

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ÖZDİRENÇ TOMOGRAFİ
VERİLERİNİN SONLU ELEMANLAR
YÖNTEMİYLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Elif KONDU

Ekim, 2022

İZMİR

ELEKTRİK ÖZDİRENÇ TOMOGRAFİ VERİLERİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elif KONDU

Ekim, 2022

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SONUÇ FORMU

Elif KONDU tarafından, **Doç. Dr. Emre TİMUR** yönetiminde hazırlanan “**ELEKTRİK ÖZDİRENÇ TOMOGRAFİ VERİLERİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE DEĞERLENDİRİLMESİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Emre TİMUR

Yönetici

Dr. Öğr. Üyesi Petek SINDIRGI

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Züheyr KAMACI

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Okan FISTIKOĞLU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Bu tezin gerçekleŐtirilme aşamasında, iki yıl boyunca kıymetli bilgilerini benden esirgemeyen, kullandığı her kelimenin hayatıma kattığı önemini asla unutmayacağım sayĐı değer danıŐman hocam Doç. Dr. Emre TİMUR' a, veri toplama aşamasında kıymetli bilgi, tecrübe ve zamanını paylaŐan, destek ve yardımlarını esirgemeyen Zülfikar ERHAN' a, çalışma süresince tüm zorlukları benimle göğüsleyen, hayatımın her evresinde bana destek olan değerli aileme sonsuz teŐekkürlerimi sunarım.

Elif KONDU

ELEKTRİK ÖZDİRENÇ TOMOGRAFİ VERİLERİNİN SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİYLE DEĞERLENDİRİLMESİ

ÖZ

Litolojik birimlerin tortul ortamlarda ayrışması iki-boyutlu elektrik öz direnç tomografisinde var olan zorluklardan biridir. Jeolojik yorumlama yapılırken genel olarak elde edilen öz direnç kesiti görsel olarak incelenmektedir. Net bir şekilde sınırların oluşturulması amacıyla geliştirilmiş çeşitli ters-çözüm yöntemleri mevcuttur fakat bu yöntemler sadece çözüme yakın bir başlangıç modeli sağlanabildiği takdirde başarıya ulaşmaktadır. Bu anlamda yapılandırılmış modellerin gerçekleştirilmesinde hibrit genetik algoritmalar kullanılmaktadır. Bir kontrol noktasındaki bir birimin sıfır kalınlığı, ünitenin o kontrol noktasında bulunmadığı anlamına gelir. Yapılandırılmamış model ağının ölçüm süresini azalttığı ve bilinmeyen parametre sayısını birkaç onla sınırlaması sebebiyle önerilen parametreleştirme yöntemi, iki boyutlu belirli bir esneklik problemi için genetik algoritmalar oluşturur. Bu tez çalışmasında Magnesia arkeolojik kazı alanında şehir surlarının devamlılığının araştırılması amacı ile toplanan elektrik öz direnç tomografi verileri MATLAB tabanlı ELRIS2D yazılımında değerlendirilerek modellerin yanıtlarının hesaplanma zamanı azaltılmıştır. Ayrıca toplanan veriler EarthImager programı ile de değerlendirilip, her iki programdan elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Yapılan öz direnç çalışmaları sonucunda bölgede aranan olası sur yapılarının kalıntılarına ait anomaliler saptanmış ve modellenmiştir.

Anahtar kelimeler: Arkeoloji, genetik algoritma, modelleme, öz direnç.

EVALUATION OF ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY DATA BY USING FINITE ELEMENT METHOD

ABSTRACT

The separation of lithological units in sedimentary environments is one of the difficulties that exist in two-dimensional electrical resistivity tomography. When conducting geological interpretation, the resistivity cross-section obtained in general is visually examined. There are various reverse-solution methods developed for the purpose of clearly establishing boundaries, but these methods are successful only if an initial model close to the solution can be provided. In this sense, hybrid genetic algorithms are used to implement structured models. The zero thickness of a unit at a checkpoint means that the unit is not located at that checkpoint. Due to the fact that the unstructured model network reduces the measurement time and limits the number of unknown parameters to a few tens, the proposed parameterization method creates genetic algorithms for a specific two-dimensional flexibility problem. In this thesis study, electrical resistivity tomography data collected for the purpose of investigating the continuity of the city walls in the Magnesia archaeological excavation area were evaluated in MATLAB-based ELRIS2D software and the time for calculating the responses of the models was reduced. In addition, the collected data were evaluated with the EarthImager program and the results obtained from both programs were evaluated by comparing. As a result of the resistivity studies carried out, anomalies belonging to the remains of possible fortification structures searched in the region were detected and modeled.

Keywords: Archaeology, genetic algorithm, modelling, resistivity.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ.....	x
SEMBOLLER LİSTESİ	xi
BÖLÜM BİR-GİRİŞ.....	1
BÖLÜM İKİ-ELEKTRİK ÖZDİRENÇ YÖNTEMİ.....	4
2.1 Elektrik Özdirenç Yöntemi	4
2.2 Kayaç ve Minerallerin Özdirençleri	8
2.3 Elektrik Özdirenç Yönteminde Kullanılan Dizilimler	10
2.3.1 Wenner Dizilimi	13
2.3.2 Wenner –Schlumberger Dizilimi	15
2.3.3 Dipol-dipol Dizilimi	16
2.3.4 Pol-pol Dizilimi	18
2.3.5 Pol-dipol Dizilimi	19
BÖLÜM ÜÇ-YAPI TABANLI MODELLEME.....	21
3.1 Ağ Tasarımı	22
3.1.1 Yapı-tabanlı Ağ Tasarımı	25
3.2 Düz Çözüm.....	31
3.3 Ters Çözüm	33
3.4 Model Parametreleştirme	35
3.4.1 Yapı-tabanlı Parametreleştirme	36
3.5 Melez Genetik Algoritmalar.....	38
BÖLÜM DÖRT- MAGNESIA ARKEOLOJİK ALANI VE JEOLojİK	
ÖZELLİKLERİ	42

4.1 Bölge Jeolojisi ve Jeofiziği.....	43
BÖLÜM BEŞ-DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR	45
5.1 Profil-1.....	45
5.2 Profil-2.....	47
5.3 Profil-3.....	48
5.4 Profil-4.....	49
5.5 Profil-5.....	54
5.6 Profil-6.....	56
BÖLÜM ALTI-SONUÇLAR.....	45
KAYNAKLAR	59

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Akım ve potansiyel çizgilerinin yarı sonsuz homojen ortamda dağılımı.	5
Şekil 2.2 Genel dört elektrot diziliminin gösterimi	11
Şekil 2.3 Wenner-Schlumberger, Wenner alpha, Wenner beta, Wenner gamma, Pol-Pol, PolDipol ve Dipol-Dipol elektrot dizilimleri ve geometrik faktörleri.	12
Şekil 2.4 Wenner-alfa (α) dizilimine ait duyarlık kesiti.....	14
Şekil 2.5 Wenner-beta (β) dizilimine ait duyarlık kesiti.	14
Şekil 2.6 Wenner-gama (γ) dizilimine ait duyarlık kesiti	15
Şekil 2.7 Wenner-Schlumberger dizilimine ait duyarlık kesiti	16
Şekil 2.8 Dipol-dipol dizilimine ait duyarlık kesiti.....	17
Şekil 2.9 Pol-pol dizilimine ait duyarlık kesiti	18
Şekil 2.10 Pol-dipol dizilimine ait duyarlık kesiti	19
Şekil 3.1 Yapısal olmayan, (b) Yapısal ve (c) hibrit sonlu eleman ağları	24
Şekil 3.2 a). Birim karenin dört köşesi ve iki alt bölge arasındaki sınırı tanımlayan noktalar kümesi, b). Verilen noktaların Delaunay üçgenlemesi	26
Şekil 3.3 Üçgen kalitesi ölçütüne göre oluşturulan ağ iyileştirmesi	28
Şekil 3.4 a) Üç birimden oluşan iki-boyutlu yer modeli, b) ilksel noktaların Delaunay üçgenlemesi, c) yapı-tabanlı model ağı	30
Şekil 3.5 a) Yapı-tabanlı model ve model ağı, b). Dikdörtgen elemanlardan oluşturulan model ağı	31
Şekil 4.1 Ege Bölgesi'ndeki önde gelen antik kentler, Magnesia arkeolojik alanının konumu ve bölgenin topografyası.....	42
Şekil 4.2 Magnesia arkeolojik alanının konumu ve jeolojisi	43
Şekil 4.3 Jeofizik Araştırma Bölgelerini gösteren yer bulduru haritası	44
Şekil 5.1 Profil-1, ELRIS2D yazılımı ile değerlendirilmiş elektrik özdirenç tomografi kesitleri	46
Şekil 5.2 Profil-1, EarthImager yazılımı ile değerlendirilmiş elektrik özdirenç tomografi kesitleri	47
Şekil 5.3 Profil-2, ELRIS2D yazılımı ile değerlendirilmiş elektrik özdirenç tomografi kesitleri	48

Şekil 5.4 Profil-2, EarthImager yazılımı ile değerlendirilmiş elektrik özdirenç tomografi kesitleri	48
Şekil 5.5 Profil-3, ELRIS2D yazılımı ile değerlendirilmiş elektrik özdirenç tomografi kesitleri	49
Şekil 5.6 Profil-3, EarthImager yazılımı ile değerlendirilmiş elektrik özdirenç tomografi kesitleri	50
Şekil 5.7 Profil-4, ELRIS2D yazılımı ile değerlendirilmiş elektrik özdirenç tomografi kesitleri	50
Şekil 5.8 Profil-4, EarthImager yazılımı ile değerlendirilmiş elektrik özdirenç tomografi kesitleri	51
Şekil 5.9 Profil-5, ELRIS2D yazılımı ile değerlendirilmiş elektrik özdirenç tomografi kesitleri	52
Şekil 5.10 Profil-5, EarthImager yazılımı ile değerlendirilmiş elektrik özdirenç tomografi kesitleri	53
Şekil 5.11 Profil-6, ELRIS2D yazılımı ile değerlendirilmiş elektrik özdirenç tomografi kesitleri	54
Şekil 5.12 Profil-6, EarthImager yazılımı ile değerlendirmiş 6 profil elektrik özdirenç tomografi kesitleri	55
Şekil 5.13 ELRIS2D yazılımı ile değerlendirmiş 6 profil elektrik özdirenç tomografi kesitleri	56
Şekil 5.14 EarthImager yazılımı ile değerlendirmiş 6 profil elektrik özdirenç tomografi kesitleri	57

TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Bazı materyal ve kayaçların özdirenç değerleri.....	10



SEMBOLLER LİSTESİ

DAÖ	Doğru Akım Özdirenç
GA	Genetik Algoritma
İK	İşaretli Kısıtlar
LE	Lamarckian Evrim
ρ	Özdirenç
ρ_a	Görünür Özdirenç
RMS	Ortalama Karekök Hata



BÖLÜM 1

GİRİŞ

Doğru akım öz direnç (DAÖ) üzerinde iyi çalışılmış bir jeofizik yöntemdir ve genellikle mühendislik problemleri ve sığ jeofizik problemlerini çözmek için kullanılır. Bu yöntem ile ölçüm cihazlarının mevcut durumu ile veriler çok hızlı bir şekilde toplanabilme özelliğine sahiptir. Uygulanan diğer jeofizik yöntemlerle ortak olarak bu yöntemde de kısıtlı veri kullanarak yer içinin bir hacminde veya bir bölümünde fiziksel parametre değişimini belirli bir aralıkla ortaya çıkarmak için ayrıklaştırılması gerekmektedir.

Ayrıklaştırma, aynı zamanda bir ters-çözüm yöntemi aracılığıyla modelin çözülebilir parametreler kullanılarak tanımlanma işlemi şeklinde görülebilir. Doğru akım öz direnç yönteminde yer belirli sayıda küçük hücelere bölünür ve iki-boyutlu yer modelleri parametreleştirilir. Belirli direnç, yönüne dik olan ölçüm yönünde değişmemesi gerektiğinden, x-z düzlemi dikey ve yatay yönlerdeki değişken dikdörtgen elemanlara bölünür. Başka adı hücre tabanlı modelin parametrelendirilmesi olan bu yöntemde, hücrelerin konumu ters çözüm işlemi sırasında sabit kalır ve belirli direnç değerleri birkaç kez iyileştirilir ve son aşamada topraklamanın elektriksel yapısını gösteren bir kesit oluşturulur. Elektrik ve elektromanyetik yöntemler söz konusu olduğunda, hücre tabanlı model parametreleştirme çeşitli uyarlamalar ve değişiklikler ile birçok çalışmacı tarafından kullanılır hale gelmiştir (Candansayar, 2002).

Hücrelerle parametrelenmiş bir modelde, hücre direnci türevlere dayalı bir ters çözüm algoritması kullanılarak tahmin edilebilir (örneğin, en küçük kareler, en küçük düşüş, Gauss-Newton). Böyle bir sorun genellikle ciddidir ve küçük özdeğer sorunu nedeniyle çözüm durağan kabul edilmez. Çözümün matematiksel olarak durağan kabul edilmesi hücrelerin öz dirençlerinin bağlantılı bir şekilde çözülmesiyle elde edilebilir. Bunun tersi olduğunda son aşamada jeolojik bakımdan anlamlı bir kesit oluşturmak mümkün değildir. Yuvarlatılmış ya da düzgünleyicili ters-çözüm özel hedeflere yönelik sığ amaçlı (arkeolojik kalıntılar, depo ve gömülü kanal sistemleri

gibi) çalışmalarda başarılı sonuçlar görülebilir (Papadopoulos vd., 2006; Candansayar ve Başokur, 2001). Diğer taraftan bu algoritalarda cisim özellikleri çok yuvarlatılmıştır. (2008) Terziler ve Zhdanov (1999), keskin sınırlarla ayrılmış modelleri elde etmek için minimum gradient support yöntemine bazı uyarlamalar yapılmıştır.

Bu tez kapsamında Aydın ili Ortaklar Beldesi Tekinköy sınırları içinde bulunan Magnesia antik kazı alanında şehir surlarının devamlılığının araştırılması amacı ile 6 profil boyunca elektrik öz direnç tomografi verileri ölçülmüştür. Elde edilen veriler, İki-boyutlu yer elektrik modellerinin parametreleri kestirimi yapılırken kullanılan genetik işlemler, genetik algoritmalar ve evrim kuramlarının çeşitli birleşimleri ile oluşturulmuş olan ELRIS2D yazılımı ile değerlendirilmiştir. Ayrıca veriler EarthImager programıyla değerlendirilip her iki programdan elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

Christiansen ve Auken (2004) hücre tabanlı model parametreleştirmeye alternatif olarak katmanlı iki-boyutlu yer modellerini tavsiye etmişlerdir. Bu modeli, ölçüm profili boyunca düzenlenmiş birkaç düğüm noktasında tek boyutlu modellerin bir kombinasyonu olarak tanımlanmıştır. Doğrusal ara değer bulma yöntemiyle komşu düğümler arasında bulunan öz direnç değerleri hesaplanıp iki-boyutlu model ağındaki gerekli hücrelere atanır. Birden fazla birim için ortak olan dikdörtgen hücrelere, yarısından fazlasını içeren birim başına direnç verilir. Uygulanan yöntem ile parametreleştirilen modelin parametrelerini kestirebilmek amacıyla, Broyden (1965) yöntemi ile revize ederek, bir-boyutlu yaklaşım ile hesaplanan kısmi türevler düzeyini kullanmaya karar vermişlerdir. Bu yöntem, bazı kısıt ve önbilginin algoritmaya dahil olması ile olumlu sonuçlar getirmektedir. Bilhassa arazi verileri kullanılarak gerçekleştirilen deneyler, diğer bir yol ile ulaşılan jeolojik/jeofizik verinin algoritmaya dahil edilmesi gerektiğini göstermiştir. Doğru akım öz direnç yönteminde 2-B modellerin kuramsal cevaplarının analitik yöntemler kullanılarak hesaplanması mümkün olmadığı için sayısal bir yaklaşıma ihtiyaç duyulmaktadır.

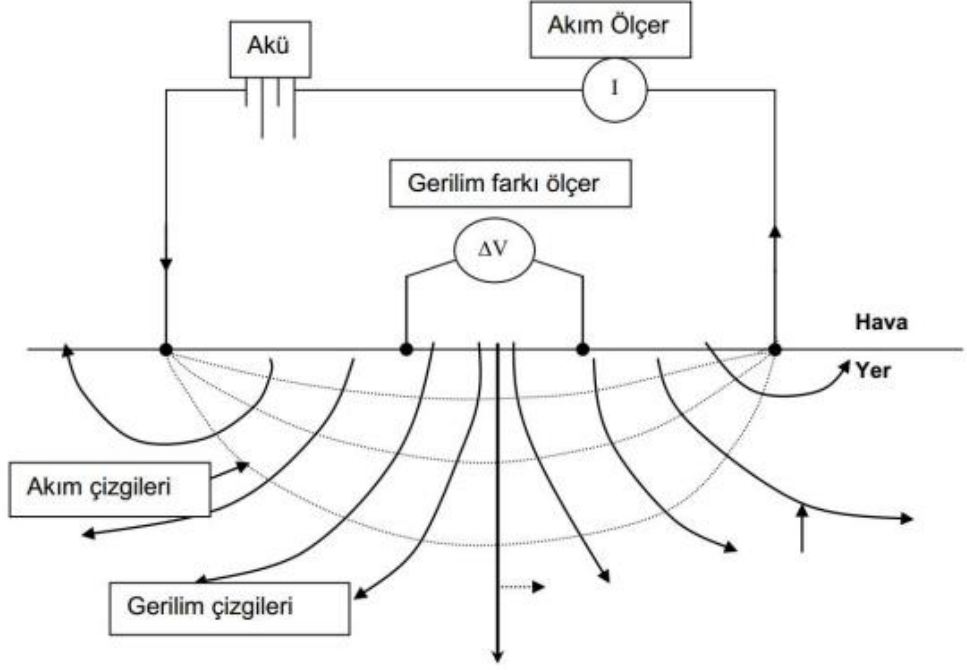
BÖLÜM 2

ELEKTRİK ÖZDİRENÇ YÖNTEMİ

2.1 Elektrik Özdirenç Yöntemi

Elektrik özdirenç yöntemi, jeofizik yöntemler arasında en yaygın kullanılan ve en eski yöntemdir. Yöntem, 1915'de ilk kez Wenner tarafından kullanılmış ve 1920 yılında Schlumberger tarafından ortaya konmuştur (Sünbül, 2007). Genellikle bu yöntemde bir kaynak (akü) ile yüzeyden yere iki akım elektrotundan akım verilir ve yeraltında meydana gelen potansiyeli, yüzeyde yer alan iki potansiyel elektrot ölçmektedir (Şekil 2.1). Yeraltında var olan ortamların fiziksel ve kimyasal özelliklerindeki farklılıklardan (karstik şekiller, gömülü yapılar, su ve nem aktivitesi, tabakalanma, dom tahmini sayısı vb.) dolayı ölçülen potansiyel farkı değerleri oluşmaktadır.

Elektrik özdirenç yönteminde, yer altında gömülü halde bulunan yapılar ile onu çevreleyen ortam arasında elektriksel özellikler ve sıvı ile nem içeriklerinden kaynaklanan zıtlıklar oluşmaktadır. Bu zıtlıklar yapının görüntülendirilmesinde önemli bir unsur oluşturmaktadır (Berge, 2011). Elektrik özdirenç yöntemi, 1946 yılında ilk kez Atkinson tarafından arkeolojik araştırmalarda kullanılmıştır. Bu yöntem ile arkeolojik araştırmalarda aranılan şeklin jeolojik özellikleri ile onu saran jeolojik birim arasındaki elektriksel iletkenlik farklılığı antik yapı kalıntısına ulaşılmasını olumlu etkilemektedir (Kaya, 2017).



Şekil 2.1 Akım ve voltaj hatlarını toprağa dağıtmak için özel direnç ve yöntem kullanma (Candansayar 2010)

Elektrik özdirenç yönteminin temelini Maxwell denklemleri ve Ohm yasası oluşturmaktadır.

Elektrik potansiyel ile elektrik alan şiddeti arasındaki ilişki denklem 2.1'deki gibidir.

$$\vec{E} = -\nabla\phi \quad (2.1)$$

Sürekli bir yapıda akım akışı için Ohm yasasının vektör formundaki eşitliği ise;

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.2)$$

şeklinde verilir. Burada σ , yapının iletkenliği; \vec{J} , akım yoğunluğu ve \vec{E} , elektrik alan şiddetidir. Ortam özdirenci ρ ve $\rho=1/\sigma$ olarak ifade edilmektedir. Bağlıtından da

anlaşılacağı gibi ortamın iletkenliğine (σ) bağlıdır. (2.1) ve (2.2) denklemleri düzenlendiğinde ise akım yoğunluğu elde edilir ve (2.3) denklemi ile tanımlanır.

$$\vec{j} = \frac{-1}{\rho} \nabla \phi = \frac{1}{A} \quad (2.3)$$

Akım yoğunluğu Maxwell denklemleri yardımıyla da elde edilebilir ve (2.4) denklemindeki gibi ifade edilebilir.

$$\nabla \cdot \vec{j} = \frac{-\partial q}{\partial t} \quad (2.4)$$

Kaynaktan I akımı verildiği ve akım kaynağı (x_s, y_s, z_s) koordinatlarına yerleştirildiği düşünülürse (2.5) denklemi ile tanımlanmıştır.

$$\nabla \cdot \vec{j} = I \cdot \delta(x - x_s) \cdot \delta(y - y_s) \cdot \delta(z - z_s) \quad (2.5)$$

(2.5) denklemi, (2.3) denkleminde yazılır ve düzenlendiği takdirde Poisson denklemi elde edilebilir. Dey ve Morrison (1979a) bu denklemi, I akım kaynağının onu çevreleyen bir ΔV hacim elemanı üstünde (x_s, y_s, z_s) koordinatlarına yerleştirilmesiyle yeraltında oluşturacağı potansiyel dağılımı olarak akım yoğunluğu ve akım ile olan ilişkisi (2.6) denklemi ile tanımlanmıştır (Berge, 2011).

$$-\nabla[\sigma(x, y, z) \cdot \nabla \phi(x, y, z)] = \left(\frac{1}{\Delta V}\right) \cdot \delta(x - x_s) \cdot \delta(y - y_s) \cdot \delta(z - z_s) \quad (2.6)$$

Burada δ , Birim Delta (Dirac Delta) fonksiyonudur ve denklemin çözümü için birçok teknik geliştirilmiş olup yer altı yapısı üzerinde potansiyel dağılımın modellenmesi yapılabilir ve bu ‘Düz Çözüm’ olarak adlandırılır.

Elektrik özdirenç çalışmalarında elektrik potansiyel Laplace denklemini de sağlamalıdır. Buna göre Laplace denklemi,

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (2.7)$$

Şeklinde ifade edilir.

Yeraltında bulunan nokta akım kaynağının yeryüzünde herhangi bir noktada oluşturacağı potansiyel değer misse-à-la-masse metodu (Parasnis, 1966) ile (2.8) denklemi ile ifade edilmektedir.

Yarı-sonsuz homojen ortamda akım ile potansiyel elektrotlarının yüzeyde konumlandığı düşünüldüğünde, A ve B akım, M ve N ise potansiyel elektrotlarıdır. Şekil 1’de de verilmiş olan dört elektrotlu dizilimde potansiyel elektrotlar arasında oluşan gerilim farkı,

$$\Delta\phi = \phi_M - \phi_N = \frac{1\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right) \quad (2.9)$$

denklemi ile ifade edilmektedir. (2.9) denklemi kullanılarak elde edilen homojen olmayan yeraltı için hesaplanan öz direnç değerine görünür öz direnç (ρ_a) denir ve ρ_a görünür öz direnç değeri,

$$\rho_a = \frac{\Delta\phi}{I} \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right)} \quad (2.10)$$

denklemi ile tanımlanmaktadır.

Görünür öz direnç, yeraltında var olan yapının öz direnci, kullanılan elektrot dizilim yöntemi ve şekli ile doğrudan ilişkilidir. Görünür öz direnç tanımına bakıldığında ise; eğer izotrop ve homojen bir ortam var ise ölçülecek olan görünür öz direnç ile ortamın öz direncinin birbirine eşit olması gerekmektedir. Tabakalı bir ortamda görünür öz direnç eğrisinin AB/2’nin küçük değerleri için birinci tabakanın öz direncine, AB/2’nin büyük değerleri için son tabakanın öz direncine asimtot olması gerekmektedir. Ek olarak görünür öz direncin, AB/2’nin ara değerlerinde de ara tabakaların öz direncine yakın olması gereklidir (Başokur, 1994).

Elde edilen görünür özdirenç değeri, elektrot diziliminin orta noktasına atanmaktadır. Yeraltının sahip olduğu gerçek özdirenç değeri hesaplanan özdirenç değeri değildir ancak görünür özdirenç ölçümlerinden, yeraltının gerçek özdirenç değerleri uygulanan değerlendirme metotlarıyla belirlenebilmektedir. Bu tekniklerden bir tanesi de *Ters Çözüm*'dür.

Geometrik faktör, dizilim katsayısı olarak da adlandırılmaktadır. Genellikle k ile gösterilir ve

$$k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4}\right)} \quad (2.11)$$

Şeklinde ifade edilir.

2.2 Kayaç ve Minerallerin Özdirençleri

Elektrik özdirenç yönteminde gömülü halde bulunan yapıyı bulabilmek için yeraltında özdirenç zıtlığı oluşması gerekmektedir. Aksi halde, gömülü yapının ve ortamın birbirinden ayırt edilmesi mümkün olamaz. Bu nedenle gömülü halde bulunan yapının ortamdan farklı elektriksel özelliklere sahip olması gerekmektedir. Ward'ın (1990) belirttiği üzere özdirenci belirleyen faktörler şunlardır:

Kayaç bileşimi: Jeolojik yapıların oluşumunda rol oynayan kayaçlar minerallerden oluşur ve minerallerin elementlerden oluştuğu bilinir. Benzer şekilde bilindiği üzere metaller elektriksel açıdan diğer elementlerden daha fazla iletkenlerdir. Gümüş, bakır, altın, gibi elementler ve kalkopirit, pirit gibi mineraller, kayaç içerisindeki miktarına bağlı olarak kayaç özdirencini düşürürler.

Gözeneklilik ve Saturasyon: Kayaçlar içerisindeki gözeneklerin içinde hava olduğunda özdirenci artar, kil ve su olduğunda ise özdirenç azalır.

Kil: Yerin özdirencini belirlemede rol oynayan bir diğer materyaldir. Kil minerallerinde geçirgenlik düşük, gözeneklilik ve iyon alışverişleri yüksektir. Bu yüzden suya doymuş killer, özdirencin düşmesine sebep olmaktadır.

Anizotropi: Hem izotrop (yön bağımsız) hem de homojen yer modeli neredeyse imkansızdır. Bu sebeple kayaç ortamında elektrik akımı da yöne bağlı olacağı için özdirenci etkiler.

Tuzluluk: Ortamda bulunan tuz özellikle çözülmüş olduğu takdirde iyon miktarını arttırması sebebiyle özdirencin azalmasını sağlar.

Sıcaklık: Sıcaklık arttıkça çözünürlük artar ve bu durum iyon hareketliliğini arttırarak özdirenci azaltır.

Yaş ve Derinlik: Kayacın bulunduğu derinlik ve kayaç yaşı özdirenci etkilemektedir. Aynı yaşlarda olan iki kayaçtan derinde bulunan kayaç sığdaki kayaca oranla daha masif olması sebebiyle daha dirençlidir.

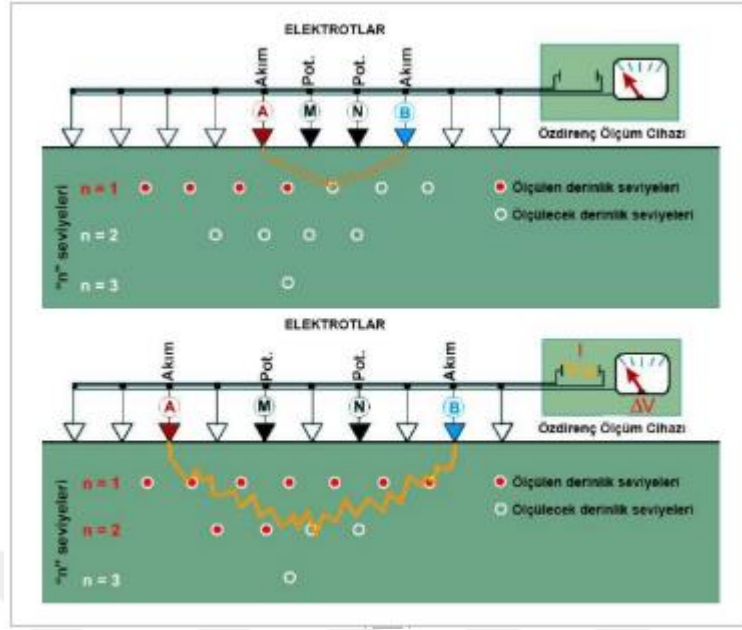
Yeraltındaki materyallerde elektriksel yükün taşınma hareketi elektronik ve elektrolitik iletim olarak iki ana iletim şeklinde olmaktadır. Elektronik iletim, akım akışı serbest elektronlar yoluyla gerçekleşirken elektrolitik iletimde ise akım akışı iyonlar yoluyla gerçekleşir. Eğer bir kayaç çok az serbest elektrona sahip ise elektrik akımını dielektrik iletim ile gerçekleşmektedir. Bu nedenle kayaçlar doğal ortamda, sahip oldukları geçirgenlik ve gözeneklilik özelliklerine bağlı olarak geniş aralıkta özdirenç değerleri göstermektedir (Telford vd., 1976) (Tablo 2.1).

Tablo 2.1 Bazı materyal ve kayaçların özdirenç değerleri (Telford vd., 1976)

Kayaç ve Mineral Tipi	Özdirenç Aralığı (Ωm)
Kil	1-100
Örtü Tabakası	50-100
Gevşek Kum	500-5000
Alüvyon ve Kumlar	10-800
Kumtaşı	200-8000
Pirit	0.01-100
Granit	200-100000
Kireçtaşı	500-10000
Bazalt	200-100000
Yüzey Suları	10-100
Doğal Sular(Sedimanlarda)	1-100
Toprak Suları	~100
Deniz Suyu	~0.2

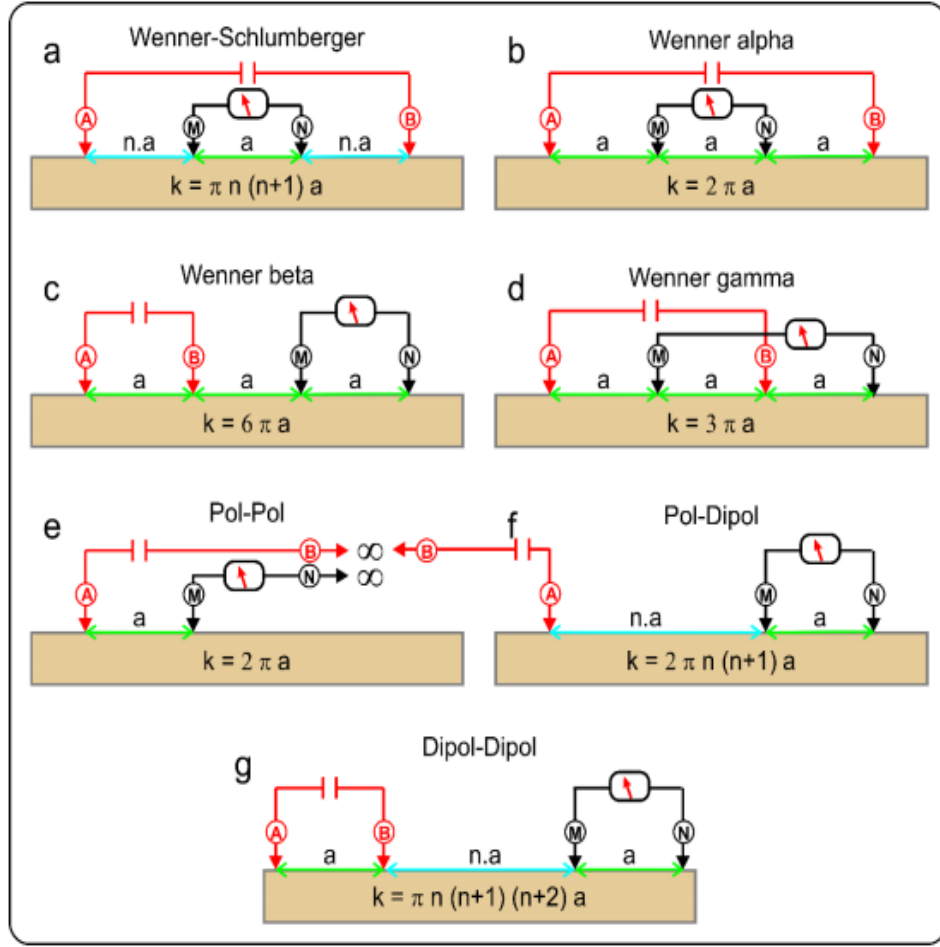
2.3 Elektrik Özdirenç Yönteminde Kullanılan Dizilimler

Elektrik özdirenç yöntemi genel olarak iki potansiyel elektrot ve iki akım olmak üzere 4 elektrotun kullanıldığı bir yöntemdir. Elektrot sayılarının ve dizilişlerinin farklı olmasından kaynaklı elektrot dizilimi kavramı oluşmuştur (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Genel dört elektrot diziliminin gösterimi: A1 ve A2 akım elektrotları, P1 ve P2 potansiyel elektrotlar

Literatürde birçok bilim insanının sınıflandırdığı birçok dizilim türü bulunmaktadır. Pratikte en yaygın olarak kullanılan dizilim türleri ise Wenner-Schlumberger, Wenner-beta, Wenner-gama, Wenner-alfa, pol-pol, pol-dipol ve dipol-dipol dizilimleridir. Elektrik öz direnç yönteminin dizilimleri uygulanırken 4 elektrot içeren dizilimler kullanılır. Bu dizilimlerden ikisi dışarıdan yere iletilen akım elektrotları A ve B harfleriyle ifade edilirse diğer elektrotlar da bu akımların potansiyel değişimini okuduğumuz M ve N harfleriyle ifade edilen potansiyel elektrotlarıdır. Bu elektrotların birbirlerine olan uzaklıkları ve yüzeydeki dağılımlarının değiştirilmesi sonucu farklı şekillerde dizilimler elde edilebilir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 Wenner gamma, Wenner alpha, Wenner beta, Wenner-Schlumberger, Pol-Pol, PolDipol ve Dipol-Dipol elektrot dizilimleri ve geometrik faktörleri

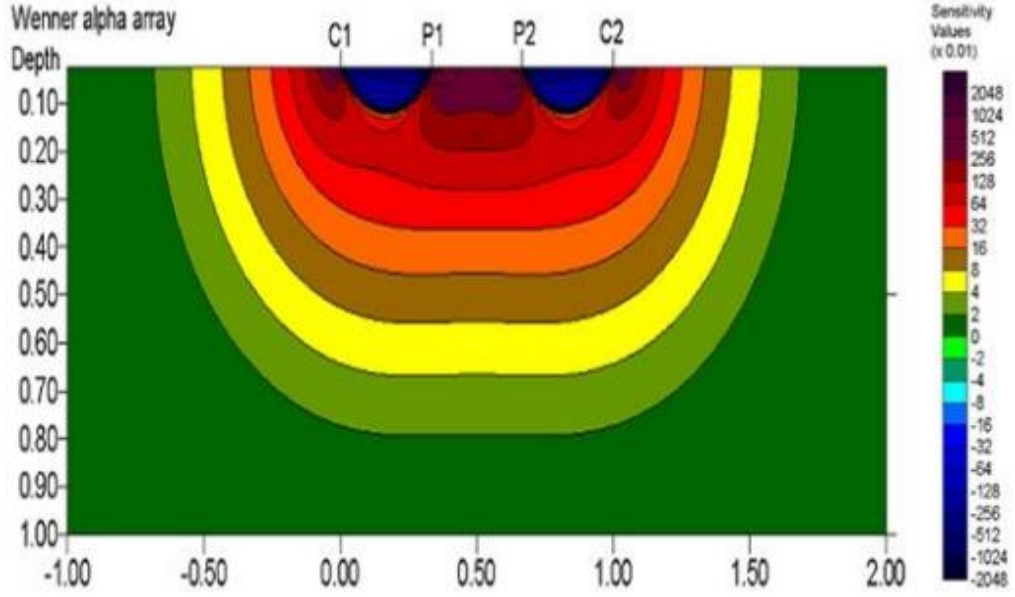
Elektrotlar bir simetri merkezi baz alınarak çizgi boyunca dizilir ve geleneksel elektrot dizilimleri olan; Wenner, Schlumberger, pole-dipol ve dipol-dipol dizilimleri elde edilir (Candansayar, 2014). Bu dizilimler kullanılan elektrotların dizilim katsayıları (k) ve yüzeydeki konumlarıyla birlikte Şekil 2.3'te gösterilmektedir. a, b ve c dizilimde 4 elektrot da ölçümlerde aktif bir şekilde kullanılmaktadır. Pol-pol diziliminde bir potansiyel elektrotu ve bir akımın, pol-dipol diziliminde bir akım elektrotunun sonsuzda olduğu kabul edilerek pozisyonu korunmaktadır. Ölçüm yapılırken sonsuz mesafesi olarak en büyük elektrot aralığının yaklaşık olarak 20 katı civarı bir mesafe belirlenmektedir. Elektrotlar arasındaki mesafeyi gösteren a ve n

değerleri değiştirilir ve farklı derinlik derecelerinden görünür özdirenç verisi ölçülmektedir (Berge, 2011).

Elektrotların yüzeye yerleştirilmesi, yeraltına olan iletimi ve oluşan potansiyeli değiştirir ve buna bağlı olarak dizinin geometrisi olarak bilinen bu olay, yüzeydeki ölçülen görünür özdirenç değerini direkt etkiler. Bu durum dizilimin çözüm gücünü de değiştirir. Bu yöntem ile yürütülen araştırmalarda, hangi dizilimin kullanılacağı belirlenirken elektrot dizilimlerinin çözünürlük kapasitelerinin de gözetilmesi önemli bir etkidir. Geleneksel dizilimler farklı çözünürlük, sinyal-gürültü oranı, araştırmanın derinliği, yatay yönde veri kaplama alanı ve veri yoğunluğu özelliklerini içerir. Dizilim seçiminde rol oynayan faktörleri Ward (1990) incelemiştir. Araştırma problemi ve dizilimlerin özellikleri dikkate alınarak dizilimlerden bir ya da birden fazlası ölçümler için kullanılabilir.

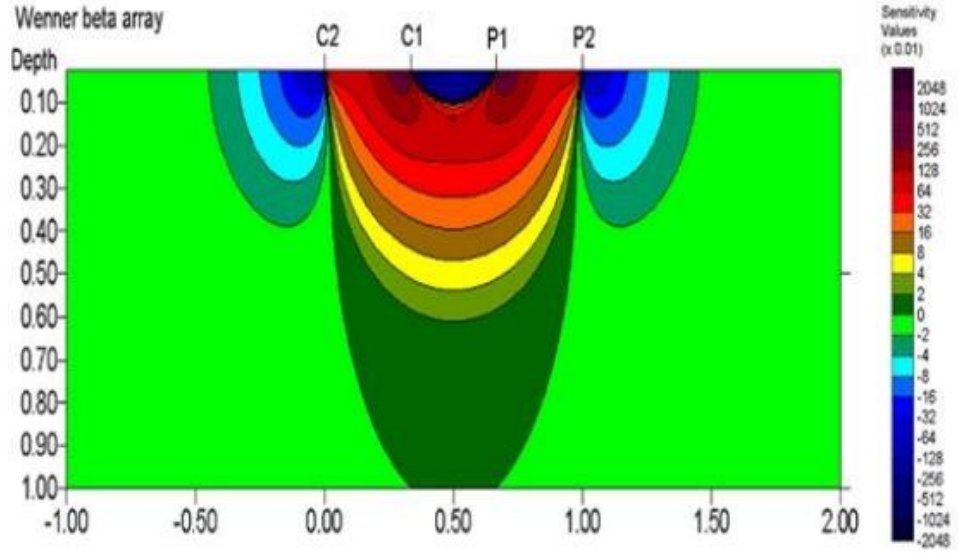
2.3.1 Wenner Dizilimi

Wenner dizilimi iki akım ve iki potansiyel elektrotun aktif olarak kullanıldığı simetrik bir dizilim türüdür. Elektrot aralıkları a olarak sabit alınmakta ve ölçüm değerleri ise iki potansiyel elektrotun ortasına atanmaktadır. Dizilimin duyarlılığının dizilim merkezinin altında ve iki akım elektrotu arasında hemen hemen yatay olması sebebiyle yeraltındaki yatay tabakalara daha iyi çözümler verebilmektedir. Ortalama araştırma derinliği, Wenner dizilimde sabit olarak alınan elektrot aralığı a nın yarısı kadardır. Dizilim yüksek sinyal oranı sunarak, gürültüye karşı daha az duyarlıdır. Wenner diziliminde elektrotlar C1P1P2C2 veya P1C1C2P2 düzeninde sıralanırsa, Alfa (α) dizilimi olarak adlandırılır ve dizilimin duyarlılık kesiti Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



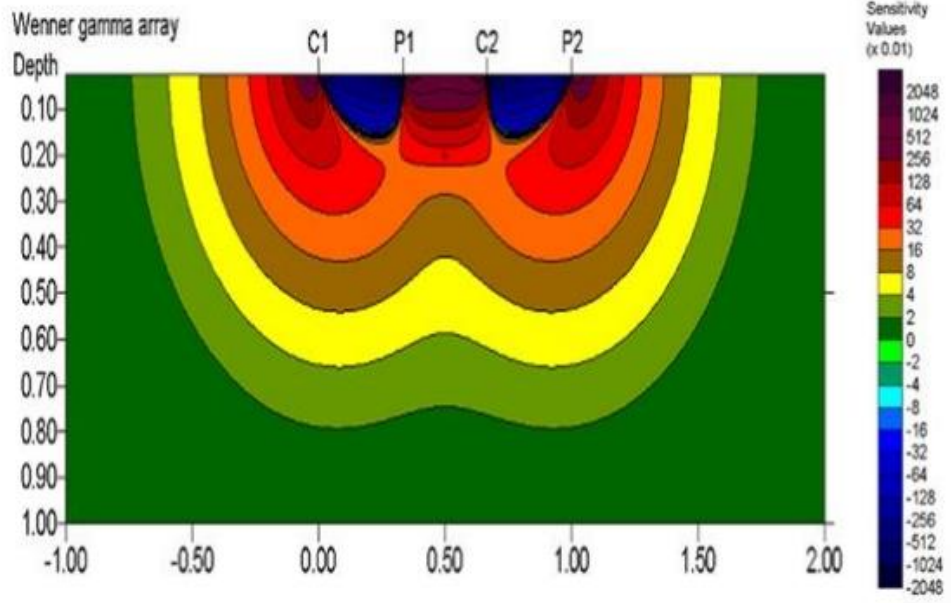
Şekil 2.4 Wenner-alfa (α) dizilimine ait duyarlık kesiti (Loke, 2015)

Wenner diziliminde elektrotlar C1C2P1P2 düzeninde sıralanırsa, Beta (β) dizilimi olarak adlandırılır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 Wenner-beta (β) dizilimine ait duyarlık kesiti (Loke, 2015)

Wenner diziliminde elektrotlar C1P1C2P2 veya P1C1P2C2 düzeninde sıralandığı takdirde, Gama (γ) Dizilimi olarak adlandırılmaktadır (Şekil 2.6).



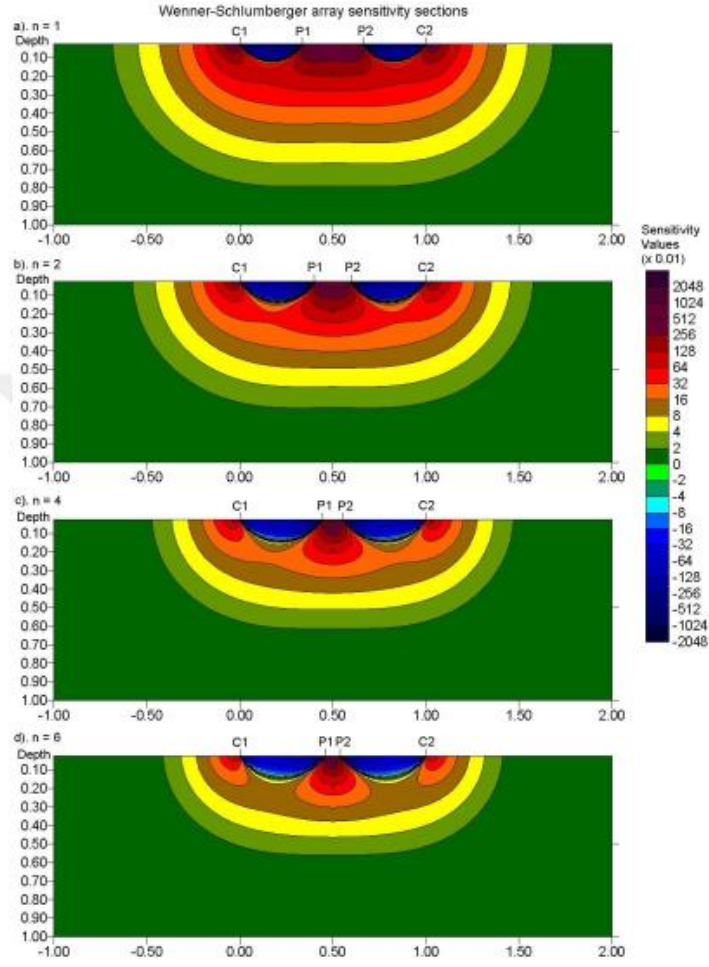
Şekil 2.6 Wenner-gama (γ) dizilimine ait duyarlık kesiti (Loke, 2015)

Wenner elektrot dizilimi yanal süreksizliklerden etkilendiği için genellikle sığ araştırmalarda tercih edilmektedir.

2.3.2 Wenner –Schlumberger Dizilimi

Wenner-Schlumberger diziliminde, ölçüm anında iki potansiyel elektrot ve iki akım aktif bir şekilde rol oynamaktadır. Elektrot aralıkları belli bir n faktörüne göre seçilmekte olup ölçüm değerleri, iki potansiyel elektrotun ortasına atandığı diğer bir simetrik dizilim türüdür.

Dizilimin duyarlık kesiti ele alındığında; potansiyel elektrotların arasında bulunan alanın pozitif kısmı Wenner dizilimine kıyasla derine doğru yayvan ve daha dar olduğu görülmektedir (Şekil 2.7). Buna göre dizilim yatay ve düşey süreksizliklere karşı duyarlıdır ve özellikle düşey süreksizlik durumlarında Schlumberger diziliminin oldukça iyi sonuçlar verdiği görülmektedir (Berge, 2002).



Şekil 2.7 Wenner-Schlumberger dizilimine ait duyarlık kesiti (Loke, 2015)

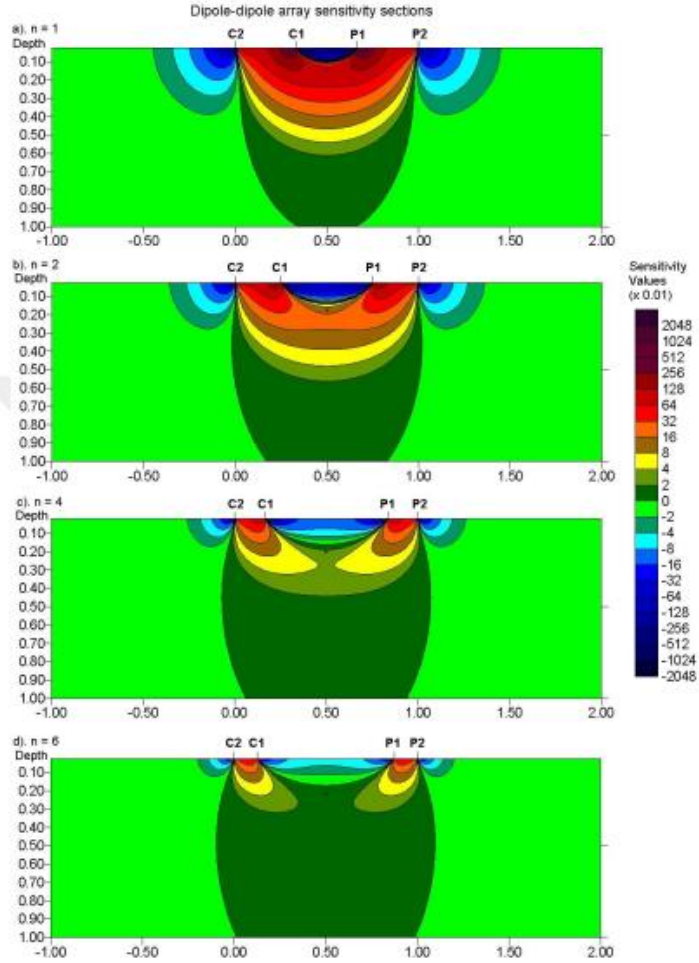
2.3.3 Dipol-dipol Dizilimi

Dipol-dipol dizilimi, n faktörüne göre simetrik olarak yerleştirilmiş olan akım ve potansiyel elektrotlarının dipol olarak yerleştirildiği dizilim türüdür. Bu dizilimin araştırma derinliği a ve n değerlerine göre değişken olup Wenner dizilimine kıyasla görece sığ kalabilmektedir. Dipol-dipol diziliminin görünür özdirenç değeri ise dipol kollarının orta noktasına atanmaktadır.

Elektrik özdirenç yönteminin iki boyutlu araştırmalarında dipol-dipol diziliminin yatayda kapladığı veri kaplama alanı, Wenner dizilimine göre daha geniş olmasıyla beraber diğer dizilim türlerine göre yüksek anomali etkisine sahiptir. Göstermiş olduğu yüksek anomali etkisine rağmen dipol-dipol diziliminin gürültü içerme olasılığı

fazladır. Düşey yönelimli yapılara duyarlı olan dipol-dipol dizilimden elde edilen sonuçların ayrırlılığı da yüksektir.

Şekil 2.8 incelendiğinde dizilimin akım ve potansiyel kolları arasında yüksek duyarlılık gösterdiği ve bu nedenden dolayı yeraltındaki düşey yönlü değişimlerde daha başarılı olduğu görülebilir.



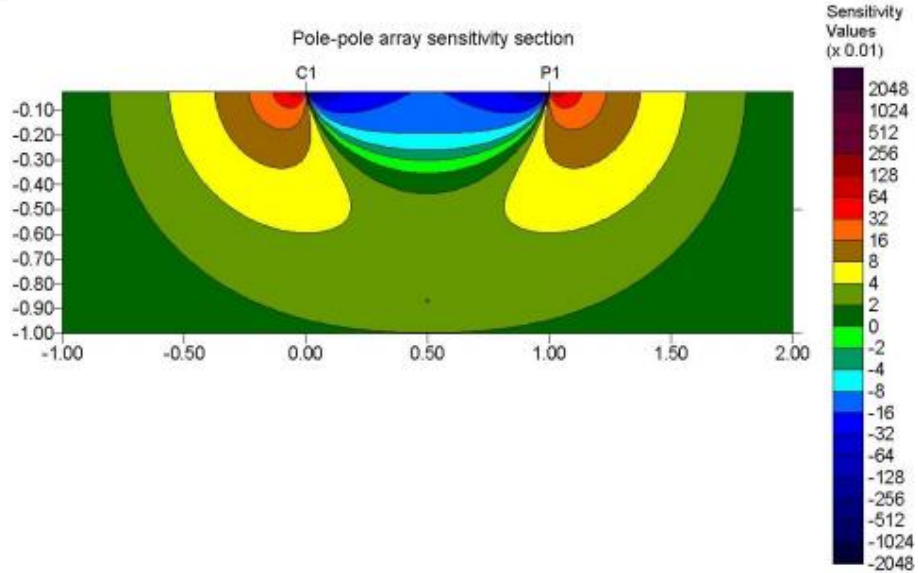
Şekil 2.8 Dipol-dipol dizilimine ait duyarlılık kesiti (Loke, 2015)

Dipol-dipol dizilim, derindeki ayrırlılığın önemli olmadığı dayk ve boşluklar gibi düşey yapıların haritalanmasında da başarılı sonuçlar vermektedir.

2.3.4 Pol-pol Dizilimi

Pol-pol diziliminde, ölçüm anında aktif olarak bir akım ve bir potansiyel elektrotu kullanılmaktadır. Sabit olarak alınan elektrot aralığının (a) ve ölçülen görünür özdirenç değerlerinin akım ve potansiyel elektrotunun arasına atandığı simetrik bir dizilim türüdür. Dizilimin duyarlılık kesiti Şekil 2.9’da verilmektedir.

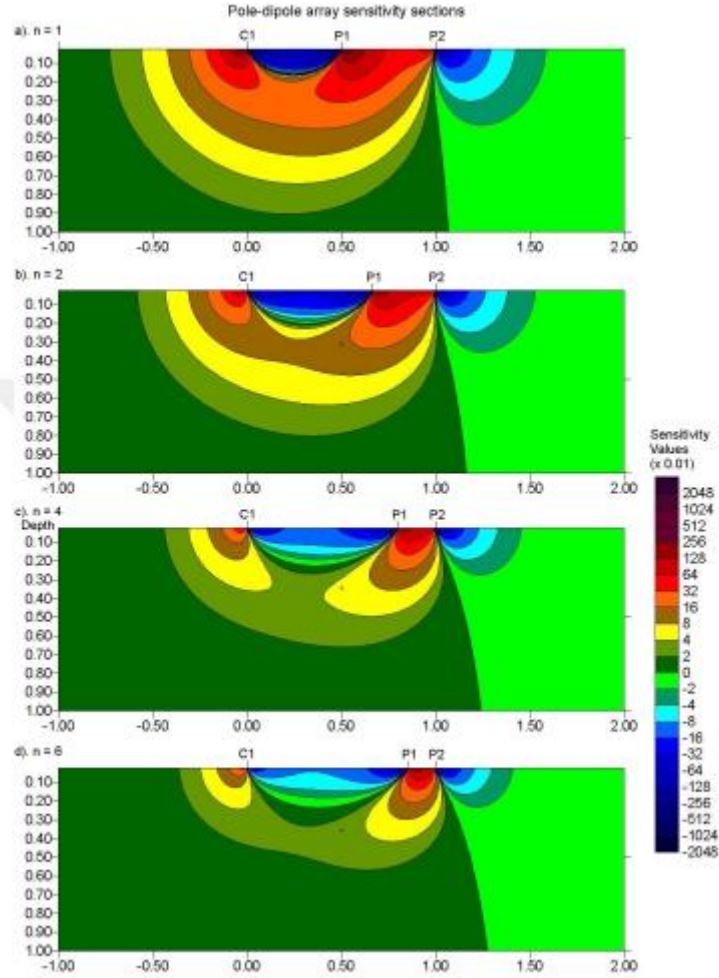
Pol-pol dizilimde diğer akım ve potansiyel elektrot da kullanılmaktadır ancak bu iki elektrot hem sabit hem de oldukça uzak bir mesafeye yerleştirilir. Dizilimin araştırma derinliği ve yataydaki veri kaplama alanı diğer dizilimlere göre fazladır ve a mesafesinin 0.866 katıdır. Pol-pol diziliminde sinyal/gürültü oranı ile anomali etkisi yeraltı modeli ile kıyasla düşük ya da yüksek olabilmektedir. Ancak teorik çalışmalara göre pol-pol dizilim eklenen gürültüye rağmen diğer dizilimler ile karşılaştırıldığında orta seviyededir (Dahlin ve Zhou, 2004). Üç boyutlu elektrik özdirenç ölçümleri için ise dizilimin iki elektrotun kullanılması uygun ve avantaj sağlarken tellürik akımlara karşı duyarlı olması ise dizilimin dezavantajıdır.



Şekil 2.9 Pol-pol dizilimine ait duyarlılık kesiti (Loke, 2015).

2.3.5 Pol-dipol Dizilimi

Pol-dipol dizilimi, ölçüm esnasında aktif bir şekilde bir akım ve iki potansiyel elektrotun kullanıldığı asimetrik bir dizilim türüdür. Diğer akım elektrotu ise sonsuza atılmaktadır ve sonsuzda konumlandırılan bu akım elektrotunun yönüne bağlı olarak sol ve sağ yönlü dizilim olarak adlandırılır.



Şekil 2.10 Pol-dipol dizilimine ait duyarlık kesiti (Loke, 2015)

Pol-dipol dizilimi, asimetrik dizilim olduğundan simetrik olmayan görünür öz direnç eğrileri göstermeye meyilli olan bir dizilim türüdür. Ölçülen görünür öz direnç değerleri de dizilimin ortasına atanabileceği gibi, iki potansiyel elektrodun ortasına da atanabilir. Şekil 2.10'daki duyarlık kesiti incelendiğinde pol-dipol 24

dizilimi, dipol-dipol dizilimine benzer şekilde dűsey yönelimli yapılara duyarlıdır ve dipol-dipol dizilimine kıyasla daha az gűrűltű içerięi sunduęu söylenbilir (Berge, 2011).



BÖLÜM 3

YAPI TABANLI MODELLEME

Mühendislikte modelleme, genel olarak, özellikle nesnelerin geometrisini ve uzaydaki konumlarını sayısallaştıran tasarım uygulamalarını sıklıkla kullanan mühendislik dallarında, fiziksel bir nesnenin veya olayın sayısal bir açıklaması olarak düşünülebilir. Modelde istenilen değişiklikler ve tasarımın yeni duruma göre test edilmesi sayısal olarak yapılır. Tasarlanacak nesnenin geometrik yapısı çeşitlendikçe sayısal olarak modellemek için de çeşitli yöntemler uygulanır. Burada farklı olan genellikle geometri ve modeli oluşturmak için kullanılan sonlu eleman sayısıdır. Modelleme yapılırken cismin uzayda yer kaplayan konumu dikkate alınarak 2B veya 3B elemanlar tercih edilebilir. İki boyutta kullanılabilen elemanlar üçgen, dörtgen ve diğer çokgen geometrik şekiller veya bunların karma kullanımı olabilir (Akça, 2010).

Jeofizikte, dünya'da ölçülen alanlardan fiziksel miktarları hesaplayarak ve ölçerek ölçülen verilerden bir model elde etmeye çalışılmıştır. Uygulanan yöntemin duyarlı olduğu fiziksel parametrenin dağılımına göre bir model elde edilir. Parametreler veriler aracılığıyla hesaplandığı ve doğrudan ölçülemediği için ve aynı verilerin ölçülmesiyle sonuçlanabilecek birden fazla model bulunması önem arz etmektedir. Jeofizikteki fiziksel ve geometrik parametreler ile tanımlanan bir yer modelinin tepkisini ilgilenilen yer için hesaplamaya modelleme denilmektedir. Tasarlanmış bir jeofizik modelin tepkisi hesaplanırken izlenmesi gereken iki adım bulunmaktadır. İlk olarak modelin parametreleri tanımlanmalıdır. Daha sonra ise model yanıtını hesaplamak için tanımlanan bu parametreler düz çözüm bağıntısında yerine yerleştirilir. Düz çözüm bağıntılarının analitik çözümleri, iki ya da üç-boyutlu jeofizik modellemede çoğunlukla bulunmamaktadır. Bu nedenle sonlu-elemanlar, sonlu-farklar gibi bazı sayısal yaklaşımlarla hesaplanırlar. Sayısal uyarlamaları sınırlı ve ayrık bir alanda, sınırlandırılmış şartlar altında gerçekleştirildiği için Tek başına homojen olarak kabul edilen küçük geometrik elemanların birleşiminden oluşur. Bu sayede köşe noktaları ve eleman kenarlarını içeren bir ağ elde edilmektedir. Ağ tasarımı gerçekleştirilirken dikkate alınacak etkenler; yürütülecek sayısal hesaplamaların durağanlığı, yöntemin çözünürlüğü ve verinin çözüm gücüdür. Bu

sebeple model ağı oluşturulurken olası yer modelinin geometrik şekline bağımlı kalınmadığı ileri sürülmektedir.

Bu yol ile tasarımı yapılan model ağda, nesnelerin sınırları ve derinlikleri ağı oluşturan öğelerin sınırlarıyla örtüşmelidir. Bu durum nesnelerin ve yapıların olması gerekenden farklı boyut veya derinliklerde tanımının yapılmasına neden olabilir. Model geometrisinde bulunan hızlı düşey-yanal değişimler sebebiyle model geometrisi ve model ağı arasındaki benzeşim de düşecektir. İstenilen model ile model ağının uyumunu arttırabilmek amacıyla değişikliklere karşı uyum sağlama açısından daha iyi elemanlar kullanılabilir. Bu durum elemanların model tasarımı açısından esnekliğini sağlar. İki-boyutlu modelleme çalışmaları için çoğunlukla dörtgen elemanlar köşegenlerinden ikiye ya da dörde bölünerek üçgen elemanlı ağlar oluşturulmaktadır. Üç-boyutlu model ağının oluşturulmasında da bunun gibi bir yol izlenir. Buna önlem olarak model ağının gerçek model ile uyumunu arttırmak amacıyla elemanların boyutlarının küçültülmesiyle ağın sıklaştırılması gerçekleştirilebilir (Akça, 2010).

Jeolojik yapıların veya gömülü cisimlerin sınırlarını temsil eden ve beraberinde ağ boyutunun büyümesine sebep olmayan bir ağ tasarımına ihtiyaç duyulmasının sebebi yukarıya bahsedilen faktörlerdir. Elektrik ve elektromanyetik yöntemlerde kullanılan ve yapısal olmayan model ağlar bulunmaktadır ve bu ağların bu ihtiyacı karşılamada yeterli olacağı düşüncesi mevcuttur (Günther ve Rücker, 2005).

3.1 Ağ Tasarımı

İki boyutlu sonlu eleman ağları genellikle yeraltı birimleri arasında ara yüzlerin temsili için daha fazla esneklik sağlayan üçgen elemanlar kullanılarak oluşturulur. En yaygın olarak kullanılan sonlu eleman ağları, elemanların yerleşimi ve şekline göre *yapısal* ve *yapısal olmayan* olarak iki şekilde sınıflandırılır. Şekil 3.1.a, b, 2B modellemede ve doğru akım öz direnç (DAÖ) verilerinin ters çözümünde kullanılan yapısal ve yapısal olmayan üçgen ağ örneklerini göstermektedir (Akca, 2016). Yapı tabanlı ağ tasarımı oluşumu, dikdörtgen (veya dörtgen) elemanların iki veya dört üçgen

birime bölünmesine dayanırken (Şekil 3.1.b), yapısal olmayan ağ tasarımı üçgen kalitesi tarafından sınırlandırılan Delaunay üçgenleme kurallarına göre oluşturulur (Şekil 3.1.a). Shewchuk (1997) ve Si (2008), iki ve üç boyutlu yapısal olmayan ağ tasarımının kapsamlı bir tanımını vermiştir ve Rucker (2011), DAÖ modelleme ve ters çözümünde yapısal olmayan ağların kullanımını gözden geçirmiştir. Diğerlerinin yanı sıra, yapısal olmayan bir ağ tasarımı kullanmanın ana avantajı, ağ boyutunu küçültüyor olabilmek ve böylece ileriye dönük hesaplamalarda kullanılan matrisleri yönetmektir. Ek olarak, model ağının veri duyarlılığının düşük olduğu bölümlerinde daha büyük boyutlu üçgenlerin kullanımına izin verirken, düzensiz ara yüzleri ana hatlarıyla net bir şekilde belirtmek için esnek bir araçtır. Şekil 3.1.a'da verilen yapısal olmayan ağ tasarımı, aynı modelin ayrıklaştırılması için tasarlanmış yapısal ağ tasarımındaki düğüm sayısının neredeyse yarısı kadar olan 363 düğümden oluşmaktadır. Yapısal ağı oluşturan üçgen sayısı, yapısal olmayan ağdan yaklaşık üç kat daha fazladır. Yapısal olmayan ağ tasarımının yukarıda belirtilen avantajlarının yanı sıra, bilinmeyen bir yeraltı modelini parametreleştirmek için kullanıldığında bazı problemler ortaya çıkar. Örneğin, üçgenlerin oluşumu biraz düzensizdir, bu da ters çevrilmiş model bölümlerinde yıldız veya çiçek biçimindeki gövdelerin görünmesine neden olabilir. Bu durum öz direnç verileri yorumlanırken zorluklar oluşturmaktadır. Model ve sonlu eleman ağ yapısının daha iyi anlaşılması için, yeraltının ayrıklaştırılmasıyla ilgili aşağıdaki temel hususları hatırlamak yardımcı olacaktır. Yeraltının ayrıklaştırılması iki şartın yerine getirilmesi için esastır:

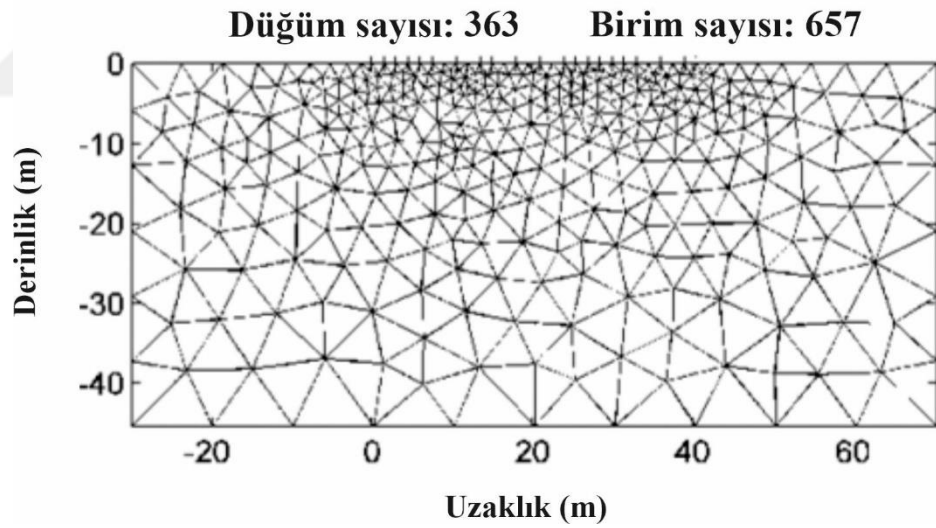
(1) Belirli bir geometriye sahip bir fiziksel parametrenin yer altı dağılımını sunmak için kavramsal bir jeofizik model gereklidir.

(2) Sonlu elemanlar çözümü, sınırlı ve iyi ayrımlandırılmış bir alan gerektirir.

Tamamen yapısal veya yapısal olmayan ağlarda yukarıda listelenen iki gereksinimin karşılanması, ağ boyutunun gereksiz yere büyümesine neden olur (Şekil 3.1). Bu nedenle bazı araştırmacılar parametre ve hesaplama ağlarını birbirinden ayırmaktadır. Örneğin, Günther (2004) ve Rucker (2011), üç farklı yapısal olmayan ağın kullanıldığı, üçgenleme yöntemi, çözünürlüğe bağlı bir model parametreleştirmesinin düz çözüm hesaplamaları ile sonlu elemanlar kullanılarak

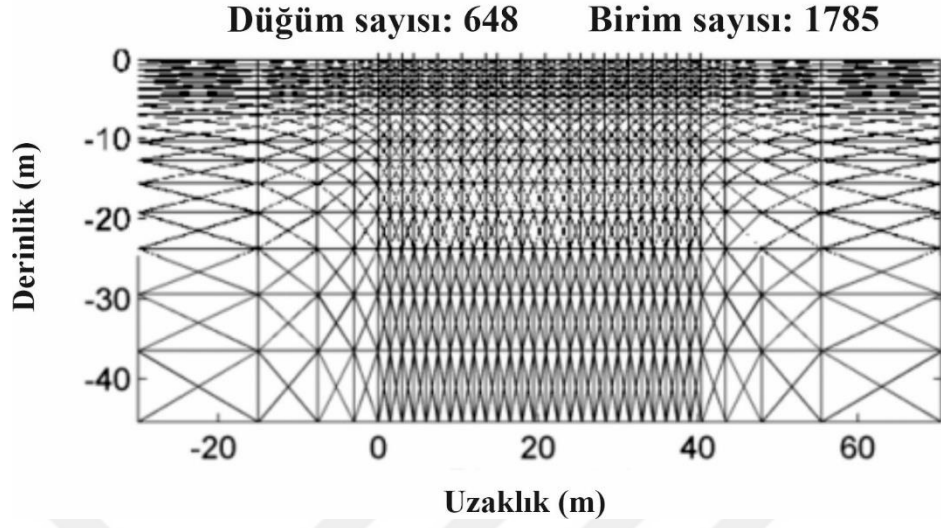
hesaplanmasını önermiştir. Bu tezde, her iki ağ türünün avantajlarını kullanmak için düzenli ve yapısal olmayan sonlu eleman ağlarının bir kombinasyonu kullanılmıştır. Model ağı iki alt alana bölünmüştür. İlk alt alan, ölçülen verilerin model parametrelerini yüksek doğrulukla çözmek için yeterince hassas olan model bölgesini sınırlar. Model bölgesi, x yönündeki ilk ve son elektrot konumları ve z yönünde maksimum araştırma derinliği ile sınırlandırılmıştır (Akça, 2016). Maksimum penetrasyon derinliği Edwards'a (1977) göre hesaplanır. Ağın bu kısmı, düzenli olarak ayarlanmış dikdörtgenlerin üçgen elemanlara bölünmesiyle oluşturulur ve her dikdörtgen hücre model parametresi gibi değerlendirilir. Diğer ağlar, sonlu elemanlar algoritmasının sayısal uygulamasında gereklidir ve boyutu üçgen elemanlar kullanılarak tasarlanmıştır. Bu üçgen elemanların boyutu ağın dış sınırlarına doğru genişlemektedir (Şekil 3.1). Bu, dikdörtgen model hücrelerin geleneksel düzenini koruyan yapısal bir ağ ile karşılaştırıldığında ağ boyutunun azalmasına yol açar.

(a)

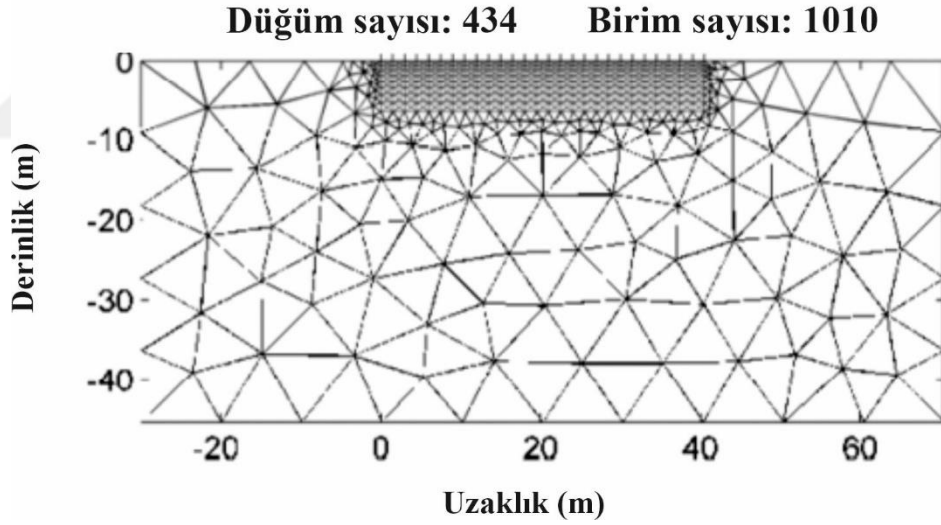


Şekil 3.1 (a) Yapısal olmayan, (b) Yapısal ve (c) hibrit sonlu eleman ağları (Akça, 2016)

(b)



(c)



Şekil 3.1 Devamı

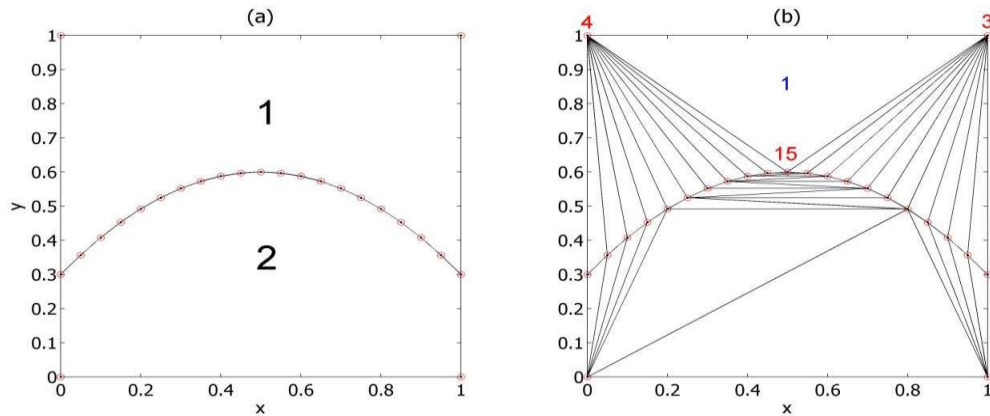
3.1.1 Yapı-tabanlı Ağ Tasarımı

Karmaşık yapıları temsil etmek için kullanılabilen esnek araçlar üçgen eleman modeli ağlarıdır. Model ağında esnekliği sağlamak için, geometrinin nispeten daha az karmaşık olduğu veya hızlı değiştiği kısımlarda elemanları düzenli bir ızgara üzerine

yerleştirmek yerine eleman boyutları küçültülür ve değişimin çok olmadığı bölümlerde kıyasla büyük elemanlar kullanılır. Bu tür ağlara yapılandırılmamış ağlar (unstructured mesh) denilmesinin sebebi elemanların düzensiz dizilimidir. Yapılandırılmamış model ağlar oluşturulurken Delaunay üçgenleme yöntemine dayalı olarak geliştirilen algoritmalar kullanılır. Adını yazarından alan bu yöntem Boris Nikolaevich Delaunay tarafından geliştirilmiştir (Delaunay, 1934). Üçgen oluşturmak için aynı düzlemde sınırlı sayıda noktayı birleştirmenin birçok yolu vardır fakat bu konuda Delaunay üçgenlemesi benzersizdir. Delaunay üçgenlemesinde iki koşulun sağlanması şarttır:

- Bir üçgenin çevrel çemberinde verilen noktalar kümesinin hiçbir üyesinin bulunmaması.
- İki üçgenin yalnızca köşe noktalarında veya yalnızca bir kenar boyunca keşişmesi.

Farklı fiziki özelliklere sahip iki bölgeden oluşan basit bir model için Delaunay üçgenleme (şekil 3.2.a) örneklendirilmiştir. MATLAB programı ile oluşturulan Delaunay üçgenleme modelinde (şekil 3.2.b) her üçgen üç köşesinin koordinatının satır numarasıyla tanımlanır. Üçgenlerin köşe sayıları saat yönünün tersindedir. Her üçgenin köşelerinin koordinatlarının köşe sayıları ile bulunabilmesi için bir numaralandırma sistemi kullanılır.



şekil 3.2 a). Birim karenin dört köşesi ve iki alt bölge arasındaki sınırı deşifre eden noktalar kümesi, b). Verilen noktaların Delaunay üçgenlemesi (Akça, 2010)

Verilen üçgenlerin hepsi yukarıdaki şartları sağlar (Şekil 3.2.b). Üçgenlerin kenar uzunluklarının farkının az olması hesaplamaların olabildiğince az hata ile yapılabilmesini sağlar. *Üçgen kalitesi* şeklinde tanımlanabilen bir kriter uygulanması öncesinde oluşturulan seyrek ağın sıkılaştırılmasını ve sayısal hesaplamalara uygun duruma gelmesini sağlayabilir. Üçgen kalitesi ölçütü:

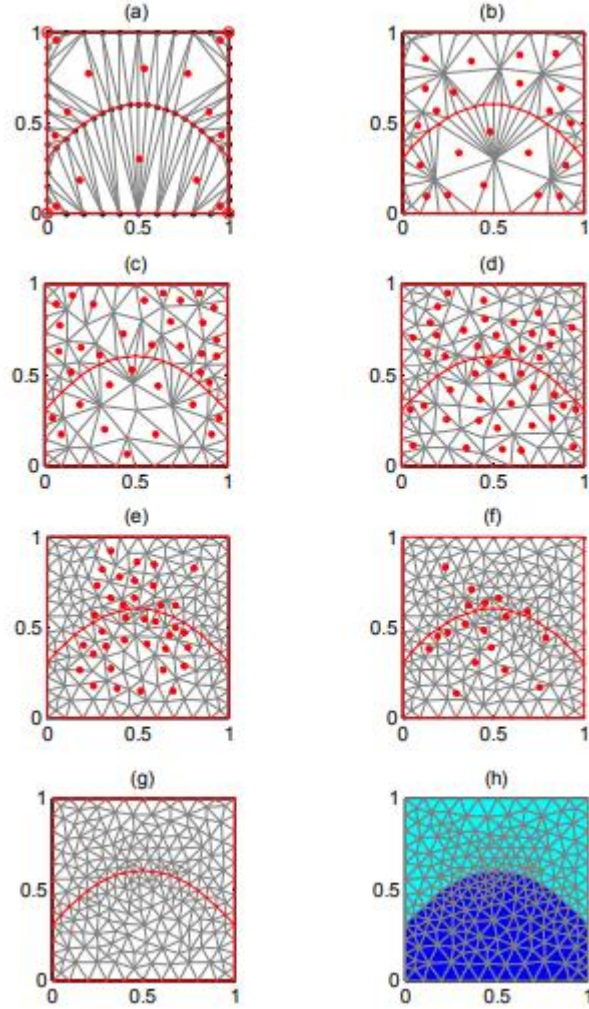
$$q = \frac{4a\sqrt{3}}{h_1^2+h_2^2+h_3^2} \quad (3.1)$$

Bağıntısı ile tanımlanır. Burada a , üçgenin alanını, h kenar uzunluklarını ifade etmektedir. Ağ iyileştirilme bir farklı tabirle sayısal hesaplamalar için daha uygun hale getirilmesi işlemi, temelde gerçekte olmayan noktaların noktalar kümesine eklenmesidir. Şekil 3.2.b’de delaunay fonksiyonu yeniden çağırmak için noktalar kümesine yeni noktalar dahil edilir. Bu adım sonrası meydana gelen bütün üçgenlerin şekil olarak denetlenmesiyle yeni noktalar çevrel çemberinin merkezlerine eklenmiş olur. Her adımın ardından üçgenleme fonksiyonu tekrar çağırılır (Bank, 2004).

Belirli bir eşik değerine erişine veya üçgen oluşumunda belirlenmiş bir sayıya ulaşına kadar bu işlem sürdürülür (Şekil 3.3.a-g). Sonuncu aşamada sayısal hesaplamaların yürütülmesine uygun, yapı sınırları ile uyumlu bir ağ elde edilir (Şekil 3.3.h). Burada belirtilen işlemler pratik bir şekilde bir algoritmaya çevrilebilir. Öte yandan benzer işlem MATLAB kütüphanesinde mevcut olan `decsg` ve `initmesh` fonksiyonlarını kullanarak da gerçekleştirilebilir. Model poligonlar olarak bölgelere ayrılır ve tüm alt bölgeler numaralandırılır. Dolayısıyla üçgenlerin yapısı veya ait olduğu birim bellekte saklanabilir hale gelir.

Basit bir modelle temsil edilen ağ tasarımı, iki boyutlu bir jeofizik model ağı oluşturmak için aynı biçimde kullanılabilir. Geleneksel olarak, 2 boyutlu bir Dünya modelinde, fiziksel parametre hem dikey hem de kesit olarak değişir. Genellikle, modellerin bir ızgarası değişken genişlik ve kalınlığa sahip dikdörtgenlerden oluşur. Bu yöntem, modelin oluşmasını sağlayan yapıların sınırları ile eleman sınırları çakışmadığı takdirde model ağıyla model arasında uyumsuzluk yaratır. Öte yandan modelin parametreleştirilmesinin bu ağa bağımlı bir şekilde gerçekleşmesi ve çözüm

gerçekleşirken de aynı ağa bağlı kalınması şartları oluşur. Bahsedilen şartların yok edilmesi için oluşturulacak model ağı bir önceki bölümde verilen örnek gibi oluşturulabilir.



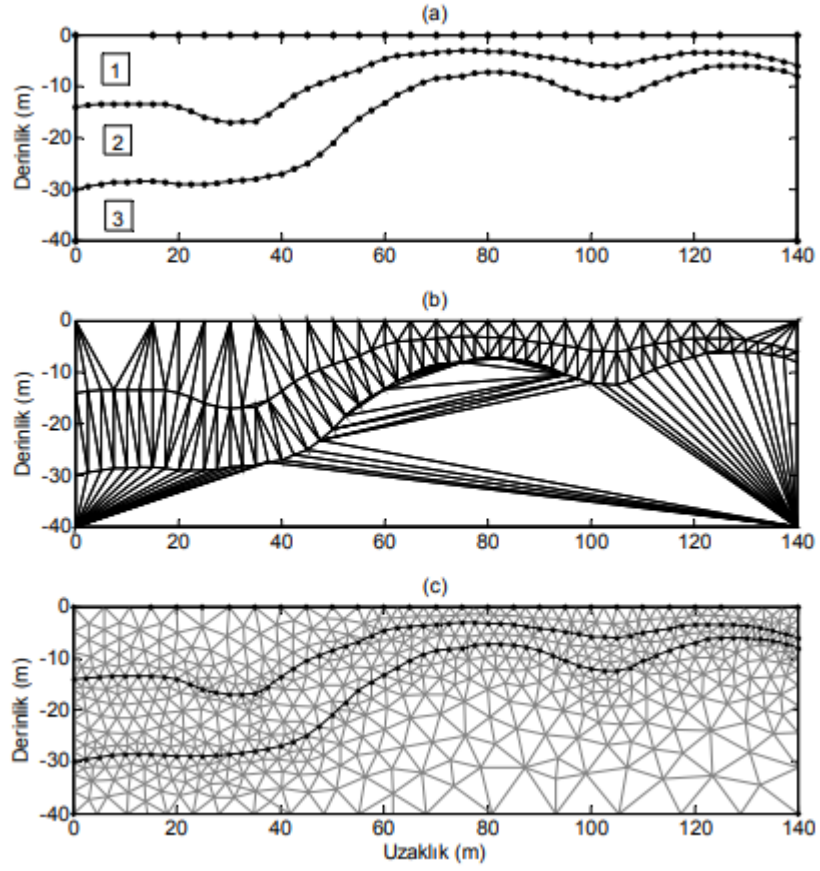
Şekil 3.3 Üçgen kalite kriterine göre oluşturulan ağ iyileştirmesi (Akça, 2010)

Şekildeki kırmızı yuvarlaklar sıradaki aşamada kümeye eklenecek olan noktaları belirtmektedir.

Bu aşamada bir model ağı tasarlarırken kullanılan jeofizik yöntem kabul edilebilir değildir, ancak belirli bir teorik modelin tepkisini hesaplarırken, birçok yöntem ölçülen noktaların yüzeyde veya ağda temsil edilmesini gerektirir. Böylece, jeolojik/jeofizik

modelin yapısal modelleri ağı oluşturulduğunda, algoritmaya modelin dış sınırları, yapının sınırları ve ölçüm noktalarının koordinatları atanır. Yukarıda bahsedilen süreç aşağıdaki örnek üzerinde net bir şekilde anlaşılabilir. Şekil 3.4.a'da bulunan model farklı fiziksel özelliklere sahip üç birim vardır. Model ağında kesinlikle bulunması gereken kısımlar siyah yuvarlaklar ile belirtilir. Sadece anlatım için verilen bu noktaların Delaunay üçgenlemesi görüldüğü gibidir (Şekil 3.4.b). Birinci adımda oluşturulan seyrek ağ yukarıda bahsedilen biçimde düzenlenerek yapı tabanlı model ağı elde edilmektedir (Akça, 2010) (Şekil 3.4).

Bir model kendi şekliyle, daha önce ayarlanmış bir ağa dayanmadan temsil edilebilir. Sonrasında modeli fiziksel ve geometrik olarak tanımlamak üzere ağın elemanlarına fiziksel parametre değerleri atanır. Yapı-tabanlı model ağında birimler veya yapı net sınırla ayrılır. Bu koşullarda bir üçgenin toplam 4 indis ile tanımlanabilmesi mümkündür. Dördüncü indislerden hedeflenen alt alanı belirleyenleri bulmak için bir arama işlemi kullanılabilir.

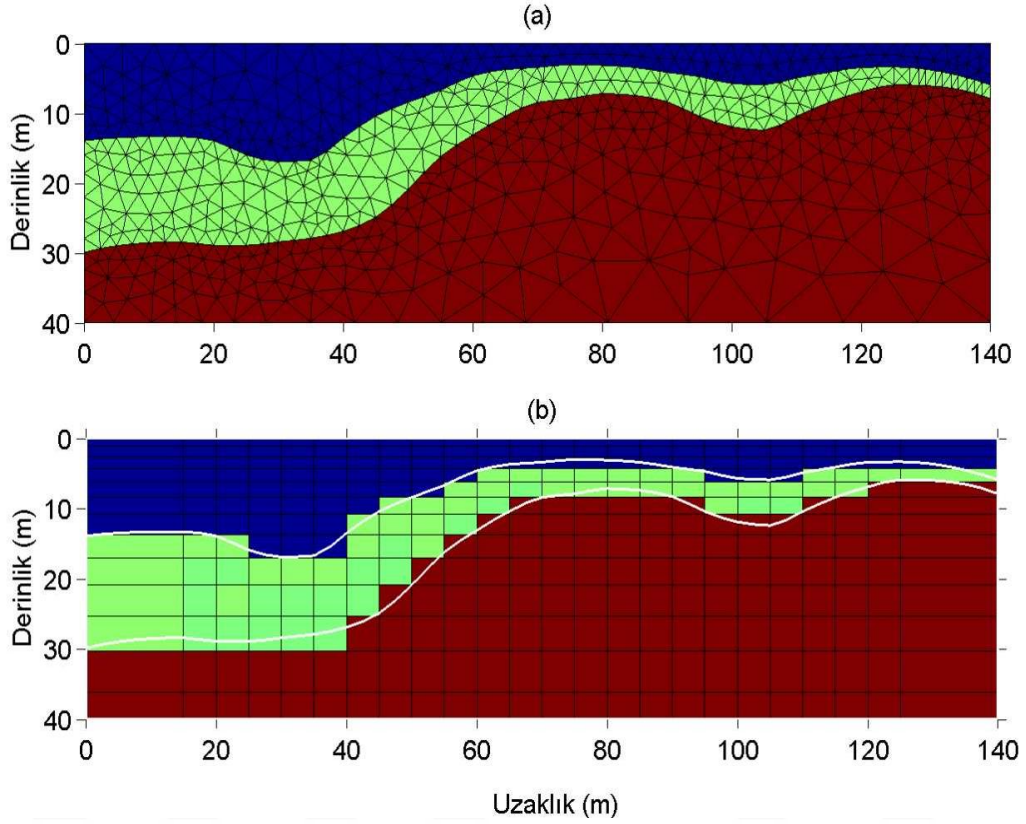


Şekil 3.4 a) Üç üniteden oluşan iki boyutlu zemin modeli, b). ilksel noktaların Delaunay üçgenlemesi, c). yapı-tabanlı model ağı (Akça, 2010)

Üçgelerin ait olduğu model birime bu yöntem ile belirlenir ve ardından üçgenlere fiziksel parametreler atanabilir. Şekil 3.5.a'da geometrik ve fiziksel parametreleriyle tanımlanan ağ gösterilmektedir. Ağda bulunan renkler sadece fiziksel parametrelerdeki farkı ifade eder, birimi yoktur. Karşılaştırmak için aynı model ağının dikdörtgen hücrelerden oluşturulmuş versiyonu da ayrıştırılarak Şekil 3.5.b'de gösterilmiştir. Bu örnekte geometrik olarak çok net değişimler bulunmadığı halde, oluşturulan model ağı ve model arasında tutarsızlıklar bulunmaktadır. Modeli karmaşıktırdıkça bu tutarsızlığın da fazlaşacağı öngörülmektedir.

Dikdörtgen hücrelerden oluşturulmuş model ağın birtakım düzenlemeler sayesinde model ile uyumunun artırılabilmesi olasıdır. Örneğin tüm dikdörtgenler

köşegenlerinden bölünür ve ortaya dört üçgen eleman çıkar (Erdoğan vd., 2008). Modeldeki değişimlerin temsilinde bu yöntem ile bir nebze esneklik sağlanır.



Şekil 3.5 a) Yapı-tabanlı model ve model ağı , b). dikdörtgen elemanlardan oluşturulan bir model ağı (Akca, 2010)

3.2 Düz Çözüm

DAÖ yönteminde 2B modelleme, yarısansuz uzay içindeki bir yer elektrik modelinin bir nokta akım kaynağından dolayı oluşturduğu gerilim dağılımının hesaplanması olarak tarif edilebilir. DAÖ ölçümlerinde hesaplanan gerilim dağılımı, modelde ölçülmesi hedeflenen değerlerin sayısal yöntemlerle elde edilen karşılığıdır. Aşağıdaki eliptik denklem, bir akım kaynağına bağlı olarak 2 boyutlu bir iletkenlik yapısı (σ) üzerinde potansiyel dağılımını $\phi(x, y, z)$ hesaplamak için çözülmüştür.

$$-\nabla \cdot [\sigma(x, z) \nabla \phi(x, y, z)] = I(x, y, z) \quad (3.2)$$

Denklem 3.2, iletkenliğin yalnızca x ve z yönlerinde farklılık gösterdiği bir model üzerinde üç boyutlu potansiyel dağılımını yönetir. Denklemün sayısal çözümü, sonlu fark (Dey ve Morrison, 1979; Mufti, 1976) veya sonlu elemanlar (Pelton vd., 1978; Rijo, 1977; Coggon, 1971) gibi sayısal bir yaklaşım kullanılarak elde edilebilir. Model ağının oluşturulmasının ardından düğüm noktaları için düz çözüm bağıntısı ayrıklaştırılır ve sonlu-elemanlar denklemlerine ulaşılır. Denklemün çözümü birçok araştırmacı tarafından tartışılmaktadır. Candansayar (1997)'a göre Poisson denkleminin sonlu elemanlar çözümünde 6 aşamayı içeren bir akış vardır. Bu akış şöyledir:

- *“Poisson denklemini integral denkleme dönüştürmek gerekir.*
- *Çözüm bölgesi sonlu sayıda elemana bölünmelidir.*
- *Belirsiz gerilim değerlerini tanımlamada doğrusal polinom kullanılır.*
- *Elemanların sahip olduğu dizey denklemlerine ulaşılır.*
- *Eleman dizey denklemlerinin birleştirilmesiyle genel dizey denklemini elde edilir.*
- *Genel dizey denkleminin çözülmesiyle düğüm noktalarındaki gerilimler ölçülür.”*

Sonlu elemanlar yönteminin denklem 1'e ayrıklaştırılmış bir alanın sınırlarında Neumann ve Dirichlet sınır koşullarının uygulanması, şu şekilde ifade edilen doğrusal bir denklem sistemi ile sonuçlanır:

$$K \times v = s \quad (3.3)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada K ; *pozitif kesin ve simetrik bir çizgi*, v ; *düğüm noktalarında hesaplanması gereken bilinmeyen voltaj değerlerini içeren bir çizgi*. s ; *kaynak terimi* olarak tanımlanır.

Denklemler 3.3, MATLAB'da bir matris bölümü ile Gauss eliminasyonu kullanılarak $v = K \setminus S$ şeklinde çözülebilir. MATLAB'deki matris bölme operatörü, olası tüm tek akım kaynakları nedeniyle oluşan potansiyellerin çözümüne bir kerede izin verir. Bu nedenle, S 'nin her sütunu, $2\pi A$ 'ya ayarlanmış sanal akım kaynağının gücüne karşılık gelen sıfır olmayan bir eleman içerir. Kaynak matrisinin diğer öğeleri 0 olarak ayarlanır. Sayısal hesaplamalar iletkenlik ve potansiyel dağılıma dayalı olmasına rağmen, pratikte potansiyel fark ve görünür özdirenç değerleri kullanılır. Bu nedenle, potansiyel farklar, elektrotların dizilimine bağlı olarak görünür özdirençlere dönüştürülmelidir. Marescot et al. (2006), görünür özdirençlerin tanımı için kapsamlı bir yaklaşımın tanımını vermiştir. *Genel yaklaşım* olarak adlandırılan tanım şu şekilde verilmektedir:

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{\Delta V_0} \rho_0 \quad (3.4)$$

Burada ΔV , *iki-boyutlu yer elektrik modeli*, ΔV_0 ise *özdirenci*, ρ_0 *tekdüze alan yer modeli için hesaplanan gerilim farklarını* temsil etmektedir. Tekdüze yer modelinin özdirenci 1 alınır ve denklem sadeleştirilir. Bu, sistemin birliğe tepkisi ile normalleştirilmiş bir potansiyel farkı verir. Her bir düğümdeki potansiyeller, her elektrotun bir akım kutbu gibi davrandığı varsayılarak hesaplanır. Bu nedenle, herhangi bir akım-potansiyel elektrot kombinasyonu, görünür özdirenç değerlerini hesaplamak için kullanılabilir. Görünür özdirenç değerleri, Edwards (1977) tarafından verilen esasa göre sözde kesitler olarak gösterilir.

3.3 Ters Çözüm

DC özdirenç verilerinin tersine çevrilmesi, doğrusal olmayan ve kötü tasarlanmış bir problemdir. Kullanıcı tarafından sağlanan bir başlangıç modeli, yinelemeli bir süreçle güncellenir. Genellikle, ters çözümü stabilize etmek için bir tür model düzgünlük kısıtlaması gerekir. Model düzgünlük kısıtlamaları, anlamsız bir jeoelektrik kesite neden olabilecek özdirençlerde keskin değişiklikleri önlemek için komşu model parametrelerini (bitişik dikdörtgen hücrelerin özdirenci) birbirine bağlar. ELRIS2D

(Akça, 2016) yazılımında kullanılan ters çözüm rutini aşağıdaki denklemin çözümüne dayanmaktadır.

$$\Delta \mathbf{m}_i = (\mathbf{J}^T \mathbf{W}_d^T \mathbf{W}_d \mathbf{J} + \lambda \mathbf{C})^{-1} (\mathbf{J}^T \mathbf{W}_d^T \mathbf{W}_d \Delta \mathbf{d} - \lambda \mathbf{C} \mathbf{m}_{i-1}) \quad (3.5)$$

Burada, $\Delta \mathbf{m}_i$; model düzeltme vektörü, \mathbf{J} ; Jakobiyen matrisi, λ ; düzenleme parametresi, $\Delta \mathbf{d}$; veri tutarsızlık vektörü, i ; iterasyon sayısı, \mathbf{W}_d ; veri ağırlıklandırma matrisi, ve \mathbf{C} ; beş noktalı sonlu fark Laplacian'dır. Veri ağırlıklandırma matrisi verilen biçimdedir:

$$\mathbf{W}_d = \text{diag}\left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right) \quad (3.6)$$

Burada ε_i mevcudiyet durumunda ölçümlerin bireysel standart sapmasını belirtir. Aksi takdirde, veri ağırlık matrisi şu şekilde hesaplanır:

$$\mathbf{W}_d = \text{diag}\left(\frac{1}{\sqrt{\rho_{app}}}\right) \quad (3.7)$$

Veri ağırlıklandırma prosedürü, aşırı okumaların ters çözüme etkisini azaltmayı amaçlar. Sönüm faktörünün başlangıç λ değeri, görünen öz dirençlerin logaritmalarının standart sapmasına dayanır ve 0.01'den büyük ise her yinelemeden sonra yarıya indirilir. Jacobian matrisi (\mathbf{J}), denklem 3.3'te hücre iletkenliklerine göre diferansiyelleri alınarak hesaplandı:

$$\mathbf{K} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \sigma_i} = \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \sigma_i} \mathbf{v} \quad (3.8)$$

Denklem 3.8'de sadece hücre iletkenliklerine göre potansiyellerin kısmi türevleri bilinmiyor. \mathbf{K} ve \mathbf{v} ileri çözüm sırasında zaten üretilir. Model parametrelerine göre katılık matrisinin kısmi türevi, ilgili iletkenliklere 1 ve diğerlerine 0 atanarak kolayca hesaplanabilir. İlk durumda tüm iletkenlikler 1 olarak atanır ve sonuç K_1 olarak saklanır. Bu nedenle, belirli bir parametreye göre türevini hesaplamak için bir parametre bloğu içindeki üçgenlerle ilgili K_1 değerlerini seçmek yeterlidir. Bu, ağ

oluşturma sırasında parametrelerle ilişkilendiren bir üçgen indeksi oluşturarak kolayca uygulanır. Denklem 3.8 daha sonra $Ax = b$ şeklinde lineer bir denklem sistemi olarak ele alınabilir ve her model parametresi için çözülmesi gerekir. Bu işlem, daha önce denklem 2 için açıklandığı gibi yapılır. Bu şekilde, her yineleme için Jacobian matrisi hesaplanır. Model parametrelerine hesaplanan düzeltmeler eklenerek güncellenmiş bir model elde edilir. Yeni model, tepkisi ölçülen verilerle karşılaştırılarak doğrulanır. Veri uygunluğu, şu şekilde tanımlanan RMS ile ölçülür:

$$RMS = \sqrt{\frac{(W_d \Delta d)^T (W_d \Delta d)}{N}} \quad (3.9)$$

N , veri sayısıdır ve üst simge T, matris tersini belirtir. Denklem 8’de verilen uyumsuzluk fonksiyonu, ters çözüm rutini tarafından minimize edilecek hata fonksiyonudur.

3.4 Model Parametreleştirme

Ters-çözüm işlemi, ölçülen verinin içerdiği bilgiden yola çıkılarak özel olarak tasarlanmış bir modelin parametrelerinin kestirilmesi olarak tanımlanabilir. Geleneksel jeofizik yorumlamada bu işlem yorumcu tarafından sağlanan başlangıç parametrelerinin, ölçülen ve hesaplanan veriler arasında yeterli uyum sağlanıncaya kadar yinelemeli olarak iyileştirilmesi şeklinde yürütülür. Veri farkları *genelleştirilmiş ters* adı verilen işleç aracılığıyla gerçek ön kestirim parametreleriyle parametre değerlerinin arasındaki farka dönüştürülmektedir (Akça ve Başokur, 2010).). Parametre düzeltme düzeyi ön kestirim değerlerine eklenerek hata enerjisi haritasında değeri daha düşük bir noktaya adım atılmış olur. Parametrelere yapılacak düzeltmeler, kuramsal verinin parametrelere göre kısmi türevlerinin hesaplanmasına dayandığından, bu yöntemler bundan sonra *türev tabanlı ters-çözüm* olarak adlandırılacaktır. DAÖ problemi genellikle kötü durumudur (ill-posed). Dizey tersleme işlemleri içeren türev tabanlı ters-çözüm işlemi kimi durumlarda durağan olmaktan çıkar

Bu sebeple düzgünleştirilmiş ve da yuvarlatılmış ters-çözüm (Candansayar, 2008; Zhdanov, 2002) adı verilen bazı yöntemlerle sonuncu aşamada yorumlanabilen bir kesit oluşturmak amaçlanır. Ters-çözüm algoritmalarının başarımı genelleştirilmiş tersin tanımına, problemdeki fiziki öze, modelin parametreleştirilmesinde izlenen yola, çalışma alanı ile ilgili ön bilginin varlığına ve yorumcunun sağladığı ön kestirimin gerçek modele olan yakınlığıyla doğrudan ilişkilidir.

Seçilen yöntem ne olursa olsun son aşamada kestirilen parametreler yorumlayıcı tarafından jeolojik olarak değerlendirilmeli ve yorumlanmalıdır. Bu aşamada modelin nasıl parametreleştirildiği önem arz etmektedir. İki-boyutlu jeofizik yorumlamada dikdörtgen model hücrelerinin kullanımı ile ayrıklaştırılma yaygın kullanılan bir yöntemdir.

Model parametreleştirme ön bilgilere dayanmıyorsa, verilerin hangi parametre hakkında ne kadar bilgi içerdiğini belirlemek zordur. Bu tür yöntemlerde parametreler birbirinden tamamen bağımsız olarak değişmemelidir. Bu tür yöntemlerde parametreler hiç değiştirilmemelidir. Bu tür ters algoritmalar, genellikle parametrelerin bir türetme operatörü ile birleştirilmesiyle gerçekleştirilir, oldukça yuvarlatılmış bir kesit üretir. Özellikle tortul ortamlarda bu tür bir kesitten birim sınırlarını ayırmak oldukça güçtür. Jeolojik birimlerin fiziksel özellikleri çok geniş bir aralıkta değişebildiğinden, hesaplanan fiziksel parametre değerlerinden birim ayrımı yapmak da çoğunlukla olanaklı değildir. Birçok arama probleminde birimlerin alt ve/veya üst sınırlarının belirlenmesi birimleri tanımlayan fiziksel parametrenin duyarlı bir şekilde hesaplanmasından daha önemlidir.

3.4.1 Yapı-tabanlı Parametreleştirme

İki boyutlu jeofizik ters çözüm probleminde, konumu sabit model elemanları ile yürütülen işlemler sonunda bu elemanların konumlandırılmasına bağlı olarak bir kesit elde edilir. Ancak, daha önce geliştirilen ve sürekli olarak ters çözümün işlenmesinde yer alan model ağı, verilerin mevcut olması nedeniyle modelin geometrisini de belirleyen bir parametrelendirme yöntemi kullanılarak geliştirilmelidir. Smith vd.

(1999) iki boyutlu manyetotellürük ters çözümünde modeli oluşturan katmanlar arasında yer alan sınırlar. kalınlıklarını yatay olarak düzenlenmiş düğümlerde tanımlar. İnterpolasyon yöntemi kullanılarak düğüm noktaları dışındaki noktalarda kalınlıklar hesaplanmıştır. Benzer şekilde katman özdirenci belirlenir ve interpolasyon ile modelin örneklenmemiş noktalarına aktarılır.

Sismik yansıma yönteminde yansıtıcı yüzey sınırlarının belirlenmesi amacıyla Vassallo ve Zollo (2008), eşit aralıkla yanal yönde dizilmiş düğüm noktalarının düşeydeki konumlarını model parametresi olarak varsayıp çözmeyi denemişlerdir. İlerleyen ters-çözüm adımlarını ve düğüm noktalarının sayısını eşzamanlı olarak arttırmış ve bunların arama uzayını daraltmışlardır. Fiziksel özellikleri değişken tortul birimden oluşan ortamlarda gerçekleştirilen jeoteknik ve hidrojeolojik etütler gibi problemlerin çözümünde ve zeminin ilk metrelerinde gömülü kalıntı veya nesnelerin aranmasında temel amaç çevrenin sınırlarını kırmaktır.

İki boyutlu bir jeofizik geri bildirim çözümünde amaç, fiziksel mülkün yeryüzündeki dağılımını belirlemektir. Son ters-çözüm aşamasında, bir yorumlayıcı, iki boyutlu bir enine kesit olarak sunulan sonuçları jeolojik/teknik bilgilere dönüştürür. Bununla birlikte, yukarıda belirtildiği gibi, aynı birim için fiziksel bir özelliğin değeri, farklı koşullar altında büyük ölçüde değişebilir. Bunlar koşullar olduğunda, fiziksel parametrenin büyük ölçüde değiştiği bölümdeki konumlar bazında birim ayrımı yapılır. Bu süreç özellikle tortul ortamlarda çalışırken zordur. Bu dolaylı yorumlama süreci yerine, yer iç kısmının belirli sayıda birimden oluştuğunu ve bu birimlerin kalınlığının kesite göre değiştiğini varsayan bir model tasarlanabilir. Ayrıca, gözeneklilik, mineral bileşimi ve geçirgenlik gibi özelliklerin yanal yönündeki değişiklikleri temsil etmek için fiziksel parametrenin yanal yönde değiştirilmesine de izin verilir.

Birimlerin kalınlığının belirlendiği noktalara kontrol noktaları denir. Duruma bağlı olarak, profil üzerindeki kontrol noktalarının konumları da z-koordinatlarında ifade edilen geometrik bir parametre olarak düşünülebilir. Bu durumda, bir düğümün birim

sınırları üzerindeki konumu, değişken x ve z koordinatlarıyla temsil edilir. Modelin geometrisinde boyutsal ve boylamsal değişikliklere ilişkin bir tahmin yoksa, kontrol noktalarının konumunu bir parametre olarak dikkate almak yararlıdır. Öte yandan, hızlı yanal geçişlerin beklenmedik önceden tanımlanmış yerlere kontrol noktaları yerleştirilir. Herhangi bir kontrol noktasındaki birimlerin kalınlığı sıfıra ayarlanabildiğinden, yanal doğrultuda süreksizlikleri de temsil edebilir.

Bir sonraki adım, modelin fiziksel parametrelerini tanımlanan geometriye atamaktır. Modelin fiziksel parametrelerini atamanın farklı yolları vardır. Birincisi, birimin kendisinin aynı olduğunu varsayarsak, aynı birimi temsil eden model ağının tüm öğelerine aynı direnç değeri atanabilir. Gerçekten ideale yakın olan homojen birimlerden oluşan temel model, çalışmanın iç kısmının genel yapısının ele alınmaya çalışıldığı durumlar için seçilebilir. Çünkü böyle bir modelle, bir modelde küçük ölçekli yapıları hayal etmek imkansızdır. Bu nedenle, gerçek modelden sapmaların olabileceğini hesaba katmak gerekir.

İkinci olarak, istenen frekansta örneklenen ara noktalarda kontrol noktalarında tanımlanan öz dirençler yeniden hesaplanarak, cihazların öz dirençlerinin yanal yönde değişmesine izin verilebilir. Bu, cihazın parçalarını dikey bir sınırla iki kontrol noktası arasında bölerek ve her bir parçaya o noktada hesaplanmış bir öz direnç değeri atayarak yapılabilir. Bu yöntem, farklı fiziksel koşullar nedeniyle oluşabilecek yanal öz direnç değişikliklerinin tek bir birim içerisinde modelde temsil edilmesini sağlar. Noktalar ve birimler istenilen yanal ve düşey mesafeye göre büyütülebilir veya küçültülebilir. Ancak, yöntem türünün izin verdiği ayırma sınırları aşılmamalıdır. Bu tip parametreleştirme yönteminde, modeli tanımlayan parametre sayısı en fazla birkaç on ile sınırlıdır. Tahmin yönteminin hangi parametresi kullanılırsa kullanılsın, parametre sayısının azalması (verilerdeki mevcut bilgilerin kaybolmaması şartıyla) avantaj sağlar.

3.5 Melez Genetik Algoritmalar

Holland (1975) tarafından önerilen genetik algoritma, Goldberg (1989) tarafından geliştirildi ve çeşitli alanlardaki birçok problemi çözmek için kullanıldı. Bunun nedeni, bu yöntemin toplumdaki insanların çevresel koşulları nasıl yönettiğine ve gelecek nesillere aktardıkları genetik bilginin biyolojik evrim süreci hakkında genel bilgilere erişme kabiliyetine dayanmasıdır. Genetik bilginin bir nesilden diğerine aktarımı, genlerde seleksiyon, gen değişimi (outcross), genlerde küçük veya ani değişiklikler (mutasyonlar) gibi manipülasyonlar yoluyla gerçekleşir. Doğada seçilimin nasıl işlediğine dair bilinen görüşten biri Darwin'den gelmektedir. Darwin'in doğal seleksiyon olarak adlandırdığı teorisine göre, çevresel koşullara uyum sağlayan rastgele özelliklere sahip bireylerin hayatta kalma olasılığı daha yüksekken, bu özelliklere sahip olmayanların genlerini ilerideki nesillere aktarma olasılığı düşüktür. Plansız bu süreç, bireyleri çevresel koşullarla uyumlu bir topluluk oluşturmada kilit rol oynamaktadır. Seçim süreci genellikle geçim koşullarıyla uyumlu niteliklere sahip bireyleri tercih eder. Bununla birlikte, ikincil seçim mekanizmaları vardır. Örnek olarak bazı hayvanların dişileri çiftleşmek için erkekleri seçerken, çevresel koşullardan bağımsız bazı özelliklerin dikkate almaktadır. Eşeyli seçilimin türün çevresel koşullara uyumunu artırdığına dair bir kural yoktur. Eşeyli seçim daha çok türün sağlığı veya görünümü ile ilgilidir fakat bu sürecin seçilen özelliği taşıyan türün birey sayısında artışa yol açacağı açıktır.

Doğal ve cinsel seçim süreçleri de aynı anda gerçekleşebilir. Seçim sürecinden başarıyla geçen bireyler, genetik bilgilerini gen paylaşımı yoluyla bir sonraki neslin üyelerine aktarır. Farklı kalıtsal özelliklere sahip bireylerin yavruları da aynı süreçten geçerek bir sonraki nesli oluştururlar. Lamarck'ın kuramına göre organizmalar değişen çevresel koşullara tepki verirler. Bu davranış değişikliği nedeniyle, organların sık kullanılanları evrimleşip daha karmaşık hale gelirken, kullanılmayan organlar küçülebilir, zayıflayabilir, hatta tamamen kaybolabilir ve kazanılmış mükemmelliğe doğru evrimsel bir sürece girerek üremelerini hızlandırabilir.

Fiziksel parametrenin anlamını bulma alanı, pratikte çoğul olarak adlandırılabilir çok sayıda modelden oluşur ve bu da basit bir genetik algoritmayı çok değerli bir ayırıştırma haline getirir. Arama alanı, gerçekte gerçekleştirilebilen sayısız model de dahil olmak üzere, Fiziksel parametrenin değeri, çok geniş çapta değişen görevleri çözerken belirlenir olabilmesi amacıyla bazı uyarlamaların gerçekleştirilmesini zorunlu kılar. Genetik algoritma doğası gereği esnektir ve adaptasyona açıktır ve bu nedenle diğer parametre tahmini veya optimizasyon yöntemleri ile eşzamanlı veya sıralı olarak uygulanabilir. Melez kavramı bu tür uygulamalar için kullanılır. Hibrit genetik algoritma, küresel arama yöntemlerinin yanı sıra yerel ve ayırıştırıcı çözüm yöntemlerinin birleşiminden oluşur ve bunları birleştirmek için kullanılır (Mahinthakumar ve Sayeed, 2005; Chunduru vd.,1997; Başokur vd., 2007).

Melez genetik algoritmaların, algoritmalar, türevlere dayalı yöntemlerle bir neslin en iyi bireyini geliştirmek (Sen ve Stoffa, 1995), sıralı algoritmalar ve genetik yöntemler türetme tabanlı aktarım kullanmak veya türev tabanlı algoritmalar kullanmak gibi birçok farklı uygulamaya sahiptir. Başokur vd. (2007) ilk olarak türevlere dayalı bir yöntemle tüm bireylerin iyileştirilmesi fikrini ortaya atmıştır. Bu uygulama, arama uzayında rastgele dağıtılmış modelleri en yakın minimuma hizalamayı amaçlar. Basit teorik problemlerin çözümünde kazanılan deneyime göre (Akça, 2004; Başokur vd., 2007), ilk nesillerden sonra model çatışmaları minimum etrafında toplanmıştır. Çökmekte olan sorunlar, kullanıcı tanımlı arama alanında kalır ve arama alanı yeterli sayıda modelle taranırsa, bazı çoğaltmalardan sonra genel minimuma yakın bir noktaya ulaşabilir. Bu adımdan sonra, dar bir on yılda ortaya çıkan bir arama motoru optimizasyonu sorunu haline gelir. Hibrit genetik algoritma, Lamarck'ın evrimi(Le) olarak adlandırılır çünkü Lamarck'ın önerdiği evrim teorisine karşılık gelir. LE yönteminin uyarlanması, türev tabanlı bir yöntem için bir neslin tüm modellerini öngörücü olarak dahil ederek yinelemeli bir adım uygulanır. Adım başarılı olursa, mevcut model, optimize edilmiş bir biçimde koleksiyona geri eklenir. Aksi takdirde modelde herhangi bir değişiklik yapılmaz. Son olarak, LE yöntemine işaretlenen kısıtlamalar eklenir ve LE+İK Kısıltma belirtilen yöntemi belirtir. Bu yöntem, burada gösterilen doğal seleksiyon, cinsel seleksiyon ve yönlendirilmiş

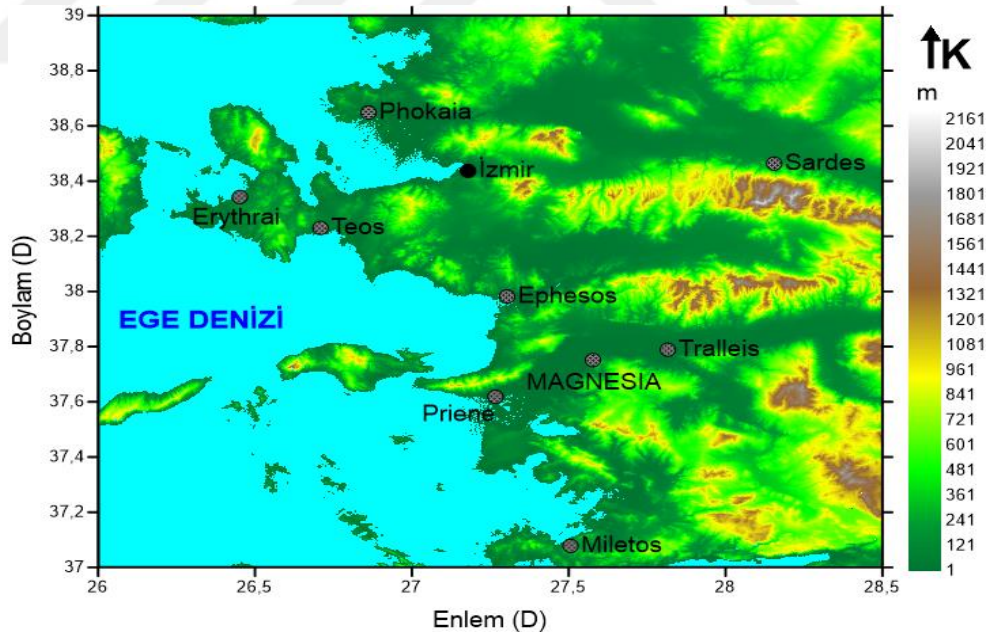
evrimin genel bir benzetmesini temsil etmektedir. Bahsedilen bir problem için problemin tipi ve bu konuda bilgi olup olmadığı gibi faktörler değerlendirilerek burada listelenen hibrit ve ayarlanmış genetik algoritmalarından biri tercih edilebilir.

Melez genetik algoritmanın yaklaşımı, çözüm uzayında rastgele dağılabilen çözümleri en yakın minimuma yönlendirmek ve genetik evrimde bu çözümlerden sonra nesiller çıkararak minimumun yerel mi yoksa küresel mi olduğunu kontrol etmektir. Yoğun bir popülasyon yoğunluğu ile uygulanan hibrit bir genetik algoritmada, en az bir örnek küresel minimum etrafında yer almalıdır. Algoritma bu noktaya gelir gelmez kümedeki örnekler arasında global minimum etrafındaki örneklerin hızla artması ve homojen bir küme oluşması beklenir. Ayrıca, mevcut model parametreleri bilgisi, geliştirme (HR) sırasında arama alanını tanımlamak veya azaltmak için kullanılabilir. Bu mevcut durum, jeofizik problemlerin çözümünde uzmanlığın doğrudan algoritmaya dahil edilmesini mümkün kılmaktadır.

BÖLÜM 4

MAGNESIA ARKEOLOJİK ALANI VE JEOLÖERİJİK ÖZELLİKLERİ

Aydın İli, Germencik İlçesi Ortaklar Bucağına bağlı Tekin Köy sınırları içinde, Ortaklar Söke karayolunun üzerinde yer alan Menderes Magnesiası (Magnesia ad Meandrum) hellenistik dönemde, önce Seleukos, ardından Bergama Krallığı'nın hakimiyetine giren Magnesia, Roma Döneminde de önemini korumuştur ve ardından Bizans Döneminde piskoposluk merkezi haline gelmiştir. Magnetler adı verilen bir kavim tarafından kurulan bu magnesia yaklaşık 1.5 km. çapında bir alanı kapsamakta olup kent suru ile çevrili bir haldedir. Izgara planlı cadde ve sokak sistemine sahip bir kent olan Magnesia; Priene, Tralleis ve Ephesos üçgeni arasında da ticari ve stratejik açıdan önemli arz eden bir konumdadır (Şekil 4.1). Bu durumda nehir taşmalarının ve Gümüş Dağı'ndan inen yağmur sularının getirdiği mil tabakasının kenti örtmesinin rolü yüksektir. M.S. 17'de geçirdiği yıkıcı bir deprem sebebiyle epeyce zarar görmüştür (Bingöl, 2005).

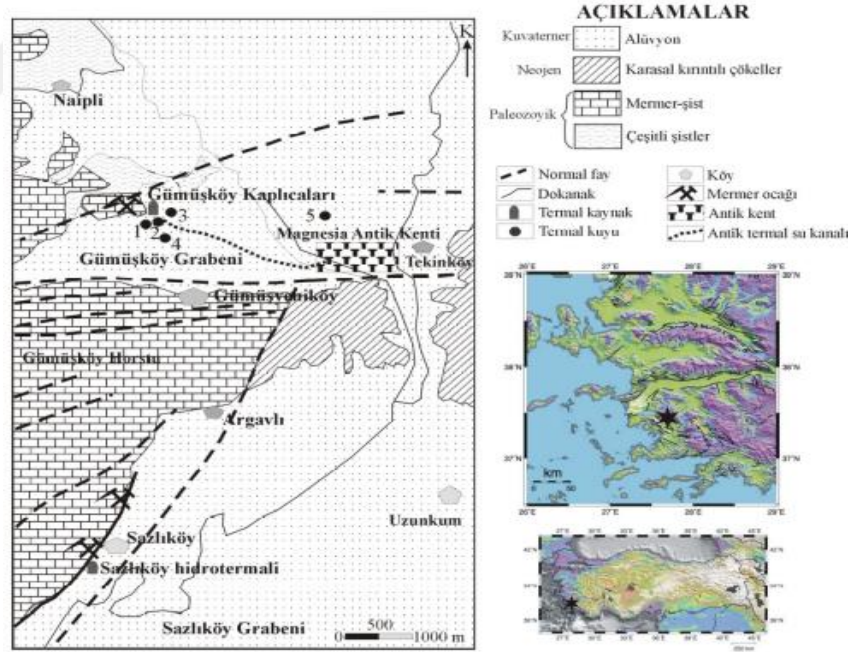


Şekil 4.1 Ege Bölgesi'ndeki önde gelen antik kentler, Magnesia arkeolojik alanının konumu ve bölgenin topografyası

4.1 Bölge Jeolojisi ve Jeofiziği

Jeolojik olarak, bölgede temeli paleozoik yaşlı Menderes masifi metamorfikleri bulunmaktadır. Bunlar Büyük Menderes çöküntüsünün dışında kalan yükselim bölgelerinde geniş yüzlekler vermektedirler (Şekil 4.2). Metamorfikler; mermer, çeşitli şistler, gnays, kuvarsit ve serpantinitten oluşmaktadır (Tarcan ve Gemici, 2001). Çalışma yürütülen arkeolojik bölge sel sularının taşıdığı ince silt tabakalarıyla örtülmüş durumdadır. 1989 yılında Başokur (1992) tarafından Magnesia arkeolojik alanında ilk jeofizik çalışma, Argavlı Tümülüsü'nün girişinin araştırılması amacıyla üç gerilim yöntemi uygulanarak gerçekleştirilmiştir.

Bölgede Akdeniz iklimi hakimdir. Kış yağmurları bölgeden kaçamadığı için Artemis Kutsal Alanı ve Anıt Giriş Alanı (Propylon) yılın 7-8 ayı sular altında kalmaktadır.



Şekil 4.2 Magnesia arkeolojik alanının konumu ve jeolojisi (Timur, 2009)



Şekil 4.3 Jeofizik Araştırma Bölgelerini gösteren yer bulduru haritası

Gümüşçay üzerinde yüzeyde gözlemlenen sur yapısının devamlılığının kontrol amacı ile 43.5m uzunluğunda 3 m aralıkla 6 adet profil üzerinde öz direnç tomografi ölçümleri 1.5 metre elektrod aralıklı aralıkla 1. seviyeden 13. seviyeye kadar alınmıştır (Şekil 4.3). Toplanan veriler ELRIS2D ve EarhImager yazılımı ile değerlendirilerek profillerin düşey elektrik tomografi kesitleri oluşturulmuştur.

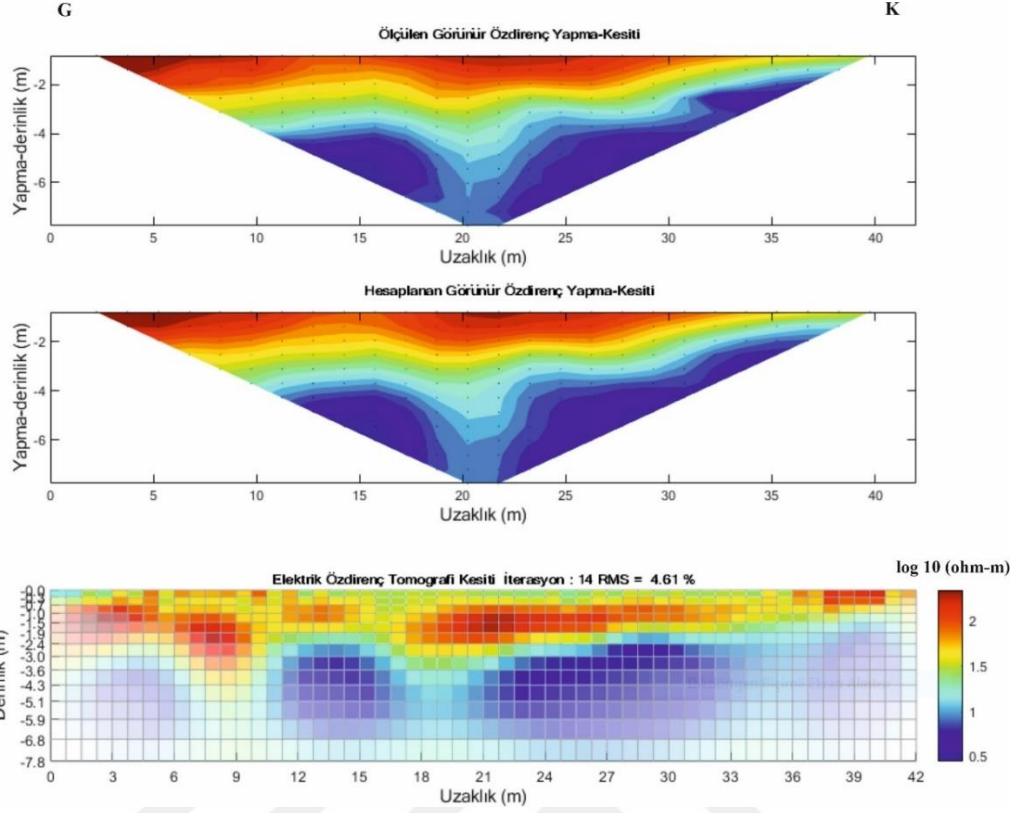
BÖLÜM 5

DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

Çalışma alanı güncel alüvyon birimleri içerisinde yer almakta ve alüvyon ağırlıklı olarak silt ve ince taneli kum birimlerinden oluşmaktadır (Şekil 16). Bu birimlerin özdirençleri çevre birimlere göre düşük özdirençli olup, özdirenç değerleri 15 ile 30 ohm. metre arasında değişim göstermektedir. Yer altı su seviyesinin etkisinde ise bu değerler daha da düşmektedir. Aranılan sur yapısı ise çoğunlukla traverten ve bazı kesimlerde mermer gibi içinde bulunduğu ortama göre yüksek özdirenç gösteren malzemelerden oluşmaktadır. Aranılan olası yapının alüvyon ortam içinde gömülü, olasılıkla traverten veya mermerden yapılmış bir sur yapısı olması nedeniyle, çevresine göre, yüksek elektrik özdirenç göstermesi beklenmektedir.

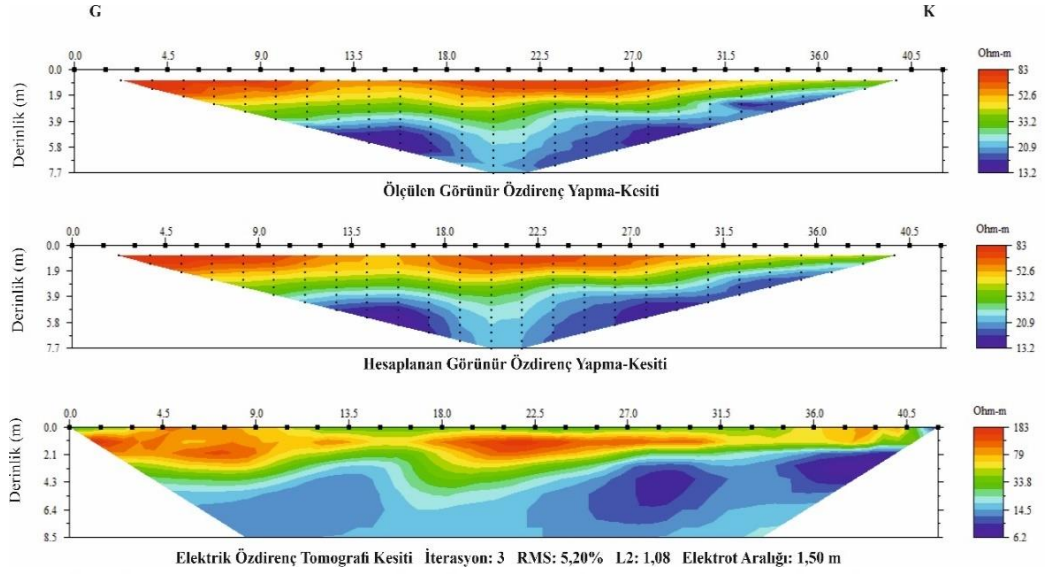
5.1 Profil-1

Çalışma alanının doğusunda bulunan Gümüşçay sınırında yer alan profil-1'in ELRIS2D ve EarthImager yazılımları ile değerlendirilmesi sonucu elde edilen kesitler şekil 5.1 ve şekil 5.2'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Profil-1, ELRIS2D yazılımı ile değerlendirilmiş elektrik öz direnç tomografi kesitleri

ELRIS2D yazılımıyla oluşturulan kesit incelendiğinde ağırlıklı olarak mavi renkle gösterilen düşük öz dirençli anomaliler görülürken, yüzeye yakın kısımlarda ise kırmızı renkle gösterilen yüksek öz dirençli değerler gözlemlenmektedir. Bu yapıların çevresine göre yüksek öz direnç göstermesi beklenen sur yapıları olduğu tahmin edilmektedir. Kesitte yüksek öz dirençli yapılar profilin 3, 7, 21 ve 39 metreler arasında yer aldığı görülmektedir.

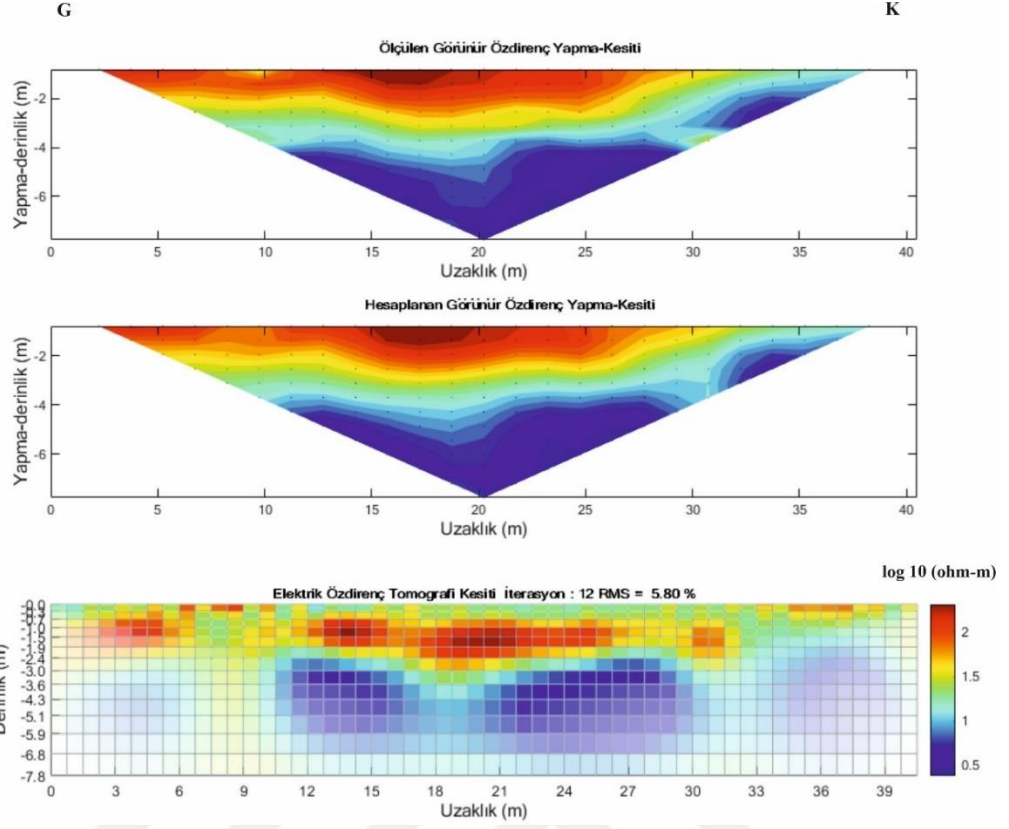


Şekil 5.2 Profil-1, EarthImager yazılımı ile değerlendirilmiş elektrik özdirenç tomografi kesitleri

Profil-1 için EarthImager yazılımı ile değerlendirilmiş kesitler (Şekil 5.2) incelendiğinde benzer şekilde ağırlıklı olarak mavi renkle gösterilen anomalilerin düşük özdirenç değerlerinden oluştuğu görülmektedir. Kesitte yüksek özdirençli yapılar profilin 3, 6 ve 21 metreler arasında yer aldığı görülmektedir.

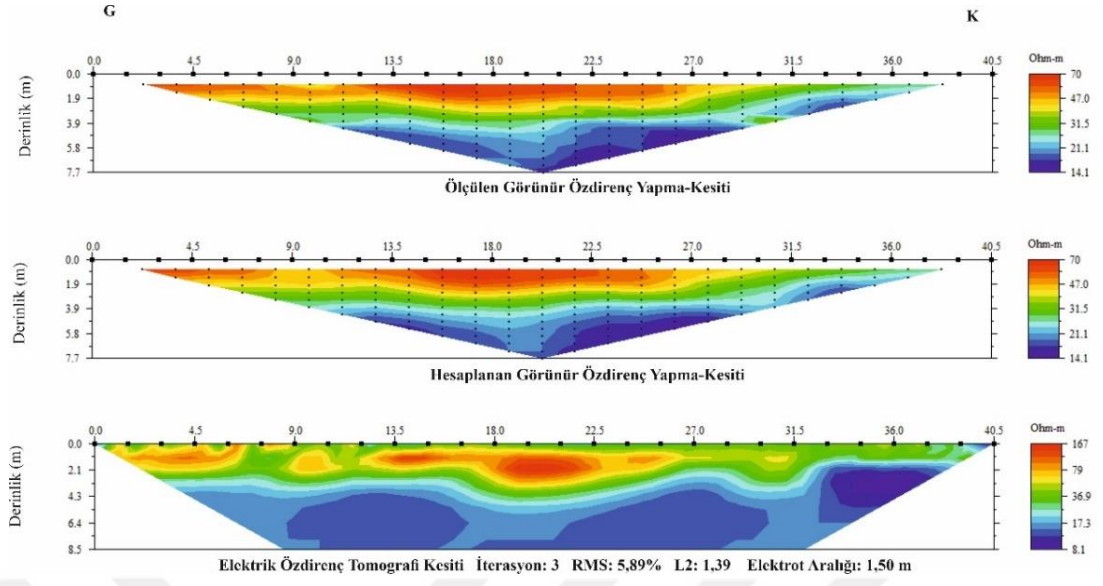
5.2 Profil-2

Profil-2, Profil-1'in 3 metre batısında ve buna paralel olarak alınmıştır. ELRIS2D yazılımıyla elde edilen kesitler (Şekil 5.3) incelendiğinde gözlemlenen en belirgin yapı 19 metrede yer alan kırmızı renkle gösterilen yüksek özdirençli anomalidir. Bu profilde de devam ettiği gözlemlenen bu yapı yaklaşık 2 metre derinlik seviyesinde yer almaktadır.



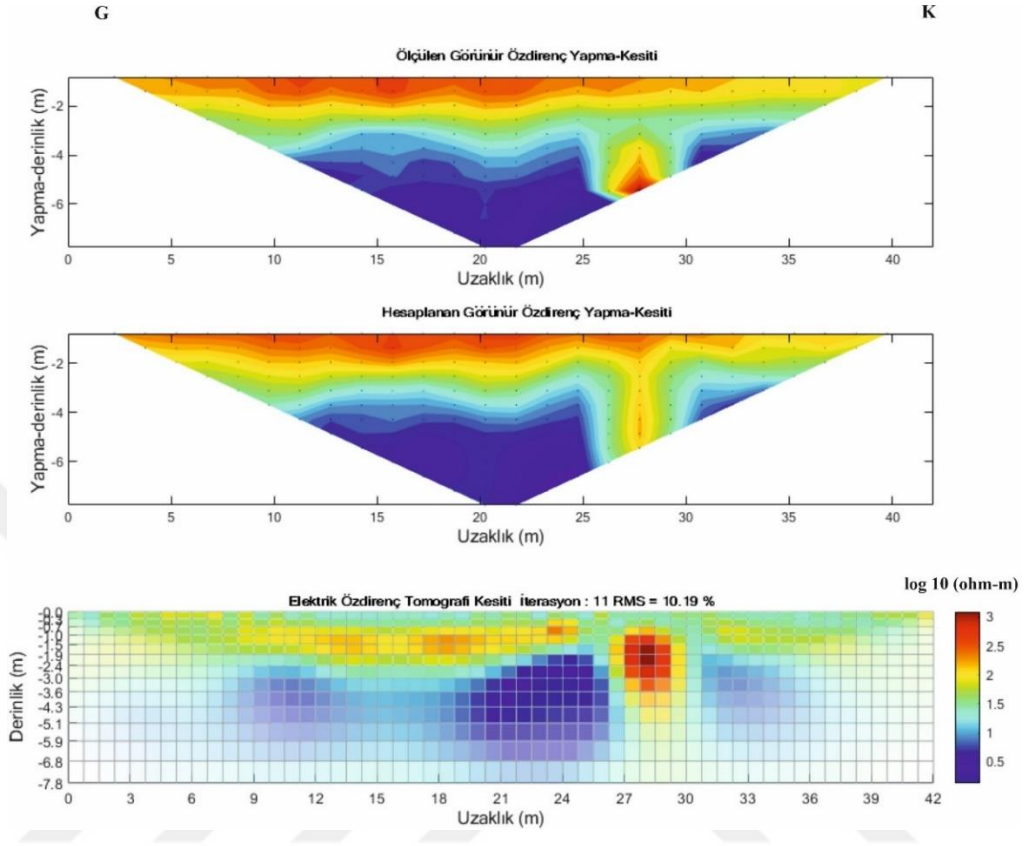
Şekil 5.3 Profil-2, ELRIS2D yazılımı ile değerlendirilmiş elektrik özdirenç tomografi kesitleri

Profil-2 için ErathImager yazılımı ile elde edilen kesitler (Şekil 5.4) incelendiğinde yaklaşık olarak benzer sonuçlar görülmektedir.



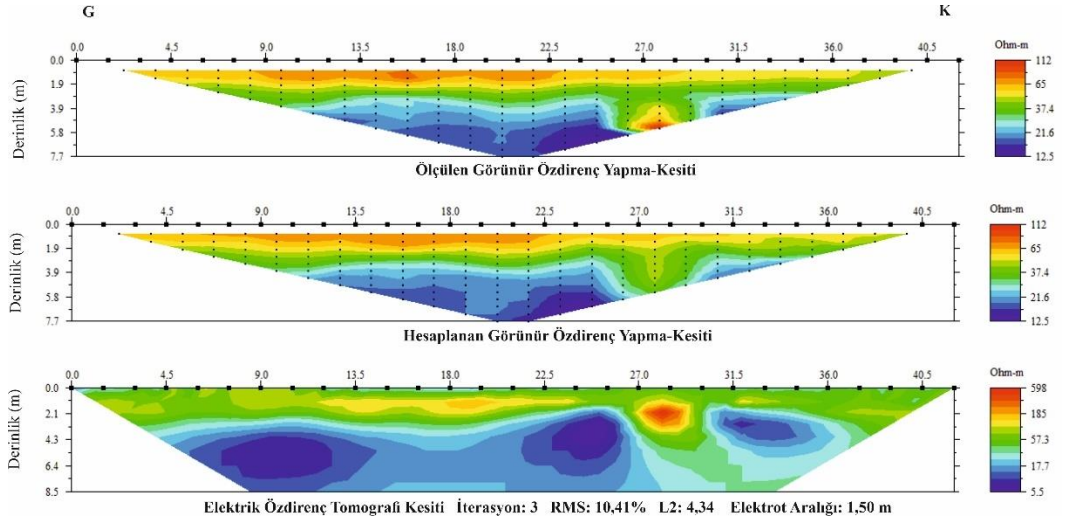
Şekil 5.4 Profil-2, EarthImager yazılımı ile değerlendirilmiş elektrik özdirenç tomografi kesitleri

5.3 Profil-3



Şekil 5.5 Profil-3, ELRIS2D yazılımı ile değerlendirilmiş elektrik özdirenç tomografi kesitleri

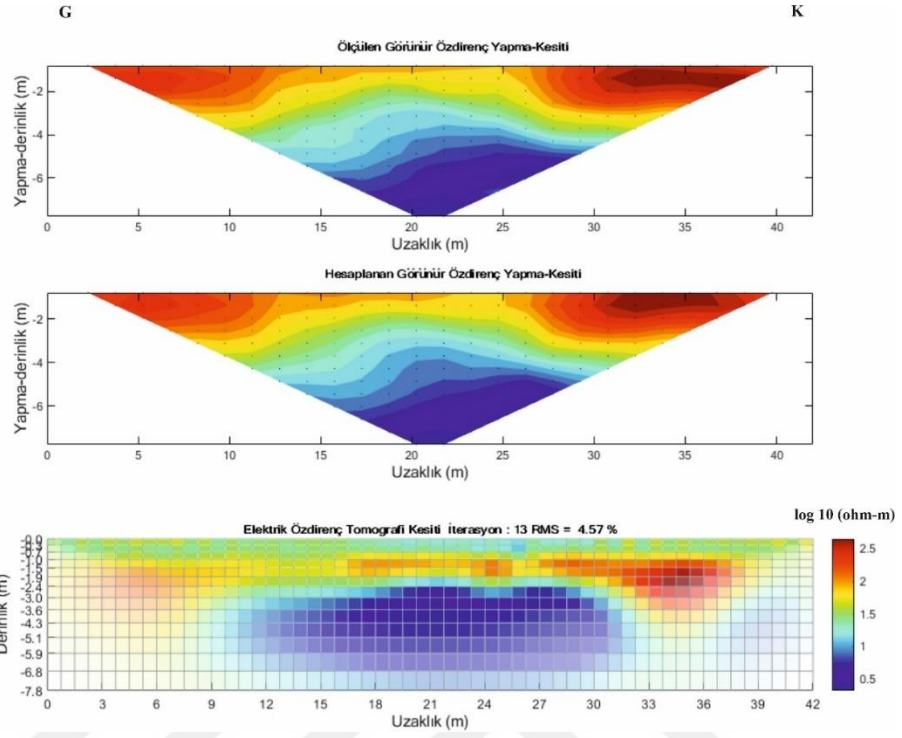
Profil-3'ün ELRIS2D yazılımı ile değerlendirilmesi sonucu elde özdirenç kesitleri (Şekil 5.5) incelendiğinde Profil-1 ve Profil-2'de devamlılık gösteren ve 18 metrede yer alan anomalinin bu profilde de devamlılığı görülmektedir. Fakat kesitteki en önemli aykırılık 28 metrede yüksek özdirenç değeri ile gözlemlenen 3 metre derinliğindeki kapanımdır.



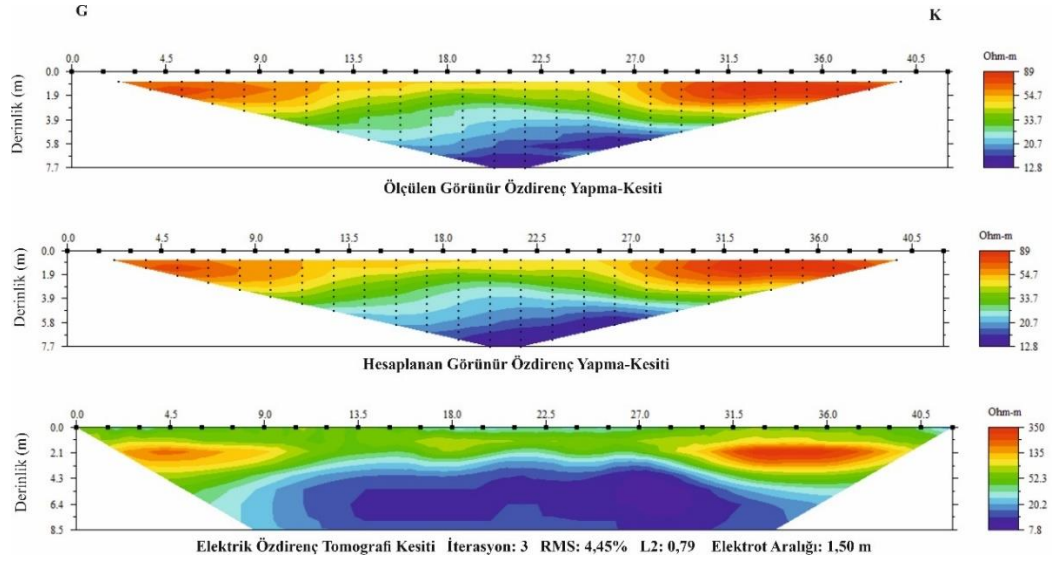
Şekil 5.6 Profil-3, EarthImager yazılımı ile değerlendirilmiş elektrik özdirenç tomografi kesitleri.

Aynı profilin EarthImager yazılımı ile değerlendirilmiş kesitleri incelendiğinde Profil-1 ve Profil-2'nin devamlı olması durumu net bir şekilde görüntülenememiştir. Kesitte en belirgin yapı 28 metrede yaklaşık 3 metre derinliğindeki kapanımdır.

5.4 Profil-4



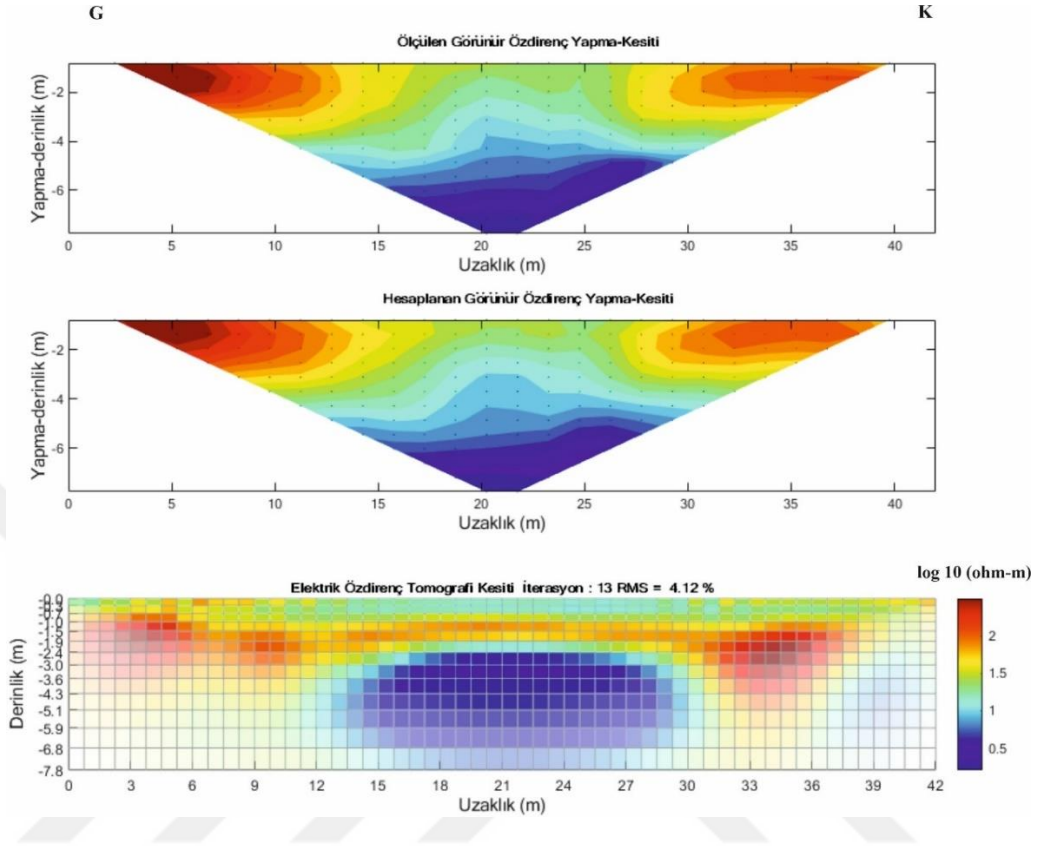
Profil-4'ün ELRIS2D yazılımı değerlendirilmesi sonucu elde edilen öz direnç kesitlerinde (Şekil 5.7) gözlemlenen en belirgin yapı 27-39 metreler arasında yer alan yaklaşık 3 metre derinlikte yer alan kırmızı renkle gösterilen yüksek öz dirençli anomalidir. Bu anomalilerin geniş olması anomalinin önemli olabileceğini göstermektedir. Bunun yanı sıra 18-25 metre aralığında yer alan yaklaşık 1.5 metre derinliğindeki yüksek öz direnç değerli anomali dikkat çekmektedir.



Şekil 5.8 Profil-4, EarthImager yazılımı ile değerlendirilmiş elektrik özdirenç tomografi kesitleri

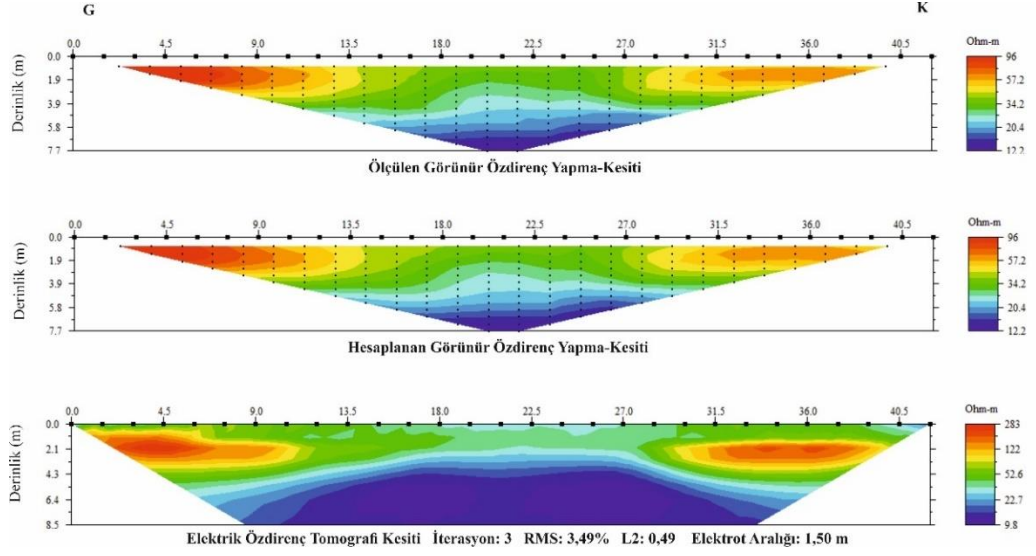
ErathImager yazılımı ile elde edilen kesitler (Şekil 5.8) incelendiğinde en belirgin anomali 3-6 ve 29-38 metreler arasında yer alan yaklaşık 2 metre derinlikte yer alan kırmızı renkle gösterilen yüksek özdirençli anomalilerdir.

5.5 Profil-5



Şekil 5.9 Profil-5, ELRIS2D yazılımı ile değerlendirilmiş elektrik öz direnç tomografi kesitleri

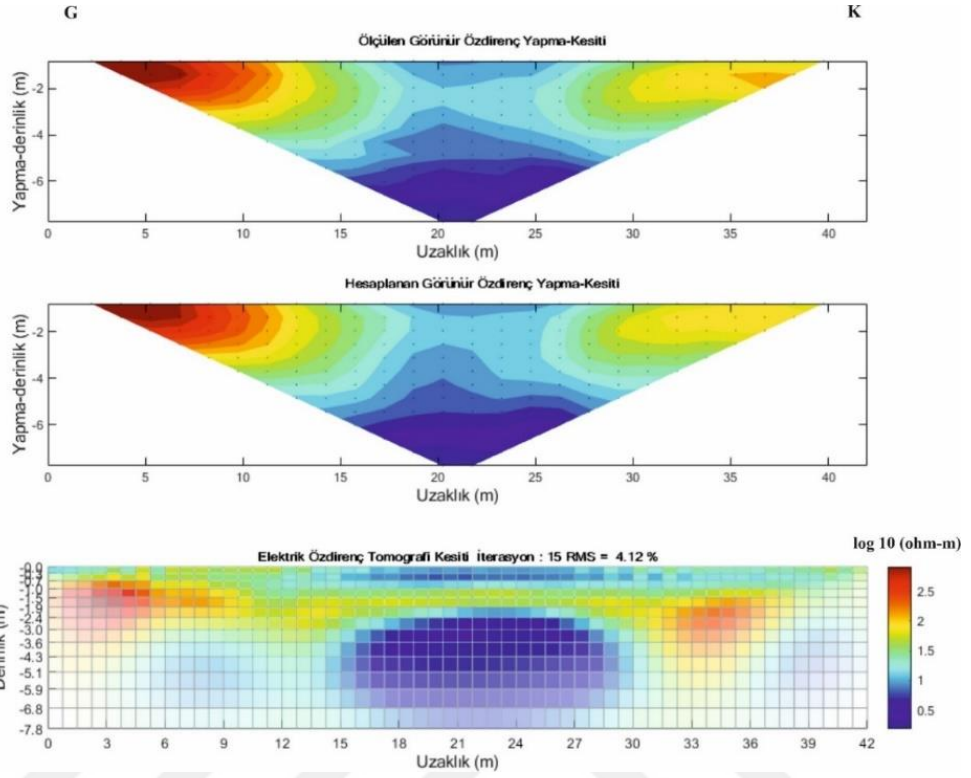
Profil-5'in ELRIS2D yazılımı ile değerlendirilmesi neticesinde elde edilen öz direnç kesitleri incelendiğine 3-7 ve 27-39 metreler arasında yer alan anomalilerin devamlılık gösterirken profilin 1-6 metrelerinde ve sıg derinlikte yer alan anomalinin belirginlik kazandığı görülmektedir (Şekil 5.9).



Şekil 5.10 Profil-5, EarthImager yazılımı ile değerlendirilmiş elektrik özdirenç tomografi kesitleri

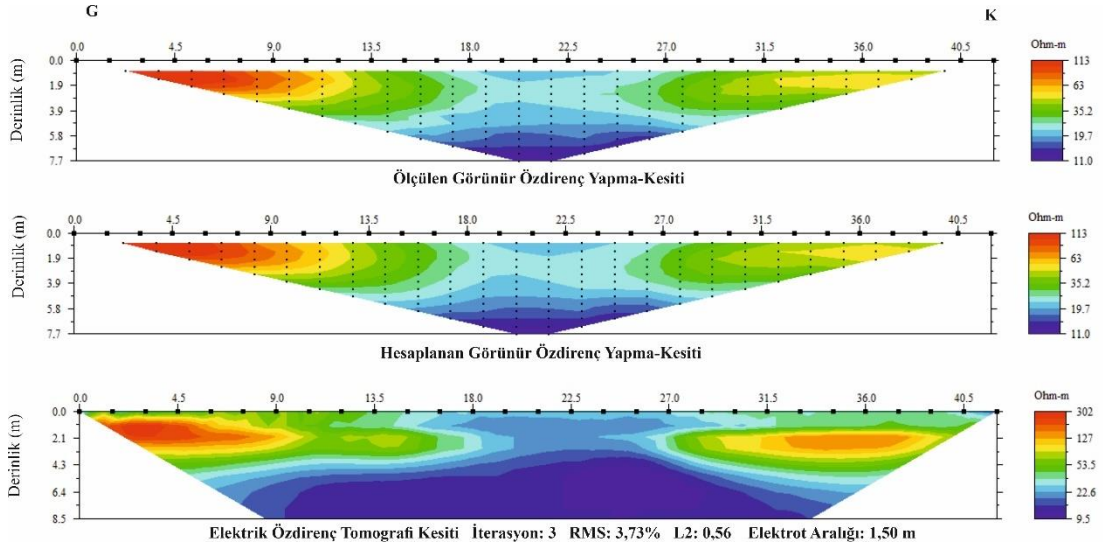
ErathImager yazılımı ile elde edilen kesitler (Şekil 5.10) incelendiğinde benzer şekilde en belirgin yapı 3-6 ve 29-38 metreler arasında yer alan anomalilerin devam etmesidir.

5.6 Profil-6



Şekil 5.11 Profil-6, ELRIS2D yazılımı ile değerlendirilmiş elektrik özdirenç tomografi kesitleri

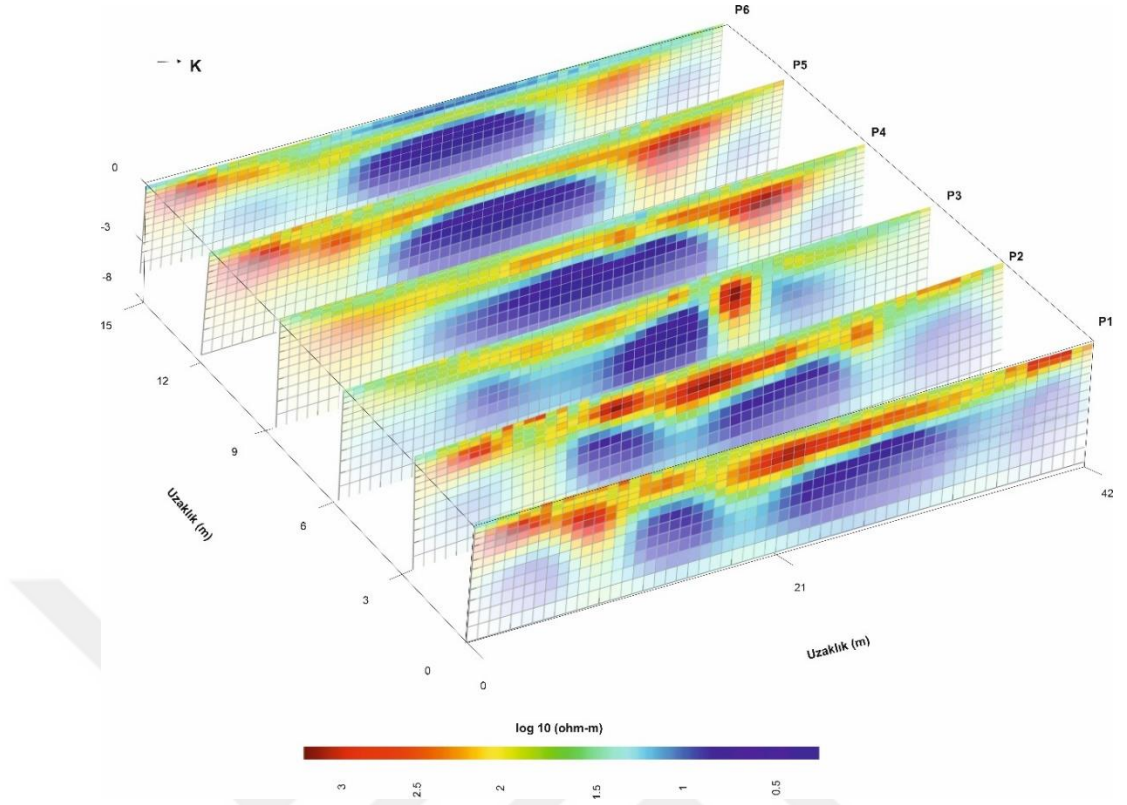
Profil-6'nın ELRIS2D yazılımı ile değerlendirilmesi neticesinde elde edilen özdirenç kesitleri (Şekil 5.11) incelendiğinde Profil-5'te gözlenen yapıların devamlılığı görülmektedir. Ayrıca 15-30 metreler arasında mavi renkle gösterilen düşük özdirençli değerler varlığını göstermiştir.



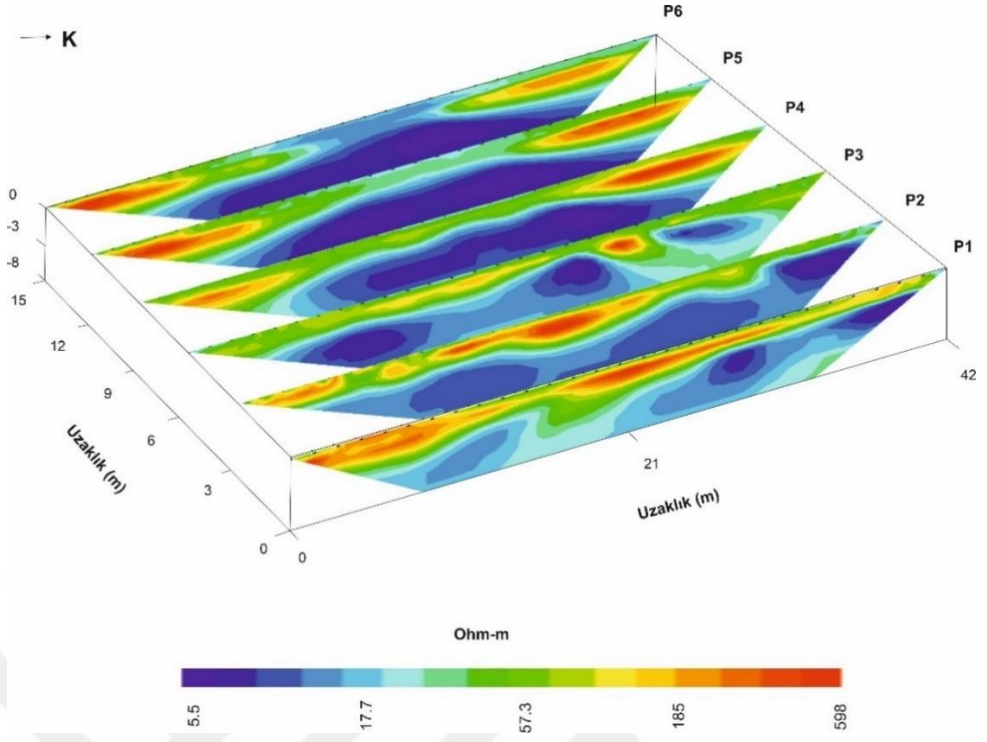
Şekil 5.12 Profil-6, EarthImager yazılımı ile değerlendirilmiş elektrik özdirenç tomografi kesitleri

ErathImager yazılımı ile elde edilen kesitler (Şekil 5.12) incelendiğinde Profil-5'te gözlemlenen 3-6 ve 29-38 metreler arasında ve yaklaşık 2 metre derinlikte yer alan yapıların devamlılığı söz konusudur. Ayrıca 15-30 metreler arasında yüzeye ulaşan mavi renkle gösterilen düşük özdirençli değerler gözlenmiştir.

Birbirine paralel olarak alınmış 6 profil özdirenç tomografi kesitleri (Şekil 5.13 ve şekil 5.14) bir arada incelendiğinde kırmızı renkle gösterilen yüksek özdirençli bölgelerin olası sur yapısı olduğu ve K-G yönünde devamlılık gösterdiği düşünülmektedir. Bazı profillerde yüksek özdirenç değerleri içeren küçük anomalilerin varlığı saçılmış şekilde yer alsa da anomalinin genel yapısı ana hatları ile görülmektedir. Bu saçılımların olası nedeninin, ana yapıdan kopmuş veya ayrılmış malzemelerin etkisi olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.13 ELRIS2D yazılımı ile değerlendirmiş 6 profil elektrik özdirenç tomografi kesitleri



Şekil 5.14 EarthImager yazılımı ile değerlendirmiş 6 profil elektrik özdirenç tomografi kesitleri

BÖLÜM 6

SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında Aydın ilinin Ortaklar beldesi sınırları içerisinde bulunan Magnesia antik kentinde şehir surlarının devamlılığının araştırılması amacıyla toplanan 6 profil elektrik özdirenç tomografi verileri değerlendirilmiştir. Araştırılması düşünülen yapı güncel alüvyon birimleri içerisinde yer almakta ve alüvyon ağırlıklı olarak silt ve ince taneli kum birimlerinden oluşmaktadır. Bu birimlerin özdirenç karşılıkları 15 ile 30 ohm metre arasında değişim göstermektedir. Aranılan sur yapısı ise çoğunlukla traverten ve bazı kesimlerde mermer gibi içinde bulunduğu ortama göre yüksek özdirenç gösteren malzemelerden oluştuğu için özdirenç tomografi yöntemi seçilmiş ve gerçekleştirilmiştir.

Çalışma alanında bulunan Gümüştay üzerinde yüzeyde gözlemlenen sur yapısının devamlılığının kontrol amacı ile 43.5m uzunluğunda 3 m aralıkla 6 adet profil üzerinde özdirenç tomografi ölçümleri alınmıştır. Toplanan veriler melez genetik algoritmalar temel alınarak oluşturulan MATLAB tabanlı ELRIS2D yazılımı ile değerlendirilmiştir. Ayrıca toplanan veriler dünya genelinde elektrik özdirenç verilerinin değerlendirilmesinde sıklıkla kullanılan EarthImager programı ile de değerlendirilmiştir. Her iki program ile üretilen elektrik özdirenç tomografi kesitleri karşılaştırıldığında kesitlerde önemli derecede benzerlikler görülmektedir.

Elde edilen sonuçlara göre sahada beklenen sur yapısının yaklaşık olarak K-G yönünde devamlılık gösterdiği sonucuna varılmıştır. Profil-1'in her iki program ile elde edilen elektrik tomografi kesiti incelendiğinde ağırlıklı olarak düşük özdirenç değerlerinden oluştuğu görülmektedir. Yüzeyden yaklaşık 3.5 metre derinliğe kadar kısımlarda ise olası sur yapısı olması beklenen yüksek özdirençli yapılar görülmektedir. Profil 2'nin her iki program ile üretilen elektrik tomografi kesitlerinde en önemli anomali yaklaşık 19 metre de 2.5 metre derinlikli yüksek özdirençli kapanımdır. Profil 3'te, Profil-1 ve Profil-2'de devamlılık gösteren ve 18 metrede yer alan anomali bu profilde de devamlılık olmuştur.

Fakat her iki yazılım ile elde edilen kesitlerdeki en önemli anomali 28 metrede yüksek öz direnç değeri ile gözlemlenen 3 metre derinliğindeki kapanımdır. Profil-4 için oluşturulan kesitler incelendiğinde en belirgin anomali 3-6 ve 29-38 metreler arasında yer alan yaklaşık 2 metre derinlikte yer alan yüksek öz dirençli kapanımlardır. Profil-5 ve Profil-6 için bu kapanımların devamlılığı söz konusudur. Genel olarak elde edilen kesitler incelendiğinde ELRIS2D yazılımı ticari amaçlarla oluşturulan EarthImager yazılımı ile önemli derecede benzer kesitler üretilip, güvenilirliğini kanıtlamıştır. Fakat en güvenilir sonuç olası sur yapısı olması beklenen bölgelerde kazı çalışmaları yapılarak sağlanabilir.



KAYNAKLAR

- Akca, İ. (2004). *Elektrik verilerin Lamarckian genetik algoritma ile ters çözümü* [Yüksek lisans tezi]. Ankara Üniversitesi.
- Akça, İ. (2010). *Melez genetik algortimalar ile yapı tabanlı model gerçekleştirme* [Doktora tezi]. Ankara Üniversitesi.
- Akça, İ. 2016. *ELRIS2D: A Matlab Package for the 2D Inversion of DC Resistivity/IP Data*, 3 s.
- Akça, İ. ve Başokur, A.T. (2010). Extraction of structure-based geoelectrical models by hybrid genetic algorithms. *Geophysics*, 75 (1); F15-F22.
- Bank, R. E. (2004). *PLTMG: A Software Package for Solving Elliptic Partial Differential Equations, User's Guide 9.0*, Department of Mathematics, University of California.
- Başokur, A. T., Akca, I. and Siyam, N.W. E. (2007). Hybrid genetic algorithms in view of the evolution theories with application for the electrical sounding method. *Geophysical Prospecting*, 55; 393–406.
- Berge, M. A. (2011). *Elektrik öz direnç ters-çözümüyle çok katmanlı arkeolojik yerleşmelerin görüntülendirilmesi* [Doktora Tezi]. Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Berge, M.A. (2005). *İki-boyutlu öz direnç ters çözüm modellemesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Bingöl, O. (2005). *Menderes Magnesiası/Magnesia on the Meander: Theatron*. İstanbul: Homer Yayınları.
- Blaschek, R., Hördt, A. and Kemna, A. (2008). A new sensitivity-controlled focusing regularization scheme for the inversion of induced polarization data based on the minimum gradient support. *Geophysics*, 73, (2); F45–F54.

- Broyden, C. G. (1965). A class of methods for solving nonlinear simultaneous equations. *Mathematics of Computation*, 19; 577–593.
- Candansayar, M. E. (2002). *Sönümlü en-küçük kareler ve eşlenik türev algoritmalarının ardışık kullanımı ile manyetotellürik verilerin Düzgünleştiricili İki-Boyutlu Ters Çözümü* [Doktora Tezi]. Ankara Üniversitesi.
- Candansayar, M. E., (2008). Two-dimensional inversion of magnetotelluric data with consecutive use of conjugate gradient and least-squares solution with singular value decomposition algorithms. *Geophysical Prospecting*, 56; 141–157.
- Candansayar, M. E., & Başokur, A. T. (2001). Detecting small-scale targets by the 2D inversion of two-sided three-electrode data: Application to an archaeological survey. *Geophysical Prospecting*. 49; 40–58.
- Candansayar, M. E., (2010). II- *Doğru Akım Öz direnç Yöntemi*, Lisans Ders Notu, Ankara.
- Christiansen, A. V., & Auken, E. (2004). Optimizing a layered and laterally constrained 2D inversion of resistivity data using Broyden's update and 1D derivatives. *Journal of Applied Geophysics*, 56; 247–261.
- Chunduru, R. K., & Sen, M. K. & Stoffa, P. L. (1997). Hybrid optimization methods for geophysical inversion. *Geophysics*, 62; 1196-1207.
- Coggon, J. H. (1971). Electromagnetic and electrical modeling by the finite-element method. *Geophysics*, 36, 132-155.
- Constable, S.C., & Parker, L. P., & Constable, C. G. (1987). Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, 52; 289–300.

- deGroot-Hedlin, C., & Constable, S. (1990). Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, 55;1613–1624.
- Delaunay, B. (1934). *N. Sur la Sphère Vide. Izvestia Akademia Nauk SSSR*, VII Seria, Otdelenie Matematicheskii i Estestvennyka Nauk 7;793-800.
- DeLugão, P.B, Portniaguine, O., & Zhdanov M. S. (1997). Fast and stable two-dimensional inversion of magnetotellurics data. *J. Geomag. Geoelectr.* 49, 1469-1497.
- Dey, A., & Morrison. H.F. (1979). Resistivity modeling for arbitrarily shaped two-dimensional structures. *Geophysical Prospecting*, 27; 106-136.
- Edwards, L.S.,(1977). A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization. *Geophysics*, 42; 1020-1036.
- Erdoğan, E., Demirci, I. and Candansayar, M. E. (2008). Incorporating topography into 2D resistivity modeling using finite-element and finite-difference approaches. *Geophysics*,73, (1); F135-F142.
- Goldberg, D. E., (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley.
- Günther, T., (2005). *Inversion Methods and Resolution Analysis for the 2D/3D Reconstruction of Resistivity Structures from DC Measurements* [PhD Thesis]. University of Mining and Technology, Freiberg (Germany).
- Günther, T., & Rücker, C. (2005). Applications of the triple-grid technique to the inversion of dc resistivity data. 21. *Kolloquium Elektromagnetische Tiefenforschung, Haus Wohldenber, Holle, 3-7.10.2005.*

Holland, J. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, Ann Arbor, MI: The University of Michigan Pres.

Jepsen, A.F. (1969). *Numerical modeling in resistivity prospecting* [Ph. D. Thesis]. University of California, Berkley.

Kaya, M.A., Başokur, A.T., Ateş, A., Pekşen, E. ve Candansayar, E. (1996). Göndürle-I Höyük Mezarlığının Jeofizik Yöntemlerle Araştırılması. TÜBİTAK YDABÇAG- 142 no'lu Proje Raporu.

Loke, M.H. (1999). *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: a practical guide to 2D and 3D surveys*.

<http://www.terrajp.co.jp/lokenote.pdf> Erişim tarihi: 01.08.2022.

Loke M.H., & Barker R.D. (1996a). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophys. Prosp.*, 44; 131–152.

Marescot L., & Rigobert S., & Lopes, S.P., & Lagabrielle R., & Chapellier, D. (2006). A general approach for DC apparent resistivity evaluation on arbitrarily shaped 3D structures. *Journal of Applied Geophysics*, 60; 55-67.

Mahinthakumar G., & Sayeed M. (2005). *Hybrid genetic algorithm-local search methods for solving groundwater source identification inverse problems*. J. Water Resour. Plng. & Mgmt. 131; 45-57.

Menke, W. (1984). *Geophysical data analysis: Discrete inverse theory*: Academic Press Inc.

Mufti, I. R. (1976). Finite-difference resistivity modeling for arbitrarily shaped two-dimensional structures. *Geophysics*, 41; 62-78.

- Olayinka, A. I. & Yaramanci, U. (2000). Use of block inversion in the 2-D interpretation of apparent resistivity data and its comparison with smooth inversion. *Journal of Applied Geophysics*, 45; 63–81.
- Papadopoulos, N. G., & Tsourlos, P., & Tsokas, G. N. & Sarris A., (2006). Two-dimensional and three-dimensional resistivity imaging in archaeological site investigation: *Archaeological Prospection*, 13; 163–181.
- Rijo, L. (1977). *Modeling of electric and electromagnetic data* [Ph.D. thesis]. University of Utah.
- Sasaki, Y. (1989). Two-dimensional joint inversion of MT and dipole-dipole resistivity data. *Geophysics*, 54; 254–262.
- Sasaki, Y. (1992). Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophysical Prospecting*, 40; 453-464.
- Sen, M. K., & Stoffa, P. (1995). *Global optimization methods in geophysical inversion*, Elsevier Publ.
- Silvia R., & Oibar M., & Oliver C., & Marquez P., & Miranda J. M. (2020). Finite Element Analysis and Experimental Characterization of Soil Electrical Resistivity at El Roque de los Muchachos Observatory. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*. Vol.12 No.7, DOI: 10.4236/jemaa.2020.127008.
- Smith, T., & Hoversten, M., & Gasperikowa E., & Morrison, F. (1999). Sharp boundary inversion of 2D magnetotelluric data. *Geophysical Prospecting*, 47; 469–486.
- Soupios, P., & Papadopoulos, I., & Kouli M., & Georgaki, I., & Vallianatos, F., & Kokkinou, E. (2006). Investigation of waste disposal areas using electrical

methods: A case study from Chania, Crete, Greece: *Environmental Geology*, 51; 1249–1261.

Stoffa, P. L., & Sen, M. K. (1991). Nonlinear multiparameter optimization using genetic algorithms: Inversion of plane wave seismograms, *Geophysics*, 56; 1794–1810.

Stummer, P. (2003). *New developments in electrical resistivity imaging* [Phd Thesis]. Swiss Federal Institute of Technology Zurich.

Sünbül, F. (2007). *Balıkesir-burhaniye-ören'deki bergaz tepe adremytteion antik alanının arkeojeofizik yöntemlerle tespiti* [Yüksek lisans tezi]. Sakarya Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü.

Timur, E. (2009). *Manyetik ve elektromanyetik verilerinin birleşik ters çözümü*. [Doktora Tezi]. Dokuz Eylül Üniversitesi.

Trampert, J., & Leveque, J.-J. (1990). *Simultaneous iterative reconstruction technique: physical interpretation based on the generalized least squares solution*. *J. Geophys. Res.* 95;12553–12559.

Vassallo, M., & Zollo, A. (2008). Depth and Morphology of reflectors from the non-linear inversion of arrival time and waveform semblance data. Part I: Method and applications to synthetic data. *Geophysical Prospecting* 56;527-540.

Wéber, Z. (2001). Optimizing model parameterization in 2D linearized seismic travelttime tomography, *Phys. Earth Planet. Inter.* 124; 33-43.

Zhdanov, M. S. (2002), *Geophysical inverse theory and regularization problems*. Elsevier