$ ile temsil edilen katsayılarla çarpılıp toplanarak, $f(t)$ fonksiyonu elde edilmiştir. Klasik ters Laplace dönüşümü ile Gaver-Stehfest sayısal ters Laplace dönüşümünün aynı değerleri verdiği ve çizdirildiğinde üstüste gelerek uyumlu bir davranış gösterdikleri Şekil 2.5'ten izlenmektedir.



Şekil 2.5 : Gaver-Stehfest sayısal ters Laplace dönüşümü (nokta ile) ile klasik ters Laplace dönüşümünün (çizgi ile) karşılaştırılması.

2.3 Görünür Öz direnç

TEM yönteminde, ölçülen gerilim değerlerinin zamanın fonksiyonu olarak çizilmesi ile yerelektrik yapısı ile ilgili bilgiler elde edilmektedir. Ancak uygulamada gerilim eğrileri yerelektrik yapısına ait bilgiler içermesine rağmen, yeraltı suyu araştırmalarında yer öz direnç dağılımı önemli olduğu için bu bilgiler yeterli olmamaktadır. Bu nedenle daha kolay bir değerlendirme yapılabilmesi için, ölçülen gerilim değerlerinin görünür öz dirence çevrilmesi gerekmektedir. Zamana ve gerilime bağlı görünür öz direnç değerlerinin, $t \rightarrow 0$ 'a ve $t \rightarrow \infty$ 'a olmak üzere farklı iki çözümü bulunmaktadır (Spies ve Eggers, 1986). Erken zaman görünür öz direnç (early-time apparent resistivity) ve geç zaman görünür öz direnç (late-time apparent resistivity) olarak adlandırılan görünür öz direnç değerleri, asimptotik erken zaman ve geç zaman bağıntıları ile izleyen bağıntılar kullanılarak hesaplanabilmektedir:

$$\frac{\partial b}{\partial t} \approx V^{\text{erken zaman}} = \frac{3mI\rho}{a^3} \quad (2.66)$$

$$\frac{\partial b}{\partial t} \approx V^{\text{geç zaman}} = \frac{I\rho^{-3/2}\mu_0^{5/2}ma^2}{20\sqrt{\pi}t^{5/2}} \quad (2.67)$$

(2.66) ve (2.67) bağıntılarından görünür öz direnç ifadesi çekilirse,

$$\rho_a^{erken zaman} = \frac{a^3 V}{3mI} \quad (2.68)$$

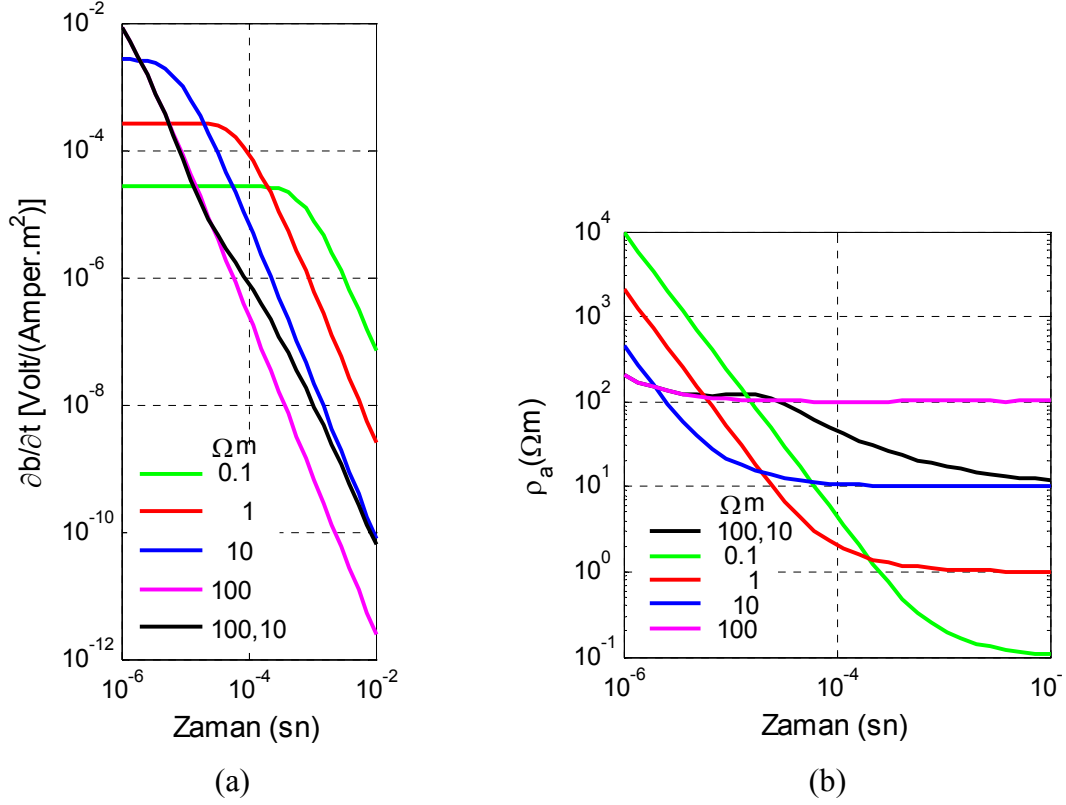
$$\rho_a^{geç zaman} = \frac{I^{2/3} a^{4/3} m^{2/3} \mu_0^{5/3}}{20^{2/3} \pi^{1/3} t^{5/3} V^{2/3}} \quad (2.69)$$

asimptotik öz direnç denklemleri sırasıyla erken zaman (2.68) ve geç zaman (2.69) için türetilmiş olmaktadır (Spies ve Eggers, 1986). Burada m , alıcı alanın etkin alanını göstermektedir. Şekil 2.6'da alıcı ilmekte ölçülen ikincil manyetik alanın düşey bileşeninin zamana göre türevinin karakteristik davranışı görülmektedir. Görüldüğü üzere, farklı öz dirence sahip tekdüze ortamlar için gerilim eğrilerinin davranışı aynı olmakla birlikte yer yapısı ile çok fazla bilgiyi görünür kılmamaktadır. Farklı öz dirence sahip tekdüze ortamı ($\rho=0.1, 1, 10, 100 \Omega m$) kendi içinde incelediğimizde, öz direnç değişimi gerilim eğrisinin genel davranış şeklini değiştirmemektedir, ancak iletken ortamda gerilim eğrisi daha geç sönümlenmektedir. Şekilde, siyah çizgi ile temsil edilen iki katmanlı bir yer modeline ($\rho_1=100, \rho_2=10 \Omega m$) ait gerilim eğrisinin davranışını incelersek, eğri ilk olarak üst katmanın öz direncini (tek düze ortam, $\rho=100 \Omega m$) takip ederek ikinci katmanın öz direnç eğrisine (tekdüze ortam, $\rho=10 \Omega m$) yaklaşmaktadır. Yerbilimciler yer altı yapısını, kullandıkları yöntemle bağlı olarak yöntemlerin duyarlı olduğu fiziksel parametreler cinsinden araştırmakta ve görüntülemektedirler. Bu çalışmada kullanılan TEM yönteminin duyarlı olduğu fiziksel parametre öz direnç parametresi olduğundan, ölçümler sonucunda elde edilen gerilim değerleri görünür öz direnç değerlerine dönüştürülmektedir. Bağntı (2.69) kullanılarak, geç zaman gerilim bağıntısından türetilen görünür öz direnç eğrileri, yeryapısı ile ilgili daha aydınlatıcı bilgiler taşımaktadır.

Yukarıda verilen öz direnç formülleri cihaz üreten firmaların kullandığı bazı referanslar ile farklı biçimlerde yazılabilmektedir. Örnek olarak bu tez çalışmasında kullanılan SIROTEM Mk 3 cihazı için yukarıdaki geç zaman görünür öz direnç ifadesi,

$$\rho_a^{geç zaman} = 6.32 \cdot 10^{-12} A^{2/3} a^{4/3} \left(\frac{V}{I} \right)^{-2/3} t^{-5/3} \quad (2.70)$$

bağıntısı ile verilmektedir (Fugro, 2002). Bu bağıntı, $t > 0.00119a^2\rho_a$ olması durumunda uygulanabilmektedir. Burada A , alıcı ilmeğin efektif alanını (SIROTEM RVR (Roving Vector Receiver) için 10000 m^2) ve a , kare şeklindeki vericinin bir kenarının uzunluğunu göstermektedir.



Şekil 2.6 : (a) Manyetik alan düşey bileşeninin zamana göre türevinin (the impulse response) farklı öz dirence sahip homojen ortamlar için davranışı. (b) Bu eğrilerden hesaplanan görünür öz direnç eğrileri. Siyah eğri, iki katmanlı bir yer modeli ($\rho_1=100 \text{ } \Omega\text{m}$, $\rho_2=10 \text{ } \Omega\text{m}$ ve $h=40 \text{ m}$) için elde edilen (a) gerilim ve (b) görünür öz direnç eğrisini temsil etmektedir.

2.4 Araştırma Derinliği

TEM yönteminde araştırma derinliği ile ilgili, diğer jeofizik yöntemlerde olduğu gibi nicel ve kesin bir yorum yapmak çok kolay değildir. Kuramsal olarak araştırma derinliği, verici halkaya uygulanan akım ile ortamın öz direncine bağlı olmasına rağmen aletsel kısıtlamalar nedeni ile vericiye uygulanan akımın belirli bir değerin üzerine çıkarılması olası değildir. Örneğin, bu çalışmada kullanılan SIROTEM Mk 3 cihazı için maksimum akım değeri $<10 \text{ Amper}$ dir. Bu nedenle, uygulamada kullanılan kare vericinin kenar uzunluğu arttırılarak hedeflenen derinliğe inebilmek mümkündür. Basit bir genelleme yapılırsa, gürültüsüz ve yeterince uzun süre veri

toplanabildiği bir ölçümde araştırma derinliği, verici ilmeğin bir kenarının 1/4 ‘ü ile 4 katı arasında değişmektedir.

Bilimsel yazında yaygın olarak, geçici elektromanyetik yöntem verilerinin hızlı yorumlanabilmesi amacıyla Meju (1995) tarafından etkin öz direnç-etkin derinlik yaklaşımı kullanılmaktadır (2.71) ve (2.72).

$$\rho_{eff} = k\rho_a e^{-(1-\alpha)} \quad (2.71)$$

$$\delta_{eff} = \frac{\delta_T}{2.3} \quad (2.72)$$

$$z_{max} = \delta_T = \left(\frac{2t\rho}{\mu_0} \right)^{1/2} \quad (2.73)$$

Bağıntı (2.71), etkin öz direnç ifadesi olup burada kullanılan değişkenler deneme-yanılma yolu ile bulunabilmektedir. α değeri için 0.15-2 arasında bir değer alınabilirken, bu çalışmada 0.15 olarak alınmıştır. k değeri ise 2.3 olarak alınmıştır. Bağıntı (2.71)’de verilen ρ_a , ölçülen görünür öz direnç değerlerini göstermektedir. Bağıntı (2.72)’de, δ_T , öz dirence ve gecikme zamanına bağlı nüfuz derinliğidir. Ancak uygulamada bu derinliğe pratik olarak ulaşmak zordur. Bu nedenle δ_{eff} ifadesi, etkin derinliği göstererek, uygulamada elektromanyetik dalganın inebileceği derinlik için daha iyi bir yaklaşım yapılmasını ve hızlı bir yoruma gidilmesini kolaylaştırmaktadır.

Bu çalışmada, TEM verileri için etkin öz direnç-etkin derinlik yaklaşımıyla elde edilen sonuçlar geliştirilen algoritma ile değerlendirilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve ortak bir yoruma gidilmiştir.

3. DOĞRU AKIM ÖZDİRENÇ YÖNTEMİ

Uygulamalı jeofizik yöntemler içerisinde en eski ve yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri doğru akım öz direnç (DAÖ) yöntemi'dir. Yöntemin temel ilkesi, Ohm yasasına (3.1) dayanmaktadır; bir çift akım elektrotu kullanarak yeriçine uygulanan elektrik alanın yeryüzünde oluşturacağı gerilim farkının, yine bir çift gerilim elektrodu ile ölçülmesidir.

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (3.1)$$

Burada, I (Amper) yeriçine gönderilen akımı, ΔV (Volt) yerde oluşan gerilim farkını ve R (Ohm) yerin direncini göstermektedir.

3.1 Yatay Katmanlı Ortam

Doğru akım öz direnç yönteminde, ölçülen büyüklüklerin sayısal olarak yorumlanabilmesi için, yeryüzünde ölçülen elektriksel gerilim farkı ile katman öz dirençleri arasındaki ilişkinin anlaşılabilmesi gerekmektedir. Burdan hareketle, bu ilişkiyi oluşturabilmek için yatay katmanlı bir ortamda yeryüzünde tek bir nokta akım kaynağı ile oluşturulan gerilim ifadesi için bazı temel tanımlamalar yapılırsa;

- 1) Yeraltındaki sonlu sayıdaki tabakalar birbirlerinden yatay düzlemler ile ayrılmışlardır; en derindeki katman yarı sonsuz olup diğer katmanların kalınlığı sonludur.
- 2) Her tabaka kendi içinde elektriksel olarak homojen ve izotropdur.
- 3) Potansiyel alanı oluşturan akım kaynağı yeryüzündedir.
- 4) Yeriçine gönderilen akım doğru akımdır.

Bu tanımlamalar doğrultusunda yeryüzünde oluşan gerilim farkı ifadesi (V) Laplace bağıntısını sağlamaktadır (Koefoed, 1979):

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (3.2)$$

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

$$V(r,z)=U(r) W(z). \quad (3.3)$$

Bu varsayımla (3.3) bağıntısı (3.2) bağıntısında yerine konulursa ve tüm terimler U ve W ile bölünürse;

$$\frac{1}{U} \frac{d^2 U}{dr^2} + \frac{1}{Ur} \frac{dU}{dr} + \frac{1}{W} \frac{d^2 W}{dz^2} = 0 \quad (3.4)$$

biçimine dönüşmektedir. Bu denklem,

$$\frac{1}{U} \frac{d^2 U}{dr^2} + \frac{1}{Ur} \frac{dU}{dr} = -\lambda^2 \quad (3.5)$$

ve

$$\frac{1}{W} \frac{d^2 W}{dz^2} = \lambda^2 \quad (3.6)$$

olması durumunda sağlanmaktadır.

Burada λ , keyfi bir sabittir. Yukarıdaki (3.6) denkleminin çözümü,

$$W=C e^{-\lambda z} \text{ ve } W=C e^{+\lambda z} \quad (3.7)$$

şeklinde bulunmaktadır (Koefoed, 1979).

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

$$U=C J_0(\lambda r) \quad (3.8)$$

fonksiyonun geliştirilmesine yol göstermektedir. Burada J_0 , sıfırıncı dereceden birinci cins Bessel fonksiyonudur. (3.7) ve (3.8) denklemleri birleştirilerek,

$$V=C e^{-\lambda z} J_0(\lambda r) \text{ ve } V=C e^{+\lambda z} J_0(\lambda r) \quad (3.9)$$

(3.5) diferansiyel denkleminin özel çözümleri bulunmuş olur. C ve λ keyfi sabitlerdir. (3.9) denklemindeki çözümlerinin herbirinin bir çözüm olduğu bilinerek λ' ya sıfırdan sonsuza kadar değerler vererek ve C' yi λ' nın bir değişkeni olarak

yazarak (3.5) numaralı diferansiyel denkleminin genel çözümü elde edilmektedir (Koefoed, 1979).

$$V = \int_0^{\infty} [\Phi(\lambda) e^{-\lambda z} + \Psi(\lambda) e^{+\lambda z}] J_0(\lambda r) d\lambda \quad (3.10)$$

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

$$V = \frac{\rho_1 I}{2\pi \sqrt{r^2 + z^2}} \quad (3.11)$$

şeklinde hesaplanır. Burada ρ_1 , homojen ortamın öz direncini göstermektedir. (3.11) denklemi Lipschitz integrali şeklinde yazılırsa (3.10) denkleminde benzemektedir.

$$\int_0^{\infty} e^{-\lambda z} J_0(\lambda r) d\lambda = \frac{I}{\sqrt{r^2 + z^2}} \quad (3.12)$$

(3.11) ve (3.12) denklemleri kullanılarak (3.10) numaralı denklemin genel çözümünün bulunması için aşağıda ifade edilen sınır koşullarının kullanılması gerekmektedir.

- 1) Yeraltındaki sınır düzlemlerinin herbirinde elektrik gerilim sürekli.
- 2) Yeraltındaki her sınır düzleminde akım yoğunluğunun düşey bileşeni sürekli olmalıdır.
- 3) Akım kaynağı hariç, yeryüzünde akım yoğunluğunun düşey bileşeni sıfır olmalıdır. İkinci sınır koşulu gereğince havada akım yoğunluğu sıfır olduğundan, yeryüzünde düşey bileşen de sıfır olmalıdır.
- 4) $I\rho_1/2\pi\sqrt{r^2 + z^2}$ şeklinde verilen gerilim ifadesi akım kaynağının sonsuz küçüklükteki civarında sonsuza yaklaşmalıdır.
- 5) Gerilim sonsuz derinlikte sıfıra yaklaşmalıdır.

Yukarıda maddeler halinde verilen sınır koşullarının uygulanması ile (3.10) numaralı denklemin genel çözümü

$$V = \frac{\rho I}{2\pi} \int_0^{\infty} (1 + 2\Theta(\lambda) J_0(\lambda r)) d\lambda \quad (3.13)$$

elde edilmektedir (Koefed, 1979). Burada, Stefanescu çekirdek fonksiyonu olarak bilinen $\Theta(\lambda)$ katmanların kalınlıkları ve öz dirençleri tarafından kontrol edilmektedir. (3.13) numaralı bağıntıda,

$$K(\lambda) = 1 + 2\Theta(\lambda) \quad (3.14)$$

ifadesi kullanılırsa,

$$V = \frac{\rho I}{2\pi} \int_0^{\infty} K(\lambda) J_0(\lambda r) d\lambda \quad (3.15)$$

oluşan gerilim, (3.15) bağıntısı ile yeniden ifade edilebilmektedir. Burada $K(\lambda)$ Slichter çekirdek fonksiyonunu göstermektedir (Koefed, 1979).

3.2 Schlumberger Dizilimi İçin Görünür Özdirencin Hesaplanması

Yatay katmanlı ortamlarda Schlumberger dizilimi için görünür öz direnç,

$$\rho_{as} = \rho_1 + 2\rho_1 s^2 \int_0^{\infty} \Theta_1(\lambda) J_1(\lambda s) \lambda d\lambda \quad (3.16)$$

şeklinde verilmektedir (Koefed, 1979). Bağıntı (3.14) ile gösterilen ilişkiden yararlanarak temelin üzerine yeni bir katman eklenmesi ve ölçü sistemini yeni eklenen katman üzerine taşınmasıyla yürütülen Pekeris yineleme bağıntısı ile Slichter çekirdek fonksiyonu,

$$K_i = \frac{K_{i+1} + p_i \cdot \tanh(\lambda t_i)}{p_i + K_{i+1} \cdot \tanh(\lambda t_i)}, \quad p_i = \frac{\rho_i}{\rho_{i+1}} \quad (3.17)$$

sayısal olarak değerlendirilebilmektedir. Koefed (1979) tarafından verilen yineleme bağıntısından hareketle, katman parametrelerinin bilinmesi durumunda çekirdek fonksiyonu sayısal olarak hesaplanabilmektedir. İlk olarak temel katmanda K fonksiyonu saptanmaktadır. Bir önceki bölümde bahsedilen sınır koşulları gözönüne

alındığında, $K_n(\lambda)=1$ alınırsa, yinelemeli olarak çekirdek fonksiyonu her bir katman için hesaplanabilmektedir.

Koefed (1970) tarafından dönüşük özdirenc fonksiyonu (3.18) bağıntısıyla tanımlanmaktadır:

$$\rho_{as} = s^2 \int_0^{\infty} T(\lambda) J_1(\lambda s) \lambda d\lambda . \quad (3.18)$$

Burada, $T(\lambda)$ dönüşük özdirenci temsil etmektedir. Pekeris yineleme bağıntısı dönüşük özdirenc için,

$$T_i = \frac{T_{i+1} + \rho_i \cdot \tanh(\lambda t_i)}{p_i + \left(\frac{T_{i+1}}{\rho_i} \right) \cdot \tanh(\lambda t_i)} \quad (3.19)$$

şeklinde verilmektedir. Temel katman için,

$$T_n = K_n \cdot \rho_n \quad (3.20)$$

$K_n=1$ olduğundan,

$$T_n = \rho_n \quad (3.21)$$

bulunur.

Bu çalışmada, (3.18) bağıntısı ile verilen görünür özdirenc ifadesi doğrusal süzgeçler kullanılarak yapılan ters Hankel dönüşümleri (Anderson, 1979) ile sayısal olarak hesaplanmıştır.

4. TERS ÇÖZÜM

Son yıllarda modelleme ile ilgili çalışmalarda, gelişen bilgisayar teknolojisiyle orantılı olarak büyük ilerlemeler kaydedilmiştir. TEM yöntemi için yaygın olarak kullanılan bir-boyutlu ters çözüm algoritmalarının yanı sıra iki ve üç boyutlu modelleme çalışmaları yapılmaktadır. Bugüne kadar, iki ve üç boyutlu modelleme algoritmalarında bir boyutlu düz çözüm algoritmaları kullanılmıştır (Auken ve diğ., 2008; Arnason, 1995; Best ve diğ., 1995; Sugeng, 1998). Ancak, son yıllarda gerek düz çözüm gerekse ters çözüm algoritmaları üç boyutlu olarak düzenlenmiştir (Alumbaugh ve Newman, 2000; Haber ve diğ., 2004). Bununla birlikte, bir boyutlu modelleme çalışmalarından elde edilen sonuçların, iki ve üç boyutlu modellemelerde başlangıç modeli olarak kullanılması bir boyutlu modellemelerin öneminin hala güncelliğini koruduğunu göstermektedir.

Bu çalışma kapsamında, daha önce de belirtildiği gibi bir boyutlu düz çözüm algoritması kullanılarak bir-boyutlu ters çözüm programı geliştirilmiştir. Ters çözüm programı, sürekli ve yumuşak özdirenç geçişleriyle yeriçini görselleştirebilmemizi sağlayan, Constable ve diğ., (1987)'nin OCCAM ters çözüm algoritması kullanılarak geliştirilmiştir. Bu algoritma, daha yoğun bilgisayar zamanı gerektirdiğinden klasik ters çözüm algoritmaları kadar yaygın olarak kullanılmamaktadır. Ancak katman sayısı ile ilgili ön-bilgiye (a priori-information) ihtiyaç duymayan algoritma, yeriçinin iletkenlik dağılımının olası sınırlarının görüntülenmesinde, diğer klasik ters çözüm algoritmalarının yanıltıcı-az güvenilir yapıdaki derinlik dönüşümlerine kıyasla daha iyi bir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır (Spies ve Macnae, 1997).

4.1 Doğrusal Ters Çözüm

Bir gözlemsel veri grubu ve bilinmeyen model parametreleri arasındaki doğrusal ilişki,

$$y_i = A_{ij}x_j \quad (4.1)$$

şeklinde verilebilir. Burada, y_i ($i = 1, \dots, n$) gözlemsel verileri, x_j ($j = 1, \dots, m$) model parametreleri, A_{ij} model parametreleri ile veri arasındaki matematiksel ifadeyi göstermektedir. Daha basitleştirilmiş olarak,

$$y = Ax \quad (4.2)$$

şeklinde yazılabilir. Tek bir adımda denklem (4.1)'den model parametreleri

$$x_j = A_{ij}^{-1} y_i \quad (4.3)$$

bulunabilmektedir. Ancak geçici elektromanyetik ve doğru akım öz direnç yöntemlerinde parametre ve veri grubu arasındaki ilişki doğrusal değildir. Bu nedenle, doğrusal olmayan bir matematiksel model, belirlenen bir başlangıç değeri civarında, birinci dereceden Taylor serisine açılarak doğrusallaştırılabilmektedir. Herhangi bir f fonksiyonunun x_j° civarında Taylor serisi açılımı,

$$f(x_j) \cong f(x_j^\circ) + \frac{\partial f(x_j^\circ)}{\partial x_j} (x_j - x_j^\circ) + R(x_j - x_j^\circ) \quad (4.4)$$

şeklinde verilmektedir. Burada, $R(x_j - x_j^\circ)$ yüksek dereceli türevleri göstermektedir.

$R(x_j - x_j^\circ)$ ihmal edildiği durumda,

$$f(x_j) - f(x_j^\circ) = \left[\frac{\partial f(x_j^\circ)}{\partial x_j} \right] [x_j - x_j^\circ] \quad (4.5)$$

ifadesi elde edilmekte ve bu ifade (4.1) bağıntısına benzemektedir. Böylece, doğrusallaştırılmış olan (4.5) denklem genelleştirilerek yazılırsa;

$$y_i^{göz.} - y_i^{kur.} = \sum_{j=1}^m \frac{\partial f_i(x_j^\circ)}{\partial x_j} (x_j - x_j^\circ) \quad i = 1, \dots, n \quad (4.6)$$

elde edilmektedir. Bu durumda ($i = 1, \dots, n$, $j = 1, \dots, m$ için);

$$\Delta y_i = A_{ij} \Delta x_j \quad (4.7)$$

denklem sistemine ve en genel haliyle (4.2) bağıntısı, doğrusal denklem sistemine karşılık gelmektedir. Bu denklem sisteminde, A ($n \times m$) Jacobian matrisi olarak adlandırılmakta ve model parametrelerine göre kısmi türevlerden oluşmaktadır. Δy ($n \times 1$) gözlemsel veriler ile kuramsal veriler arasındaki farkı, Δx ($m \times 1$) ise model parametrelerine uygulanacak düzeltmeyi göstermektedir.

Elektrik ve elektromanyetik yöntemlerde model parametreleri büyüklük olarak çok geniş bir aralıkta değişmektedir. Bu parametrelerin doğrusal değişimleri ile gözlemsel veri üzerinde doğrusal bir değişim elde edilememektedir. Bu nedenle parametrelerin ve veri grubunun logaritmaları alınarak ters çözüm işleminin yapılması gerekmektedir. Böylece, doğrusal olmayan bir problemi bir adım daha doğrusallaştırılmaktadır. Bununla birlikte, fiziksel olarak mümkün olmayan negatif büyüklüklerin (özdirenç, sismik hız, yoğunluk, tabaka kalınlığı gibi) hesaplanmasını da engellemektedir.

(4.2) ile verilen denklem sistemi ile ifade edilebilen bir matematiksel modelde, model parametrelerine ait düzeltme terimleri,

$$\Delta x = A^{-1} \Delta y \quad (4.8)$$

şeklinde bulunabilmektedir. Doğrusal denklem sistemlerinde yineleme yapılmadan model parametrelerinin hesaplanabileceği yukarıda belirtilmişti. Doğrusal olmayan denklem sistemlerinde ise model parametreleri belli sayıda yineleme yapılarak elde edilebilmekte ve her yinelemede, düzeltme terimleri bir önceki yinelemedeki model parametrelerine uygulanmaktadır. Burada A^{-1} , ($n \times m$) Jacobian matrisinin tersini göstermektedir. Menke (1984)'te belirtildiği gibi; gözlem sayısının model parametre sayısına eşit olması durumunda ($n=m$), denklem sistemleri tam tanımlı (exact determined) denklem sistemleri olarak adlandırılır. Bu durumda, A matrisi tersi alınabilir bir kare dizey haline gelmektedir. Gözlem sayısının model parametreleri sayısından fazla olması durumunda ($n>m$), denklem sistemleri fazla tanımlı (overdetermined), ($n<m$) durumunda ise eksik tanımlı (underdetermined) denklem sistemleri olarak adlandırılmaktadır. Jeofizik mühendisliğinde, genellikle gözlem sayısı parametre sayısından fazla olmaktadır. Yukarıda belirtilen problem fazla ya da eksik tanımlı ise Jacobian matrisinin tersinin alınabilmesi için yalancı ters matris (pseudo inverse) matris ifadesi kullanılmaktadır:

$$H = (A^T A)^{-1} A^T. \quad (4.9)$$

Bilindiği gibi, yukarıdaki H ifadesi (4.8) denkleminde A^{-1} ifadesi yerine konularak ters çözüm işlemi gerçekleştirilmektedir.

4.2 OCCAM Ters Çözümü

Occam ters çözümü, yeriçinin öz direnç yapısının sürekli ve yumuşatılmış bir biçimde elde edilmesine dayanmaktadır. İnce katmanlar olarak adlandırılan çok sayıda “lamina” dan oluşan bir başlangıç modelinde, denklem sistemine, komşu tabakalar arasındaki öz direnç farkı en küçük seviyede tutulması gibi kısıtlamalar getirilerek, ince katmanlar arasındaki öz direnç değişimlerinin/geçişlerinin ani olmasına izin verilmemektedir. Böylece ters çözüm sonucunda yumuşatılmış ve sürekli bir yer yapısı elde edilmektedir.

Ters çözümde, modelin olabildiğince esnek ve bununla birlikte kontrol altında tutulabilmesini sağlamak için, bütün profil boyunca, bir sarplık (roughness) değeri tanımlanmaktadır. Bu değer yumuşatmanın (smoothing) tersini ifade etmektedir. Sarplık parametresi, model parametrenin derinliğe bağlı birinci veya ikinci türevinin integrali biçiminde

$$R_1 = \int \left(\frac{dx}{dz} \right)^2 dz \quad (4.10)$$

veya

$$R_2 = \int \left(\frac{d^2x}{dz^2} \right)^2 dz \quad (4.11)$$

(Constable ve diğ., 1987) olarak ifade edilmektedir. Bu çalışmada, $x(z)$ öz direnç parametresini temsil etmektedir. Sarplık değeri, ayrık olarak birinci türevinin integrali,

$$R_1 = \sum_{i=2}^N (x_i - x_{i-1})^2 \quad (4.12)$$

ve ikinci türevinin integrali,

$$R_2 = \sum_{i=2}^{N-1} (x_{i+1} - 2x_i + x_{i-1})^2 \quad (4.13)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Gözlemsel veri ile kuramsal veri arasındaki çakışma ölçütü,

$$\chi = \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (d_j - F_j(x))^2 \right)^{1/2} \quad (4.14)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Burada, d_j gözlemsel verileri, $F_j(x)$ model parametrelere atanan sayısal değerler kullanılarak matematik bağıntı ile hesaplanan verileri ve n , veri sayısını göstermektedir.

(4.12) ve (4.13) denklemleri şeklinde verilen sarplık değerleri matris şeklinde,

$$R_1 = \|\partial x\|^2 \quad (4.15)$$

$$R_2 = \|\partial^2 x\|^2 \quad (4.16)$$

ifade edilebilmektedir. Burada x , model parametrelerini, öz direnç parametresini, ∂ ise model parametre boyutunda,

$$\partial = \begin{bmatrix} 0 & & & & \\ -1 & 1 & & & 0 \\ & -1 & 1 & & \\ & & \dots & & \\ & 0 & & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

şeklinde bir matrisi tanımlamaktadır (Constable ve diğ., 1987). Model parametrenin, ∂ matrisi ile çarpılması ani değişimlere izin vermeyip, köşeli görünüm yerine yumuşatılmış bir sonuç elde edilmesini sağlamaktadır. Her yinelemede en küçük sarplık değerinin (en yumuşak model) elde edilmesi için en küçük RMS hatayı veren Lagrange çarpanının (μ) belirli bir aralık içerisinde araştırılması gerekmektedir. Bu durum gerçekleşirken gözlemsel veri ile kuramsal veri arasındaki çakışma ölçütünü veren RMS hata alabileceği en küçük değeri almaktadır. Böylece, Occam ters çözümünün ilkesini oluşturan önceden belirlenmiş RMS hatasından daha küçük hata veren modeller içerisinde en yumuşak öz direnç değişimini gösteren model araştırılabilmektedir.

Doğrusal olmayan bir problemde, k iterasyon sayısını göstermek üzere,

$$x_{k+1}(\mu) = \left[\mu \partial^T \partial + (W A_k)^T W A_k \right]^{-1} (W A_k)^T W d_k \quad (4.18)$$

şeklinde model parametre hesaplanmaktadır. A ($n \times m$) kısmi türevlerden oluşan Jacobian matrisini, W ($m \times m$) ağırlıklandırma matrisini, μ ise Lagrange çarpanını ifade etmektedir.

4.3 Ortak Ters Çözüm

Ters çözüm sonuçlarını iyileştirmek amacı ile uygulanan yöntemlerden biri verilerin ortak ters çözümüdür (Joint Inversion). Genel bir ifadeyle, ters çözüm işlemine başlamadan önce birbirlerini tamamlayan ve aynı model parametre ile ilgilenen iki farklı yöntem verileri bir yer modeli için birleştirilmektedir. Diğer bir ifadeyle, denklem sistemi farklı iki matematiksel ifade kullanılarak farklı iki veri grubu ile tek bir model parametre serisi hesaplamaya çalışılmaktadır. Böylece, ortak ters çözüm sağladığı ek bilgi ile çözümün gelişmesine katkıda bulunmaktadır.

Ortak ters çözümde parametre matrisi (bu çalışma için özdirenç parametresi) aynı kalarak her iki yöntemin matematiksel birleşimi, her iki yöntemin gözlemsel ve kuramsal veri matrislerinin birleşimi ile sağlanmaktadır. Bu uygulamada gözlemsel ve kuramsal veri matrisleri ile Jacobian matrisi sırasıyla aşağıdaki şekilde gösterilmektedir:

$$d = \begin{bmatrix} d_{tem} \\ d_{daö} \end{bmatrix}; \quad f = \begin{bmatrix} f_{1(tem)} \\ f_{2(daö)} \end{bmatrix}; \quad J = \begin{bmatrix} J_{1(tem)} \\ J_{2(daö)} \end{bmatrix}. \quad (4.19)$$

5. YAPAY VERİLERİN TERS ÇÖZÜMÜ

Bu çalışma kapsamında doğru akım öz direnç yöntemi ve geçici elektromanyetik yöntem ile ölçülen verilerin ayrı ayrı ve ortak ters çözümlerini gerçekleştiren MATLAB ortamında bir program geliştirilmiştir.

MATLAB programlama dilinin çok kısa komut dizileri kullanarak birçok işlemi kısa sürede gerçekleştirebilmesi ve görsel anlamda üstünlükleri kullanılarak yazılan program, TEM ve DAÖ verilerinin nitel olarak değerlendirilmesini sağlayan etkin bir programdır. OCCAM ters çözüm tekniği kullanılarak geliştirilen algorithmada birinci dereceden türev dizeyi sayısal türev alma tekniği ile hesaplanmıştır.

OCCAM ters çözüm algoritmasında, yarı-sürekli bir yer modeli elde edebilmek için katman kalınlıkları sabit olarak alınmaktadır (Chen, 1999); burada sadece öz direnç değerleri parametre olarak ters çözüm işlemine girmektedir. Çok sayıda katman yaklaşımı ile çalışan algoritma ile klasik ters çözüm sonuçlarındaki köşeli öz direnç modeli yerine daha gerçekçi, sürekli bir öz direnç modeli sunmaktadır. Bu bölümde, OCCAM ters çözüm tekniğinin özelliklerinin ortaya konması, ayrı ayrı ve ortak ters çözümdeki farklılıkların tartışılması amacıyla öncelikle yapay verilerle test edilmiştir.

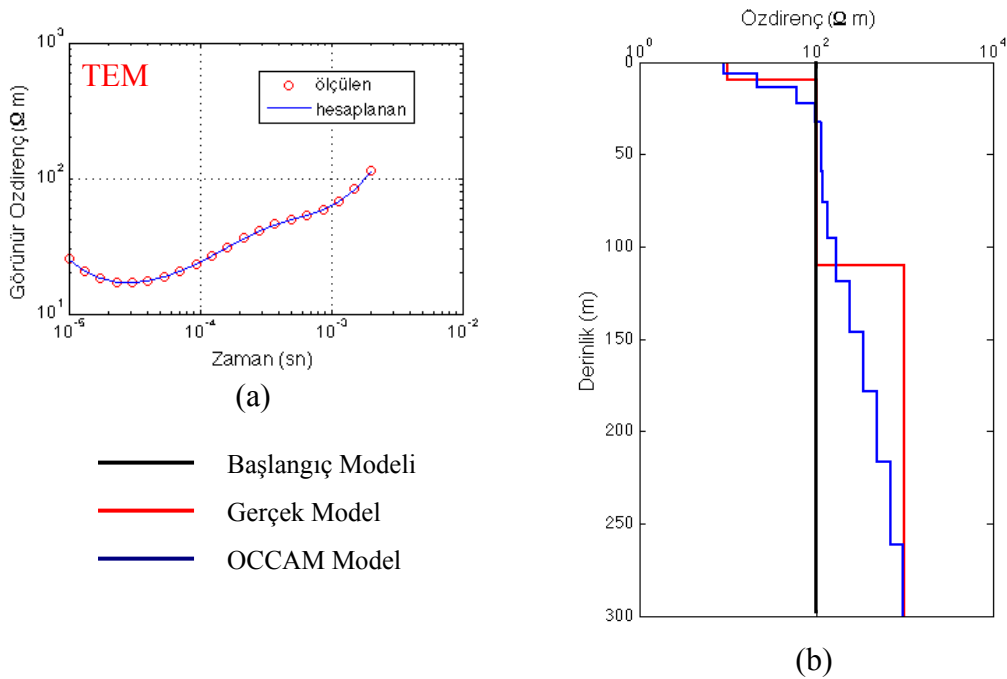
Bilindiği gibi; klasik ters çözümde, tabaka sayısının arttırılması ters çözüm sonucunu etkilemektedir. Tabaka kalınlıkları arttırılarak kısıtlamalar ortadan kaldırılmaya çalışılırken, bazı durumlarda tabaka kalınlıkları verinin çözüm kapasitesinin altında kalmaktadır. Bu durumda, gerçekçi olmayan yer modelleri ortaya çıkabilmektedir. OCCAM algoritmasının geleneksel ters çözüm algoritması Marquardt'a göre avantajı, ters çözüm sonucu kullanılan katman sayısına ve başlangıç modeline bağımlı olmamasıdır (Constable ve diğ., 1987; Spies ve Macnae, 1997; Chen, 1999). Bu bölümde yeralan yapay verilerin ters çözümünde, başlangıç modeli olarak tekdüze yer modeli seçilmiştir. Yapay verilerle gerçekleştirilen denemelerde ters çözüm yineleme (iterasyon) adımı 5 ile 8 arasında değişmekte olup, bu adımlardan sonraki sonuçlarda RMS hata değeri alabileceği en küçük değeri almaktadır. RMS

hata değerine bağlı olarak, OCCAM ters çözümünde önemli bir parametre olan Lagrange çarpanı (μ), (bakınız. bölüm 4.2), yapay modeller ile yapılan testlerde 10^{-5} - 10^5 aralığında araştırılmıştır. Her yinelemede 10 adet μ hesaplanarak en iyi RMS hata değerini veren Lagrange parametresi $\mu < 1$ değerleri için elde edilmiştir.

İzleyen bölümde OCCAM ters çözüm tekniği ile yapay TEM ve DAÖ verileri önce ayrı ayrı sonra ortak biçimde değerlendirilmiştir. Yapay veri testleri için A, Q, H ve K tipi yer modellerinin tümü hesaplanmış ve sonuçlar ayrı ayrı irdelenmiştir.

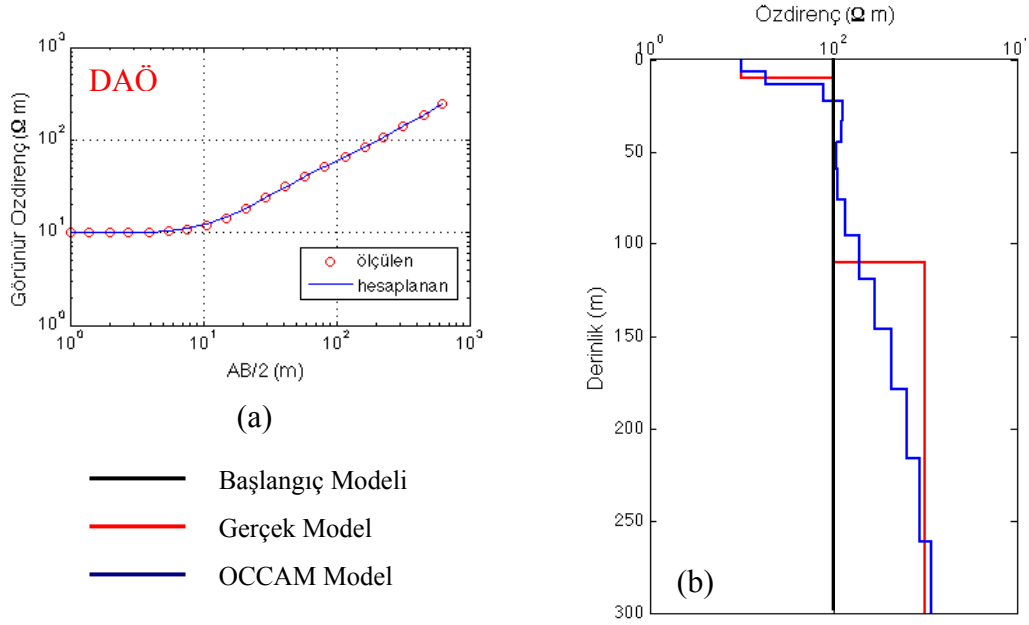
5.1 A Tipi Yer Modeli

Derinlik arttıkça öz direnç değerlerinin arttığı A tipi ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$) bir yer modeli ($\rho_1=10 \Omega m$, $\rho_2=100 \Omega m$, $\rho_3=1000 \Omega m$; $h_1=10 m$, $h_2=100 m$) için TEM ve DAÖ yapay verileri sırasıyla Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de verilmiştir. Yapay TEM verisi $50 \times 50 m^2$ ’lik verici halka ile merkezi halka düzeneği için 0.01-2 ms arasında oluşturulmuştur. Her iki veriye aynı başlangıç modeli ve aynı veri grubu için ortak ters çözüm uygulanmıştır (Şekil 5.3). Başlangıç modeli için katman öz dirençleri $100 \Omega m$ olan 14 katmanlı bir yer modeli belirlenmiştir. Ters çözüm sonuçları 5 yineleme adımından sonra elde edilen bulguları göstermektedir.

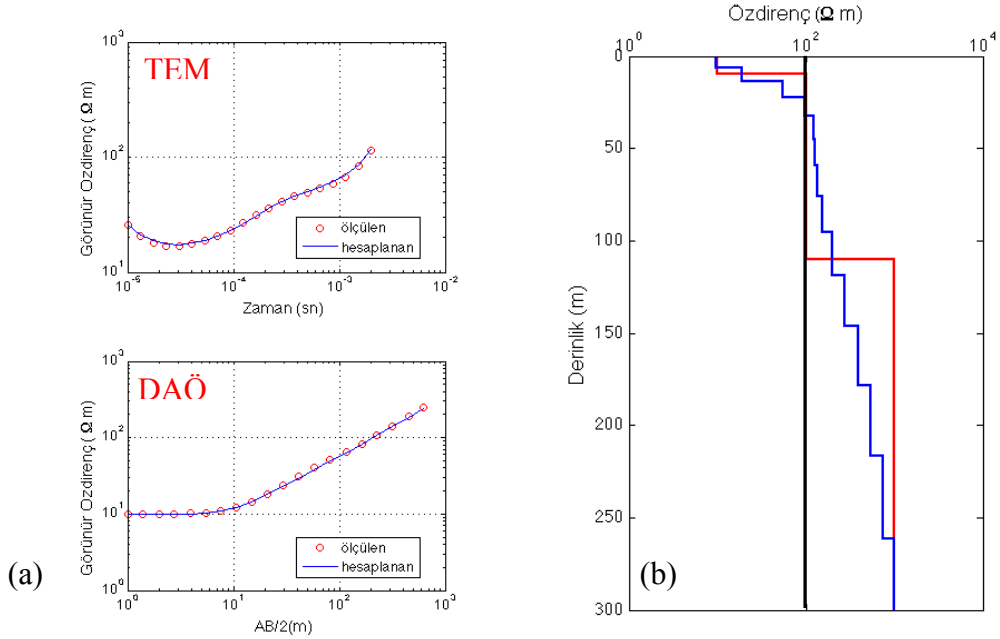


Şekil 5.1 : (a) A tipi yer modeli için üretilen yapay TEM verisi ve bu model için hesaplanan kuramsal eğri (düz mavi çizgi), (b) Ters çözüm sonucunda elde edilen yer modeli.

TEM ve DAÖ verisi ile yapılan bağımsız ve ortak ters çözüm sonuçlarından elde edilen bir boyutlu OCCAM modellerinde (smooth model), gerçek modeldeki özdirencin derinlikle artışı başarılı bir şekilde izlenebilmektedir. Her iki yöntem bilgisi kullanılarak yapılan ortak ters çözüm sonucunda oldukça küçük bir RMS hata değerine (0.011) ulaşılmıştır.



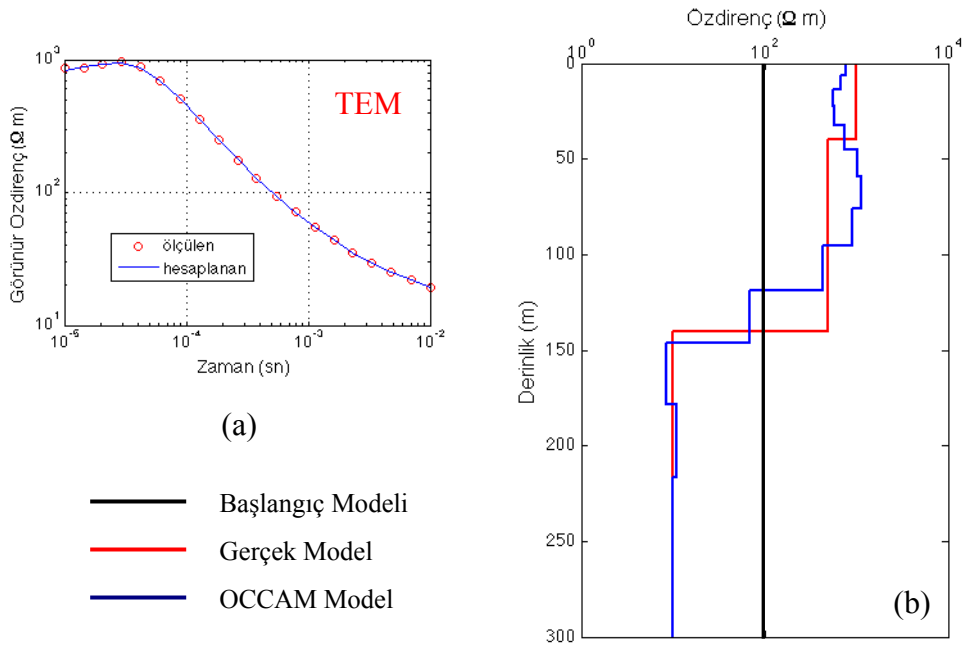
Şekil 5.2 : (a) A tipi yer modeli için üretilen yapay DAÖ verisi ve bu model için hesaplanan kuramsal eğri (düz mavi çizgi), (b) Ters çözüm sonucunda elde edilen yer modeli.



Şekil 5.3 : (a) A tipi yapay TEM ve DAÖ verileri ve bu model için hesaplanan kuramsal eğri (düz mavi çizgi), (b) TEM ve DAÖ verileri ortak ters çözümü sonucunda elde edilen yer modeli.

5.2 Q Tipi Yer Modeli

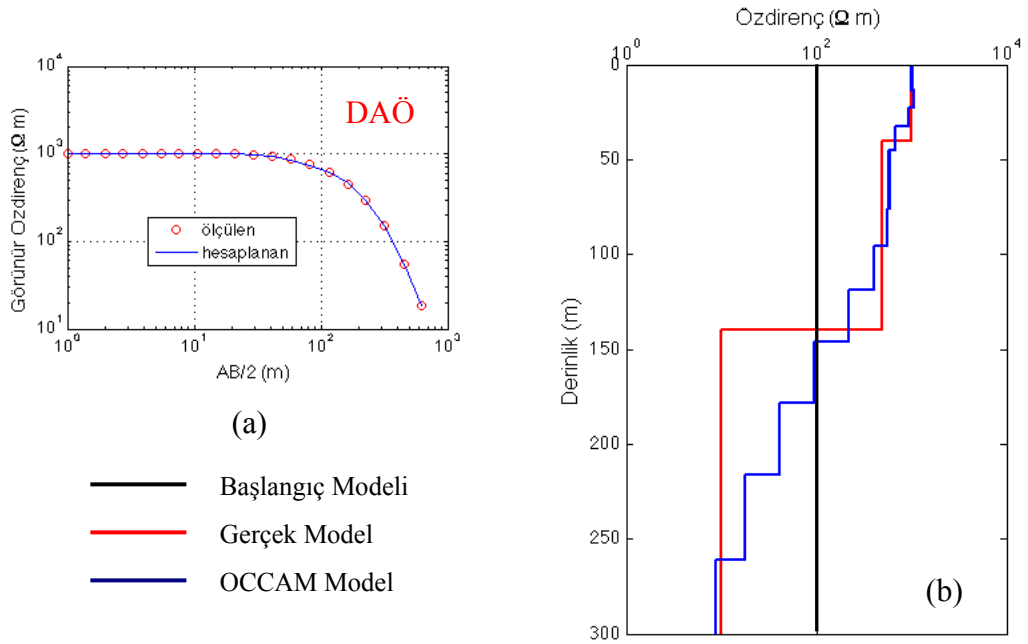
Özdirençin derinlikle azaldığı, Q tipi ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$) bir yer modeli ($\rho_1=1000 \Omega m$, $\rho_2=500 \Omega m$, $\rho_3=10 \Omega m$; $h_1=40 m$, $h_2=100 m$) için üretilen TEM ve DAÖ yapay verileri sırasıyla Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te görülmektedir. TEM yapay verisi $50 \times 50 m^2$ 'lik verici halka ile merkezi halka düzeneği için 0.01-10 ms arasında oluşturulmuştur. Şekil 5.6'da, iki yöntemin ortak ters çözüm sonucu görülmektedir. Bu model için, başlangıç modeli 14 katmanlı ve katman özdirençleri $100 \Omega m$ olarak belirlenmiştir. Ters çözüm sonuçları 6 yineleme adımından sonra elde edilen bulguları göstermektedir.



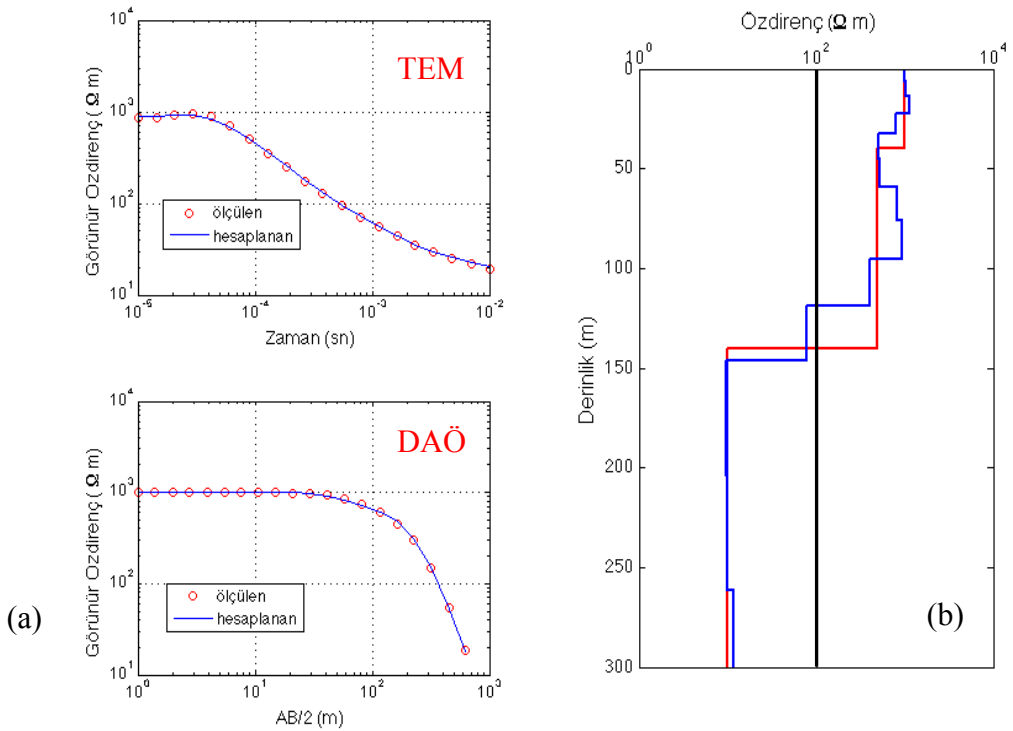
Şekil 5.4 : (a) Q tipi yer modeli için oluşturulan yapay TEM verisi ve bu model için hesaplanan kuramsal eğri (düz mavi çizgi), (b) Ters çözüm sonucunda elde edilen yer modeli

TEM ve DAÖ verisi ile ayrı ayrı gerçekleştirilen ters çözüm sonucundan elde edilen OCCAM model, özdirençin derinlikle azalmasını başarıyla görüntülemektedir. TEM modelinde, sığ derinliklerdeki özdirençlerinde görülen salınımlar, DAÖ verisi ile yapılan ters çözüm sonucunda bu salınımlar azalmış ve gerçek modele daha yakın sonuçlar vermiştir. Diğer taraftan, iletken son katman ($10 \Omega m$) TEM verisi ile elde edilen OCCAM modelde daha iyi tanımlanmaktadır. Ortak ters çözüm sonucunda elde edilen yer modelinde (Şekil 5.6), her iki yöntem bilgisi modelde etkisini göstermektedir. TEM modelinde sığ derinliklerde görülen salınımlar etkisini

kaybederek, ortak çözüm sonucunda elde edilen modelde iletken katmanda TEM verisinin etkisi daha fazla görülmektedir. 6. yineleme sonucunda yine küçük bir RMS hata değeri (0.026) elde edilmiştir.



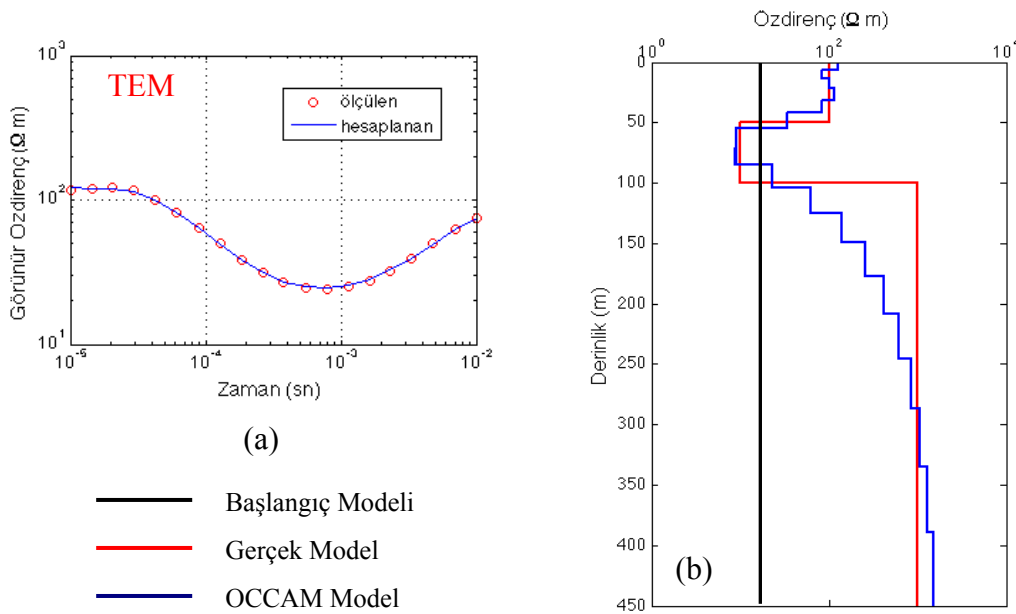
Şekil 5.5 : (a) Q tipi yer modeli için üretilen yapay DAÖ verisi ve bu model için hesaplanan kuramsal eğri (düz mavi çizgi), (b) Ters çözüm sonucunda elde edilen yer model.



Şekil 5.6 : (a) Q tipi yapay TEM ve DAÖ verileri ve bu model için hesaplanan kuramsal eğri (düz mavi çizgi), (b) TEM ve DAÖ verileri ortak ters çözümü sonucunda elde edilen yer modeli.

5.3 H Tipi Yer Modeli

İletken bir ara katmanın dirençli bir ortamda bulunduğu, H tipi ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$) bir yer modeli ($\rho_1=100 \text{ } \Omega\text{m}$, $\rho_2=10 \text{ } \Omega\text{m}$, $\rho_3=1000 \text{ } \Omega\text{ m}$; $h_1=50 \text{ m}$, $h_2=50 \text{ m}$) için üretilen TEM ve DAÖ verileri sırasıyla Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’de görülmektedir. TEM yapay verisi $50 \times 50 \text{ m}^2$ olan bir verici halka ile merkezi halka düzeneği için 0.01-10 ms arasında oluşturulmuştur. İki yöntemin ortak ters çözüm sonuçları Şekil 5.9’da gösterilmektedir. Diğer modellerde olduğu gibi, aynı başlangıç modeli ve aynı veri grubu için ortak ters çözüm uygulanmıştır. Başlangıç modeli olarak 19 katmanlı ve her katmanın öz direnci $20 \text{ } \Omega\text{m}$ olarak belirlenmiştir. Ters çözüm sonuçları 6 yineleme adımından sonra elde edilen bulguları göstermektedir.

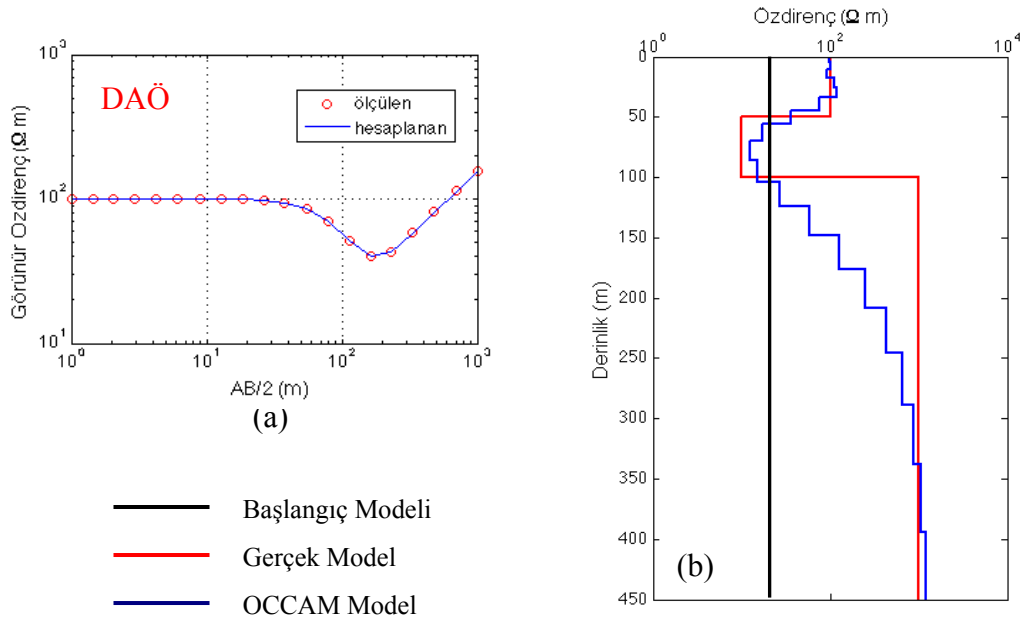


Şekil 5.7 : (a) H tipi yer modeli için oluşturulan yapay TEM verisi ve bu model için hesaplanan kuramsal eğri (düz mavi çizgi), (b) Ters çözüm sonucunda elde edilen yer modeli.

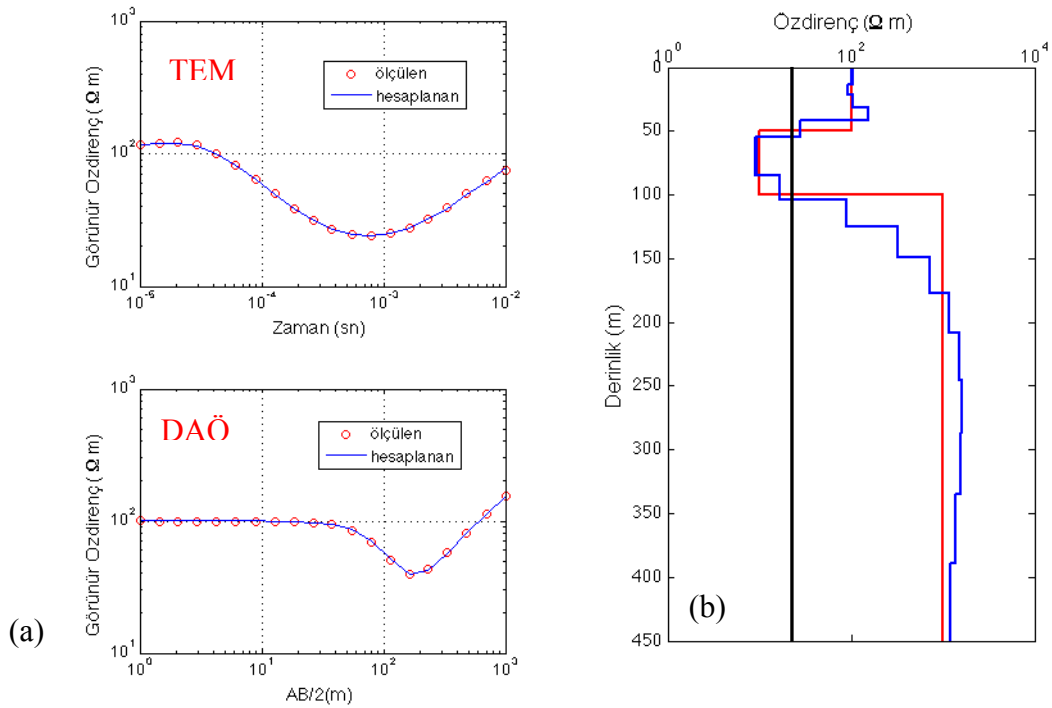
Her iki yöntemin bağımsız ters çözümünden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, TEM verisinin iletken katmanlarının sınırlarını ve öz direncini DAÖ verisine göre daha iyi belirlediği görülmektedir. Ancak dirençli katmanların ($\rho_1 = 100 \text{ } \Omega\text{m}$ ve $\rho_3 = 1000 \text{ } \Omega\text{m}$) çözümünde DAÖ verisinden elde edilen yer modeli, gerçek yer modeli ile daha iyi bir uyum içerisindedir. TEM yönteminin iletken katmanlara ve DAÖ yönteminin dirençli katmanlara daha duyarlı olduğu (Gomez-Trevino ve Edwards, 1983) bilindiğinden her iki yöntem bilgisini kullanarak ortak ters çözüm sonucundan elde

edilen yer modeli için, gerçek modele daha yakın sonuç elde edildiği görülmektedir.

6. yineleme sonucunda RMS hata değeri 0.009 bulunmuştur.



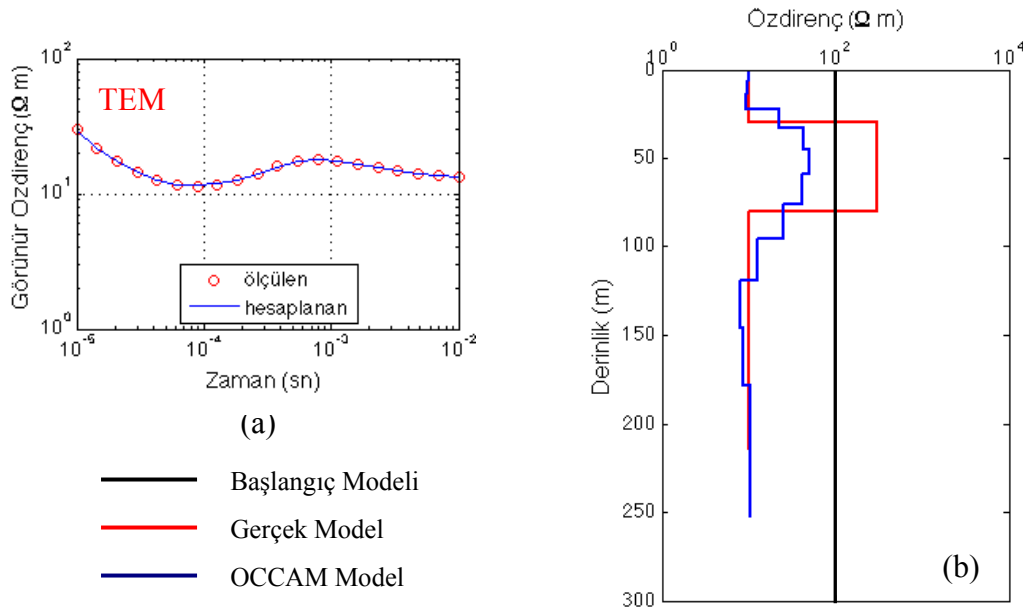
Şekil 5.8 : (a) H tipi yer modeli için üretilen yapay DAÖ verisi ve bu model için hesaplanan kuramsal eğri (düz mavi çizgi), (b) Ters çözüm sonucunda elde edilen yer modeli.



Şekil 5.9 : (a) H tipi yapay TEM ve DAÖ verileri ve bu model için hesaplanan kuramsal eğri (düz mavi çizgi), (b) TEM ve DAÖ verileri ortak ters çözümü sonucunda elde edilen yer modeli.

5.4 K Tipi Yer Modeli

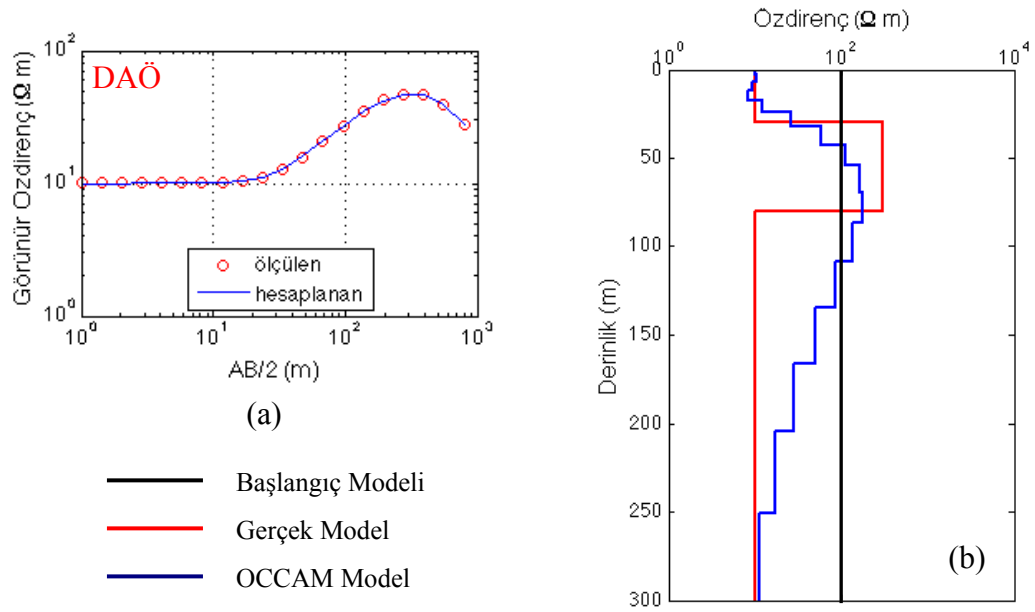
Dirençli bir ara katmanın iletken bir ortamda bulunduğu, K tipi ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$) bir yer modeli ($\rho_1=10 \Omega m$, $\rho_2=300 \Omega m$, $\rho_3=10 \Omega m$; $h_1=30 m$, $h_2=50 m$) için üretilen TEM ve DAÖ yapay verileri sırasıyla Şekil 5.10 ve 5.11’de gösterilmektedir. TEM yapay verisi ise $50 \times 50 m^2$ ’lik verici halka ile merkezi halka düzeneği için 0.01-10 ms arasında oluşturulmuştur. Bağımsız ters çözümünden elde edilen yer modelleri Şekil 5.10 ve Şekil 5.11’de görülmektedir. Şekil 5.12’de, iki yöntemin ortak ters çözüm sonucu görülmektedir. Başlangıç modeli olarak 17 katmanlı ve her katmanın öz direnci $100 \Omega m$ olarak belirlenmiştir. Aynı başlangıç modeli ve aynı veri grubu için ortak ters çözüm uygulanmıştır. Ters çözüm sonuçları 8 yineleme adımından sonra elde edilen bulguları göstermektedir.



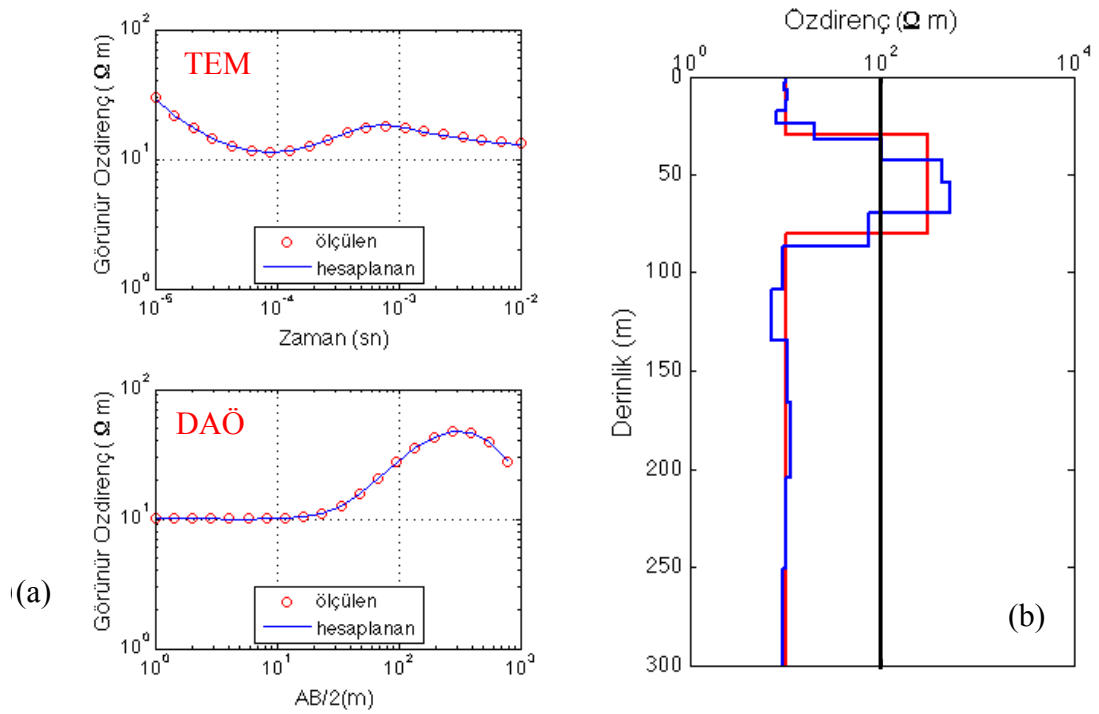
Şekil 5.10 : (a) K tipi yer modeli için oluşturulan yapay TEM verisi ve bu model için hesaplanan kuramsal eğri (düz mavi çizgi), **(b)** Ters çözüm sonucunda elde edilen yer modeli.

Her iki yöntemin ayrı ayrı ters çözümünden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, DAÖ verisinin dirençli katmanlar üzerindeki ayrımlılık yeteneğinin TEM yöntemine göre daha iyi olduğu modellerden izlenebilmektedir. Ancak iletken katmanların ($\rho_1 = 10 \Omega m$ ve $\rho_3 = 10 \Omega m$) çözümünde TEM verisinden elde edilen yer modeli, gerçek yer modeli ile daha iyi bir uyum içerisindedir. DAÖ yönteminin dirençli katmanlara duyarlılığı ve TEM yönteminin iletken katmanlara duyarlılığı bir araya geldiğinde,

Şekil 5.12’de görülen gerçek modele daha yakın yer modeli elde edilmiştir. 8. yineleme sonucunda RMS hata değeri 0.009 bulunmuştur.



Şekil 5.11 : (a) K tipi yer modeli için oluşturulan yapay DAÖ verisi ve bu model için hesaplanan kuramsal eğri (düz mavi çizgi), (b) Ters çözüm sonucunda elde edilen yer modeli.



Şekil 5.12 : (a) K tipi yapay TEM ve DAÖ verileri ve bu model için hesaplanan kuramsal eğri (düz mavi çizgi), (b) TEM ve DAÖ verileri ortak ters çözümü sonucunda elde edilen yer modeli.

Yapay verilerle gerçekleştirilen testler, ters çözüm sonucunda elde edilen OCCAM yer modellerinin, yeriçinin derinlikle değişen iletkenlik dağılımını başarıyla temsil ettiğini göstermektedir. Dördüncü bölümünde denklem (4.17) ile verilen OCCAM matrisi çözüm vektörüne eklenmesiyle, algoritma belirlenen katmanlar arasındaki özdirenç geçişlerinin ani olmasına izin vermemektedir. Klasik ters çözümdeki köşeli ve sınırlı sayıdaki tabakalı (genel olarak 2 yada 3) ortamın aksine; çok sayıda ince katman ile temsil edilen yer modellerinde katmanlar arasındaki özdirenç geçişleri rahatlıkla izlenebilmektedir. Klasik çözümde tek bir katmanın özdirenç değeri OCCAM çözümünde sürekli bir eğri gibi elde edilmektedir. Bu yumuşak görünüm özellikle sedimanter ortamlarda yer altı yapısını daha gerçekçi bir biçimde ortaya koymaktadır.

6. ÖLÇÜLEN VERİLERİN TERS ÇÖZÜMÜ; TUZLU SU GİRİŞİMİ PROBLEMİ

Bu bölümde, Çanakkale-Dardanos bölgesinde tuzlu su girişiminin araştırılması amacıyla ölçülen TEM verilerinin OCCAM ters çözümüyle değerlendirilmesi ile elde edilen ilk sonuçlar sunulmaktadır.

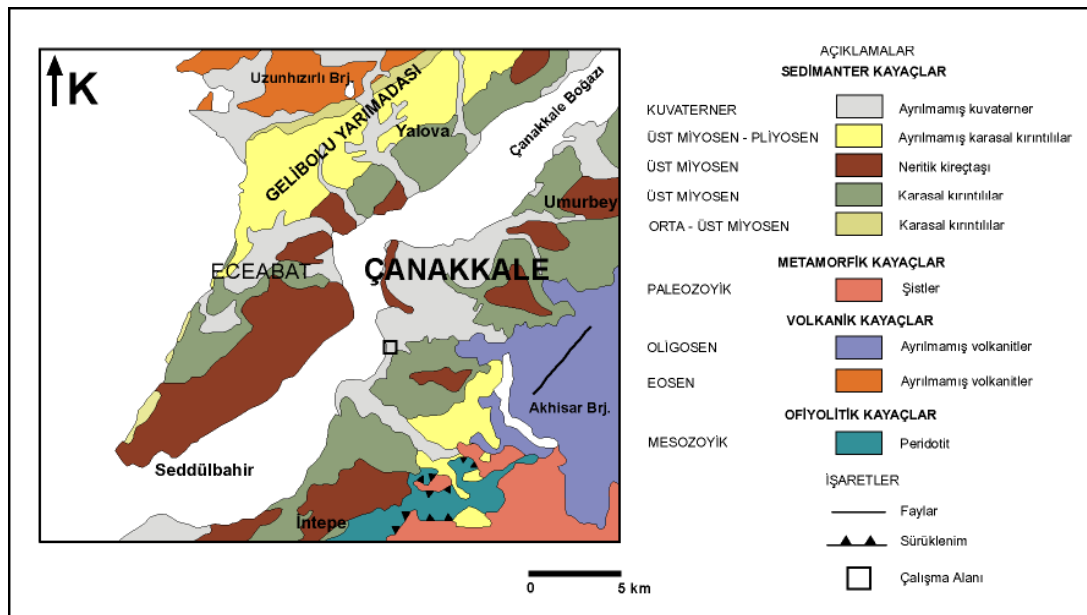
Yeraltı sularının toplandığı akiferlerdeki yeraltı su tablası genellikle topoğrafyaya bağlı bir hidrolik eğimle denize ulaşmaktadır. Ancak denize yakın akiferlerde yeraltından fazla miktarda ve devamlı olarak su çekilmesi ile karadan denize doğru hidrolik eğim yön değiştirmekte, deniz suları akiferlere doğru sokulmaktadır. Elektrik ve elektromanyetik yöntemlerin tatlı su-tuzlu su girişim sınırlarının haritalanmasında etkin yöntemler olduğu çeşitli araştırmacılar tarafından ortaya konmuştur (Fitterman ve Stewart, 1986; Hoekstra ve Blohm, 1990; Goldman ve diğ., 1991; Yang ve diğ., 1999).

Bu çalışmada, geliştirilen OCCAM ters çözüm algoritması ile değerlendirilmek üzere Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Dardanos yerleşkesinde tuzlu su girişiminin saptanması amacıyla 2 profilde, 16 noktada merkezi ilmek (central loop) ve tek ilmek (single loop) ölçüm düzenekleri kullanılarak TEM ölçümleri yapılmıştır (Şekil 6.4). TEM ölçümleri SIROTEM Mk 3 cihazı kullanılarak $50 \times 50 \text{ m}^2$ olan kare vericiler kullanılarak yapılmıştır. Ölçümlerde sinyal/gürültü oranını arttırmak için, ölçülen geçici (transient) sinyallere yığma (64-128) işlemi uygulanmış ve farklı kazanç (gain) ayarları için ölçümler tekrarlanmıştır. Ölçülen TEM verileri ortalama olarak 0.15-5 ms arasında ve nV/A (Nanovolt/Amper) cinsindendir. Bu değerler alıcı alanına normalize edilerek $V/(A \cdot m^2)$ birimine dönüştürülmüştür. Elde edilen TEM verileri ile DAÖ verilerinin bağımsız ve ortak OCCAM ters çözümü ile değerlendirilebilmesi için, 7 noktada da DAÖ verisi ölçülmüştür (Şekil 6.4). Bu bölümde, sadece Profil 1'e ait TEM verileri için değerlendirme sonuçları verilmektedir. Çizelge 6.1'de çalışma alanında yapılan TEM verilerinin özellikleri toplu şekilde sunulmaktadır.

Çizelge 6.1 : TEM ölçümleri özellikleri

Ölçü Düzenekleri	Merkezi İlmek ve Tek İlmek
İstasyon sayısı	16
Profil sayısı	2
İlmek boyu	50×50
Zaman aralığı	0.15-5 ms
Büyütme (Gain)	0.1, 1, 10, 100
Yığılma (Stack)	64-128

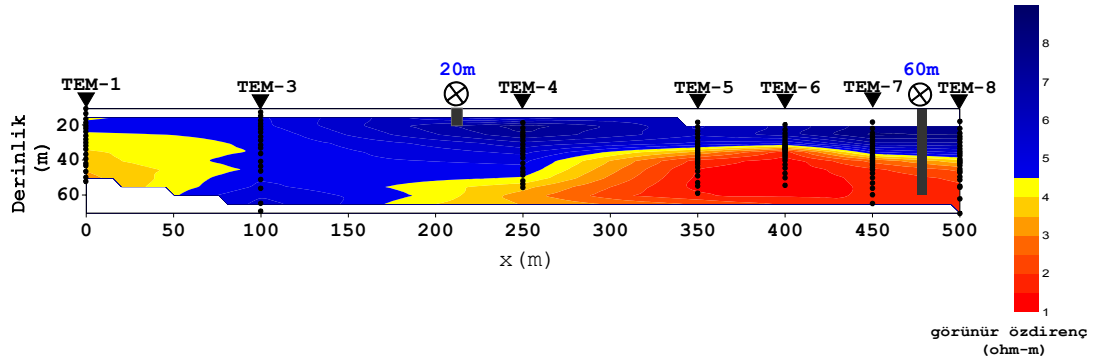
İnceleme alanının jeolojisine bakıldığında, Kuvaterner yaşlı alüvyon ve güncel çökeller alana hakimdir (Şekil 6.1). Çalışma alanında bilgi veren iki adet su kuyusu bulunmaktadır (Şekil 6.4). Bugün 60 m derinliğindeki su kuyusundan artık tuzlu çekilmesi nedeniyle, kuyu işlevini yitirmiş durumdadır. Ancak, 20 m derinliğe sahip kuyudan tatlı su çekilmeye devam edilmektedir.



Şekil 6.1 : Çanakkale ve yakın çevresi jeoloji haritası. (MTA (2002)'den uyarlanmıştır).

Profil 1'e ait TEM verileri için ters çözüm sonuçları ile karşılaştırma amaçlı hazırlanan etkin öz direnç-etkin derinlik dönüşüm kesitinde (Şekil 6.2), ölçülen 8 TEM noktasında da çok küçük bir öz direnç değişimi izlenmektedir. 1 ile 10 Ωm arasında değişen değerler, profilde elde edilmesi beklenen bir sonucu yansıtmaktadır.

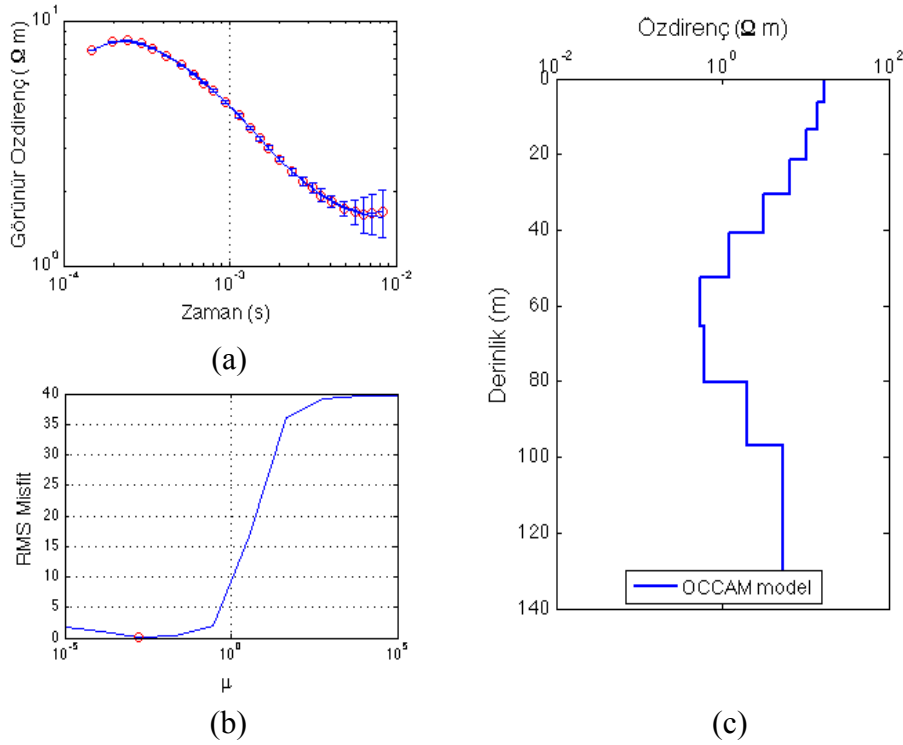
1-5 Ωm arasında değişen ve yaklaşık 20 metreden aşağıda yeralan değerlerin tuzlu suyu sembolize ettiği düşünülmektedir.



Şekil 6.2 : Çanakkale TEM verilerinin etkin öz direnç-etkin derinlik dönüşüm kesiti.

TEM-3 ile TEM-4 noktaları arasında bulunan ve halen tatlı su çekilen 20 metre derinliğindeki su kuyusunun yaklaşık 10 Ωm değerleri arasında yer alması bu derinlikte tuzlu su bulunmadığını kanıtlamaktadır. Ancak TEM-7 ile TEM-8 arasında bulunan ve 20 metrelik kuyudan yaklaşık 250 metre uzaklıktaki 60 metre derinliğindeki kuyudan tuzlu su çekilmesi durumunun bu kesitte açık olarak izlendiği görülmektedir. Yaklaşık 1-5 Ωm arasında öz direnç değerleri ile 25 metreden daha derinlerde (kırmızı ile sembolize edilmiştir) tuzlu su içeren katman bulunduğu kesitten net olarak izlenmektedir. Yaklaşık 500 metrelik Profil 1 verisi etkin derinlik – etkin öz direnç kesitinde sağ bölümde kırmızı renk ile sembolize edilen tuzlu suyun, 60 metrelik kuyudan sürekli su çekilmesi sonucu yukarıya doğru yükseldiği görülmektedir. Çalışma alanında öz direnç kontrastı oldukça az olmasına rağmen, tuzlu suyun içerilere doğru sokulduğu kesitten rahatlıkla izlenebilmektedir. Diğer taraftan girişimin nereye kadar devam ettiğini söyleyebilmek için daha fazla ölçüm noktasına gereksinim duyulmaktadır.

Profil 1'e ait TEM verilerinin ters çözümü sonucunda elde edilen bir boyutlu OCCAM modelleri toplu olarak Şekil 6.5'te görülmektedir. Ters çözümde kullanılan katman sayısı 10-13 arasında değişmektedir (Şekil 6.3 ve Şekil 6.5). Örneğin, TEM-7 noktasında yapılan TEM ölçümü için ters çözümde kullanılan katman sayısı 12'dir (Şekil 6.3). Başlangıç modeli olarak tekdüze bir yer modeli seçilmiş, çalışma alanına ait görünür öz direnç değerlerinin ortalaması alınarak, 5 Ωm olarak belirlenmiştir. Yineleme işleminin durdurulması için, ardışık iki yineleme arasındaki uyum farkının (RMS hata) birbirine çok yakın olması ve bu farkın belirli bir değerin (1'den küçük) altına inmesi kriterleri esas alınmıştır.



Şekil 6.3 : TEM-7 noktasına ait verilerin **(a)** ters çözümü ve **(c)** bulunan yer modeli. **(b)** Modele ait RMS hata eğrisi. Son yinelemeye ait Lagrange çarpanı ve en küçük rms değeri eğri üzerinde yuvarlak içi boş nokta ile işaretlenmiştir.

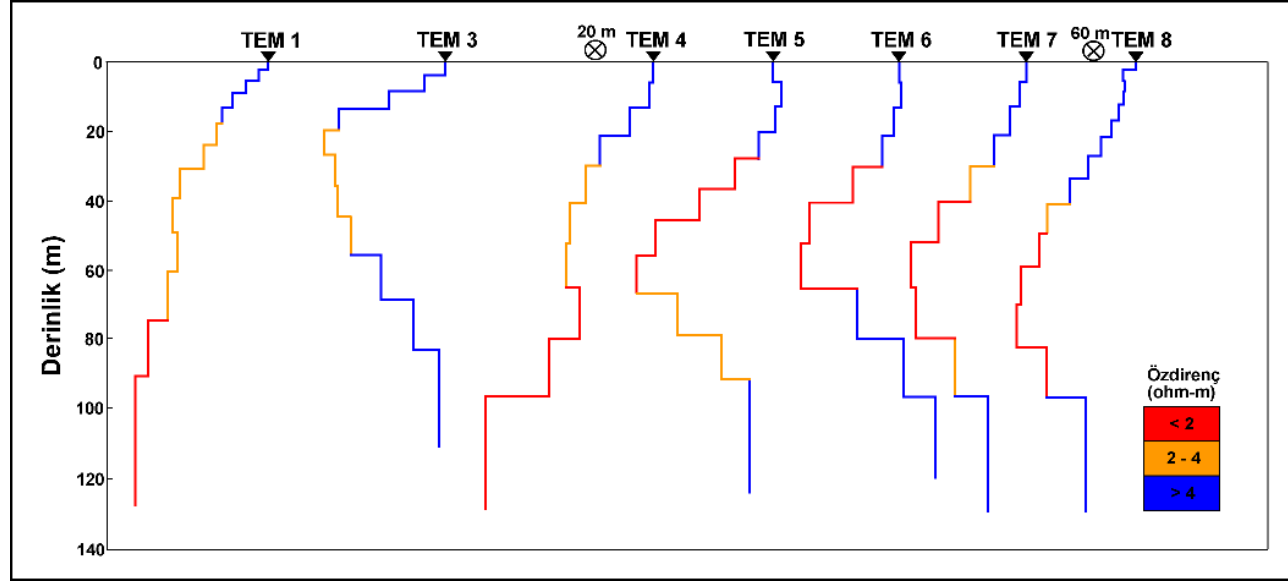
Bu koşullar altında, 5-6 yineleme sonucunda Şekil 6.5'te sunulan yer modelleri elde edilmiştir. Bir boyutlu ters çözümünden elde edilen yer elektrik kesiti Şekil 6.6'da sunulmaktadır. Yer modellerinde, katmanlar arasındaki öz direnç değişimlerinin ani olmasına izin vermeyen algoritma ile 100-120 metre derinliğe kadar yeriçinin öz direnç dağılımının olası sınırları sürekli ve yumuşatılmış bir şekilde görüntülenmektedir (Şekil 6.5). Tuzlu su içeren katman, 40 metrelerden başlayan ve 60 metre derinliğe kadar devam eden düşük öz direnç değerleriyle (1-5 Ωm) TEM-5, TEM-6, TEM-7 ve TEM-8 verilerinin ters çözümü sonucunda elde edilen yer modellerinden takip edilebilmektedir. Şekil 6.6'da sunulan kesitte, etkin öz direnç-etkin derinlik kesitinden farklı olarak TEM-3 ve TEM-4 noktalarında daha düşük öz direnç değerleri elde edilmiş ve böylece düşük öz dirence sahip tuzlu su içeren katmanın sürekliliği kıyıda itibaren rahatlıkla izlenebilmektedir.

Bilimsel yazında yeralan uygulamalarda elde edilen tuzlu su içeren katman öz dirençlerinin bu değer aralığında olduğu düşünülürse, bu bölge için yapılan değerlendirme çalışmalarında gerçekçi sonuçlar elde edildiği düşünülmektedir. Ancak, profil boyunun 1-2 km'ye uzatılması durumunda tuzlu su içermeyen

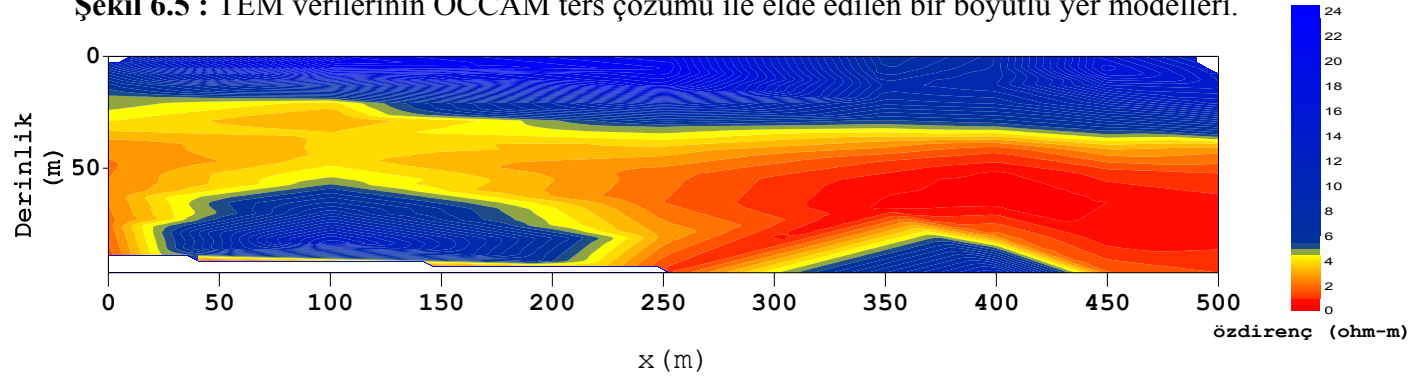
katmanların elde edilmesi durumunda sonuçların daha gerçekçi olacağı ortadadır. Bunun yanısıra, daha geniş vericiler kullanılarak yapılacak ölçümlerle daha derine inilmesi sonucu elde edilecek sonuçların sorunu çözümlemede daha açık bilgiler vereceği düşünülmektedir.



Şekil 6.4 : Çanakkale, Dardanos yerleşkesinde TEM ve DAÖ ölçüm noktalarını ve çalışma alanında açılmış 2 adet su kuyusunun yerlerini gösteren lokasyon haritası.



Şekil 6.5 : TEM verilerinin OCCAM ters çözümü ile elde edilen bir boyutlu yer modelleri.



Şekil 6.6 : TEM verilerinin OCCAM ters çözümü sonucunun kesit olarak sunu

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Günümüzde elektrik ve elektromanyetik yöntem verilerinin yorumlanmasında iki ve üç-boyutlu modelleme çalışmalarına ağırlık verilmesine rağmen, bir boyutlu ters çözüm algoritmaları önemini korumaktadır. Bir boyutlu modelleme çalışmalarında nitel sonuçlara ulaşmak için yaygın olarak klasik ters çözüm algoritmaları tercih edilmektedir. Bu algoritmalar başlangıç modeline bağımlı olup, gerçekçi olmayan başlangıç parametrelerinin kullanılması durumunda yer yapısı ile ilgili yanıltıcı sonuçlar verebilmektedir. Bununla birlikte, kullanılan katman sayısının artırılması, çözüm sonucunda gerçekçi olmayan modellerin ortaya çıkmasına neden olabilmektedir.

Başlangıç modelinden bağımsız ve katman sayısı ile ilgili ön-bilgiye (a priori-information) ihtiyaç duymayan OCCAM algoritması, yeriçinin iletkenlik dağılımının olası sınırlarının görüntülenmesinde, klasik ters çözüme bir alternatif olarak sunulmaktadır. Basit tabakalı modelde (the simple layered model), katmanlar arasındaki özdirenç geçişleri süreksiz ve köşeli yapılar ile temsil edilirken; OCCAM modelde (the smooth model) çok sayıda ince katman kullanılarak, katmanlar arasındaki özdirenç geçişleri sürekli ve yumuşatılmış bir biçimde verilebilmektedir.

Geçici elektromanyetik ve doğru akım özdirenç yöntemleri karşılaştırıldıklarında; doğru akım özdirenç yöntemi dirençli katmanlara daha duyarlı iken geçici elektromanyetik yöntemi iletken katmanların belirlenmesinde daha etkin bir rol oynamaktadır. Bu nedenle aynı fiziksel parametreye duyarlı bu yöntemlerin ortak değerlendirilmesi sonucunda çözümü geliştirmesi beklenmektedir.

Bu tez kapsamında, geçici elektromanyetik ve doğru akım özdirenç yöntem verilerinin OCCAM ters çözümünü gerçekleştiren bir yazılım geliştirilmiştir. Geçici elektromanyetik yöntemi için düz çözüm algoritmasında Gaver-Stehfest tekniği, doğru akım özdirenç yöntemi için Pekeris yineleme bağıntısı kullanılmıştır. MATLAB ortamında geliştirilen program, veri işleme, görsel üstünlükler ve ters çözüm sonuçlarının kontrolü açısından etkin bir programdır.

Ters çözüm sonuçlarının irdelenmesi ve ortak ters çözümün sonuçlar üzerindeki etkisinin tartışılabilmesi amacıyla öncelikle geliştirilen yazılım A, Q, H ve K tipi yer modelleri için oluşturulan yapay verilerle test edilmiştir. Testlerde, bağımsız ve ortak ters çözüm sonuçlarından elde edilen OCCAM modeller, yeriçinin derinlikle değişen öz direnç dağılımını sürekli ve gerçekçi bir biçimde başarıyla yansıtmaktadır. Başlangıç modelinden bağımsız OCCAM ters çözümü, yaklaşık 5 iterasyonda gerçek modele yakınsamaktadır. H tipi yer modelinde, geçici elektromanyetik verileri kullanılarak yapılan ters çözüm sonucu iletken katmanın belirlenmesinde, doğru akım öz direnç sonucuna göre daha iyi sonuç vermiştir. K tipi yer modeli için yapılan ters çözüm sonucunda, doğru akım öz direnç yönteminin dirençli katmanlar üzerindeki ayrımlılık yeteneği OCCAM modelde kendini göstermektedir. Diğer taraftan, OCCAM modelde düşük ve yüksek öz dirençli bölgeler basitleştirilmiş ama kabul edilebilir sınırlar içerisinde, gerçek yer yapısını yansıtabilmektedir.

Tez kapsamında geliştirilen programın gerçek verilerle test edilmesi amacıyla Çanakkale-Dardanos yerleşkesindeki tuzlu su girişi problemi incelenmiştir. Tez kapsamında çalışma alanında ölçülen geçici elektromanyetik verileri geliştirilen OCCAM ters çözüm programı ile değerlendirilmiştir. Çalışma alanına ait genel ve hızlı bir değerlendirme yapılması aynı zamanda bir boyutlu değerlendirmeden elde edilen sonuçlarla karşılaştırmak için etkin derinlik-etkin öz direnç kesitinden daha düşük öz direnç değerleriyle (1-5 Ωm) tuzlu su girişiminin saptanabildiği açıkça görülmektedir. Çalışma alanında, işlevselliğini yitirmiş olan 60 metrelik kuyudan sürekli su çekilmesi sonucu tuzlu suyun yüzeye doğru çıktığı kesitte net olarak görülmektedir. OCCAM ters çözümünden elde edilen yer modelleri, tabakalar arasındaki öz direnç geçişlerini minimize ederek, sürekli ve gerçekçi bir şekilde yer yapısını temsil etmektedir. Modellerde tuzlu su girişi için elde edilen öz direnç değerleri, etkin derinlik-etkin öz direnç dönüşümü değerlendirme sonucuna göre daha düşük değerler göstermektedir (1-5 Ωm).

KAYNAKLAR

- Alumbaugh, D.L. and Newman, G.A.,** 2000. Image appraisal for 2-D and 3-D electromagnetic inversion, *Geophysics*, **65**, 1455-1467.
- Anderson, W. L.,** 1979. Numerical integration of related Hankel transforms of orders 0 and 1 by adaptive digital filtering, *Geophysics*, **44**, 1287-1305.
- Árnason, K.,** 1995. A consistent discretization of the electromagnetic field in conducting media and application to the TEM Problem. In: *Proceedings of the First International Symposium on Three-Dimensional Electromagnetics*, 167-180.
- Auken, E., Jørgensen, F. and Sørensen, K.I.,** 2003. Large-scale TEM investigation for groundwater, *Exploration Geophysics*, **34**, 188-194.
- Auken, E., Christiansen, A.V., Jacobsen L.H and Sørensen, K.I.,** 2008. A resolution study of buried valleys using laterally constrained inversion of TEM data, *Journal of Applied Geophysics*, **65**, 10-20.
- Best, M.E., Duncan, P., Jacobs, F.J. and Scheen, W.L.,** 1995. Numerical modeling of the electromagnetic response of three-dimensional conductors in a layered earth, *Geophysics*, **50**, 665-676.
- Buselli, G. and O'Neill, B.,** 1977. SIROTEM: A new portable instrument for multichannel transient electromagnetic measurements, *Exploration Geophysics*, **8**, 82-87.
- Buselli, G., Barber, C., Davis, G.B. and Salama, R.B.,** 1990. Detection of groundwater contamination near waste disposal sites with transient electromagnetic and electrical methods. In: S.H. Ward, Editor, *Geotechnical and Environmental Geophysics*, Vol. 2, Society of Exploration Geophysicists, 27-39
- Carrasquilla, A.A.G. and Ulugergerli E.U.,** 2006. Evaluation of the transient electromagnetic geophysical method for stratigraphic mapping and hydrogeological delineation in Campos basin, Brazil, *Revista Brasileira de Geofísica*, **24**, 333-341.
- Chen, C.-S.,** 1999. TEM Investigations of aquifers in southwest coast of Taiwan, *Ground Water*, **37**, 890-893.
- Christensen, N.B.,** 1995. 1D Imaging of central loop transient electromagnetic soundings, *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, **1**, 53-66.
- Constable, S. C., Parker, R. L. and Constable, C. G.,** 1987. Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth model from electromagnetic sounding data, *Geophysics*, **52**, 289-300.
- Danielsen, J.E., Auken, E., Jørgensen, F., Søndergård, V. and Sørensen, K.I.,** 2003. The application of the transient electromagnetic method in hydrogeological surveys, *Journal of Applied Geophysics*, **53**, 181-198.

- deGroot-Hedlin, C. and Constable, S.,** 1990. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data, *Geophysics*, **55**, 1613-1624.
- Duque, C., Calvache, M.L., Pedrera, A., Martín-Rosales, W. and López-Chicano, M.,** 2008. Combined time domain electromagnetic soundings and gravimetry to determine marine intrusion in a detrital coastal aquifer (Southern Spain), *Journal of Hydrology*, **349**, 536-547.
- Erguvanli, K., ve Yüzer E.,** 1984. Yer altı Suları Jeolojisi (Hidrojeoloji), İTÜ Kütüphanesi Sayı: 967, Özarkadaş Matbaası, İstanbul, 340 sf.
- Fitterman, D.V. and Stewart, M.T.,** 1986. Transient electromagnetic sounding for groundwater. *Geophysics*, **51**, 995–1005
- Fitterman, D.V., Frischknecht, F.C., Mazzella, A.T. and Anderson, W. L.,** 1990, Example of transient electromagnetic soundings in the presence of oil-field pipes, In: S.H. Ward, Editor, *Geotechnical and Environmental Geophysics*, Vol. 2: Society of Exploration Geophysicists, 79–88.
- Frischknecht, F.C. and Raab, P.V.,** 1984. Time-Domain Electromagnetic Soundings at the Nevada Test Site, Nevada, *Geophysics*, **49**, 981-992.
- Fugro Instruments,** 2002. Time domain electromagnetic transmitter/receiver system, *SIROTEM MK 3 User's Manual*, Sydney, Australia.
- Goldman, M., Gilad, D., Ronen, A. and Melloul, A.,** 1991. Mapping of seawater intrusion into the coastal aquifer of Israel by the time domain electromagnetic method, *Geoexploration*, **28**, 153-174.
- Gomez-Trevino, E. and Edwards, R. N.,** 1983. Electromagnetic soundings in the sedimentary basin of southern Ontario-A case history, *Geophysics*, **48**, 311-326.
- Haber, E., Ascher, U.M. and Oldenburg, D.W.,** 2004. Inversion of 3D electromagnetic data in frequency and time domain using an inexact all-at-once approach, *Geophysics*, **69**, 1216.
- Hoekstra, P. and Blohm, M.W.,** 1990. Case histories of time-domain electromagnetic soundings in environmental geophysics. In: S.H. Ward, Editor, *Geotechnical and Environmental Geophysics*, Vol. 2: Society of Exploration Geophysicists, 1–15.
- Holladay, J.S., Doll, W.E., Beard, L.P., Lee, L.C.L. and Bell, D.T.,** 2006. UXO time-constant estimation from helicopter-borne TEM data, *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, **11**, 43-52.
- Jorgensen, F., Sandersen, P.B.E., Auken, E., Lykke-Andersen, H. and Sorensen, K.,** 2005. Contributions to the geological mapping of Mors, Denmark – A study based on a large-scale TEM survey, *Bulletin of the Geological Society of Denmark*, **52**, 53-75.
- Kafri, U., Goldman, M. and Lang, B.,** 1997. Detection of subsurface brines, freshwater bodies and the interface configuration in between by the time domain electromagnetic (TDEM) method in the Dead Sea rift, Israel, *Environmental Geology*, **31**, 42–49.

- Kafri, U. and Goldman, M.,** 2005. The use of the time domain electromagnetic method to delineate saline groundwater in granular and carbonate aquifers and to evaluate their porosity, *Journal of Applied Geophysics*, **57**, 167-178.
- Kafri, U., Goldman, M., Lyakhovsky, V., Scholl, C., Helwig, S. and Tezkan, B.,** 2007. The configuration of the fresh-saline groundwater interface within the regional Judea group carbonate aquifer in Northern Israel between the Mediterranean and the Dead Sea base levels as delineated by deep geoelectromagnetic soundings, *Journal of Hydrology*, **344**, 123-134.
- Kafri, U., Goldman, M., Levi, E.,** 2008. The relationship between saline groundwater within the Arava Rift Valley in Israel and the present and ancient base levels as detected by deep geoelectromagnetic soundings, *Environmental Geology*, **54**, 1435-1445.
- Kalscheuer, T., Commer, M., Helwig, S. L., Hördt, A. and Tezkan, B.,** 2007. Electromagnetic evidence for an ancient avalanche caldera rim on the south flank of Mount Merapi, Indonesia, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **162**, 81-97.
- Kaufman, A. A. and Keller G. V.,** 1983. Frequency and Transient Soundings, *Elsevier Publishing*.
- 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, Vol. 1, Resistivity Sounding Measurements, *Elsevier Publishing*.
- MacNeil, R.E, Sanford, W.E., Connor, C.B., Sandberg S.K. and Diez, M.,** 2007. Investigation of the groundwater system at Masaya caldera, Nicaragua, using transient electromagnetics and numerical simulation, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **166**, 217-232.
- McNeill, J. D.,** 1990. Use of electromagnetic methods for groundwater studies. in Ward SH, Editor, *Geotechnical and Environmental Geophysics*, Vol. 1: Society of Exploration Geophysicists., 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., Fontes, S.L., Oliviera, M.F.B., Lima, J.P.R., Ulugergerli, E.U. and Carrasquilla, A.A.,** 1999. Regional aquifer mapping using combined VES-TEM-AMT/EMAP methods in the Semiarid eastern margin of Parnaiba Basin, Brazil, *Geophysics*, **64**, 337-356.
- Menke, W.,** 1984. Geophysical data analysis: discrete inverse theory, *Academic Press*.
- Mills, T., Hoekstra, P., Blohm, M. and Evans, L.,** 1988. Time domain electromagnetic soundings for mapping sea-water intrusion in Monterey County, California, *Groundwater*, **26**, 771-782.
- Nielsen, L., Jørgensen, N.O. and Gelting, P.,** 2007. Mapping of the freshwater lens in a coastal aquifer on the Keta Barrier (Ghana) by transient electromagnetic soundings, *Journal of Applied Geophysics*, **62**, 1-15.

- Qian, W., Jeffrey, G. T., Scott, H. J., Richard, L. and Dennis, A.,** 1997. Inversion of airborne electromagnetic data using an OCCAM technique to resolve a variable number of layers. In: *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Environmental and Engineering Problems (SAGEEP)*, 735-739.
- Raiche, A. P.,** 1984. The effect of ramp function turn-off on the TEM response of layered earth, *Exploration Geophysics*, **15**, 37-41.
- Spies, B. R.,** 1983. Recent developments in the use of surface electrical methods for oil and gas exploration in the Soviet Union, *Geophysics*, **48**, 1102-1112.
- 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 Macnae, J.C.,** 1997. Electromagnetic Trends – Spatial, Temporal and Economic, in *Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration*, ed. A.G. Gubins, 489-496.
- Sugeng, F.,** 1998. Modelling the 3D TDEM response using the 3D full-domain finite-element method based on the hexahedral edge-element technique, *Exploration Geophysics*, **29**, 615–619.
- Tezkan, B., Mufor, H., Helwig, S. and Bergers, R.,** 2007. Time domain electromagnetic (TEM) measurements on a buried subglacial valley in Northern Germany, in *Proceedings of Near Surface 2007*, 13th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, A17.
- Vedanti, N., Srivastava, R., P., Sagode, J., and Dimri, V., P.,** 2005. An efficient 1D OCCAM's inversion algorithm using analytically computed first- and second-order derivatives for DC resistivity soundings, *Computers & Geosciences*, **31**, 319-328.
- Ward, S. H. and Hohmann, G. W.,** 1988. Electromagnetic theory for geophysical applications, in *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, Vol 1, M.N. Nabighian, Editor, Society of Exploration Geophysicists, 131-311.
- 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.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Duygu Kıyan

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul, 03.02.1983

Adres: İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği
Bölümü, 34469 Ayazağa – İstanbul

Lisans Üniversitesi: İstanbul Teknik Üniversitesi

Yayın Listesi:

- **Kıyan, D.**, Ozurlan, G. & Kocaoglu, A., Interpretation of transient electromagnetic and direct electric current resistivity data using occam inversion, *The 18th International Geophysical Congress and Exhibition of Turkey*, 14-17 October, MTA Kültür Sitesi, Ankara, Turkey, paper no:20.
- **Kıyan, D.**, Özurlan, G., Geçici elektromanyetik ve doğru akım öz direnç verilerinin bağımsız ve ortak ters çözümü, *Manyetotellürik ve Jeoelektrik Çalıştayı*, 13-14 Kasım, İTÜ, Maden Fakültesi, Maslak.