

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ÖZDİRENÇ TERS-ÇÖZÜMÜYLE
ÇOK KATMANLI ARKEOLOJİK
YERLEŞMELERİN GÖRÜNTÜLENDİRİLMESİ

Meriç Aziz BERGE

Ekim, 2011
İZMİR

**ELEKTRİK ÖZDİRENÇ TERS-ÇÖZÜMÜYLE
ÇOK KATMANLI ARKEOLOJİK
YERLEŞMELERİN GÖRÜNTÜLENDİRİLMESİ**

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Doktora Tezi

Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Meriç Aziz BERGE

Ekim, 2011

İZMİR

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

MERİÇ AZİZ BERGE, tarafından PROF. DR. MAH MUT GÖKTUĞ DRAHOR yönetiminde hazırlanan “ELEKTRİK ÖZDİRENÇ TERS-ÇÖZÜMÜYLE ÇOK KATMANLI ARKEOLOJİK YERLEŞMELERİN GÖRÜNTÜLENDİRİLMESİ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.



Prof. Dr. Mahmut Göktuğ DRAHOR

Yönetici



Prof. Dr. Coşkun SARI

Tez İzleme Komitesi Üyesi



Doç. Dr. Talip GÜNGÖR

Tez İzleme Komitesi Üyesi



Prof. Dr. Ayşan GÜREER

Jüri Üyesi



Doç. Dr. Derman DONDURUR

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Mustafa SABUNCU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Başta tezimin hazırlanması sırasında yardımlarını ve önerilerini esirgemeyen, kendisini bir bilimci olarak her zaman örnek almaya çalıştığım tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Mahmut G. DRAHOR'a,

Tez çalışmamın aşamalarını sürekli takip eden tez izleme komitesi üyeleri Sayın Prof. Dr. Coşkun SARI ve Doç. Dr. Talip GÜNGÖR'e,

Tez savunma sınavına jüri üyesi olarak katıldıkları için Prof. Dr. Aysan GÜRER ve Doç. Dr. Derman DONDURUR'a,

Göstermiş olduğu sevgi, sabır ve anlayıştan dolayı değerli eşim Elif BERGE ile yardımları ve manevi desteklerinden dolayı aileme,

Eski Smyrna (Bayraklı-Tepekule) Höyüğü arkeolojik alanında gerçekleştirilen jeofizik çalışmalarındaki desteklerinden dolayı Kazı Başkanı Sayın Prof. Dr. Meral AKURGAL ve kazı ekibine,

Elektrik öz direnç ve manyetik gradymetre yöntemi ile yapılan 2007-2008 yılları arazi kampanyalarındaki yardımlarından dolayı Araş. Gör. Tevfik Özgür KURTULMUŞ ve jeofizik mühendisleri Caner ÖZTÜRK ile Hasan Hüseyin DEMİRÖZ'e,

Teşekkür ederim.

Bu tez çalışması 2009-2010 yılları arasında Dokuz Eylül Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri kapsamında 2008.KB.FEN.002 numaralı proje ile desteklenmiştir.

Meriç Aziz BERGE

ELEKTRİK ÖZDİRENÇ TERS-ÇÖZÜMÜYLE ÇOK KATMANLI ARKEOLOJİK YERLEŞMELERİN GÖRÜNTÜLENDİRİLMESİ

ÖZ

Farklı arkeolojik dönemlere ilişkin karmaşık arkeolojik konteks içeren çok katmanlı höyük türü yerleşmeler arkeolojide önemli araştırma alanlarından biridir. Bu tez çalışmasında, elektrik öz direnç ters-çözüm (elektrik öz direnç tomografisi-ERT) yönteminin veri toplama ve ters-çözüm stratejileri höyük türü arkeolojik yerleşmeler bağlamında benzetim ve arazi çalışmaları yardımıyla araştırılmıştır. ERT sonuçları, farklı elektrot dizilimleri (Wenner-alfa, Wenner-Schlumberger, dipol-dipol, pol-pol ve pol-dipol), profil ile elektrot aralıkları ve profil yönlenmesi etkileri göz önüne alınarak test edilmiştir. Ayrıca, yöntemin gömülü yapılar ile farklı arkeolojik dönemlere ilişkin yerleşim mimarisini görüntülendirmedeki başarısı incelenmiştir. Yöntemin 3-boyutlu uygulamalarında düz ve ters-çözüm değerlendirmeleri Res3Dinv ve geliştirilen Matlab tabanlı programlar ile gerçekleştirilmiştir. Bu değerlendirmelerde, bloklu ve düzgünlük-kısıtlı ters-çözümler kullanılırken, düz-çözüm ise sonlu-elemanlar ve sonlu-farklar yaklaşımları ile başarılmıştır. Modelleme ve arazi çalışmaları, ERT yönteminin arkeolojik yapı ile örtü toprak arasında yeteri bir öz direnç zıtlığı bulunması durumunda başarılı yeraltı görüntüleri ürettiğini göstermiştir. Ayrıca Matlab tabanlı programın, Res3Dinv yazılıma oldukça benzer sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Değerlendirmelerde kısmi-3B görüntüler yetersiz bir çözünürlüğe sahipken, yarı-tam 3B çözümler yeraltının daha yorumlanabilir görüntülerini vermiştir. Dizilim araştırmalarında ise, dipol-dipol, pol-pol ve pol-dipol dizilimleri Wenner ve Wenner-Schlumberger dizilimlerine göre daha nitelikli görüntüler sunmuştur. Profil ve elektrot aralıkları ile profil yönlenmesinin etkileri de bu çalışma ile ortaya çıkarılmıştır. Böylece, yöntemin veri toplama ve değerlendirme aşamalarında uygun yolların izlenmesiyle yeraltının 3-boyutlu öz direnç dağılımı ayrıntılı olarak belirlenebilmekte ve gömülü yapıların yorumlanması daha kolay bir biçimde yapılabilmektedir. Sonuç olarak bu tez çalışması elektrik öz direnç ters-çözümünün höyük türü yerleşmelerin çok

katmanlı stratigrafisinin görüntülendirilmesinde önemli bir araç olabileceğini ortaya koymuştur.

Anahtar sözcükler: Elektrik öz direnç yöntemi, modelleme, ters-çözüm, yarı-tam 3B çözüm, kısmi-3B çözüm, çok katmanlı yerleşim, höyük

IMAGING OF MULTILAYERED ARCHAEOLOGICAL SETTLEMENTS USING ELECTRICAL RESISTIVITY INVERSION METHOD

ABSTRACT

In archaeology, multilayered settlements (höyük, tell, tepe) are among the most important sites for investigation and excavation. This type of site is a sub-circular, nucleated settlement composed of mud and stone-based materials remaining from different archaeological times; it presents a complex archaeological context. This thesis discusses the usefulness of the data acquisition and inversion facilities of electrical resistivity inversion (electrical resistivity tomography-ERT) method to define buried structures and settlement plans of various archaeological layers of the höyük. ERT results were analyzed according to the effects of different electrode arrays (Wenner-alfa, Wenner-Schlumberger, dipole-dipole, pole-pole and pole-dipole), line and electrode intervals and line orientations in the context of simulation and field studies. The inversion of the apparent resistivity data were achieved using a developed code in Matlab and Res3Dinv software. The robust and smoothness-constrained inversion techniques were performed during the evaluations in which the forward solution was achieved using the finite-difference and finite-element approaches. Modelling and field studies reveal that the ERT method produces satisfactory subsurface images if there is sufficient resistivity contrast between the archaeological structures and covering soil of them. Developed Matlab code shows a good correlation with the Res3Dinv software. The ERT results indicate that a semi-fully 3D investigation provides more accurate solutions than quasi-3D applications. In the course of array investigations, dipole-dipole, pole-pole and pole-dipole arrays present more informative images than the Wenner and Wenner-Schlumberger. The inter-electrode and inter-line spacing, as well as the line orientation effects, were also investigated during the studies. Therefore, a reasonable field and inversion strategies for ERT studies of the multilayered settlements are suggested. The results of this thesis conclude that ERT is a highly suitable technique for the determination of settlements that have layered stratigraphy.

Keywords: Electrical resistivity method, modelling, inversion, semi-fully 3D solution, quasi-3D solution, multilayered settlement, höyük

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	vi
BÖLÜM BİR – GİRİŞ	1
BÖLÜM İKİ – ARKEOLOJİ JEOFİZİĞİ VE HÖYÜK TÜRÜ ARKEOLOJİK YERLEŞMELER.....	6
2.1 Arkeoloji Jeofiziği.....	6
2.2 Höyük Türü Arkeolojik Yerleşmeler	9
2.2.1 Eski Smyrna Höyüğü ve Çevresinin Jeolojik ve Tarihi Özellikleri	12
BÖLÜM ÜÇ – ELEKTRİK ÖZDİRENÇ YÖNTEMİ	18
3.1 Elektrik Özdirenc Yönteminin Genel Özellikleri.....	18
3.2 Elektrot Dizilimleri.....	22
3.3 Veri Toplama ve Elde Edilen Görüntüler.....	27
3.4 Kullanım Alanları.....	37
BÖLÜM DÖRT – ELEKTRİK ÖZDİRENÇ YÖNTEMİNDE MODELLEME	39
4.1 Elektrik Özdirenc Yönteminde Düz-Çözüm	40
4.1.1 Üç-boyutlu Sonlu-Farklar Düz-Çözümü	43
4.1.2 Üç-boyutlu Sonlu-Elemanlar Düz-Çözümü	46
4.1.3 Üç-boyutlu Elektrik Özdirenc Düz-Çözüm Programı	50
4.1.3.1 Koşullu Eşlenik Türev Yöntemi	51

4.1.3.2 Matlab Düz-Çözüm Programının Sınanması	52
4.1.3.3 Matlab Düz-Çözüm Programında Paralel Hesaplama	62
4.2 Elektrik Öz direnç Yönteminde Ters-Çözüm.....	66
4.2.1 Genelleştirilmiş Ters-Çözüm Teorisi	66
4.2.2 Elektrik Öz direnç Verisinin Üç-boyutlu Ters-Çözümü.....	73
4.2.3 Üç-boyutlu Elektrik Öz direnç Ters-Çözüm Programı.....	74
4.2.3.1 En Küçük Kareler Eşlenik Türev Yöntemi.....	78
4.2.3.2 Matlab Ters-Çözüm Programının Sınanması.....	78
 BÖLÜM BEŞ – ELEKTRİK ÖZDİRENÇ TERS-ÇÖZÜM YÖNTEMİYLE ARKEOLOJİYE YÖNELİK MODELLEME ÇALIŞMALARI.....	 86
5.1 Yapay Höyük Modeli ve Modelleme Çalışmaları.....	88
5.2 Yapay Höyük Modelinden Elde Edilen Modelleme Sonuçları	96
5.2.1 Kısmi ve Yarı-tam Üç-Boyutlu Çözümler.....	97
5.2.2 Elektrot Dizilimlerinin Etkisi	100
5.2.3 Optimum Elektrik Öz direnç Tomografisi (OERT) Uygulamaları.....	104
5.2.3.1 İki-boyutlu Ölçümler için OERT Uygulamaları	106
5.2.3.2 Üç-boyutlu Ölçümler için OERT Uygulamaları.....	112
5.2.4 Elektrot ve Profil Aralıklarının Etkisi	115
5.2.5 Profil Yönlenmesinin Etkisi	118
 BÖLÜM ALTI – ESKİ SMYRNA HÖYÜĞÜ’NÜN ELEKTRİK ÖZDİRENÇ TERS-ÇÖZÜM YÖNTEMİYLE GÖRÜNTÜLENDİRİLMESİ	 121
6.1 Eski Smyrna Höyüğünde Gerçekleştirilen Önceki Jeofizik Çalışmalar.....	121
6.2 Veri Toplama ve Değerlendirme	124
6.3 Eski Smyrna Höyüğünden Elde Edilen Sonuçlar.....	127
6.3.1 Kısmi ve Yarı-tam Üç-Boyutlu Çözümler.....	131
6.3.2 Geliştirilen Matlab Ters-çözüm Programı ile Değerlendirmeler.....	134
6.3.3 Elektrot Dizilimlerinin Etkisi	136
6.3.4 Optimum Elektrik Öz direnç Tomografisi (OERT) Uygulamaları.....	139

6.3.5 Profil Aralıklarının Etkisi	144
6.3.6 Profil Yönlenmesinin Etkisi	148
6.4 Arkeolojik Yorumlama.....	149
BÖLÜM YEDİ – SONUÇLAR	153
KAYNAKLAR	156

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Arkeolojik alanların araştırılması, kazı çalışmaları dışında arkeolojik prospeksiyon adı altında toplanan çok disiplinli çalışmalara da sahne olmaktadır. Başta hava fotoğrafları ve uydu görüntüleri olmak üzere coğrafi bilgi sistemleri, küresel konumlandırma, jeofizik, jeomorfoloji, jeokimyasal çalışmalar ve termal algılama başlıca arkeolojik prospeksiyon dallarıdır. Bu çok disiplinli dalların arkeolojik kazılar ile birlikte uygulanması sonucunda arkeolojik alanlar hakkındaki bilgiler daha hızlı elde edilebilirken, kazı planlamasına da büyük katkılar sağlanmaktadır. Ayrıca coğrafi bilgi sistemleri ve küresel konumlandırma ile arkeolojik alandan elde edilen bilgilerin bir veri tabanı ile birleştirilmesi ve sayısal olarak veri bankalarında saklanabilmesi mümkün olmaktadır.

Günümüzde arkeolojik prospeksiyonda kullanılan jeofizik yöntemler sağladıkları önemli avantajlar nedeniyle öne çıkmaktadır. Arkeolojik alanların bu yöntemler ile araştırılması, hızlı, bozucu etkisi olmayan ve etkin sonuçlar verdiğinden dolayı tercih edilmektedir. Kullanılan jeofizik yöntemler gömülü arkeolojik yapı ile bu yapıyı örten ortam arasındaki fiziksel farklılıklardan yararlanarak, gömülü yapıların yerlerinin belirlenmesini amaçlamaktadır. Araştırılan fiziksel parametreler, kullanılan yönteme göre değişmektedir. Özellikle manyetik, yeraltına nüfuz eden radar ve elektrik özdirenç yöntemleri, arkeolojik alanlardaki gömülü mimarinin ortaya çıkarılmasında ve arkeolojik kazı çalışmalarına yön vermede sıklıkla kullanılmakta ve bu yöntemler hızla gelişmektedir (Drahor, 2005). Bu yöntemlerin daha sık kullanılır olması, yöntemlerin gömülü kalıntıları belirlemedeki başarıları ve ölçüm hızlarından kaynaklanmaktadır. Yöntemlerin bu özellikleri ise gelişen bilgisayar ve elektronik teknolojisi ile birlikte gün geçtikçe güçlenmektedir. Burada göz önünde tutulması gereken nokta, kullanılan yöntemin yeraltındaki hangi fiziksel özelliğin belirlenmesine yönelik olarak seçildiği ve gömülü arkeolojik konteksin bu fiziksel özellik için bir zıtlık sunup sunmadığıdır.

Elektrik prospeksiyon yöntemlerinden biri olan elektrik özdirenç yöntemi, arkeolojik yapı ile örtü ortamın ayırt edilmesinde iletkenlik/özdirenç fiziksel parametresini kullanmaktadır. Böylelikle bu parametre için hedef yapı ile ortam arasında yeterli bir zıtlık bulunuyorsa, yapının elektrik özdirenç yöntemi ile belirlenmesi mümkün olmaktadır. Yöntem arkeolojik alanlarda gömülü olarak bulunan yol, duvar, mezar vb. kalıntıları saptayarak arkeolojik yapılanmanın ortaya çıkarılmasına katkı sağlamaktadır (Aitken, 1974; Drahor, 2007). Arkeolojik yapılanmalar arkeolojik alanların tarihsel dönemlerine ve bununla ilişkili fiziksel özelliklerine göre birbirleriyle önemli farklılıklar göstermektedir. Arkeolojik yerleşmeler genelde höyük, düz yerleşme, mezarlık alanları (nekropolis, Tümülüs, kurgan vb.), kale türü ve askeri yerleşmeler ile maden işleme alanlarından oluşur. Bunlar anıtsal ve kamusal alanlar gibi önemli mekanları barındırmanın dışında, seramik ve maden işleme atölyeleri, mezarlıklar ve askeri mekanlar olmak üzere çeşitliliklere sahiptir ve bu nedenle kullanılan yöntemlerden beklenen yanıtlarda da çok belirgin değişiklikler ortaya çıkmaktadır. Gömülü arkeolojik yapıların olası yerleşim planlarının ve mimari özelliklerin höyükler gibi farklı arkeolojik dönemlerden kalan ve birden fazla yerleşimin üst üste bulunduğu arkeolojik alanlarda, jeofizik yöntemlerle belirleme önemli oranlarda güçleşmekte ve bazen ortam koşullarına bağlı olarak olanaksız duruma gelmektedir. Bu nedenle höyük türü arkeolojik alanların sunduğu bu karmaşık yeraltı koşulları ve derinlik anlamında ortaya çıkan farklı yapı katlarının etkisi, bu tip alanların görüntülendirilmesinde kullanılacak jeofizik yöntem seçimini önemli bir hale getirmektedir. Arkeolojik aramacılıkta yaygın kullanıma sahip manyetik gradyometre ölçüm cihazlarının sahip olduğu kısa sensör aralıkları (1 ile 1.5 metre) nedeniyle derinden yeterince bilgi alınamaması ve özellikle de yeraltına nüfuz eden radar yönteminde kullanılan yüksek frekans içerikli radar dalgalarının höyük türü alanlarda ortaya çıkan yüksek sıvı ve nem içeriği nedeniyle ortamlar içinde hızla sönümlenmesinden dolayı, bu tür alanlarda elektrik özdirenç çalışmalarının önemi daha da artmaktadır. Özellikle uygun veri toplama ve veri-işlem adımlarının kullanılmasıyla yeraltının özdirenç dağılımını gerçeğe yakın bir şekilde yansıtabilen özdirenç yöntemi arkeolojik prospeksiyon da sıkça kullanılmaktadır (Aspinall ve Gaffney, 2001; Drahor ve diğer., 2007, 2008a, b; Griffiths ve Barker, 1994; Noel ve Xu, 1991; Papadopoulos ve

diğer., 2006, 2007; Tsokas ve diğer., 2008, 2009). Yöntemin höyük türü yerleşim alanlarında ki uygulamaları ise sınırlı kalmıştır. Elektrik özdirenç tomografisi (ERT) yaklaşımıyla, höyüklerde karşımıza çıkan çok tabakalı yerleşimdeki arkeolojik kalıntıların yeraltındaki üç boyutlu dağılımını ortaya koyma ve tabakalar arası ayrımlılığı inceleme anlamında arkeolojiye önemli katkılar sağlayabileceği düşünülmelidir. Böylece bu tip alanlarda kazı stratejilerinin belirlenmesinde de önemli bir aşama kaydedilecektir.

Elektrik özdirenç yönteminde yeraltının gerçeğe yakın özdirenç dağılımının elde edilmesi görüntülendirme anlamında yapılacak ters-çözüm çalışmalarıyla mümkündür. Bu yönde geliştirilen ters-çözüm algoritmaları (deGroot-Hedlin ve Constable, 1990; Günther ve diğer., 2006; Loke ve Barker, 1996a, b; Sasaki, 1992) yeraltının tomografik görüntülerinin 2- ve 3-boyutta elde edilmesine olanak sağlamıştır. Ters-çözüm değerlendirmeleriyle tomografi görüntülerine benzer sonuçlar elde edilmesi, bu tip uygulamaların elektrik özdirenç tomografisi (Electrical Resistivity Tomography - ERT) olarak da adlandırılmasına yol açmıştır. Ters-çözüm aşamasında kullanılan sayısal düz-çözüm yöntemleri (örneğin, Dey ve Morrison, 1979a, b; Rücker ve diğer., 2006; Scriba, 1981) ise elektrik özdirenç tomografisinin gelişiminde önemli bir aşama olmuştur. Elektrik özdirenç ters-çözüm yönteminin hem kuramsal hem de alansal çalışmaları hakkında çıkan yayınlar, araştırmacıların yöntemin veri toplama ve değerlendirme aşamalarında farklı teknikleri tercih ettiklerini göstermektedir. Tam anlamıyla bir 3-boyutlu arazi çalışmasının yapılması, birkaç dizilim dışında olası değildir ve bu durum birbirine dik iki boyutlu profillerin birleştirilerek değerlendirildiği kısmi-3B (quasi-3D) ve yarı-tam 3B (semi-fully 3D) veri toplama ve değerlendirme yaklaşımlarını ortaya çıkarmıştır. Ayrıca, elektrik özdirenç yönteminde kullanılan elektrot dizilimlerinin geometrilerine ve yeraltı koşullarına göre farklı ölçüm sonuçları vermesi ve değerlendirmede ters-çözüm algoritmalarının tekil olmaması, yani aynı ölçülen veriye karşılık farklı yeraltı koşullarının olması, yöntemin en önemli dezavantajıdır. Uygulama sırasında elde edilen veriler üzerinde belirtilen bu etkenlere dikkat edilmeden yapılacak ters-çözüm çalışmalarıyla ulaşılabilecek sonuçlar yeraltının yanlış yorumlanmasına neden olabilecektir. Bu etkenlerin önüne geçilmesi ancak birlikte yapılacak modelleme ve

arazi çalışmaları ile olasıdır. Böylece yöntemin uygulanmasında değerlendirme teknikleri ile elektrot dizilimi, ölçüm doğrultusu etkileri ve profil ile ölçüm noktaları arası uzaklıkların etkileri üzerinde değişik araştırmacılar tarafından çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Berge ve Drahor, 2007; Chambers ve diğer., 2002; Gharibi ve Bentley, 2005; Papadopoulos ve diğer., 2006, 2007).

Bu tez çalışması kapsamında elektrik öz direnç yönteminin ters-çözüm uygulamaları ile höyük türü çok katmanlı arkeolojik alanların görüntülendirilmesi amaçlanmıştır. Buna yönelik olarak öncelikle yöntemin kuramsal höyük modeli üzerinde ve daha sonra da bir höyük yerleşmesi olan Eski Smyrna Höyüğü arkeolojik alanında ki uygulamaları ile başarısı incelenmiştir.

Bu çalışmada elektrik öz direnç yönteminin;

- Veri toplama sırasındaki 2 ve 3-boyutlu görüntülendirme ölçümleri,
- 2 ve 3-boyutlu düz ve ters-çözüm değerlendirmeleri,
- Kullanılan elektrot dizilimleri,
- Ölçüm doğrultusunun etkileri,
- Ölçüm aralıklarının etkileri,

gibi veri ölçümü ve değerlendirmesiyle ilgili özellikleri araştırılmıştır. Böylece höyük türü arkeolojik yerleşmelerin elektrik öz direnç ters-çözümüyle görüntülendirilmesi hakkında önemli yaklaşımlar ortaya konulmuştur. Bu tez çalışmasının içeriği;

Bölüm Bir, tez çalışmasının literatürdeki yeri ve amacı,

Bölüm İki, arkeoloji jeofiziği, höyük türü yerleşmeler ve çalışma alanı olan Eski Smyrna Höyüğü arkeolojik alanının tanıtımı,

Bölüm Üç, elektrik öz direnç yönteminin genel özellikleri ve veri toplama ilkeleri,

Bölüm Dört, elektrik özdirenç yönteminde düz-çözüm ve ters-çözüm ile tez çalışmasında geliştirilen Matlab tabanlı bilgisayar programlarının sınanması,

Bölüm Beş, elektrik özdirenç ters-çözüm yöntemiyle arkeolojiye yönelik yapay modelleme çalışmaları,

Bölüm Altı, Eski Smyrna Höyüğü arkeolojik alanında gerçekleştirilen elektrik özdirenç ters-çözüm uygulamaları,

Bölüm Yedi, sonuçlar ve önerilerden oluşmaktadır.

BÖLÜM İKİ

ARKEOLOJİ JEOFİZİĞİ VE HÖYÜK TÜRÜ ARKEOLOJİK YERLEŞMELER

2.1 Arkeoloji Jeofiziği

Birçok yeraltı probleminin çözümüne doğrudan yanıt verebilen jeofizik aramacılık, 1940'lı yılların ortalarından itibaren arkeolojik kalıntıların araştırılmasında da etkin bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle yeraltında gömülü olarak bulunan kalıntıların (duvar, mezar, yol vb.) yerleri, gömülü bulundukları toprak örtü ile yeterli bir fiziksel farklılık sunmaları durumunda, uygun jeofizik yöntemler kullanılarak belirlenebilmektedir. Bu durum gerek arkeolojik kazı, gerekse de restorasyon amaçlı çalışmalarda önemli veriler sunan, çalışma zamanı ile maliyetini düşüren arkeoloji jeofiziği çalışmalarını diğer araştırma yöntemlerinin önüne taşımıştır. Arkeoloji jeofiziğine artan bu ilgi, çok geniş alanların hızlı ölçümüne olanak veren jeofizik cihaz ve ekipmanlar ile ölçülen verilerden en doğru arkeolojik yorumu veren veri-işleme ve modelleme yazılımlarının hızla gelişmesini sağlamıştır. Bunun yanı sıra jeofizik cihaz, ekipman ve yazılım teknolojisindeki bu gelişim ile koşut olarak yüksek çözünürlüklü ve daha nitelikli araştırmaların yapılabilmesinin de önü açılmıştır. Bu durum jeofiziğin önemli bir dalı olan sığ jeofizik araştırmaların gelişiminin ana ivmesini oluşturmuştur. Arkeolojik prospeksiyon içinde kendine sağlam bir yer edinen jeofizik, batı toplumlarında yasalar çerçevesinde kazı çalışmaları sırasında uygulanması zorunlu bir yöntem haline gelmiştir (Linford, 2006). Ayrıca, bu konuya ilgi duyan araştırmacılar 1990'lı yıllardan beri belirli aralıklarla uluslararası sempozyumlar düzenleyerek bir araya gelmiş ve bu durum bazı dernek ve kurumların kurulmasına olanak sağlamıştır (örneğin, International Society for Archaeological Prospection-ISAP, Institute of Field Archaeologists-IFA). Sığ jeofizik araştırmalar kapsamında ele alınan arkeoloji jeofiziği kullanım sıklığına göre başta manyetik, elektrik-elektromanyetik yöntemler olmak üzere sismik ve gravite gibi diğer jeofizik yöntemleri de kullanılmaktadır. Tablo 2.1'de arkeolojik prospeksiyon araştırmalarında kullanılan jeofizik yöntemler, fiziksel ve arkeolojik konteksin durumuna bağlı olarak belirlenebilen yapı özellikleri

ile birlikte verilmektedir. Sığ derinliklerde gömülü olarak bulunan arkeolojik kalıntıların belirlenmesi, bu derinliklerde yeraltının da oldukça karmaşık olacağı göz önüne alındığında zor olabilmektedir. Bu gibi durumlarda arkeoloji jeofiziği uygulamaları söz konusu jeofizik yöntemlerden iki veya daha fazlasının bir arada yürütülmesi ile tümleşik jeofizik çalışmalara doğru yönelmektedir. Böylelikle ana amaç olan gömülü kalıntıların yorumlanması doğruya en yakın şekilde başarılabilmektedir.

Sunulan bu tez çalışması kapsamında arkeolojik amaçlı çalışmalarda kullanılan yöntemlerden biri olan elektrik özdirenç yöntemi höyük türü arkeolojik yerleşmelerin görüntülendirmesi ve yorumlanması amacıyla uygulanmıştır. Sığ jeofizik araştırmalar içerisinde de oldukça yaygın kullanılan ve birçok soruna doğrudan yanıt verebilen elektrik özdirenç yöntemi, arkeolojik uygulamalarda da birçok araştırmacı tarafından temel araştırma yöntemlerinden biri olarak görülmektedir (Astin ve diğer., 2007; Drahor ve diğer., 2007, 2008a, b; Papadopoulos ve diğer., 2006; Tsokas ve diğer., 2008, 2009). Özellikle iki ve üç-boyutlu ters-çözüm uygulamaları ile gömülü halde bulunan arkeolojik kalıntıların konumları ve derinlikleri ortaya çıkarılmakta ve buradan yeraltında gömülü durumdaki arkeolojik yapıların konteks ve mimari özellikleri hakkında yoruma gidilebilmektedir. Arkeolojik konteks genelde çok karışık bir durumda olmasına karşın, gömülü arkeolojik yapılar ile bunları örten toprak birimlerinin elektriksel özellikleri (özdirenç, iletkenlik) arasında yeterli bir zıtlık varsa bu yapıların özdirenç yöntemi ile belirlenmesi olanaklı olmaktadır (Aitken, 1974). Örtü toprağın fiziksel özellikleri, su ve nem içeriği ile gömülü arkeolojik kalıntının elektriksel özellikleri, boyutları ve yüzeyden olan derinliği ile ana kaya etkisi yöntemin çözüm başarısının ana etkenleridir (Clark, 1996). Bunun yanı sıra yöntemin uygulanmasında izlenen yolda (örneğin kullanılan elektrot dizilimi, elektrot aralıkları, ölçüm yönü ve veri değerlendirme teknikleri) yöntemin başarısını doğrudan etkilemektedir. Bu koşulların bir bölümünün ölçülen özdirenç verisi ve değerlendirme sonuçları üzerindeki etkileri bu tez çalışması kapsamında incelenmiştir.

Tablo 2.1 Arkeolojik prospeksiyonda kullanılan jeofizik yöntemler ve özellikleri (Drahor, 2005'ten düzenlenmiştir).

Yöntem	Fiziksel Özellik ve Araştırılan Hedef Arkeolojik Yapı
Manyetik	Yermanyetik alanının bileşenleri ya da şiddetindeki değişiklikler ölçülmektedir. Yapı ve ortamın mıknatıslanma özelliklerindeki zıtlıklar yardımıyla; Ocak, fırın, kerpiç, tuğla ve volkanik kayalardan yapılmış duvarlar, mezarlar, metalik nesneler, yanma geçirmiş alanlar, seramik-kiremit yığışımalarının belirlenmesi ve yaşlandırma çalışmaları yapılabilir.
Yeraltına Nüfuz Eden Radar (YNER)	Yüksek frekanslı elektromanyetik dalganın yeraltındaki yayılımı sırasında bu dalgaların yer ile hedef yapı arasındaki geliş-gidiş seyahat süresi ölçülmektedir. Yapı ve ortamın elektriksel özelliklerindeki (dielektrik, iletkenlik, manyetik geçirgenlik) zıtlıklar yardımıyla; Metalik ve metalik olmayan nesneler, duvarlar, hendekler, içi dolu çukurlar, taşlar, bina temellerinin belirlenmesi ve yaşayan kültür varlıklarının araştırılması olanaklıdır.
Elektrik Özdirenç	Elektrik akımının yeraltındaki yayılımı sonucu oluşan potansiyel fark ölçülmektedir. Yapı ve ortamın özdirenç değerindeki zıtlıklar yardımıyla; Duvar, hendek, mezar, yol, ana kaya derinliği ve bina temelleri gibi diğer birçok özelliğin belirlenmesi olanaklıdır.
Elektromanyetik	Elektromanyetik dalganın yeraltındaki yayılımı sırasında hedef yapıdan kaynaklanan ikincil alanlar ölçülmektedir. Yapı ve ortamın iletkenliğindeki zıtlıklar yardımıyla; Duvar, mezar ve metalik nesneler belirlenebilmektedir.
Sismik	Sismik dalgaların yeraltındaki yayılımı sırasında bu dalgaların seyahat süreleri ölçülmektedir. Yapı ve ortamın sismik dalga hızlarındaki zıtlıklar yardımıyla; Duvar, tümülüs mezar odalarının belirlenmesi mümkündür.
Mikrogravite	Yoğunluk farklılıklarından kaynaklanan yerçekim ivmesinin değişimi ölçülmektedir. Yapı ve ortamın yoğunluklarındaki zıtlıklar yardımıyla; Boşluk, mezar odaları ve duvarlar belirlenebilmektedir.
Doğal Gerilim (SP)	Yeraltındaki elektrokinetik, elektrokimyasal ve pH değişikliklerinden kaynaklanan doğal akımlar sonucu oluşan doğal potansiyel ölçülmektedir. Bu doğal akımlara sebep olan arkeolojik kalıntıların belirlenmesi (örneğin duvar kenarlarından yeraltına sızan suyun hareketi ile duvarların belirlenmesi) olanaklıdır.
Uyarılmış Kutuplanma (IP)	Elektrik akımının yeraltındaki yayılımı sırasında yapıların gösterdiği şarjlanma ve kapasitans etkileri ölçülmektedir. Yapı ve ortamın iletkenliğindeki zıtlıklar yardımıyla; Okside olmuş ortamlar, antropolojik materyaller ve kil içeriği olan yapılar belirlenebilmektedir.

2.2 Höyük Türü Arkeolojik Yerleşmeler

Arkeolojik alanlar, höyükler, düz yerleşmeler, nekropol, akropol, tümülüs, askeri sahalar, anıtsal ve kamusal alanlar olmak üzere değişik biçimlerde sınıflandırılabilir. Bunlar içerisinde höyükler, uygarlığın uzun bir bölümünde bazen kesintisiz olarak 10'dan fazla arkeolojik katmanı içerebilen ve çapları genelde 100 metreden büyük 5-35 metre yüksekliğe kadar ulaşabilen alanlar olarak diğer yerleşmelerden ayrılmaktadır (Naumann, 1991). Bu yerleşmeler de özellikle kerpiç yapıların ana yapı elemanı olarak kullanılması nedeniyle ve bunların zamanla aşınarak toprak tepeler oluşturmasıyla, bulundukları ovada yükselen bir topoğrafya biçiminde ortaya çıkarlar (Drahor ve Kaya, 2000; Rosen, 1986). Su, yiyecek ve yapı malzemesi kaynakları ile korunma gibi etkenlerle birlikte coğrafi ve sosyal koşullar bir höyüğün yerleşim dönemlerini belirleyen ana faktörler olarak öne çıkmaktadır. Höyük alanlarında yapılan kazılar göstermiştir ki, doğal afetler ve savaşlar bu yerleşim dönemlerindeki kesintileri oluşturmaktadır ve bu kesintilerin izleri çok tabakalı höyük stratigrafisi içerisinde gözlenebilmektedir. Balkanlar'dan yakın doğuya kadar geniş bir coğrafyada özellikle de Anadolu ve Mezopotamya'da sıklıkla gözlenen höyük türü yerleşmeler, Prehistorik, Neolitik, Kalkolitik, Tunç, Demir, Helenistik, Roma ve yer yer Bizans dönemlerini de içeren uygarlık katmanları barındırabilmektedir. Günümüzde ise halen üzerinde güncel yerleşmelerin devam ettiği örneklerle rastlanmaktadır. Türkiye'nin orta batı ve Trakya kesimlerinde belirlenen höyük türü yerleşmelerin dağılımı Şekil 2.1'de verilmektedir. Türkiye'de kazı çalışmaları yürütülen önemli höyüklerden bazıları Acemhöyük, Alacahöyük, Beyce Sultan, Çatalhöyük, Kaniş, Tell Açana ve Troia olarak verilebilir. Şekil 2.1'de görüldüğü gibi sadece Batı Anadolu'da günümüze kadar 965 adet höyük saptanmıştır ve bunların birçoğu sahip oldukları eski geçmişleri ile önemli bilgileri barındırmaktadır.

Höyük türü yerleşmelerin daha iyi anlaşılabilmesi için bu yerleşmelerin bilinen örneklerinden biri olan Troia arkeolojik alanı (Çanakkale) verilebilir. Bu yerleşmede arkeologlar tarafından 9 farklı yerleşim dönemine ilişkin izler yapılan kazılar sonucunda tespit edilebilmiştir (Şekil 2.2). Erken Tunç Çağı'ndan itibaren yerleşim

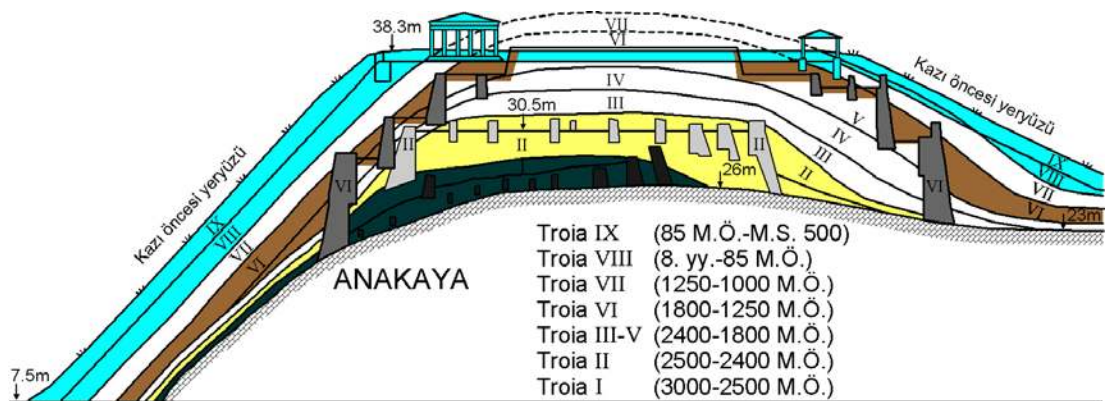
görmeye başlayan Troia, izleyen yerleşim dönemleri sonucunda yaklaşık 10 metre yükseklikte ve orta büyüklüklü bir tepe haline gelmiştir. Kazı sonuçları Troia-VI'nın büyük bir deprem ile Troia-VII'nin ise geniş bir yangın sonucu tahrip olduğunu göstermiştir. Arkeolojik yerleşme dönemlerinde karşılaşılan bu insan veya doğal kaynaklı tahribatlar Troia'da daha genç yerleşmelerin yapılmasını engellememiş ve buradaki yaşam Erken Demir Çağı'na kadar devam etmiştir (Naumann, 1991).

Höyük türü yerleşmelerde kerpiç malzemenin yanı sıra yerel kayalardan malzemelerde kullanılır (kireçtaşı, andezit, bazalt vb.) ve bunlar genelde sur duvarları, anıtsal ve kamusal yapılar ve evlerin temellerinin yapımında kullanılmaktadır. Birbirini takip eden arkeolojik dönemler içerisinde höyüklerin mimari özellikleri, bir önceki yerleşim döneminin benzeri şekilde gelişebilirken, bazen de eski dönemin yapı elemanları kullanılmakla birlikte, farklı bir mimariye yönelimlerde gözlenmiştir. Mimarideki bu değişimler yapılan kazı çalışmalarını ve arkeolojik yorumlamaları zorlaştırmaktadır. Bu zorluklar, yüzeyden başlayarak yürütülen kazılarda bir altta bulunan arkeolojik katmanın kazılabilmesi için üstteki katmanın tahrip edilmek zorunda kalınmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca karşılaşılan farklı dönem yapı ve malzemeleri de kazıların daha karmaşıklaşmasına ve zorlaşmasına neden olmaktadır. Bu durumda höyük katmanlaşmasını tanımlamada yardımcı olabilecek jeofizik araştırmaların önemi ortaya çıkmaktadır. Böylesi bir problemi çözmede kullanılacak jeofizik yöntemlerin yeraltını tanımlama gücü önem kazanmaktadır. Yeraltı yapılarını tanımlama gücü, yöntemden elde edilen veri çözünürlüğü ve etki derinliğinin optimum bir düzeydeki birliği şeklinde değerlendirilebilir. Höyük yerleşmesi gibi bir problemde ise bu iki özelliğin üst düzeyde yani hem gömülü yapılar arasında iyi bir ayrımın hem de yeterli bir derinlikten alınacak bilginin olması beklenmektedir. Son zamanlarda bu tür yerleşmelerin görüntülendirilmesi için manyetik gradyometre, yeraltına nüfuz eden radar (YNER) ve elektrik öz direnç tomografi (ERT) çalışmaları tümleşik biçimlerde gerçekleştirilmektedir (Casana ve diğer., 2008; Drahor ve Kaya, 2000; Herbich, 2009; Schmidt ve Fazeli, 2007). Höyük alanlarında uygulaması yaygın olmayan elektrik öz direnç tomografi yöntemi ise, görüntülendirme anlamında yapılacak modelleme ve arazi çalışması biçiminde uygulamalar yoluyla geliştirilmeye ihtiyaç

duymaktadır. Böylece bu tez kapsamında höyük katmanlaşmasını görüntülendirmeye yönelik olarak elektrik öz direnç ters-çözüm uygulamaları irdelenmiş ve yöntemin kullanımı ve değerlendirmesi üzerine çıkarımlarda bulunulmuştur.



Şekil 2.1 Türkiye batısında belirlenen höyük türü yerleşmelerin dağılımı. Höyük lokasyonları TAYCBS (2009)'dan alınmıştır. Topoğrafya haritası GMT (Wessel ve Smith, 1995) ile hazırlanmıştır.



Şekil 2.2 Troia arkeolojik alanının çok katmanlı yapısal planını gösteren şematik kesit (Dörpfeld, 1902'den alınmıştır).

2.2.1 Eski Smyrna Höyüğü ve Çevresinin Jeolojik ve Tarihi Özellikleri

Elektrik öz direnç ters-çözümüyle höyük yerleşmelerinin görüntülendirilmesine yönelik olarak gerçekleştirilen bu tez çalışmasında uygulama alanı olarak, İzmir'in Bayraklı ilçesindeki Eski Smyrna (Bayraklı-Tepekule) Höyüğü seçilmiştir (Şekil 2.3-2.6). Çalışma alanını oluşturan jeolojik birimler Kretase-Paleosen yaşlı İzmir Flişi, Miosen yaşlı volkanik ve sedimanter kayaçlar ile Kuvaterner yaşlı alüvyondur (Emre ve diğer., 2005; Uzel ve diğer., 2010). İzmir ve çevresinde graben tektoniğine bağlı gelişen normal faylanmalar gözlenmektedir. Bunların geçmiş dönemlerde yıkıcı olan depremler ürettiği bilinmektedir. Bölgede bulunan jeotermal kaynaklarda bu tektonik aktivitenin bir göstergesidir. Eski Smyrna'nında içinde bulunduğu İzmir İli'ne ait bir jeoloji haritası topoğrafya verileri ile birlikte Şekil 2.3'de verilmektedir. İzmir Körfezi'nin doğu ucunda bulunan Eski Smyrna, kuzeyinde bulunan volkanik birimlerden oluşan Yamanlar Dağı'nın eteklerine kurulmuştur. Volkanik kökenli kayaçlar olan andezit ve bazalt höyükte kullanılan ana yapı malzemesi kerpiğin dışında yaygın olarak bulunmaktadır. Foça'dan getirilen tuf, genellikle sütun başlıkları gibi kısımlarda dekoratif yapı elemanı olarak kullanılmıştır. Bunun yanı sıra İzmir Flişi'nden gelen kireçtaşına bazı yapı temellerinde rastlanmaktadır. Höyüğün güneyinden akan Kocaçay deresi kerpiç malzemenin yapıldığı kilin kaynağını oluşturmaktadır. Eski Smyrna Höyüğü'nün üzerine kurulduğu anakayanın derinliği ise henüz bilinmemektedir. H çukuru olarak adlandırılan en derin açmada (yaklaşık 8 m) anakayaya rastlanılmamıştır.

Şekil 2.3'te İzmir İli'nde bulunan diğer arkeolojik yerleşmeler de verilmektedir. Antik dönemden günümüze önemli bir konuma sahip olan İzmir'de Prehistorik dönemden başlayarak birçok yerleşme kurulmuştur. Eski Smyrna dışında İzmir ve çevresinde 5 adet höyük bulunmaktadır. Bunlar; Prehistorik dönemde yerleşim gören Küçük Yamanlar Höyüğü (1), Manda deresi yakınlarında bulunan ve Neolitikten Roma dönemine kadar kullanılmış olan Yeşilova Höyüğü (2) ve yine Manda deresi üzerinde kurulan Bornova-İpeklikuyu (3), Yassitepe (4) ve Pınarbaşı (5) höyükleridir (Derin ve Batmaz, 2004). İzleyen dönemlerde kurulan bu yerleşmeler zamanla ya terk edilmiş ya da nehir taşkınları sonucu gelen yoğun sel tabakası altında kalmıştır.

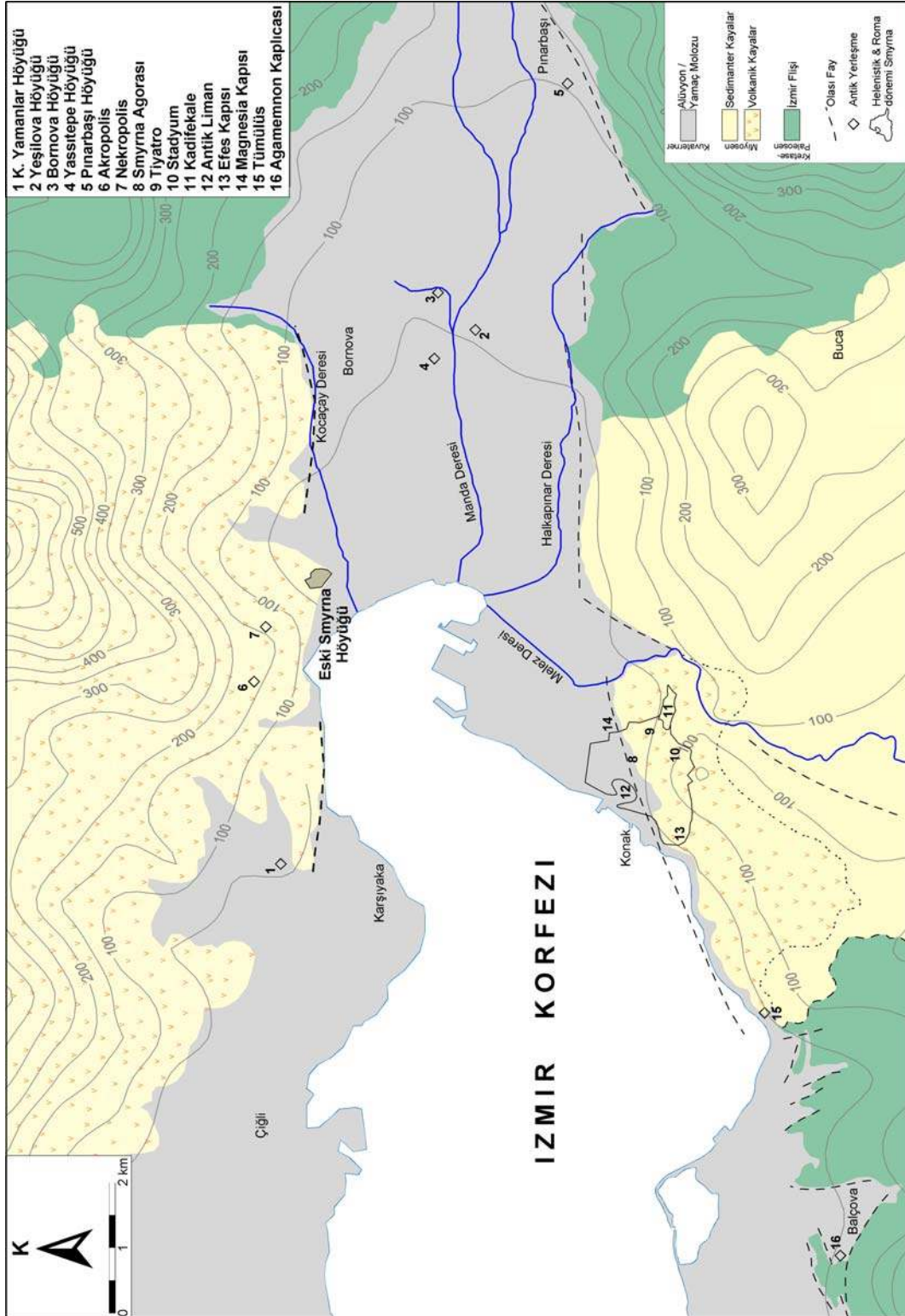
Eski Smyrna ise M.Ö. 6. yüzyılda Yamanlar Dağı'nın güneyindeki Akropolis (6) ve Nekropolis'e (7) doğru genişlemiştir. Daha sonra yoğun nüfus sonucu yetersiz kalan yerleşim alanından ve yoğun Pers akınlarından dolayı höyük günümüzde Kadifekale olarak anılan Pagos ve eteklerine taşınmıştır. Burada Helenistik ve Roma Smyrna'sı (8-14) olarak günümüz İzmir'inin temellerini oluşturmuştur. M.S. 178 yılındaki büyük deprem sonrasında Roma İmparatoru Marcus Aurelius tarafından tekrar inşa edilen bu yerleşim, günümüzde ise modern kentin altında kalmıştır. Tarihi liman (12) insan etkisi ve Meles deresinin alüvyonları ile dolmuştur. İzmir'de bu yerleşmeler dışında halen korunabilmiş bir tümülüs (15) ve tarihi çağlardan beri kullanılan Agamemnon (16) kaplıcaları da bulunmaktadır (Şekil 2.3).

Yaklaşık yüzölçümü yüz dönüm olan Eski Smyrna Höyüğü'nde ilk arkeolojik kazılar Türk ve İngiliz arkeologlar tarafından 1948'de gerçekleştirilmiştir. 2. Dünya Savaşı döneminde ara verilen bu çalışmalar yeniden 1966'da başlamıştır (Akurgal, 1993). Günümüzde ise bu çalışmalar T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı Kültür Varlıkları ve Müzeler Genel Müdürlüğü'nün izni ile kazı başkanı Prof. Dr. Meral Akurgal tarafından sürdürülmektedir. Kazı çalışmaları sırasında gerçekleştirilen mimari ve jeodezi çalışmalarının verileri derlenerek hazırlanan jeofizik çalışma planı ve gün yüzüne çıkarılmış arkeolojik kalıntıları da içeren bir topoğrafik kontur haritası Şekil 2.4 sunulmaktadır. Kazılar, höyüğün M.Ö. 3000'de üç tarafı denizle çevrili küçük bir yarımada üzerinde kurulduğunu göstermektedir. Bu ilk yerleşimi M.Ö. 2500-2000 ve 1800-1200 yılları arasındaki iki farklı yerleşim izlemiştir. Daha sonra Demir Çağı kabilelerinin yaklaşık M.Ö. 1050 yılında burada yerleştiği düşünülmektedir. M.Ö. 1050-333 yılları arasında birbirini takip eden 10 yerleşme katının varlığı kazılar ile ortaya çıkarılmıştır. Yerleşim gördüğü dönemlerde Eski Smyrna Höyüğü mimari açıdan zamanının birçok yeniliğini içermektedir. Athena tapınağı, megaron tipi avlulu evler, antik çeşme ve sur duvarı dönemi içerisinde oldukça öne çıkan yapılardır (Şekil 2.5). Demir Çağı boyunca Eski Smyrna evleri tek odalı mekânlardan oluşmaktadır. M.Ö. 11. ve M.Ö. 9. yüzyıllar arasında tek odadan oluşan bahçe içinde evlerle Eski Smyrna, köy düzeninde bir yerleşmedir. Planı ve tarihi kesin olarak bilinen Batı Anadolu'nun en eski Doğu Hellen evi buradaki Oval Ev'dir (Şekil 2.5c). Ev, M.Ö. 9. yüzyıldan itibaren kerpiç tuğlalarla örülmüş bir sur

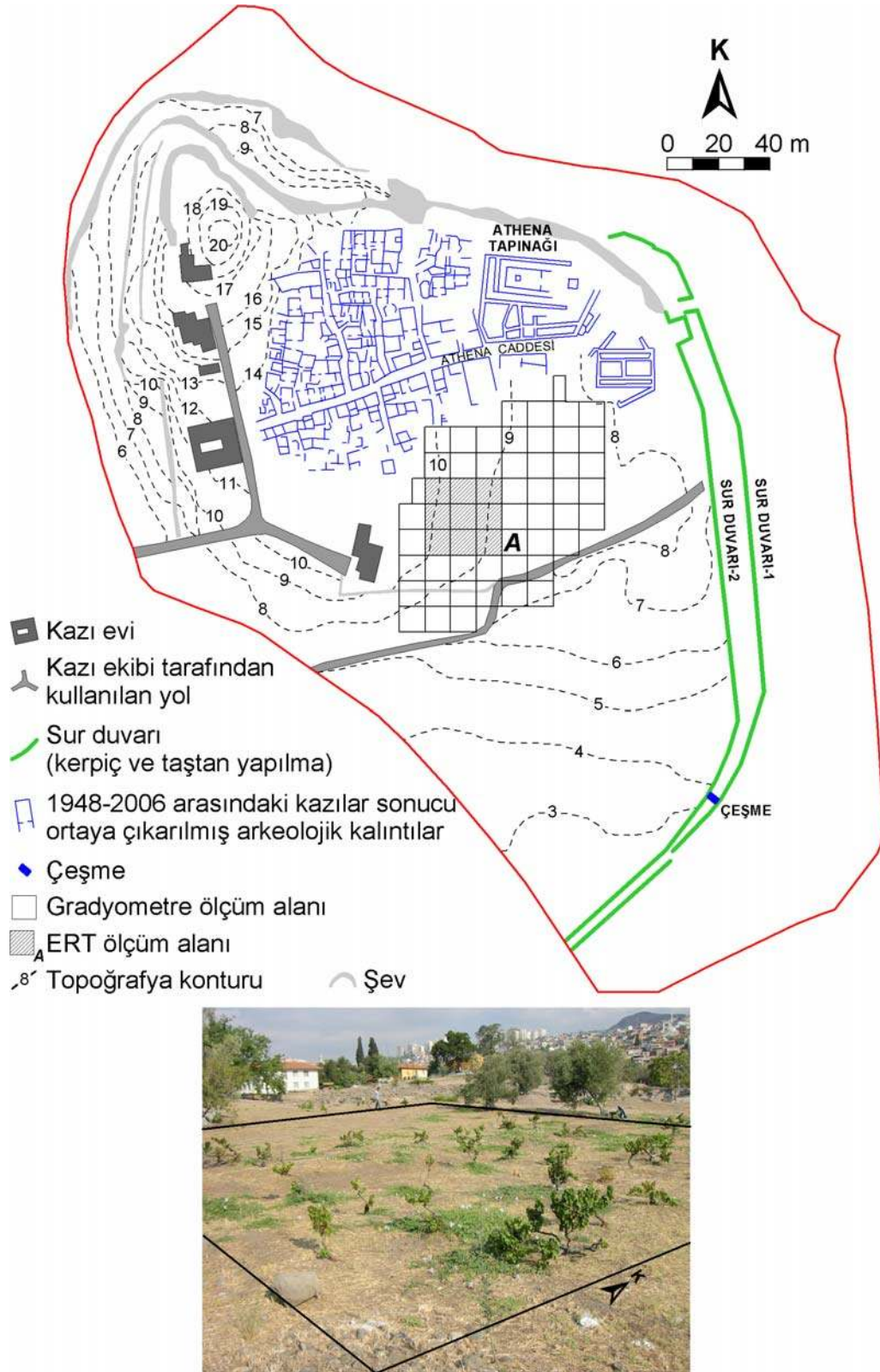
ile korunmaya başlanmıştır. Eski Smyrna Höyüğü'nde M.Ö. 9. ve 8. yüzyıllara ait dörtgen ve oval planlı ev kalıntıları, oldukça belirgin olarak gün ışığına çıkarılmıştır. M.Ö. 650-546 tarihleri arasında Aiolis Bölgesi'nin en büyük ve en önemli kenti Bayraklı'daki Eski Smyrna'dır. Bu süreçte mimarlık alanında büyük yapılar ortaya konmuştur.

Eski Smyrna'da kazılarla ortaya çıkan tapınak en eski Athena Tapınağı'dır (Şekil 2.5b). Ön yüzü doğuya bakan Athena Tapınağı doğu-batı doğrultusunda yerleşmiştir. M.Ö. 7. yüzyılın sonuna ait tapınağın sütun kaideleri, tamburlar ve volütlü başlık parçaları tüf taşındandır. Eski Smyrna'nın Athena Tapınağı'nın önünden başlayıp batıda, limanda son bulan bir ana caddesi vardır. Şekil 2.4'ten görülebildiği gibi Athena Caddesi M.Ö. 6. yüzyılın başından itibaren, kendisine dik olarak ulaşan birbirine paralel sokaklarla bir geometrik doku oluşturmuştur (Akurgal, 1993).

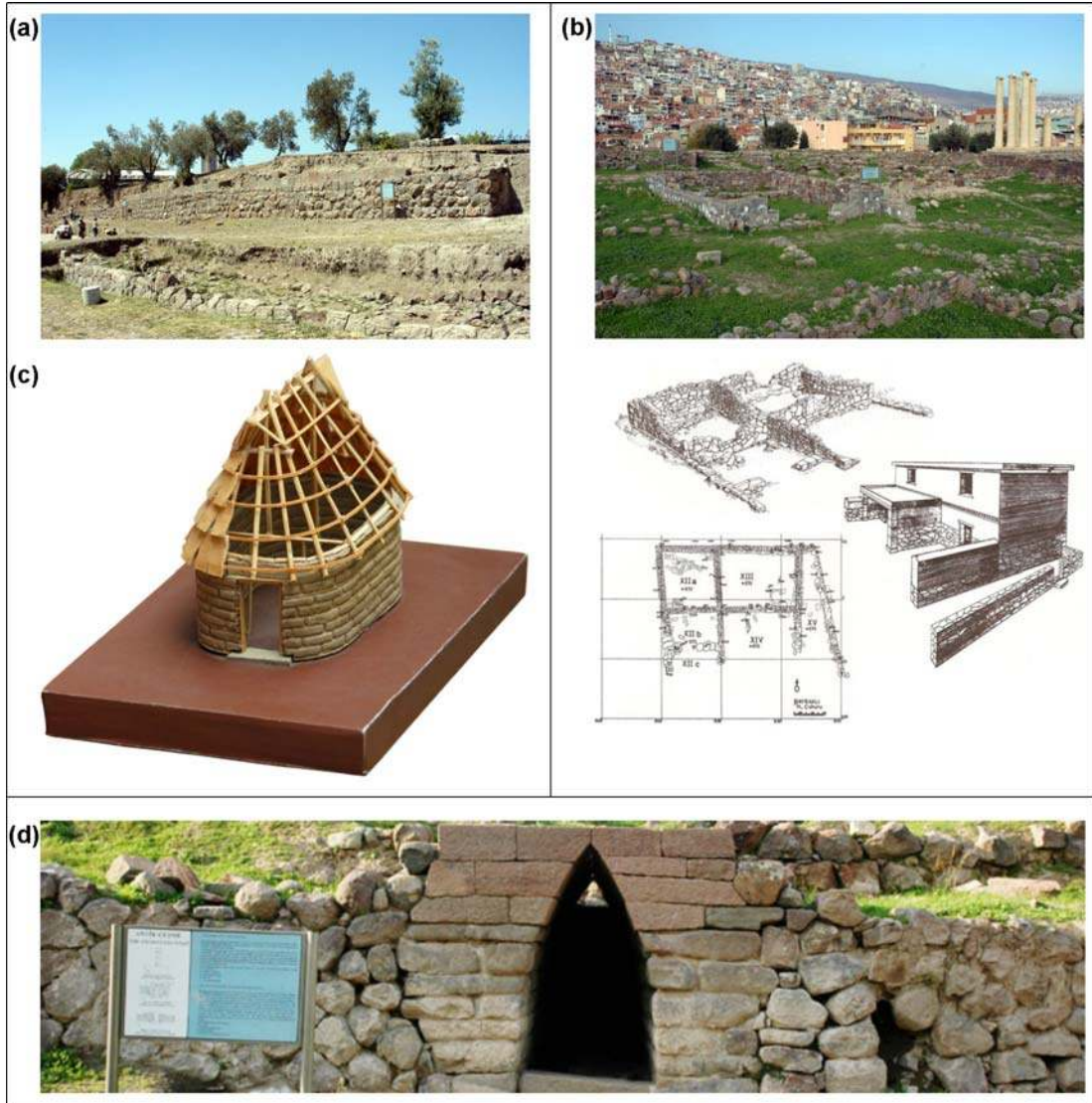
Höyük alanı terk edildikten sonra deniz içinde olan yerleri zamanla çevre derelerin taşıdığı malzeme ile dolarken, kerpiç yapıların erimesi ve yüksek kotlardan aşağı inen yamaç molozları höyüğü kaplamıştır. Günümüzde höyük yerleşmesi denizden uzakta kalmış ve çevresi modern yerleşme ile çevrilmiştir. Yine höyüğün anakara ile bağlantısının ve nekropol alanının binalar altında kaldığı düşünülmektedir (Şekil 2.6). Hızla büyüyen kentleşmenin zamanla höyük alanını tehdit eden bir unsura dönüştüğü Şekil 2.6'da verilen farklı iki döneme ait hava fotoğrafında da izlenebilmektedir. Tekel'in bu alanı deneme bağı olarak kullanması ve arkeolojik çalışmalara erken sayılabilecek dönemlerde başlanmış olması höyüğün kalan kısmının kurtarılmasında önemli olmuştur.



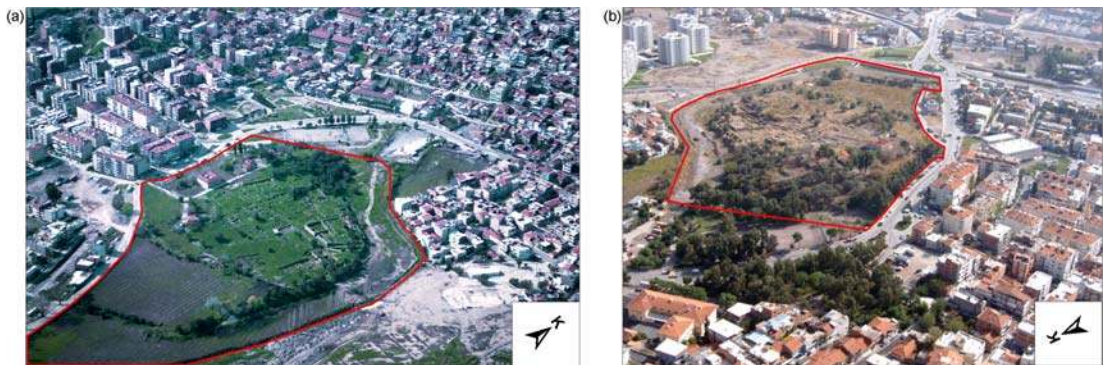
Şekil 2.3 İzmir İli'nde bulunan arkeolojik yerleşmelerin yerleri. Jeoloji ve jeomorfoloji bilgileri Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü [MTA] (2002), Koca (1995) ve Kayan (2000)'den düzenlenmiştir. Topoğrafya verisi GMT (Wessel ve Smith, 1995) veri kütüğünden alınmıştır.



Şekil 2.4 Eski Smyrna Höyüğü'nde arkeolojik kazılar sonucu ortaya çıkarılan mimari ve jeofizik çalışma planını içeren topoğrafya haritası ve ERT ölçüm alanına (A) ait fotoğraf. Jeofizik ölçüm gridleri 10x10 m boyutlarındadır.



Şekil 2.5 Eski Smyrna Höyüğü'nde arkeolojik kazılar sonucu ortaya çıkarılan mimari yapılar (Akurgal, 1993; <http://www.smyrnabayrakli.com>). a) Arkaik dönem sur duvarları, b) Athena Tapınağı ve megaron tipi eve ait plan, c) oval evin rekonstrüksiyonu ve d) çeşme yapısı.



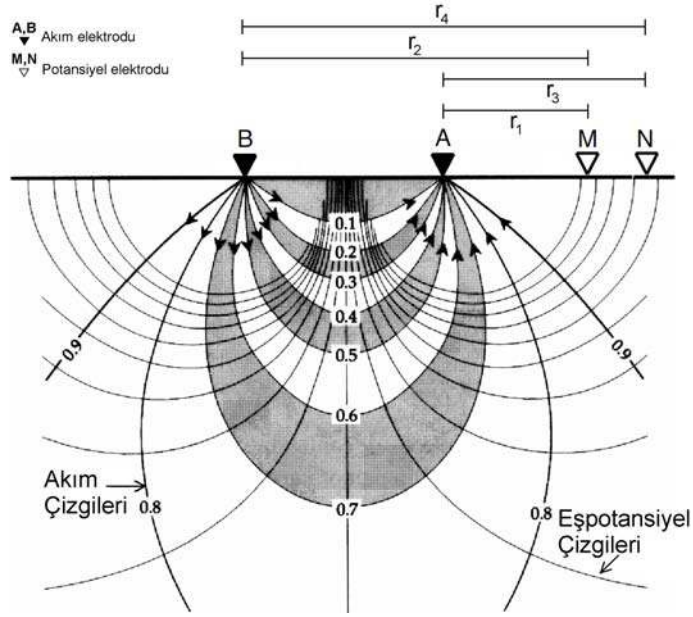
Şekil 2.6 Eski Smyrna Höyüğü 1980 (a) ve 2004 (b) yıllarına ait hava fotoğrafları.

BÖLÜM ÜÇ

ELEKTRİK ÖZDİRENÇ YÖNTEMİ

3.1 Elektrik Özdirenç Yönteminin Genel Özellikleri

Elektrik özdirenç yöntemi ile ilk uygulamalar 20. yüzyılın başlarında Wenner ve Conrad Schlumberger tarafından gerçekleştirilmiştir. Yöntem 1940'lı yılların ikinci yarısından itibaren arkeolojik prospeksiyonda kullanılmaya başlanmıştır. Yöntemde, gömülü halde bulunan hedef yapı ile bunu çevreleyen ortam arasındaki özdirenç zıtlığı yapının görüntülendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu zıtlık yeraltı yapılarının elektriksel özellikleri ve sıvı ile nem içerikleri ile ilişkilidir. Genel olarak yöntemde kullanılan bir güç kaynağı ile iki akım elektrotundan yere akım verilmekte ve yeraltında oluşan potansiyel, iki potansiyel elektrotu ile ölçülmektedir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Yarı sonsuz homojen ortamda akım ve potansiyel çizgilerinin dağılımı (Stummer, 2003; Van Nostran ve Cook, 1966).

Bu durumda elektrik özdirenç yönteminin temel kuramını çıkarabilmek için Maxwell denklemleri ve Ohm yasası kullanılmaktadır.

Buradan hareket ile öncelikle elektrik alan şiddeti ve elektrik potansiyel arasındaki ilişki aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır;

$$\vec{E} = -\nabla \phi \quad (3.1)$$

Akım yoğunluğu kavramı ise, belirli bir elektrik alana maruz kalan sürekli, izotrop ve homojen bir ortamdaki akım akışı ile verilmektedir ve ortamın iletkenliğine (σ) bağlıdır;

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (3.2)$$

Burada ortam öz direnci ρ olarak düşünüldüğünde, bu değer $\rho=1/\sigma$ bağıntısıyla verilebilmektedir. (3.1) ve (3.2) denklemleri düzenlenirse akım yoğunluğu ifadesi (3.3) denklemi ile tanımlanır. Aynı zamanda akım yoğunluğu, birim alandan geçen akım miktarının alana oranı olarak da tanımlanmaktadır.

$$\vec{J} = -\frac{1}{\rho} \cdot \nabla \phi = \frac{I}{A} \quad (3.3)$$

Ayrıca elektriksel potansiyel elektrik öz direnç uygulamalarında Laplace denklemini sağlamak zorundadır. Buna göre Laplace denklemi aşağıdaki gibi verilmektedir;

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (3.4)$$

Misse-à-la-masse'dan hareket ile yeraltındaki nokta akım kaynağının yeryüzündeki bir noktada oluşturacağı potansiyel değeri (3.5) denklemi ile tanımlanmaktadır.

$$\phi = \frac{I \rho}{4 \pi r} \quad (3.5)$$

Ortam yarı sonsuz homojen ve akım ile potansiyel elektrotlarının da yüzeyde olduğu düşünülürse, A ve B akım elektrotları olmak üzere Şekil 3.1’de verilen dört elektrotlu dizilim için M ve N potansiyel elektrotları arasında oluşan gerilim farkı (3.6) denklemi ile verilmektedir;

$$\Delta\phi = \phi_M - \phi_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right) \quad (3.6)$$

(3.6) denkleminde hareket ile homojen olmayan yeraltı için hesaplanacak olan özdirenç değeri ise görünür özdirenç (ρ_a) olarak tanımlanmaktadır ve bu değer elektrotların yüzeydeki dizilişine, yeraltının özdirencine, nem içeriğine ve mevsimsel koşullara bağlı olarak değişmektedir. (3.6) denklemi kullanılarak elde edilen “ ρ_a ” görünür özdirenç değeri (3.7) denklemi ile verilmektedir. Elde edilen bu değer elektrot diziliminin orta noktasına atanmaktadır. Yeraltının homojen olması koşulunda görünür özdirenç değeri yeraltının gerçek özdirencine eşit olmaktadır.

$$\rho_a = \frac{\Delta\phi}{I} \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right)} \quad (3.7)$$

Kullanılan elektrot sayısı ve yeryüzündeki dizilişleri elektrik özdirenç yöntemi içerisinde elektrot dizilimi kavramını getirmektedir. Eşitliğin sağ tarafındaki ikinci bölme ifadesi “k” dizilim katsayı (geometrik faktör) olarak adlandırılmaktadır ve (3.8) denklemi ile ifade edilmektedir.

$$k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right)} \quad (3.8)$$

Diğer taraftan elektrik özdirenç yönteminde düz-çözüm çalışmaları için Poisson denklemi kullanılmaktadır. (3.2) denklemi ile verilen akım yoğunluğu Maxwell denklemleri kullanılarak yazılabilmektedir.

$$\nabla \cdot \vec{J} = -\frac{\partial q}{\partial t} \quad (3.9)$$

Akım kaynağı (x_s, y_s, z_s) koordinatlarına yerleştirildiği ve bu kaynaktan I akımı verildiği düşünülürse (3.9) denklemi,

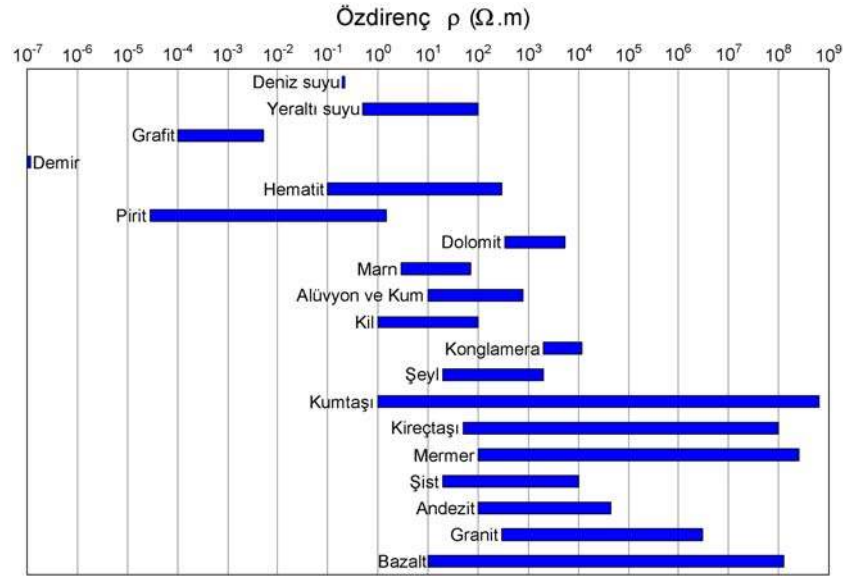
$$\nabla \cdot \vec{J} = I \cdot \delta(x - x_s) \cdot \delta(y - y_s) \cdot \delta(z - z_s) \quad (3.10)$$

halini alır. (3.10) denklemi, (3.3) denkleminde yerine konulur ve tekrar düzenlenirse Poisson denklemi elde edilebilmektedir. 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 (3.11) denklemi ile tanımlanmaktadır.

$$-\nabla \cdot [\sigma(x, y, z) \cdot \nabla \phi(x, y, z)] = \left(\frac{I}{\Delta V} \right) \cdot \delta(x - x_s) \cdot \delta(y - y_s) \cdot \delta(z - z_s) \quad (3.11)$$

Burada δ , Dirac Delta fonksiyonudur. Bu denklemin çözümü ile potansiyel dağılımının modellenmesi mümkündür ve bu elektrik özdirenç yönteminde düz-çözüm olarak tanımlanmaktadır (Bkz. Bölüm 4.1).

Kayaç ve minerallerde elektrik akımının iletimi, serbest elektron bulunduran kayaç ve minerallerde elektronik iletim ile gerçekleşirken, kötü iletken olan kayaçlarda ise gözeneklerinde bulunan sıvı yoluyla elektrolitik iletim sağlanmaktadır. Eğer kayacın serbest elektronu çok az ise elektrik akımı dielektrik iletim ile sağlanmaktadır. Dolayısıyla doğal ortamda kayaçlar, göstermiş oldukları gözeneklilik ve geçirgenlik özelliklerine bağlı olarak geniş bir aralıkta özdirenç değerleri sunmaktadır (Şekil 3.2). Kayaçların bu özelliklerini, jeolojik ve atmosferik olaylardan dolayı kayaçlarda oluşan kırıklanma, alterasyon ve ayrışma gibi etkiler ile birlikte kayaçların mineral içerikleri de belirlemektedir. Örneğin sedimanter kayalar, genellikle daha gözenekli ve yüksek su içeriğine sahiptir ve volkanik ile metamorfik kayalara göre normal olarak daha düşük özdirenç değerleri göstermektedir.

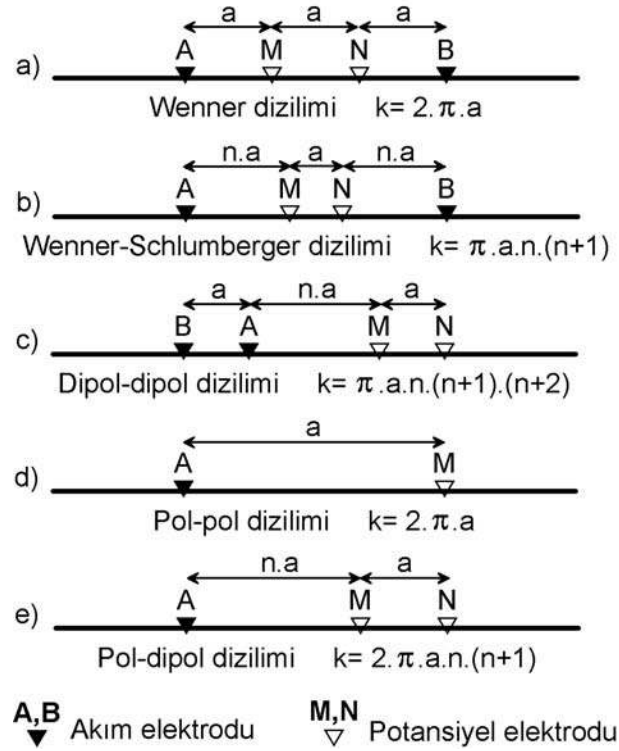


Şekil 3.2 Bazı kayaç ve materyallerin özdirençleri (Telford ve diğer., 1990).

3.2 Elektrot Dizilimleri

Elektrik özdirenç yönteminin uygulamasında iki akım ve iki potansiyel elektrotu olmak üzere 4 elektrottan oluşan dizilimler kullanılmaktadır. Bu elektrotların yüzeydeki dağılımlarının ve birbirlerine göre olan uzaklıklarının değiştirilmesi ile farklı düzenlerde dizilimler elde edilebilmektedir. Szalai ve Szarka (2008) yaptıkları çalışmada literatürde tanımlanan yüzden fazla elektrot dizilimini süperpozisyon, odaklanma ve doğrusallık özelliklerini inceleyerek sınıflandırmıştır. Bu tez çalışması kapsamında ise sık kullanılan beş elektrot dizilimi Wenner, Wenner-Schlumberger, dipol-dipol, pol-pol ve sol yönlü pol-dipol (izleyen bölümlerde pol-dipol olarak anılacaktır) dizilimleri modelleme ve arazi çalışmaları kapsamında incelenmiştir. Şekil 3.3'te bu dizilimlerde kullanılan elektrotların yüzeydeki konumları, dizilim katsayıları (k) ile birlikte verilmektedir. Burada ilk üç dizilim 4 elektrotu birden ölçümlerde aktif olarak kullanılırken, pol-pol diziliminde bir akım ve bir potansiyel elektrotunun, pol-dipol diziliminde ise bir akım elektrotunun sonsuza yerleştirildiği varsayılarak sabit pozisyonda tutulmaktadır. Arazi uygulamalarında sonsuz mesafesi olarak en büyük elektrot açıklığının 20 katı kadar bir uzaklık seçilmektedir. Elektrotlar arası uzaklıkları gösteren “a” ve “n” değerleri değiştirilerek farklı derinlik seviyelerinden görünür özdirenç verisinin ölçülmesi sağlanmaktadır.

Elektrotların yüzeydeki yerleşimi akımın yeraltına iletimini ve oluşturulan potansiyeli değiştirmektedir. Dolayısıyla dizilim geometrisi olarak da adlandırılan bu durum yüzeyde ölçülen görünür öz direnç değerini doğrudan etkilemektedir. Bu da aranan hedef yapının belirlenebilirliğini yani dizilimin çözüm gücünü değiştirmektedir. Elektrik öz direnç yöntemi ile yapılan çalışmalarda, elektrot dizilimlerinin çözünürlük kapasitelerine uygun olarak hangi dizilimin kullanılacağına belirlenmesi önemli bir olgudur. Bilindiği gibi geleneksel dizilimler farklı çözünürlük (yatay ve düşey yapılara karşı duyarlılık), araştırma derinliği, sinyal-gürültü oranı, veri yoğunluğu ve yatay yönde veri kaplama alanı özelliklerine sahiptir. Ward (1990) dizilim seçiminde etkin olan faktörleri açıklamaktadır. Dizilimlerin bu özellikleri ve araştırma problemi göz önüne alınarak, dizilimlerden bir veya daha fazlası ölçümlerde kullanılabilir. Tez çalışmasında kullanılan beş dizilime ait duyarlılık kesitleri 100 $\Omega.m$ 'lik homojen yeraltı için hesaplatılarak, Şekil 3.4'te sunulmuştur. Bu kesitlerden, kullanılan dizilimin hedef yapıya karşı gösterdiği tepki çıkarılabilmektedir. Koyu tonlar pozitif ve açık tonlar negatif duyarlılık değerlerini göstermektedir. Buna göre, pozitif bölgeye denk gelen yeraltındaki ortama göre yüksek öz dirençli bir yapı yüzeyde ölçülen görünür öz direnç değerinin azalmasına sebep olurken, yapı negatif bölgeye denk geldiğinde görünür öz direnç değeri artmaktadır. Örneğin, Wenner diziliminin duyarlılık kesitinde, N ve B elektrotları arasına denk gelen gömülü olduğu ortama göre yüksek öz dirençli hedef yapı, ölçülen görünür öz direnç değerini arttırırken, M ve N elektrotları arasına gelince değerin düşmesine neden olmaktadır. A ve M elektrotları arasında ise yine ölçülen görünür öz direncin artışı gözlenmektedir (Şekil 3.4a). Sonuç olarak ortama göre dirençli bir hedef yapı için Wenner dizilimi "M" şeklinde bir anomali sergilerken, iletken bir yapı da tersi olan "W" şeklinde bir anomali ile karşımıza çıkacaktır. Duyarlılığın yüksek değerli olduğu alanların ölçülen öz direnç değerine daha fazla katkı yaptığı bu kesitlerden söylenebilmektedir. Bu durum ölçülen değere en fazla katkının elektrotların çevresindeki alanlardan olduğunu da göstermektedir. Duyarlılık hesapları ayrıca dizilimlere ait araştırma derinliği bilgisini elde etmek içinde kullanılmaktadır (Edwards, 1977; Loke, 2010; Oldenburg ve Li, 1999). Bu tez çalışması kapsamında kullanılan dizilimler hakkında genel bilgi ise aşağıdaki gibi özetlenebilir.



Şekil 3.3 a) Wenner, b) Wenner-Schlumberger, c) dipol-dipol, d) pol-pol ve e) pol-dipol dizilimlerinde kullanılan elektrotların yüzeydeki dağılımı ve dizilimlere ait geometrik faktör (k) hesabı.

Wenner diziliminde, iki akım ve iki potansiyel elektrotu ölçümde aktif olarak kullanılmaktadır. Elektrot aralıklarının “a” olarak sabit alındığı ve ölçüm değerlerinin iki potansiyel elektrotunun orta noktasına atandığı dizilim simetrik bir dizilim türüdür (Şekil 3.3a). Dizilim genel anlamda, yeraltındaki yatay tabakalara daha iyi çözümler verebilmektedir. Bunun sebebi diziliminin duyarlılığının dizilim altında hemen hemen yatay olmasıdır (Şekil 3.4a). Ortalama araştırma derinliği, bu dizilimde “a”nın yani elektrot aralığının yarısı kadardır. Dizilim yüksek sinyal oranı sunduğundan, gürültülü ortamlarda kullanılması tercih edilebilmektedir.

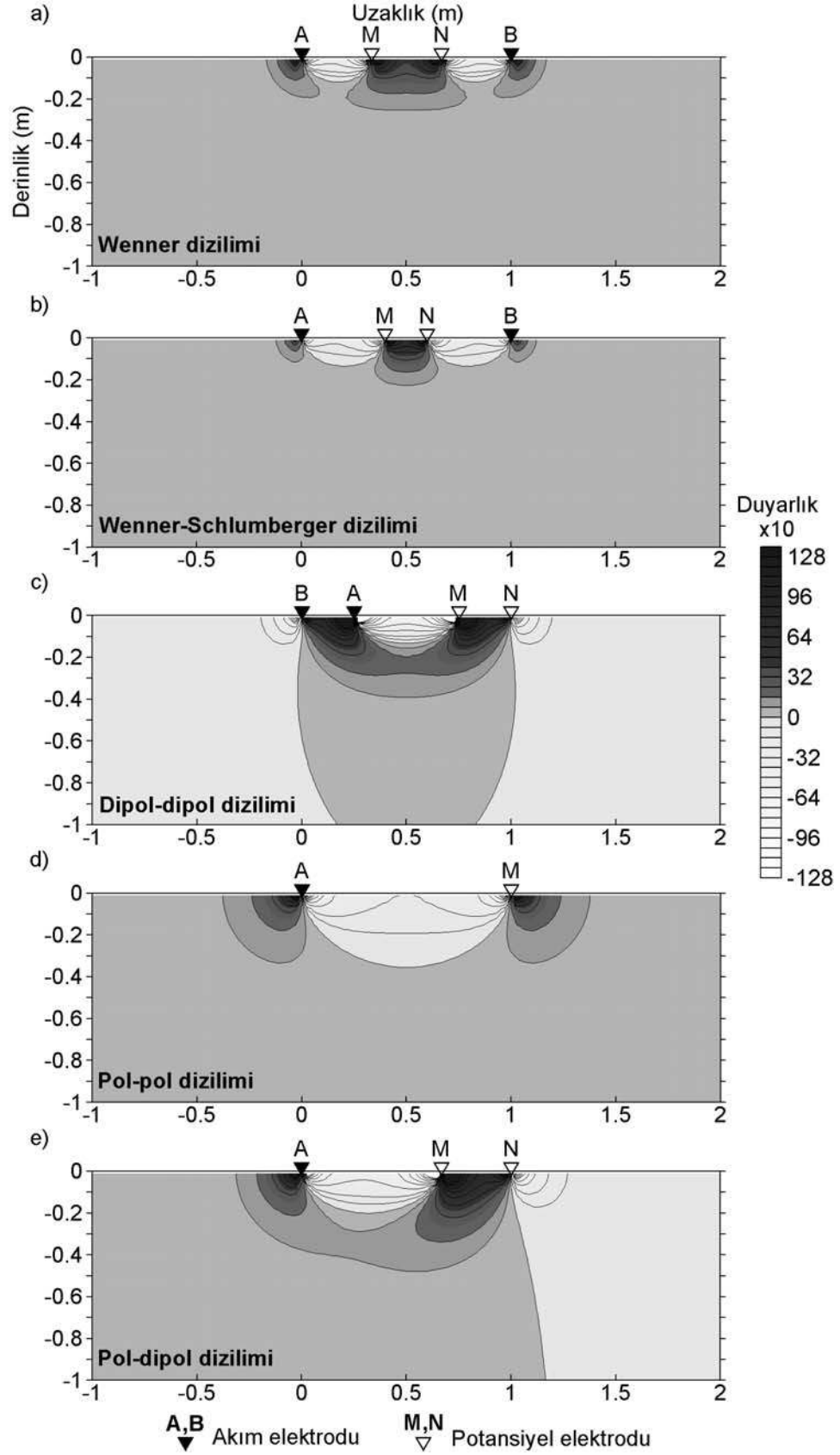
Dört elektrot kullanan diğer bir dizilim olan Wenner-Schlumberger dizilimi orta noktaya göre simetrik olup, elektrot aralıkları belli bir “n” faktörüne göre seçilmektedir (Şekil 3.3b). Dikkat edileceği gibi “n=1” olması durumunda Wenner dizilimi elde edilmektedir. Ölçülen görünür öz direnç değerinin dizilimin orta noktasına atandığı bu elektrot düzeninde, “a” ve “n” ayrı ayrı veya birlikte arttırılarak

derin seviyelerden bilgi alınabilmektedir. Dizilime ait duyarlık kesiti incelendiğinde; potansiyel elektrotları arasında kalan pozitif alanın Wenner diziliminden daha dar ve derine doğru yayvan olduğu görülmektedir (Şekil 3.4b). Bu durum dizilimin hem yatay hem de düşey süreksizliklere karşı duyarlı olduğunu göstermektedir.

Dipol-Dipol dizilimi, akım ve potansiyel elektrotlarının dipol kolları olarak yerleştirildiği bir elektrot düzenidir (Şekil 3.3c). Araştırma derinliği “a” ve “n” değerlerine göre belirlenmektedir. Görünür öz direnç değeri dipol kollarının ortasına atanmaktadır. Dipol-dipol dizilimi diğer dizilimlere göre yüksek anomali etkisine sahip olmasına karşın, gürültü içerme riski de fazladır. Düşey uzanımlı yeraltı yapılarına duyarlı olan bu dizilimle elde edilen görüntülerin ayrımlılığı da yüksektir. Şekil 3.4c’deki duyarlık kesitine bakıldığında ise dizilimin akım ve potansiyel kolları arasında yüksek duyarlık verdiği, böylelikle yeraltındaki düşey yönlü değişimlere karşı daha başarılı olduğu söylenebilir.

Simetrik bir dizilim olan pol-pol dizilimi aktif olarak bir akım ve bir potansiyel elektrotunun ölçümde kullanıldığı bir düzendir. Ölçülen görünür öz direnç değerleri kullanılan akım ve potansiyel elektrotu arasına atanmaktadır. Dizilimin araştırma derinliği diğer tüm dizilimlerden daha fazladır ve “a” mesafesinin 0.867 katıdır. Ayrıca ölçümde iki elektrot kullanılmasından dolayı tam 3-boyutlu elektrik öz direnç ölçümleri için uygundur. Tellürik akımlara karşı duyarlı olması dizilimin dezavantajıdır.

Yeryüzünde üç elektrotu aktif olarak kullanan pol-dipol dizilimi bu düzeni ile asimetrik bir dizilimdir (Şekil 3.3e). Sonsuza atılan akım elektrotunun yönüne göre sağ ve sol yönlü olarak adlandırılmaktadır. Bu özelliğinden dolayı dizilim simetrik olmayan görünür öz direnç eğrileri sunmaya meyillidir. Ölçülen görünür öz direnç değeri dizilimin orta noktasına atanabildiği gibi, iki potansiyel elektrotunun orta noktasına da atanabilmektedir. Dipol-dipol dizilimi gibi düşey yönlü uzanan yapılara duyarlı olan dizilim, dipol-dipol dizilimine göre daha az gürültü içeriği sunmaktadır (Şekil 3.4e).



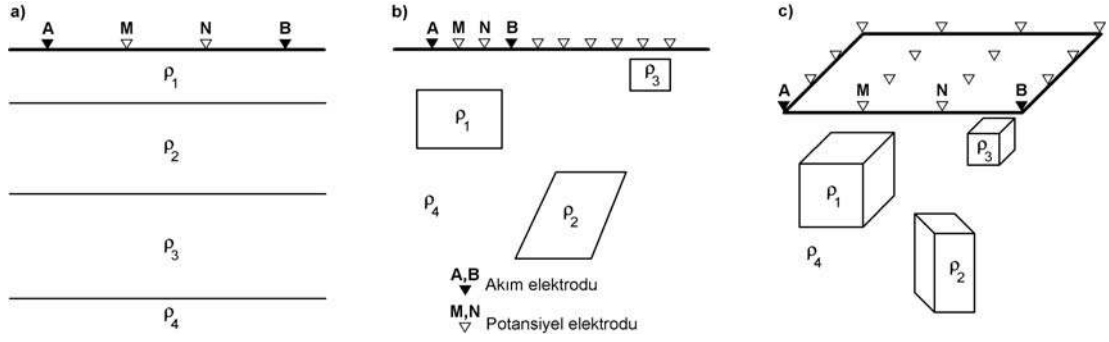
Şekil 3.4 a) Wenner, b) Wenner-Schlumberger, c) dipol-dipol, d) pol-pol ve e) pol-dipol dizilimlerine ait duyarlık kesitleri (100 $\Omega \cdot m$ 'lık homojen ortam için hesaplatılmıştır).

Elektrot dizilimlerinin bu özelliklerinden dolayı aynı ölçüm alanı için verdikleri yanıtlar farklı olmaktadır. Bu farklılıklar gerek modelleme gerekse de arazi çalışmaları ile irdelenmiştir. Örneğin Sasaki (1992) kuramsal veriler ile yaptığı çalışmalarda, karmaşık yapıların çözümlenmesinde dipol-dipol diziliminin pol-pol dizilimine göre daha başarılı olduğunu saptamıştır. Dizilimlerin (pol-pol, dipol-dipol ve pol-dipol) araştırma derinliklerini inceledikleri çalışmalarında Oldenburg ve Li (1999) bu dizilimlere ait ters-çözüm işleminden elde edilen modellerin farklı nüfuz derinlikleri sunduğunu belirlemiştir. Dahlin ve Zhou (2004) ve Drahor ve diğer. (2005) ise çalışmalarında farklı dizilimlerin kuramsal modeller üzerindeki etkilerini incelemiştir. Sonuç olarak yüksek ayrımlıklı yeraltı görüntüleri elde edebilmek için kullanılan dizilimden elde edilen verinin maksimum anomali bilgisini ve minimum gürültüyü içermesi beklenmektedir.

3.3 Veri Toplama ve Elde Edilen Görüntüler

Elektrik özdirenç yönteminin uygulamaları yüzeyden, kuyu içerisinden ve yüzey-kuyu arasında gerçekleştirilebilmektedir. Yüzey çalışmalarında elektrotlar yüzeyde konumlandırılarak ölçümler yapılırken, kuyu içi çalışmalarda ise elektrotların tamamı kuyu içerisinde olacak şekilde ölçüm alınmaktadır. Bunlara ek olarak, ölçümde kullanılan elektrotların bir kısmı yüzeyde bir kısmı kuyu içerisinde olacak şekilde de ölçümler gerçekleştirilebilmektedir. Yeryüzünden yapılan elektrik özdirenç çalışmaları araştırma problemine göre üç farklı şekilde uygulanabilmektedir. Bunlar;

- i. Düşey Elektrik Sondaj (DES) çalışmaları,
- ii. Profil ölçüsü veya haritalama,
- iii. İki- ve üç-boyutlu görüntülendirme (elektrik özdirenç tomografisi)'dir. Böylelikle yeraltı özdirenç dağılımı Şekil 3.5'te gösterildiği gibi 1-, 2- ve 3-boyutta tanımlanabilmektedir.

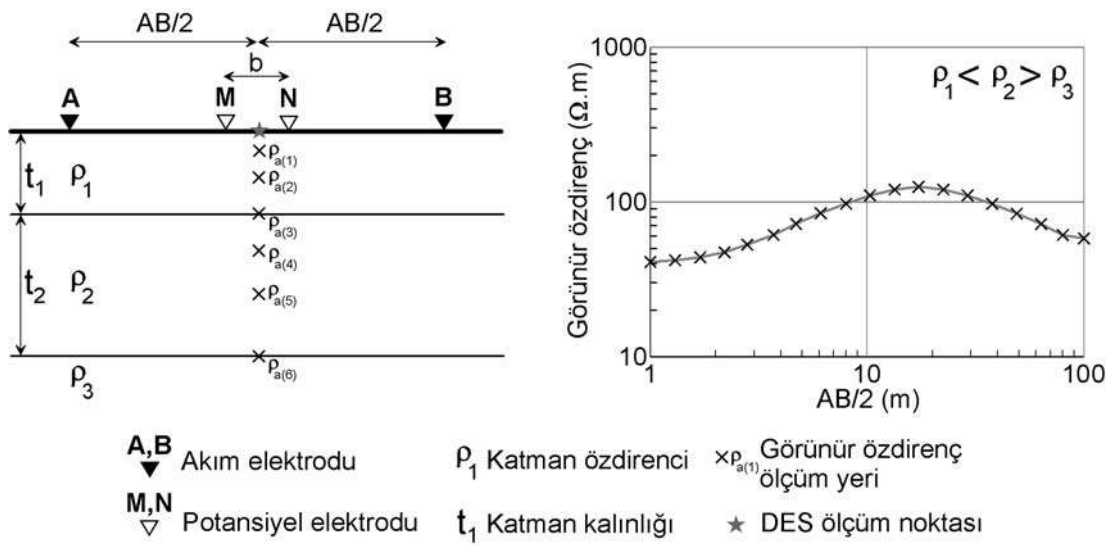


Şekil 3.5 a) Düşey elektrik sondaj, b) 2- ve c) 3- boyutlu elektrik öz direnç tomografi uygulamalarında yeraltının yorumlanması (Loke, 2010).

Elektrik öz direnç yönteminin uygulamalarında genellikle tek veya çok-kanallı öz direnç ölçüm donanımları kullanılmaktadır. Bu donanımlar genel olarak öz direnç ölçüm cihazını, güç kaynağını (akü veya jeneratör), uygun iletken kabloları ve yer ile iletimi sağlayan elektrotları (metal kazık veya polarize olmayan elektrot) içermektedir. Yukarıda belirtilen araştırma problemine göre kullanılan ölçüm sistemi değişiklik gösterebilmektedir. Sığ derinlikli problemleri kapsayan arkeoloji amaçlı çalışmalarda ise tekerlekli (wheeled), çekmeli (towed) ve çok-kanallı (multi-electrode) veri toplama sistemleri kullanılmaktadır (Gaffney, 2008). Bu sistemler ile arkeolojik alanlardan daha hızlı veri toplama olanağı ortaya çıkmaktadır. Tekerlekli ve çekmeli sistemlerde ölçümler genellikle profil ölçüsü şeklinde tek bir elektrot dizilimi kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Çok-kanallı sistemler ise birçok elektrot diziliminin kullanımına ve 2- veya 3-boyutlu veri toplanmasına izin vermektedir.

Yeraltının öz direnç değerinin derinlikle değişimi düşey elektrik sondaj (DES) çalışmalarıyla incelenmektedir. Tek-kanallı öz direnç aletlerinin kullanıldığı ölçüm yönteminde, dizilimin orta noktası sabit tutularak, elektrotların aralıkları açılmakta ve böylelikle elektrot aralığına bağlı olarak, orta noktanın altındaki yeraltına ait görünür öz direnç değerleri, derinliğe göre bir-boyutlu olarak elde edilmektedir (Şekil 3.6). Derinliğe göre olan bu değişimde öz direncin sadece bu yönde (z- yönü) değiştiği, diğer iki yönde (x- ve y- yönü) sabit kaldığı ve yeraltının yatay homojen katmanlardan oluştuğu varsayılmaktadır (Şekil 3.5a ve 3.6). Bir boyutta yapılan bu varsayım sonucu diğer yöndeki değişimler, elde edilen görünür öz direnç değerlerini

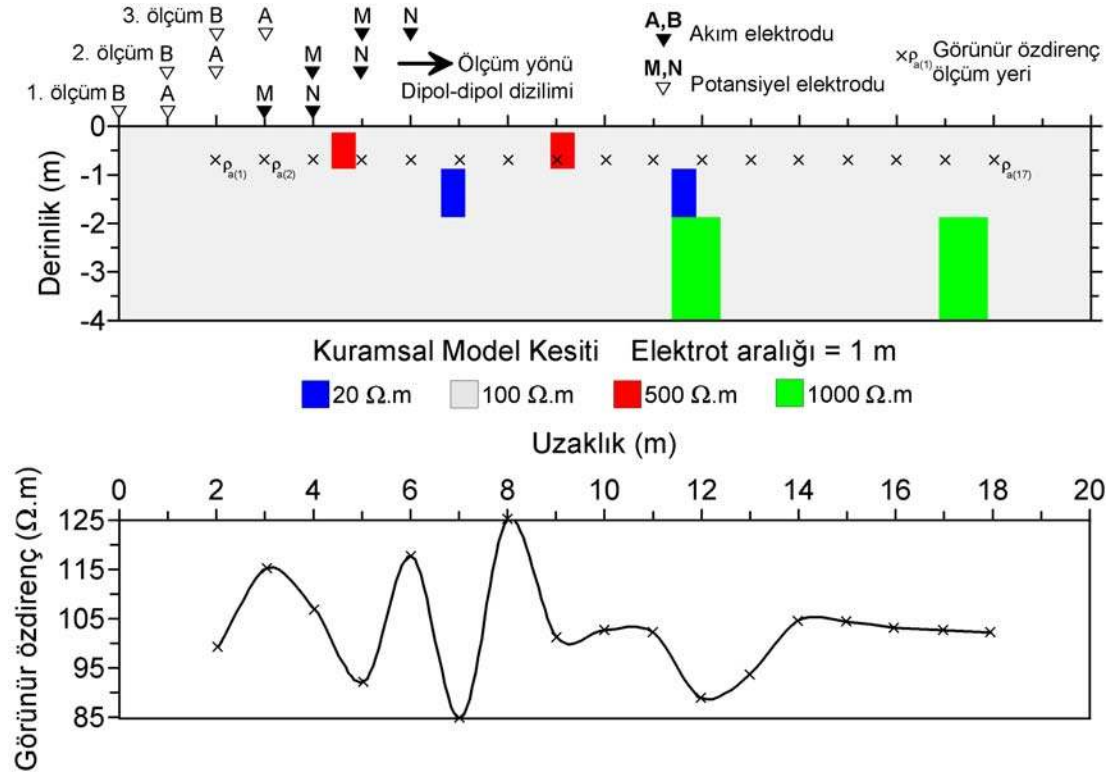
olumsuz etkilemektedir. Yine de yöntem bir-boyutlu yeraltı modelinin yaklaşık doğru olduğu yerde örneğin yeraltı su tablası gibi jeolojik ortamlar hakkında kullanışlı bilgi verebilmektedir. DES ölçümleri log-log eksenli grafiklerde gösterilmektedir. Bu öz direnç eğrilerinin abaklar (Stefanescu ve diğer., 1930) ile nicel yorumlamaları mümkündür. 1970’li yıllardan itibaren bilgisayarların ve lineer süzgeç kuramının gelişimi ile DES değerlendirmeleri için bilgisayar temelli yorumlama teknikleri ortaya çıkmıştır (Ghosh, 1971). Bunu ise otomatik ters-çözüm teknikleri izlemiştir (Başokur, 1999; Inman, 1975; Zohdy, 1989).



Şekil 3.6 Düşey elektrik sondaj (DES) için ölçüm sistemi, üç katmanlı yeraltı modeli ve görünür öz direnç eğrisi.

Yeraltı öz direnç dağılımının belirli bir derinlikte ve bir profil doğrultusunda incelenmesi ise profil ölçümü ile başarılabilmektedir. Bu ölçümlerde elektrot aralıkları sabit tutularak belirli ölçüm aralıklarında elektrotlar kaydırılmaktadır. Şekil 3.7’de dipol-dipol dizilimi için kuramsal modelden üretilmiş 1. ölçüm seviyesi için profil ölçümü eğrisi verilmektedir. Elektrotlar ölçüm aralıkları 1 metre olacak şekilde 1. ölçümden başlayarak ölçüm yönünde kaydırılmaktadır. Her bir kaydırma sonucunda ölçülen görünür öz direnç verisi dizilimin orta noktasına atanmaktadır. Böylelikle toplam 17 görünür öz direnç verisi kuramsal model kesiti üzerinde gösterilen seviyeden toplanmaktadır. Profil ölçümleri ile profil doğrultusu boyunca yeraltında olabilecek yanal yönlü öz direnç değişimleri belirlenmeye çalışılmaktadır.

Bu işlemin bir alan üzerinde birden fazla profil ölçümü ile yapılmasıyla da o alanın ölçülen derinlik seviyesine ait görünür öz direnç değerleri elde edilmektedir ve haritalama ölçümü gerçekleştirilmiş olmaktadır.

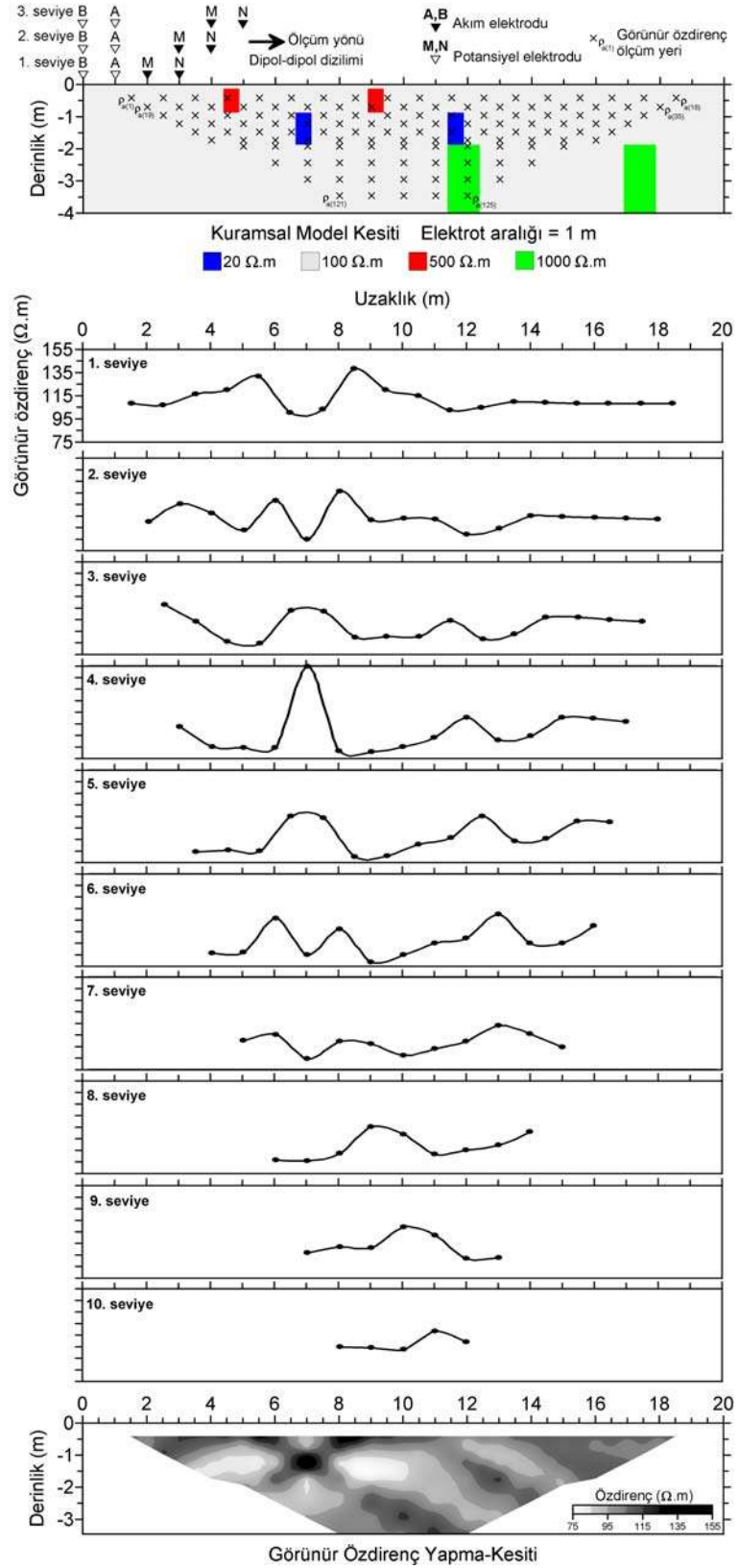


Şekil 3.7 Düz-çözümde kullanılan kuramsal modelden dipol-dipol diziliminin profil ölçümü ile elde edilen 1. ölçüm seviyesi için profil eğrisi.

Elektrik öz direnç yönteminin mühendislik, çevre ve arkeoloji gibi uygulamalarında karşılaşılan yeraltı problemleri oldukça karmaşıktır. Bu gibi koşullarda yeraltı öz direnç dağılımının iki veya üç boyutta ortaya çıkarılması, yapılacak yorumların daha sağlıklı olmasını sağlayacaktır. Bunun için elektrik öz direnç yönteminde iki- ve üç-boyutlu görüntülendirmeye yönelik ölçümler yapılmaktadır. İki-boyutlu görüntülendirmede ölçüm profili boyunca ve istenen aralıklarda yerleştirilen elektrotlar, çok kanallı kablo (32, 64 kanal sayısı gibi) ve bir öz direnç ölçüm cihazı ölçümün temel ekipmanlarıdır (Christensen ve Sorensen, 1998; Dahlin, 1996, 2001; Dahlin ve Loke, 1998; Griffiths ve Barker, 1993; Griffiths ve diğer., 1990; Van Overmeeren ve Ritsema, 1988). Belli bir elektrot sayısı ile çevrelenen çalışma alanının iki-boyutlu bir öz direnç görüntülendirmesini yapmak X-

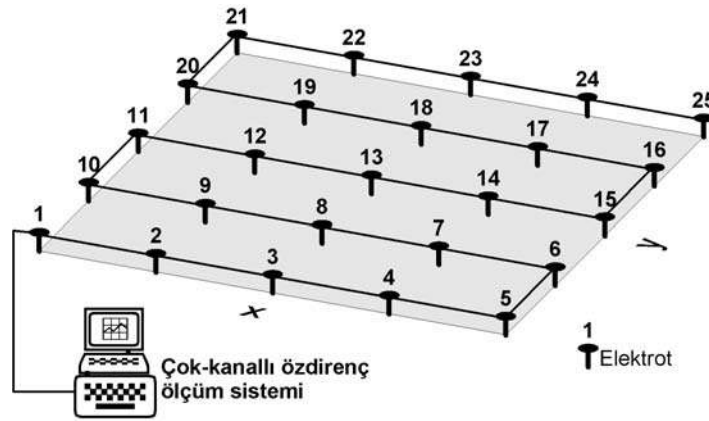
ışını tomografisine benzer bir çözünürlükte sonuçlar verdiğiinden, “Elektrik Öz direnç Tomografisi (Electrical Resistivity Tomography-ERT)” adlandırması ilk kez 1987’deki 57. SEG Toplantısında (New Orleans) Shima ve Sakayama (1987) tarafından kullanılmıştır. Günümüzde oldukça sık uygulanan 2-boyutlu elektrik öz direnç tomografi (ERT) çalışmalarından, yeraltındaki yapıların uzanımları hakkında başarılı sonuçlar elde edildiği görülmektedir.

Şekil 3.8’de 21 elektrottan oluşan ölçüm düzeninde dipol-dipol dizilimine göre yapılan görünür öz direnç ölçüm sonuçları verilmektedir. Elektrot aralıkları sabit tutularak yapılan 1. seviyeye ait profil ölçümünden sonra elektrot aralıkları arttırılmakta ve diğer seviyelere ait profil ölçümlerine devam edilmektedir. Ölçülen tüm seviyeler, elektrot dizilimine ait araştırma derinliği kavramından elde edilen derinlik değerlerine göre haritalandırıldığında 2-boyutlu ölçüme ait görünür öz direnç yapma-kesitine ulaşılmış olmaktadır. Ölçülen görünür öz direnç değerinin düşeydeki yeri, kullanılan elektrot dizilimine bağlı olarak etkin araştırma derinliği (Edwards, 1977) veya yapma-derinlik ile belirlenmektedir. Bu yapma-derinlik değeri homojen bir yarı-uzay için duyarlık değerleri veya Frechet türevleri kullanılarak hesaplanabilmektedir. Belirli sayıda elektrot kullanılmasından dolayı veri sayısı artan seviye ölçümlerine bağlı olarak azalmakta ve böylece ERT ile yeraltında üçgensel bir alandan yapma-kesit elde edilmektedir. Bu durumda Şekil 3.8 örneğinde olduğu gibi model kesitinde köşelere denk gelen yapılar üzerinden veri alınamadığına dikkat edilmelidir. Ayrıca örnekte görüldüğü gibi yapma-kesit üzerindeki anomalilerden model yapılara ait öz direnç ve geometri bilgilerine ulaşılammamaktadır. Bu durum yorumlama aşamasında görünür öz direnç değerlerinden oluşan yapma-kesitten gerçek öz dirence geçmeyi gerekli kılmaktadır. Bunun için 2-boyutlu ERT verilerinden bir yeraltı modeline yaklaşmayı amaçlayan ters-çözüm yöntemleri geliştirilmiştir (Bkz. Bölüm 4.2).



Şekil 3.8 Düz-çözümde kullanılan kuramsal modelden dipol-dipol diziliminin 2-boyutlu ERT ölçümü ile elde edilen seviye eğrileri ve görünür öz direnç yapma-kesiti.

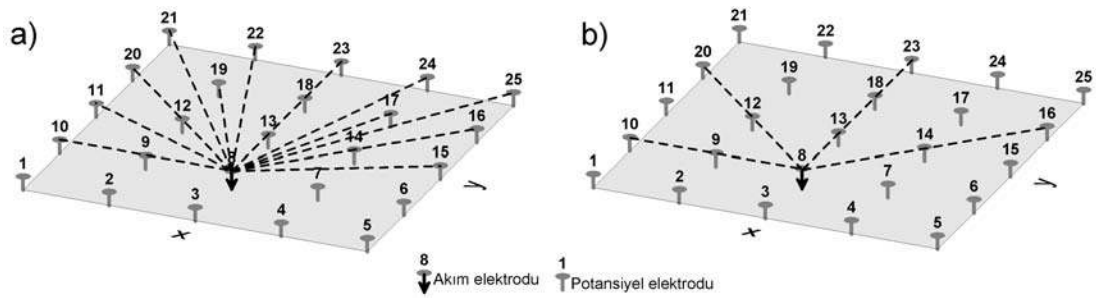
Alan çalışmalarında hedef yapının yeraltında her üç boyutta da (x, y ve z) dağılım göstermesinden dolayı, yeraltının 3-boyutlu bir model ile temsil edilmesi doğru olacaktır. Dolayısıyla ERT yöntemini kullanan araştırmacılar çalışmalarında bu tip karmaşık yapıların belirlenmesi için 3-boyutlu araştırmalara yönelmiştir. Arazi çalışmalarında ideal bir 3-boyutlu ERT ölçümünün yapılması, çalışmanın yapıldığı dörtgensel alan üzerindeki elektrot düzeni ile mümkün olan her yöndeki potansiyel değerlerinin ölçülmesi şeklinde başarılabilmektedir. Şekil 3.9’da 25 elektrot için verilen 3-boyutlu ölçüm düzeninde, elektrotlar alanı kaplayacak şekilde hem x- hem de y- yönünde eşit aralıklar ile dizilmiştir. Böylelikle yeryüzünde her iki boyutta ve yeraltında derinlik boyutunda olmak üzere üç boyutta görünür öz direnç değişimleri incelenebilmektedir. Oldukça zaman alan bu uygulama ile tam 3-boyutlu (full-3D) bir veri seti elde edilebilmektedir.



Şekil 3.9 Üç-boyutlu çalışma için ölçüm düzeni.

Beş elektrota beş elektrotluk bu dizilim ile Şekil 3.10a’da gösterildiği gibi tam 3-boyutlu veri setinin toplanması için 300 adet görünür öz direnç verisinin ölçülmesi gerekmektedir (Xu ve Noel, 1993). Bu da alanın boyutlarının büyümesi ile doğru orantılı olarak yapılacak ölçüm sayısının artacağı anlamına gelmektedir. Tek kanallı sistemler ile çok uzun zaman alabilecek bu tip ölçümler, çok-kanallı sistemler ile daha hızlı bir şekilde yapılabilir. Yine de fazla olan arazi çalışma ve bilgisayar hesaplama süreleri 3-boyutlu tomografik ölçümlerin rutin olarak uygulanmasına engel olmaktadır. Bunun yerine ölçüm zamanı daha az olan çapraz köşegen (cross diagonal) ölçümü Loke ve Barker (1996b) tarafından önerilmektedir

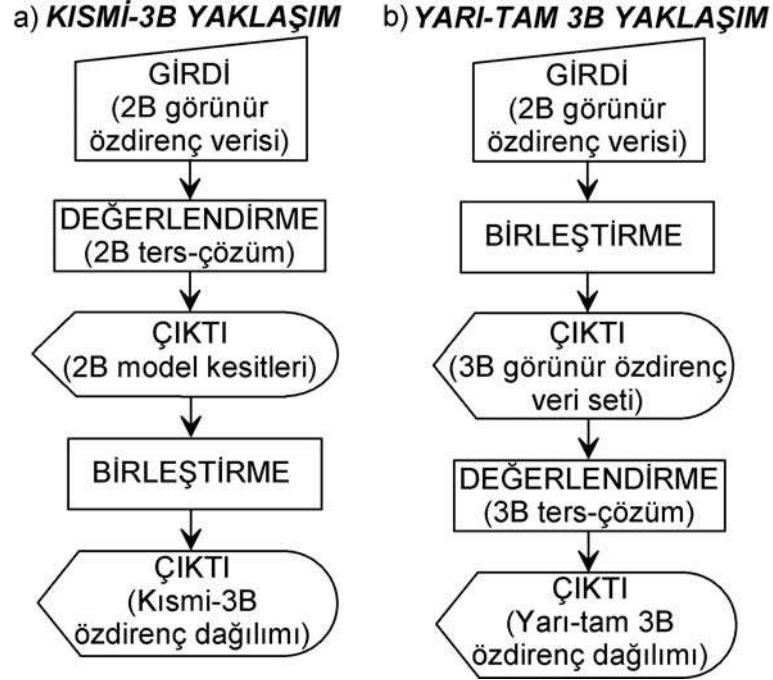
(Şekil 3.10b). Bu ölçümde, akım elektrotu üzerinden geçen ve birbirine sadece dik ve 45° 'lik açılara sahip uzanımlar boyunca bulunan elektrotlarda potansiyel değerleri ölçülmektedir. Eğer 7×7 'lik bir elektrot düzeni ile çalışma yapılıyorsa, tam 3-boyutlu veri seti 1176 görünür öz direnç değerinden oluşurken, bu düzende ölçüm sayısı 476 olmaktadır (Loke ve Barker, 1996b). Böylelikle hem arazide çalışma süresi azalmakta, hem de bu verinin ters-çözüm işlemi daha az bir zamanda başarılabilmektedir. Fakat bu tip 3-boyutlu ERT ölçümlerinin yalnızca pol-pol ve bazı gradyent dizilimleri ile mümkün olduğu burada belirtilmelidir.



Şekil 3.10 Üç-boyutlu çalışmada tek bir akım elektrotuna (8) karşılık potansiyel elektrotlarının düzeni, a) tam veri setinin ölçümü ve b) çapraz köşegen (cross diagonal) ölçümü (Loke ve Barker, 1996b'den düzenlenmiştir).

3-boyutlu yeraltı öz direnç dağılımını görüntülemek için yapılan çalışmalarda bir diğer pratik yaklaşım ise birbirine paralel ya da kesişen profiller üzerinde 2-boyutlu ERT ölçümlerinin yapılarak bunların sonuçlarından 3-boyutlu modele ulaşılması şeklindedir (Berge ve Drahor, 2007; Chambers ve diğer., 2002; Gharibi ve Bentley, 2005; Loke, 2010; Papadopoulos ve diğer., 2006, 2007). Bu işlem birkaç değişik yol ile başarılabilmektedir. Bunlardan ilki, yapılan 2-boyutlu ERT ölçümlerinin yine 2-boyutlu bir ters-çözüm algoritmasıyla işlenip, bu sonuçların profiller için birleştirilerek kısmi-3B (quasi-3d model) öz direnç derinlik kesitlerinin oluşturulmasıdır (Şekil 3.11a). İkinci yol ise, 2-boyutlu ölçümlerin birbirine paralel profiller boyunca yapılarak, görünür öz direnç değerlerinin birleştirilmesi ve yarı-tam 3-boyutlu (semi-fully 3D) öz direnç veri setinin oluşturulmasıdır. Daha sonra bu veri seti 3-boyutlu ters-çözüm programları ile değerlendirilmektedir (Şekil 3.11b). Böylece hem arazideki ölçüm zamanı hem de bilgisayar hesaplama zamanı

azaltılmaktadır ve ölçümlerde elektrot dizilimi kısıtlamasının da ortadan kalktığı görülmektedir.

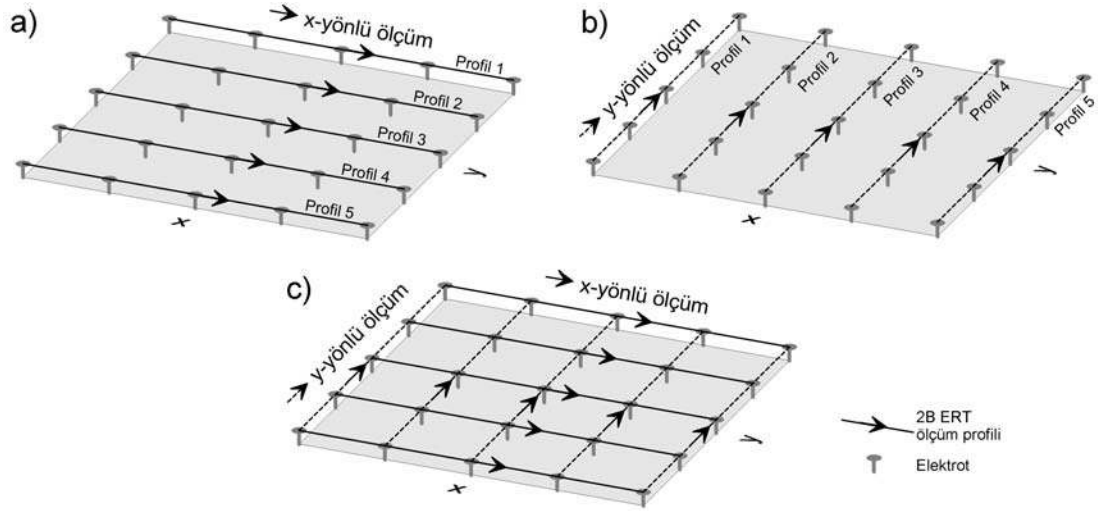


Şekil 3.11 Üç-boyutlu ERT uygulamalarında kullanılan yaklaşımlar.

a) Kısmi-3B ve b) yarı-tam 3B değerlendirme yöntemleri.

Ancak bu aşamada paralel profiller arası mesafenin uygun çözüm için nasıl seçilmesi durumunda verinin halen 3-boyutlu kabul edilebileceği sorusu gündeme gelmektedir. Bu soru için Loke (2010) profiller arası uzaklığın, kullanılan en küçük elektrot aralığından çok fazla olmaması gerektiğini belirtmektedir. Yapılan modelleme ve arazi çalışmaları da, profiller arası mesafenin elektrotlar arası mesafeye eşit ya da iki katı olarak seçildiği durumlarda başarılı sonuçların alındığını göstermektedir. Bir diğer soru ise birbirine paralel profiller boyunca yapılan ölçümler de bu profillerin alan üzerinde hangi yönde uzanacağı yani görünür özdirenç verisinin hangi yönde toplanacağı olgusudur. Şekil 3.12a'da x- yönü ölçüm yönü olarak seçilmiş, profiller ise y- yönünde kaydırılarak alan 3-boyutta taranmıştır. Aynı işlem ölçüm ve profil ilerleme yönü değiştirilerek de uygulanabilmektedir (Şekil 3.12b). Her iki yönde 2-boyutlu veri toplanarak yapılan ölçümler ise Şekil 3.12c'de verilmektedir. Profiller boyunca toplanan 2-boyutlu veriler, ayrı ayrı 2-boyutlu ters-

çözüm ile değerlendirilebileceği gibi, birleştirilerek de 3-boyutlu ters-çözüm yapılabilmektedir. Hangi düzenin daha başarılı olduğu ise özellikle aranan yapının uzanımına ve kullanılan ters-çözüm işleminin 2- ya da 3-boyutta olmasına bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 3.12 a) x- yönlü b) y- yönlü ve c) xy- yönlü 3-boyutlu ERT verisinin ölçülmesi.

3-boyutlu ERT çalışmalarının gerçekleştirilmesi sırasında çözümü etkileyen veri ölçüm ve değerlendirme yaklaşımları Tablo 3.1’de özetlenmektedir. Bu etkenlerin araştırılması ancak birlikte yapılan modelleme (benzetim) ve arazi çalışmalarıyla mümkün olacaktır. Dolayısıyla bu tez çalışması kapsamında höyük gibi çok katmanlı yerleşimler için oluşturulan yapay model ile benzetim çalışmaları ve Eski Smyrna Höyüğü’ndeki arazi çalışmaları birbirleri ile ilişkili olacak biçimde yapılmıştır.

Tablo 3.1 Üç-boyutlu ERT çalışmalarında çözümü etkileyen ve bu çalışmada irdelenen etkenler.

Etki	3-boyutlu yaklaşım	Elektrot dizilimleri	Profil yönlenmesi	Elektrot ve profil aralıkları
Kullanım şekli	Kısmi-3B Yarı-tam 3B	Wenner Wenner-Schlumberger Dipol-dipol Pol-pol Pol-dipol	x- yönlü y- yönlü xy- yönlü	0.5 x 0.5 m 1 x 0.5 m 1 x 1 m 2 x 2 m

3.4 Kullanım Alanları

Elektrik özdirenç yöntemi uzun zamandır jeoloji, hidrojeoloji, maden ve jeoteknik araştırmalar, arkeoloji, çevresel sorunlar ve mühendislik amaçlı birçok çalışmada etkili biçimde kullanılmaktadır. Sığ jeofizik (0-100 metre) çalışmalar altında toplanan bu problemler aşağıdaki başlıklar altında irdelenebilir.

- Jeolojik amaçlı çalışmalar: fay, kırık-çatlak, karstik boşluk, dolgu kalınlığı ve heyelan geometrisinin çıkarılması, dolgu alanların saptanması ve toprak türünün ve elektriksel özelliklerinin belirlenmesi.
- Hidrojeoloji amaçlı çalışmalar: akifer yeri ve kalınlığının saptanması, tuz ve kil girişimlerinin belirlenmesi, gömülü paleo kanalların saptanması, jeotermal aramacılık ve rezervuar ile kuyuların zamana bağlı gözlenmesi.
- Maden arama amaçlı çalışmalar: cevher konumunun belirlenmesi.
- Jeoteknik amaçlı çalışmalar: zemin özelliklerinin belirlenmesi.
- Arkeoloji amaçlı çalışmalar: gömülü mezar, duvar, yol tipi yapıların ortaya çıkartılarak yeraltındaki gömülü yapıların mimari özelliklerinin belirlenmesi, yaşayan kültür varlıkları olan yapıların (kilise, cami vb.) zemin ve donatı özellikleri ile zemin altındaki arkeolojik kalıntılar ve boşlukların belirlenmesi.
- Çevresel amaçlı çalışmalar: atık ve dolgu alanlarının belirlenmesi ve periyodik olarak sızıntıların gözlenmesi.
- Mühendislik amaçlı çalışmalar: gömülü kanalizasyon, telefon-elektrik gibi kanalların bulunması, bina-tünel-demiryolu-otoyol gibi yapıların altyapı-zemin araştırmaları, baraj kaçaklarının belirlenmesi.

Bu problemlere yönelik olarak yapılan elektrik özdirenç çalışmalarının sonuçlarında yorumlar yeraltı özdirenç dağılımına göre yapılmaktadır. Hedef yapının ve etrafını örten ortamın özdirenç değerlerine göre yüksek ya da düşük özdirenç sunması beklenmektedir. Böylece hedef yapının konumu hakkında yorumlar yapılabilecektir. Tez çalışmasına konu olan arkeoloji problemine yönelik uygulamalarda ise, ERT yöntemiyle belirlenebilecek yapılara ilişkin yorumlamalar genel anlamda izleyen şekilde yapılmaktadır.

Yüksek öz dirençli belirtiler olarak karşımıza çıkan yapılar;

1. Gözenekliliği çok az olan (ya da gözeneklerinde iletkenliği artıran su içeriği çok az olan) kayalardan yapılmış duvarlardan ve bina veya yol taban kaplamalarından,
2. İçi havayla dolu boşluklardan (mezar odaları gibi),
3. Yüzey düzensizliklerinden dolayı özellikle potansiyel elektrotlarının kontak problemleri veya akım elektrotlarından yeterli akımın geçmemesi gibi ölçüm hatalarından kaynaklanabilmektedir.

Düşük öz direnç sunan yapılar ise;

1. Gözeneklerinde aşırı derece su bulundurabilen kayalardan veya kil gibi iletken tabanlı materyallerden oluşan kerpiçten yapılmış duvarlardan,
2. Çöp çukurları ve gömülü hendek dolgularından,
3. İçi dolu boşluklardan (Dolgu malzemesinin niteliğine göre) kaynaklanabilmektedir (Linford, 2006).

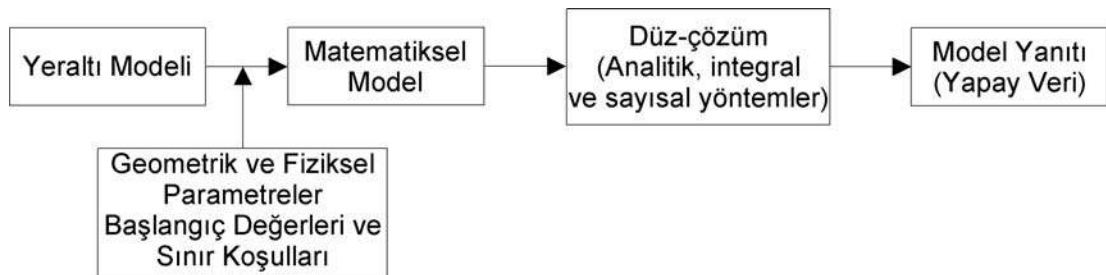
Yukarıda bahsedilen hedef yapının ortama göre yüksek veya düşük öz dirençli olma durumunun toprak koşullarına bağlı olduğu unutulmamalıdır. Toprağın iklimsel koşullara göre durumu (yazın çok kuru veya kışın aşırı yağış almış toprak koşulları) gömülü arkeolojik kalıntıların belirlenmesini doğrudan etkilemektedir. Bu gibi durumlardan arkeolojik kalıntının belirlenebileceği iklimsel koşul dikkate alınmalı ve uzun süreli ölçümlerin sürekli aynı iklimsel koşullarda sürdürülmesine dikkat edilmelidir (Aitken, 1974; Clark, 1996).

BÖLÜM DÖRT

ELEKTRİK ÖZDİRENÇ YÖNTEMİNDE MODELLEME

ELEKTRİK ÖZDİRENÇ YÖNTEMİNDE MODELLEME

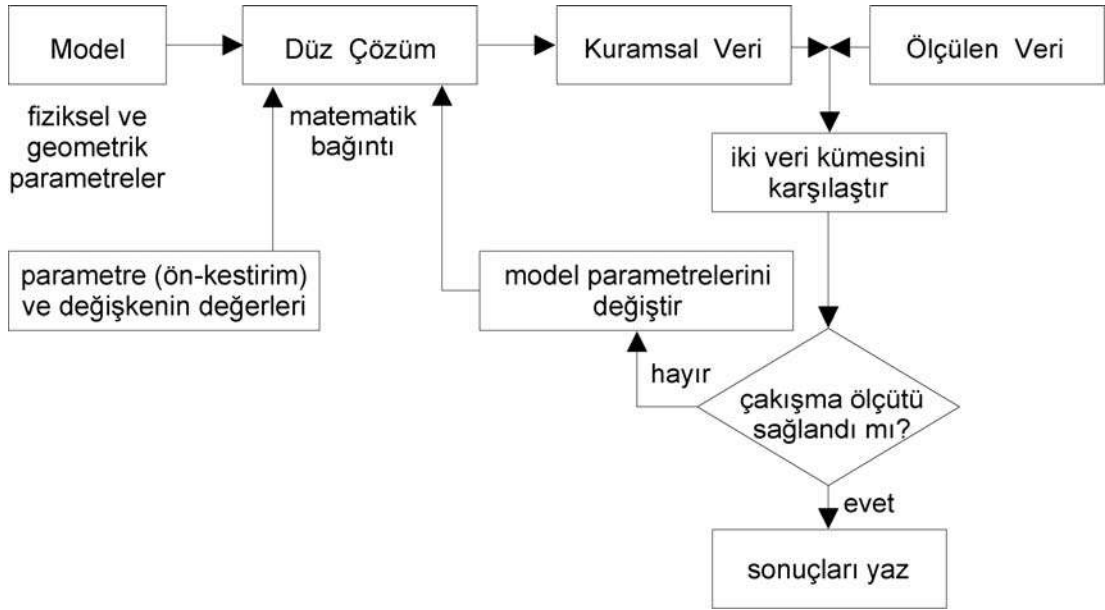
Jeofizikte modelleme düz-çözüm ve ters-çözüm olarak ikiye ayrılmaktadır. Düz-çözüm ile yeraltının fiziksel koşullarına benzetilen modelden yola çıkarak bu modelin yüzeyde oluşturacağı model yanıtı (jeofizik belirti) belirlenmeye çalışılmaktadır (Şekil 4.1). Bu işlem, arazi çalışmaları öncesinde araştırılan problemin kullanılacak jeofizik yöntemle karşı nasıl bir tepki vereceğini göstermesinden dolayı oldukça önemlidir. Burada yeraltı modeli, geometrik (şekil, konum, derinlik vb.) ve fiziksel (yoğunluk, öz direnç vb.) parametrelerden oluşmaktadır. Bu parametreler araştırma problemine göre belirlenmekte ve bunlara ek olarak düz-çözüm işlemine başlangıç değerleri ile sınır koşulları da tanıtılarak matematiksel bir fiziki model oluşturulmaktadır (Canitez, 1997). Model yanıtının (yapay-kuramsal verinin) elde edilebilmesi için düz-çözüm işleminde, analitik, integral veya sayısal yöntemler kullanılmaktadır. Düz-çözümde model boyutları ise 1, 2 ve 3-boyutlu olabilmektedir.



Şekil 4.1 Jeofizikte düz-çözüm işlemine ait akış şeması.

Jeofizik uygulamalarda problemlerden biri de ölçülen veriden yeraltını oluşturan modele ait parametrelere ulaşmaktır. Bu işlem jeofizik belirtiden modele ait parametrelerin bulunmasıdır ve ters-çözüm olarak adlandırılmaktadır (Şekil 4.2). Bu işlemin gerçekleştirilebilmesinin bir yolu, düz-çözüm işlemi ile kuramsal bir modelden elde edilecek yapay verinin, ölçülen veri ile karşılaştırılmasıdır. Ölçülen veri ile yapay verinin karşılaştırılması sonucunda aralarındaki yanılgyı en küçük yapan bir kuramsal model bulunabilirse, bu modelin yeraltını temsil ettiği söylenebilmektedir. Böylece yeraltına ait geometrik ve fiziksel parametreler belirli

hata payları etrafında kestirilmiş olmaktadır. Bu hata payları, ölçülen verinin içerdiği gürültü miktarı, kabul edilen başlangıç değerleri, sınır koşulları ve sayısal çözümünden gelen hata miktarı ile ilişkilidir. Ters-çözüm işleminde birden fazla kuramsal modele ait yapay verinin denenmesi gerektiğinden, bu işlemler yinelemeli bir yol ile yapılmaktadır. Belirlenen yanılğı (çakışma) ölçütüne veya istenilen yineleme sayısına ulaşılması ile yineleme işleminin bitirilmesi mümkündür.



Şekil 4.2 Ters-çözüm işleminin basitleştirilmiş akış şeması (Başokur, 2002).

4.1 Elektrik Özdirenç Yönteminde Düz-Çözüm

Elektrik özdirenç yönteminde düz-çözüm, geometrik ve fiziksel parametreler olan tabaka kalınlıkları, konumları ve özdirenç değerleri gibi parametrelerin oluşturduğu modelin yüzeyde yaratacağı model yanıtı olan görünür özdirenç değerlerinin hesaplanması işlemidir. Analitik yaklaşımlar ile yapılabilecek düz-çözüm işlemi, yatay tabakalı ortam, fay, dayk gibi basit modellerin çözümüne izin vermektedir. Ancak, gelişigüzel bir özdirenç dağılımını tanımlayan daha karmaşık modellerin düz-çözümü için sayısal teknikler (sonlu-farklar-SFY, sonlu-elemanlar-SEY ve sonlu-hacimler-SHY) kullanılmaktadır. Böylece 2- ve 3-boyutlu modeller tanımlanarak

model yanıtları hesap edilebilmektedir. Elektrik özdirenç yöntemi için literatürde geçen düz-çözüm çalışmaları ise aşağıda verilmektedir.

Elektrik özdirenç yönteminde iki-boyutlu modellemeyi sayısal tekniklerden sonlu-farkları (SFY) kullanarak ilk Jepsen (1969) göstermiştir. Yine bu yöntemle Mufti (1976) Neumann sınır koşullarını ve Dey ve Morrison (1979a) ise karışık sınır koşullarını kullanarak iki-boyutlu modelleme yapmışlardır. SFY ile üç-boyutlu modelleme ise Dey ve Morrison (1979b) ve Scriba (1981) tarafından başarılmıştır.

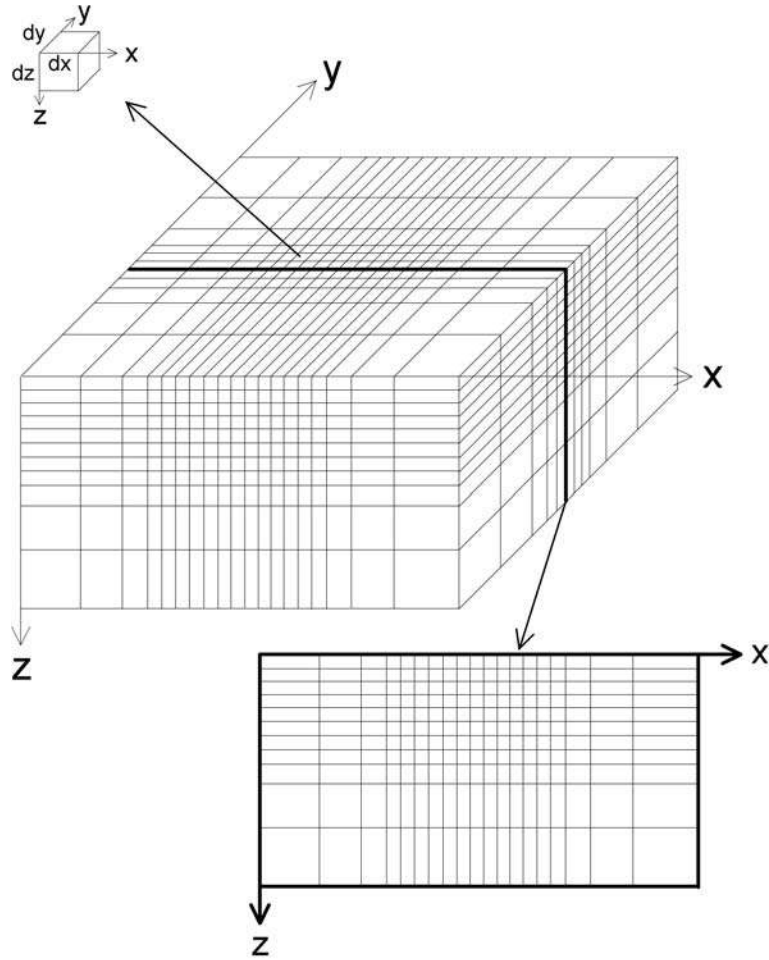
Sonlu-elemanlar yöntemiyle (SEY) iki-boyutlu modellemeyi, Coggon (1971) ve Rijo (1977) tarafından başarılmıştır. Daha sonra Tong ve Yang (1990) hesaplamalara topoğrafya etkisini de katmıştır. Queralt ve diğer. (1991) SEY de karışık sınır koşullarını kullanmıştır. Bu yöntemde üç-boyutlu modelleme ise Pridmore ve diğer. (1981) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu iki sayısal yöntemin karşılaştırılmasını Molano ve diğer. (1990), sonlu-elemanlar ile integral denkleminin karşılaştırılmasını ise Rijo (1977) yapmıştır. Günümüzde ise modelleme çalışmaları belirtilen bu sayısal tekniklerde izlenen gelişim ile birlikte daha hızlı ve daha kesin model yanıtı üretmeyi amaçlayan algoritmaların geliştirilmesine yönelmiştir (Blome ve diğer., 2008; Rücker ve diğer., 2006; Zhou ve diğer., 2009).

Sonlu-hacimler yöntemi (SHY) ise elektrik özdirenç yönteminin düz-çözümünde kendine daha az yer bulmaktadır. Buna göre, Haber ve diğer. (2000) elektromanyetik yöntem için tanımladıkları yöntem Pidlisecky ve diğer. (2007) tarafından elektrik özdirenç yönteminin iki ve üç-boyutlu çözümlerine uygulanmıştır.

Modelleme çalışmalarında, yeraltı özdirenç dağılımının yapılacak kabul ve sınır koşulları dahilinde bir-, iki- ve üç-boyutta modellenebilmesi olanaklıdır (Şekil 4.3). Elektrik özdirenç çalışmalarında iki ve üç-boyutlu modelleme için kullanılan matematiksel bağıntı Poisson denklemidir. Dey ve Morrison (1979a), I akım kaynağının onu çevreleyen bir ΔV hacim elemanı üstünde (x_s, y_s, z_s) koordinatlarına yerleştirilmesiyle yeraltında oluşturacağı potansiyel dağılımını, Poisson denklemi (4.1) ile tanımlanmaktadır.

$$-\nabla \cdot [\sigma(x, y, z) \cdot \nabla \phi(x, y, z)] = \left(\frac{I}{\Delta V} \right) \cdot \delta(x - x_s) \cdot \delta(y - y_s) \cdot \delta(z - z_s) \quad (4.1)$$

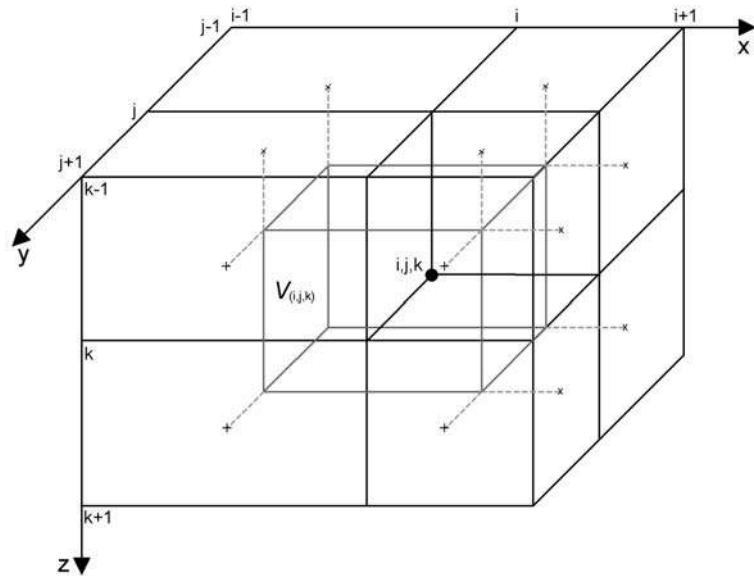
Burada σ izotropik elektrik  ziletkenliği; δ , Dirac delta fonksiyonu; ϕ 'de skaler gerilimdir. İki- ve üç-boyutlu düz-  z md  bu denklem yeraltını tanımlayan modelin hücrelere bölünmesiyle her bir hücre için çözümü gerektirecektir ( ekil 4.3). Böylece bu hücrelere ait potansiyel değerleri ve buradan hareketle de istenen dizilime ait görünür özdirenç değerleri hesap edilmiş olacaktır. Bu tez çalışmasında, höyük için oluşturulan yapay modeller 3-boyutlu olarak modellenmiş ve böylece bu modeller için kuramsal görünür özdirenç verileri elde edilmiştir. Dolayısıyla ilerleyen b l md  elektrik özdirenç düz-çözümü için yalnızca üç-boyutlu sonlu-farklar ve sonlu-elemanlar yöntemlerine değinilecektir.



Şekil 4.3 Modelleme çalışmalarında kullanılan 2- ve 3-boyutlu sonlu farklar ağı.

4.1.1 Üç-boyutlu Sonlu-Farklar Düz-Çözümü

Elektrik özdirenç yönteminin düz-çözümünde tanımlanan Poisson denkleminin, model içerisinde tanımlanan geometrik ve fiziksel parametreler ile başlangıç değer ve sınır koşulları için çözümü matris formunda gösterilebilen bir denklem sisteminin çözümünü gerektirir. Dey ve Morrison (1979b) tarafından çözümü yapılan üç-boyutlu bir ortamdaki sonlu-farklar özdirenç modellemesi Şekil 4.4’de verilen bir üç-boyutlu hücre sistemi ile tanımlanabilmektedir. Burada çözüm bölgesi, üç-boyutlu bir kapalı alan içinde gelişigüzel bir iletkenlik dağılımı gösteren hacimsel hücrelerdir. Bu hücrelerin köşe noktaları birer düğüm noktasıdır ve üç boyutlu bir koordinat sistemi içinde tanımlanır. Kapalı olan bu alan x , y ve z ’de yapay sınırlarla ya da yüzeylerle tanımlanmıştır. Bu yüzeyler ve kapalı alan Şekil 4.4’de görülmektedir. Oluşturulan yeraltı modelinin x , y ve z yönündeki düğümleri sırasıyla şöyledir; $i=1,2,3,..,L$; $j=1,2,3,..,M$; $k=1,2,3,..,N$. Yarı sonsuz bu hacmin sınırlarının $i=1$, $i=L$; $j=1$, $j=M$ ve $k=1$, $k=N$ yüzeylerinde olduğu düşünülür. Üst yüzeyde herhangi iki düğüm noktasına yerleştirilen akım kaynağından oluşan birincil gerilim ile süreksizliklerden kaynaklanan ikincil gerilimler (x,y,z) uzayında uzaklığa bağlı olarak bir azalış gösterecektir.



Şekil 4.4 Kübik $V_{i,j,k}$ elemanı kullanılarak 3-boyutlu yeraltının ayrıklaştırılması.

Prizma içinde alınan herhangi bir model için modelin izdüşümlerinin prizmanın 6 yüzeyinde yaratacağı etki, bu modelin toplam etkisini verecektir (Katsayı matrisindeki 6 elemanın her biri bir yüzeydeki etkidir). Bu modelin yaratacağı etki, prizma üzerinde herhangi bir noktada elektrotların yerleştirilerek değerlerin elde edilmesi ile mümkündür. Poisson denklemi her bir (i,j,k) düğüm noktası için bir hacim integrali ile ifade edilebilir. Böylece denklem (4.2) bağıntısıyla tanımlanır.

$$\begin{aligned}
 - \iiint_{\Delta V_{i,j,k}} \nabla[\sigma(x,y,z)\nabla\phi(x,y,z)]dxdydz &= \iiint_{\Delta V_{i,j,k}} \frac{I}{\Delta V_{i,j,k}} \delta(x_i - x_s)\delta(y_j - y_s)\delta(z_k - z_s)dxdydz = \\
 &= I(x_s, y_s, z_s)
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

Green teoremi yardımıyla hacimsel integral alansal ifade biçimine dönüştürülürse,

$$\iiint_{\Delta V_{i,j,k}} \nabla(\sigma\nabla\phi)dv = \iint_{S_{i,j,k}} \sigma \frac{\partial\phi}{\partial\eta} ds \tag{4.3}$$

$$\iint \sigma(x,y,z) \frac{\partial\phi(x,y,z)}{\partial\eta} ds_{i,j,k} = -I(x_s, y_s, z_s) \tag{4.4}$$

bağıntıları elde edilir (Dey ve Morrison, 1979b). Green teoremi ve merkezi türetme operatörü yardımıyla, tek bir düğüm noktası için, denklemin çözümü aşağıdaki duruma dönüşür.

$$\begin{aligned}
 &C_{Top}^{ijk} \phi_{i,j,k-1} + C_{Bottom}^{ijk} \phi_{i,j,k+1} + C_{Left}^{ijk} \phi_{i-1,j,k} + C_{Right}^{ijk} \phi_{i+1,j,k} + C_{Front}^{ijk} \phi_{i,j-1,k} + C_{Back}^{ijk} \phi_{i,j+1,k} + C_P^{ijk} \phi_{i,j,k} = \\
 &= I\delta(x_i - x_s)\delta(y_j - y_s)\delta(z_k - z_s)
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

Bu denklemde, bağlanım (coupling) katsayıları (C_B , C_L , C_T , C_R , C_P , C_F , C_B) Dey ve Morrison (1979b)'de açıkça tanımlanmıştır. Denklem (4.5) de görüldüğü gibi, gerilimin (i,j,k) noktasındaki değerinin çözümü, kendisine komşu (i,j,k-1), (i,j,k+1), (i-1,j,k), (i+1,j,k), (i,j-1,k), (i,j+1,k) düğüm noktalarındaki değerlerine bağlıdır. Buradaki bağlanım katsayıları, modelin geometrisine ve ortamın iletkenliğine bağlıdır. Farklı modellerin bağlanım katsayıları farklı olur. Hacimde

ayrıklaştırma sonucu bütün (i,j,k) düğümleri için elde edilen C_B , C_L , C_T , C_R , C_P , C_F ve C_B katsayıları “Kapasitans matrisi (C)” nin oluşturulmasında kullanılır. Katsayı dizeyi, X-Y ve X-Z düzlemlerinde, LMN olarak tanımlanan bir ağ üzerinde toplam düğüm sayısı olmak üzere, $LMN \times LMN$ boyutunda bir kare matristir ($i=1,2,...L$; $j=1,2,...M$ ve $k=1,2,...N$). Daha önce bulunan, modelin iletkenliğine ve geometrisine bağlı C bağlanım katsayıları, akımın konumunu belirten S değerleri ile aranılan ϕ potansiyel değerleri matris biçiminde yazılırsa (4.6) denklemi elde edilir.

$$C \phi = S \quad (4.6)$$

Burada C kapasitans matrisini, ϕ bilinmeyen gerilim vektörü ve S 'de kaynak terimini içeren vektörü göstermektedir. S sütun vektöründe kaynağın olmadığı noktalar için sıfır değeri atanarak, bu noktalarda Laplace denklemi sağlanmış olur. Ayrıca her düğüm noktası için yazılan denklemlerde düğüm noktasının komşu olmadığı noktalar için sıfır değeri atanarak, sınırlarda Dirichlet sınır koşulu uygulanır. Elektrik özdirenç modelleme çalışmalarında genellikle iki tip sınır koşulu kullanılır. Bunlar Neumann ve Dirichlet sınır koşullarıdır. Modelde iletken yer ile yalıtkan atmosfer arasındaki sınırı temsil eden yüzey boyunca Neumann sınır koşulu (4.7) ve modelin diğer kenarlarında ise Dirichlet sınır koşulu (4.8) kullanılır.

$$\left. \frac{\partial v}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \quad (4.7)$$

$$v(x, y, z) = 0 \quad (4.8)$$

Böylece, çözülen $\phi(x,y,z)$ değerleri yardımıyla her bir dizilim için görünür özdirenç değerleri hesaplanarak, heterojen ortamlar üç-boyut içerisinde modellenebilir. Sınır koşulu olarak Dey ve Morrison (1979b)'de belirtilen karmaşık sınır (mixed boundary) koşulları da tercih edilebilmektedir. (4.6) denkleminin çözümünde ise doğrudan (Cholesky ayrışımı, vb.) veya yinelemeli yaklaşımlar (en-dik iniş, eşlenik türev, vb.) kullanılabilir.

4.1.2 Üç-boyutlu Sonlu-Elementler Düz-Çözümü

Sonlu-elementler yöntemi (SEY) birçok mühendislik probleminin sayısal çözümünde güçlü bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Uygulama alanları, otomobil, uçak, binaların deformasyon ve stres analizinden, ısı akımı, sıvı akışı, manyetizma ve elektrik akımı gibi alan analizlerine kadar geniş bir perspektif sunmaktadır (Chandrupatla ve Belegundu, 1997). Bu yöntemde çözüm için ilgilenilen karmaşık bölge, basit geometrik şekillere sahip sonlu elementlere bölünmektedir. Sonlu elementlerin materyal özellikleri ve köşelerindeki bilinmeyen değerler bir araya getirilerek oluşturulan denklem sistemlerinin çözümünden de, ilgilenilen bölgenin yaklaşık bir durumu elde edilebilmektedir.

Elektrik iletken düz-çözüm modellemesinde kullanılan sonlu-elementler yöntemi, sınır-değer problemini bir integral fonksiyonunun minimizasyonuna çevirmektedir (Coggon, 1971; Fox ve diğer., 1980; Holcombe ve Jiracek, 1984; Pridmore ve diğer., 1981; Queralt ve diğer., 1991). Yöntemin diğer sayısal yöntemlere göre ana avantajı, karmaşık geometrileri, genel sınır koşullarını ve uzaysal değişken veya doğrusal olmayan materyal özelliklerini basit olarak kullanabilmesidir (Pridmore ve diğer., 1981; Sasaki, 1994).

Elektrik iletken verilerinin 2 ve 3-boyutlu modellemesinde kullanılan Poisson denklemi Pridmore ve diğer. (1981) tarafından izleyen diferansiyel denklem ile verilmektedir.

$$-\nabla \cdot \sigma \nabla \phi = \nabla \cdot \mathbf{J}_s \quad (4.13)$$

Burada σ yerin iletkenliği, ϕ elektrik potansiyeli ve $\mathbf{J}_s$ elektrik kaynağı göstermektedir. Merkezdeki bir nokta kaynağı için $\nabla \cdot \mathbf{J}_s$, I akım, $\delta(x)$ birim fonksiyon olmak üzere $I \cdot \delta(x) \cdot \delta(y) \cdot \delta(z)$ çarpımına dönüşür. Şekil 4.5’de basit bir akış şeması verilen sonlu-elementler sayısal yönteminin (SEY) ilk adımında, diferansiyel bir denklem olan Poisson denkleminin integral denklemine dönüştürülmesi

gerekmektedir. Bunun için Galerkin yaklaşımı (Zienkiewicz, 1971) veya varyasyonel yöntem (Sasaki, 1994) kullanılmaktadır. Sasaki (1994), varyasyonel yöntemi kullanarak (4.13)'den elde ettiği integral denklemini aşağıdaki gibi tanımlamıştır.

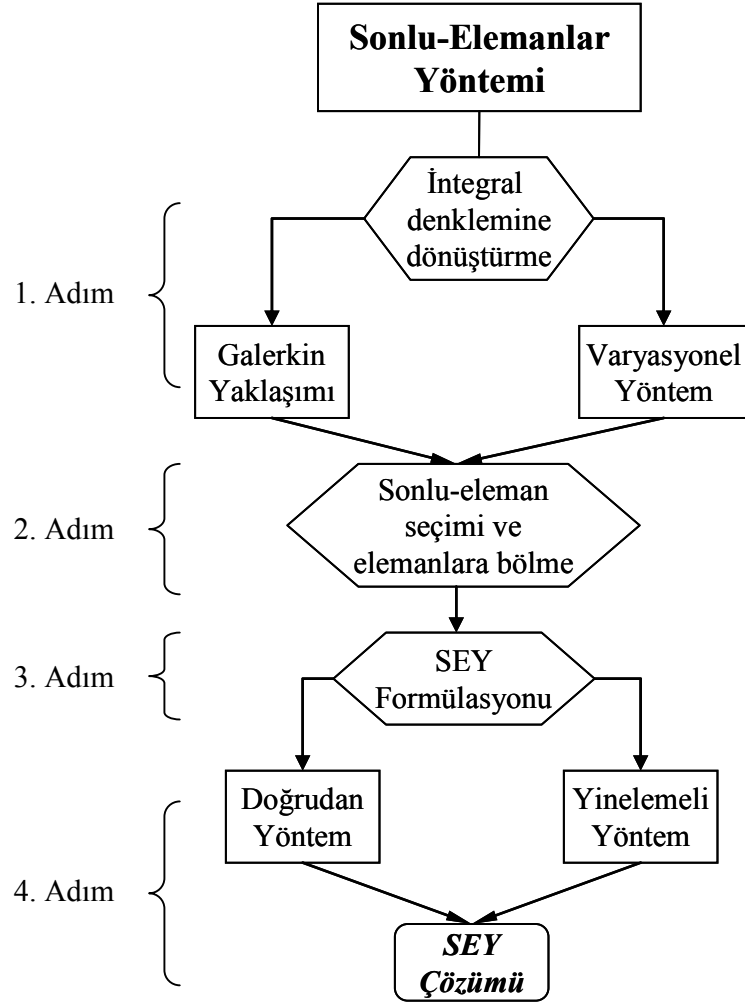
$$\chi = \int \left[\sigma (\nabla \phi)^2 - 2\phi \nabla \cdot \mathbf{J}_s \right] dv \quad (4.14)$$

İkinci adımda, elde edilen integral denkleminin uygulanacağı bölgenin sonlu-elemanlara bölünmesi gerekmektedir. Burada sonlu-eleman seçimi yapılmalıdır. Elektrik özdirenç yönteminin SEY ile üç-boyutlu modellemesinde kullanılan elemanlar, üç-boyutlu 4-düğümlü üçgensel (tetrahedral) veya üç-boyutlu 8-düğümlü dörtgensel (hexahedral) elemanlardır (Şekil 4.6a ve b). Ayrıca ortogonal elemanlarda kullanılabilmektedir (Rücker ve diğer., 2006).

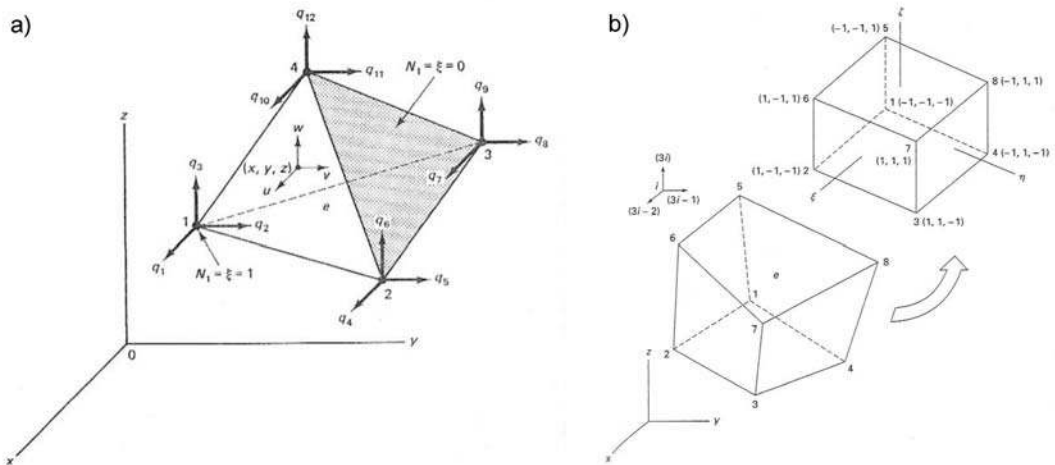
Böylelikle ilgilenilen bölge birbirine düğüm noktalarından bağlı sonlu sayıda elemanlara ayrılarak sonlu-elemanlar ağı (finite element mesh) oluşturulur (Şekil 4.7). Bundan sonraki adımda, elemanların düğüm noktalarındaki bilinmeyen gerilim değerleri, elemana ait koordinat değerlerini içeren şekil fonksiyonları (shape functions) kullanılarak tanımlanır. Buradan hareketle tanımlanan bilinmeyen gerilim değerleri, SEY için oluşturulan integral denkleminde (4.14) yerine konularak her eleman için düzey denklem takımları elde edilir.

Üçüncü adımda, eleman düzey denklemleri birleştirilerek sonlu elemanlar ağı için genel katsayı dizeyi (global stiffness matrix - K) ve SEY formülasyonu (4.15) elde edilir. Genel düzey denklemi oluşturulurken Neumann ve Dirichlet sınır koşulları uygulanır.

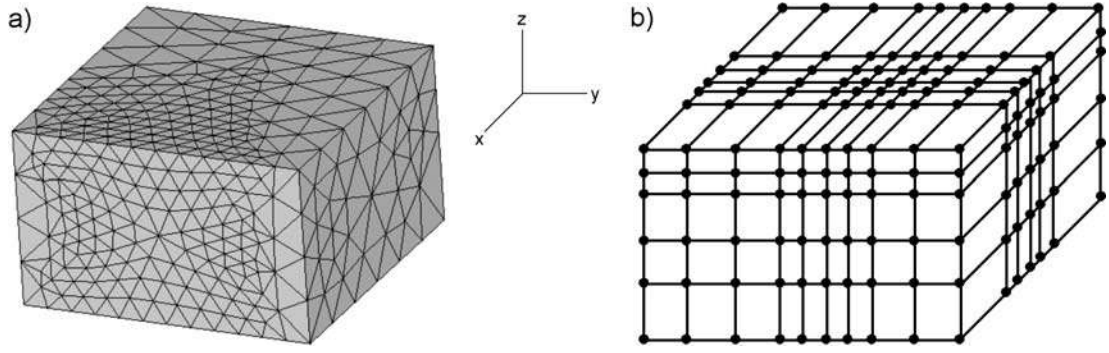
$$K \phi = S \quad (4.15)$$



Şekil 4.5 Sonlu-elemanlar yönteminin akış şeması.



Şekil 4.6 Sonlu-elemanlar yönteminde kullanılan elemanlar ve koordinat sistemleri. a) Tetrahedral ve b) hexahedral elemanlar (Chandrupatla ve Belegundu, 1997).



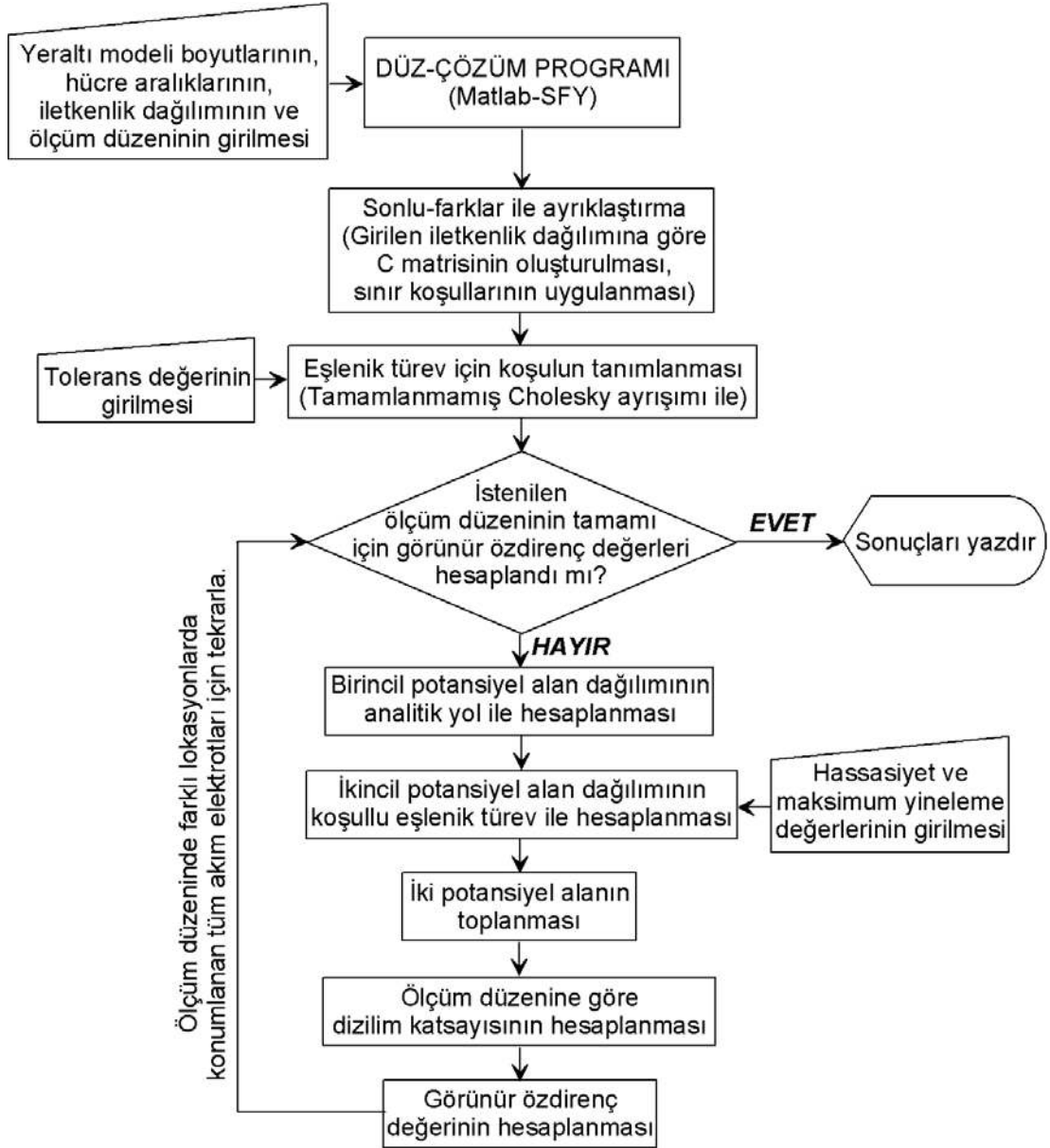
Şekil 4.7 a) Tetrahedral ve b) hexahedral elemanlardan oluşan 3-boyutlu sonlu elemanlar ağı.

Burada K , N düğüm sayısı olmak üzere $N \times N$ boyutlu, pozitif, simetrik, köşegensel dominant band matristir ve sonlu-elemanlar ağındaki tüm elemanların geometrisine ve iletkenliğine bağlıdır. ϕ , bütün düğüm noktalarındaki bilinmeyen gerilim değerlerini içeren, S ise bütün düğüm noktalarındaki nokta akım kaynağının değerlerini içeren $N \times 1$ boyutlu sütun vektörlerdir.

Son adımda (4.15)'te verilen denklem sisteminin çözümü yapılmaktadır. Burada doğrudan (direct) veya yinelemeli (iterative) yöntemlerden biri kullanılabilir. Doğrudan yöntemde bir takım aritmetik işlemlerle sonuca gidilirken, yinelemeli yöntemde, bir başlangıç tahmini yapılarak doğru sonuca ulaşılan dek çözüm geliştirilmektedir (Sasaki, 1994). Böylece genel düzey denklemi çözülmüş ve ϕ vektörünün elemanları olan düğüm noktalarına ait bilinmeyen gerilim değerleri hesaplanmış olmaktadır. Hesaplanan bu gerilim değerleri kullanılarak istenilen elektrot dizilimi için görünür öz direnç verisi yani model yanıtı bulunmaktadır. Böylelikle SEY kullanılarak elektrik öz direnç düz-çözüm modellenmesi başarılmaktadır.

4.1.3 Üç-boyutlu Elektrik Özdirenç Düz-Çözüm Programı

Elektrik özdirenç yönteminde sonlu-farklar yöntemini (SFY) kullanarak düz-çözüm işlemini gerçekleştiren Matlab (Mathworks) tabanlı bir program (Matlab-SFY) oluşturulmuştur. Programın temelini oluşturan sonlu-farklar algoritması Dey ve Morrison (1979b) tarafından verilmiştir. Sınır koşulları olarak Dirichlet ve karmaşık sınır koşulları tanımlanmıştır. Belirlenen modelleme alanı ve model özdirenç dağılımına göre bağlanım (coupling) katsayılarını (C_B , C_L , C_T , C_R , C_P , C_F , C_B) hesaplayan program, daha sonra oluşturulan $C \phi = S$ denklem sistemini ön koşullu eşlenik türev (preconditioned conjugate gradient) yinelemeli yaklaşımı ile çözmektedir (Şekil 4.8). Çözümün hızlandırılması için bu işlemde koşul olarak tamamlanmamış Cholesky ayrışımı (incomplete Cholesky decomposition) verilmiştir. Ayrıca çözümden tekilliğin kaldırılması (singularity removal) ise ikincil potansiyel alanın hesap edilmesiyle başarılmıştır (Lowry ve diğer., 1989). Önceden belirlenen sabit bir iletkenlik değerine sahip homojen ortam için analitik yol ile hesaplanan birincil potansiyel alan değerlerine, yinelemeli yaklaşımdan elde edilen ikincil alan değerleri eklenmiştir. Böylece elektrot yakınında sonlu-farklar çözümünün doğruluğu arttırılmıştır. Sonuç olarak, denklem sistemi çözümünden elde edilen potansiyel değerleri istenilen elektrot dizilimine göre görünür özdirenç değerinin hesaplanmasında kullanılmıştır. Ölçüm düzeni içerisinde farklı lokasyonlarda konumlandırılan tüm akım elektrotları için hesaplamalar yinelenmiştir. Akım elektrotlarının yerlerinin değişmediği ve potansiyel elektrotlarının yer değiştirdiği ölçüm düzeninde ise (dipol-dipol, pol-dipol gibi dizilimler) potansiyel alanların tekrar hesaplanmasına gerek duyulmayacağı burada belirtilmelidir. Geliştirilen program karmaşık yeraltı özdirenç dağılımlarının üç-boyutlu modellenmesini mümkün kılmıştır.



Şekil 4.8 Geliştirilen Matlab tabanlı düz-çözüm programına (Matlab-SFY) ait akış şeması.

4.1.3.1 Koşullu Eşlenik Türev Yöntemi

Kapasitans matrisinin (C) oluşturulması ile kaynak vektörü (S) kullanılarak $C\phi = S$ sisteminin çözümü eşlenik türev (conjugate gradient) yöntemi ile gerçekleştirilebilmektedir. Hestenes ve Stiefel (1952) tarafından geliştirilen yöntem kapasitans dizeyinin tersinin alınmasını gerektirmediğinden, en-dik iniş (steepest descent) ve doğrudan yöntemlere göre genelde daha hızlı çalışmaktadır. $Ax = b$ şeklindeki sistem için eşlenik türev algoritması Algoritma 4.1’de verilmektedir.

Belirlenecek bir maksimum yineleme sayısına ulaşılması veya bir hassasiyet (accuracy) değerinin sağlanması yinelemenin durdurulmasını sağlayacaktır. Çözümde kullanılan kapasitans matrisi kötü-kışullu ve seyrek matris olduğundan eşlenik türev ile çözüm, yavaş olan yakınsama oranından dolayı uygun olmayabilmektedir (Wu ve diğer., 2003). Bu durumda A matrisi için, $A \approx RR^T$ olarak tamamlanmamış Cholesky ayrıklaştırması (incomplete Cholesky decomposition-factorization) yapılabilmektedir. Bunun sonucunda $Ax = b$ denklem sistemi (4.16)'daki gibi tanımlanmakta ve eşlenik türev yaklaşımının hızlandırılması mümkün olmaktadır.

Algoritma 4.1 Eşlenik türev.

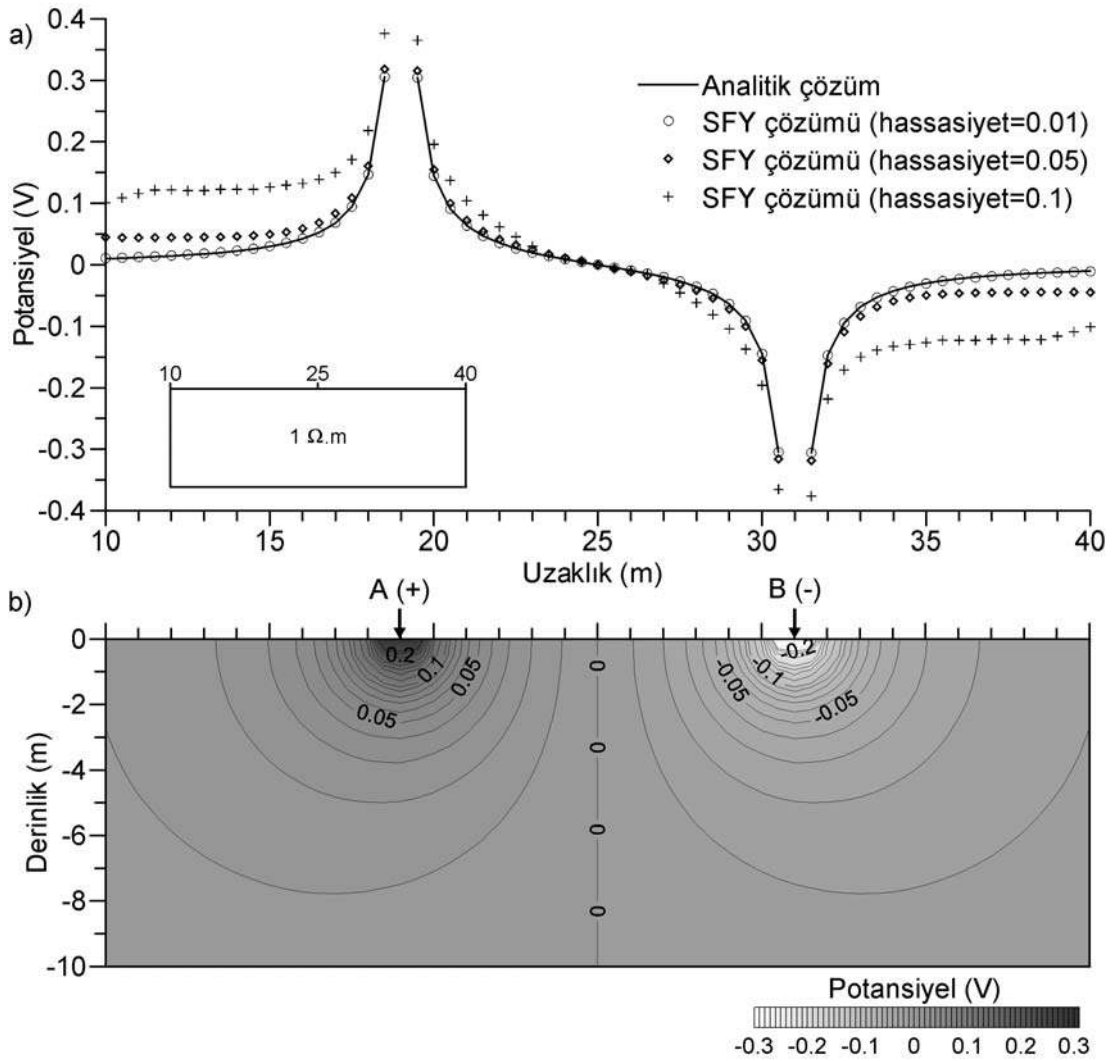
$$\begin{aligned}
 p_0 &= r_0 = b - Ax_0 & ; & \quad k = 0, 1, 2, \dots \\
 \alpha_{k+1} &= \frac{(r_k, r_k)}{(p_k, Ap_k)} & ; & \quad (r_k, r_k) = r_k^T r_k \\
 x_{k+1} &= x_k + \alpha_{k+1} p_k \\
 r_{k+1} &= r_k - \alpha_{k+1} Ap_k \\
 \beta_{k+1} &= \frac{(r_{k+1}, r_{k+1})}{(r_k, r_k)} \\
 p_{k+1} &= r_{k+1} - \beta_{k+1} p_k
 \end{aligned}$$

$$\left[R^{-1} A (R^T)^{-1} \right] R^T x = R^{-1} b \quad (4.16)$$

4.1.3.2 Matlab Düz-Çözüm Programının Sınanması

Matlab-SFY programının güvenilirliği öncelikle analitik olarak öz direnç değişimi hesaplanabilen basit modeller ile test edilmiştir. Buna göre, homojen 1 $\Omega.m$ 'lik bir ortam üzerinde A pozitif ve B negatif akım elektrotlarının oluşturacağı potansiyel dağılımı, sonlu-farklar düz-çözüm programı ve analitik yol ile hesaplanmıştır (Şekil 4.9). Elektrotlar yüzeyde 19 ve 25. metrelere yerleştirilmiştir. Modelleme alanında 0-50 m arasında x, y ve z yönlerinde 0,5 m hücre kalınlığı kullanılırken, sınırlara doğru bu değer 5, 50 ve 500 m olarak alınmıştır. Elde edilen sonuçlar çizdirildiğinde analitik ve sonlu-farklar sonuçları arasında değişen hassasiyet değerlerine göre 0,01 değerinde oldukça iyi bir uyumun olduğu gözlenmiştir. Akım elektrotlarından

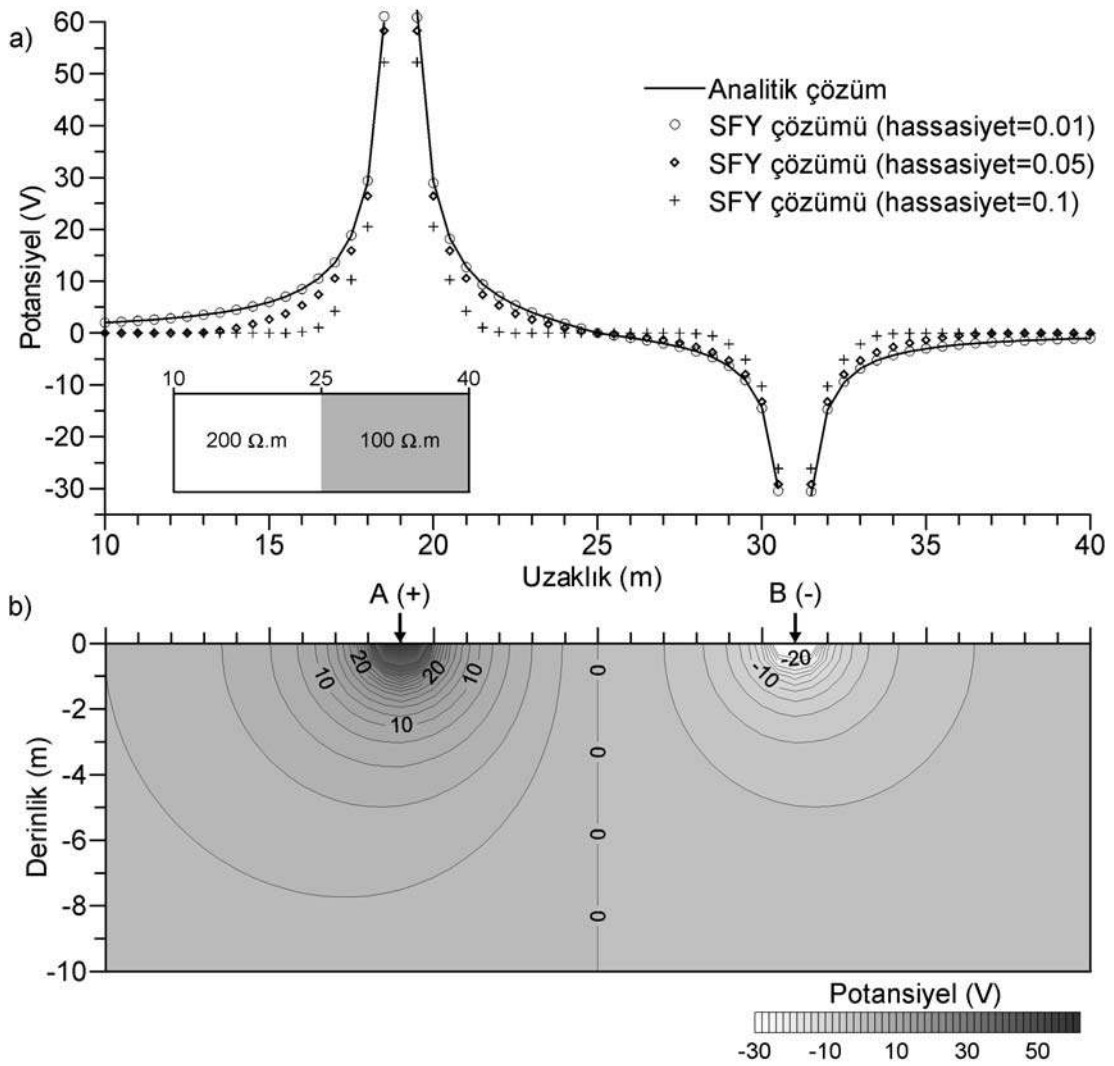
uzaklaştıkça potansiyel değerleri sıfıra yaklaşmaktadır. Diğer hassasiyet değerlerinde ise akım elektrotlarından uzaklaştıkça analitik çözümden olan saçılmaların arttığı belirlenmiştir (Şekil 4.9a). Sayısal olarak 0,01 hassasiyet değeri ile hesaplanan potansiyel dağılımının düşey kesitteki çiziminde ise akım elektrotlarının orta noktasında potansiyel değerinin sıfır olduğu, akım elektrotları üstünde ise bu değer sonsuza ulaştığı görülmüştür (Şekil 4.9b).



Şekil 4.9 Homojen 1 Ω.m'lik ortamda A (+) ve B (-) akım elektrotlarından kaynaklanan potansiyel dağılımı. a) Yüzeydeki potansiyel dağılımının analitik ve Matlab-SFY çözümü ile b) Matlab-SFY programı sonucunda elde edilen düşeydeki potansiyel dağılımı.

Analitik çözümü yapılabilen bir fay modeli içinde programın sonuçları irdelenmiştir. Burada modeli tam ortasından ikiye ayıran bir fay modeli

kullanılmıştır. 0-25 m arasında 200 $\Omega.m$ 'lik ortam ve 25-50 m arasında ise 100 $\Omega.m$ 'lik bir ortam bulunmaktadır. Akım elektrotları aynı yerlerinde tutularak yapılan düz-çözüm ile Şekil 4.10'daki sonuca ulaşılmıştır. Homojen ortam modeline benzer şekilde hassasiyet değerinin 0,01 seçilmesiyle analitik çözüme en yakın sonuç elde edilmiştir. Ayrıca farklı öz direnç değerlerine sahip ortamlar içerisinde potansiyel dağılımının da asimetrik olduğu gözlenmiştir. Potansiyel değerleri 200 $\Omega.m$ 'lik ortam içerisinde yüksek ve 100 $\Omega.m$ 'lik ortam içerisinde ise daha düşük hesaplanmıştır.

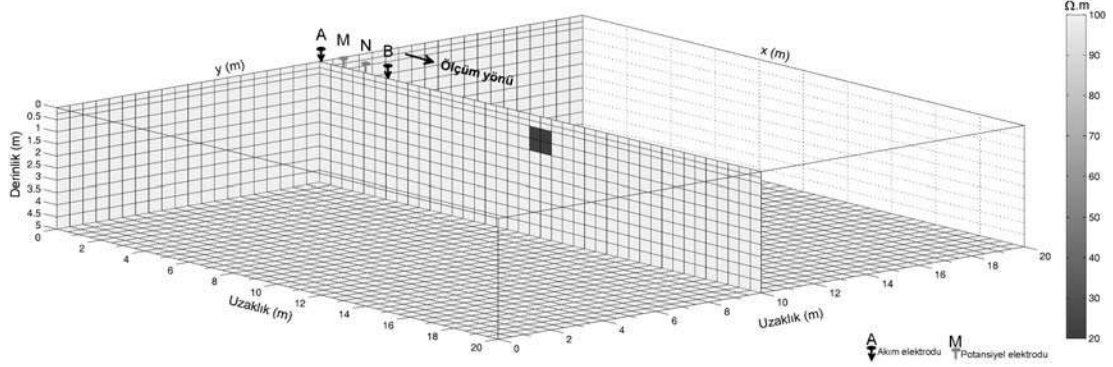


Şekil 4.10 Fay modelinde A (+) ve B (-) akım elektrotlarından kaynaklanan potansiyel dağılımı. a) Yüzeydeki potansiyel dağılımının analitik ve Matlab-SFY çözümü ile b) Matlab-SFY programı sonucunda elde edilen düşeydeki potansiyel dağılımı.

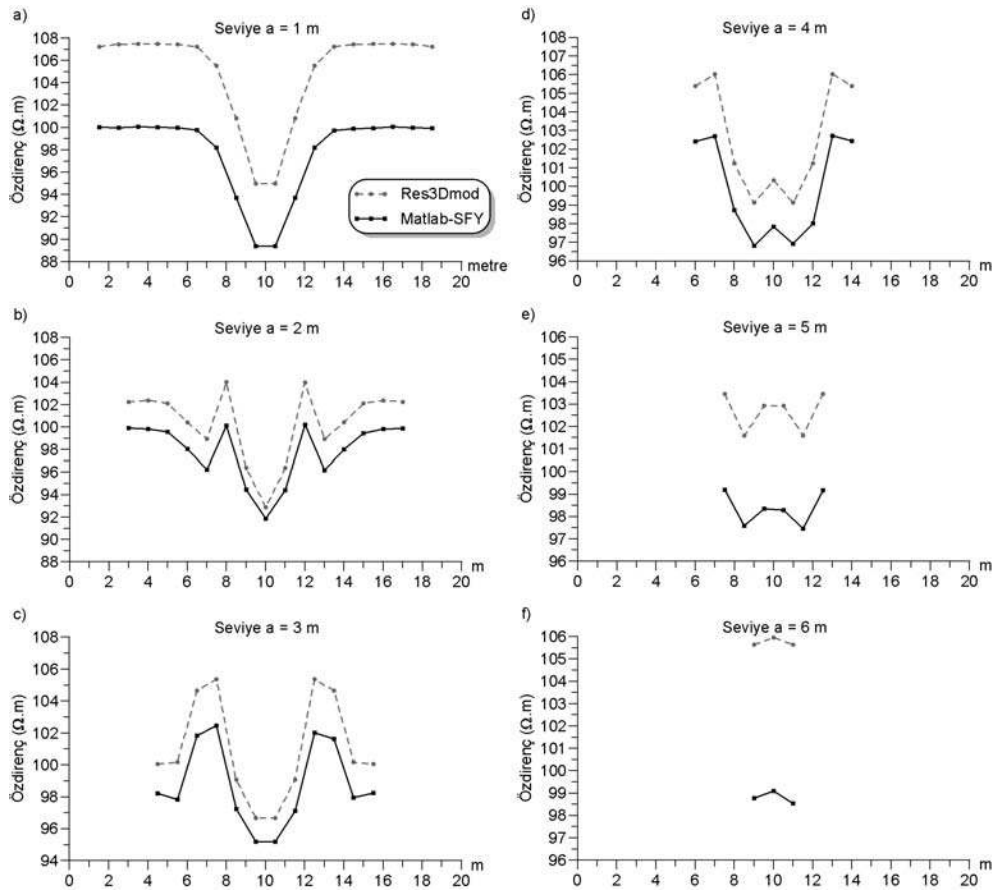
Programın çalışabilirliği, bulunduğu ortama ($100 \Omega.m$) göre iletken ($20 \Omega.m$) olan $1 \times 1 \times 1$ m boyutlarındaki bir küp modeli içinde sınanmıştır. Modelleme alanı Matlab programında, x ve y-eksenlerinde; 0'dan 20 metreye değin $0,5$ m hücre aralığı ve z-ekseninde ise ilk iki seviye $0-0,25$ m ve $0,25-0,5$ m hücre kalınlığı ve 5 metreye değin $0,5$ m hücre kalınlığı kullanılarak oluşturulmuştur. Küp, modelleme alanının ortasına denk gelecek şekilde $0,5$ m derinliğe yerleştirilmiştir (Şekil 4.11). Görünür öz direnç değerleri ise modelin ortasından geçen bir profil ($y=10$ m, ölçüm yönü olarak gösterilen) üzerinde, 1 metre elektrot aralıklı Wenner dizilimi ve altı seviye ($a=1, \dots, 6$ m) için hesaplanmıştır. Böylece düz-çözüm işlemi 36864 model parametresi ile 63 adet veri değeri için gerçekleştirilmiş ve koşullu eşlenik türev yaklaşımında hassasiyet değeri $0,0001$ seçilmiştir. Elde edilen sonuçlarda karşılaştırma için küp modelinin analitik çözümü kullanılmayıp, bunun yerine akademik olarak ücretsiz dağıtımı yapılan Res3Dmod (Geotomo Software) programının ürettiği düz-çözüm sonuçları kullanılmıştır. Bu program sonlu-farklar algoritmasını kullanabilirken, sistem çözümünü doğrudan yöntem ile yapmaktadır (Loke ve Barker, 1996b).

Ölçüm seviyeleri için elde edilen görünür öz direnç değerleri grafik olarak Şekil 4.12'de verilmiştir. Bu grafiklerden, tüm seviyeler için Res3Dmod programının Matlab-SFY programına göre daha yüksek görünür öz direnç değerleri ürettiği görülmüştür. Elde edilen görünür öz direnç anomalileri şekilsel olarak birbirine benzemekle birlikte, öz direnç değerleri 2 ile $7 \Omega.m$ arasında farklılık göstermektedir. Modellemede kullanılan ortam öz direnç değerinin $100 \Omega.m$ olduğu düşünüldüğünde, Matlab-SFY programının bu değere daha yakın sonuçlar vermesi programın daha güvenilir bir yaklaşım ile çalıştığını göstermiştir. Seviyeler için elde edilen değerler, Edwards (1977) tarafından verilen yapma-derinlik değerleri kullanılarak çizdirildiğinde ise anomalilerin farklı olduğu anlaşılmıştır (Şekil 4.13). Küp modelinin bu kesitler üzerinde gösterilmesiyle de program sonuçlarının model ile benzeşimi karşılaştırılabilmiştir. Buna göre Res3Dmod programının modele daha yakın bir görünür öz direnç dağılımı oluşturduğu gözlenmiştir. Buna karşın Matlab-SFY program sonucunda modelin düşey sınırları tam olarak ayrılamamaktadır. Bilinmektedir ki, görünür öz direnç değerlerine göre sonuçların yorumlanması

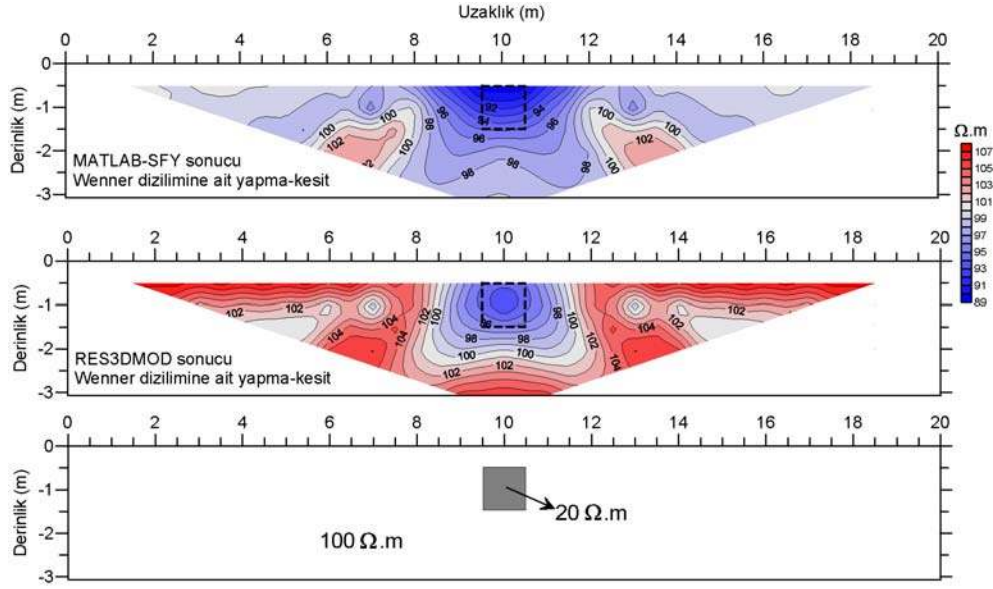
genelde hatalı sonuçlar üreteceğinden, yorumun ters-çözüm işleminden geçirildikten sonra ulaşılacak doğru yeraltı modeli ile daha güvenilir biçimde yapılacağı açıktır.



Şekil 4.11 Matlab-SFY programında küp modeli için modelleme alanı ve $y=10$ profilinin görünümü.

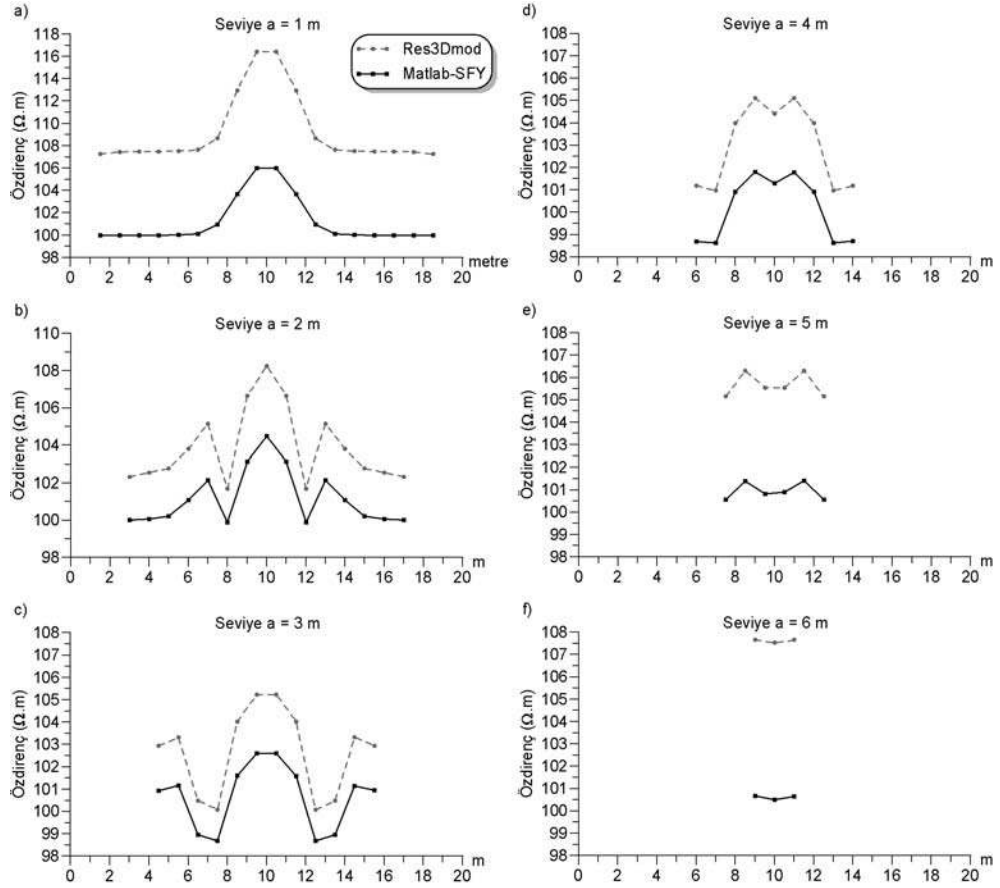


Şekil 4.12 İletken küp modeli için Wenner diziliminden elde edilen görünür özdirenç seviye eğrileri.

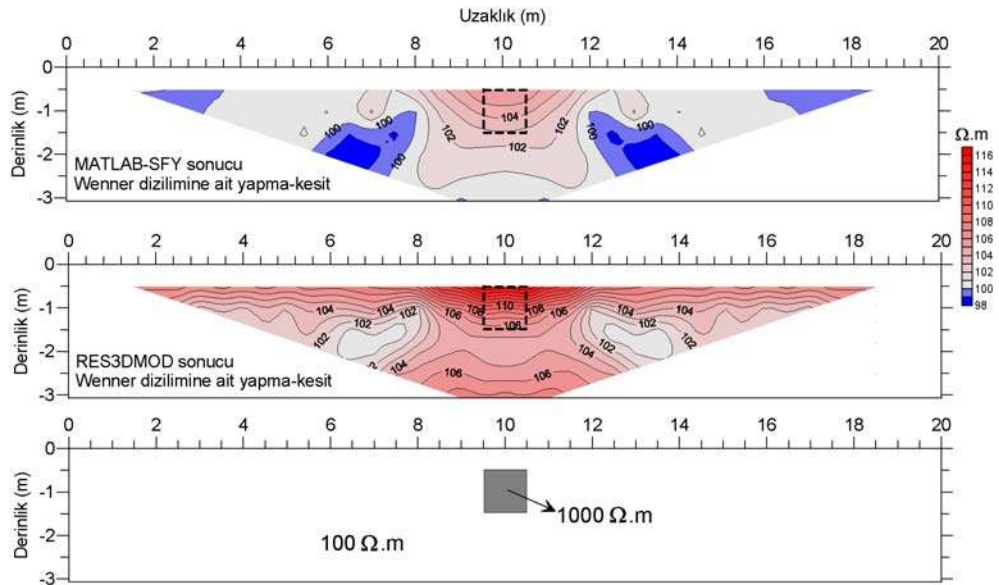


Şekil 4.13 İletken küp modeli için Wenner diziliminden elde edilen görünür özdirenç yapma-kesitleri. Görünür özdirenç yapma-kesitleri üzerinde küp modelinin yeri kesikli çizgi ile gösterilmiştir.

Küp modelinin özdirenci $1000 \Omega.m$ olarak değiştirilerek ve modelleme alanı ile düz-çözüm parametreleri aynı tutularak oluşturulan dirençli küp modelinden elde edilen sonuçlar Şekil 4.14’de verilmiştir. Her iki program sonucu görünür özdirenç eğrileri, bir önceki modelin tersi sonuçları üretmiştir. Buna karşın Res3Dmod programının değerlerinin Matlab-SFY sonuçlarına göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Yakın eğri şekilleri sunan programların sonuçları yapma-kesit olarak çizdirildiğinde ise, küp yakınında benzer anomaliler verdikleri anlaşılmıştır (Şekil 4.15). Ancak Res3Dmod program sonucu özellikle 1 m derinliği civarında yatay bir özdirenç değişimi göstermektedir. Ayrıca küp modeli altında 2 m derinlikten başlayan bir özdirenç artışıda görülmektedir. $a=1$ ve $a=6$ m seviyelerine ait eğri çizimlerinde iki programın üretmiş olduğu özdirenç değerlerindeki farklılıklar, yapma-kesitlere bu şekilde yansımıştır. Dolayısıyla dirençli küp modeli için Matlab-SFY programı çözümünün daha uygun bir görünür özdirenç dağılımı gösterdiğine karar verilmiştir.

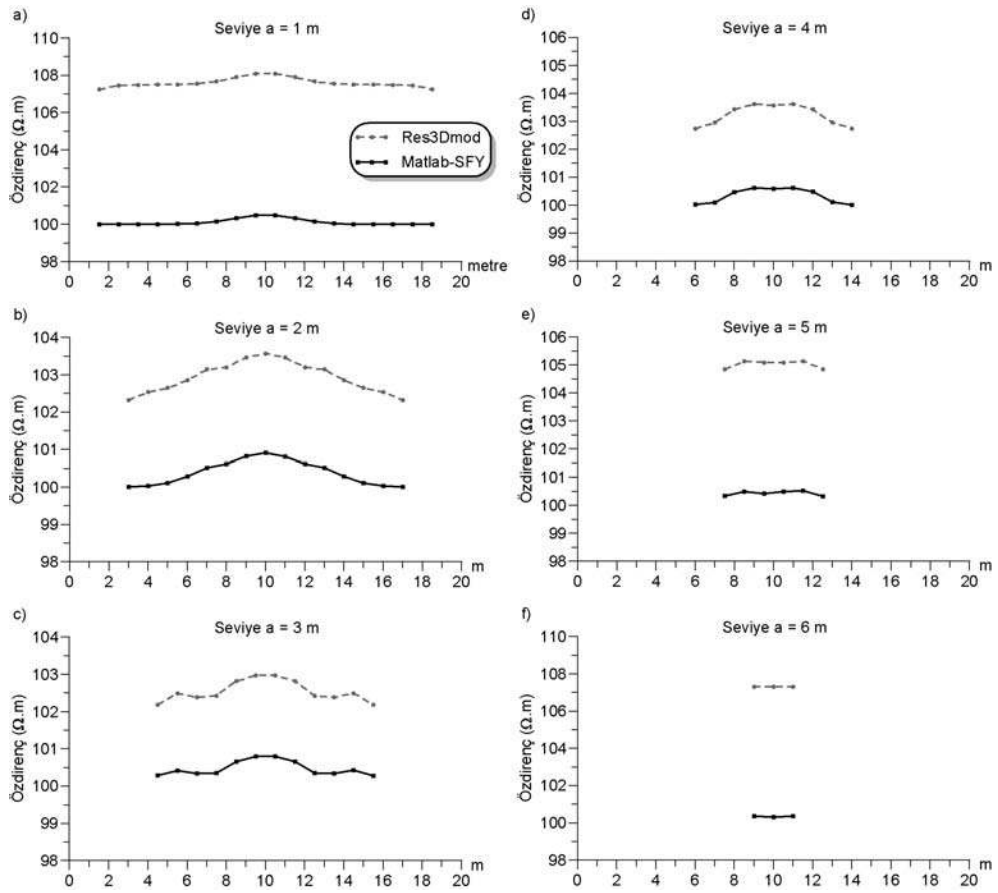


Şekil 4.14 Dirençli küp modeli için Wenner diziliminden elde edilen görünür özdirenç seviye eğrileri.

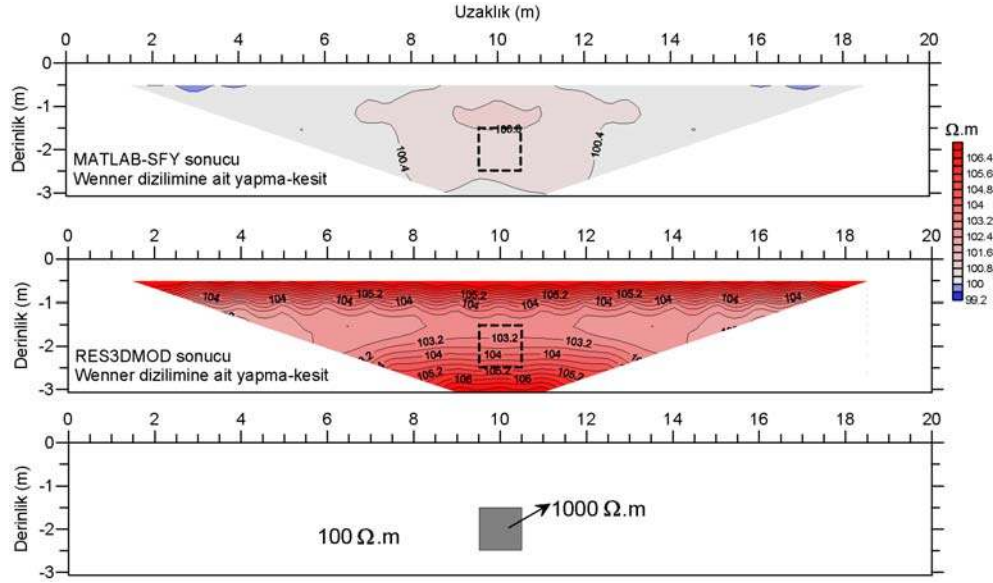


Şekil 4.15 Dirençli küp modeli için Wenner diziliminden elde edilen görünür özdirenç yapma-kesitleri. Görünür özdirenç yapma-kesitleri üzerinde küp modelinin yeri kesikli çizgi ile gösterilmiştir.

Aynı modelleme ortamında dirençli kübün 1,5 m derinliğe taşınması durumunda Matlab-SFY programının üreteceği sonuçlarda araştırılmıştır. Buna göre, 1,5 m derinlikte bulunan küp modelinin görünür öz direnç değerlerini daha az etkilediği ve dolayısıyla eğri genliklerinin bir önceki modele göre düşük olduğu Şekil 4.16'da verilen seviye eğrilerinden anlaşılmıştır. Bu eğrilerden, programların sonuçlarının birbirinden farklı olduğu ve Res3Dmod sonuçlarının yine daha yüksek değerler ürettiği gözlenmiştir. Bu modele ait yapma-kesitlerin sunulduğu Şekil 4.17'de ise elde edilen sonuçlar ve küp modelinin gerçek yeri birlikte verilmiştir. Oldukça düşük bir aralıkta değişen kontur çizgilerinin her iki program sonucunda da anlamlı bir anomali üretmediği gözlenmiştir. Ancak Matlab-SFY sonucunun görünür öz direnç değerleri anlamında daha tek düze sonuçlar ürettiği görülmektedir. Böylece farklı anomaliler veren her iki yapma-kesitten de küp modelinin yerinin belirlenmesinin mümkün olmadığı anlaşılmaktadır.

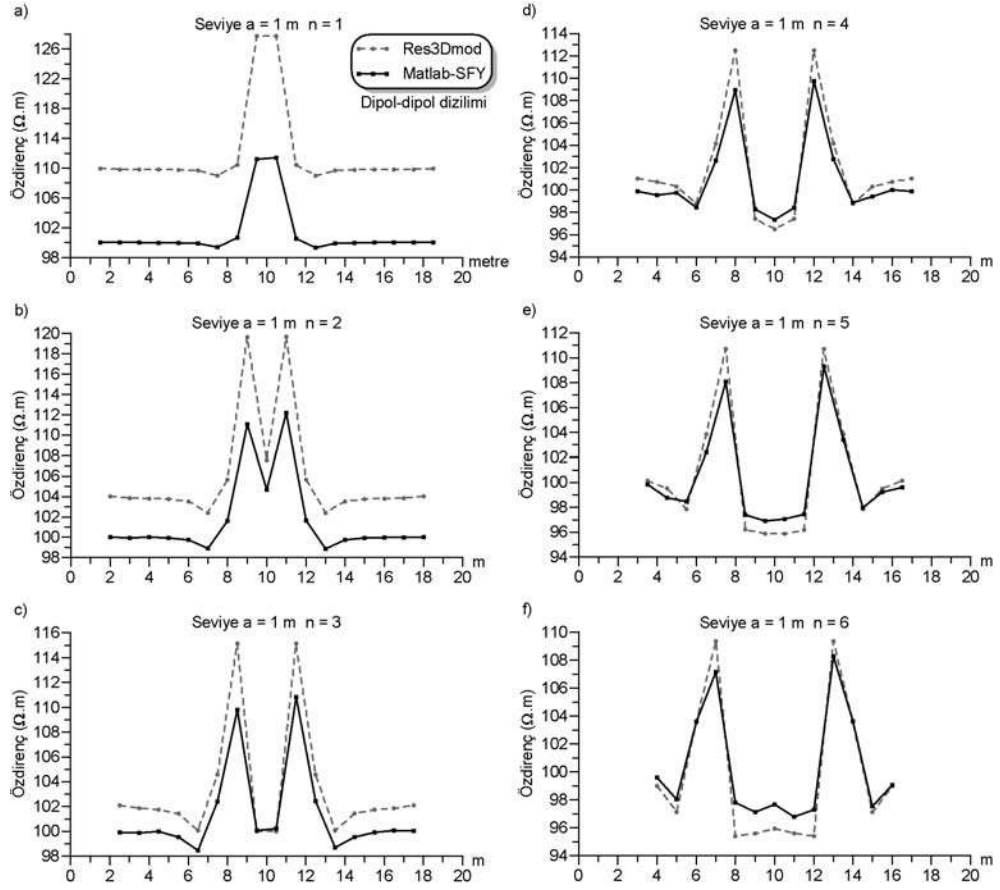


Şekil 4.16 Dirençli ve 1,5 m derinlikte bulunan küp modeli için Wenner diziliminden elde edilen görünür öz direnç seviye eğrileri.

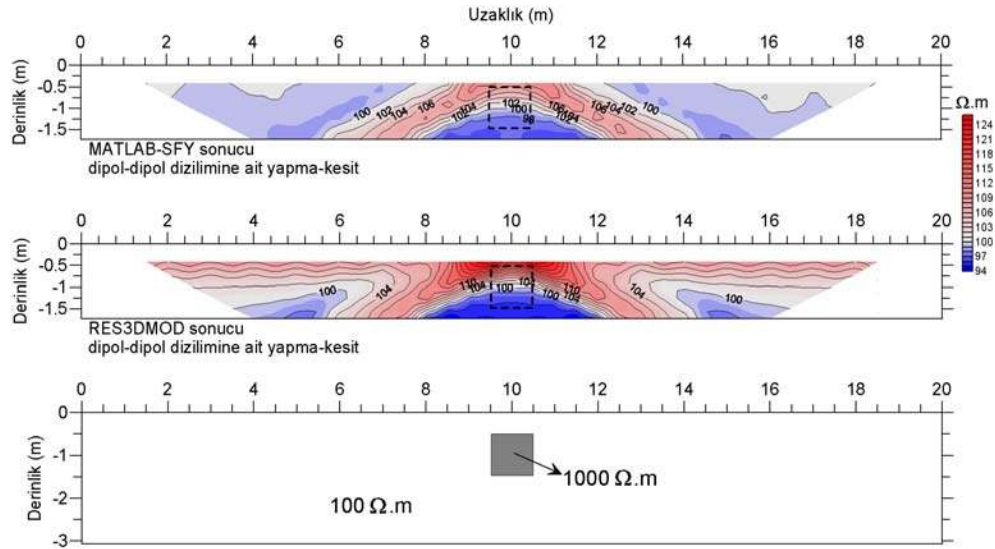


Şekil 4.17 Dirençli ve 1.5 m derinlikte bulunan küp modeli için Wenner diziliminden elde edilen görünür öz direnç yapma-kesitleri. Görünür öz direnç yapma-kesitleri üzerinde küp modelinin yeri kesikli çizgi ile gösterilmiştir.

Geliştirilen Matlab tabanlı programın diğer elektrot dizilimleri ile çalışabilirliğini göstermek için yüzeyden 0,5 metre derinlikte bulunan dirençli küp modeli, aynı modelleme parametreleri ile Wenner-Schlumberger, dipol-dipol, pol-pol ve pol-dipol dizilimleri içinde denenmiştir. 93 akım kaynağı ile altı seviye ($a=1$ m ve $n=1, \dots, 6$) için oluşturulan dipol-dipol dizilimine ait seviye eğrileri Şekil 4.18’de verilmiştir. Bu ölçüm sistemi ile dipol-dipol dizilimi, akım kollarının yer değiştirmesine gerek duymadan 6 farklı potansiyel ölçümünü gerektirdiğinden, düz-çözüm hesaplaması üzerinde yapılan bir değişiklik ile hesaplama sayısı azaltılabilmektedir. Böylece düz-çözümün 18 farklı akım kolu lokasyonu için tekrar edilmesiyle 93 adet görünür öz direnç değeri hesaplanabilmektedir. Dolayısıyla bu dizilimin düz-çözümü için gerekli olan bilgisayar süresi Wenner, Wenner-Schlumberger ve pol-pol dizilimlerine göre önemli oranda azalmıştır. Elde edilen sonuçlar dipol-dipol diziliminin Wenner dizilimine göre daha yüksek görünür öz direnç değerleri sunduğunu göstermiştir. Ayrıca, iki programın üretmiş olduğu değerler arasında ilk üç seviyede belirgin bir öz direnç farkı gözlenmiştir. Özellikle ilk seviyede Res3Dmod programının verdiği yüksek öz direnç değerleri, Şekil 4.19’daki yapma-kesitlerde 1 m derinliğe kadar açıkça görülmektedir. Bu yüksek öz dirençli ortam dışında, dipol-dipol dizilimi için belirgin hiperbolik anomaliler elde edilmiştir.



Şekil 4.18 Dirençli küp modeli için dipol-dipol diziliminden elde edilen görünür özdirenç seviye eğrileri.

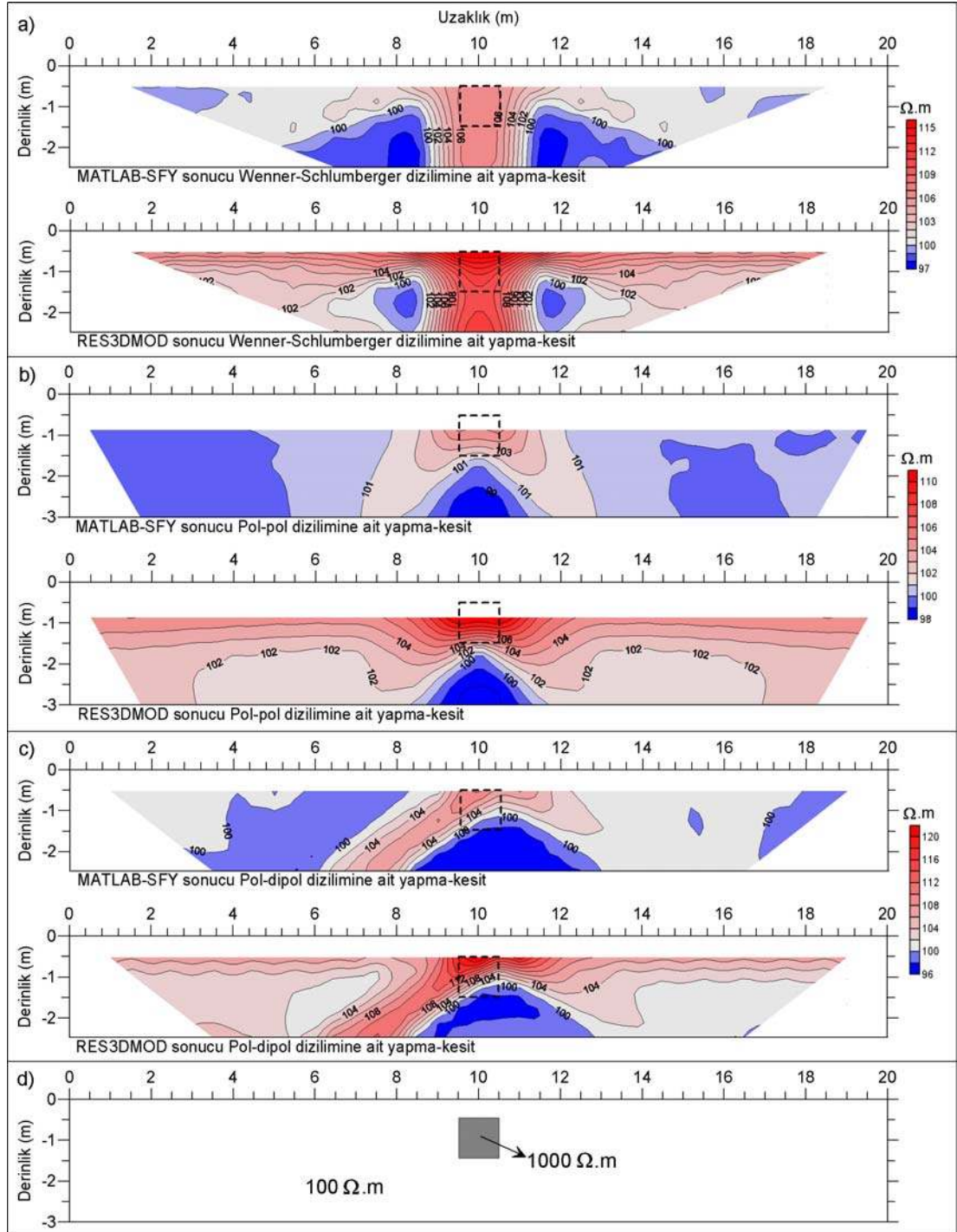


Şekil 4.19 Dirençli küp modeli için dipol-dipol diziliminden elde edilen görünür özdirenç yapma-kesitleri. Görünür özdirenç yapma-kesitleri üzerinde küp modelinin yeri kesikli çizgi ile gösterilmiştir.

Tez çalışması kapsamında sonuçları irdelenen diğer dizilimlerin (Wenner-Schlumberger, pol-pol ve pol-dipol) Matlab-SFY ve Res3Dmod düz-çözüm programlarından elde edilen yapma-kesitleri Şekil 4.20’de verilmiştir. Pol-dipol diziliminde de dipol-dipol diziliminde olduğu gibi daha az düz-çözüm hesabı ile istenilen görünür öz direnç değerlerine ulaşılmıştır. Verilen üç dizilimin sonuçları Res3Dmod programının Matlab-SFY programına göre daha yüksek görünür öz direnç değerleri ürettiğini ortaya koymuştur. Dolayısıyla Res3Dmod programı düz-çözüm sonucundan elde edilen ortam öz direnç değeri modelde verilen $100 \Omega.m$ ’lik değere göre yüksek kalmaktadır. Bunun dışında her iki programın sonuçları benzerlik gösterirken, Matlab-SFY düz-çözümünün kullanılan beş dizilim için doğru çalıştığı anlaşılmıştır. Oluşturulan Matlab tabanlı sonlu-farklar programının analitik çözüm ve Res3Dmod program çözümü ile gösterdiği bu uyum, düz-çözüm programının başarılı bir şekilde çalıştığını göstermiştir.

4.1.3.3 Matlab Düz-Çözüm Programında Paralel Hesaplama

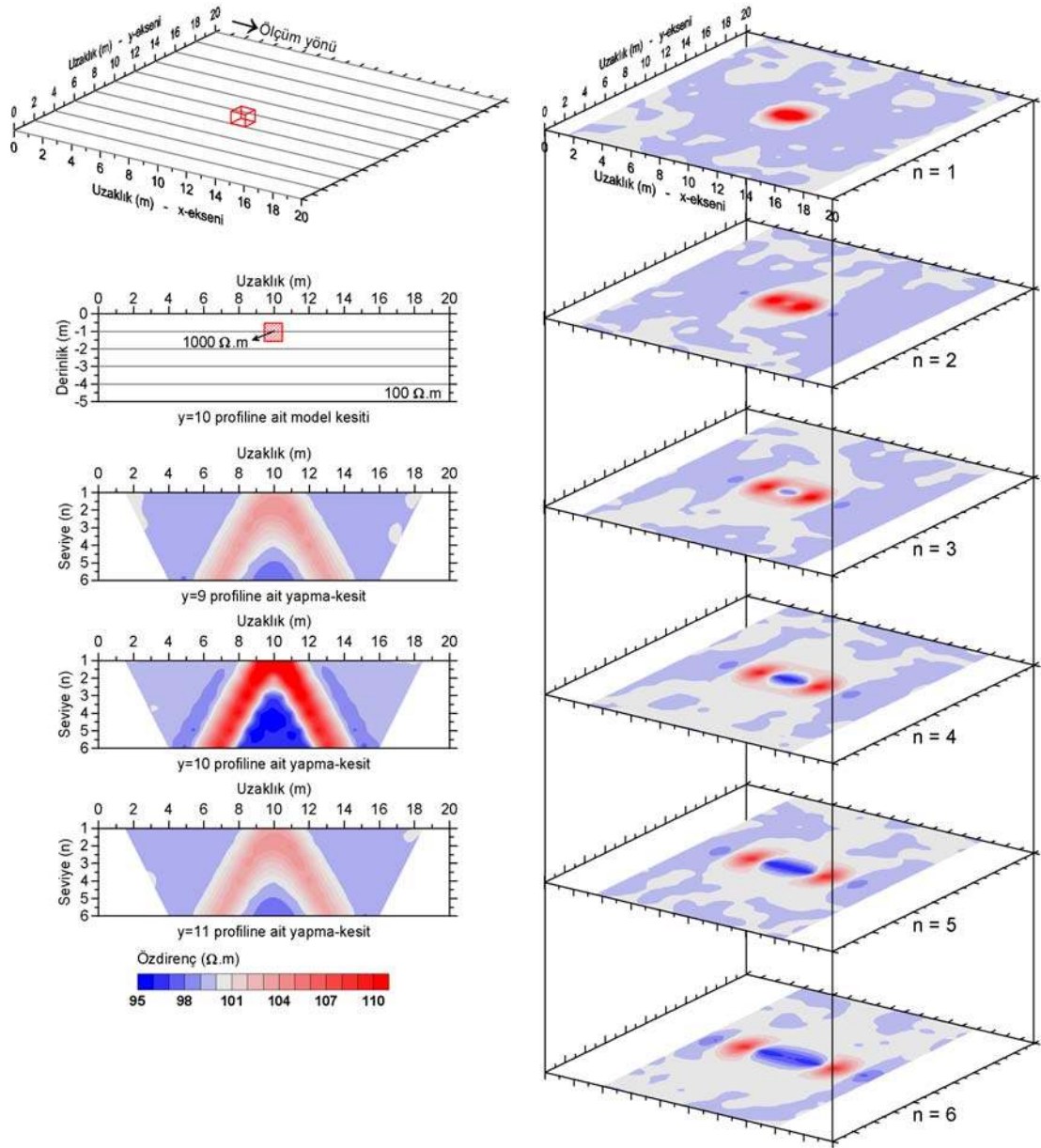
Ters-çözüm işlemi, düz-çözümün birden çok defa çalıştırılmasını gerektirdiğinden hesaplama süresinin hızlı olması önemlidir. Bu durumda Matlab programının sunduğu avantajlardan biri olan paralel hesaplama (paralel computing) yönteminden yararlanılmıştır. Paralel hesaplama, günümüz bilgisayarlarında kullanılan ve birden çok çekirdeğe (2 veya 4) sahip işlemcilere veya birden çok bilgisayara bağlanabilme koşullarına ihtiyaç duymaktadır. Hesaplanması istenen problem eşit parçalara bölünerek işlemler farklı çekirdeklerde veya bilgisayarlarda eş zamanlı olarak sürdürülmektedir. Çözümü biten parçalar daha sonra ana bilgisayarda tekrar birleştirilmekte ve işlem sonlandırılmaktadır. Böylece hesaplama süresinin hızlandırılması hedeflenmektedir. Hazırlanan Matlab tabanlı algorithmada değişiklikler yapılarak düz-çözüm hesaplamalarının kullanılan bilgisayardaki 4 çekirdek üzerinde de yapılması sağlanmıştır.



Şekil 4.20 Dirençli küp modeli için a) Wenner-Schlumberger, b) pol-pol ve c) pol-dipol dizilimlerinden elde edilen görünür öz direnç yapma-kesitleri. Görünür öz direnç yapma-kesitleri üzerinde küp modelinin yeri kesikli çizgi ile gösterilmiştir.

Şekil 4.21’de verilen örnek çalışmada, dipol-dipol dizilimi kullanılarak 21 profil üzerinde 6 ölçüm seviyesi için 2079 görünür öz direnç verisi geliştirilen Matlab programı ile hesaplanmıştır. Hesaplamaların gerçekleştirildiği model, 1x1x1 m boyutlarında dirençli bir küp modelini temsil etmektedir. 20736 model parametresine sahip model alanı üzerinde elektrotlar ve birbirine paralel seçilen profiller arası uzaklıklar 1 m’dir. Seri hesaplama olarak tanımlanabilecek ve tek bir çekirdek kullanılarak gerçekleştirilen düz-çözüm çalışmasında hesaplama süresinin 75 sn olduğu görülmüştür. Buna karşın paralel hesaplama için yeniden düzenlenen algoritma ile 4 çekirdek üzerinden gerçekleştirilen hesaplamalar ise 32 sn sürmüştür. Her iki hesaplama sonucunda elde edilen görünür öz direnç değerlerinde hiçbir fark gözlenmemiştir. Böylece, düz-çözüm programında %60’a varan bir hız kazancı paralel hesaplama ile elde edilmiştir. Hesaplama sonuçlarının görünür öz direnç yapma-kesitleri ve seviye haritaları ile gösterildiği Şekil 4.21’de, küp modelinin tam ortasından geçen $y=10$ profili için en belirgin anomali değerleri elde edilmiştir. Küp modelinden kaynaklanan anomali dışında ortam öz direnci gerçek değerine (100 $\Omega.m$) oldukça yakındır.

Tez çalışmasının bundan sonraki aşamasını ise geliştirilen düz-çözüm programını kullanan bir ters-çözüm algoritmasının hazırlanması oluşturmaktadır. Elektrik öz direnç yönteminin ters-çözümü ile ilgili genel bilgiler verildikten sonra, Matlab tabanlı hazırlanan ters-çözüm programı ve ürettiği sonuçlar tanıtılmaktadır.



Şekil 4.21 Dirençli küp modeli üzerinde dipol-dipol diziliminin 3-boyutlu ERT ölçümü ile paralel hesaplama sonucu elde edilen görünür öz direnç yapma-kesitleri.

4.2 Elektrik Özdirenç Yönteminde Ters-Çözüm

Elektrik özdirenç ters-çözümünde amaç sınırlı sayıdaki görünür özdirenç verisinden yeraltı modeli olan özdirenç dağılımına ulaşmaktır. Bu durum çözülecek problemin doğrusal olmayan ters-çözüm problemi olmasına sebep olmaktadır. Bu tür problemlerin çözümü, gözlenen ve kuramsal görünür özdirenç verisi arasındaki farkın yinelemeli bir yolla küçüklmesini sağlayarak bir başlangıç modelinin iyileştirmesini gerektirmektedir. Başlangıç modelinden kuramsal verinin elde edilmesi ve yinelemeler sonucu model parametrelerinin iyileştirilmesiyle yeniden bir kuramsal verinin üretilmesinde ise düz-çözüm aşamasına gereksinim duyulur. Tomografik yaklaşım teknikleri olarak da adlandırılan bu yinelemeli işlem elektrik özdirenç verisinin değerlendirilmesinde 1980'lerden itibaren kullanılmaya başlanmıştır (Loke ve Barker, 1996a, b; Sasaki, 1992; Tripp ve diğer., 1984). Genelleştirilmiş ters-çözüm teorisi ile başlayan tomografik teknikler ile ilgili genel bilgi ise izleyen bölümde verilmektedir.

4.2.1 Genelleştirilmiş Ters-Çözüm

Jeofizik ters-çözümde, ölçülen değerler ile hesaplanan değerler arasında en küçük kareler anlamında doğru yanıtı veren bir *model* oluşturulmaya çalışılır. Model, istenilen fiziksel ve geometrik özelliklerin verildiği *model parametrelerine* sahiptir. Verilen bir model parametreleri seti için matematiksel ilişkilerden tanımlanmış modelden hesaplanabilen yapay veri ise *model yanıtı* veya *kuramsal veridir*. Tüm ters-çözüm yöntemleri esasen yeraltı için, yanıtın bazı kısıtlamalara tabi tutulduğu, ölçülen veriye uygun bir modeli belirlemeye çalışır. En iyileştirme (optimizasyon) yöntemlerinde izlenen yol, bir başlangıç modelini, model yanıtı ile gözlenen veri değerleri arasındaki farkın düşürüldüğü yinelemeli bir yöntem ile modifiye etmektir (Şekil 4.2). Bu yaklaşım doğrusal olmayan problemlerin çözümde kullanılmaktadır. Jeofizikte ters-çözüm işleminin kuramsal çalışmaları ise doğrusal problemlerin çözümü ile başlanarak genelleştirilmiş ters-çözüm (Generalized Inverse Theory) anlamında birçok araştırmacı tarafından ele alınmıştır (Lines ve Treitel, 1984;

Menke, 1984; Scales ve diğer., 2001; Tarantola 2005; Treitel ve Lines, 1982; Zhdanov, 2002).

$i = 1, 2, \dots, n$ olacak şekilde n adet ölçüm noktasında gözlenen veri seti bir “ d_i ” kolon vektörü, model yanıtı (kuramsal veri) ise yine bir “ f_i ” kolon vektörü olarak yazılabilmektedir;

$$d_i = (d_1, d_2, d_3, \dots, d_n)^T \quad \text{ve} \quad f_i = (f_1, f_2, f_3, \dots, f_n)^T \quad (4.17)$$

Özdirenç problemlerinde gözlenen veri ve model yanıtı için görünür özdirenç değerlerinin logaritmasının kullanılması genel bir kolaylıktır ve model değerlerinin logaritması model parametreleridir. $j=1, 2, \dots, m$ olacak şekilde m adet model parametre sayısından oluşan model parametreleri izleyen “ p_j ” vektörü ile gösterilebilmektedir.

$$p_j = (p_1, p_2, p_3, \dots, p_m)^T \quad (4.18)$$

Gözlem (n) ve parametre (m) sayılarına göre doğrusal problemler üçe ayrılmaktadır;

1. $n=m$ ise tam tanımlı problem (sistemin tek bir çözümü vardır),
2. $n < m$ ise az tanımlı problem (belirli kısıtlamalar altında optimum bir çözüm vardır, belirlenen kısıtlamalar çözümü değiştirir),
3. $n > m$ ise aşırı tanımlı problem (hata değerinin en küçüklenmesiyle çözülebilir) ve

bunların dışında jeofizik problemlerin çoğunda olduğu gibi problemin bir kısmının az bir kısmının aşırı tanımlı olduğu karışık tanımlı problemler de bulunmaktadır. Problemin tanımına göre en küçüklenecek farkın hesabında kullanılacak denklem (objektif fonksiyoneli) değişmektedir. Gözlenen veri ve model yanıtı arasındaki fark (discrepancy) vektörü aşağıdaki gibi tanımlanabilmektedir.

$$e = d_i - f_i = (d_1, d_2, d_3, \dots, d_n)^T - (f_1, f_2, f_3, \dots, f_n)^T \quad (4.19)$$

Lines ve Treitel (1984) gösterdikleri en küçük kareler yöntemi yaklaşımına göre;

“ p_j^0 ” ($j = 1, \dots, m$) parametrelerin bir ilk tahmin değeri ve “ f^0 ” da bu ilk tahmin parametrelerine göre ilk model yanıtı olsun. Eğer model yanıtı “ f ”, parametrelerin bir doğrusal fonksiyonu ise, “ p^0 ” model yanıtı etrafındaki dağılım Taylor açılımının birinci mertebeden (yüksek mertebeler ihmal edilerek) kuvveti olarak (4.20) denklemi ile gösterilebilir. Bu işlem ile doğrusal olmayan problemler doğrusallaştırılabilir.

$$f = f^0 + \sum_{j=1}^m \frac{\partial f}{\partial p_j} \Big|_{p=p^0} (p_j - p_j^0) \quad (4.20)$$

Dizey formunda bu denklem (4.21) halini alır.

$$f = f^0 + J\Delta p \quad (4.21)$$

Burada J , $n \times m$ boyutlu kısmi türevlerden oluşan elemanları aşağıdaki gibi verilen *Jakobyen dizeydir*.

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial p_1} & \frac{\partial f_1}{\partial p_2} & \frac{\partial f_1}{\partial p_3} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial p_m} \\ \frac{\partial f_2}{\partial p_1} & \frac{\partial f_2}{\partial p_2} & \frac{\partial f_2}{\partial p_3} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial p_m} \\ \frac{\partial f_3}{\partial p_1} & \frac{\partial f_3}{\partial p_2} & \frac{\partial f_3}{\partial p_3} & \dots & \frac{\partial f_3}{\partial p_m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial p_1} & \frac{\partial f_n}{\partial p_2} & \frac{\partial f_n}{\partial p_3} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial p_m} \end{bmatrix}_{n \times m} \quad (4.22)$$

Jakobyen dizey gösteriminin anlamı, i. model yanıtındaki değişime karşılık j.nci model parametresindeki değişikliklerdir. $\Delta p_j = (p_j - p_j^0)$ ise model parametrelerinin değişim vektörüdür.

(4.19) fark vektörü, (4.21) denklemi kullanılarak tekrar düzenlenirse (4.23) denklemi elde edilir.

$$d - f^0 = J\Delta p + e \quad (4.23)$$

Burada “ $d - f^0$ ” olarak gözlenen veri ile ilk model yanıtı arası fark vektörü “ g ” ile tanımlanır ve (4.23) tekrar düzenlenirse (4.24) denkleminde ulaşılır.

$$e = g - J\Delta p \quad (4.24)$$

(4.24) denklemi ile verilen fark vektörünün en küçüklenmesi gerekmektedir. Bunun için öncelikle çıkışma için bir ölçüt olan hata enerjisi tanımlanmalıdır. Hata enerjisi “ E ”, tüm ölçüm değerlerindeki hata miktarlarının herhangi bir dereceden kuvvetinin toplamını vermektedir (Başokur, 2002).

$$E_k(p) = \sum_{i=1}^n |d_i - f_i|^k \quad (4.25)$$

Burada “ k ” tam sayıdır. Bir vektörün elemanlarının bazı kuvvetlerine göre toplamı, o vektörün “normu” olarak tanımlanmaktadır. “ e ” hata vektörünün normu $\|e\|$ ile gösterilir. En küçük kareler yaklaşımının çözümü, yaklaşılan verinin gözlemlerden olan Euclidean uzaklığını minimize eden model parametrelerini bulmaktır (Menke, 1984). Euclidean uzunluk, bir vektörün boyut veya uzunluğunun ölçümü için bir yoldur ve norm kavramı ile açıklanır. Buna göre “ k ”nın değerlerine göre bazı normlar aşağıda verilmektedir.

$$L_1\text{-normu} \quad : \quad \|e\|_1 = \left[\sum_i |e_i|^1 \right] \quad (4.26a)$$

$$L_2\text{-normu} \quad : \quad \|e\|_2 = \left[\sum_i |e_i|^2 \right]^{1/2} \quad (4.26b)$$

$$L_n\text{-normu} \quad : \quad \|e\|_n = \left[\sum_i |e_i|^n \right]^{1/n} \quad (4.26c)$$

(4.25) denkleminde “k” değeri 2 olarak alınırsa işlem bizi en küçük kareler veya “Gauss-Newton” yaklaşımına (L_2 -normu) götürmektedir. Buradan elde edilecek toplam değeri ise, hata vektörü ile kendisinin evriğinin çarpımına eşit olacaktır.

$$E_2(p) = \sum_{i=1}^n e^2 = e^T e = (g - J\Delta p)^T (g - J\Delta p) \quad (4.27)$$

(4.27) ile verilen hata enerjisinin “ Δp ” parametrelerine göre türevi alınıp, sıfıra eşitlenmesi gerekmektedir. Buna göre (4.28) denklemi elde edilmektedir (bir vektöre göre türev Graybill (1969) tarafından tanımlanmış ve tüm i değerleri için $\partial S / \partial \Delta p_j = 0$ olarak uygulanmıştır).

$$\frac{\partial}{\partial \Delta p} (\Delta p^T J^T J \Delta p - g^T J \Delta p - \Delta p^T J^T g + g^T g) = 0 \quad (4.28)$$

Türevin Δp ‘ye göre alınmasıyla (4.29) denklemi elde edilmektedir.

$$J^T J \Delta p + \Delta p^T J^T J - g^T J - J^T g = 0 \quad (4.29)$$

$J^T J \Delta p = \Delta p^T J^T J$ ve $g^T J = J^T g$ olmak üzere (4.29) denklemi yeniden düzenlenirse,

$$2(J^T J \Delta p) - 2(J^T g) = 0 \quad (4.30)$$

$$(J^T J \Delta p) = (J^T g) \quad (4.31)$$

(4.31) denkleminde parametre değişim vektörü çekilirse (4.32) denklemiyle tanımlanan en küçük kareler ya da Gauss-Newton çözümüne ulaşılır.

$$\Delta p = (J^T J)^{-1} J^T g \quad (4.32)$$

Δp parametre değişim vektörünün hesaplanmasından sonra, “k+1” nci yinelemedeki yeni model parametreleri (4.33) ile elde edilir.

$$p_j^{k+1} = p_j^k + \Delta p_j^k \quad (4.33)$$

Pratikte basit en küçük kareler denklemi (4.32) jeofizik ters-çözümde sıkça kullanılmaktadır. Bazı durumlarda $(J^T J)^{-1}$ dizeyinin sonucu tekil olabilmekte ve böylece en küçük kareler denkleminin Δp için bir çözümü bulunamamaktadır. Bir başka genel sorun, kalitesiz bir başlangıç modeli (optimum modelden çok farklı olan) kullanıldığında meydana gelen $(J^T J)^{-1}$ dizey sonucunun yakın tekil olmasıdır. Bu durumda (4.32) denklemi ile hesaplanan parametre değişim vektörü, (4.33) kullanılarak hesaplanan yeni model değerlerinde gerçek olmayan sonuçlar doğurabilir. Bu problemi engellemek için bilinen bir yöntem Gauss-Newton denkleminin Levenberg-Marquart modifikasyonudur ve (4.34) ile verilir.

$$\Delta p = (J^T J + \lambda I)^{-1} J^T g \quad (4.34)$$

Burada I birim dizey, λ ise Marquart veya sönüm (damping) faktörü olarak bilinir ve bu yöntem *Ridge Regression* (Inman, 1975) olarak da adlandırılmaktadır. Sönüm faktörü, Δp parametre değişim vektörü bileşenlerinin değerlerini efektif olarak sınırlandırır ve problemin az tanımlı kısmını sönümler. Bununla birlikte iki- ve üç-boyutlu ters-çözüm modellerinde olduğu gibi çok sayıda küçük hücrenin olması gibi model parametrelerinin sayısı çok olduğunda, model bu yöntem ile yüksek veya düşük sahte öz direnç zonları ile kararsız bir öz direnç dağılımına sahip olabilir (Constable ve diğer., 1987). Bu durumda gözlem değerleri model parametre sayısından küçüktür ve problem az tanımlıdır. Bu problemin çözümü için, Gauss-

Newton en küçük kareler denkleminde model parametrelerindeki uzaysal değişimi minimize eden bir başka modifikasyon yapılır (örneğin model özdirenç değerleri yumuşak veya aşamalı bir yolla değiştiren). Bu *düzgünlük-kısıtlı (smoothness-constrained)* en küçük kareler metodu (Ellis ve Oldenburg, 1994a) olarak izleyen matematiksel formda verilir;

$$(J^T J + \lambda F) \Delta p_k = J^T g - \lambda F p_k \quad (4.35)$$

Burada $F = \alpha_x C_x^T C_x + \alpha_y C_y^T C_y + \alpha_z C_z^T C_z$ ile tanımlanır ve C_x , C_y ve C_z ; x, y ve z yönlerindeki düzgünleştirme düzeyleridir. α_x , α_y ve α_z yine x, y ve z yönlerindeki düzgünlük süzgeçlerini veren görelî ağırlıklandırmalardır. Düzgünleştirme düzeyinin genel bir hali fark düzeyinin birinci kuvvetidir (deGroot-Hedlin ve Constable, 1990). Bu da aşağıdaki gibi verilir;

$$C = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

(4.35) denklemi aynı zamanda model özdirenç değerlerinin uzaysal değişimlerinin veya pürüzlülüğün (roughness) karesini en küçüklemeye çalışır. Bu denklem, özdirenç değerlerinin düzgün değişimi ile bir model üretme eğilimindedir. Bu yaklaşım, eğer gerçek yeraltı özdirenci yumuşak ya da aşamalı değişiyorsa kabul edilebilir. Bazı durumlarda, yeraltı jeolojisi, kendi içinde çoğunlukla homojen ama aralarında keskin sınırlara sahip katmanlar içerir. Bu tip durumlar için (4.35)'deki ters-çözüm bağıntısı, model özdirenç değerlerindeki mutlak değişimleri en küçükleyecek şekilde modifiye edilebilmektedir (Claerbout ve Muir, 1973). Bu bazen daha iyi sonuçlar verebilir ve teknik olarak L_1 -normu veya daha bilinen şekliyle *bloklu* (ya da *robust*) ters-çözüm yöntemi olarak tanımlanır. Başka tekniklerde modifikasyon için kullanılabilir. Bunlardan biri Wolke ve Schwetlick (1988) tarafından verilen standart L_1 -normu en küçük kareler

formülasyonunu kullanan yinelemeli tekrar ağırlıklandırılmış en küçük kareler metodudur.

Bu en iyileştirme denklemi ise (4.35) denkleminin modifikasyonu ile verilir.

$$(J^T J + \lambda F_R) \Delta p_k = J^T R_d g - \lambda F_R p_k \quad (4.37)$$

$$F_R = \alpha_x C_x^T R_m C_x + \alpha_y C_y^T R_m C_y + \alpha_z C_z^T R_m C_z \quad (4.38)$$

R_d ve R_m , ağırlıklandırma düzeyleridir yani ters-çözüm işleminde, veri uyumsuzlukları (misfit) ve model pürüzlülük vektörlerine eşit ağırlık verilmektedir.

4.2.2 Elektrik Özdirenç Verisinin Üç-boyutlu Ters-Çözümü

Üç-boyutlu elektrik özdirenç ters-çözüm uygulamasının ilk örneklerinden birini Park ve Van (1991) sonlu-farklar algoritması ve pol-pol dizilimini kullanarak vermiştir. Sonlu-elemanları kullanarak ters-çözümü ise Sasaki (1994) göstermiştir. Ellis ve Oldenburg (1994b) ise eşlenik türev yöntemini ters-çözümde kullanmıştır. İzleyen süreçte farklı ters-çözüm algoritmaları da kullanılmış ve sonuçları araştırmacılar tarafından yayınlanmıştır (örneğin, Günther ve diğer., 2006; Loke ve Barker, 1996b; Pidlisecky ve diğer., 2007; Tsourlos ve Ogilvy, 1999). Elektrik özdirenç verisinin ters-çözümü, yeraltının fiziksel özelliklerini ve başlangıç modelini tanımlayan model parametrelerine ihtiyaç duymaktadır. Bunun için parametreleştirme (ayrıklaştırma) işlemi gerçekleştirilmektedir. Üç-boyutlu yeraltı modelinde bu işlem sonucu kullanılan sayısal yönteme göre hücreler elde edilmektedir. Oluşturulan başlangıç modeli için her bir hücreye ait potansiyel değeri sayısal yöntemler kullanılarak hesaplanmaktadır. İşlem, tüm hücreler için tamamlandığında istenilen elektrot dizilime göre görünür özdirenç değerleri elde edilmektedir. Bu kuramsal veri ile gözlenen veri arasındaki fark ise fark vektörünün hesaplanmasında kullanılmaktadır.

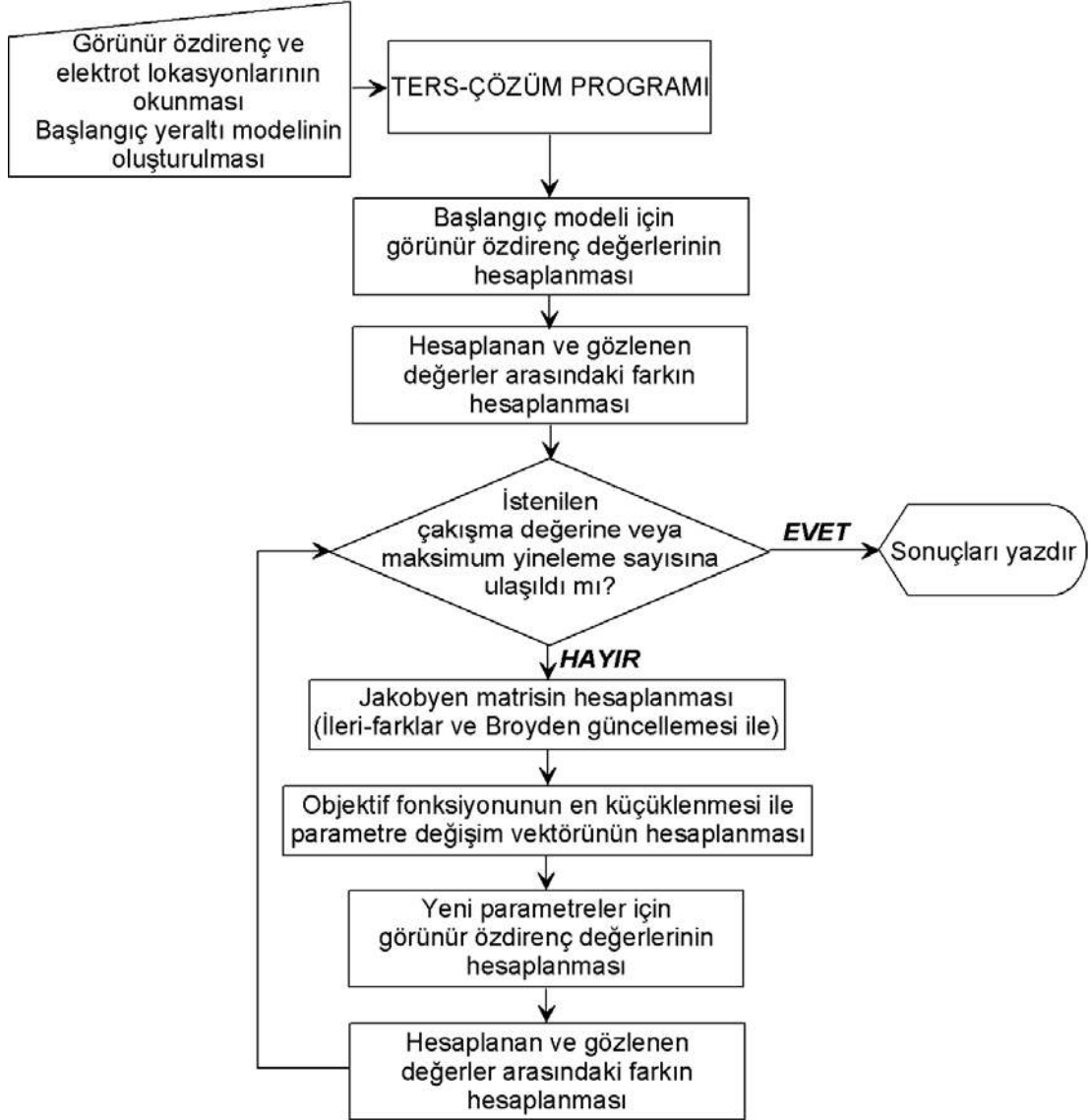
İlerleyen adımda kısmi türevlerden oluşan Jakobyen dizeyi hesaplanmakta ve en küçük kareler eşitliği ile doğrusal denklemler sistemi çözülmektedir. Bu adım için modifiye edilmiş Gram-Schmidt, Cholesky ayrışımı (decomposition) ve tekil değer ayrışımı (SVD) yöntemleri gibi sayısal teknikler kullanılabilir. Böylece parametre değişim vektörü elde edilmektedir. Son olarak bir önceki yineleme adımında bulunan parametreler bu değişim vektörü kullanılarak yenilenmekte ve bu yeni parametrelere göre düz-çözüm ile kuramsal veri oluşturulmaktadır. Bundan sonra gözlenen ve kuramsal verinin karşılaştırılması ile yeteri bir çakışma ölçütü sağlanmış ise yineleme işlemi sonlandırılmakta veya istenilen çakışma ölçütü sağlanıncaya kadar işlem sürdürülmektedir. Yinelemenin durdurulması için bir diğer kistas ise her bir yineleme sonucunda elde edilen çakışma ölçütünün belirli bir düzeyin altına düşmemesidir (Başokur, 2002). Yinelemenin sonlandırılması ile son adımda bulunan model parametrelerinin yeraltını temsil eden model olduğu kabul edilmektedir.

4.2.3 Üç-boyutlu Elektrik Özdirenç Ters-Çözüm Programı

Matlab ortamında geliştirilen MatlabERTinv ters-çözüm programına ait akış şeması Şekil 4.22’de verilmiştir. Program, giriş olarak verilen elektrot lokasyonları ve başlangıç parametreleri ile bir kuramsal veri seti oluşturmakta ve bunu gözlenen görünür özdirenç değerleri ile karşılaştırmaktadır. Çakışma koşulunun veya maksimum yineleme sayısının sağlanmasına kadar objektif fonksiyonelinin en küçüklenmesine çalışan algoritma, yinelemeli bir yol ile model parametrelerini iyileştirmeyi hedeflemektedir.

Elektrik özdirenç ters-çözümü üç boyutta çözülmeye çalışıldığından oluşturulması ve hesaplanması gereken matris boyutları oldukça büyük olmaktadır. Bu durum özellikle Jakobyen matrisin oluşturulmasının uzun sürmesi ve dolayısıyla ters-çözüm algoritmasının çalışmasının efektif olmaktan (kullanılan model boyutuna göre birkaç saatten fazla süren yineleme süreleri gibi) uzak kalmasına yol açmaktadır. Araştırmacılar başlangıçta model boyutunu küçültmek için hücre boyutlarını büyük tutmayı yeğlerken, ilerleyen dönemlerde Jakobyen matrisin analitik çözümünün

hesaplanması ve Broyden güncellemesi gibi yakınsama işlemleri (Broyden, 1965) ile bilgisayar hesaplama süresini azaltmayı hedeflemişlerdir. Ayrıca, ters-çözüm yakınsamasının kontrol edilebilmesi için en küçüklenecek objektif fonksiyonunda belirli düzgünleştirme terimleri kullanılmıştır.



Şekil 4.22 Matlab tabanlı geliştirilen MatlabERTinv ters-çözüm programına ait akış şeması.

Bu tez çalışmasında geliştirilen Matlab tabanlı ters-çözüm algoritmasında (4.39) denkleminde verilen objektif fonksiyoneli kullanılmıştır (Sasaki, 1994).

$$\Phi = \|\Delta d - J \Delta p\|^2 + \lambda \|r\|^2 \quad (4.39)$$

Bu fonksiyonelde, “ $\Delta d=d-f$ ” gözlenen ve hesaplanan veriler arasındaki farkı ve “ $r=C\Delta p$ ” terimi ise düzgünleştirme (parametre ağırlıklandırma) matrisini tanımlanmaktadır. (4.39) denklemi içerisinde model parametreleri dışında verilere de bir ağırlıklandırma uygulanması mümkündür. Bu çalışma kapsamında verilere herhangi bir ağırlıklandırma verilmemiştir. Gözlenen ve hesaplanan görünür öz direnç verilerinin logaritmaları kullanılarak bir düzgünleştirme sağlanmıştır. Çakışma koşulu olarak da yine bu iki veri setinin ortalama karekök hataları (root mean square-RMS) kullanılmıştır.

Objektif fonksiyonelinin parametreye göre kısmi türevinin en küçüklenmesi ile (4.40) denklem sistemi elde edilmektedir.

$$(J^T J + \lambda C^T C) \Delta p = J^T \Delta d \quad (4.40)$$

Bu eşitliğin çözümü (4.41) sisteminin çözümüne denktir.

$$\begin{bmatrix} J \\ \sqrt{\lambda} C \end{bmatrix} \Delta p = \begin{bmatrix} \Delta d \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

Bu çözümün kullanılmasıyla bilgisayar hafızasında büyük yer kaplayan $J^T J$ ve $C^T C$ matris çarpımlarının yapılmasına gerek kalmamaktadır. (4.41) denkleminin çözümü için yinelemeli yaklaşımlar olan en küçük kareler eşlenik türev (conjugate gradient least-squares - CGLS) veya en küçük kareler QR ayrışımı (LSQR) yöntemleri veya doğrudan çözümler olan tekil değer ayrışımı gibi yöntemler tercih edilebilmektedir (Günther ve diğer., 2006; Papadopoulos ve diğer., 2011; Sasaki, 1994). Bu tez çalışmasında ise en küçük kareler eşlenik türev (CGLS) yöntemi kullanılmıştır.

Ters-çözüm işleminde, yinelemelerin hızlandırılabilmesi için Jakobyen matris ilk üç yineleme adımı (4.42) denkleminde verilen sonlu-farklar yöntemi (Lines ve Treitel, 1984) ile açık olarak hesaplanırken, izleyen yineleme adımlarında bu

matrisin hesabı için (4.43) denklemi ile verilen Broyden güncellemesinden (Broyden, 1965) yararlanılmıştır.

$$J_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial p_j} \approx \frac{f_i(p_j + \Delta p_j) - f_i(p_j)}{\Delta p_j} \quad i=1, \dots, n \quad j=1, \dots, m \quad (4.42)$$

$$J^{k+1} = J^k + \frac{(\Delta f^k - J^k \Delta p^k)(\Delta p^k)^T}{(\Delta p^k)^T (\Delta p^k)} \quad \Delta f^k = f(p^{k+1}) - f(p^k) \quad (4.43)$$

Jakobyen matrise ait elemanların (4.42) denklemi ile hesabında her bir eleman için bir adet düz-çözüm adımının yapılması gerektiği açıktır. Bu işlem model parametrelerinin çok olduğu modeller üzerinde oldukça fazla zaman gerektirmektedir. Bu durumda Jakobyen matrisin açık hesabının hızlandırılabilmesi için yazılan program paralel hesaplamaya uygun olacak şekilde düzenlenmiştir. Böylece aynı anda birden çok bilgisayarın veya işlemci çekirdeğinin kullanılması olanaklı olmuş ve hesaplama süresi %60'a kadar azaltılabilmektedir.

3. yineleme adımından sonra devreye giren Broyden güncellemesi, Jakobyen matrisin hesabında bir önceki yinelemede bulunan Jakobyen matrisi kullanmaktadır. Böylece yineleme süresi %90'a yakın düşürülebilmektedir. Yapılan test çalışmalarında Broyden güncellemesine hangi yineleme adımından sonra geçilebileceği araştırılmış ve üçüncü yinelemeden sonra kullanılan bu güncellemenin sonuçları çok değiştirmedeği anlaşılmıştır. Dolayısıyla programın çalışma süresini kısaltmak için bu yöntemin kullanılması uygun görülmüştür.

(4.41) denkleminin çözümünde λ sönüm faktörü değeri 0,1 değerinden başlayarak önceden belirlenen bir minimum değere ulaşana kadar $\lambda^{k+1} = \lambda^k / 2$ ile yarıya bölünerek azaltılmıştır. Düzgünleştirme matrisi "C" ise ikinci derece Laplacian fark operatörü kullanılarak oluşturulmuştur (Sasaki, 1994). Bu matriste, yineleme işlemi sırasında yakınsamayı sağlayabilmek için her bir derinlik seviyesine denk gelen elemanların değerleri %15 artırılmıştır (Loke ve Barker, 1996b).

4.2.3.1 En küçük Kareler Eşlenik Türev Yöntemi (CGLS)

Eşlenik türev yöntemi pozitif tanımlı denklem sistemlerinin çözümünde kullanılabilirken, doğrudan en küçük kareler çözümüne uygulanamamaktadır. Burada eşlenik türev, (4.44) denklemi ile tanımlanan en küçük kareler çözümüne aşağıdaki gibi uygulanmaktadır.

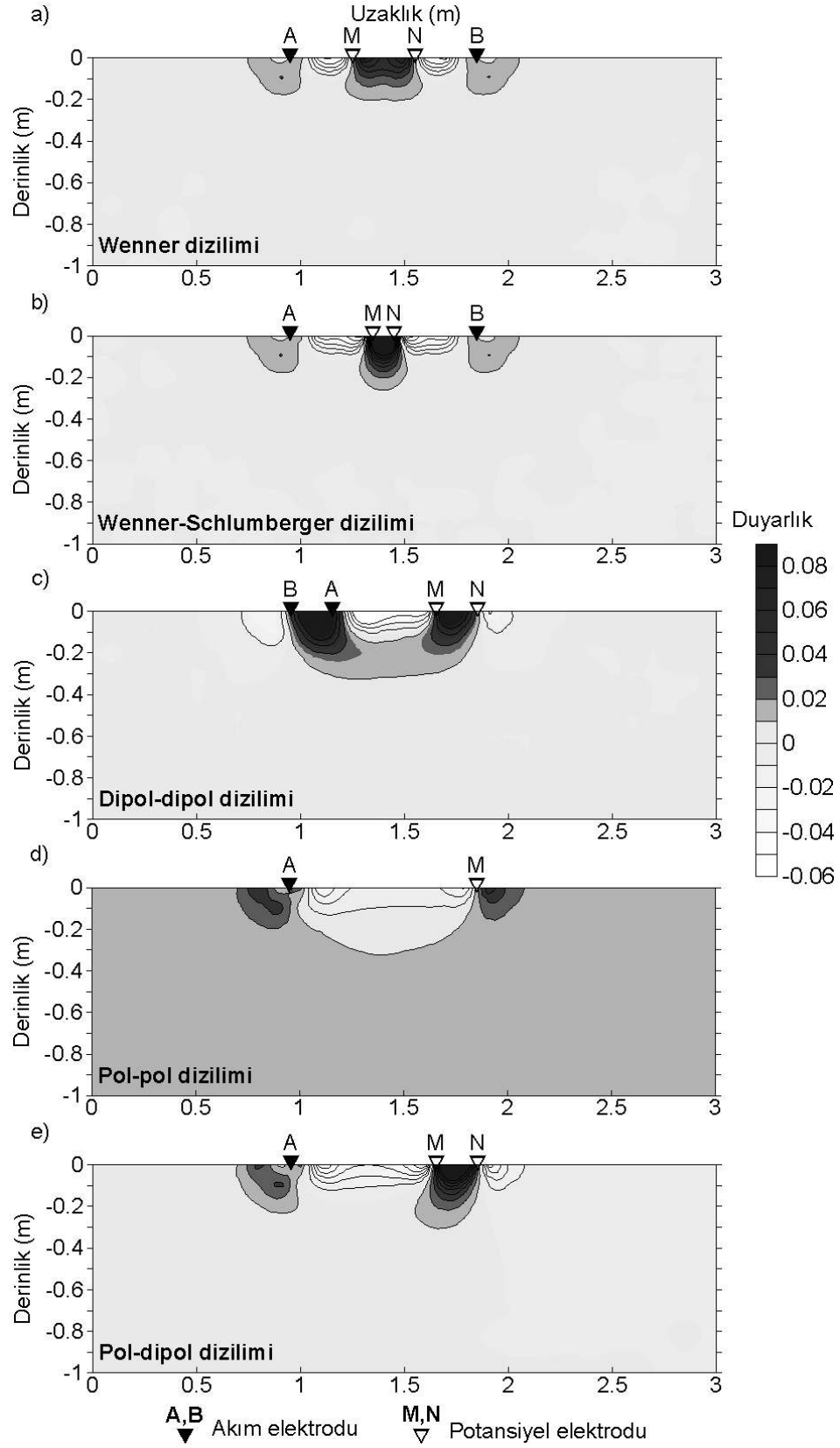
$$J^T J \Delta p = J^T \Delta d \quad (4.44)$$

Algoritma 4.2 En küçük kareler eşlenik türev (Aster ve diğer., 2004). $Gm=d$ denklemine benzetilen (4.44) denklem sistemi için yakınsama sağlanana dek yinelemeli çözüm devam ettirilmektedir.

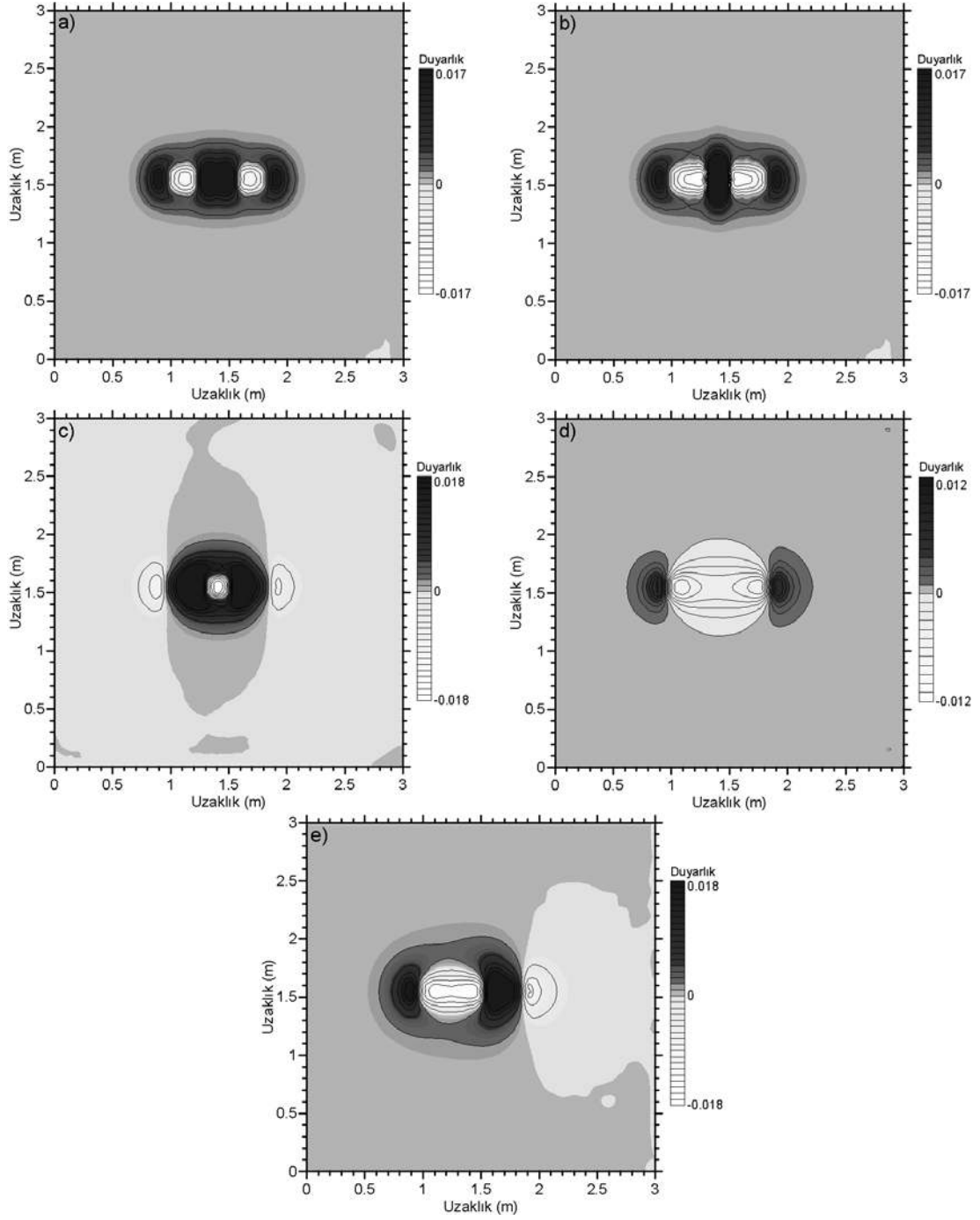
$$\begin{aligned} m_0 &= p_{-1} = \beta_0 = 0; r_0 = J^T s_0; s_0 = \Delta d \quad ; \quad k = 0, 1, 2, \dots \\ \beta_{k+1} &= \frac{(r_k, r_k)}{(r_{k-1}, r_{k-1})} \quad ; \quad (r_k, r_k) = r_k^T r_k \\ p_k &= r_k + \beta_k p_{k-1} \\ \alpha_k &= \frac{(r_k, r_k)}{(Gp_k, Gp_k)} \quad ; \quad (Gp_k, Gp_k) = (Gp_k)^T (Gp_k) \\ x_{k+1} &= x_k + \alpha_k p_k \\ s_{k+1} &= s_k + \alpha_k Gp_k \\ r_{k+1} &= G^T s_{k+1} \end{aligned}$$

4.2.3.2 Matlab Ters-Çözüm Programının Sınanması

Matlab tabanlı geliştirilen MatlabERTinv programı için öncelikle dizilimlere ait duyarlık kesitleri incelenmiştir. Buna göre, 100 $\Omega.m$ 'lik homojen bir ortam için ileri farklar ile hesaplanan Jakobyen matrizen üç-boyutlu duyarlık değerlerine ulaşılmıştır. Şekil 4.23'de düşey kesitler olarak sunulan duyarlık dağılımları, hücre aralıkları yatay ve düşey yönde 0,1 m alınarak (4.42) denklemi ile hesaplanmıştır. Eş derinlik kesitleri olarak sunulan duyarlık dağılımları ise Şekil 4.24'de verilmiştir. Elde edilen duyarlık değerlerinin, analitik çözüm ile hesaplanan değerlere oldukça yakın olduğu belirlenmiştir. Böylece ters-çözüm işleminin önemli bir bölümü olan Jakobyen matris hesabı başarılmıştır.



Şekil 4.23 a) Wenner, b) Wenner-Schlumberger, c) dipol-dipol, d) pol-pol ve e) pol-dipol dizilimlerine ait duyarlık kesitleri ($100 \Omega \cdot \text{m}$ 'lik homojen ortam için hesaplatılmıştır).



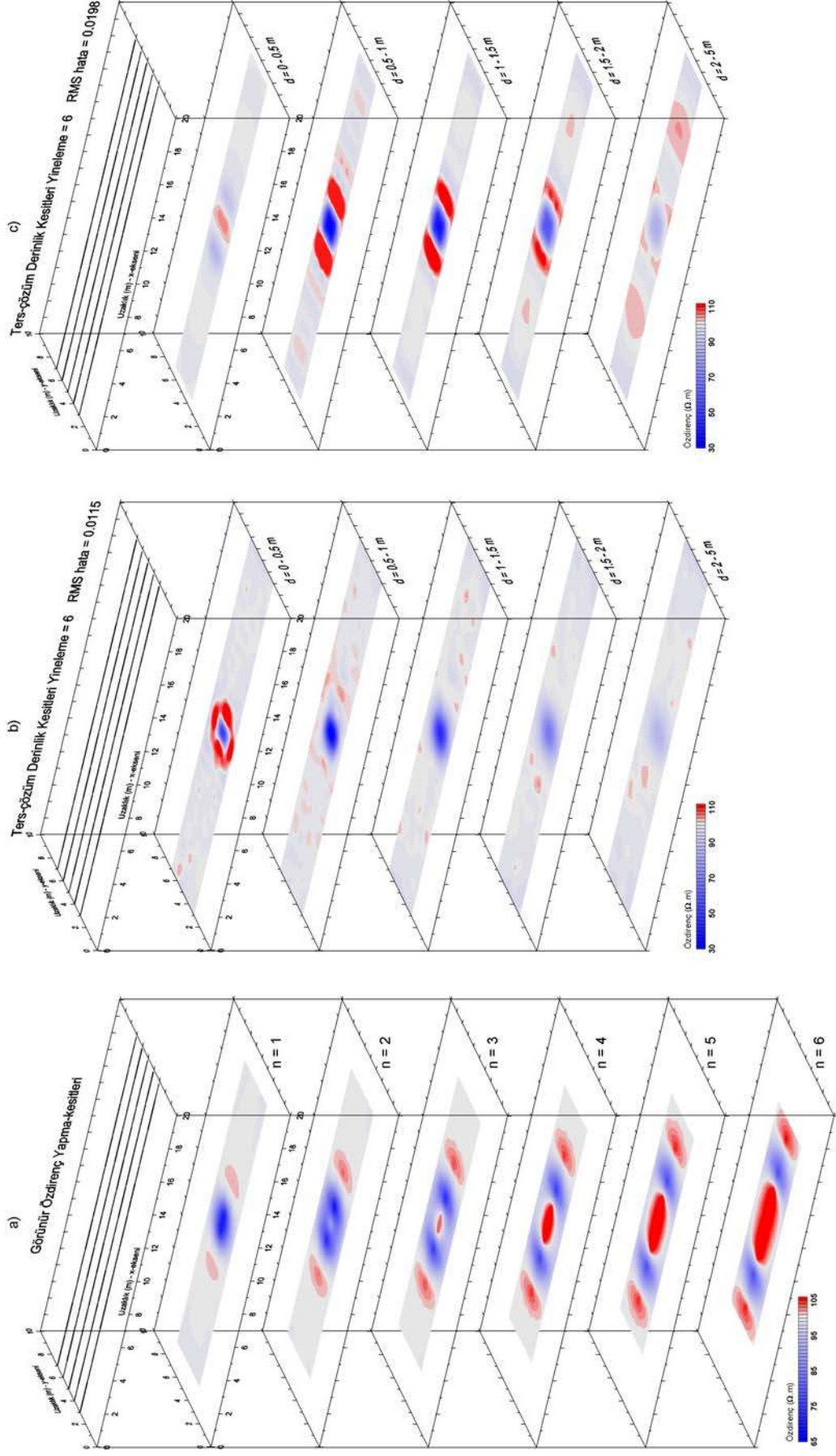
Şekil 4.24 a) Wenner, b) Wenner-Schlumberger, c) dipol-dipol, d) pol-pol ve e) pol-dipol dizilimlerine ait 0.25 m derinlik için 3-boyutlu duyarlık kesitleri (100 Ω.m'lik homojen ortam için hesaplatılmıştır).

Matlab ters-çözüm programının sınanabilmesi için öncelikle bulunduğu ortama göre iletken olan 1x1x1 m boyutlarındaki küp, modelleme alanının ortasına ve 0,5-1,5 metre derinlikleri arasına yerleştirilmiştir. Ortam öz direnci 100 Ω.m ve iletken

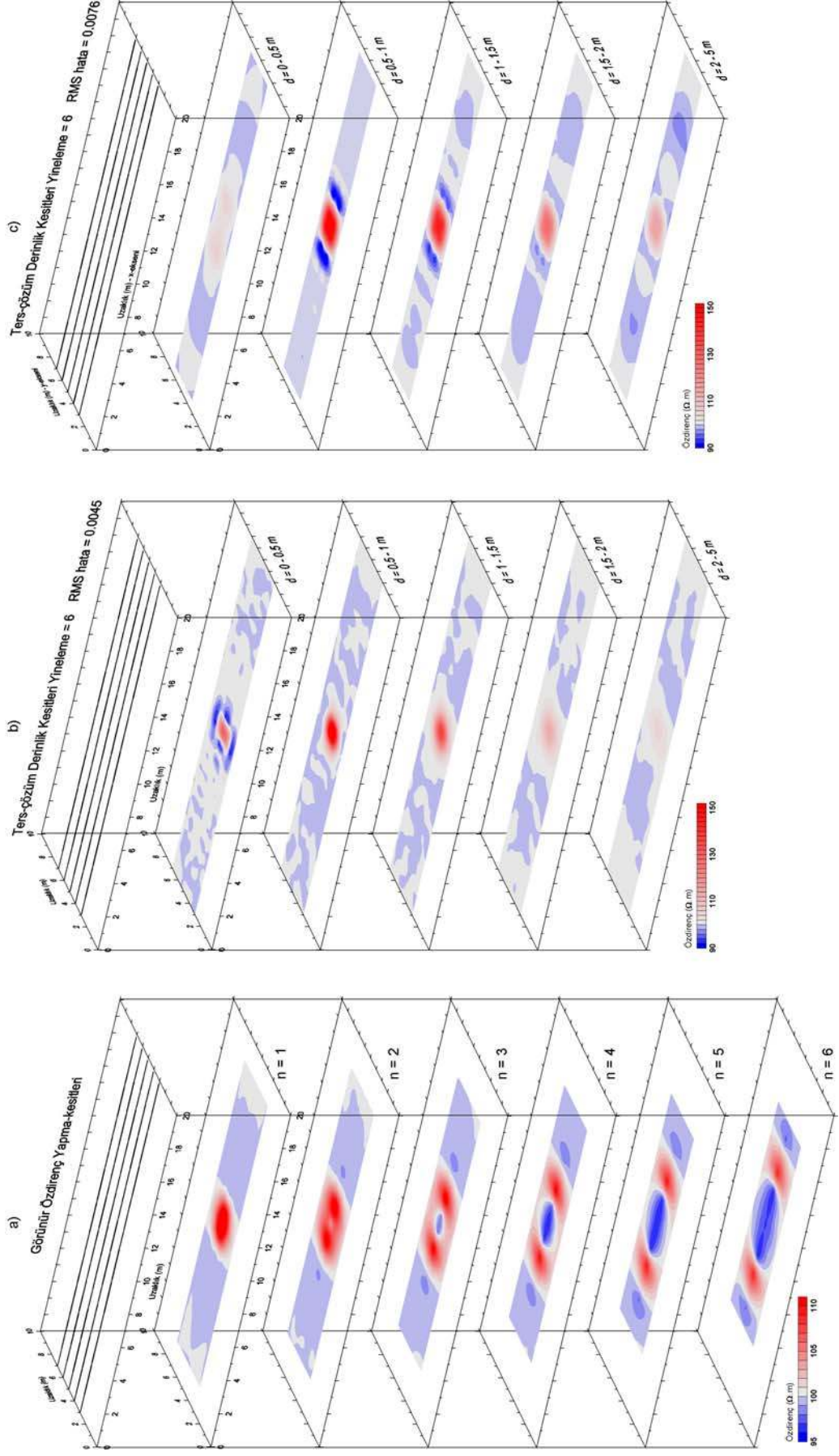
kübün öz direnci ise $10 \Omega.m$ seçilmiştir. Modelleme çalışmasında hesaplamalar için 0,5 m hücre aralıkları ile 12096 model parametresinden oluşan model ve 1 m elektrot ve profil aralıklı dipol-dipol dizilimi kullanılmıştır. Toplam 5 profil üzerinde 6 seviye için elde edilen 465 adet görünür öz direnç değeri, Res3Dinv (Loke ve Barker, 1996b) ve MatlabERTinv ters-çözüm programları ile değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.25’de sunulmuştur. Dipol-dipol dizilimine ait görünür öz direnç seviye haritalarını gösteren Şekil 4.25a’da, veriler üzerine herhangi bir gürültü eklenmemiştir. Böylece 6 yineleme sonucunda düşük hata değerleri ile elde edilen ters-çözüm sonuçlarında, iletken küp modeli her iki program ile başarılı olarak belirlenebilmiştir. Matlab programı, ilk seviyede küp modeli çevresinde dirençli bir bölge oluştururken, Res3Dinv programı ise 2, 3 ve 4. seviyelerde benzer bir olguyu sunmuştur. Kübün ve ortamın öz direnç değerleri yakın bir şekilde bulunmuştur.

Benzer modelleme ve hesaplama özellikleri kullanılarak, ortama göre dirençli küp modeli ($1000 \Omega.m$) için elde edilen sonuçlar ise Şekil 4.26’da verilmiştir. 6 yineleme sonucunda da her iki programın kübün konumunu net biçimde belirleyebildiği gözlenmiştir. Bu durumda geliştirilen Matlab tabanlı programın dirençli veya iletken modeller ile çalışabildiği anlaşılmıştır.

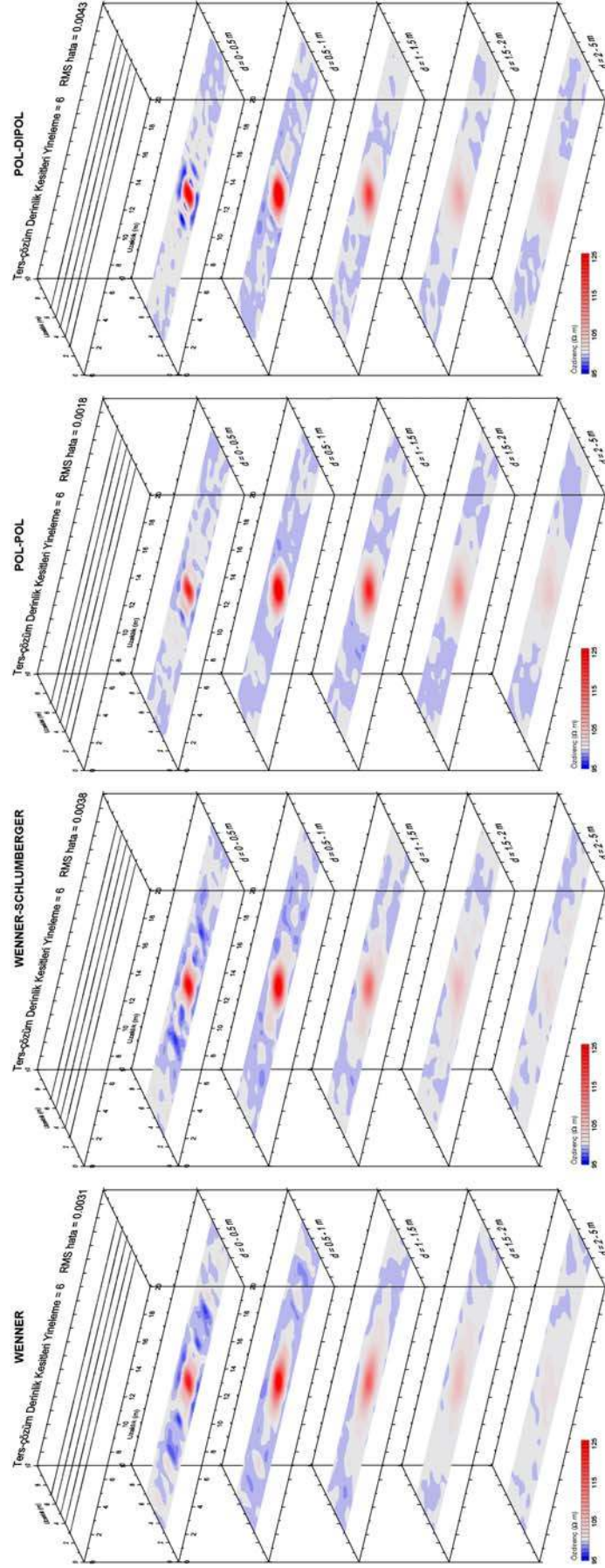
Matlab tabanlı programın dipol-dipol haricinde Wenner, Wenner-Schlumberger, pol-pol ve pol-dipol dizilimleri kullanılarak ters-çözüm sonucunda ürettiği model kesitleri Şekil 4.27’de sunulmuştur. Programın bu dizilimler ile çalışabilirliği elde edilen sonuçlardan anlaşılmaktadır. Dizilimlerin sunduğu farklı duyarlıklar sonucu küp modelinin belirlenebilirliği de farklılıklar göstermiştir. Bu sonuçlara göre dipol-dipol ve pol-dipol dizilimlerinin sonuçlarının yapıyı belirleme de daha iyi olduğu söylenebilmektedir. Buna karşın Wenner dizilimi diğerlerine oranla zayıf kalmıştır. Bu da dizilimlerin duyarlık özelliklerine bakıldığında beklenen bir olgudur.



Şekil 4.25 a) İletken küp modelinden üretilen görünür özdeşleş yapma-kesitleri, b) Matlab ve c) Res3dinv programlarından elde edilen ters-çözüm model kesitleri.



Şekil 4.26 a) Dirençli küp modelinden üretilen görünür özdeşleş yapma-kesitleri, b) Matlab ve c) Res3dinv programlarından elde edilen ters-çözüm model kesitleri.



Şekil 4.27 Dirençli küp modeli için Wenner, Wenner-Schlumberger, pol-pol ve pol-dipol dizilimleri kullanılarak Matlab programından elde edilen ters-çözüm model kesitleri.

Sonuç olarak Matlab tabanlı MatlabERTinv programının sonuçları Res3Dinv programının sonuçları ile büyük benzerliklere sahiptir. Ancak bu tez kapsamında oluşturulan Matlab tabanlı programın hesaplama süresi oldukça uzundur. Res3Dinv programının homojen başlangıç modeline ait ilk Jakobyen matrisi analitik yol ile hesaplıyor olması en büyük avantajıdır. Bu durum programın 3 boyutlu ve model parametre sayısı yüksek modeller ile çalışılırken daha efektif olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla tez çalışmasının ilerleyen bölümlerinde veri sayısının yüksek olması nedeniyle ters-çözüm hesaplamaları Res3Dinv programı ile yapılmıştır. Matlab tabanlı programın hızlandırılmasının, Jakobyen matris hesabının analitik olarak yapılması ve programın C++ gibi yazılım dillerinden birine çevrilmesiyle olası olacağı düşünülmektedir.

BÖLÜM BEŞ

ELEKTRİK ÖZDİRENÇ TERS-ÇÖZÜM YÖNTEMİYLE ARKEOLOJİYE YÖNELİK MODELLEME ÇALIŞMALARI

Günümüzde oldukça sık uygulanan 2-boyutlu ERT çalışmalarından, yeraltındaki yapıların uzanımları hakkında iyi sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Yeraltına ait 3-boyutlu öz direnç dağılımı ise ancak 3-boyutlu ERT ölçümleri ile ortaya çıkarılabilmektedir. Öz direnç ölçümleri sonucunda yeraltının bir görünür öz direnç dağılımı elde edilmektedir. Görünür öz direnç değeri yeraltının öz direnç dağılımına ve hedef yapının özelliklerine bağlı olduğu kadar dizilim geometrisine de bağlı bir değerdir. Dolayısıyla bu durum doğru yeraltı öz direnç dağılımının ters-çözüm teknikleri ile elde edilmesi gerekliliğini ortaya çıkarır. Ters-çözüm tekniklerinin yeraltını görüntülendirmedeki başarılarının irdelenmesi ise oluşturulacak yapay modelleme çalışmaları yardımıyla olası olmaktadır. Buna yönelik olarak bu tez çalışmasında höyük türü arkeolojik yerleşim için oluşturulan kuramsal bir model üstünde elektrik öz direnç ters-çözüm modelleme çalışması yapılmıştır.

Arkeolojiye yönelik elektrik öz direnç çalışmaları, yeraltı öz direnç dağılımının ölçülmesiyle gerçekleştirilebilmektedir. Böylece oluşturulan öz direnç haritalarında gözlenen anomaliler, olası arkeolojik yapılar olarak işaretlenmektedir. Haritaların elde edilmesinde özellikle twin (Aspinall ve Lynam, 1970) ve kare (Clark, 1968) elektrot dizilimleri kullanılmaktadır. Bu dizilimlerin ölçüm düzenlerine göre geliştirilen hızlı ve portatif ölçüm sistemleri günümüzde çok sık kullanılan RM15 (Walker, 2000), MSP (Walker ve diğer., 2005) ve bir araç tarafından çekilerek kullanılan RATEAU (Dabas ve diğer., 1994) ve ARP (Dabas, 2009) sistemleri ile karşımıza çıkmaktadır. Bu sistemler ile oldukça büyük alanlar ölçülebilmekte ve arkeolojiye yönelik bu çalışmalar geniş-ölçekli (large-scale) jeofizik aramacılık adı altında yapılmaktadır. Ölçümler sonucunda haritalar üzerinde işaretlenen yerler için yapı sınırlarının belirlenmesi yapılacak veri-işlem çalışmalarıyla (alçak-yüksek geçişli süzgeçler ve sinyal-gürültü oranını artırıcı yöntemler örneğin sinyal belirleme süzgeçleri gibi) mümkün olmaktadır.

Haritalama dışında arazi ölçümlerinin yapma-kesit elde edilebilecek şekilde iki ve üç-boyutlu ERT uygulanması ise geliştirilen çok-kanallı elektrot sistemleri ile başlamıştır (Griffiths ve Barker, 1994; Noel ve Xu, 1991). Bu yapma-kesitlerin ters-çözüm değerlendirmeleri ile iki ve üç boyutlu yeraltı modellerine ulaşılabilir. Bu modeller üzerinde olası arkeolojik yapıların yerleri, gömülü oldukları derinlik bilgisiyle birlikte elde edilebilmektedir. Ayrıca haritalamada kullanılan sistemlerin sınırlı olan araştırma derinlikleri ve dik topoğrafyadan kaynaklanabilecek hatalar, iki ve üç-boyutlu ölçümler ve ters-çözüm değerlendirmeleriyle aşılabilmektedir. Buna karşın bu tür ölçümler haritalamada kullanılan ölçümlere göre çok daha yavaş kalmaktadır. Böylece daha önceleri jeoloji amaçlı uygulanan iki-boyutlu ERT ölçümlerinin arkeolojiye yönelik uygulamaları Noel ve Xu (1991) ile Griffiths ve Barker (1994) tarafından tanıtılmıştır.

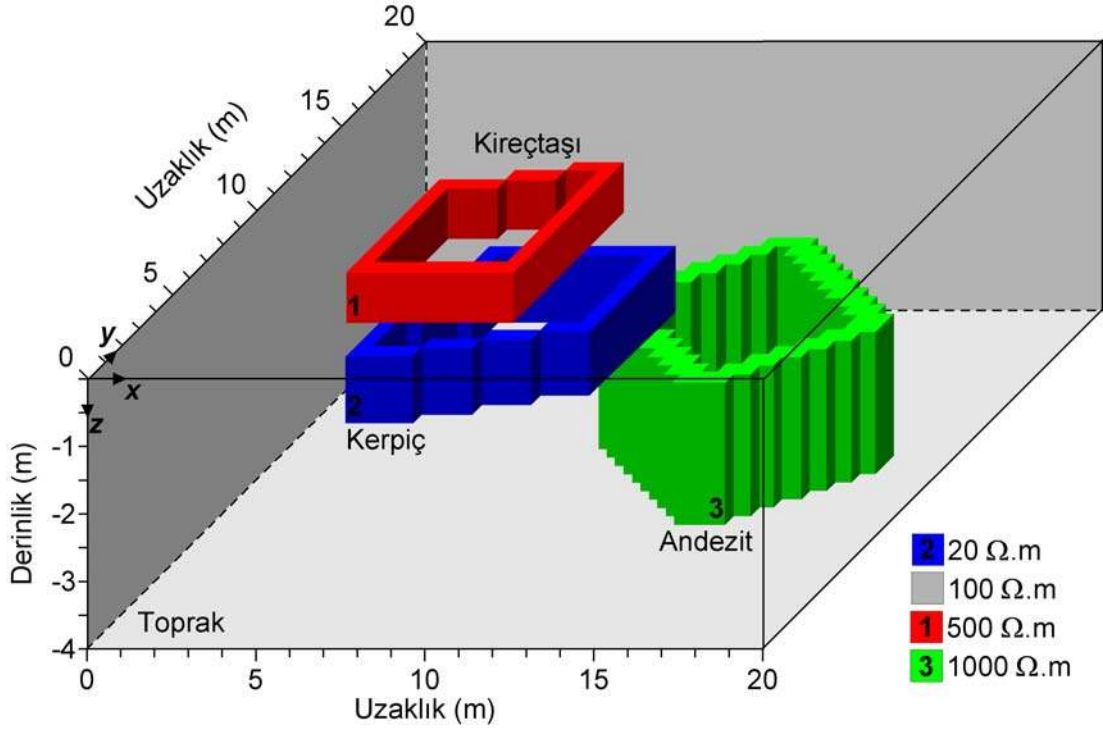
Ters-çözüm modelleme çalışmaları, farklı fiziksel koşullar içerisinde gömülü arkeolojik hedeflerin benzetimlerinin elde edilmesi için de önemli bir araçtır. Böylece arkeolojik hedeflerin yeraltı öz direnç özellikleri hakkında ön bilgiler ölçümler öncesinde elde edilebilmektedir (Berge ve Drahor, 2007; Papadopoulos ve diğer., 2006, 2007). Höyük türü çok katmanlı arkeolojik yerleşmelerde birbiri ardına gömülü halde bulunan farklı dönemlere ait yapıların bir araya gelmesiyle farklı fiziksel özelliklere ve uzanımlara sahip arkeolojik kalıntılardan oluşan karmaşık bir konteks meydana gelmektedir. Özellikle kerpiç (mud-brick), taş yapılar ve farklı malzemelerden yapılmış duvarlar (andezit, kireçtaşı vb.) gömülü mimariyi oluşturan ana yapılar olmaktadır. Bu tür yerleşmelerin jeofizik yöntemler ile araştırılması düz yerleşmelere göre daha farklı olmak durumundadır. Bu tür alanlarda yapılacak haritalama ölçümleri sonucunda yeterli bir derinlik bilgisi alınamayacağından, yerleşmenin yüzeye en yakın bölgesindeki arkeolojik kalıntılar saptanabilmektedir. Derinde bulunan ve daha önceki arkeolojik katmana ait olan yapıların belirlenebilmesi ise iki ve üç-boyutlu ERT ölçümleri ile olasıdır. Höyük türü yerleşmelerin araştırılmasında ERT yönteminin uygulamaları ise çok sınırlıdır. Bu tür yeraltı problemlerinin ERT yöntemine karşı verecekleri yanıtların daha iyi anlaşılabilmesi için modelleme çalışmaları yapılmalıdır. Buna yönelik olarak, Eski

Smyrna Höyüğü kazı çalışmaları sonucu ortaya çıkarılan arkeolojik özellikler de göz önüne alınarak kuramsal bir model oluşturulmuştur.

5.1 Yapay Höyük Modeli ve Modelleme Çalışmaları

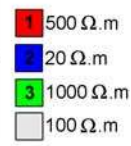
Yapay höyük modeli, çok katmanlı höyük yerleşimi stratigrafisini tanımlayan birbiri ardına konumlanmış üç farklı arkeolojik yapı modelini içermektedir (Şekil 5.1 ve 5.2). Modellemede kullanılan tüm dizilimler için etkin bir model alanı olarak 40x40x4 metrelik bir hesaplama alanı belirlenmiştir. Bu alanın merkezine yerleştirilen yapılar sonucunda tüm dizilimler ile tam olarak görüntülendirilebilecek 20x20x4 metre boyutlarındaki bir hacim elde edilmiştir. Böylelikle dizilimlerin 3-boyutlu ERT ölçümleri ile derinliğe doğru veri kaybından kaynaklanabilecek problemlerin önüne geçilmeye çalışılmıştır. Buna göre kuramsal modelin özellikleri aşağıdaki gibi tanımlanabilmektedir;

- 1) 500 Ω .m özdirence sahip üstteki yapının (kireçtaşı) üst yüzeyi 0,25 m derinlikte ve kalınlığı 0,75 m, duvar genişliği 0,5 m'dir.
- 2) Bu yapının altında bulunan ikinci yapı ise 1-2 m derinlikleri arasında yerleştirilmiştir. Bu yapının duvar genişliği 0,5 m ve özdirenç değeri ise kerpiç duvarı temsilen 20 Ω .m olarak verilmiştir.
- 3) Alttaki üçüncü yapı (andezit) ise 1000 Ω .m özdirenç ile 2-4 m derinlikleri arasında yerleştirilmiştir. Bu yapının duvar genişliği 1 m'dir.
- 4) Yapıların gömülü bulunduğu ortamın özdirenci ise Türkiye genelindeki arkeolojik alanlarda rastlanan toprak koşulları ve Eski Smyrna Höyük alanı çalışmaları göz önüne alınarak 100 Ω .m olarak belirlenmiştir. Böylece farklı materyallerden yapıldığı düşünülen yapılar ile düşük ve yüksek özdirençli yapıları içeren ve höyüğün karmaşık yeraltı durumunu gösteren üç katmanlı bir yapay höyük modeli oluşturulmuştur. Şekil 5.1 ve 5.2'de verilen model görünümünden yapıların farklı doğrultularda gerçek mimari uzanımlara (Eski Smyrna Höyüğü kazı çalışmalarında belirlenen) sahip olarak tasarlandığı burada belirtilmelidir.

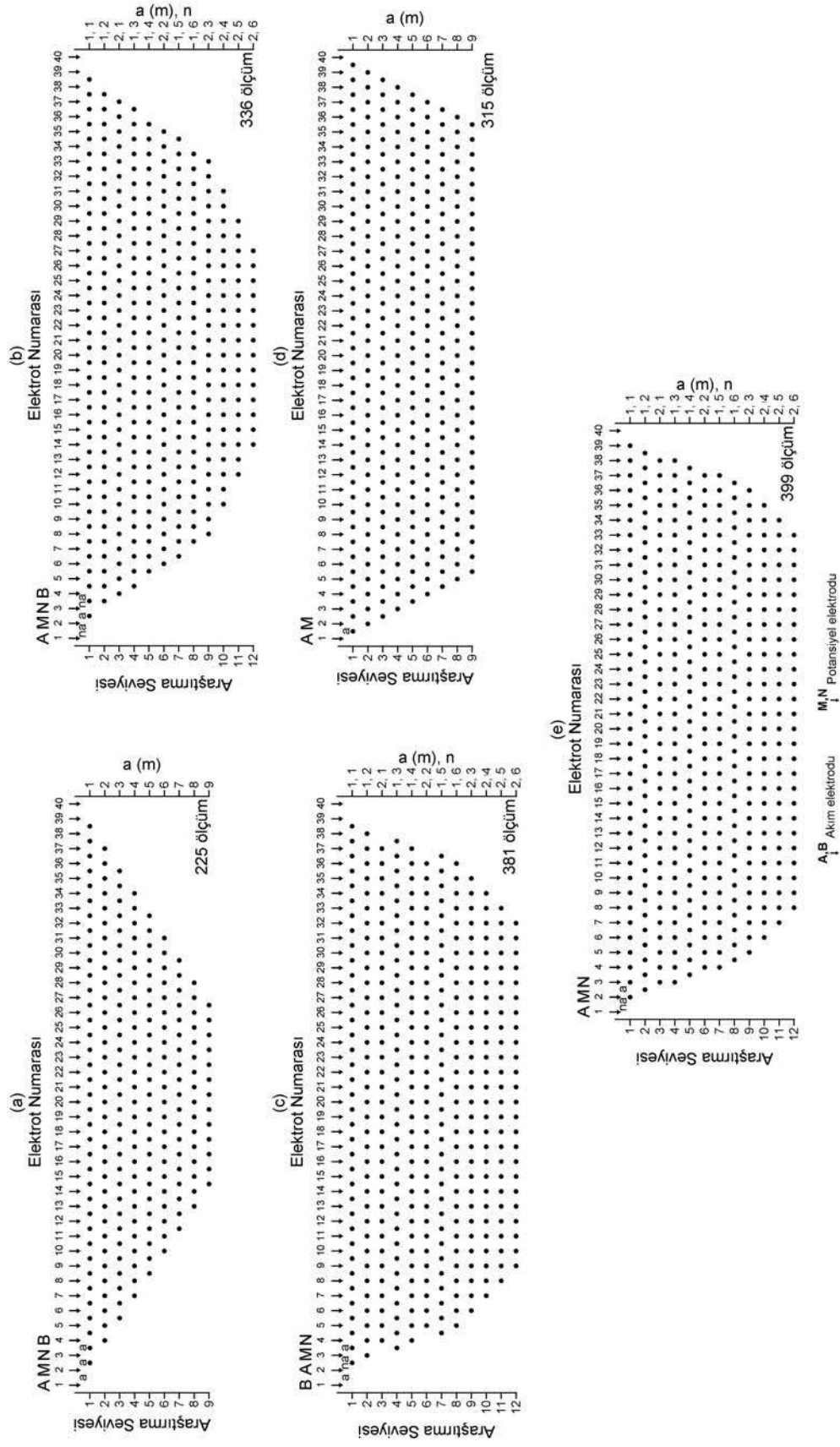


Şekil 5.1 Yapay höyük modelinin 3-boyutlu görünümü.

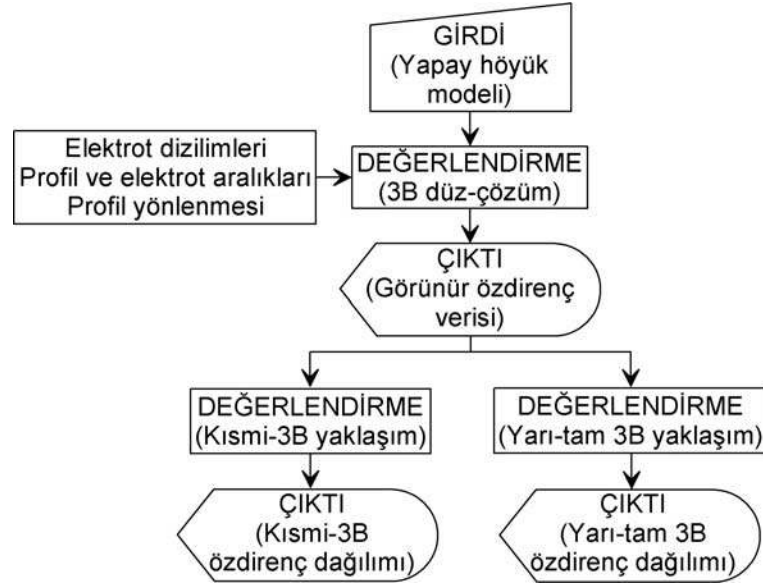
Höyük tipi çok katmanlı bir yerleşimi temel alan model belirlendikten sonra, 3-boyutlu sonlu-elemanlar algoritmasını kullanan Res3Dmod (Geotomo Software) programı ile düz-çözüm gerçekleştirilmiştir. Böylece görünür öz direnç verileri sık kullanılan beş elektrot dizilimi (Wenner, Wenner-Schlumberger, dipol-dipol, pol-pol ve pol-dipol) için hesaplanmıştır. Bu dizilimlere ait elektrot pozisyonlarını ve görünür öz direnç ölçüm noktalarını gösteren iki-boyutlu yapma-kesitler Şekil 5.3’de verilmiştir. Bu şekilde dizilimlerin araştırma seviyeleri için kullanılan “a” ve “n” değerleri görülmektedir. Dizilimlerin elektrot düzenlerine göre araştırma seviyelerinden ölçülebilen veri sayısı ve dolayısıyla verilerin yeraltında kapladıkları alanlar değişmektedir. Ayrıca farklı profil yönelimleri ve elektrotlar ile profiller arası uzaklıkların etkileri de düz-çözüm hesaplamasında değerlendirilmiştir (Şekil 5.4). Bahsedilen bu etkilerin araştırılmasına yönelik yapılan modelleme çalışmalarına ait bir akış şeması ise Şekil 5.4’de verilmiştir. Böylece bu etkilerin değerlendirmeler sırasında irdelenmesi olası olmuştur. Kuramsal model ve ters-çözüm sonuçları arasında daha karşılaştırılabilir görüntülerin oluşturulabilmesi için düz-çözüm sonucu elde edilen görünür öz direnç verilerine gürültü eklenmemiştir.



Şekil 5.2 Yapay höyük modelinin derinlik kesitleri olarak görünümü (d, derinliği belirtmektedir).

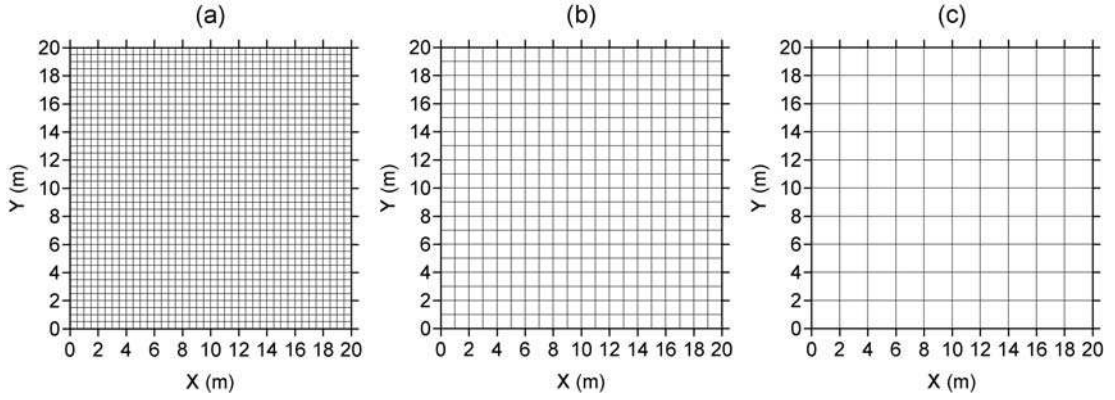


Şekil 5.3 Wenner (a), Wenner-Schlumberger (b), dipol-dipol (c), pol-pol (d) ve pol-dipol (e) dizilimleri için elektrot pozisyonları (oklar ile gösterilen) ve görünür öz direnç ölçüm noktaları.



Şekil 5.4 Elektrik öz direnç ters-çözüm yöntemiyle yapılan modelleme çalışmasının akış şeması.

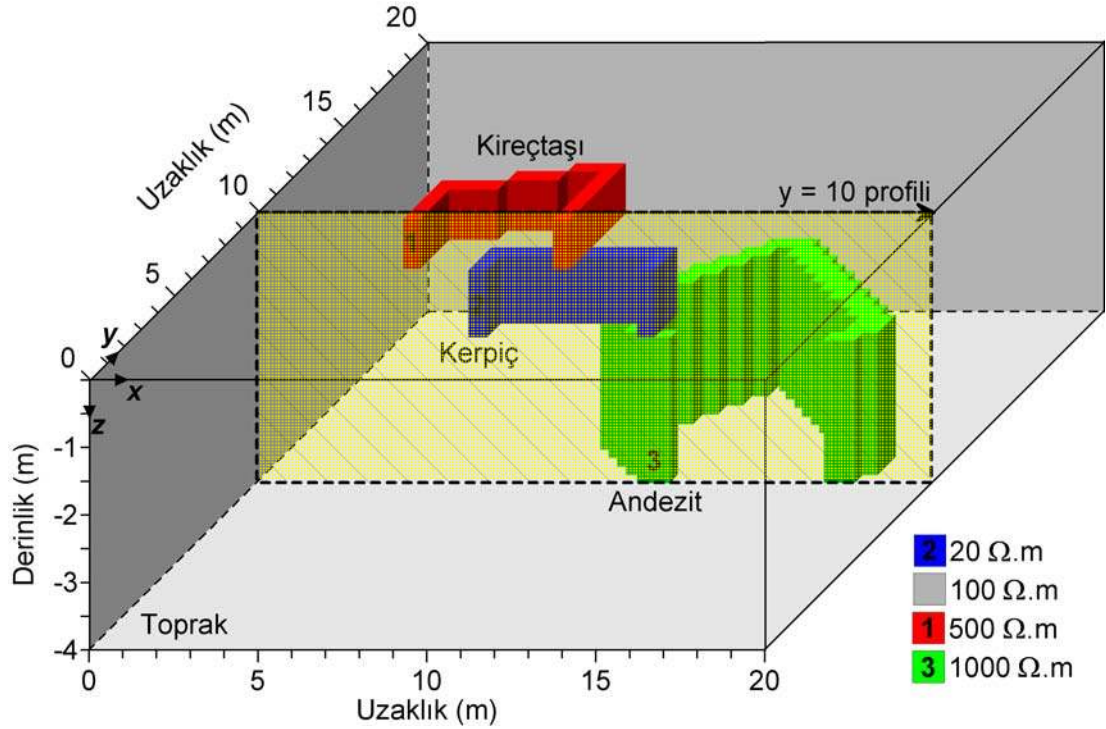
Modelleme çalışması sonucunda elde edilen 3-boyutlu görünür öz direnç verisi eşit aralıklı ve x- ile y- yönlü paralel profiller oluşturacak şekilde yeniden düzenlenmiştir. Her iki yöndeki verilerin birleştirilmesiyle de x- ve y- yönlü değişimleri içeren veri setleri oluşturulmuştur. Bu aşamada elektrot ve profil aralıkları arkeolojik amaçlı arazi çalışmalarında tercih edilen değerlere göre sırasıyla 0,5, 1 ve 2 m seçilmiştir (Şekil 5.5). Böylece hücrelere ayrılan alanda her bir köşe noktasına bir elektrotun yerleştirildiği düşünülmektedir. Tahmin edilebileceği gibi 20x20 metre boyutlarındaki böylesi bir alan üzerinden ERT ölçümlerinin başarılmasında kullanılan elektrot ve profil aralıkları ölçümün tamamlanma süresini doğrudan etkilemektedir. Şekil 5.5’deki ölçüm aralıkları için her bir seviyedeki ölçüm sayısı, artan elektrot-profil arası uzaklıklar ile ters orantılı olarak azalmaktadır. Örneğin Wenner diziliminde birinci ölçüm seviyesinin hem x- hem y- yönlerinde 0,5x0,5m’lik ölçüm aralıkları ile ölçülmesi için yapılması gereken ölçüm sayısı 1296 iken, 1x1m ölçüm ağında bu sayı 256’ya ve 2x2m ölçüm ağında ise 49’a düşmektedir. Düz-çözüm sonucunda elde edilen veri setleri kısmi-3B ve yarı-tam 3B yaklaşımlarına göre değerlendirilip, yeraltına ait öz direnç dağılımları elde edilmiştir (Şekil 5.4). Bu aşamada 2- ve 3-boyutlu değerlendirme için sırasıyla Res2Dinv (Loke ve Barker, 1996a) ve Res3Dinv (Loke ve Barker, 1996b) elektrik öz direnç ters-çözüm programları kullanılmıştır.



Şekil 5.5 Modelleme çalışmasında kullanılan elektrotlar ve profiller arası uzaklıklara bağlı ölçüm aralıkları a) 0,5x0,5m, b) 1x1m ve c) 2x2m.

Kuramsal görünür öz direnç verisinin ters-çözümünde bloklu (L_1 -norm, robust) en küçük kareler çözümü tercih edilmiştir (Loke ve diğer., 2003). Bu çözüm yönteminin arkeolojik yapı benzeri keskin köşeli modeller üretmek için daha uygun olduğu bazı çalışmalarda belirtilmiştir (Drahor ve diğer., 2008a, b). Düzgünlük-kısıtlı (L_2 -norm, smoothness-constrained) ve bloklu en küçük kareler ters-çözüm yöntemleriyle ilgili modelleme sonucu bir örnek Şekil 5.6 ve 5.7' de verilmektedir. Modelin ortasından geçen $y=10$ profili bahsedilen iki ters-çözüm yönteminin karşılaştırılması için seçilmiştir (Şekil 5.6 ve 5.7a). Bu profile ait 1 m elektrot aralıklı dipol-dipol dizilimi yapma-kesiti Şekil 5.7b'de ve bloklu ile düzgünlük-kısıtlı ters-çözüm model kesitleri ise Şekil 5.7c ve d'de sunulmaktadır. Ters-çözüm model kesitlerinde yüksek öz direnç değerleri kırmızı ve yeşil renkler ile gösterilerek 1 ve 3 numaralı dirençli yapıların tanımlanması kolaylaştırılmıştır. 6 yineleme sonucunda düzgünlük-kısıtlı ters-çözüm %1,25 ortalama karekök (root mean squares) ve bloklu ters-çözüm ise %0,78 mutlak (absolute) hata değerleri vermiştir. Bu ters-çözüm sonuçlarına göre, bloklu çözümün düzgünlük-kısıtlı çözüme göre daha keskin yapı sınırları verdiği gözlenmektedir. Özellikle, yüksek ve düşük öz direnç bölgeleri arası keskin sınırlara bloklu ters-çözüm kullanılarak erişilmiştir. Bunların dışında, kuramsal modelde 1000 $\Omega.m$ gibi yüksek öz dirençli bir yapı bulunmasına karşın, ters-çözüm sonucunda hesaplanan öz direnç değerleri 70-130 $\Omega.m$ arasında kalmıştır. Bu duruma, kerpiç yapıyı temsil eden düşük öz dirence sahip yapının ters-çözüm sonucu hesaplanan öz direnç değerlerini düşürmesi neden olmaktadır. Böylesi bir yeraltı modelinde

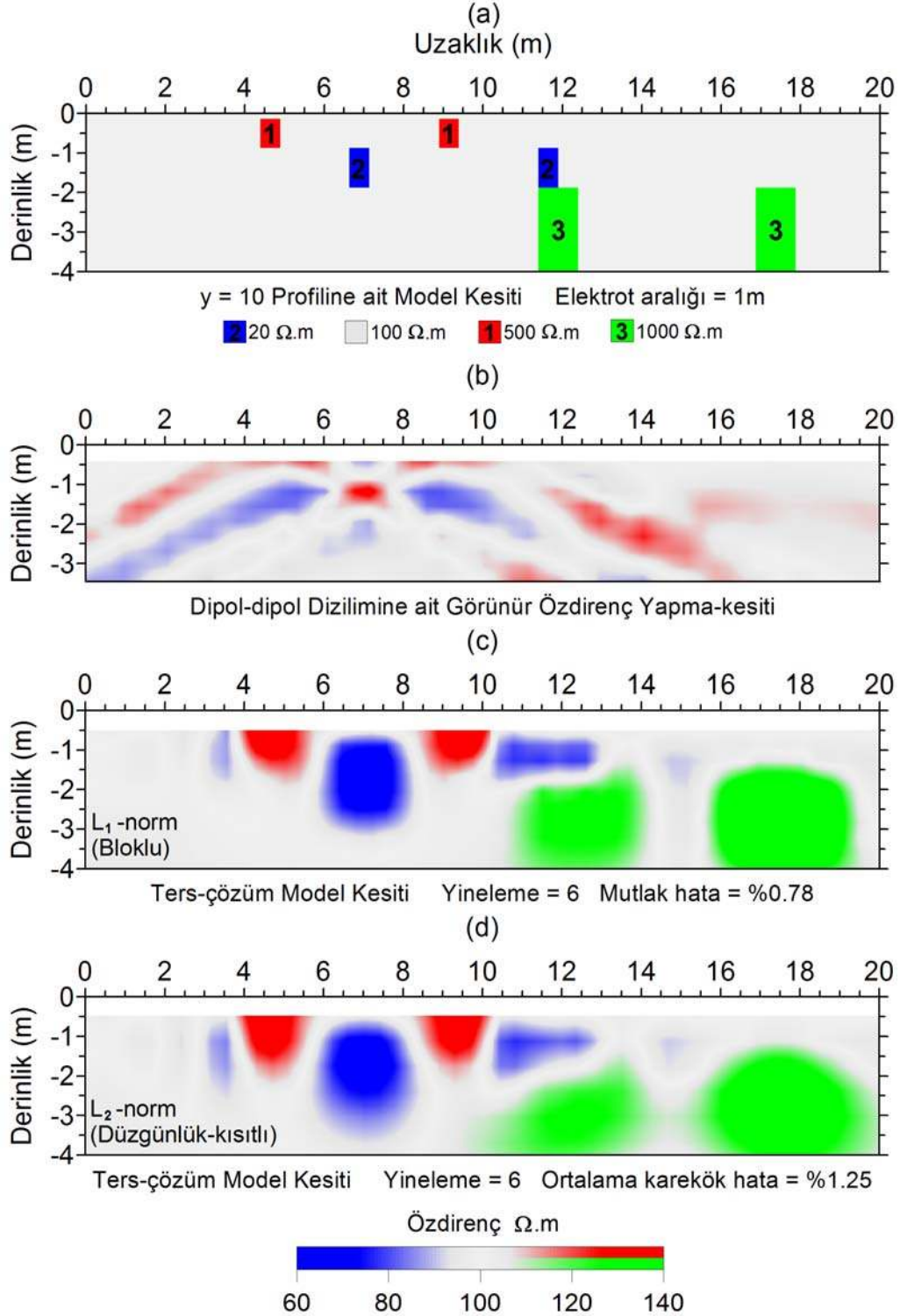
hedef yapılar ile ortam arasındaki öz direnç zıtlığında bir azalma olduğu da göz önüne alınmalıdır. Bu durum höyük türü çok katmanlı yerleşimlerde gözlenebilecek bir olgudur.



Şekil 5.6 Yapay höyük modelinde y=10 profilinin 3-boyutlu görünümü.

Ters-çözüm ile yapılan değerlendirmeler sırasında kullanılan parametreler Tablo 5.1’de verilmektedir. Bu değerlendirmelerde sönüm faktörünün seçimi için farklı değerler denenmiş ve karşılaştırılmıştır. Bu analizlerin sonucunda, $\lambda=0,15$ değeri sönüm faktörü olarak seçilmiştir (Bkz. Bölüm 5.2). Jakobyen matris ise her bir yineleme için tekrar hesaplatılmıştır. Ayrıca ters-çözüm değerlendirmesinde hesaplama zamanının azaltılması için Gauss-Newton yaklaşımı yerine tamamlanmamış (incomplete) Gauss-Newton yöntemi tercih edilmiştir. Bu iki yaklaşımın karşılaştırması izleyen alt bölümde sunulmuştur. Kullanılan ters-çözüm programı, kullanıcının diğer jeofizik yöntemlerden veya kuyu loglarından elde edebileceği bir ön bilgiyi (*a priori*) programa tanıtmaya olanağı sunmaktadır. Böylece, ayrıklaştırma da kullanılan hücre kalınlıkları çok katmanlı höyük modeline uygun olarak düzenlenmiştir. Bu işlem ile 0-0,25 m aralığında seçilen ilk hücreden sonra 0,5 m artımlarla derinleşen bir hücre ağı oluşturulmuştur. Böylece değerlendirilen

beş elektrot dizilimi için aynı derinlik seviyelerinin elde edilmesi mümkün olmuştur. Bu derinlik seviyelerine ait ters-çözüm sonuçları ise Surfer (Golden Software) yazılımı kullanılarak konturlanmış ve kesitler halinde çizdirilmiştir.



Şekil 5.7 y = 10 profiline ait model kesiti (a) ile dipol-dipol dizilimine göre elde edilen görünür özdirenç yapma-kesiti (b), bloklu (c) ve düzgünlük-kısıtlı (d) ters-çözüm model kesitleri.

Tablo 5.1 ERT ters-çözüm çalışmalarında kullanılan parametreler.

Ters-çözüm parametreleri	Seçilen özellik
Ters-çözüm model kısıtlaması	Bloklu (robust) ters-çözüm
Düz-çözüm yöntemi	Sonlu-elemanlar
Sönüm faktörü (λ)	0,15
Jakobyen matris hesabı	Her yinelemede tekrar hesaplama
İyileştirme yöntemi	Tamamlanmamış (incomplete) Gauss-Newton
Ön bilgi girişi	Tüm elektrot dizilimleri için aynı hücre kalınlıkları
En yüksek yineleme sayısı	10 (tüm sonuçlar 6 yineleme için verilmiştir.)
Başlangıç modeli	Giriş verisinin ortalama öz direnç değerini alan homojen ortam
Her bir elektrot arası düğüm sayısı	1 ve 2 m elektrot aralığı için 4 düğüm ve 0,5 m elektrot aralığı için 2 düğüm

5.2 Yapay Höyük Modelinden Elde Edilen Modelleme Sonuçları

Elektrik öz direnç yönteminin yapay höyük modeli için ters-çözüm modellemesi çalışmaları ile veri değerlendirme ve ölçümde karşılaşılan etkenler burada sunulacak sonuçlar kapsamında incelenmiştir. Kısmi ve yarı-tam üç-boyutlu yaklaşımlar, elektrot dizilimleri, profil yönlenmesi ve elektrot ile profil aralıklarının ters-çözüm sonucu elde edilen görüntüler üzerindeki etkileri izleyen alt bölümlerde tartışılmaktadır. Burada yapılan karşılaştırmalarda sonuçların olumlu veya olumsuz yönlerinin ortaya çıkarılabilmesi için, ters-çözüm ile elde edilen yeraltı modellerinin ne ölçüde yapay höyük modeline yakınsadıkları irdelenmiştir.

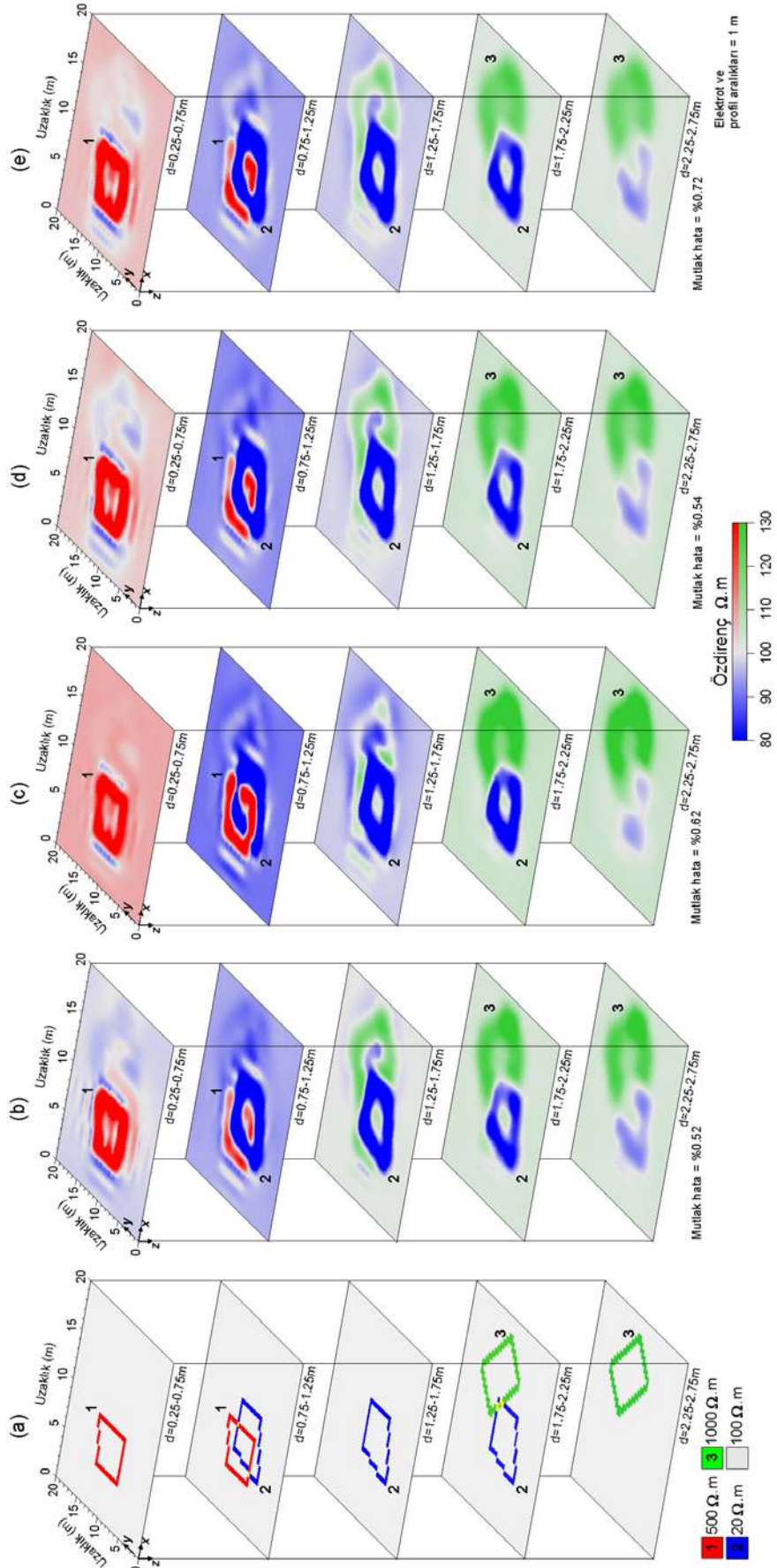
Ters-çözüm işleminde kullanılan sönüm faktörü değeri farklı değerlerin sonuçlarının karşılaştırılmasıyla belirlenmiştir. Buna yönelik olarak, modelleme çalışmasında dipol-dipol dizilimi kullanılarak sönüm faktörünün 0,05, 0,15, 0,25 ve 0,4 değerleri için ürettiği sonuçlar Şekil 5.8’de verilmektedir. Derinlik kesitlerinin gösteriminde öz direnç aralığı 80-130 $\Omega.m$ aralığında sabitlenmiştir. Dirençli yapılar olan 1 ve 3 numaralı yapıların kolay tanımlanabilmesi için yüksek öz direnç değerleri

bu yapıların bulundukları derinliklerde kırmızı ve yeşil renkler ile gösterilmiştir. Derinlik değerleri (d) ise, ters-çözümde kullanılan hücre kalınlıkları (hücrenin üst ve alt derinliği) ile aynı olacak şekilde verilmiştir. Sönüm faktörünün farklı değerler için verdiği derinlik kesitleri, yakın mutlak hata değerleri ve birbirine benzer görüntüler sunmuştur. Bu sonuçlardan $\lambda=0,15$ sönüm faktörüne ait olan 0,75-1,25 m derinlik seviyesinde 1 numaralı yapı diğer sonuçlara göre daha başarılı tanımlanabilmektedir. Ayrıca 1,25-1,75 m derinlik seviyesinde ise 3 numaralı yapının izi diğer sonuçlara göre çok az gözlenmiştir (Şekil 5.8c). Bu derinlik seviyesine ait model çizimi de burada 3 numaralı yapının bulunmaması gerektiğini göstermektedir. Böylece izleyen bölümlerde yapılan ters-çözüm çalışmalarının tamamında sönüm faktörü değeri olarak $\lambda=0,15$ değeri kullanılmıştır.

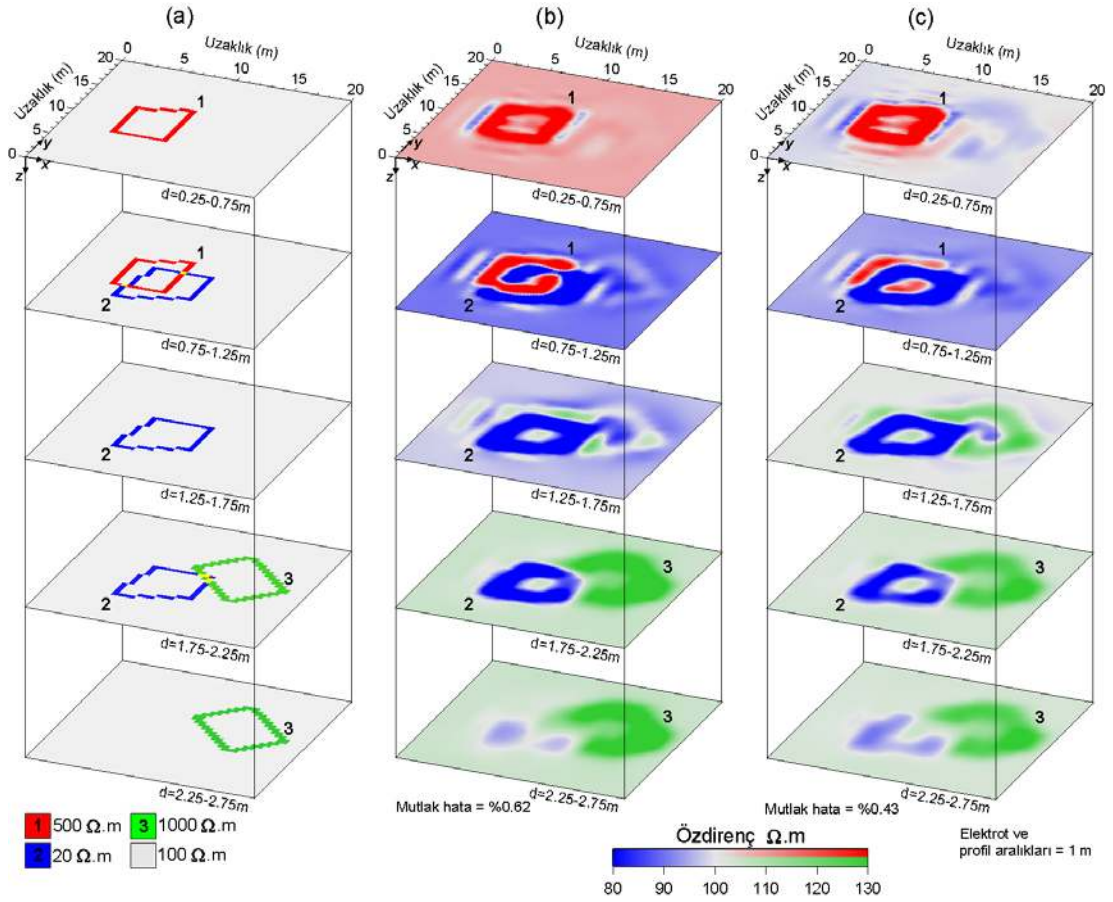
Standart Gauss-Newton ile tamamlanmamış Gauss-Newton yaklaşımlarının bir karşılaştırması Şekil 5.9'da verilmiştir. Dipol-dipol dizilimi için elde edilen bu sonuçlarda, Gauss-Newton çözümü daha küçük bir mutlak hata değeri vermiştir. Buna karşın derinlik kesitleri arasında önemli bir fark gözlenmemiştir. Ayrıca ters-çözüm değerlendirmesinde tamamlanmamış Gauss-Newton yaklaşımı hesaplama süresini %60'a yakın düşürmüştür. Dolayısıyla yapay model ile yapılan ters-çözüm değerlendirmelerinde bu yaklaşım kullanılmıştır.

5.2.1 Kısmi ve Yarı-tam Üç-Boyutlu Çözümler

Bu bölümde, yapay höyük modeli kullanılarak yapılan ters-çözüm modellemesi çalışmaları Şekil 3.11'de verilen kısmi ve yarı-tam 3-boyutlu yaklaşımlar ile gerçekleştirilmiştir. Yapay model üzerinde dipol-dipol dizilimi kullanılarak bu iki yaklaşımdan elde edilen sonuçlar ve model Şekil 5.10'da verilmektedir. Burada kullanılan veri setleri x-yönlü paralel profiller ile profil ve elektrot aralıkları 1 m olacak şekilde hazırlanmıştır. Ters-çözüm değerlendirmesi her iki yaklaşımda da 6 yineleme sonucunda %0,62 mutlak hata değerini geçmemiştir. Kısmi-3B yaklaşım için hata değeri bu yaklaşımda ters-çözümü yapılan tüm 2-boyutlu profillerin ortalama hata değeri alınarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.8 Yapay höyük modeli (a) ve dipol-dipol dizilimi için sönüm faktörü 0,05 (b), 0,15 (c), 0,25 (d) ve 0,4 (e) değerleri kullanılarak yarı-tam 3B yaklaşım ile elde edilen derinlik kesitleri. Ölçüm profilleri x-eksenine paraleldir.



Şekil 5.9 Yapay höyük modeli (a) ve dipol-dipol dizilimi için tamamlanmamış Gauss-Newton (b) ve Gauss-Newton (c) yaklaşımları ile ters-çözüm sonucu elde edilen derinlik kesitleri. Ölçüm profilleri x-eksenine paraleldir.

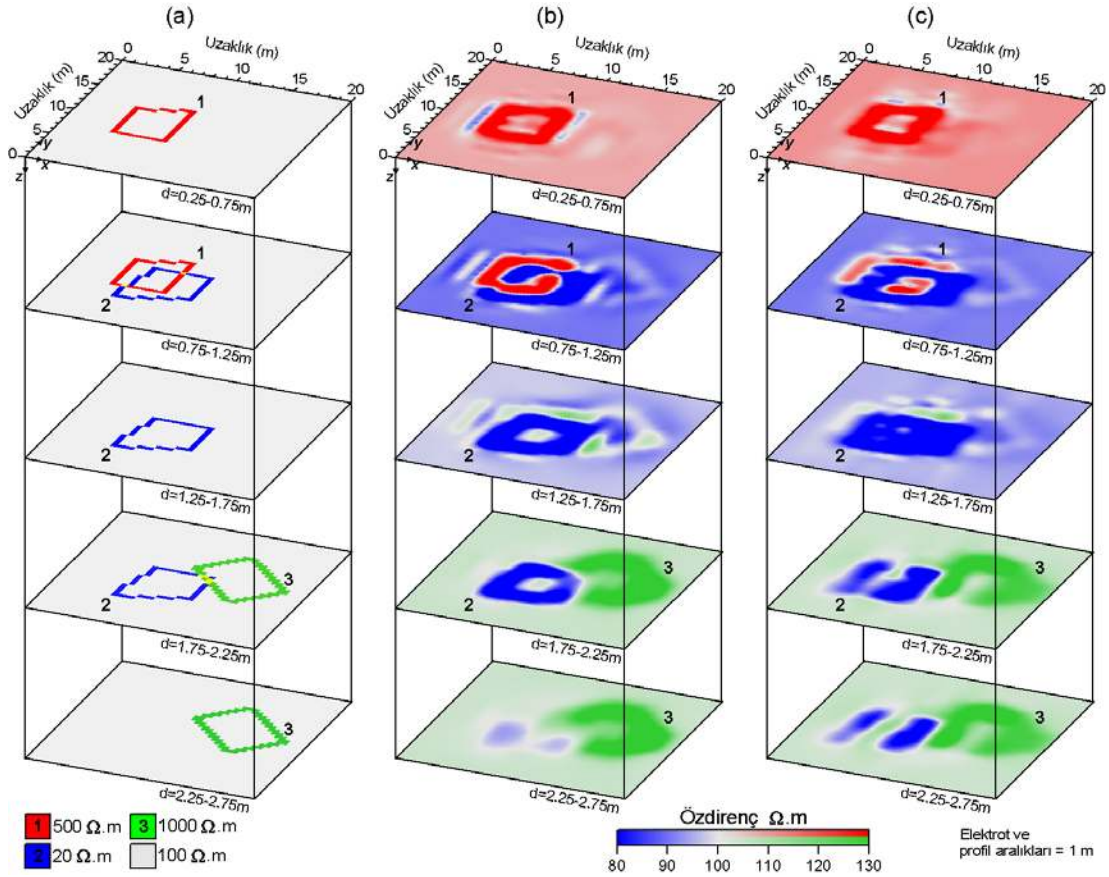
Elde edilen sonuçlara göre, yarı-tam 3B yaklaşımın kuramsal modele daha yakın sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Buna karşın kısmi-3B yaklaşımın yapıları ayırt etmeyi zorlaştıran karmaşık görüntüler sunduğu belirlenmiştir (Şekil 5.10). Kısmi-3B yaklaşımda derinliğe doğru yapı ayrırlılığının hızlıca düştüğü, özellikle üçüncü derinlik seviyesinden sonra profil yönlenmesine bağlı etkileri içerdiği izlenmiştir. Bu durum x-eksenine paralel seçilen profil ölçüm doğrultularının ters-çözüm sonucu elde edilen öz direnç değerlerine büyük ölçüde etki ettiğini göstermiştir. Özellikle derin seviyelerde profil doğrultusuna dik yönlü yapılar (y-eksenine paralel) belirlenebilirken, profil doğrultusuna paralel yapılar (x-eksenine paralel) ise gözlenememiştir. Bu problem kısmi-3B yaklaşım içerisinde kullanılan iki-boyutlu ters-çözüm algoritmasından kaynaklanmaktadır. İki-boyutlu ters-çözüm, profil

yönüne dik yöndeki öz direnç değişimine duyarlı değildir. Aksine üç-boyutlu ters-çözümün yapıldığı yarı-tam 3B yaklaşımda ise her üç yöndeki öz direnç dağılımı çözüme katıldığından bu etki gözlenmemiştir. Ters-çözüm ile belirlenen yapılar içinse yarı-tam 3B yaklaşımda, 1 ve 2 numaralı yapıların konum ve derinlik bilgileri belirlenmiştir. 3 numaralı yapının belirlenebilirliği ise diğer yapılara göre düşük kalmıştır. Bu ters-çözüm sonuçlarında 3 numaralı yapının şekli açık olarak belirlenememiştir (Şekil 5.10b). Bunun yanı sıra yapıların bulundukları derinlik seviyelerindeki öz direnç dağılımlarını baskın olarak etkiledikleri görülmüştür. Sonuç olarak yarı-tam 3B yaklaşımın daha başarılı olduğu söylenebilmektedir. Ayrıca her iki yaklaşım, tam 3-boyutlu ERT çalışmalarında kullanılamayan elektrot dizilimlerinin (pol-pol ve bazı gradyent dizilimleri haricindeki) uygulanabilirliğini göstermektedir. Dolayısıyla, ilerleyen bölümlerde çeşitli etkilerin testleri daha iyi sonuçlar ürettiği belirlenen yarı-tam 3B yaklaşıma ait kuramsal model benzetimlerinin sonuçlarıyla irdelenecektir.

5.2.2 Elektrot Dizilimlerinin Etkisi

ERT yönteminde, gömülü yapının özelliklerinin yanı sıra, kullanılan elektrot dizilimlerinin de yapı belirlenebilirliğini etkilediği bilinmektedir. Bu herhangi bir yer modeli için değişik elektrot dizilimlerine göre kuramsal ya da gözlenen görünür öz direnç değerlerinin farklı olacağı anlamına gelmektedir. Bu nedenle araştırmanın amacına uygun elektrot diziliminin seçimi araştırmanın başarısı açısından önem taşımaktadır. Özellikle arkeolojik amaçlı çalışmalarda geleneksel elektrot dizilimleri olan Wenner (Drahor ve diğer., 2008a, b), Wenner-Schlumberger (Aspinall ve Gaffney, 2001), dipol-dipol (Casana ve diğer., 2008) ve pol-pol (Papadopoulos ve diğer., 2006) dizilimlerinin yanı sıra yarım-Wenner, yarım-Schlumberger ve twin dizilimleri (Aspinall ve Lynam, 1970), gradyent dizilimi (Schlutz, 1985), odaklanmış dizilimler (Kampke, 1999), iki-yönlü üç elektrot dizilimi (Candansayar ve Başokur, 2001) ve kare dizilim (Aspinall ve Saunders, 2005; Clark, 1968) araştırmacılar tarafından tercih edilmiştir. Ayrıca, gelişen öz direnç ölçüm sistemleri de birden fazla dizilimin arazide ardı ardına ölçülebilmesine izin vermektedir. Bu durumda elektrot

dizilimlerinin başarısı istenilen yeraltı problemi için kuramsal benzetim çalışmaları ile kolaylıkla test edilebilmektedir.



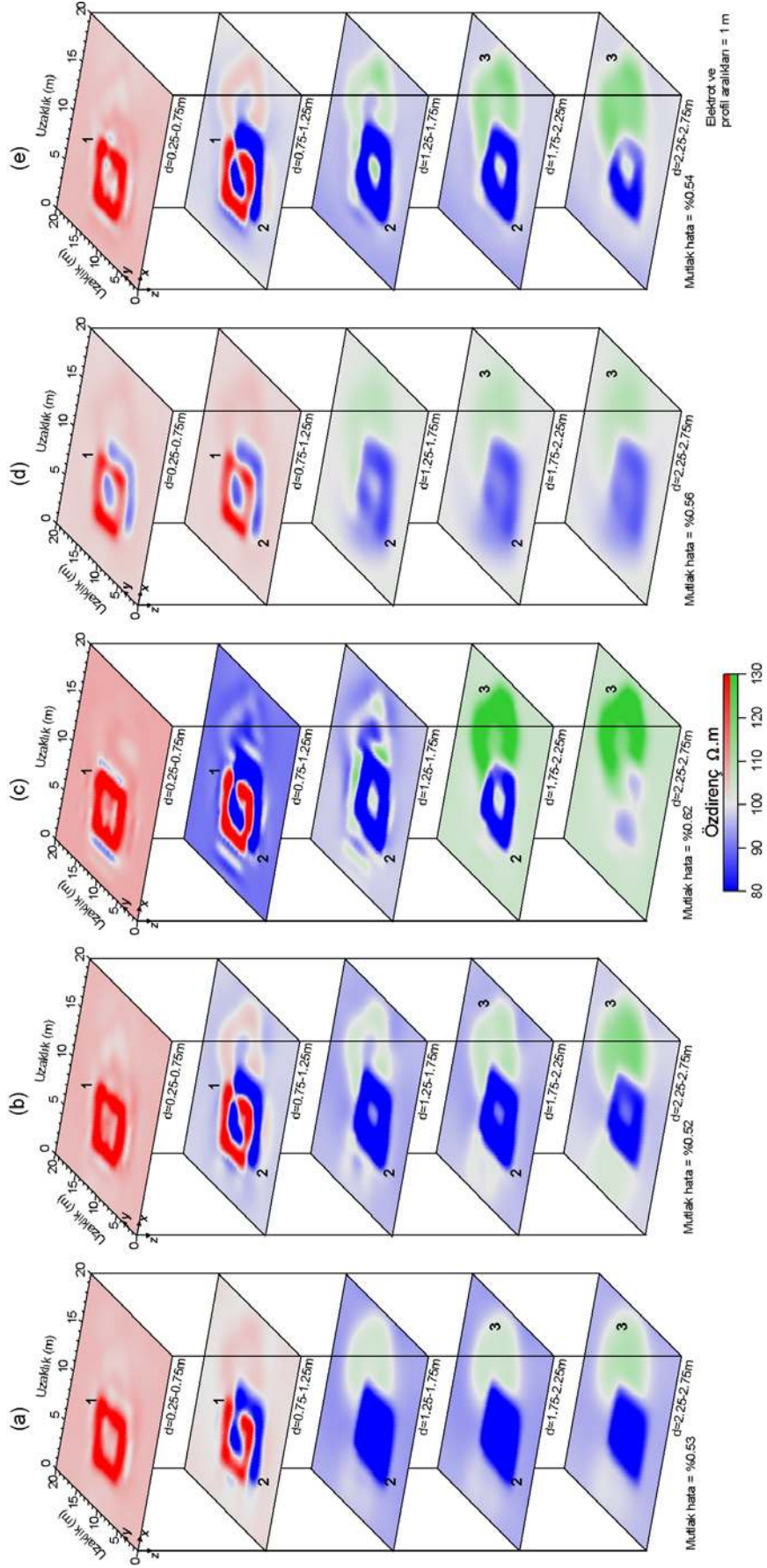
Şekil 5.10 Yapay höyük modeli (a) ve dipol-dipol dizilimi için yarı-tam (b) ve kısmi-3B (c) yaklaşımlar ile ters-çözüm sonucu elde edilen derinlik kesitleri. Ölçüm profilleri x-eksenine paraleldir.

Bu bölümde kuramsal çalışmalar ile höyük türü yerleşimlerin görüntülendirilmesi için uygun elektrot diziliminin (veya dizilimlerinin) belirlenmesine çalışılmıştır. İyi bilinen 5 dizilimin (Wenner, Wenner-Schlumberger, dipol-dipol, pol-pol ve pol-dipol) görünür özdirenç verileri yarı-tam 3B yaklaşım ile ters-çözüm değerlendirmesine tabi tutulmuştur (Şekil 5.11). Profil ve elektrot aralıklarının 1 m seçildiği uygulamada, profiller x-eksenine paraleldir. Dizilimlere ait ölçülen veri ve seviye bilgileri ise Tablo 5.2’de özetlenmiştir. Belirtilen seviyeler, tüm dizilimler için 4-5 metrelik bir derinliği tarayacak şekilde belirlenmiştir. 6 yinleme sonunda tüm dizilimler için %0,62’yi aşmayan mutlak hatalar elde edilmiştir.

Ters-çözüm model kesitlerinde elektrot dizilimleri 50-170 Ω .m aralığında değerler alırken, pol-pol dizilimi 90-140 Ω .m aralığında bir öz direnç skalası sunmuştur. Dolayısıyla, tüm derinlik kesitlerinden elverişli görüntülerin elde edilebilmesi için 80-130 Ω .m'lik öz direnç ölçeği tercih edilmiştir. Verilen derinlik kesitlerine bakıldığında, 1 numaralı yapının tüm dizilimlerin ilk derinlik kesitlerinde belirlenebildiği görülmektedir (Şekil 5.11). Pol-pol diziliminde yapı-1 ve 2 birbirinin içine geçmiş olarak gözlenmektedir (Şekil 5.11d). İletken yapı (2) için yapının geometrik şekli Wenner dizilimi hariç belirlenebilmiştir. En altta bulunan dirençli yapı (3) ise tüm dizilimlerde gözlenmektedir. Bununla birlikte dipol-dipol ve pol-dipol dizilimleri bu yapıyı daha iyi tanımlamaktadır (Şekil 5.11c ve e). Kuramsal model çalışmaları üç-katmanlı höyük modeli için bu iki dizilimin daha efektif görüntüler verdiğini göstermiştir. Ayrıca Wenner ve Wenner-Schlumberger dizilimleri en düşük çözüm gücüne sahip olarak gözlenmiştir. Bu dizilimlerin veri sayılarının da dipol-dipol ve pol-dipol dizilimlerine göre daha az olduğu unutulmamalıdır. Bunun dışında pol-dipol diziliminin 3-boyutlu ters-çözüm sonuçlarında, dizilimin asimetrik olmasından kaynaklı herhangi bir bozucu etki oluşmamıştır. Ters durumda bu dizilimin sol ve sağ yönlü olarak kullanılması ve sonucunda bu iki veri setinin birleştirilerek ters-çözümünün yapılması önerilmektedir (Candansayar, 2008; Loke, 2010).

Tablo 5.2 Üç-boyutlu ERT çalışmasında kullanılan dizilimlere ait ölçüm bilgileri.

Dizilim	Seviye Sayısı	Veri Sayısı (x-yönlü)
Wenner	9 (a=1,2,...,9)	9000
Wenner-Schlumberger	12 (a=1,2 ve n=1,2,...,6)	13440
Dipol-dipol	12 (a=1,2 ve n=1,2,...,6)	15240
Pol-pol	9 (a=1,2,...,9)	12600
Pol-dipol	12 (a=1,2 ve n=1,2,...,6)	15960



Şekil 5.11 Wenner (a), Wenner-Schlumberger (b), dipol-dipol (c), pol-pol (d) ve pol-dipol (e) dizilimlerinin yarı-tam 3B yaklaşım ile ters-çözümü sonucu elde edilen derinlik kesitleri. Ölçüm profilleri x-eksenine paraleldir.

5.2.3 Optimum Elektrik Öz direnç Tomografisi (OERT) Uygulamaları

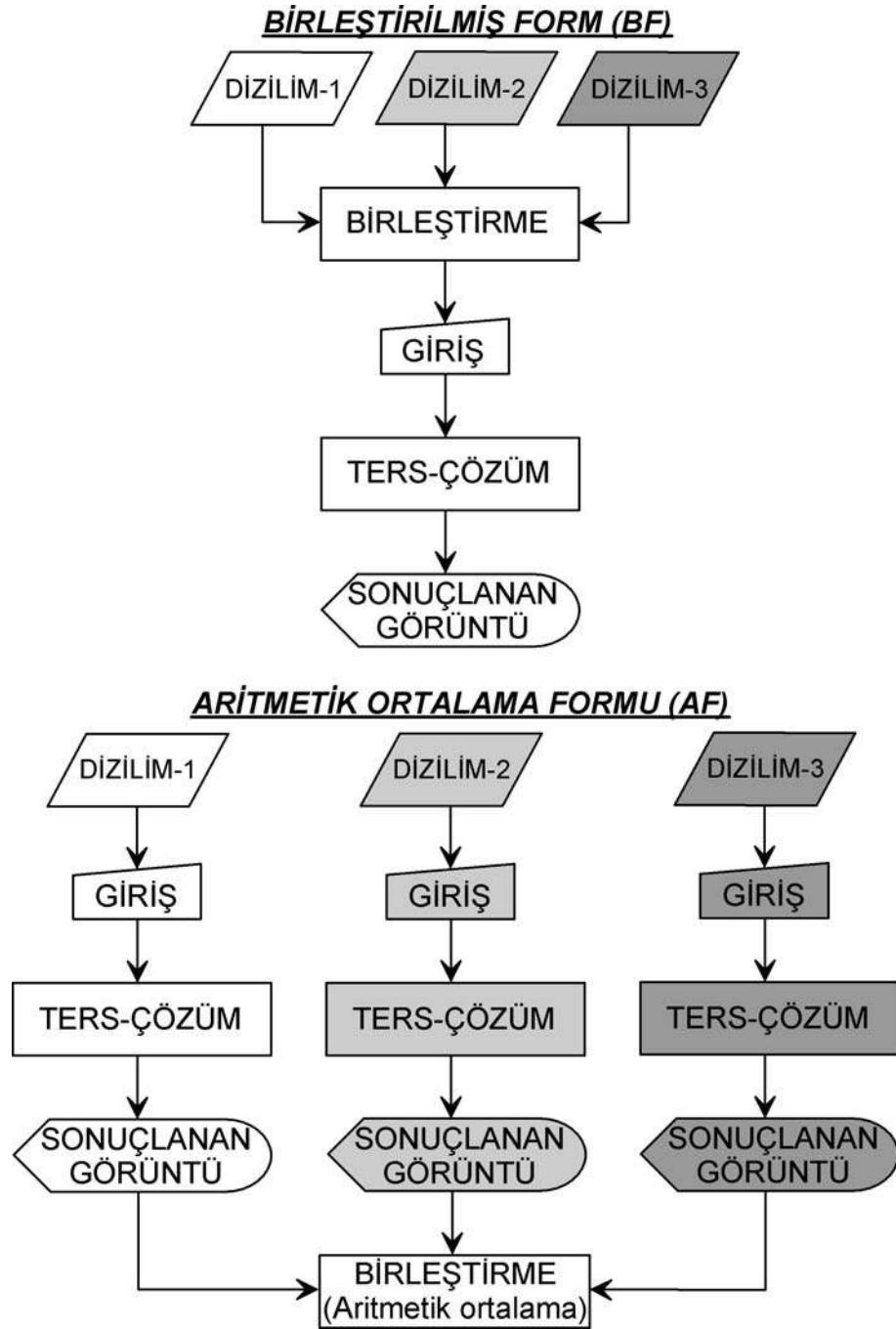
ERT yönteminde kullanılan çok-kanallı öz direnç ölçüm sistemlerinin gelişimi, arazi çalışmalarında hızlı ölçüm alınmasını olası kılarken, aynı anda birden çok dizilim verisinin toplanmasına da olanak vermektedir. Böylece aynı çalışma alanına ait birden fazla veri setine ulaşılabilir. Bu veri setleri kullanılan elektrot diziliminin farklı özelliklerini (çözünürlük, araştırma derinliği, sinyal-gürültü oranı, veri yoğunluğu ve verilerin yatayda kapladığı alan gibi) yansıtmaktadır. Bunların ters-çözüm ile değerlendirilmesi sonucunda ise farklı yeraltı görüntüleri elde edilebilmektedir ve yapay höyük modeli için bu sonuçlar önceki bölümde irdelenmiştir. Optimum bir yeraltı görüntüsünü elde etmek için yapılacak iyileştirme tekniklerinin önemi de burada ortaya çıkmaktadır. Örneğin Stummer ve diğer. (2004), Wilkinson ve diğer. (2006) ile Loke ve diğer. (2007) belirli ve sınırlı sayıdaki elektrottan oluşan bir ölçü sistemi için geleneksel tek bir dizilime göre yeraltından elde edilecek bilgiyi daha iyi yapmayı amaçlayan iyileştirilmiş elektrot düzenlerini önermiştir. Böylece çoklu dizilim geometrilerinden üretilen dizilim setlerinin uygulamalarıyla daha kesin yeraltı görüntülerinin elde edilmesine çalışılmaktadır. Bu tür iyileştirilmiş dizilim setlerinin çok fazla ölçüm gerektirmesinin rutin ERT ölçümleri için bir engel oluşturabileceği unutulmamalıdır. İyileştirilmiş dizilimler, tek bir dizilimden başlayarak yinelemeli bir yol ile yüksek model çözünürlüğüne ulaşmaya çalışan bilgisayar algoritmaları kullanılarak hesaplanmaktadır. Burada model çözünürlüğü, hesaplanan duyarlık değerlerinden elde edilmektedir (Wilkinson ve diğer., 2006). Stummer ve diğer. (2004) bu iyileştirme işlemini, dizilimlerin duyarlıklarının maksimum olduğu elektrot çiftlerini saptayarak başarmıştır. Diğer yandan de la Vega ve diğer. (2003), Athanasiou ve diğer. (2007) ile Candansayar (2008) ters-çözüm sonucunu güçlendirecek bir yol olarak farklı dizilimlerden elde edilen görünür öz direnç verisinin birleşik ters-çözümünü önermektedir. Burada her bir dizilim için hesaplanan bir ağırlıklandırma katsayısını kullanarak birleşik ters-çözüm gerçekleştirilmektedir. Sonuç olarak bu araştırmacılar, ters-çözüm ile elde edilen yeraltı görüntüsünde önemli gelişmelerin olduğunu belirtmektedirler.

Bu iyileştirme yöntemleri dışında bu tez kapsamında iki farklı yaklaşım ile optimum (en uygun) elektrik öz direnç tomografisi (OERT) kavramı oluşturulmuş ve incelenmiştir. Buna göre OERT için aynı profil ya da alandan farklı dizilimler ile ölçülmüş veri setleri kullanılarak birleştirilmiş ve aritmetik ortalama formu yaklaşımları önerilmiştir. Bu yöntemlerin uygulamasına ilişkin akış şemaları Şekil 5.12’de gösterilmektedir. Bu uygulamalar kullanılan ters-çözüm algoritması üzerinde herhangi bir değişiklik yapılmasını gerektirmemektedir.

Bu yaklaşımlara göre, birleştirilmiş form birden çok dizilimin veri setini bir araya getirmektedir. Daha sonra, bu birleştirilmiş veri seti 2- ve 3-boyutlu ters-çözüm ile değerlendirilmektedir. Ters-çözüme karışık dizilim (mixed array) olarak tanıtilan bu birleştirilmiş veri seti için herhangi bir özel dizilim ağırlıklandırması kullanılmamaktadır (Loke, 2010). İlk kez bu tez çalışmasında uygulanan aritmetik ortalama formu ise, birden çok dizilimin ayrı ayrı ters-çözüm değerlendirmesi ile başlamaktadır. Tek dizilimlerden elde edilen tüm sonuç görüntüler 2-boyutlu ERT ölçümleri için NxM boyutlu bir matris ve 3-boyutlu ERT ölçümlerinde ise derinlik kesitlerine karşılık gelen birden fazla NxM boyutlu matris olarak düşünülmektedir. Dizilimlerden elde edilen bu matrisler (5.1) denklemiyle verilen aritmetik ortalama işlemi ile birleştirilmektedir. Böylece ortalama işlemine giren tüm dizilimlere ait birleştirilmiş bir yeraltı modeli elde edilebilmektedir.

$$D_{ij}^{\text{aritmetik}} = \frac{\sum_{k=1}^L (D_{ij}^{\text{dizilim}(k)})}{L} \quad (5.1)$$

Burada $i=1,2,3,\dots,N$; $j=1,2,3,\dots,M$ ve $k=1,2,3,\dots,L$ olmak üzere, aritmetik ortalama formunun ij elemanı ($D_{ij}^{\text{aritmetik}}$), ters-çözümlenen “L” adet dizilimin ($D_{ij}^{\text{dizilim}(k)}$) her bir ij elemanının toplanıp, kullanılan toplam dizilim sayısına (L) bölünmesiyle hesaplanmaktadır. Bu bölümde tez çalışmasında kullanılan Wenner, Wenner-Schlumberger, dipol-dipol, pol-pol ve pol-dipol dizilimleri belirtilen bu iki yaklaşım ile değerlendirilmiş ve yapay höyük modeli için optimum elektrik öz direnç tomografisi (OERT) sonucunu veren dizilim iyileştirmesi belirlenmeye çalışılmıştır.

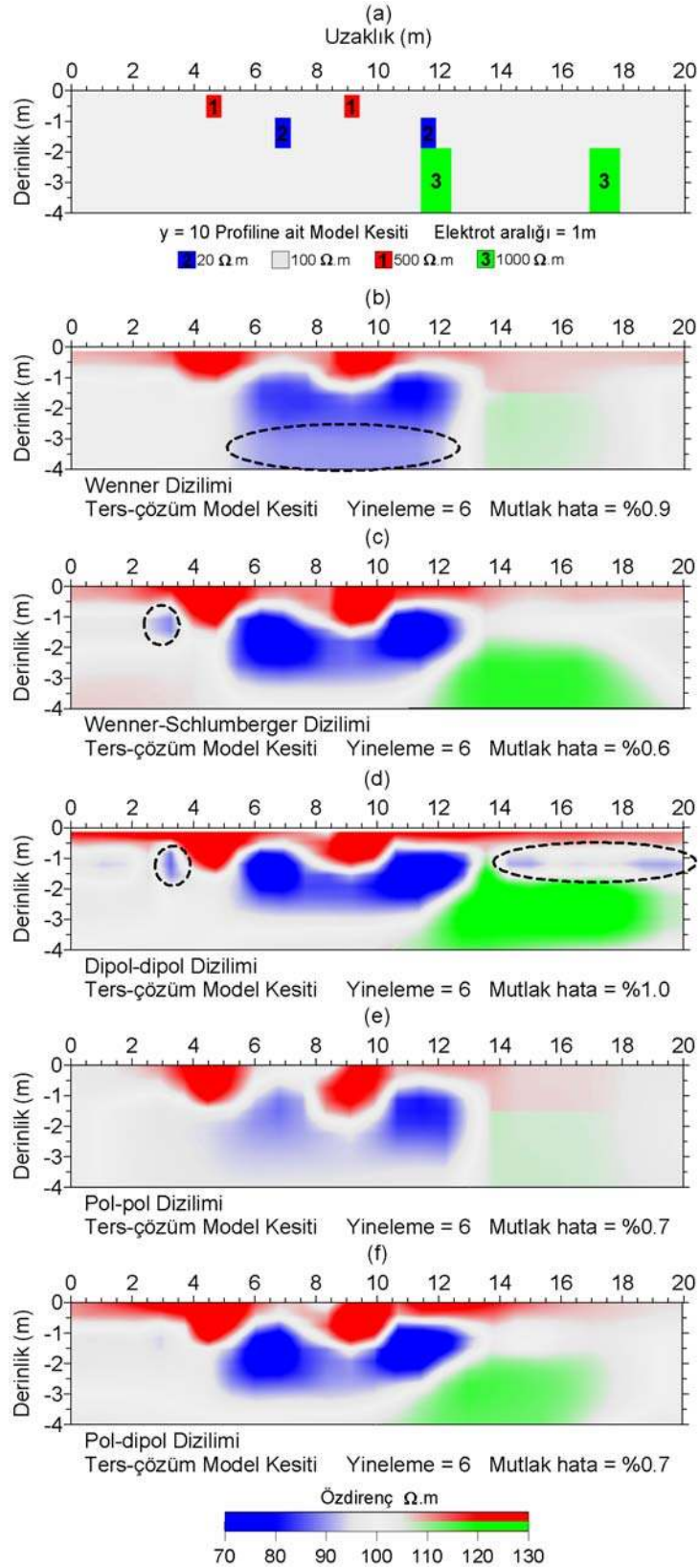


Şekil 5.12 OERT'nin elde edilmesinde kullanılan birleştirilmiş ve aritmetik ortalama formları için akış şemaları.

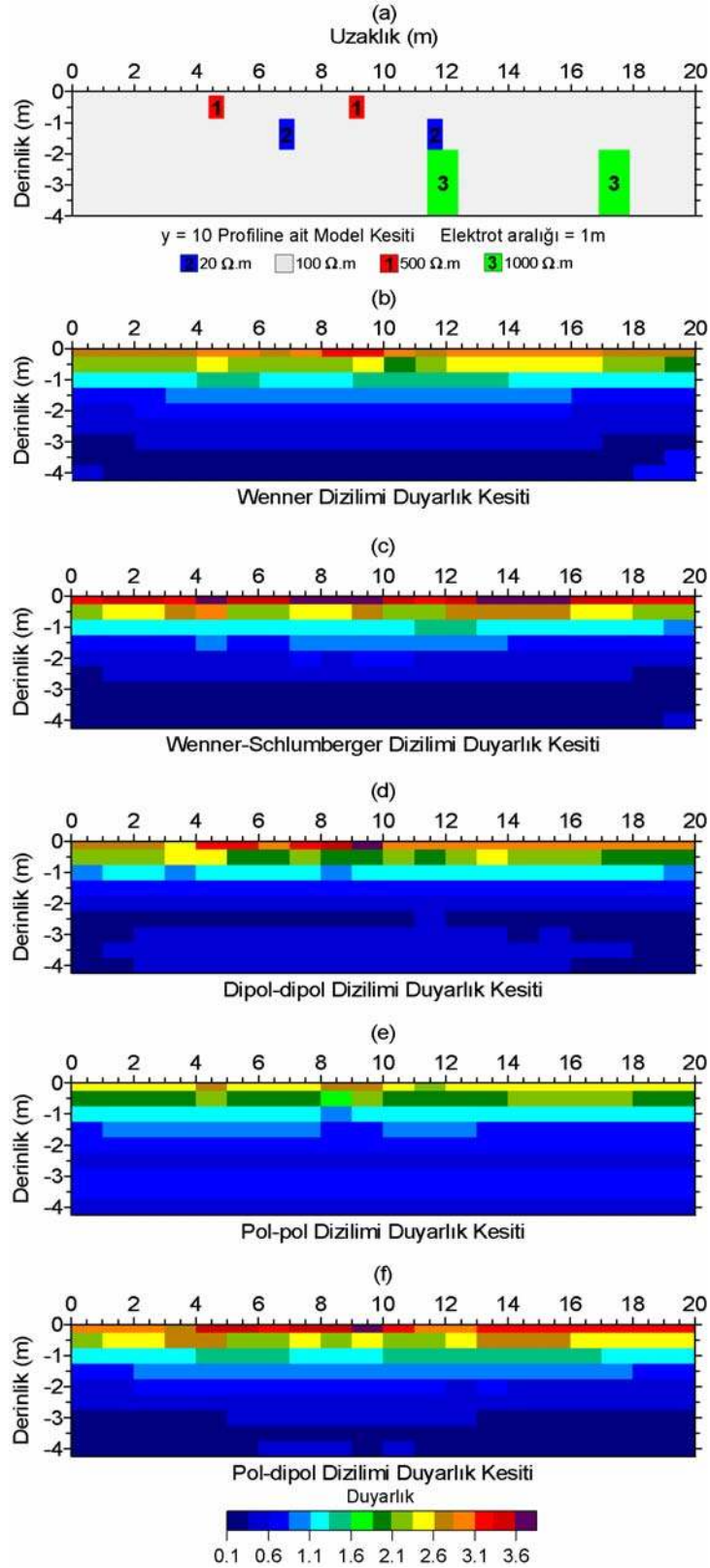
5.2.3.1 İki-boyutlu Ölçümler için OERT Uygulamaları

İki-boyutlu ölçümlerde OERT uygulamaları için aynı ölçüm profili üzerinden birden fazla dizilime ait görünür öz direnç veri setinin ölçülmesi gerekmektedir. Buna

göre modelleme çalışmasında yapay höyük modeli üzerinde $y=10$ profilinden hesaplanan görünür öz direnç veri setleri kullanılmıştır (Şekil 5.6). Böylece beş dizilime ait veri setleri 1 m elektrot aralığı için oluşturulmuş (Şekil 5.3) ve bu veriler bloklu ters-çözüm ile 6 yinelemeye kadar değerlendirilmiştir. Elde edilen kesitler Şekil 5.13'de verilmiştir. Yapay modelin ortasından geçen $y=10$ profili için dizilimlerden elde edilen model kesitlerin genel karakteristiklerinin benzediği, buna karşın dizilimlerin model yapılarını belirleme başarılarının birbirlerinden farklı olduğu görülmektedir. Dizilimlerin farklı olan ölçüm seviyesi, veri sayısı, geometrik faktör ve buna bağlı çözünürlük ile araştırma derinliği gibi özellikleri ters-çözüm kesitlerindeki farklılıkları oluşturmaktadır. Elde edilen sonuçlarda, tüm dizilimler 1 numaralı dirençli yapıları belirleyebilmiştir. Model kesitlerinde bu sığ derinlik seviyesi için (0-0,5 m) dipol-dipol ve pol-dipol dizilimlerinde daha belirgin olarak gözlenebilen yüksek öz dirençli bir tabaka ortaya çıkmıştır (Şekil 5.13d ve f). Pol-pol diziliminde gözlenmeyen bu tabaka, dizilimlerin yüzeye en yakın bu bölümden ne kadar etkilendiklerini de göstermiştir. Daha derinde bulunan 2 numaralı iletken yapılar ise Wenner ve pol-pol dizilimleri hariç diğer dizilimlerin model kesitlerinde iyi bir ayrımlılık ile belirlenmiştir. Wenner diziliminden elde edilen model kesitinde bu yapılar altında düşük öz dirençli bir ortam (elips ile gösterilen) gözlenmiştir (Şekil 5.13c). Ayrıca Wenner-Schlumberger ve dipol-dipol dizilimlerine ait model kesitlerin 1-1,5 metre derinlik seviyelerinde 85-95 $\Omega.m$ öz dirence sahip bazı sahte yapılar elipsler ile gösterilmiştir (Şekil 5.13c ve d). Dizilimlere ait model kesitlerinde 3 numaralı dirençli yapıların belirlenemediği, yapının beklendiği yerlerde öz direnç değerlerinin yükseldiği ($>110 \Omega.m$) gözlenmiştir. Bu durum elektrik öz direnç yönteminin ayrımlılığının derine doğru düşmesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca ters-çözüm işleminin bu derinlikteki öz direnç değişimini iyi çözümleyemediği ortaya çıkmıştır. Bu durum dizilimler için oluşturulan duyarlık kesitlerinden de anlaşılabilmektedir (Şekil 5.14).



Şekil 5.13 y = 10 profiline ait model kesiti (a) ile Wenner (b), Wenner-Schlumberger (c), dipol-dipol (d), pol-pol (e) ve pol-dipol (f) dizilimlerinden elde edilen ters-çözüm model kesitleri.

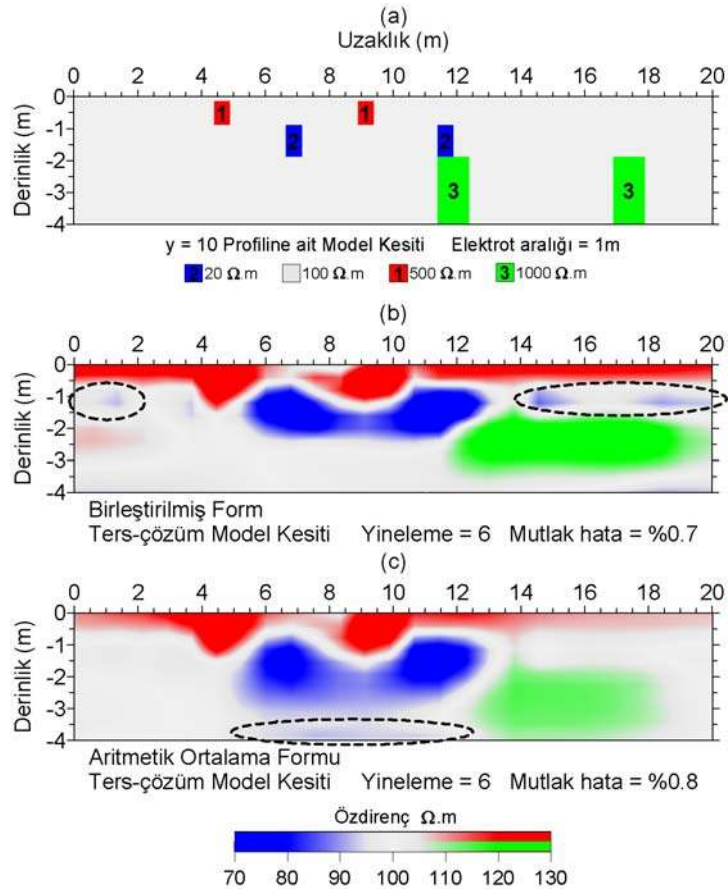


Şekil 5.14 y = 10 profiline ait model kesiti (a) ile Wenner (b), Wenner-Schlumberger (c), dipol-dipol (d), pol-pol (e) ve pol-dipol (f) dizilimlerinden elde edilen duyarlık kesitleri.

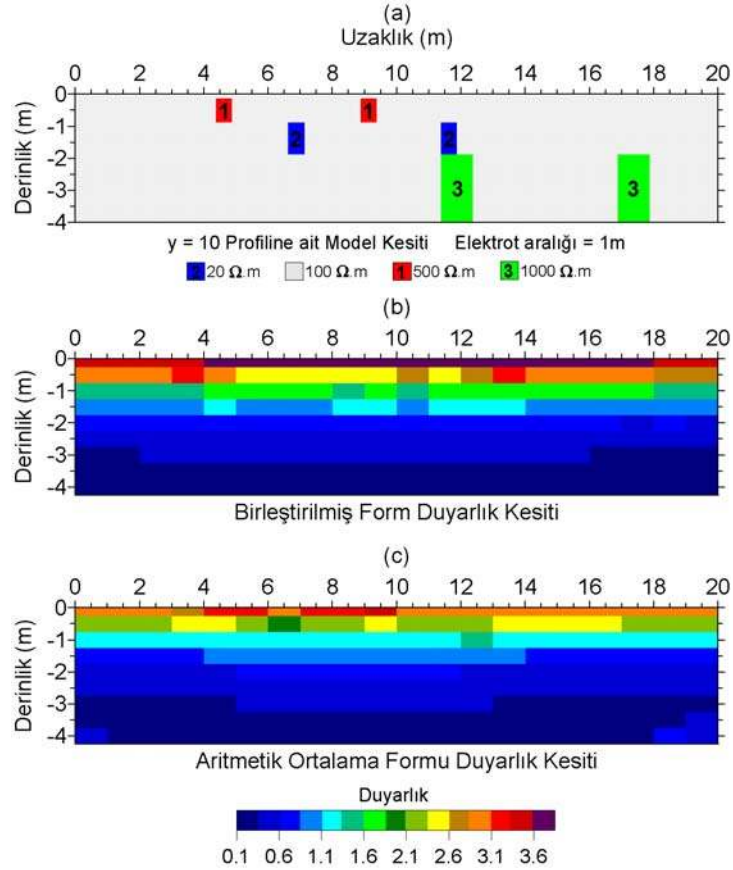
Duyarlık kesitlerinde dizilimlerin duyarlık değerlerinin 2,25 m derinlikten sonra 0,85 değerinin altına düştüğü gözlenmiştir. Bu derinlikte bulunan 3 numaralı yapıların boyut ve şekillerinin belirlenememiş olması, duyarlığın düşük olduğu bu seviyenin ters-çözüm sonucunda iyi tanımlanamadığını göstermiştir. Elektrotlar çevresinde gözlenen yüksek duyarlık değerlerine göre, Wenner-Schlumberger, pol-dipol ve dipol-dipol dizilimleri 3,6 ve üzeri duyarlık değeri verirken, Wenner dizilimi 3,25 ve pol-pol dizilimi ise 2,8 duyarlık değeri sunmuştur (Şekil 5.14).

Aynı örnek profil için birleştirilmiş ve aritmetik ortalama formlarından elde edilen sonuçlar Şekil 5.15'de verilmiştir. Birleştirilmiş formda ters-çözümlenen görünür öz direnç veri sayısı beş dizilimin veri setlerinin bir araya getirilmesiyle 1656 olmuştur. Model kesitlerine bakıldığında, birleştirilmiş form model kesitinin büyük oranda dipol-dipol dizilimi sonucuna benzediği görülmüştür (Şekil 5.13d ve 5.15b). Bu dizilimde 1-1,5 metre derinlik seviyelerinde gözlenen sahte yapılar birleştirilmiş form çözümünde de ortaya çıkmıştır (elipsler ile gösterilen). Aritmetik ortalama formu ise, Wenner ve pol-pol dizilimlerinin sonuçlarını daha iyiye götüren ve dipol-dipol dizilimindeki 1-1,5 m derinlik aralığında gözlenen sahte yapıları model kesitine almayan bir sonuç vermiştir. Buna karşın Wenner diziliminde iletken yapılar altında gözlenen öz direnç artışı aritmetik ortalama formunda da etkisini göstermiştir (Şekil 5.13 ve 5.15c). Duyarlık kesitleri incelendiğinde ise birleştirilmiş form yaklaşımının daha yüksek değerler sunduğu (maksimum 5,1), aritmetik ortalama formunun daha yumuşak geçişler ile düşük değerler (maksimum 3,5) verdiği görülmüştür (Şekil 5.16). Bu durum, birleştirilmiş formun ters-çözümlenen öz direnç değişimlerini güçlendirdiği, buna karşın aritmetik ortalama formunun ise kullanmış olduğu ortalama işlemi dolayısıyla daha düşük duyarlıklar ürettiği şeklinde yorumlanmıştır. Birleştirilmiş formun sunduğu görüntülerde her türlü görünür öz direnç verisini (yapı veya gürültü kaynaklı) daha belirgin bir şekilde ortaya çıkarmaya meyilli olmasının, gürültü içeriği yüksek olan dizilimler ile yapılan birleştirme işlemlerinde problem yaratabileceği izlenimi doğmuştur. Aritmetik ortalama ise kullanılan dizilimlerin özelliklerine göre baskın olarak tanımlanabilecek dipol-dipol ve pol-dipol gibi dizilimlerin ters-çözüm sonuçları üzerinde bir yuvarlatma işleci gibi davranarak hatalı olabilecek yapı izlerini yumuşattığından daha başarılı bir dizilim iyileştirmesi

yöntemi olarak tanımlanmıştır. Bu durumda yüksek duyarlık değerlerine birleştirilmiş form ile ulaşılmış olması bu yaklaşımın daha başarılı olarak yorumlanamayacağını da göstermiştir. Genel olarak bakıldığında, aritmetik ortalama formu kullanılarak gerçekleştirilen OERT uygulamasının, seçilen beş dizilimin tekil kullanımına göre daha başarılı yeraltı görüntüleri sunduğu söylenebilmektedir.



Şekil 5.15 y = 10 profiline ait model kesiti (a) ile birleştirilmiş (b) ve aritmetik ortalama (c) formları için elde edilen ters-çözüm model kesitleri.

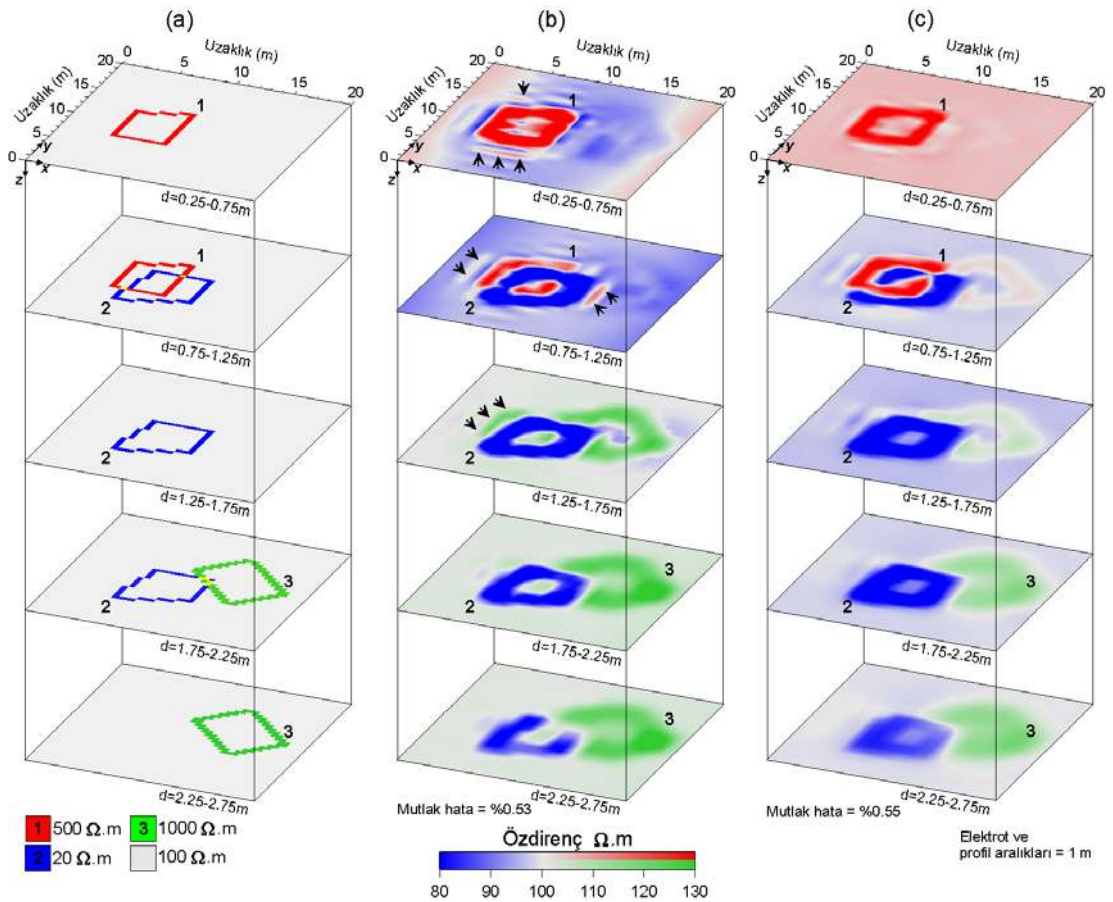


Şekil 5.16 y = 10 profiline ait model kesiti (a) ile birleştirilmiş (b) ve aritmetik ortalama (c) formları için elde edilen duyarlık kesitleri.

5.2.3.2 Üç-boyutlu Ölçümler için OERT Uygulamaları

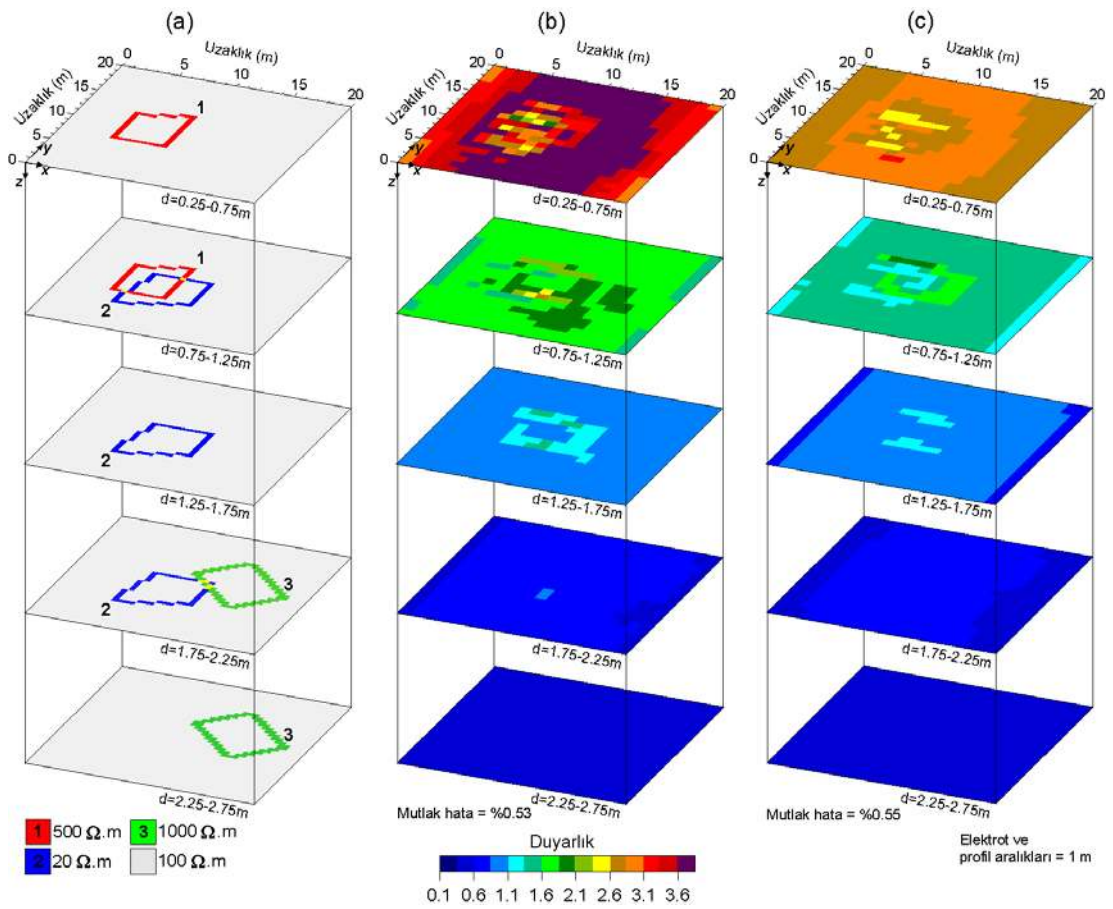
Aynı çalışma alanı üzerinde birden fazla dizilimin kullanılmasıyla gerçekleştirilen üç-boyutlu ERT ölçümleri, çalışma alanı için OERT uygulamalarını olası kılmaktadır. Böylece yapay höyük modelinden beş farklı dizilim kullanılarak elde edilen veri setleri yarı-tam 3B yaklaşım ile değerlendirilmiştir. 6 yinelemeye kadar sürdürülen ters-çözüm sonucunda beş dizilim için Şekil 5.11'deki derinlik kesitlerine ulaşılmıştır. Üç-boyutlu OERT uygulamalarında da birleştirilmiş ve aritmetik form yaklaşımları için bu dizilimler birlikte kullanılmıştır. Ölçüm profillerinin x-ekseni doğrultusunda olduğu ve 1 m elektrot ile profil aralığından üretilen üç-boyutlu görünür öz direnç veri setleri ile birleştirilmiş form için beş dizilimden toplam 66240 veri elde edilmiştir. Buna göre, Şekil 5.17'de sunulan yapay höyük modeli ile

birleştirilmiş ve aritmetik ortalama formları için elde edilen derinlik kesitlerinde, dirençli ve iletken yapılar gözlenebilmiştir. Her iki OERT yaklaşımı da yapı belirlenebilirliği anlamında oldukça benzer sonuçlar üretmiştir (Şekil 5.17b ve c). Buna karşın, 0,75-1,25 ve 1,25-1,75 m derinliklerini gösteren kesitlerde birleştirilmiş form yaklaşımı modelde var olmayan (oklar ile gösterilen) yapılar ortaya çıkarmıştır. Bu durum aritmetik ortalama yaklaşımında çok daha az gözlenmiştir. Özellikle dipol-dipol dizilimine ait derinlik kesitlerinde (Şekil 5.11c) gözlenen bu olgu, birleştirilmiş form çözümünü (Şekil 5.17b) oldukça etkilemiştir. İki-boyutlu OERT sonuçlarında da karşılaşılan bu durum, birleştirilmiş formun yapı belirlenebilirliğini artırmasının yanı sıra dipol-dipol diziliminden gelen ve yapay modelde olmayan sahte yapıları da güçlendirdiğini göstermiş ve bu yaklaşımın zayıf yanı olmuştur. Aritmetik ortalama formu ise bu izleri sönmüştür. Nitekim bu sönmüleme 2 ve 3 numaralı yapıların şekillerinin belirlenebilirliğinin düşmesine de sebep olmuştur (Şekil 5.17c).



Şekil 5.17 Yapay höyük modeli (a) ile birleştirilmiş (b) ve aritmetik ortalama (c) formları için ters-çözümü sonucu elde edilen derinlik kesitleri. Ölçüm profilleri x-eksenine paraleldir.

Bu iki OERT yaklaşımından elde edilen duyarlık kesitlerinde ise birleştirilmiş form yaklaşımının aritmetik ortalama formuna göre daha yüksek duyarlık değerleri verdiği gözlenmiştir (Şekil 5.18). Özellikle birleştirilmiş form yaklaşımının ilk iki derinlik seviyesi için (0,25-1,25 m arası) yüksek duyarlık değerleri elde edilirken, izleyen derin seviyelerde her iki yaklaşımın duyarlık değerleri yakın değerler vermiştir. Bu durum 1. ve 2. seviyelerin ters-çözüm sonuçlarının birleştirilmiş form yaklaşımında daha yüksek ve düşük öz direnç değerleri ile çözümlendiğini doğrulamıştır (Şekil 5.18b). Sonuç olarak, bu çalışmada birden fazla dizilimin OERT uygulamasının, tek dizilim kullanımına göre daha çok bilgi verdiği gösterilmiştir. Arkeolojik amaçlı bu yapay höyük modeli uygulamasında aritmetik ortalama yaklaşımının, tek bir dizilimin ters-çözüm sonucu ve birleştirilmiş form iyileştirmelerinden daha güvenilir sonuçlar ürettiği belirlenmiştir. Bu durum hem iki- hem de üç-boyutlu çalışmalarla ortaya konmuştur.



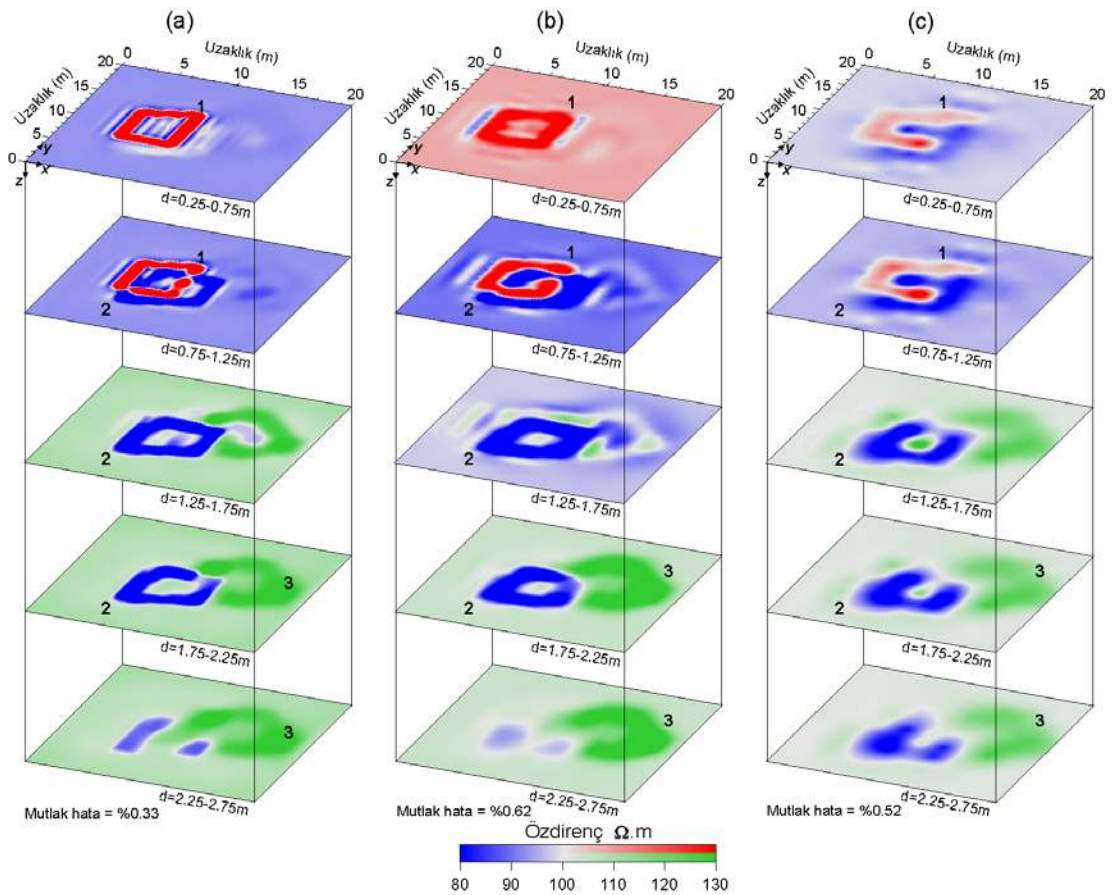
Şekil 5.18 Yapay höyük modeli (a) ile birleştirilmiş (b) ve aritmetik ortalama (c) formları için elde edilen duyarlık kesitleri. Ölçüm profilleri x-eksenine paraleldir.

5.2.4 Elektrot ve Profil Aralıklarının Etkisi

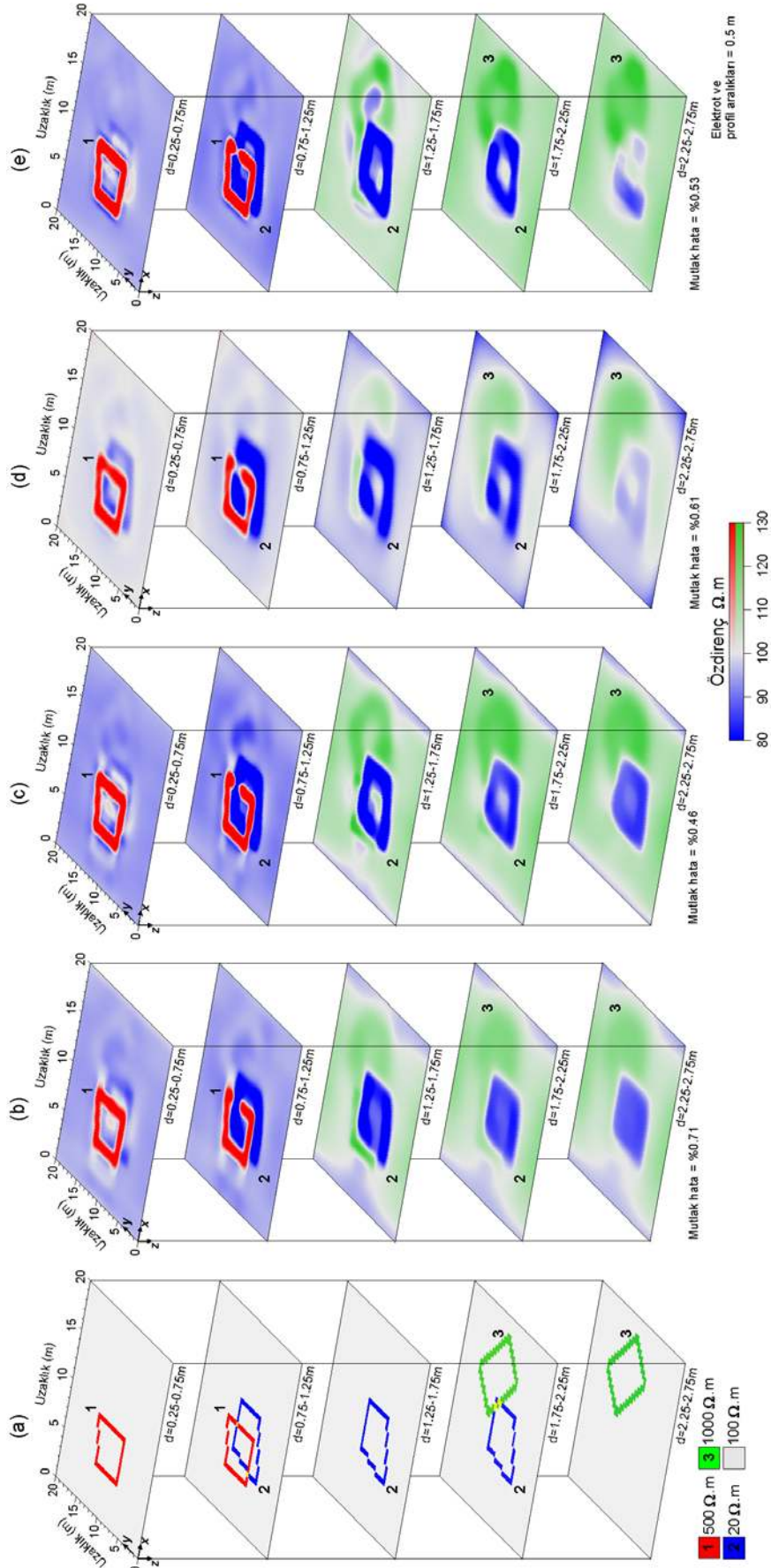
Elektrik öz direnç yönteminde, ölçümler sonucu hedef yapının belirlenmesindeki en önemli etkenlerden biri de, yeryüzünde ölçüm alanını çevreleyen elektrotlar ile yapının etkisini en iyi şekilde tanımlayabilecek uygun ölçüm düzenini bulmaktır. Bunun için, kullanılacak elektrot diziliminin seçiminden sonra hedef yapıyı tanımlayacak en uygun ölçüm aralıklarının (elektrot ve profil) belirlenmesi gerekmektedir. Burada elektrot aralıkları araştırma derinliği ve yapı belirlenebilirliğini kontrol ederken, profil aralıkları ise ters-çözüm sonucu görüntünün çözünürlüğünü etkilemektedir. Bu aşamada elektrot ve profil aralıkları arkeolojik amaçlı arazi çalışmalarında tercih edilen değerlere göre sırasıyla 0,5, 1 ve 2 m seçilmiştir (Şekil 5.5). Bu değerlerin yapay höyük modeli üzerindeki etkilerinin tartışılması için x-eksenine paralel yönlü profiller kullanılarak dipol-dipol diziliminin yarı-tam 3B ters-çözüm sonuçları sunulmuştur (Şekil 5.19). Elde edilen derinlik kesitlerinden, sık elektrot ve profil aralıklarının (0,5x0,5m) yapay höyük modeli için en tanımlayıcı sonucu verdiği görülmüştür. Böylece yapı-1 ve 2'nin şekilleri açıkça tanımlanabilmektedir. Yapı-3 ise yapı şekli olarak yine bu kullanımda daha iyi belirlenmiştir (Şekil 5.19a). 1x1 metrelik ölçüm aralıklarının kullanımda ise tatmin edici sonuçlar alınmıştır. Fakat hedef yapıların duvar kalınlıklarının sık ölçüm aralığına göre kalınlaştığı gözlenmiştir (Şekil 5.19b). Buna karşın geniş ölçüm aralıklarının kullanımında (2x2 m) ise doğru bir yorumlama için yeterli bir sonuç alınamamıştır. Bu ölçüm aralığında hedef yapıların konumları belirlenebilirken, şekilsel özelliklerinin oldukça bozulduğu görülmüştür. Bu ölçüm düzeni ile elde edilen 0,25-0,75 ve 0,75-1,25 m derinliklere ait kesitler birbirine oldukça benzer görüntüler sunmuştur. Bu durum 2 m elektrot aralığının yüzeye yakın seviyelerde yeterli ayrımı verememesinden kaynaklanmaktadır. Benzer şekilde bu ölçüm aralığı derinlik ekseninde (z-) hedef yapıların belirlenebilirliği de oldukça fazla etkilemiştir (Şekil 5.19c).

Sonuç olarak höyük türü yerleşmeler için yeterli ve iyi tanımlanmış bir yerleşim planının elde edilebilmesi 0,5x0,5 ve 1x1 metrelik elektrot-profil aralıklarının kullanımıyla olası olacağı yapay model çalışması ile belirlenmiştir. Bu durumda,

arazi çalışmasında ölçülecek veri sayısı ve buna bağlı olarak artacak ölçüm ile bilgisayar hesaplama süresi dikkate alınmalıdır. Tablo 5.3’de beş dizilim için x-yönlü profiller üzerinden farklı ölçüm aralıkları kullanılarak elde edilecek görünür öz direnç veri sayıları verilmiştir. En yüksek veri sayısına ulaşılan 0,5 m elektrot ve profil aralığı kullanımı için dipol-dipol haricindeki diğer dizilimlerden (Wenner, Wenner-Schlumberger, pol-pol ve pol-dipol) yarı-tam 3B ters-çözüm sonucu elde edilen derinlik kesitleri ise Şekil 5.20’de verilmiştir. Bu sonuçlardan sık aralık kullanımının bu dizilimler için de yapı belirlenebilirliğini arttırdığı görülebilmektedir. 1 numaralı dirençli yapı tüm dizilimlerde benzer şekilde tanımlanabilirken, bunu izleyen 2 numaralı iletken yapının şekli Wenner-Schlumberger (Şekil 5.20c) ve pol-dipol (Şekil 5.20e) dizilimlerinde dipol-dipol (Şekil 5.19a) dizilimi ile kıyaslanabilecek kadar başarılı saptanmıştır. Yapay höyük modelinde en altta bulunan dirençli yapı (3) ise şekil olarak ancak pol-dipol (Şekil 5.20e) diziliminde ayırt edilebilmiştir.



Şekil 5.19 Yapay höyük modelinden dipol-dipol dizilimi için a) 0,5x0,5 m, b) 1x1 m ve c) 2x2 m elektrot ve profil aralıkları kullanılarak yarı-tam 3B yaklaşım ile elde edilen derinlik kesitleri. Ölçüm profilleri x-eksenine paraleldir.



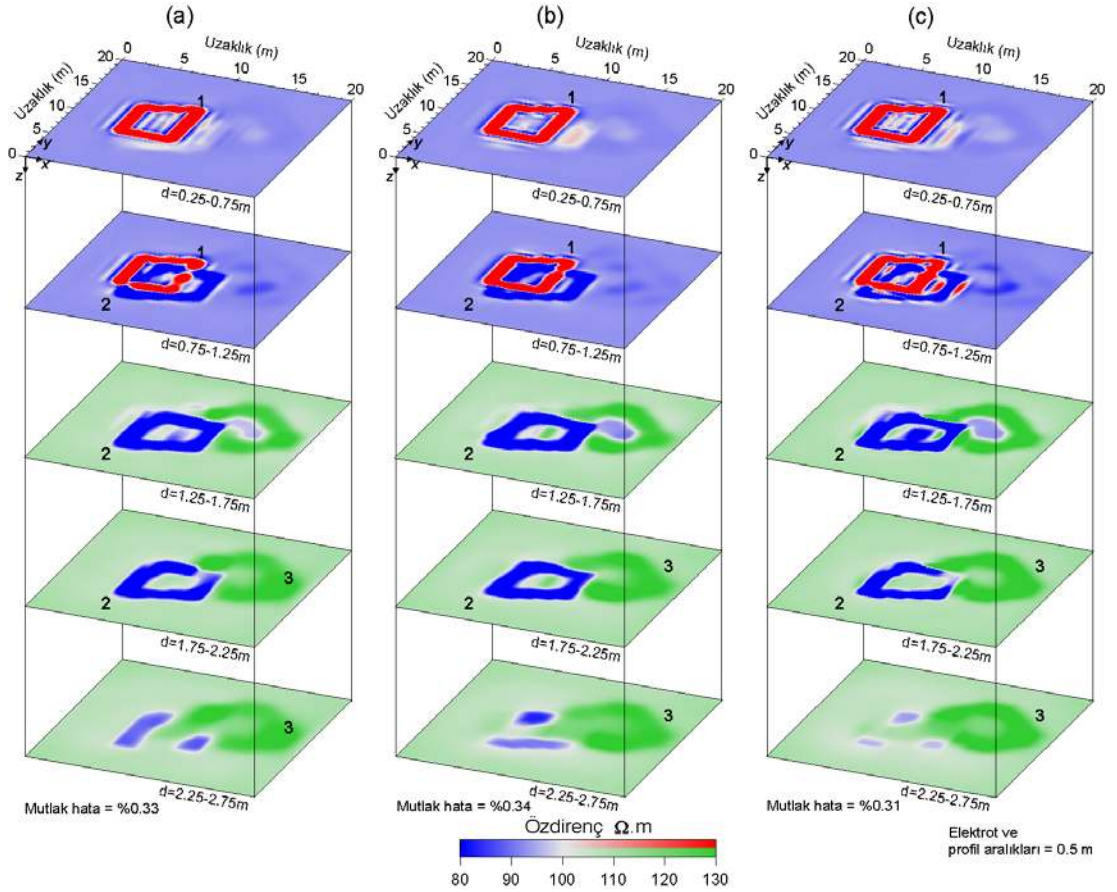
Şekil 5.20 Yapay höyük modelinden (a), 0.5x0.5 m elektrot ve profil aralıkları kullanılarak Wenner (b), Wenner-Schlumberger (c), pol-pol (d) ve pol-dipol (e) dizilimleri için yarı-tam 3B yaklaşım ile elde edilen derinlik kesitleri. Ölçüm profilleri x-eksenine paraleldir.

Tablo 5.3 Üç-boyutlu ERT ölçümlerinde dizilimler için elektrotlar ve profiller arası aralıkların değişimi sonucunda ulaşılan görünür öz direnç veri sayıları.

Dizilim	Elektrot-profil aralığı 0,5m	Elektrot-profil aralığı 1m	Elektrot-profil aralığı 2m
Wenner	18300	9000	1000
Wenner-Schlumberger	30600	13440	1440
Dipol-dipol	33800	15240	1740
Pol-pol	20250	12600	1380
Pol-dipol	36900	15960	1860

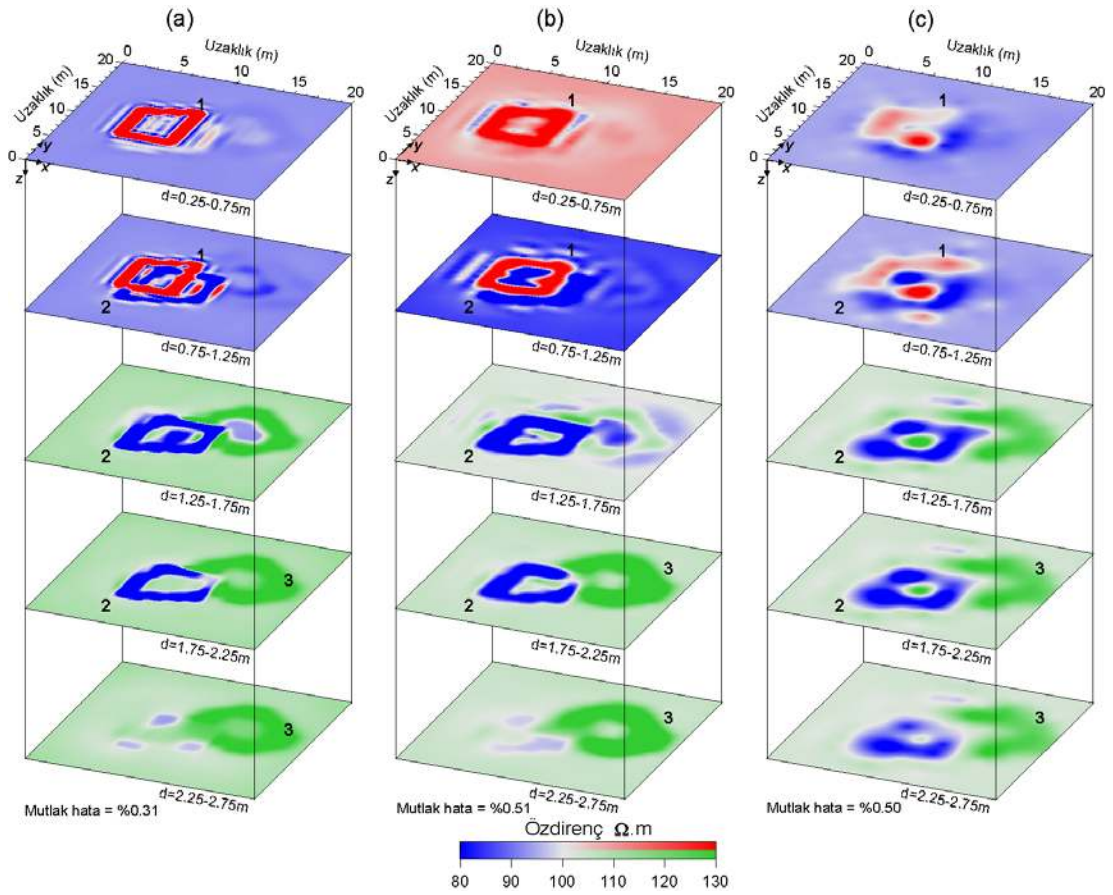
5.2.5 Profil Yönlenmesinin Etkisi

Profil yönünün seçimi, sığ yeraltı araştırmalarında önemli bir olgudur. Bu durum arkeoloji amaçlı çalışmalarda ERT ve yeraltına nüfuz eden radar yöntemleri için araştırmacılar tarafından incelenmiştir (Chambers ve diğer., 2002; Gharibi ve Bentley, 2005; Neubauer ve diğer., 2002; Papadopoulos ve diğer., 2006; Seren ve diğer., 2007). Üç-boyutlu ERT uygulamalarında birbirine paralel ölçüm profillerinin yönelimi elde edilen sonuçları etkilemektedir. Bu olgunun irdelenmesi için bu tez kapsamında çok katmanlı höyük modeli üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Buna göre dipol-dipol diziliminin 0,5 m elektrot ve profil aralığı kullanılarak birbirine dik iki yöndeki (x- ve y-) ölçüm profilleri ve bunların birleştirilmesiyle (xy-) elde edilen veri setleri yarı-tam 3B yaklaşım ile değerlendirilmiştir. Şekil 5.21’de verilen bu sonuçlara bakıldığında, derin seviyeler hariç x- ve y- eksenine paralel ölçüm profilleri birbirlerinden çok az bir fark ortaya koymuştur. x-yönlü ölçüm profilleri sonuçlarının 2,25-2,75 m derinlik kesiti incelendiğinde, 2 numaralı iletken yapının x-yönüne dik yöndeki uzanımlarının ortaya çıktığı görülmüştür. Benzer olgu y- yönlü ölçümler içinde geçerlidir ve bu ölçümlerde y- yönüne dik yapı izlerinin daha belirgin olduğu belirlenmiştir. Buna göre profil yönlenme etkisinin 2,25-2,75 m derinlik kesitinde olduğu anlaşılmıştır. Birbirine dik profillerin birleştirilmesinden elde edilen sonuçta ise sadece 2,25-2,75 m derinlik kesitinde yapı-2’nin gözlenmediği görülmüştür. Bu durum yapay höyük modeli için tek veya çift yönlü kullanım arasında çok önemli bir değişikliğin olmadığını göstermiştir.



Şekil 5.21 Yapay höyük modelinden dipol-dipol dizilimi için a) x- yönlü, b) y- yönlü ve c) xy- yönlü profiller kullanılarak yarı-tam 3B yaklaşım ile elde edilen derinlik kesitleri.

Profil yönlenmesinin daha geniş ölçüm aralıklarındaki etkisi de aynı dizilim için denenmiştir (Şekil 5.22). xy- yönlü profillerin farklı ölçüm aralıkları için verdiği sonuçlara göre, sık aralık kullanımı sonucunda kuramsal modele en yakın görüntüler elde edilmiştir (Şekil 5.22a). İki yönlü veri setlerinin kullanılmasına karşın ölçüm aralıklarının artımıyla görüntülerin çözünürlüğünün azaldığı gözlenmiştir. Ayrıca geniş ölçüm aralıklarının profil yönlenmesine karşın daha duyarlı olduğu modelleme çalışmaları ile ortaya çıkarılmıştır. Bu çalışmalara göre, eğer geniş ölçüm aralıklarının kullanılması gerekli ise, çift yönlü ölçümlerin tek yönlü ölçümlere göre daha başarılı olduğu belirtilmelidir.



Şekil 5.22 Yapay höyük modelinden dipol-dipol dizilimi için xy- yönlü profiller kullanılarak a) 0,5x0,5 m, b) 1x1 m ve c) 2x2 m ölçüm aralıkları ile yarı-tam 3B yaklaşımdan elde edilen derinlik kesitleri.

BÖLÜM ALTI

ESKİ SMYRNA HÖYÜĞÜ'NÜN ELEKTRİK ÖZDİRENÇ TERS-ÇÖZÜM YÖNTEMİYLE GÖRÜNTÜLENDİRİLMESİ

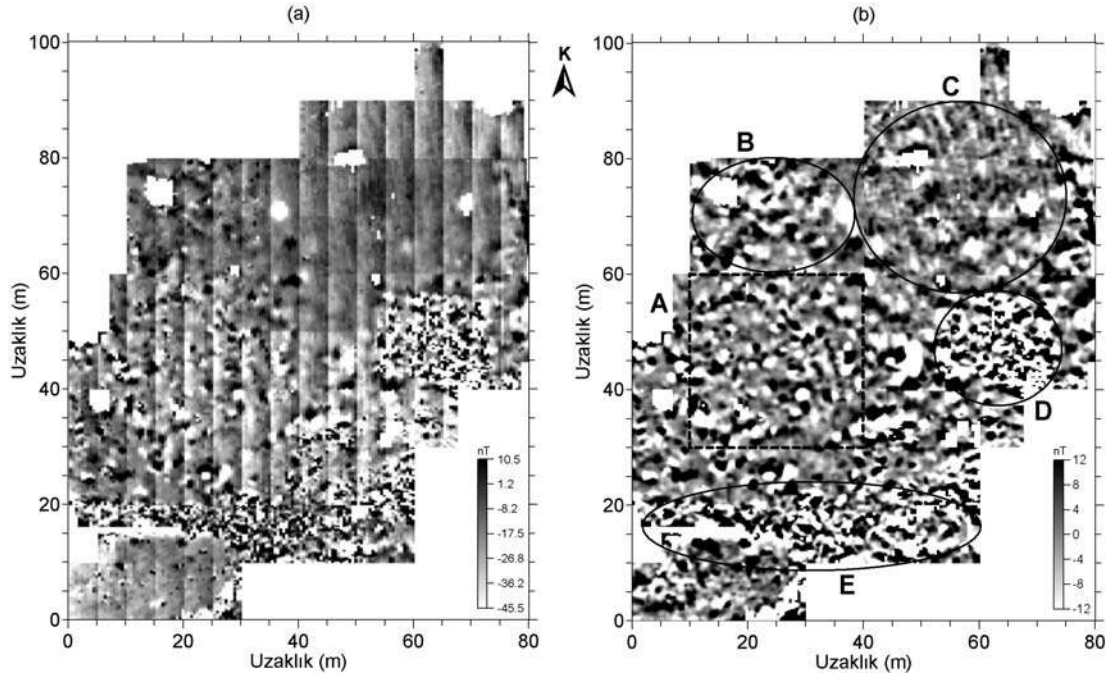
6.1 Eski Smyrna Höyüğünde Gerçekleştirilen Önceki Jeofizik Çalışmalar

Eski Smyrna Höyük alanında ilk jeofizik çalışmalar 1994 yılında düşey elektrik sondaj yöntemi kullanılarak anakaya topoğrafyasının saptanmasına yönelik olarak yapılmıştır. 2005 yılında höyüğün bilinen sur duvarı üzerinde bir test çalışması iki-boyutlu ERT ölçümleri Wenner, Wenner-Schlumberger, dipol-dipol ve pol-pol dizilimleri kullanılarak yapılmıştır ve duvar yapısı başarılı bir şekilde belirlenmiştir. Böylece höyük türü bu yerleşmeden elde edilen ilk ERT sonuçları ortaya çıkmıştır. 2007 yılında ise Athena Tapınağı'nın güney tarafında tümleşik jeofizik araştırmalara (ERT, manyetik, yeraltına nüfuz eden radar, elektromanyetik-VLF ve doğal potansiyel) başlanmıştır (Şekil 2.4). Burada ilk olarak manyetik ölçümler 10x10 m grid aralıkları ve FM36 fluxgate gradyometresi (Geoscan Research, İngiltere) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sığ jeofizik araştırmalarda manyetik yöntem yaygın olarak arkeolojik alan aramalarında kullanılmaktadır. Günümüzde manyetik yöntemde gelişen alet teknolojisinin etkisiyle oldukça kısa sürede geniş ölçekte alanlar araştırılmakta ve antik yerleşmelerin yüzeyaltına ilişkin bilgiler elde edilebilmektedir. Arkeolojik alanlarda yaygın olarak karşılaşılan çömlek, tuğla, keramik ve kiremit yığılımları, yanma çukurları, manyetik özelliğe sahip kayaçlardan oluşan yapı temelleri, demirli metal yığılımları, depolama çukurlarından ve organik ortamda oluşan bazı bakteri türlerinin demiri indirgemesi nedeniyle yeryüzünde ölçülebilir bir manyetik alan değişimi ortaya çıkmaktadır. Ayrıca arkeolojik yerleşimlerde toprağın manyetik duyarlılığındaki değişimlerde önem taşımaktadır ve ölçülebilir özellikteki bu değişimler yoluyla manyetik duyarlık değişim haritaları oluşturularak, gömülü arkeolojik nesneler belirlenebilmektedir. Manyetik yöntem yardımıyla arkeolojik alanlarda gömülü duvarlar, yollar, yapı girişleri ve temelleri, yanma bölgeleri, ocaklar, fırınlar, çöplük ve mezarlık alanları gibi birçok yapısal birim saptanabilmektedir (Drahor, 1999).

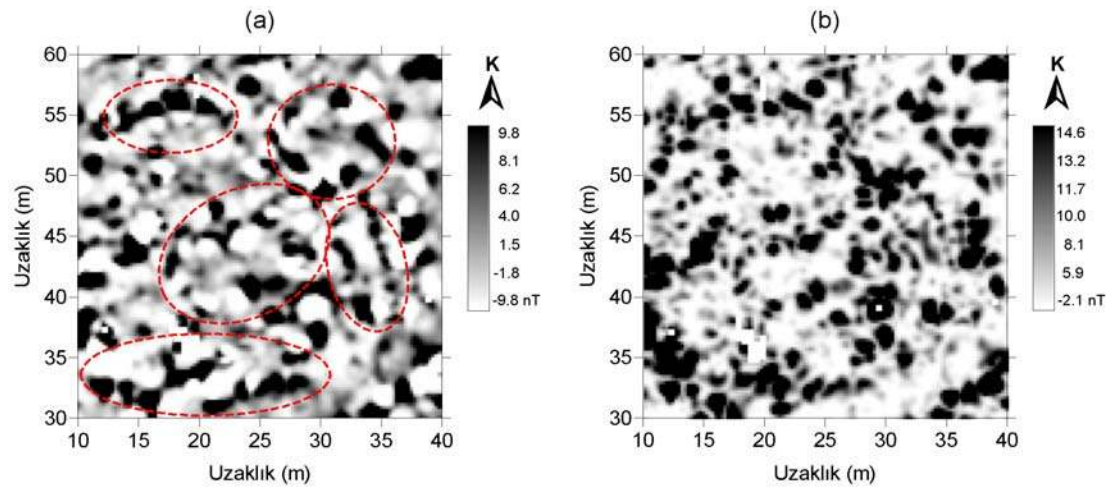
Eski Smyrna Höyüğü'nde yapılan manyetik gradyometre ölçümlerinde profil ve ölçüm aralıkları sırasıyla 0,5 ve 0,25 m olarak belirlenmiştir. Toplam 56 grid ile 5600 m² alan üzerinden yapılan ölçümler sırasında gradyometre kuzeye doğru yönlendirilerek, G-K profiller boyunca veriler toplanmıştır. Paralel profiller şeklinde toplanan manyetik gradyometre verisi sinyal ve görüntü işleme yöntemlerini kullanan Geoplot yazılımı (Geoscan Research, İngiltere) ile değerlendirilmiştir (Şekil 6.1). Bu yazılım yardımıyla işlenmemiş veri, kesme (clip), profil düzeltmesi (zero mean traverse), grid düzeltmesi (zero mean grid) ve interpolasyon işlemlerinden geçirilerek ölçüm sırasında kaynaklanan profiller ve gridler arasındaki düzensizlikler giderilmiştir. Ayrıca, düzeltilmiş veriler üzerinde alçak geçişli süzgeç uygulanarak anomalilerin belirginleştirilmesi sağlanmıştır. Değerlendirmeler sonucunda çalışma alanında beş farklı bölgenin (*A*, *B*, *C*, *D* ve *E*) varlığı ortaya konmuştur (Şekil 6.1b).

A bölgesi KKB-GGD uzanım gösteren düzgün anomali grupları sunmuştur. Benzer uzanımlı yapısal öğelerin, bu bölgenin bitişiğinde yapılmış olan kazılarda ortaya çıkarıldığı belirtilmelidir. *B* ve *C* bölgelerinde de düzenli anomali grupları gözlenmiştir. *D* bölgesi ise daha önceden kazı çalışması yapıp, gömülü yapıların ortaya çıkarıldığı bir bölgedir. Burada gözlenen daha karmaşık görüntünün sebebi yüzeyde olan volkanik kökenli yapı temelleridir. Benzer bir karmaşık manyetik görüntü de *E* bölgesinde ortaya çıkmıştır. Ölçümler esnasında yüzeyde gözlenen ve bazen gömülü olan (~10 cm kadar) metalik atıklar bu bölgedeki düzensiz yüksek anomali değerlerini yaratmıştır (Şekil 6.1b). Sonuç olarak *A* bölgesinde gömülü arkeolojik yapıların ve olası yüzeyaltı uzanımlarının diğer bölümlere göre daha düzgün yapısal uzanımlar göstermesi, buranın ERT uygulama alanı olarak seçilmesinde rol oynamıştır. Bu alan 30x30 m boyutlarındadır ve oldukça düz bir topoğrafyaya sahiptir (Şekil 2.4 ve 6.1b). ERT için belirlenen *A* bölgesinin detaylı manyetik görüntüsünün verilmesi amacıyla 30x30 m'lik bu alan tek parça halinde ayrı olarak işlenmiştir. Şekil 6.2'de verilen *A* bölgesinin manyetik gradyometre görüntüsünde belirgin olarak gözlenen bazı anomaliler elipsler ile işaretlenmiştir. Özellikle kuzeydoğuda yeralan ve yaklaşık 10x8 m'lik baklava dilimi şeklindeki anomali ve alanın ortasında bulunan anomali düzgün bir mimari sunmaktadır. Yine bu iki anomali ile ilişkili olarak görülen diğer anomali grupları da göz önüne

alındığında bu alanın ERT yöntemiyle alana derinlik boyutu da kazandırılarak daha ayrıntılı araştırılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Manyetik gradyometre verisinin mutlaklaştırma süzgeçlemesinden sonraki görüntüsü ise Şekil 6.2b’de verilmiştir. Tüm veri değerlerini pozitif yapan bu süzgeç ile gömülü yapılara ait olabilecek anomaliler izlenmeye çalışılmıştır.



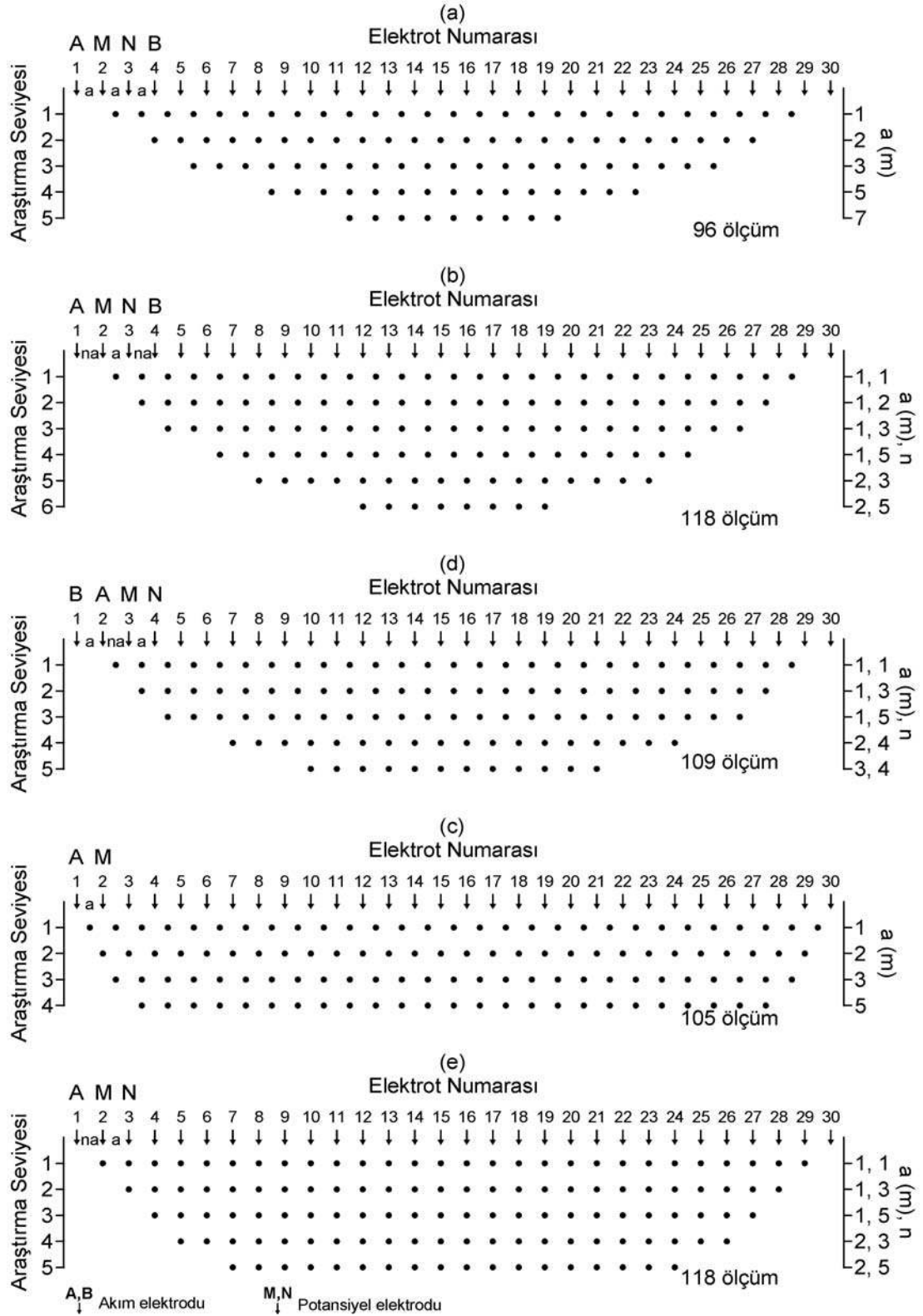
Şekil 6.1 Eski Smyrna Höyüğü’nden elde edilen manyetik gradyometre verilerinin (a) işlenmemiş ve (b) alçak geçişli süzgeçlemeden geçirildikten sonraki görüntüleri.



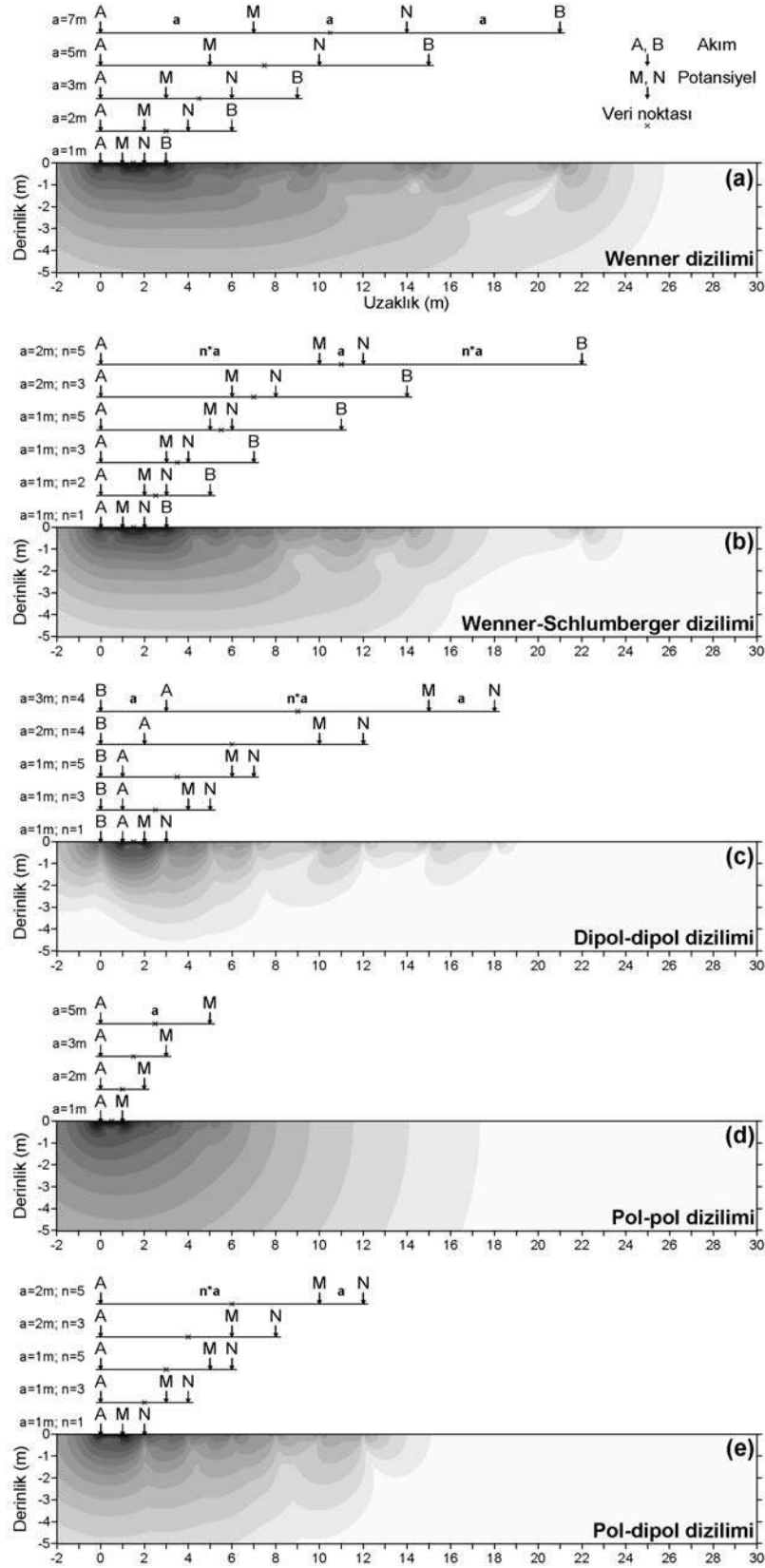
Şekil 6.2 A bölgesi manyetik gradyometre verilerinin (a) alçak geçiren ve (b) mutlaklaştırma süzgeçlemesinden geçirildikten sonraki görüntüleri.

6.2 Veri Toplama ve Değerlendirme

A bölgesine ait elektrik öz direnç verileri yeraltının tomografik görüntülerini elde etmek amacıyla üç-boyutlu araştırmaya uygun biçimde toplanmıştır. Ölçüm profilleri yeraltındaki anizotropik etkileri de ortaya çıkarabilmek için birbirine dik iki ayrı doğrultuda (K-G ve D-B) seçilmiştir. Elektrot aralıkları sabit 1 m ve profil aralıkları ise 0,5 m olarak belirlenmiştir. Böylece 30x30 metre boyutlarındaki alanda toplam 118 adet iki-boyutlu profil üzerinde ölçümler gerçekleştirilmiştir. Eski Smyrna Höyüğü'nde 2007-2008 yıllarında gerçekleştirilen bu ölçümlerde verilerin değişen toprak koşullarından etkilenmemesi için aynı iklim şartlarında ölçümlerin yapılmasına çalışılmıştır. Ölçümlerde kaynak olarak akü, ölçüm için ise elektrot yerlerinin manuel olarak adreslendiği 30 kanallı çoklu kablo ile çalışan tek kanallı ve sinyal ortalama düzenekli kare dalga üreten bir öz direnç ölçüm sistemi kullanılmıştır. Benzetim çalışmasında olduğu gibi sık kullanılan Wenner, Wenner-Schlumberger, dipol-dipol, pol-pol ve pol-dipol dizilimleri ile görünür öz direnç verisi ölçülmüştür. Pol-pol ve pol-dipol dizilimlerinde kullanılan sonsuz elektrotları, ölçüm alanından yeteri kadar bir uzaklığa (en büyük elektrot açılımının 20 katı kadar) yerleştirilmiştir. Sonsuz elektrotlarının kullanımının ölçüm alanındaki olası engelleyici yapılar veya teraslar olması durumunda pratik olmayacağı belirtilmelidir. Dizilimlerde 4-6 seviyeden ölçümler yapılmıştır. Her bir dizilimin elektrot pozisyonlarını ve görünür öz direnç ölçüm noktalarını gösteren iki-boyutlu yapma-kesitler Şekil 6.3'de verilmiştir. Kullanılan dizilimlerde ölçülen veri sayıları birbirine yakın olmasına rağmen, bu verilerin yeraltında kapladıkları alanlar birbirinden farklıdır. Ölçümlerde derinlik seviyelerini kontrol eden “a” ve “n” değerleri de bu kesitler üzerinde gösterilmiştir. Burada Wenner ve Wenner-Schlumberger dizilimlerinin birinci ölçüm seviyeleri ($a(m)=1$ ve $a(m), n=1, 1$) aynıdır ve bu seviye arazi ölçümlerinde iki dizilim için tek bir seferde ölçülmüştür. Ölçümler esnasında kullanılan bu derinlik seviyelerine karşılık dizilimlerin, 100 $\Omega.m$ 'lik homojen yarı-sonsuz ortamda göstermiş olduğu duyarlık kesitleri hesaplatılmıştır (Şekil 6.4). Bu kesitler kullanılan dizilim için her bir derinlik seviyesinde hesaplanan duyarlık değerlerinin toplamı şeklinde elde edilmiştir. Bu kesitlerdeki değerlerden, yeraltının ölçülecek görünür öz direnç değerine olan katkısı izlenebilmektedir.



Şekil 6.3 Wenner (a), Wenner-Schlumberger (b), dipol-dipol (c), pol-pol (d) ve pol-dipol (e) dizilimleri için elektrot pozisyonları (oklar ile gösterilen) ve görünür öz direnç ölçüm noktaları.



Şekil 6.4 Wenner (a), Wenner-Schlumberger (b), dipol-dipol (c), pol-pol (d) ve pol-dipol (e) dizilimleri için ölçüm seviyelerine göre oluşturulan duyarlık kesitleri.

Veri değerlendirmesi ise benzetim çalışmasında olduğu gibi kısmi ve yarı-tam 3B yaklaşımlar ile gerçekleştirilmiştir. Ters-özüm işleminde bloklu (robust) en küçük kareler ters-çözüm algoritması kullanılmıştır. İki-boyutlu ters-özüm Res2Dinv (Loke ve Barker, 1996a) ve üç-boyutlu ters-çözümde Res3Dinv (Loke ve Barker, 1996b) yazılımları yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Ters-özüm yazılımlarında kullanılan parametreler ise Tablo 6.1’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar derinlik kesitleri olarak Surfer (Golden Software) yazılımı ile hazırlanmıştır.

Tablo 6.1 ERT ters-çözüm çalışmalarında kullanılan parametreler.

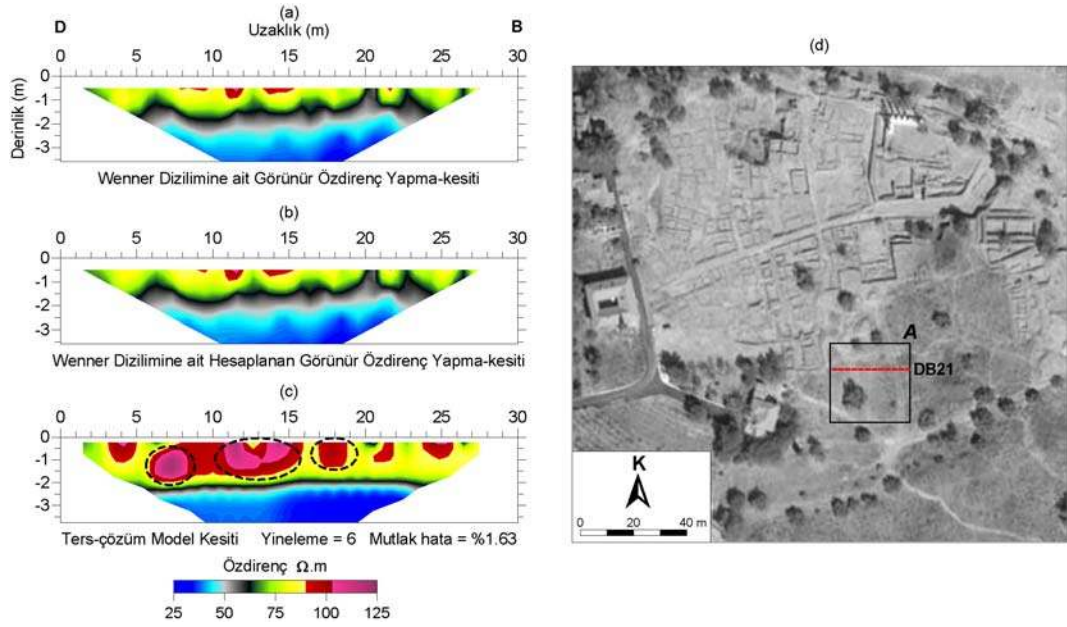
Ters-özüm parametreleri	Seçilen özellik
Ters-özüm model kısıtlaması	Bloklu (robust) ters-özüm
Düz-özüm yöntemi	Sonlu-elemanlar
Sönüm faktörü (λ)	0,15
Jakobyen matris hesabı	Her yinelemede tekrar hesaplama
İyileştirme yöntemi	Tamamlanmamış (incomplete) Gauss-Newton
Ön bilgi girişi	Tüm elektrot dizilimleri için aynı hücre kalınlıkları (4 metreye kadar 0,5 m kalınlıklı 8 parça)
En yüksek yineleme sayısı	6
Başlangıç modeli	Giriş verisinin ortalama özdirenç değerini alan homojen ortam
Her bir elektrot arası düğüm sayısı	4 düğüm

6.3 Eski Smyrna Höyüğünden Elde Edilen Sonuçlar

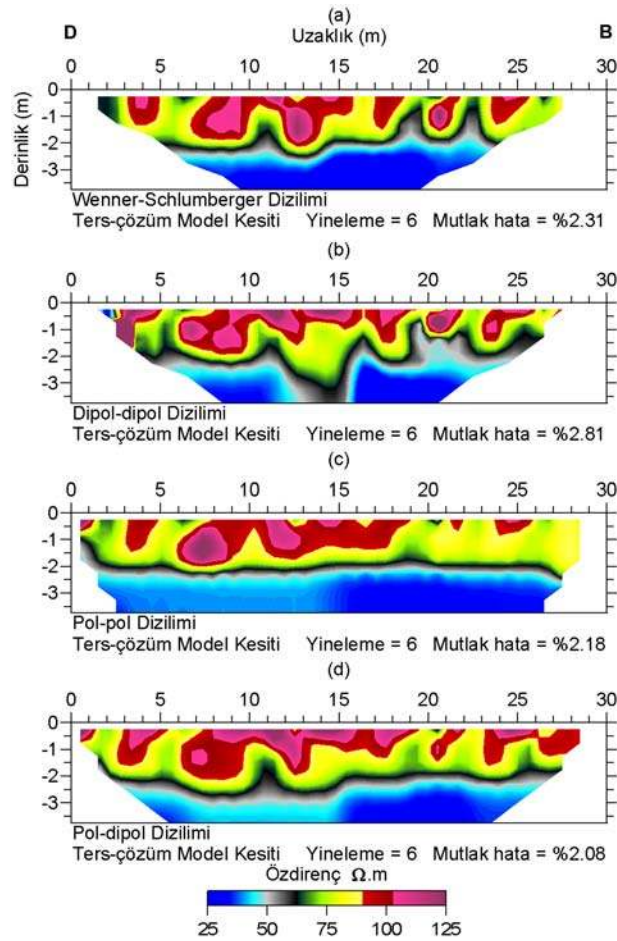
Höyük alanında yapılan ERT ölçümleri sonucunda öncelikle yeraltına ait 2-boyutlu tomografi görüntülerinin elde edilmesi amacıyla ters-çözüm değerlendirmesi yapılmıştır. Buna göre doğu-batı uzanımlı olan ve konumu GoogleEarth uydu görüntüsü üzerinde gösterilen örnek bir profil için ERT sonuçları şekil 6.5 ve 6.6’da sunulmuştur. DB21 olarak adlandırılan profilde Wenner elektrot dizilimi kullanılarak ters-çözüm işlemi sonucunda 6 yineleme ve %1,63 mutlak hata değeriyle yeraltı

kesitine ulaşılmıştır. Bu dizilime ait ölçülen ve hesaplanan görünür özdirenç yapma-kesitleri Şekil 6.5 a ve b’de verilmiştir. Elde edilen ters-çözüm model kesitinde 2-2,5 m derinliğe kadar uzanan yüksek özdirençli ($>50 \Omega.m$) ortamı düşük özdirençli bir başka ortam izlemektedir. Bu ayrım zonunun üstünde kalan ortamda, yüksek özdirençli gömülü arkeolojik yapılar (elipsler ile gösterilen) bulunmaktadır. Düşük özdirençli ortamın ise sıvı içeriği yüksek bir zon olduğu düşünülmektedir (Şekil 6.5c). Aynı profil üzerinde Wenner-Schlumberger, dipol-dipol, pol-pol ve pol-dipol dizilimlerinden elde edilen ters-çözüm sonuçlarına bakıldığında, 6 yineleme sonucunda yaklaşık mutlak hata değerleri ile dizilimlerin benzer bir yeraltı karakteristiğini yansıttığı söylenebilmektedir (Şekil 6.6). Böylece araştırma alanı olan A bölgesinin yeraltı özdirenç dağılımı hakkında genel bilgilere ulaşılmıştır. İki-boyutlu ERT ölçümlerinin tamamlanması ile ters-çözüm değerlendirmeleri üç-boyutlu olarak sürdürülmüştür.

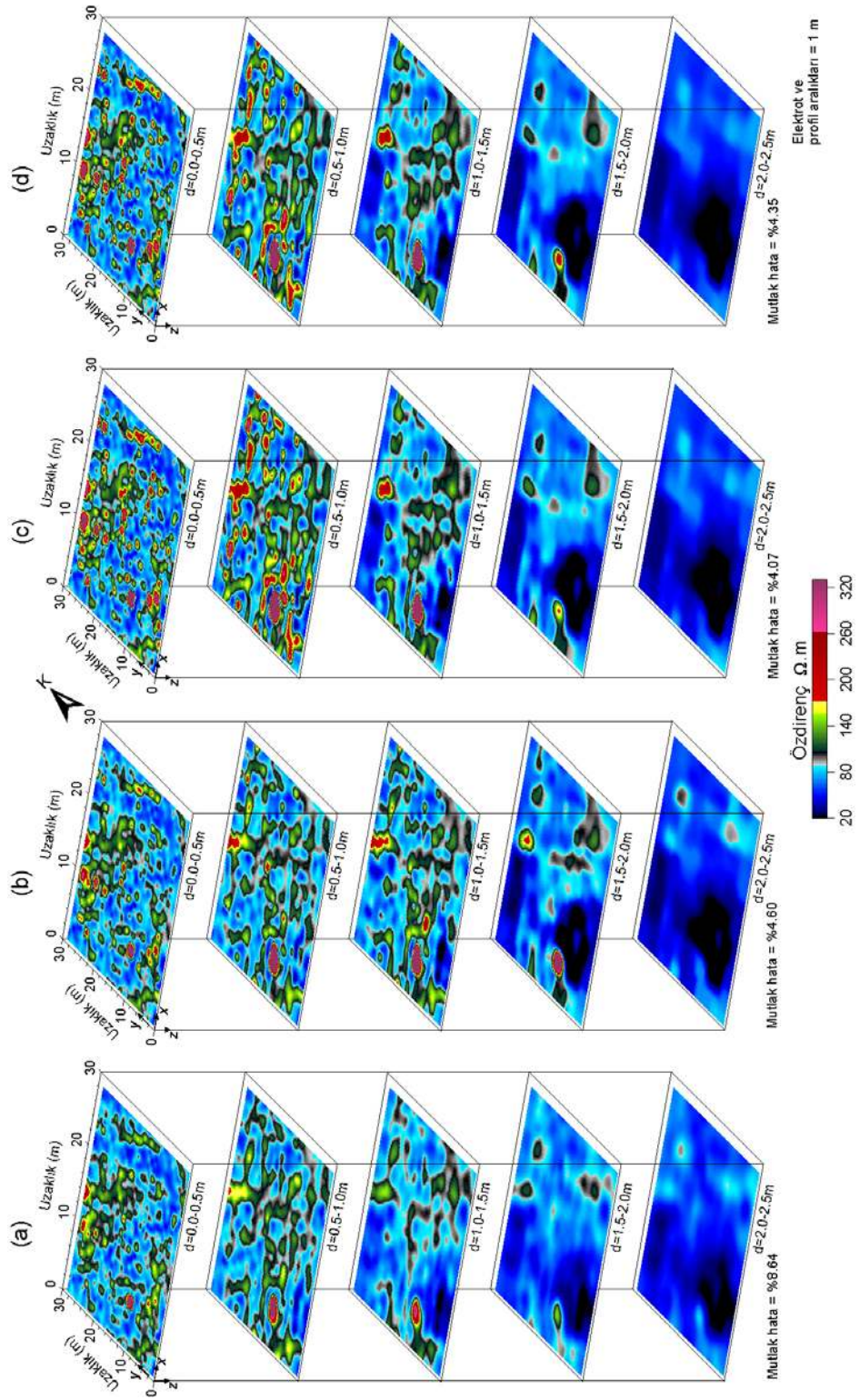
Üç-boyutlu ters-çözüm değerlendirmesinde sönüm faktörü (λ) değeri farklı değerlerin denenmesi sonucunda belirlenmiştir. Buna göre, sönüm faktörünün 0,05, 0,15, 0,25 ve 0,4 değerleri için dipol-dipol dizilime göre vermiş olduğu sonuçlar Şekil 6.7’de verilmektedir. 6 yineleme sonrasında $\lambda=0,05$ değerine göre elde edilen ters-çözüm sonucu %8,64 ile en yüksek mutlak hata değerini vermiştir. Bu sonuca ait 1,5-2,5 m derinlikleri arasındaki kesitlerde düşük özdirençli yapılar diğer çözüm sonuçlarından farklıdır (Şekil 6.7a). Buna karşın $\lambda=0,15$, 0,25 ve 0,4 sonuçları birbirleriyle uyumludur ve mutlak hata değerleri de yakındır. $\lambda=0,25$ ve 0,4 değerleri ile elde edilen derinlik kesitlerinde 0-1 m arasında gözlenen yapılar $\lambda=0,15$ ile elde edilen kesitlere göre daha fazla yüksek özdirenç değerli pikler halinde gözlenmiştir (Şekil 6.7b-d). Böylece $\lambda=0,15$ değeri diğer ters-çözüm değerlendirmelerinde kullanılmak üzere tercih edilmiştir.



Şekil 6.5 Wenner elektrot dizilimi için doğu-batı uzanımlı *DB21* profilinin (a) görünür özdirenç, (b) hesaplanan görünür özdirenç, (c) ters-çözüm model kesitleri ve (d) profilin konumu.



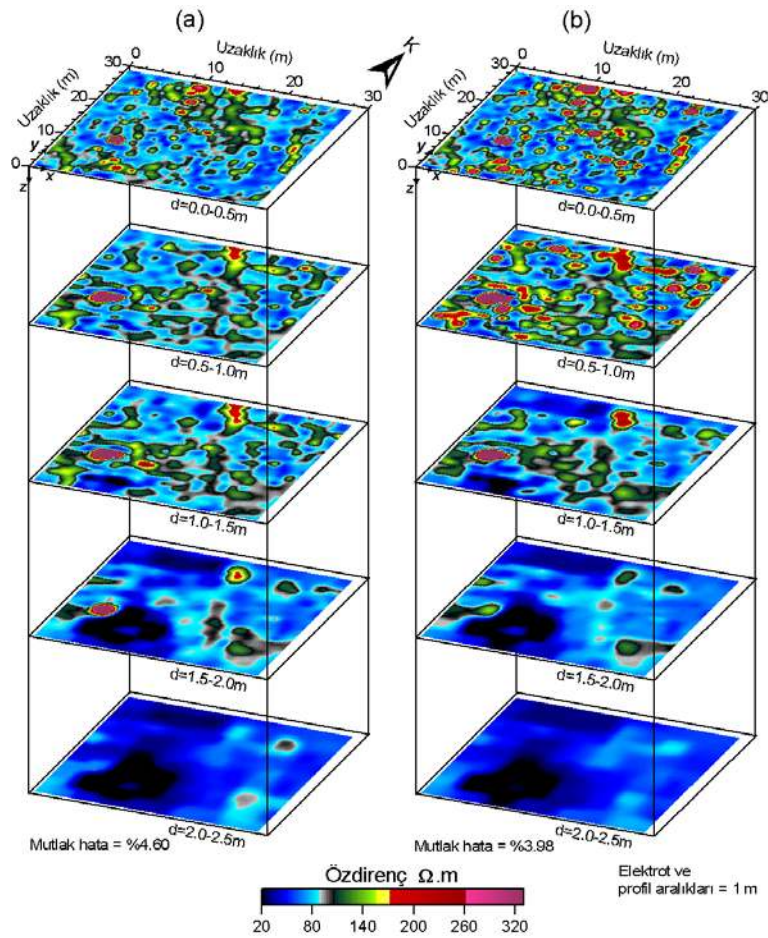
Şekil 6.6 Doğru-batı uzanımlı *DB21* profilinin (a) Wenner-Schlumberger, (b) dipol-dipol, (c) pol-pol ve (d) pol-dipol dizilimleri için ters-çözüm model kesitleri.



Şekil 6.7 Dipol-dipol dizilimi için sönüm faktörü a) 0,05, b) 0,15, c) 0,25 ve d) 0,4 değerleri kullanılarak yarı-tam 3B yaklaşım ile ters-çözüm sonucu elde edilen derinlik kesitleri. Ölçüm profilleri y-eksenine paraleldir.

Değerlendirmelerde ters-çözüm işlem süresinin azaltılması için Gauss-Newton yerine tamamlanmamış Gauss-Newton yaklaşımı tercih edilmiştir. Bu iki yaklaşıma

ait sonuçlar Şekil 6.8’de karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlara göre, 0-1 m derinlikleri arasında Gauss-Newton yaklaşımının tamamlanmamış Gauss-Newton’a göre daha yüksek öz direnç değerleri sunduğu, buna karşın 1-2,5 m derinlikleri arasında ise tersi durumun olduğu gözlenmiştir. Elde edilen bu farklı öz direnç değerleri, belirlenen yapıların şeklini ve uzanımlarını değiştirmemiştir. Ayrıca bilgisayar hesaplama süresi tamamlanmamış Gauss-Newton yaklaşımı ile yaklaşık %70 azalmıştır.



Şekil 6.8 Eski Smyrna Höyüğü’nden dipol-dipol dizilimi için a) tamamlanmamış Gauss-Newton ve b) Gauss-Newton yaklaşımları ile ters-çözüm sonucu elde edilen derinlik kesitleri. Ölçüm profilleri y-eksenine paraleldir.

6.3.1 Kısmi ve Yarı-tam Üç-Boyutlu Çözümler

Üç-boyutlu ERT çalışmalarında uyguladığımız kısmi ve yarı-tam 3B yaklaşımların, Eski Smyrna Höyüğü’nden elde edilen veriler üzerinde kullanılması

ile bu yaklaşımların sonuçları karşılaştırılabilmiştir. Şekil 6.9'da dipol-dipol dizilimi için iki yaklaşımın vermiş olduğu derinlik kesitleri sunulmaktadır. Bu sonuçlar 1 m profil ve elektrot aralıkları ile y-eksenine paralel (G-K doğrultulu) profillerden elde edilmiştir. Tüm kesitlerde 20-330 $\Omega.m$ 'lik bir özdirenç aralığı kullanılmıştır. Bu sonuçlara göre yüksek özdirençli ($>85 \Omega.m$) yapı gruplarının 1,5-2 m derinliğe kadar uzandığı gözlenmektedir. Ölçüm alanında bu yapılar KB-GD ve KD-GB yönelim göstermektedir. Yarı-tam 3B yaklaşım sonucu derinlik kesitlerinde ok ile gösterilen yüksek özdirençli yapının eski bir kuyu olabileceği düşünülmektedir. Bu yaklaşımdan elde edilen ilk derinlik seviyesi ise oldukça karışıktır ve bu seviye karıştırılmış toprak katmanı olarak tanımlanmıştır. Bunu izleyen ikinci ve üçüncü kesitler ise birbirine oldukça benzerdir. Özdirenç dağılımındaki değişiklikler 1,5 m derinlikten sonra gözlenmektedir. Buna göre 0,5 ile 1,5 m arasındaki seviyeler birinci arkeolojik katman olarak ayırt edilmiştir. Bu seviyeden sonra ise düşük özdirenç değerlerinin daha yoğun gözlendiği derin seviyeler başlamaktadır. Burada gözlenen düşük özdirençli yapıların olasılıkla kerpiç yapılardan oluştuğu (elipsler ile gösterilen) ve bu seviyelerin daha eski bir arkeolojik katman olabileceği düşünülmektedir. Yüksek özdirence sahip bazı yapılar bu seviyeler de halen devam etmektedir (Şekil 6.9a). 2-2,5 m derinlikten sonra karşılaşılan düşük özdirençli ortam ($<30 \Omega.m$) ise yeteri kadar bir özdirenç zıtlığı vermemiştir. Dolayısıyla ilerleyen bölümlerde sonuçlar bu derinlik seviyesine kadar olan bölge için sunulmuştur.

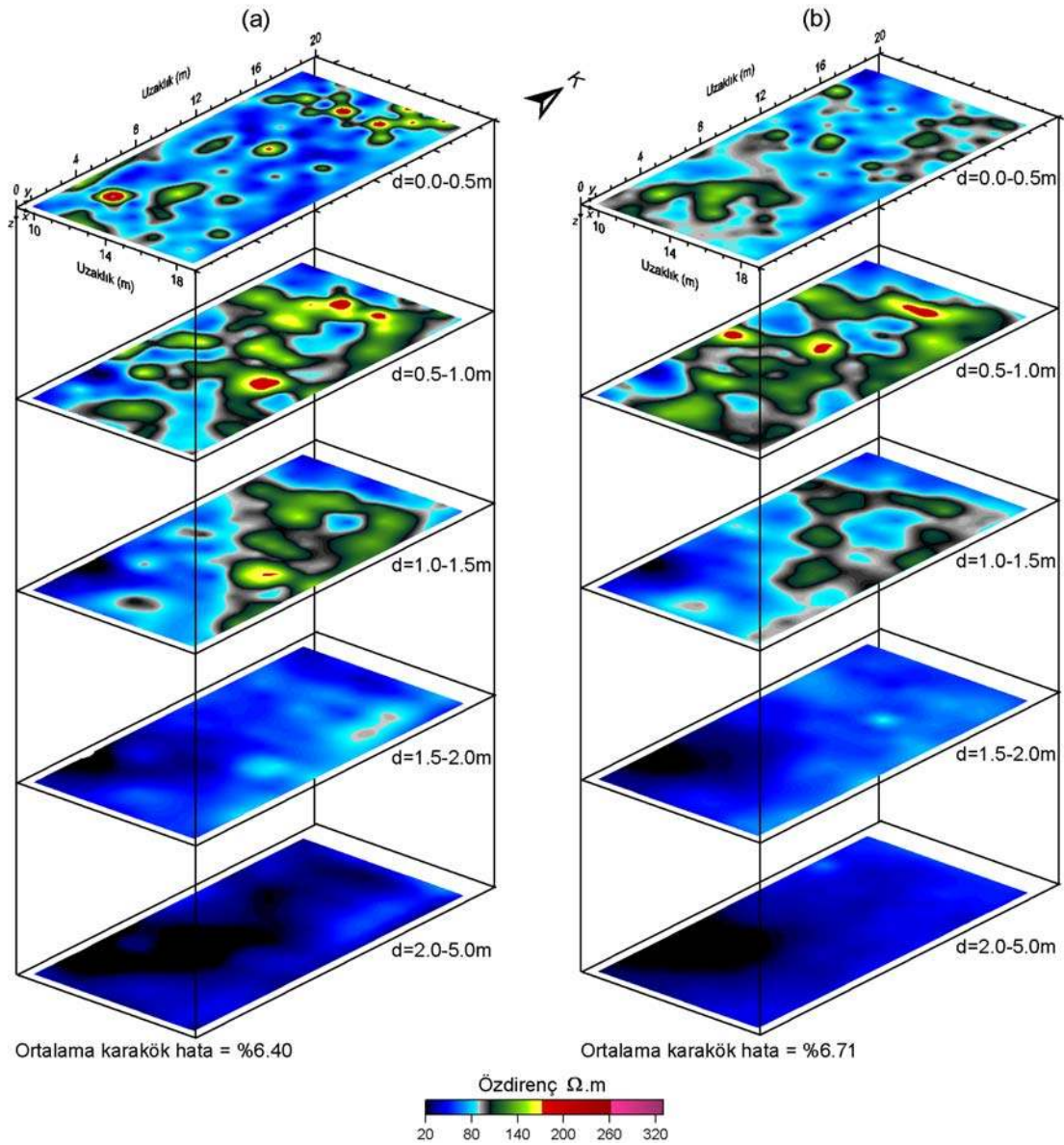
Kısmi-3B yaklaşımdan elde edilen sonuçlara bakıldığında ise, bu yaklaşımın daha karmaşık görüntüler sunduğu anlaşılmaktadır. Özellikle veri ölçümü yapılırken kullanılan profil doğrultusunun bir etkisi bu yaklaşımda gözlenmektedir. Son iki derinlik kesitinde daha belirgin olan yön bağımlı bu uzanımlar yapı belirlenebilirliğini de etkilemektedir (Şekil 6.9b). Kısmi-3B yaklaşım içerisinde uygulanan iki-boyutlu ters-çözüm sonuçlarının birleştirilmesi işlemi bu uzanımları oluşturmaktadır. Buna karşın yarı-tam 3B yaklaşım, yeraltında üç boyuttaki özdirenç değişimini çözümlediği için bu tür bir etkiyi göstermemektedir. Dolayısıyla üç-boyutlu yapılan ERT çalışmalarında değerlendirmelerin yarı-tam 3B yaklaşım ile yapılması önerilmektedir. İlerleyen bölümlerde bu yaklaşımdan elde edilen sonuçlara yer verilmektedir.

6.3.2 Geliştirilen Matlab Ters-çözüm Programı ile Değerlendirmeler

Matlab tabanlı geliştirilen 3-boyutlu elektrik özdirenç ters-çözüm programı, Eski Smyrna Höyüğü'nden elde edilen özdirenç verisinin değerlendirilmesi için kullanılmıştır. Buna yönelik olarak geliştirilen programın kullanıldığı bilgisayarın sınırlı hafızasından dolayı arazi verisinin yalnızca bir bölümü değerlendirilebilmiştir. Güney-kuzey yönlü 11 profil üzerinden pol-dipol dizilimi kullanılarak elde edilen 748 özdirenç verisi MatlabERTinv ve Res3Dinv programları ile benzer çözüm özellikleri verilerek sönümlü en-küçük kareler yöntemiyle değerlendirilmiştir. Uzunlukları ölçüm yönünde 20 metreye indirilmiş olan profiller alanın 9-19 metreleri arasında kalmaktadır. Ters-çözümde her iki programda da aynı model alanı (x ve y yönlerinde 1 metre hücre aralığı ve z yönünde ise 2 metreye değin 0,5 metrelik hücre kalınlıkları) ve sönüm faktörü değerleri (minimum 0,01 ve maksimum 0,15) tercih edilmiştir. Arazi verisinin MatlabERTinv programı ile değerlendirilmesinde toplam 4536 model parametresi çözümlenmiştir. Bu uygulamada kullanılan düzgünleştirme matrisinde ise her bir derinlik seviyesine denk gelen elemanların değerleri %5 arttırılmıştır. Böylece yöntemin derine doğru çözünürlülüğünün azalmasından kaynaklanabilecek ters-çözümdeki ıraksamalar engellenmeye çalışılmıştır. Yine her iki programda da Jakobyen matris sadece ilk 3 yineleme için tekrardan hesaplatılmış, devam eden yinelemelerde Broyden güncellemesinden yararlanılmıştır. Düz-çözümlerde ise sonlu-farklar yöntemi kullanılmıştır. MatlabERTinv programı Jakobyen matris hesabında sonlu-farklardan yararlandığı için bu matrisin oluşturulması kullanılan 4 çekirdekli ve 4 GB hafızaya sahip bilgisayarda 75 dakika sürmüştür. Buna karşın Res3Dinv programı ise bu işlemi Jakobyen matrisin analitik çözümünden yararlanarak 1 dakikanın altında tamamlayabilmiştir. 3. yineleme sonrasında Broyden güncellemesine geçildiğinden MatlabERTinv programında Jakobyen matrisin hesaplama süresi de 1 dakikanın altına düşmüştür.

6 yineleme sonucunda elde edilen derinlik kesitleri Şekil 6.10'da verilmiştir. Res3Dinv programı %6,40 ortalama karekök hatası ile modele yakınsarken, MatlabERTinv programı ise %6,71 hata vermiştir. Yakın olan hata değerleri sonrasında ulaşılan ters-çözüm sonuçlarında da önemli bir fark gözlenmemektedir.

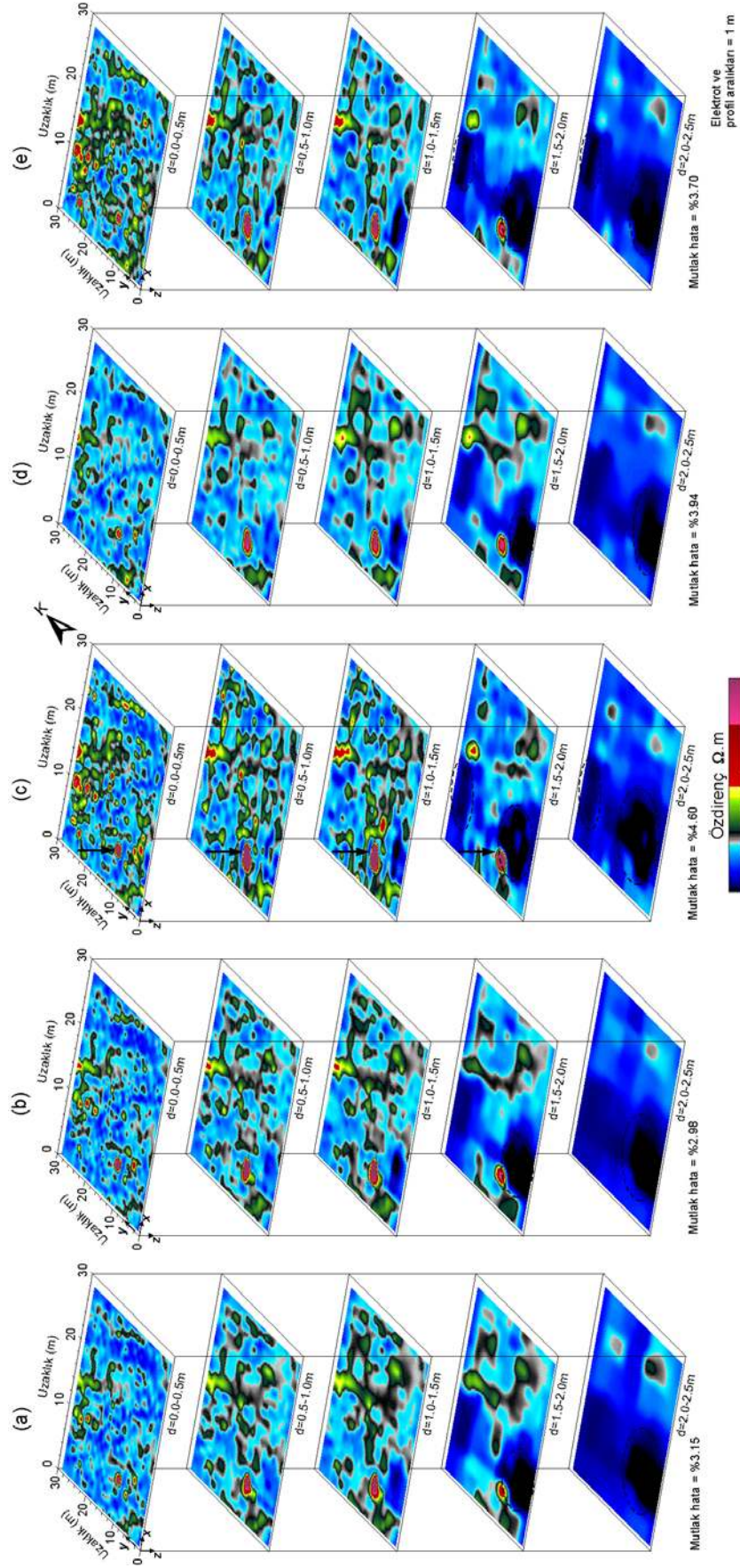
İlk derinlik kesiti olan 0-0.5m derinlikleri arasında Res3Dinv programı bazı yüksek öz direnç değerleri vermiştir. Genel olarak bakıldığında ise derinlik kesitlerinde Res3Dinv programı daha yüksek öz direnç değerleri sunmuştur. Buna karşın ilk derinlik seviyesini izleyen diğer kesitlerde programların çözüm sonuçları oldukça benzerdir. Dolayısıyla geliştirilen Matlab tabanlı programın arazi ölçümlerinden elde edilen veri setlerini başarılı bir şekilde çözümleyebildiği söylenebilmektedir.



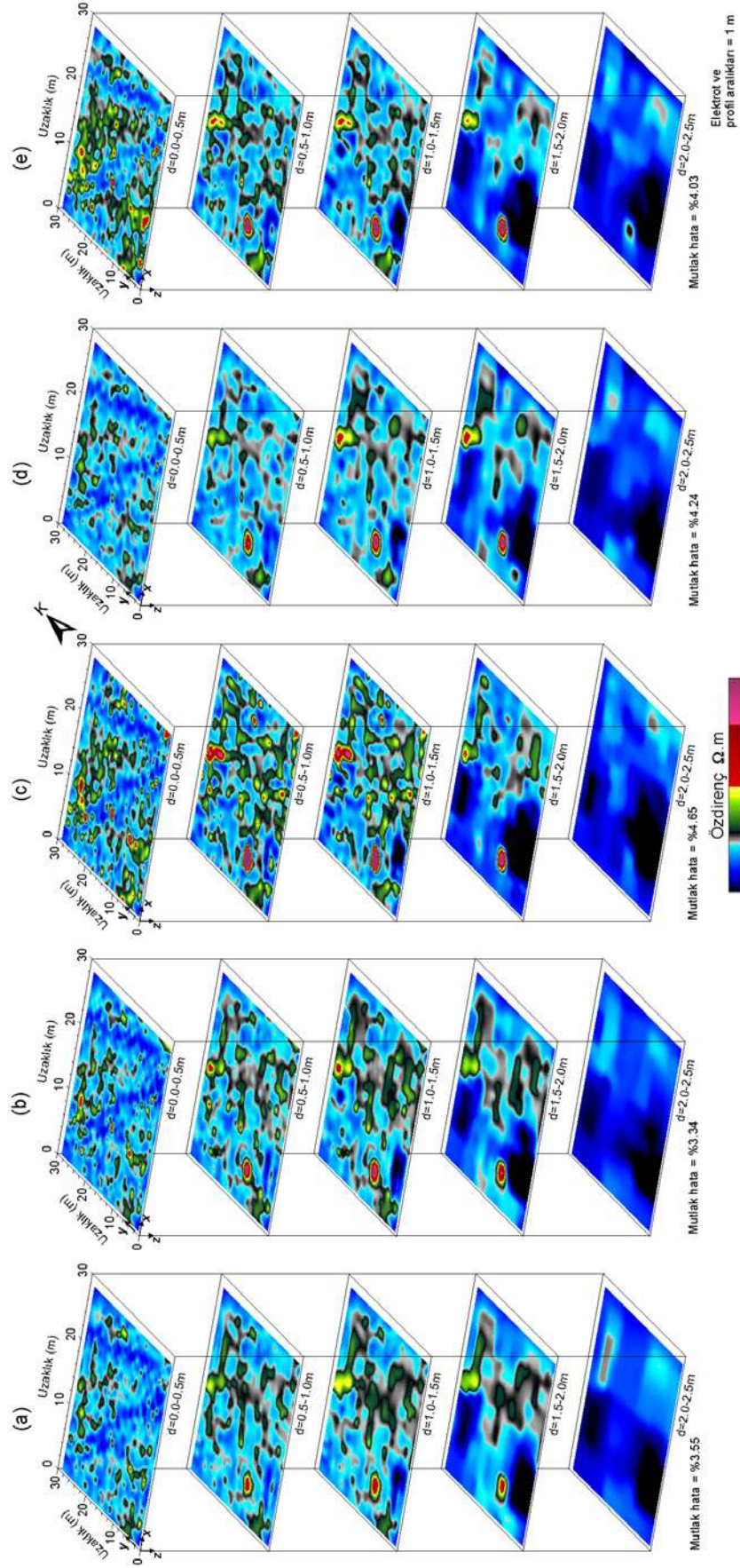
Şekil 6.10 Eski Smyrna Hüyüğü'nden pol-dipol dizilimi için Res3Dinv (a) ve MatlabERTinv (b) programları ile ters-çözüm sonucu elde edilen derinlik kesitleri. Ölçüm profilleri y-eksenine paraleldir.

6.3.3 Elektrot Dizilimlerinin Etkisi

Elektrik özdirenç yönteminde sık kullanılan beş farklı elektrot dizilimi (Wenner, Wenner-Schlumberger, dipol-dipol, pol-pol ve pol-dipol) Eski Smyrna Höyüğü'nde belirlenen ERT ölçüm alanında kullanılmıştır. Böylece bu dizilimlerin aynı yeraltı koşulları için verdiği sonuçlar karşılaştırılabilmiştir ve ERT çalışmalarındaki dizilim etkisi irdelenmiştir. Şekil 6.11'de beş elektrot dizilimi ve güney-kuzey doğrultulu (y-eksenine paralel) 1 m aralıklı profiller kullanılarak yarı-tam 3B yaklaşım ile elde edilen derinlik kesitleri verilmektedir. Bu görüntülerde yüksek özdirenç değerine sahip yapıların ve bir önceki bölümde yorumlanan kuyu yapısının da tüm dizilimlerde izlenebildiği görülmektedir (Şekil 6.9a ve 6.11). Buradan ilk üç derinlik seviyesi için dizilimlerin genel karakteristiklerinin iyi bir uyum gösterdiği söylenebilmektedir. Daha derindeki seviyelerde ise, dipol-dipol ve pol-dipol dizilimleri daha farklı bir özellik sunmaktadır. Özellikle bu seviyelerdeki (1,5-2,5 m arası) düşük özdirençli yapılar (elipsler ile gösterilen) bu iki dizilim sonuçlarında benzerlik göstermektedir (Şekil 6.11c ve e). Bu yapıların kerpiçten yapılan kalıntılara karşılık geldiği ve derinlik kesitlerinden 1,5 m'de gözlenen bu değişikliğin farklı iki arkeolojik katman sınırını işaret ettiği düşünülmektedir. Bunun dışında Wenner ve Wenner-Schlumberger dizilimleri küçük farklar dışında oldukça benzer sonuçlar üretmiştir (Şekil 6.11a ve b). Ayrıca pol-pol dizilimi ise diğer dizilimlere göre daha az karmaşık derinlik kesitleri sunmaktadır. Bu durum pol-pol diziliminin sık derinlikteki ani özdirenç değişimlerine ve gürültüye daha az duyarlı olduğunu göstermektedir (Şekil 6.11d). Özellikle yüzeydeki karıştırılmış toprak birimi, bu dizilimin sonucunu daha az etkiler iken, dipol-dipol ve pol-dipol dizilimleri bu zonun etkisini fazlaca göstermektedir. Bu da yorumlamaya bir zorluk getirmektedir. Dizilimlerin doğu-batı profil doğrultusu (x-eksenine paralel) kullanılarak üretilmiş olduğu ters-çözüm sonucu derinlik kesitleri ise Şekil 6.12'de verilmektedir. Profil yönü değişiminin ters-çözüm sonucu ortaya çıkan yapıların belirlenebilirliğini değiştirdiği, bunun dışında dizilimlerin özelliklerinin yukarıda tartışıldığı şekilde kaldığı gözlenmiştir.



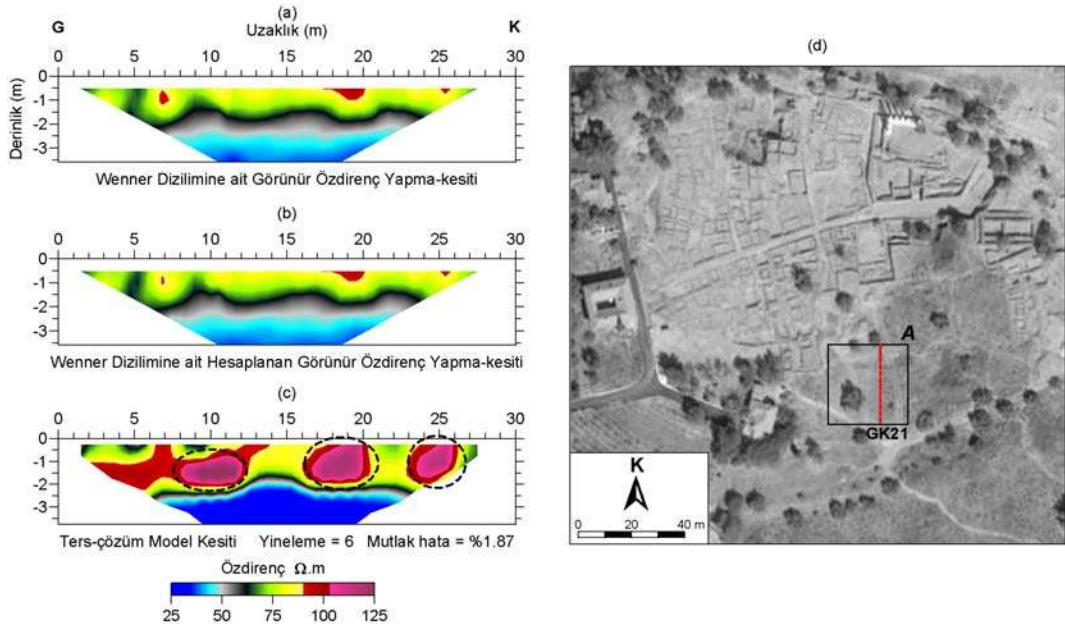
Şekil 6.11 Wenner (a), Wenner-Schlumberger (b), dipol-dipol (c), pol-pol (d) ve pol-dipol (e) dizilimlerinin yarı-tam 3B yaklaşım ile ters-çözümü sonucu elde edilen derinlik kesitleri. Ölçüm profilleri y-eksenine paraleldir.



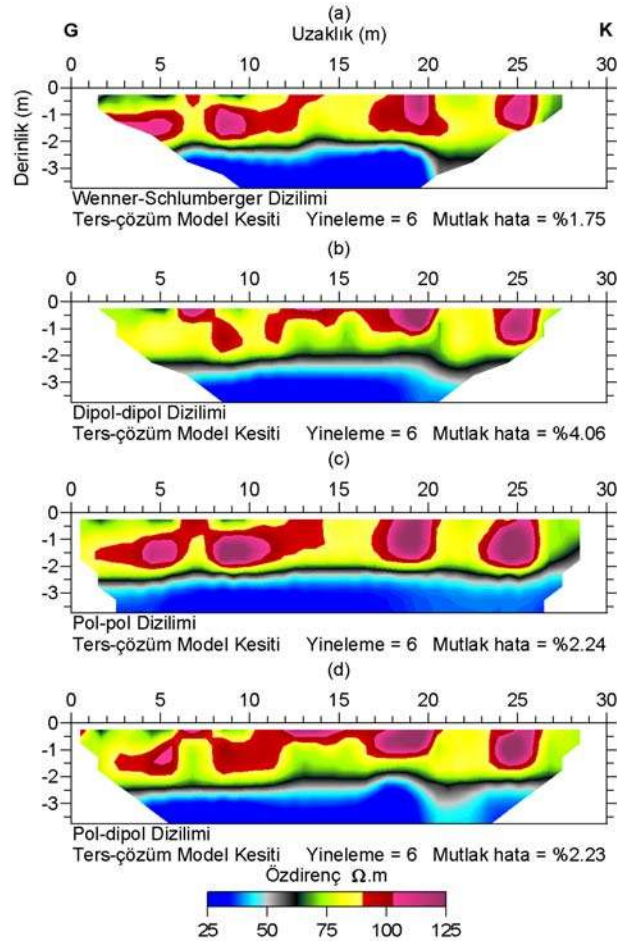
Şekil 6.12 Wenner (a), Wenner-Schlumberger (b), dipol-dipol (c), pol-pol (d) ve pol-dipol (e) dizilimlerinin yarı-tam 3B yaklaşım ile ters-çözümü sonucu elde edilen derinlik kesitleri. Ölçüm profilleri x-eksenine paraleldir.

6.3.4 Optimum Elektrik Öz direnç Tomografisi (OERT) Uygulamaları

Dizilim iyileştirmesi uygulamalarında, optimum (en uygun) elektrik öz direnç tomografisi (OERT) yaklaşımı için önerilen iki farklı yöntem Şekil 5.9'da verilmiştir. Bu bölümde ise birleştirilmiş ve aritmetik ortalama yaklaşımlarının arazi verileri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Buna yönelik olarak, öncelikle Şekil 6.13'de *GK21* profilinden Wenner dizilimine göre elde edilen ters-çözüm sonucu verilmiştir. Yüzey ile 2,5 m derinlikleri arasında kalan ortamda 9-12, 17-20 ve 24-26 m arasında (elipsler ile gösterilen) yüksek öz dirençli yapılar gözlenmiştir. Aynı ölçüm profilinde diğer dizilimlerden elde edilen ters-çözüm sonuçları ise Şekil 6.14'te verilmiştir. Beş dizilime ait sonuçlara bakıldığında, 17-20 ve 24-26 m arasında kalan iki yüksek öz dirençli yapının benzer şekilde belirlendiği anlaşılmıştır. Buna karşın ölçüm yapılan profilin başlangıç kısmında yüksek öz dirençli yapıların farklı şekillerde ortaya çıktığı izlenmiştir. Özellikle dipol-dipol diziliminin diğer dizilimlere göre 4-10. metreler arasındaki yüksek öz dirençli yapıları farklı şekilde belirlediği gözlenmiştir (Şekil 6.14b). Bu sonuçlarda tüm dizilimler için yaklaşık 2,5 metreden sonra düşük öz dirençli suya doymun zonun varlığı gözlenmektedir.



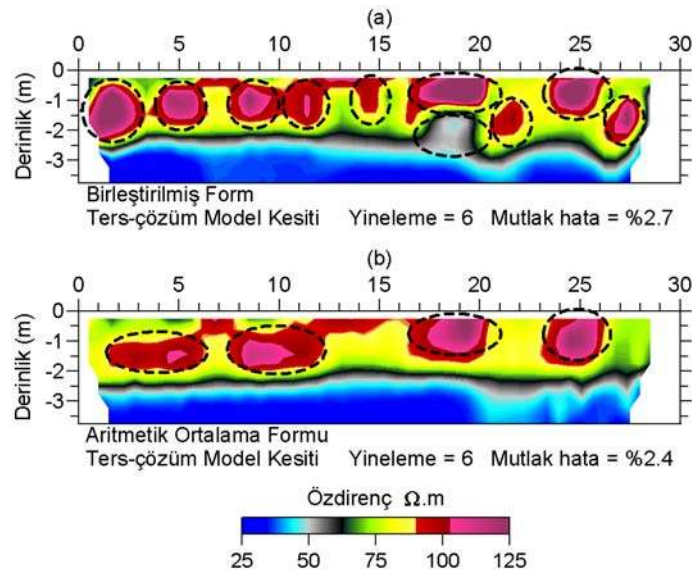
Şekil 6.13 Wenner elektrot dizilimi için güney-kuzey uzanımlı *GK21* profilinin (a) görünür öz direnç, (b) hesaplanan görünür öz direnç, (c) ters-çözüm model kesitleri ve (d) profilin konumu.



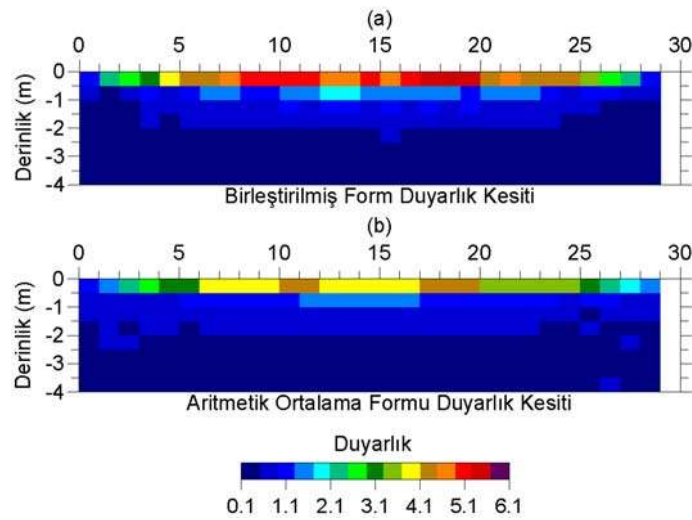
Şekil 6.14 Doğu-batı uzanımlı *GK21* profilinin (a) Wenner-Schlumberger, (b) dipol-dipol, (c) pol-pol ve (d) pol-dipol dizilimleri için ters-çözüm model kesitleri.

Arazi ölçümlerinde kullanılan Wenner, Wenner-Schlumberger, dipol-dipol, pol-pol ve pol-dipol dizilimlerinin birleştirilmiş ve aritmetik ortalama yaklaşımları sonuçları ise Şekil 6.15'te verilmiştir. Beş dizilimin verileri ile toplam 519 adet görünür özdirenç verisinin birleştirilmiş forma göre ters-çözüm sonucu dizilimlerin tek olarak verdikleri sonuçlardan oldukça farklı elde edilmiştir (Şekil 6.13-6.15a). Elipsler ile gösterilen yapıların birleşik ters-çözümde kullanılan dizilim sayına göre değiştiği gözlenmiştir. Dizilim türü ve dizilimlerin veri kalitesi bu yaklaşımın tek dizilim kullanımına göre farklılığını ortaya çıkarmıştır (Şekil 6.15a). Dipol-dipol gibi baskın dizilimlerin etkisi, birleştirilmiş form yaklaşımında öne çıkmıştır. Dizilimlerin ters-çözüm sonuçlarının ayrı ayrı alınıp, aritmetik ortalamalarının hesaplanmasıyla oluşturulan Şekil 6.15b'deki kesitte ise daha duraylı bir sonuç gözlenmiştir. Bu

sonuçlara ait duyarlık kesitleri incelendiğinde ise, yüksek duyarlık değerlerinin yüzeye yakın yerlerde olduğu görülmüştür. Buradan gömülü yapıların öz direnç kesitlerine olan katkısının sığ derinliklerde fazla, düşük değerli derin seviyelerden ise daha az olduğu ortaya çıkmaktadır. Aritmetik ortalama formundan hesaplanan duyarlık kesiti, birleştirilmiş yaklaşıma göre biraz daha düşük değerler göstermiştir (Şekil 6.16). Bunun sebebi aritmetik ortalamanın dizilimlerden gelen yüksek ve düşük değerlerin ortalamasını kullanmış olmasıdır.



Şekil 6.15 GK21 profilinden a) birleştirilmiş ve b) aritmetik ortalama formları için ters-çözüm sonucu elde edilen model kesitleri.

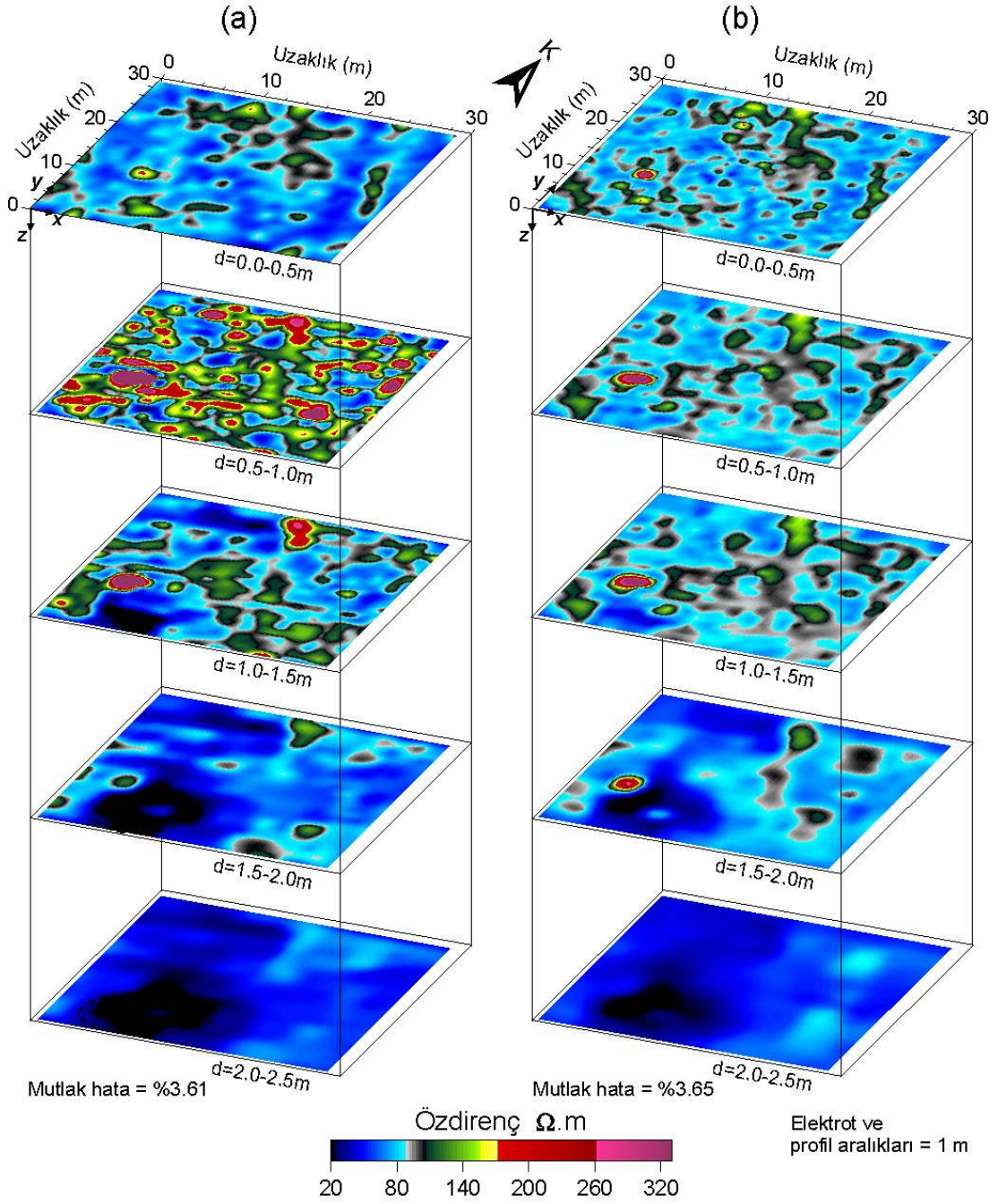


Şekil 6.16 GK21 profilinden a) birleştirilmiş ve b) aritmetik ortalama formları için elde edilen duyarlık kesitleri.

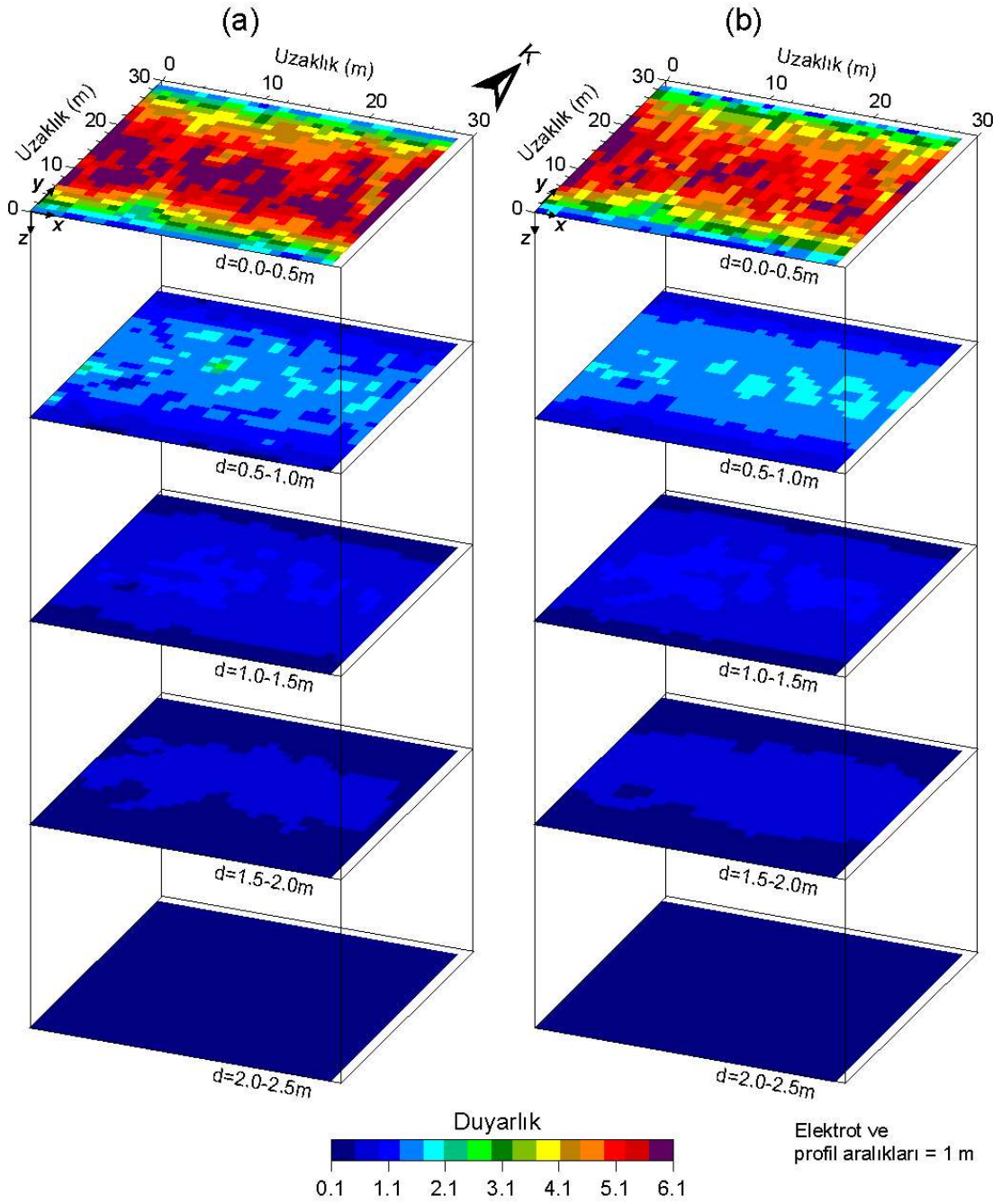
3-boyutlu ERT çalışmaları içinde birleştirilmiş ve aritmetik ortalama formu yaklaşımları en uygun yeraltı görüntüsünün belirlenebilmesi için karşılaştırılmıştır. Şekil 6.17’de verilen bu kesitlerden, aritmetik ortalama formunun gömülü arkeolojik yapıları daha iyi yansıttığı söylenebilmektedir. Özellikle birleştirilmiş form sonucu derinlik kesitleri oldukça karışık bir durumdayken, aritmetik ortalama formunda yapı uzanımları daha net gözlenmektedir. Dipol-dipol dizilimine ait sonuca göre daha yumuşak geçişler sunan aritmetik ortalama formu, bu dizilimin etkisini azaltırken, Wenner dizilimine göre daha yüksek bir yapı belirlenebilirliği sunmuştur. Buna karşın birleştirilmiş form sonucu 0,5-1 m derinlik seviyesinde yüksek öz dirençli ve uzanımları düzgün olmayan birçok yapı ortaya çıkarmıştır.

Şekil 6.18’de verilen duyarlık kesitlerinde ise 0,5-1 m derinlik seviyesine ait birleştirilmiş form sonucunun, aritmetik ortalama formuna göre dağınık şekilde yüksek duyarlık değerleri sunduğu görülmüştür. Bu düzensiz durum dolayısıyla birleştirilmiş form ile yapılan ters-çözüm uygulamalarında karmaşık sonuçlar alınmasına sebep olmuştur. Daha derin seviyelerde (>1,5m) ise, her iki yaklaşımın duyarlık kesitleri birbirine benzer kesitler sunmuştur. Bu seviyelerden elde edilen ters-çözüm sonuçları da birbirine benzer yapılar vermiştir (Şekil 6.17 ve 6.18).

Sonuç olarak, farklı dizilimlerin birleştirilmiş ters-çözümünün her durumda iyi sonuç vermediği anlaşılmaktadır. Arkeolojik amaçlı elektrik öz direnç tomografisi uygulamalarında, aritmetik ortalama formu yaklaşımının tek bir dizilimin ters-çözümü veya birleştirilmiş form iyileştirmesinden daha güvenilir sonuçlar ürettiği belirlenmiştir.



Şekil 6.17 a) Birleştirilmiş ve b) aritmetik ortalama formları için yarı-tam 3B yaklaşım ile ters-çözüm sonucu elde edilen derinlik kesitleri. Ölçüm profilleri y-eksenine paraleldir.



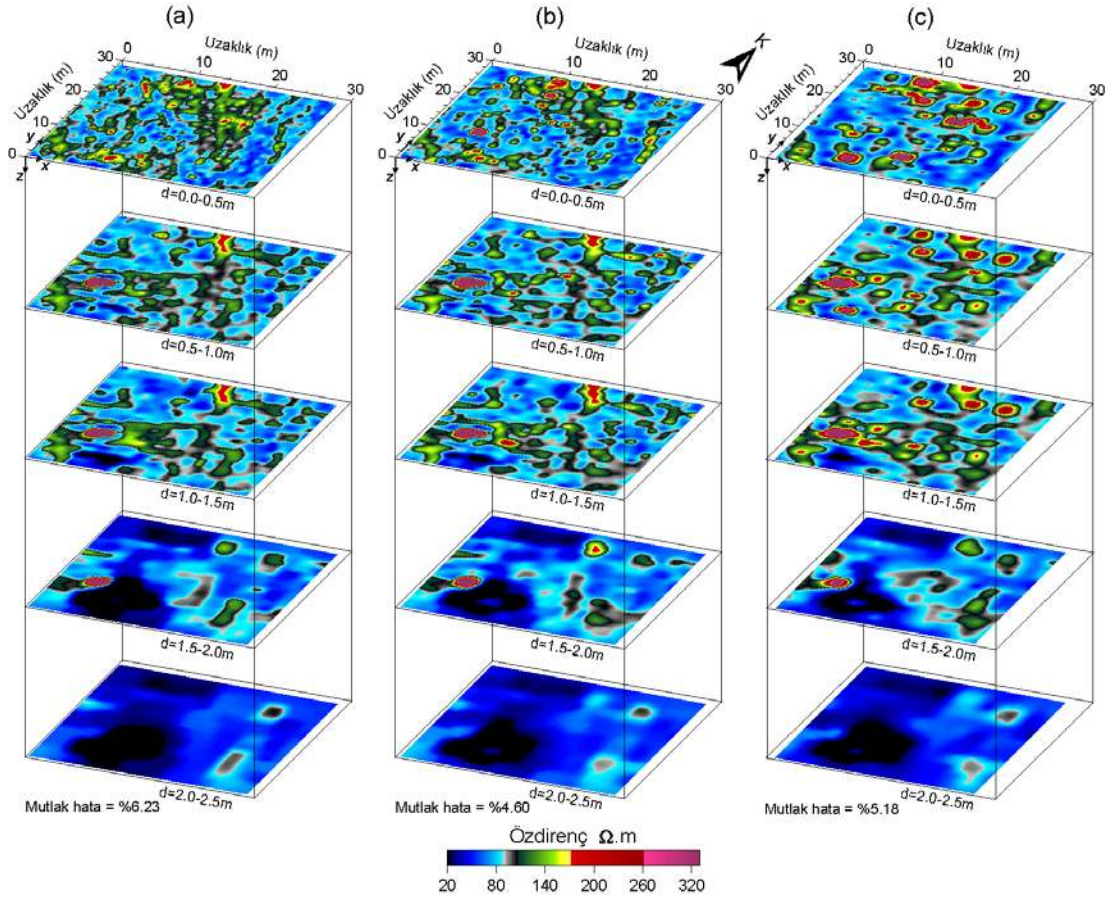
Şekil 6.18 a) Birleştirilmiş ve b) aritmetik ortalama formları için elde edilen duyarlık kesitleri. Ölçüm profilleri y-eksenine paraleldir.

6.3.5 Profil Aralıklarının Etkisi

Üç-boyutlu elektrik öz direnç ölçümlerinde aranan hedef yapıyı belirlemeye yönelik uygun elektrot ve profil aralıklarının seçimi önemli bir olgudur. Yapay

benzetim çalışmalarıyla irdelenebilen bu olgu, Eski Smyrna Höyüğü'nde gerçekleştirilen arazi çalışmalarıyla da test edilmiştir. Bunun için çalışmalar sırasında ölçüm profilleri arası uzaklıklar 0,5, 1 ve 2 metre olarak belirlenmiştir. Ölçüm zamanının aşırı uzun olması nedeniyle elektrot aralıkları değiştirilmemiş ve sabit 1 m olarak tutulmuştur. Böylece ters-çözüm sonuçları üzerinde profil aralıklarının etkisi incelenmiştir.

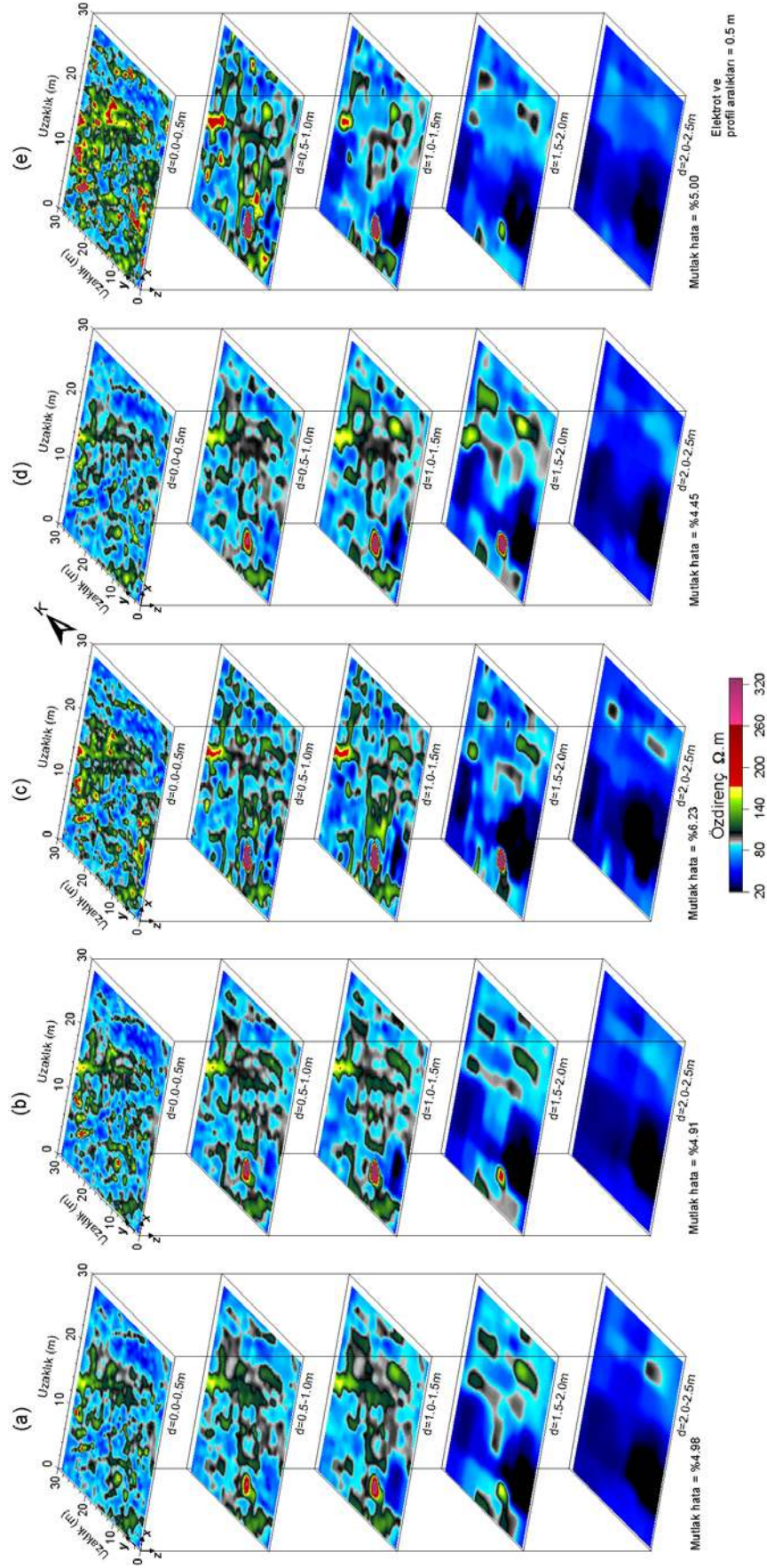
Şekil 6.19'da dipol-dipol dizilimi kullanılarak güney-kuzey yönlü ve profiller arası uzaklıkları değişen ölçümlere göre elde edilen derinlik kesitleri sunulmuştur. Profil aralıklarının değiştirilmesi ile tüm dizilimler için elde edilen görünür öz direnç veri sayıları Tablo 6.2'de verilmiştir. Buna göre ERT görüntülerinin çözünürlüklerinin artan profiller arası uzaklığa karşın açık bir şekilde düştüğü gözlenmiştir. Karıştırılmış toprak zonundan kaynaklanan etkininde bu yönde arttığı söylenebilmektedir. Sık profil aralıkları kullanımı daha düzgün yapı uzanımları sunmuştur. Geniş profil aralıkları ise yüksek öz direnç değerleri ($>220 \Omega.m$) ile bir bozucu etki meydana getirmiştir. Bu etkiler 1,5 m derinliğe kadar uzanmakta ve yorumlamayı zorlaştırmaktadır. Derinde gözlenen düşük öz dirençli yapı grubu ise 0,5 m profil aralığında açıkça gözlenirken, profil aralıklarının artmasıyla bu yapıların uzanımlarında kesiklikler oluşmaktadır. Benzer şekilde 1 m profil aralığı ile yapılan ölçümlerde gözlenen yüksek öz direnç sunan bazı yapıların uzanımlarındaki kesintiler 0,5 m aralık kullanımıyla azalmıştır. Bunların dışında profil aralıklarının 0,5 ve 1 m seçilmesi durumunda elde edilen sonuçlarda çok önemli bir ayrım gözlenememiştir. Profil aralıklarının daraltılmasıyla ölçülecek veri sayısının yaklaşık iki katına çıkması, zamana karşı yapılacak hızlı araştırmalarda 1 m profil aralığının seçilebileceğini göstermektedir. Bu sonuçlara göre höyük türü yerleşmelerin görüntülendirilmesi için 1 m'den büyük aralıkların seçimi önerilmemektedir. Ölçümlerde profil aralıklarının 0,5 m seçilmesi durumunda kullanılan beş dizilime ait ters-çözüm sonucu derinlik kesitleri ise 1 m profil aralıklarına göre yapı izlerinin daha belirgin olarak ortaya çıktığını göstermiştir (Şekil 6.11 ve 6.20).



Şekil 6.19 Dipol-dipol dizilimi için a) 0,5, b) 1 ve c) 2 m profil aralıkları kullanılarak yarı-tam 3B yaklaşım ile ters-çözüm sonucu elde edilen derinlik kesitleri. Ölçüm profilleri y-eksenine paraleldir.

Tablo 6.2 ERT ölçümlerinde profiller arası aralıkların değişimi sonucunda dizilimler için ulaşılan görünür özdirenç veri sayıları.

Dizilim	Profil aralığı 0,5m	Profil aralığı 1m	Profil aralığı 2m
Wenner	5598	2864	1429
Wenner-Schlumberger	6887	3519	1766
Dipol-dipol	5868	3118	1564
Pol-pol	6384	3249	1629
Pol-dipol	6895	3517	1764

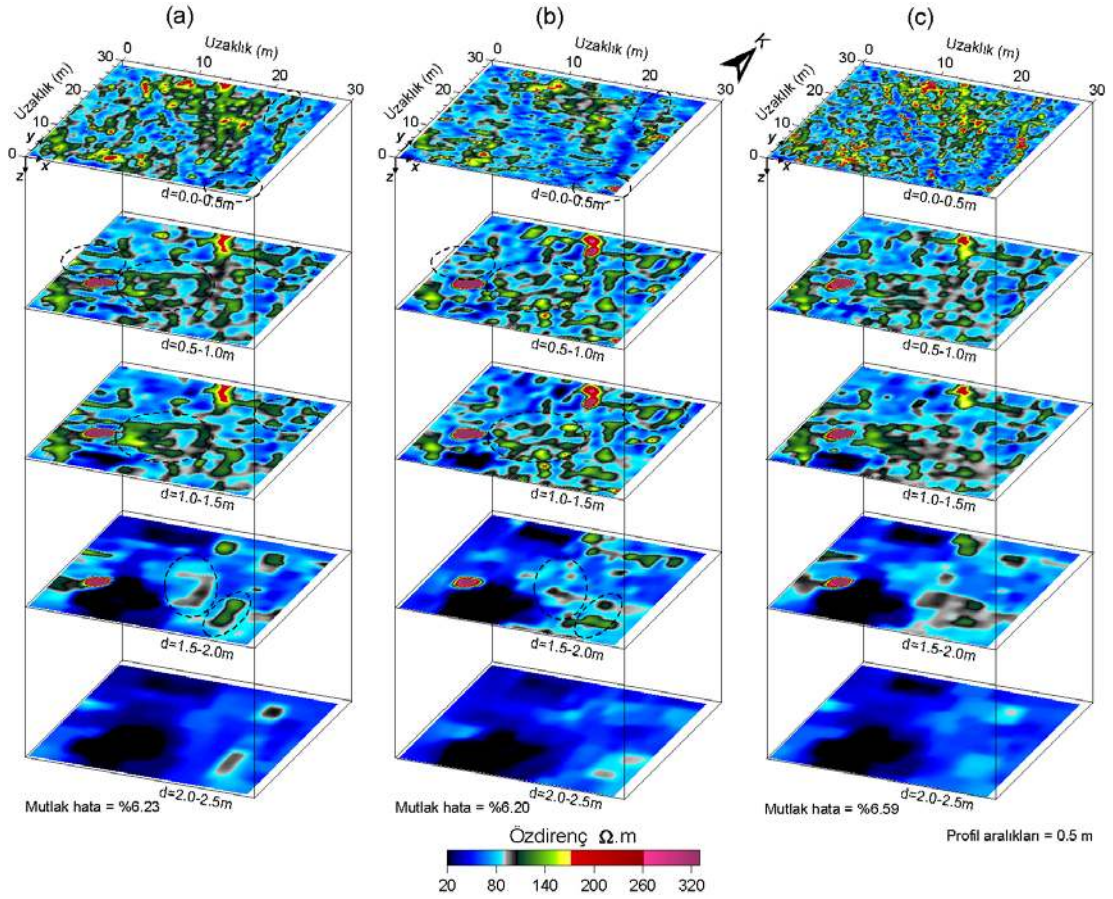


Şekil 6.20 Wenner (a), Wenner-Schlumberger (b), dipol-dipol (c), pol-pol (d) ve pol-dipol (e) dizilimleri için 0,5 m profil aralığı kullanılarak yarı-tam 3B yaklaşım ile ters-çözümü sonucu elde edilen derinlik kesitleri. Ölçüm profilleri y-eksenine paraleldir.

6.3.6 Profil Yönlenmesinin Etkisi

Üç-boyutlu ERT çalışmaları paralel veya birbirine dik profiller üzerinde ölçümler alınarak gerçekleştirilebilmektedir. Jeofizik ölçümlerde profil doğrultusunun aranan hedef yapıyı dik kesecek şekilde seçilmesi yeğlenmektedir. Fakat höyük gibi karmaşık yeraltı yapılarının olduğu ortamlarda hedef yapı olan gömülü arkeolojik kalıntıların uzanımları farklı doğrultularda olabilmektedir. Bu gibi durumlarda profil doğrultusunun seçimi bir problemdir. Eski Smyrna Höyüğü'nde yapılan ERT çalışmasında ise güney-kuzey ve doğu-batı uzanımlı olmak üzere iki farklı doğrultudaki profiller üzerinden görünür öz direnç veri setleri ölçülmüştür. Bu iki farklı veri seti ve bunların birleştirilmesiyle elde edilen birleşik veri seti, yarı-tam 3B yaklaşım ile değerlendirilerek profil doğrultusunun etkisi incelenmiştir. Şekil 6.21'de dipol-dipol dizilimi için profil doğrultusu etkisi verilmiştir. Buna göre G-K ve D-B uzanımlı profillerin sonuçları arasında gözlenen farklılıklar elipslerle gösterilmiştir. Yapı uzanımlarında karşılaşılan bu farklılıklar, profil doğrultusundan dolayı profilin gömülü yapıyı farklı yerlerden kesmesi ile ilgilidir. Birleşik veri seti ise her iki yönden elde edilen sonuçların bir bütünü şeklinde karşımıza çıkmıştır. Dolayısıyla birleşik veri seti daha yorumlanabilir derinlik kesitleri sunmaktadır. Ancak tek bir doğrultu kullanılarak yapılan ölçümlerin de uygulayıcıyı tamamen hatalı bir sonuca götürmediği elde edilen sonuçlardan anlaşılmaktadır. Bu tür uygulamalarda ERT çalışmalarının ölçüm zamanı bakımından daha avantajlı olacağı da belirtilmelidir.

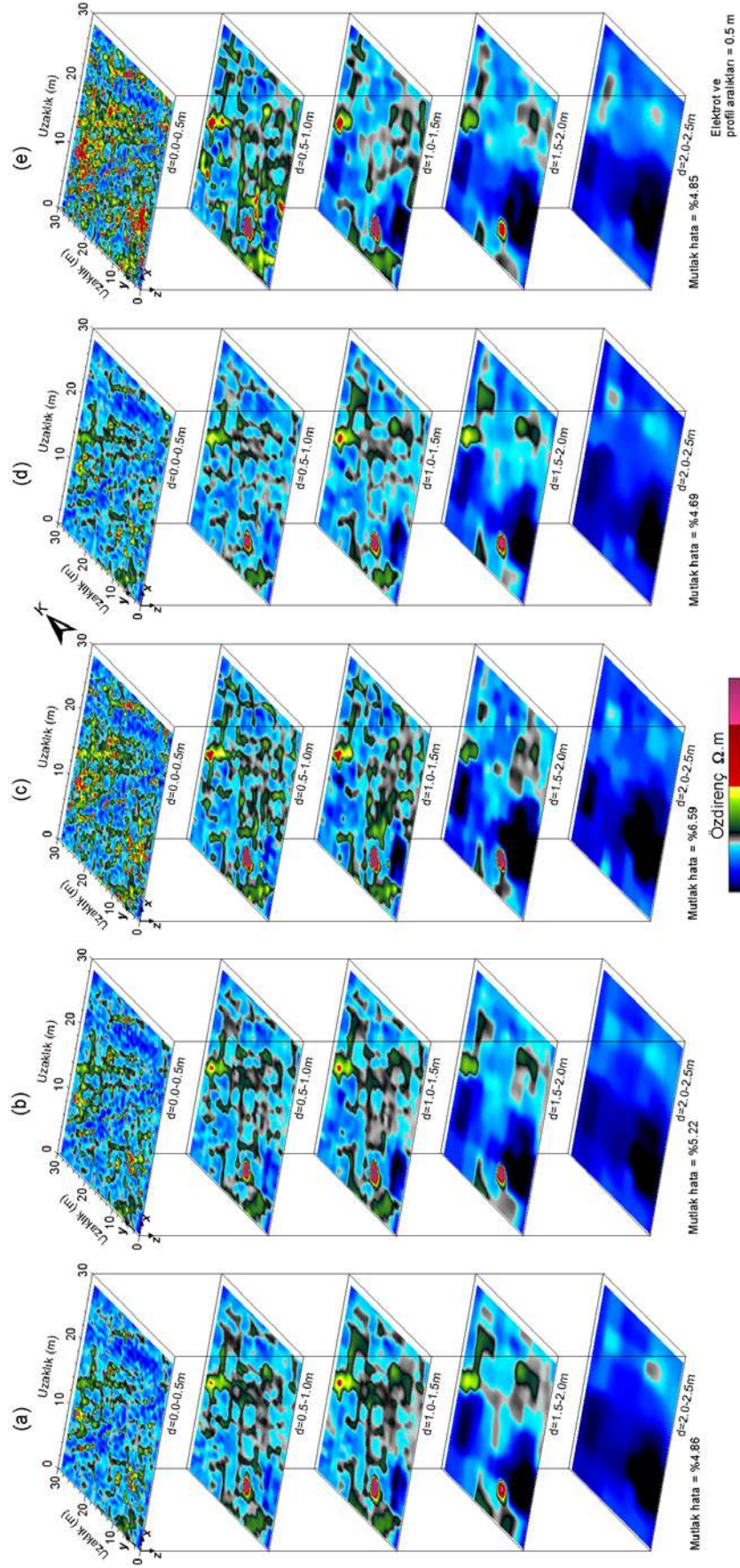
Her iki yönde ölçülen profillerden oluşan birleşik veri setinin 0,5 m profil aralığı ve kullanılan beş dizilim için verdiği ters-çözüm derinlik kesitleri Şekil 6.22'de verilmiştir. Bu veri setleri ile dizilimler için en yoğun veri sayısına ulaşılmıştır. Böylelikle profil yönlenme etkisinin ortadan kaldırılmasının yanı sıra seçilen sık profil aralıkları ile ölçüm alanından en fazla bilgi elde edilebilmiştir. Bu derinlik kesitlerinde tüm dizilimler 0,5-2 m derinlikleri arasında yapı izlerini belirgin bir biçimde ortaya çıkarmıştır.



Şekil 6.21 Dipol-dipol dizilimi için a) y- yönlü (güney-kuzey), b) x- yönlü (doğu-batı) ve c) xy- yönlü profiller kullanılarak yarı-tam 3B yaklaşım ile ters-çözüm sonucu elde edilen derinlik kesitleri.

6.4 Arkeolojik Yorumlama

Arkeolojik alanlarda gerçekleştirilen jeofizik çalışmalar sonrasında, elde edilen jeofizik sonuçlardan çalışma alanına ait bir arkeolojik yorumlamanın yapılması ana amaçtır. Arkeolojik yorumlar ana iki aşamada gerçekleştirilmektedir. Bu aşamalardan birincisi, kullanılan jeofizik yöntemin ayırt ettiği fiziksel özelliğe göre elde edilen haritalar üzerinde karşılaşılan fiziksel zıtlıkların işaretlenmesidir. Örneğin elektrik öz direnç ölçümlerinde öz direnç farklılığı olarak yüksek-düşük öz direnç değerleri, manyetik ve yeraltına nüfuz eden radar ölçümlerinde ise yüksek-düşük manyetik değerler ve yüksek yansımaya değerleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Birinci aşamada belirlenen yapı ve anomali lokasyonları ve uzanımlarının arkeolojik olarak anlamlandırılması gerekmektedir. Bu ikinci aşamada, jeofizik ölçümler konusunda tecrübesi bulunan ve kazı sonucu ortaya çıkarılan arkeolojik yapılar hakkında bilgisi

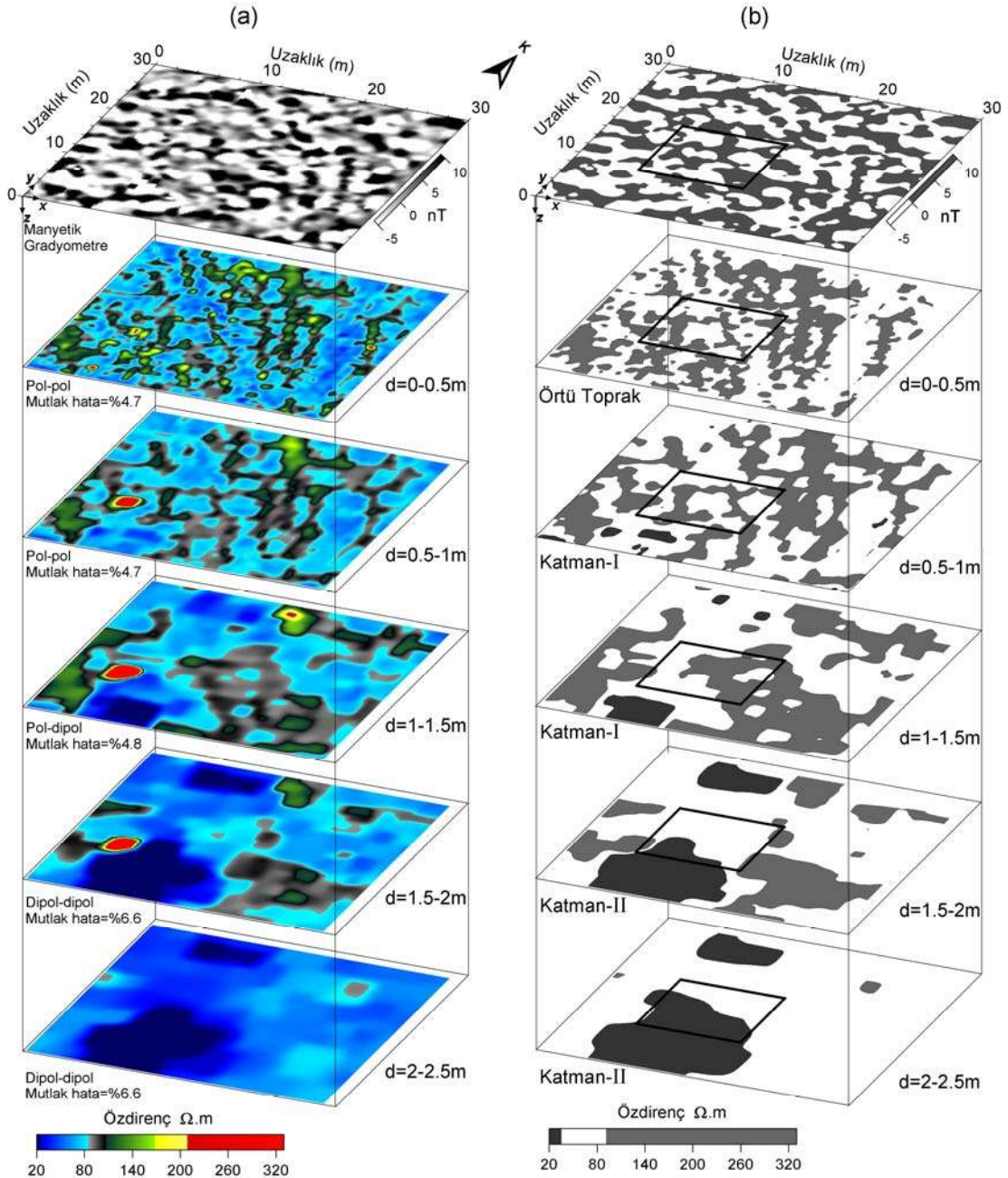


Şekil 6.22 Wenner (a), Wenner-Schlumberger (b), dipol-dipol (c), pol-pol (d) ve pol-dipol (e) dizilimleri için 0.5 m profil aralığı kullanılarak yarı-tam 3B yaklaşım ile ters-çözümü sonucu elde edilen derinlik kesitleri. Ölçüm profilleri x- ve y-eksenine paraleldir.

bulunan bir arkeolog tarafından yapılmalıdır (Neubauer ve diğer., 2002). Diğer bir seçenek ise jeofizikçi ve arkeologların ortak çalışmasıdır. Böylece jeofizik yapı ve anomaliler arkeolojik yapılar olarak tanımlanabilmektedir. Bu tanımlamalar memleket koordinatlarıyla coğrafi bilgi sistemleri temelinde, hava fotoğrafları ve diğer arkeolojik prospeksiyon sonuçlarıyla birlikte işlenebilmektedir (Neubauer, 2004). Bunların sonuçlarından ise arkeolojik yapılara ait yerleşim planları ve mimari özellikler ortaya konabilmekte ve iki-boyutlu planlar ile üç-boyutlu mimari çizimler yapılabilmektedir.

Eski Smyrna Höyüğü'nde yapılan jeofizik çalışmalar sonucunda *A* bölgesine ait arkeolojik yorumlama için manyetik gradyometre ve ERT görüntülerinden yararlanılmıştır (Şekil 6.23). Buna göre alanda KB-GD uzanımlı yapılardan oluşan bir mimari düzenin bulunduğu saptanmıştır. Manyetik gradyometre ve ERT yöntemi ile belirlenen uzanımlar benzer sonuçlar vermiştir. Verilen ERT derinlik kesitleri, profil aralıkları 0,5 m ve profil doğrultusu ise güney-kuzey ve doğu-batı uzanımlı profillerin birleştirilmesinden oluşturulmuştur. Böylelikle üç-boyutlu ERT uygulamaları ile yeraltının 2,5 metre derinliğine kadar olan bölümü için arkeolojik mimari tanımlanmaya çalışılmıştır. Fakat höyük alanında farklı dönemlere ait yerleşmelerin yapı kalıntılarının derin seviyelere kadar görülebildiği bilinmektedir. Elektrik özdirenç yönteminden elde edilen görüntülerin derinlikle beraber çözünürlüklerinin azalması, 2,5 metreden daha derinde olabilecek yapılar için tanımlanabilirliği de azaltmaktadır. Bu derinlik seviyesine kadar görüntülendirilen höyük alanında iki farklı döneme ait olduğu düşünülen arkeolojik tabakalanma (Katman-I ve Katman-II) yorumlanmıştır. Bu tabakaların taş ve kerpiç temelli yapıları içerdiği ve üzerlerini ise arkeolojik kalıntılara ait molozlar ile karışık örtü toprağın kapattığı düşünülmektedir (Şekil 6.23). Şekil 6.23b'de ise arkeolojik kalıntı olarak tanımlanan yapıların daha belirgin şekilde izlenebilmesi için, yüksek özdirenç değerleri ($> 110 \Omega.m$) açık gri ve düşük özdirenç değerleri ise koyu gri renkler ile verilmiştir. Manyetik gradyometre haritası da yalnızca pozitif değerleri içerecek şekilde yeniden çizdirilmiştir. Katman-I oldukça düzgün yapı uzanımları içerdiğinden, bu yapıların olası Megaron tipi avlulu evlerin temelleri ile ilişkili olabileceği düşünülmüştür (Şekil 2.5b). Katman-II'de gözlenen düşük özdirençli

yapılar ise kerpiç malzeme içeren yapı kalıntıları olarak yorumlanmıştır. Fakat yeraltının bu seviyelerdeki düşük öz direnç zıtlığı özelliği ve ERT yönteminin çözüm gücü, elde edilen bu görüntülerde yapı ayrırlılığını olumsuz yönde etkilemiştir. Sonuç olarak çalışma alanında 10x10 m boyutlarında bir test kazısının lokasyonu önerilmiştir (Şekil 6.23b). Bu kazı çalışması ile olası gömülü arkeolojik yapıların doğrulanması yapılabilecektir.



Şekil 6.23 A bölgesi için a) manyetik gradyometre görüntüsü, pol-pol, pol-dipol ve dipol-dipol dizilimlerine ait ters-çözüm sonucu derinlik kesitleri ve b) verilen bu jeofizik sonuçlar için yorum. Önerilen test kazısı lokasyonu dikdörtgen ile gösterilmiştir.

BÖLÜM YEDİ

SONUÇLAR

Anadolu ve Mezopotamya bölgelerinde sıklıkla görülen ve arkeolojik yerleşme türlerinden biri olan höyüklerin jeofizik yöntemler ile araştırılması yakın gelecekte önemli oranda artacaktır. Çok katmanlı bir stratigrafi sunmalarından dolayı tek katmanlı yerleşmelere göre araştırılmaları daha zor olan höyüklerin tanımlanmasında geliştirilen jeofizik yöntemlerin katkıları önemli olacaktır. Bu tez çalışması kapsamında, elektrik öz direnç ters-çözüm çalışmalarının höyükler üzerinde uygulanabilirliği ve çözüm gücü, kuramsal ve arazi çalışmalarıyla irdelenmiştir. Elektrik öz direnç tomografisi (ERT) olarak da adlandırılan yöntem ile yeraltı öz direnç dağılımının elde edilmesi işlemi, ERT verisinin iki- veya üç-boyutlu toplanmasını ve verinin ters-çözüm işlemiyle değerlendirilmesini içermektedir.

ERT yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen yapay benzetim çalışmaları ile höyük türü çok katmanlı bir arkeolojik model üç-boyutlu olarak tasarlanmış ve uygun bilgisayar programları kullanılarak düz ve ters-çözüm değerlendirmeleri yapılmıştır. İşlemler Res3Dinv ve bu tez kapsamında geliştirilen Matlab tabanlı programlar ile gerçekleştirilmiş ve Matlab programlarının doğruluk ve hız bakımından çalışabilirliği test edilmiştir. Sonlu-farklar yöntemini modelden yapay görünür öz direnç verisini elde etmek için kullanan Matlab-SFY programı, analitik sonuçlar ve Res3Dmod programı ile büyük bir uyum göstermiştir. Ters-çözüm için geliştirilen MatlabERTinv ve Res3Dinv programları ile yapılan karşılaştırmalar ise, açık kaynak kodlu MatlabERTinv programının ters-çözüm işlem adımlarına müdahale etme ve geliştirme anlamında önemli bir kaynak olduğunu göstermiştir. Buna karşın, fazla sayıda (>10000) model parametresi ile yapılan değerlendirmeler için bu programın ihtiyaç duyduğu bilgisayar hafıza gereksinimi arttığından höyük modelinin ters-çözümü yapılamamıştır. Bu durum, programın kullanıcı dostu ve C++ gibi diller ile tekrar düzenlenmesinin gerekli olduğunu ortaya çıkarmıştır. Hesaplama sürelerinin kısaltılması için tercih edilen paralel hesaplama yaklaşımı ise, seri hesaplamalara göre %60 oranında hız artışı sağlamıştır. Bu yaklaşım 3-boyutlu ERT ters-çözümü için Matlab'in sağladığı bir avantajdır.

MatlabERTinv ters-çözüm programı arazi verilerinin bir bölümünü değerlendirmek için de kullanılmıştır. Yapılan uygulamalarda Matlab programının arazi verisinin ters-çözümünde Res3Dinv programına oldukça benzer modeller ürettiği gözlenmiştir. Bilgisayar hafıza sınırlamaları aşılabildiğinde daha fazla model parametresi ve görünür öz direnç verisinin bu program ile çözümlenebileceği ortaya çıkmıştır. İlerleyen dönemlerde programın geliştirilmesinin ve hızlandırılmasının önemli bir araştırma konusu olacağı düşünülmektedir.

Gömülü arkeolojik kalıntıların belirlenmesinde, yapılan modelleme ve arazi çalışmalarına göre, bloklu ters-çözümün düzgünlük-kısıtlı ters-çözümüne göre daha başarılı sonuçlar ürettiği görülmüştür. Örtü toprak ve hedef yapılar arasında keskin sınırlar bloklu ters-çözüm ile elde edilmiştir. Yapılan ters-çözüm değerlendirmelerinde kısmi ve yarı-tam 3B yaklaşımlar kullanılmıştır. Bu yaklaşımlar ile tam 3-boyutlu ERT ölçümlerinde karşılaşılan dizilim kısıtlamasının (sadece pol-pol ve bazı gradyent dizilimleri ile mümkün olan ölçümlerin) önüne geçildiği görülmüştür. Bu yaklaşımlar kullanılarak yapılan 3-boyutlu ERT çalışmalarında dizilim etkisi, profil ile elektrotlar arası uzaklıkların ve profil doğrultusunun etkileri incelenebilmiştir. Ayrıca yöntemin uygulanabilirliği Eski Smyrna Höyüğü'nde gerçekleştirilen arazi çalışmalarıyla da irdelenmiştir.

Yapay benzetim ve arazi verilerinin değerlendirmeleri sonucunda yarı-tam 3B çözümün kısmi-3B çözüme göre daha başarılı sonuçlar verdiği anlaşılmıştır. Kısmi-3B çözüm yeraltının üç-boyuttaki öz direnç dağılımını sunmak için yeterli değildir. Bu çözüm derinlik kesitlerinde karmaşık görüntüler oluşturmuştur. ERT çalışmalarında sık kullanılan Wenner, Wenner-Schlumberger, dipol-dipol, pol-pol ve pol-dipol dizilimlerinin höyük türü arkeolojik yerleşmelerin görüntülendirilmesine olan etkileri de irdelenmiştir. Elde edilen sonuçlar dipol-dipol ve pol-dipol dizilimlerinin dirençli ve iletken yapılar için daha yorumlanabilir görüntüler verdiğini ortaya koymuştur. Wenner ve Wenner-Schlumberger dizilimleri ise birbirine benzer ve dipol-dipol ve pol-dipol dizilimlerine göre daha zayıf bir özellik sunarlarken, pol-pol dizilimi ise bu iki dizilime göre daha başarılı bulunmuştur. Elektrot ve profiller arası uzaklıkların etkisinin gömülü yapıların belirlenebilirliğini

önemli oranda etkilediği kuramsal model ve arazi verisi sonuçlarından anlaşılmıştır. Geniş seçilecek bu uzaklık değerlerinin çözüm gücünü olumsuz yönde etkilediği gözlenmiş ve 2 metreden küçük değerlerin çok katmanlı arkeolojik konteksin belirlenmesinde daha uygun olduğu belirtilmiştir. Profil yönlenmesi etkisinin ise sık profil aralıkları kullanılması durumunda ihmal edilebilecek bir fark ortaya çıkardığı, buna karşın geniş profil aralıklarının kullanılması zorunlu ise, birbirine dik doğrultulardaki profillerden 3-boyutlu ERT ölçümlerinin yapılması gerektiği ortaya konmuştur.

Eski Smyrna Höyüğü'nde gerçekleştirilen ERT ölçüm ve değerlendirmeleri sonucunda, ölçüm alanı olan *A* bölgesinde örtü toprağın altında iki farklı döneme ait olduğu düşünülen çok katmanlı stratigrafi yorumlanmıştır. Elde edilen yeraltı öz direnç dağılımlarına göre düzgün yapı uzanımları gösteren bu tabakaların taş ve kerpiç temelli yapılardan oluştuğu düşünülmektedir. Bu sonuçlar ışığında ölçüm alanında 10x10 metrelik bir test kazısı lokasyonu önerilmiştir. Bu alanda henüz bir arkeolojik kazı çalışması yapılmamıştır.

Sonuç olarak, elektrik öz direnç yönteminin ters-çözüm değerlendirmesi arkeolojide karşılaşılan çok katmanlı yerleşimlerin görüntülendirilmesi ve genel mimarinin ortaya çıkarılmasında yeterli öz direnç zıtlığının olması koşulu ile uygun bir yöntemdir. Yöntemin höyük alanlarındaki üç-boyutlu uygulamaları için yukarıda değinilen ölçüm ve değerlendirme stratejilerine göre yapılacak çalışmalardan olumlu sonuçlar elde edilebilmektedir. Bu sonuçlar ise, arkeolojik kazı çalışmalarını yönlendirme açısından önemlidir. Böylece kazı maliyetleri düşerken, zaman kaybı da azaltılabilecektir.

KAYNAKLAR

- Aitken, M. J. (1974). *Physics and Archaeology*. Oxford: Clarendon.
- Akurgal, E. (1993). *Eski İzmir I* (2. Baskı). Ankara: Türk Tarih Kurumu.
- Aster, R. C., Borchers, B. ve Thurber, C. (2004). *Parameter Estimation and Inverse Problems*. Amsterdam: Elsevier.
- Astin, T., Eckardt, H. ve Hay, S. (2007). Resistivity imaging survey of the Roman Barrows at Bartlow, Cambridgeshire, UK. *Archaeological Prospection*, 14, 24-37.
- Aspinall, A. ve Lynam, J. T. (1970). An induced polarization instrument for the detection of near surface features. *Prospezioni Archeologiche*, 5, 67-75.
- Aspinall, A. ve Gaffney, C. F. (2001). The Schlumberger array - potential and pitfalls in archaeological prospection. *Archaeological Prospection*, 8, 199-209.
- Aspinall, A. ve Saunders, M. K. (2005). Experiments with the square array. *Archaeological Prospection*, 12, 115-129.
- Athanasίου, E. N., Tsourlos, P. I., Papazachos, C. B. ve Tsokas, G. N. (2007). Combined weighted inversion of electrical resistivity data arising from different array types. *Journal of Applied Geophysics*, 62, 124-140.
- Başokur, A. T. (1999). Automated 1D interpretation of resistivity soundings by simultaneous use of the direct and iterative methods. *Geophysical Prospecting*, 47, 149-178.
- Başokur, A. T. (2002). *Doğrusal ve doğrusal olmayan problemlerin ters-çözümü*. Ankara: TMMOB Jeofizik Mühendisleri Odası Eğitim Yayınları.

- Berge, M. A. ve Drahor, M. G. (2007). Electrical resistivity inversion modelling studies for commonly used arrays in höyük (artificial hill) type of archaeological settlements. *Studijne Zvesti*, 41, 112-116.
- Blome, M., Maurer, H. R. ve Schmidt, K. (2008). Advances in three-dimensional geoelectric forward solver techniques. *Geophysical Journal International*, 176, 740-752.
- Broyden, C. G. (1965). A class of methods for solving nonlinear simultaneous equations. *Mathematics of Computation*, 19, 577-593.
- Candansayar, M. E. ve 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, 40-53.
- Candansayar, M. E. (2008). Two-dimensional individual and joint inversion of three- and four-electrode array dc resistivity data. *Journal of Geophysics and Engineering*, 5, 290-300.
- Canitez, N. (1997). *Jeofizikte modelleme*. İstanbul: Literatür Yayınları.
- Casana, J., Herrmann, J. T. ve Fogel, A. (2008). Deep subsurface geophysical prospection at Tell Qarqur, Syria. *Archaeological Prospection*, 15, 207-225.
- Chambers, J. E., Ogilvy, R. D., Kuras, O., Cripps, J. C. ve Meldrum, P. I. (2002). 3D electrical imaging of known targets at a controlled environmental test site. *Environmental Geology*, 41, 690-704.
- Chandrupatla, T. ve Belegundu, A. D. (1997). *Introduction to Finite elements in Engineering* (2nd ed.). New Jersey: Prentice Hall.

- Christensen, N. B. ve Sorensen, K. I. (1998). Surface and borehole electric and electromagnetic methods for hydrogeological investigations. *European Journal of Engineering and Environmental Geophysics*, 3(1), 75-90.
- Claerbout, J. F. ve Muir, F. (1973). Robust modeling with erratic data. *Geophysics*, 38, 826-844.
- Clark, A. (1968). A square array for resistivity surveying. *Prospezioni Archeologiche*, 3, 111-114.
- Clark, A. (1996). *Seeing Beneath the Soil*. London: Batsford.
- Constable, S. C., Parker, R. L. ve Constable, C. G. (1987). Occam's inversion: a practical algorithm for generating smooth models from EM sounding data. *Geophysics*, 52, 289-300.
- Coggon, J. H. (1971). Electromagnetic and electrical modeling by the finite element method. *Geophysics*, 36, 132-155.
- Dabas, M., Decriaud, J. P., Ducomet, G., Hesse, A., Mounir, A. ve Tabbagh, A. (1994). Continuous recording of resistivity with towed arrays for systematic mapping of buried structures at shallow depth. *Revue d'Archéométrie*, 18, 13-19.
- Dabas, M. (2009). Theory and practice of the new fast electrical imaging system ARP. In S. Campana, S. Piro, (Eds.). *Seeing the Unseen. Geophysics and Landscape Archaeology* (105-126). London: CRC Pres.
- Dahlin, T. (1996). 2D resistivity surveying for environmental and engineering applications. *First Break*, 14, 275-284.
- Dahlin, T. ve Loke, M. H. (1998). Resolution of 2D Wenner resistivity imaging as assessed by numerical modelling. *Journal of applied Geophysics*, 38(4), 237-249.

- Dahlin, T. (2001). The development of dc resistivity imaging techniques. *Computer and Geosciences*, 27, 1019-1029.
- Dahlin, T. ve Zhou, B. (2004). A numerical comparison of 2-D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical Prospecting*, 52, 379 -398.
- deGroot-Hedlin, C. ve Constable, S. (1990). Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, 55, 1613-1624.
- de la Vega, M., Osella, A. ve Lascano, E. (2003). Joint inversion of Wenner and dipole-dipole data to study a gasoline-contaminated soil. *Journal of Applied Geophysics*, 54, 97-109.
- Derin, Z. ve Batmaz, A. (2004). Bornova-Kemalpaşa arkeolojik envanteri 2003. *TÜBA Kültür Envanteri Dergisi*, 2, 75-100.
- Dey, A. ve Morrison, H. F. (1979a). Resistivity modeling for arbitrarily shaped two-dimensional structures. *Geophysical Prospecting*, 27, 106-136.
- Dey, A. ve Morrison, H. F. (1979b). Resistivity modeling for arbitrarily shaped three-dimensional structures. *Geophysics*, 44, 753-780.
- Dörpfeld, W. (1902). *Troje und Ilion: Ergebnisse der Ausgrabungen in den vorhistorischen und historischen Schichten von Ilion 1870 – 1894 (Band 1)*. Athen: Beck and Barth.
- Drahor, M. G. (1999). Arkeoloji Jeofiziği: Arkeojeofizik-II. *Arkeoloji ve Sanat*, 88, 2-12.
- Drahor, M. G. ve Kaya, M. A. (2000). A large-scale geophysical prospection in the Acemhöyük the site of the Assyrian trade colony period. *Turkish Academy of Sciences Journal of Archaeology*, 3, 85-107.

- Drahor, M. G. (2005). Arkeolojik prospeksiyon. *Arkeoloji ve Sanat*, 119, 114-123.
- Drahor, M. G., Göktürkler, G., Berge, M. A. ve Kurtulmuş, T. Ö. (2005). Bazı sığ yeraltı yapılarının öz direnç ters-çözümü. *Yerbilimleri*, 26, 1-14.
- Drahor, M. G. (2007). Arkeolojik alan incelemelerinde elektrik öz direnç prospeksiyonu. *Arkeoloji ve Sanat*, 124, 115-140.
- Drahor, M. G., Göktürkler, G., Berge, M. A. ve Kurtulmuş, T. Ö. (2007). 3-D resistivity imaging from an archaeological site in south-western Anatolia, Turkey: a case study. *Near Surface Geophysics*, 5, 195-201.
- Drahor, M. G., Kurtulmuş, T. Ö., Berge, M. A., Hartmann, M. ve Speidel, M. A. (2008a). Magnetic imaging and electrical resistivity tomography studies in a Roman Military installation found in Satala archaeological site from northeastern of Anatolia, Turkey. *Journal of Archaeological Science*, 35, 259-271.
- Drahor, M. G., Berge, M. A., Kurtulmuş, T. Ö., Hartmann, M. ve Speidel, M. A. (2008b). Magnetic and electrical resistivity tomography investigations in a Roman Legionary camp site (Legio IV Scythica) in Zeugma, southeastern Anatolia, Turkey. *Archaeological Prospection*, 15, 159-186.
- Edwards, L. S. (1977). A modified pseudosection for resistivity and IP. *Geophysics*, 42, 1020-1036.
- Ellis, R. G. ve Oldenburg, D. W. (1994a). Applied geophysical inversion. *Geophysical Journal International*, 116, 5-11.
- Ellis, R. G. ve Oldenburg D. W. (1994b). The pole-pole 3-D DC-resistivity inverse problem: a conjugate-gradient approach. *Geophysical Journal International*, 119, 187-194.

- Emre, Ö., Özalp, S., Doğan, A., Özaksoy, V., Yıldırım, C. ve Göktaş, F. (2005). *İzmir Yakın Çevresinin Diri Fayları ve Deprem Potansiyelleri*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü [MTA] 10754 sayılı Raporu.
- Fox, R. C., Hohmann, G. W., Killpack, T. J. ve Rijo, L. (1980). Topographic effects in resistivity and induced polarization surveys. *Geophysics*, 45, 75-93.
- Gaffney, C. F. (2008). Detecting trends in the prediction of the buried past: a review of geophysical techniques in archaeology. *Archaeometry*, 50, 313-336.
- Gharibi, M. ve Bentley, L. R. (2005). Resolution of 3-D electrical resistivity images from inversions of 2-D orthogonal lines. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 10, 339-349.
- Ghosh, D. P. (1971). The application of linear filter theory to the direct interpretation of geoelectrical resistivity sounding measurements. *Geophysical Prospecting*, 19, 192-217.
- Graybill, F. A. (1969). *Introduction to matrices with applications in statistics*. Belmont: Wadsworth Pub. Co. Inc.
- Griffiths, D. H., Turnbull, J. ve Olayinka, A. I. (1990). Two-dimensional resistivity mapping with a computer-controlled array. *First Break*, 8(4), 121-129.
- Griffiths, D. H. ve Barker, R. D. (1993). Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *Journal of Applied Geophysics*, 29, 211-226.
- Griffiths, D. H. ve Barker, R. D. (1994). Electrical imaging in archaeology. *Journal of Archaeological Science*, 21, 153-158.

- Günther, T., Rücker, C. ve Spitzer, K. (2006). Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity data incorporating topography – II. Inversion. *Geophysical Journal International*, 166, 506-517.
- Haber, E., Ascher, U. M., Aruliah, D. A. ve Oldenburg, D. W. (2000). Fast simulation of 3D electromagnetic problems using potentials. *Journal of Computational Physics*, 163, 150-171.
- Herbich, T. (2009). Magnetic survey of the late period grate temple enclosure in Tell el-Balamun, Egypt. *Studijne Zvesti*, 41, 77-79.
- Hestense, M. ve Stiefel, E. (1952). Methods of conjugate gradients for solving linear systems. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 49, 409-436.
- Holcombe, H. T. ve Jiracek, G. R. (1984). Three-dimensional terrain corrections in resistivity surveys. *Geophysics*, 49, 439-452.
- Jepsen, A. F. (1969). *Numerical modeling in resistivity prospecting*. PhD Thesis, University of California, Berkeley.
- Inman, J. R. (1975). Resistivity inversion with ridge regression. *Geophysics*, 40, 798-817.
- Kampke, A. (1999). Focused imaging of electrical resistivity data in archaeological prospecting. *Journal of Applied Geophysics*, 41, 215-227.
- Kayan, İ. (2000). İzmir çevresinin morfotektonik birimleri ve alüvyal jeomorfolojisi. *Batı Anadolu'nun Depremselliği Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, 103-111.
- Koca, M. Y. (1995). *Slope Stability Assessment of the Abandoned Andesite Quarries in and around the Izmir city centre*. PhD Thesis, Graduate School of Natural and Applied Sciences of Dokuz Eylul Univ., Izmir.

- Lines, L. R. ve Treitel, S. (1984). Tutorial: A review of least-squares inversion and its application to geophysical problems. *Geophysical Prospecting*, 32, 159-186.
- Linford, N. (2006). The application of geophysical methods to archaeological prospection. *Reports on Progress in Physics*, 69, 2205-2257.
- Loke M. H. ve Barker R. D. (1996a). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131-152.
- Loke M. H. ve Barker, R. D. (1996b). Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion techniques. *Geophysical Prospecting*, 44, 499-524.
- Loke M. H., Acworth I. ve Dahlin T. (2003). A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2-D electrical imaging surveys. *Exploration Geophysics*, 34, 182-187.
- Loke, M. H., Alfouzan, F. A. ve Nawawi, M. N. M. (2007). Optimization of electrode arrays used in 2D resistivity imaging surveys. *19th International Geophysical Conference and Exhibition ASEG Extended Abstract*, 18-22 November 2007. Perth Western Australia.
- Loke, M. H. (2010). *Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys*, Retrieved December 6, 2010, from <http://www.geoelectrical.com/downloads.php>
- Lowry, T., Allen, M. B. ve Shive, P. N. (1989). Singularity removal: A refinement of resistivity modeling techniques. *Geophysics*, 54, 766-774.
- Menke, W. (1984). *Geophysical data analysis: Discrete inverse theory* (Rev. ed.). California: Academic Press.

- Molano, C. E., Salamanca, M. ve Van Overmeeren, R. A. (1990). Numerical modeling of standard and continuous vertical electrical sounding. *Geophysical Prospecting*, 41, 705-718.
- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (2002). *1/500 000 ölçekli Türkiye jeoloji haritaları*, No:7, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü [MTA] Yayınları.
- Mufti, I. R. (1976). Finite difference resistivity modelling for arbitrarily shaped two-dimensional structures. *Geophysics*, 41, 62-78.
- Naumann, R. (1991). *Eski Anadolu mimarlığı*. Ankara: Türk Tarih Kurumu.
- Neubauer, W., Eder-Hinterleitner, A., Seren, S. ve Melichar, P. (2002). Georadar in the Roman civil town Carnuntum, Austria: An approach for archaeological interpretation of GPR data. *Archaeological Prospection*, 9, 135-156.
- Neubauer, W. (2004). GIS in archaeology-the interface between prospection and excavation. *Archaeological Prospection*, 11, 159-166.
- Noel, M. ve Xu, B. (1991). Archaeological investigation by electrical resistivity tomography: a preliminary study. *Geophysical Journal International*, 107, 95-102.
- Oldenburg, D. W. ve Li, Y. (1999). Estimating depth of investigation in dc resistivity and IP surveys. *Geophysics*, 64, 403-416.
- Papadopoulos, N. G., Tsourlos, P., Tsokas, G. N. ve Sarris, A. (2006). Two-dimensional and three-dimensional resistivity imaging in archaeological site investigation. *Archaeological Prospection*, 13, 163-181.

- Papadopoulos, N. G., Tsourlos, P., Tsokas, G. N. ve Sarris, A. (2007). Efficient ERT measuring and inversion strategies for 3D imaging of buried antiquities. *Near Surface Geophysics*, 5, 349-361.
- Papadopoulos, N. G., Tsourlos, P., Papazachos, C., Tsokas, G. N., Sarris, A. Ve Kim, J. H. (2011). An algorithm for fast 3D inversion of surface electrical resistivity tomography data: application on imaging buried antiquities. *Geophysical Prospecting*, 59 (3), 557-575.
- Park, S. K. ve Van, G. P. (1991). Inversion of pole–pole data for 3-D resistivity structures beneath arrays of electrodes. *Geophysics*, 56, 951-960.
- Pidlisecky, A., Haber, E. ve Knight, R. (2007). RESINVM3D: A 3D resistivity inversion package. *Geophysics*, 72(2), H1-H10.
- Pridmore, D. F., Hohmann, G. W., Ward, S. H. ve Sill, W. R. (1981). An investigation of finite element modeling for electrical and electromagnetic data in three dimensions. *Geophysics*, 46, 1009-1024.
- Queralt, P., Pous, J. ve Marcuello, A. (1991). 2-D resistivity modeling, An approach to arrays parallel to the strike direction. *Geophysics*, 56, 941-950.
- Rijo, L. (1977). *Modeling of electric and electromagnetic data*. PhD Thesis, University of Utah.
- Rosen, A. M. (1986). *Cities of clay: The geoarchaeology of tells*. Prehistoric Archaeology and Ecology Series. Chicago: University of Chicago Press.
- Rücker, C., Günther, T. ve Spitzer, K. (2006). Three-dimensional modeling and inversion of dc resistivity data incorporating topography – I. Modelling. *Geophysical Journal International*, 166, 495-505.

- Sasaki, Y. (1992). Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophysical Prospecting*, 40, 453-464.
- Sasaki, Y. (1994). 3-D resistivity inversion using the finite-element method. *Geophysics*, 59, 1839-1848.
- Scales, J. A., Smith M. L. ve Treitel, S. (2001). *Introductory Geophysical Inverse Theory*. Colorado: Samizdat Press.
- Schlutz, R. (1985). Interpretation and depth of investigation of gradient measurements indirect current geoelectrics. *Geophysical Prospecting*, 33, 1240-1253.
- Schmidt, A. ve Fazeli, H. (2007). Tepe Ghabristan: a chalcolithic tell buried in alluvium. *Archaeological Prospection*, 14, 38-46.
- Scriba, H. (1981). Computation of the electric potential in three-dimensional structures. *Geophysical Prospecting*, 29, 790-802.
- Seren, S., Eder-Hinterleitner, A., Neubauer, W., Löcker, K. ve Melichar, P. (2007). Extended comparison of different GPR systems and antenna configurations at the Roman site of Carnuntum. *Near Surface Geophysics*, 5, 389-394.
- Shima, H. ve Sakayama, T. (1987). Resistivity tomography: An approach to 2D resistivity inverse problems. *57th Annual International Meeting*, SEG, Expanded Abstracts, Session: EMI.4, New Orleans.
- Slazai, S. ve Szarka, L. (2008). On the classification of surface geoelectric arrays. *Geophysical Prospecting*, 56, 159-175.
- Stefanescu, S., Schlumberger, C. ve Schlumberger, M. (1930). Sur la distrubution electrique potantielle autour d'une prise de terre pontuelle dans un terrain a

couches horizontales, homogenes et isotropes. *Journal de Physique et du Radium*, 1(4), 132-140.

Stummer, P. (2003). *New developments in electrical resistivity imaging*. PhD Thesis, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, page: 185.

Stummer, P., Maurer, H. ve Green, A. (2004). Experimental design. Electrical resistivity data sets that provide optimum subsurface information. *Geophysics*, 69 (1), 120-139.

Tarantola, A. (2005). *Inverse problem theory and methods for model parameter estimation*. Philadelphia: Siam.

TAYCBS (2009). *Türkiye arkeolojik yerleşmeleri projesi coğrafi bilgi sistemleri*. 1 Şubat 2009, <http://tayproject.org/gistr.html>.

Telford, W. M., Geldart, L. P. ve Sheriff, R. E. (1990). *Applied Geophysics* (2), Cambridge University Press.

Tong, L. ve Yang, C. (1990). Incorporation of topography into two-dimensional resistivity inversion. *Geophysics*, 55, 354-361.

Treitel, S. ve Lines, L. R. (1982). Linear inverse theory and deconvolution. *Geophysics*, 47, 1153-1159.

Tripp, A. C., Hohmann, G. W. ve Swift Jr, C. M. (1984). Two-dimensional resistivity inversion. *Geophysics*, 49, 1708-1717.

Tsokas, G. N., Tsourlos, P. I., Vargemezis, G. ve Novack, M. (2008). Non-destructive electrical resistivity tomography for indoor investigation: the case of Kapnikarea Church in Athens. *Archaeological Prospection*, 15, 47-61.

- Tsokas, G. N., Tsourlos, P. I., Stampolidis, A., Katsonopoulou, D. ve Soter, S. (2009). Tracing a majot Roman road in the area of Ancient Helike by resistivity tomography. *Archaeological Prospection*, 16, 251-266.
- Tsourlos, P. I. ve Ogilvy, R. D. (1999). An algorithm for the 3-D inversion of tomographic resistivity and induced polarization data: preliminary results. *Journal of the Balkan Geophysical Society*, 2, 30-45.
- Uzel, B., Sözbilir, H. ve Özkaymak, Ç. (2010). Neotectonic evaluation of an actively growing superimposed basin in Western Anatolia: The iner Bay of İzmir, Turkey. *Turkish Journal of Earth Science*, in press.
- Van Nostrand, R. G. ve Cook, K. L. (1966). *Interpretation of resistivity data*. USGS Prof. Paper, Printing Office, Washington, USA.
- Van Overmeeren, R. A. ve Ritsema, I. L. (1988). Continuous vertical electrical sounding. *First Break*, 6(10), 313-324.
- Walker, R. (2000). Multiplexed resistivity survey at the Roman town of Wroxeter. *Archaeological Prospection*, 7, 119-132.
- Walker, R., Gaffney, C., Gater, J. ve Wood, E. (2005). Fluxgate gradiometry and square array resistance survey at Drumlanrig, Dumfries and Galloway, Scotland. *Archaeological Prospection*, 12, 131-136.
- Ward, S. H. (1990). Resistivity and induced polarization methods. In *Geotechnical and Environmental Geophysics, Investigations in Geophysics No 5* (147-190). Tulsa: Society of Exploration Geophysicists.
- Wessel, P. ve Smith, W. H. F. (1995). New version of the generic mapping tools released. *Eos Transactions of the American Geophysical Union*, 76, 329.

- Wilkinson, P. B., Meldrum, P. I., Chambers, J. E., Kuras, O. ve Ogilvy, R. D. (2006). Improved strategies for the automatic selection of optimized sets of electrical resistivity tomography measurement configurations. *Geophysical Journal International*, 167, 1119-1126.
- Wolke R. ve Schwetlick H. (1988). Iteratively reweighted least squares algorithms, convergence analysis, and numerical comparisons. *SIAM Journal of Scientific and Statistical Computations*, 9, 907-921.
- Wu, X., X,ao, Y., Qi, C. ve Wang, T. (2003). Computations of secondary potential for 3D DC resistivity modelling using an incomplete Choleski conjugate-gradient method. *Geophysical Prospecting*, 51, 567-577.
- Xu, B. ve Noel, M. (1993). On the completeness of data sets with multielectrode systems for electrical resistivity survey. *Geophysical Prospecting*, 41, 791-801.
- Zhdanov, M. S. (2002). *Geophysical inverse theory and regularization problems*. Amsterdam: Elsevier.
- Zhody, A. A. R. (1989). A new method for the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves. *Geophysics*, 54, 245-253.
- Zhou, B., Greenhalgh, M. ve Greenhalgh, S. A. (2009). 2.5-D/3-D resistivity modelling in anisotropic media using Gaussian quadrature grids. *Geophysical Journal International*, 176, 63-80.
- Zienkiewicz, O. Z. (1971). *The Finite element method* (3rd ed.). London: McGraw-Hill.