

PAPER DETAILS

TITLE: Dört farkli elektrot dizilimine göre bazi üç-boyutlu sig yer alti yapılarının görünür öz direnç modellemesi

AUTHORS: Mahmut G DRAHOR,Gökhan GÖKTÜRKLER,Meriç A BERGE,T Özgür KURTULMUS

PAGES: 115-128

ORIGINAL PDF URL: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/145560>



Dört farklı elektrot dizilimine göre bazı üç-boyutlu sığ yeraltı yapılarının görünür öz direnç modellemesi

Apparent resistivity modelling of some three-dimensional shallow structures using by four different electrode configurations

**Mahmut G. DRAHOR^{1,2}, Gökhan GÖKTÜRKLER¹, Meriç A. BERGE¹,
T. Özgür KURTULMUŞ²**

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Kaynaklar Yerleşkesi, 35160 Buca, İZMİR

² Dokuz Eylül Üniversitesi, Sığ Jeofizik ve Arkeolojik Prospeksiyon Araştırma ve Uygulama Merkezi (SAMER), Kaynaklar Yerleşkesi, 35160 Buca, İZMİR

ÖZ

Bu çalışmada, bir sonlu-farklar algoritması yardımıyla elektrik öz direnç yönteminde yaygın olarak kullanılan Schlumberger, Wenner, pol-pol ve dipol-dipol elektrot dizilimlerinin bazı üç-boyutlu sığ yeraltı modelleri için bilgisayar ortamı benzetimleri yapılmıştır. Bu modeller, sığ jeofizik araştırmalarda sıklıkla karşılaşılan çevresel, hidro-jeolojik ve karstik sorunlara göre oluşturulmuştur. Benzetimler, çok kanallı veri toplama tekniği temel alınarak, görünür öz direnç kesitleri ve haritalarının hesaplanmasını içermiş ve bunlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Yüzeye yakın iletken veya dirençli yapıların varlığı, hedef yapıların derinliklerindeki artış ve modellerin karmaşılaşması dizilimlerin ürettiği anomalilerdeki ayrımlılığı önemli oranda etkilemiştir. Anomaliye en büyük katkı sığ derinlikte gömülü bulunan yapılardan oluşmaktadır. Böylece; hedef yapıların yüzeye yakın olduğu durumlarda görünür öz direnç haritalarından yorum yapmak çoğunlukla daha kolay olmaktadır. Bu nedenle; sığ jeofizik araştırmaların üç-boyutlu yapıldığı durumda, görünür öz direnç yapma kesit ve haritaları yardımıyla da yorumlamada bulunulabilecektir. Ayrıca, araştırmanın amacına uygun dizilim seçilmesi, araştırmanın başarısı açısından önem taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Elektrik öz direnç, modelleme, sığ jeofizik, sonlu farklar.

ABSTRACT

In this study, using a finite-difference algorithm, the responses of the Schlumberger, Wenner, pole-pole and dipole-dipole configurations, which are widely used in the resistivity method, to some three-dimensional shallow sub-surface models were simulated. These models are based on environmental, hydrogeological and karstic problems which are frequently encountered in near surface geophysics. Based on the multi-channel data acquisition, simulations included calculation of the apparent resistivity pseudo-sections and maps for each model by each configuration. The presence of the shallow resistive or conductive bodies, increase in the depth of the target structures and complexity of the models seriously affected the resolution of the anomalies generated by the configurations. The maximum contribution to anomaly is originated by shallow structures. Therefore, the interpretation of the apparent resistivity maps is easier when the target structures are present in shallow depths. In case of the three-dimensional geophysical surveys the interpretations can be achieved using the apparent pseudo-sections and maps. Considering the success of the survey, choosing the appropriate configuration according to target is important.

Key Words: Electrical resistivity, modelling, near surface geophysics, finite difference.

GİRİŞ

Elektrik öz direnç yönteminde; anomalinin belirlenmesinde gömülü yapının fiziksel özelliklerinin yanı sıra, kullanılan elektrot dizilimlerinin de büyük önemi vardır. Herhangi bir yer modeli için hesaplanan, ya da ölçülen görünür öz direnç değerleri farklı elektrot dizilimlerine göre değişik sonuçlar verir. Bu nedenle, çalışmanın amacına uygun elektrot diziliminin seçimi araştırmanın başarısı açısından önem taşımaktadır. Değişik elektrot dizilimlerinin karmaşık yeraltı yapıları için vereceği anomalilerin analitik yöntemlerle hesaplanması olanaklı değildir. Analitik hesaplama, genelde, basit geometrik cisimler ve yer yüzünden başlayan modeller üzerinde yapılmaktadır (Parasnis, 1965; Van Nostrand ve Cook, 1966; Telford vd., 1976). Yüzey altında prizmatik biçimli gömülü cisimlerin görünür öz direnç değerlerinin belirlenmesinde ise, 1970'li yıllarda yapılan deneysel tank çalışmaları büyük önem taşır (Apparao, 1979; Brizzolari ve Bernabini, 1979). Ancak daha hızlı işlemcilerin ortaya çıkışı ile başlayan bilgisayar teknolojisindeki gelişme; sonlu elemanlar (Coggon, 1971; Rijo, 1977; Pridmore vd., 1981), sonlu farklar (Jepsen, 1969; Mufti, 1976; Dey ve Morrison, 1979 a ve 1979 b; Scriba, 1981) ve integral denklemi (Dieter vd., 1969; Hohmann, 1975; Meyer, 1977; Okabe, 1981; Das ve Parasnis, 1987) gibi sayısal yöntemleri kullanarak daha gerçekçi modellerin kurulmasına ve etkili hesap yapabilmeye olanak sağlamıştır. Son yıllarda yüksek duyarlı ve hızlı veri toplayabilen elektrik öz direnç aletlerinin geliştirilmesi, daha ayrıntılı yorum yapma olanağını da vermiştir. Bu gelişimde sonlu farklar ve sonlu elemanlar gibi sayısal hesaplama tekniklerinin önemi büyüktür. Çözüm tekniklerindeki bu gelişme, birçok farklı elektrot dizilimi için karmaşık yeraltı yapılarının iki- ve üç-boyutlu düz ve ters-çözüm (Candansayar ve Başokur, 2001; Berge, 2002; Kurtulmuş, 2003; Dahlin ve Zhou, 2004) modellemesinin etkili bir biçimde yapılmasını olanaklı kılmıştır. Düz çözüm çalışmalarında elde edilen değer, görünür öz dirençtir. Bu değer, ortamın öz direnç zıtlığına, dizilim geometrisine ve derinliğe bağlı olarak değişir ve doğal olarak ortamın gerçek elektriksel yeraltı modelini yansıtmaz. Diğer bir deyişle, belirtilen parametrelere bağlı olarak oluşan görünür değişimi yansıtır. Bu nedenle, gerçek yeraltı modelini elde etmek için mutlaka ters çözüm çalışmaları yapılmalıdır. Son yıllarda, sıg

ortamları modellemek için uygulanan iki ve üç-boyutlu ters çözüm işlemleriyle birçok sıg sorun incelenmektedir (Candansayar ve Başokur, 2001; Dahlin vd., 2002; Dahlin ve Zhou, 2004).

Sıg yapıların araştırılmasında genellikle, yanal öz direnç taraması olarak adlandırılan profillemeye ölçüm tekniği kullanılır. Bu teknikte; seçilen elektrot dizilimine bağlı olarak, değişik görünür derinlik düzeyleri için, yeraltının görünür öz direnç yapma kesitleri elde edilir. Son yıllarda, kısa sürede duyarlı veri elde etmeyi sağlayan çok-kanallı ölçüm cihazları, sıg yapıların araştırılmasında yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır (Dahlin, 2001).

Bu çalışmada; Dey ve Morrison (1979b) tarafından geliştirilen ve üç boyutlu yapılar için uygulanan bir sonlu farklar hesaplama tekniği kullanılmış olup, dört ayrı elektrot dizilimi (Schlumberger, Wenner, pol-pol ve dipol-dipol) için tasarlanan model yapıların görünür öz dirençleri RES3DMOD (Loke, 2001a) bilgisayar programı kullanılarak hesaplanmıştır. Model yapılar, değişik hidrojeolojik ortamları ve çevresel sorunları tanımlayabilecek biçimde oluşturulmuştur. Böylece; modellerde kullanılan yapıların boyutları, gömülü derinlikleri ve öz dirençlerine bağlı olarak oluşturacakları görünür öz direnç anomalileri hesaplanmıştır.

ÇOK-KANALLI VERİ TOPLAMA

Öz direnç yönteminde bilgisayar denetimli veri toplama sistemleri son 15 yıl içinde oldukça gelişmiştir. Bu tür sistemler; öz direnç aleti, bilgisayar, elektrotları denetleyen bir anahtar devresi, elektrot kabloları, bunların bağlantıları ve elektrotlardan oluşur (Van Overmeeren ve Ritsema, 1988; Griffiths vd., 1990; Griffiths ve Barker, 1993; Dahlin, 2001). Bu tür bir cihaz ve gerekli yazılım yardımıyla; dizilim türleri, akım ve potansiyel elektrotları ile ölçülecek noktalar arası uzaklıklar adreslenebilmektedir. Bu sistemlerin en önemli işlevsel bölümlerinden biri de, elektrotları denetleyen anahtar devresidir. Bazı cihazlarda bunlar doğrudan her bir elektrotta bulunurken, genelde merkezi bir anahtar devreyle denetlenen cihazlar daha yaygındır. Bu tür cihazlarda elektrot kanal sayısı 25, ya da daha fazladır ve genelde 32 ya da 64 kanallı cihazlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektrot aralıkları da araştırmacının gereksinimine bağlı olarak

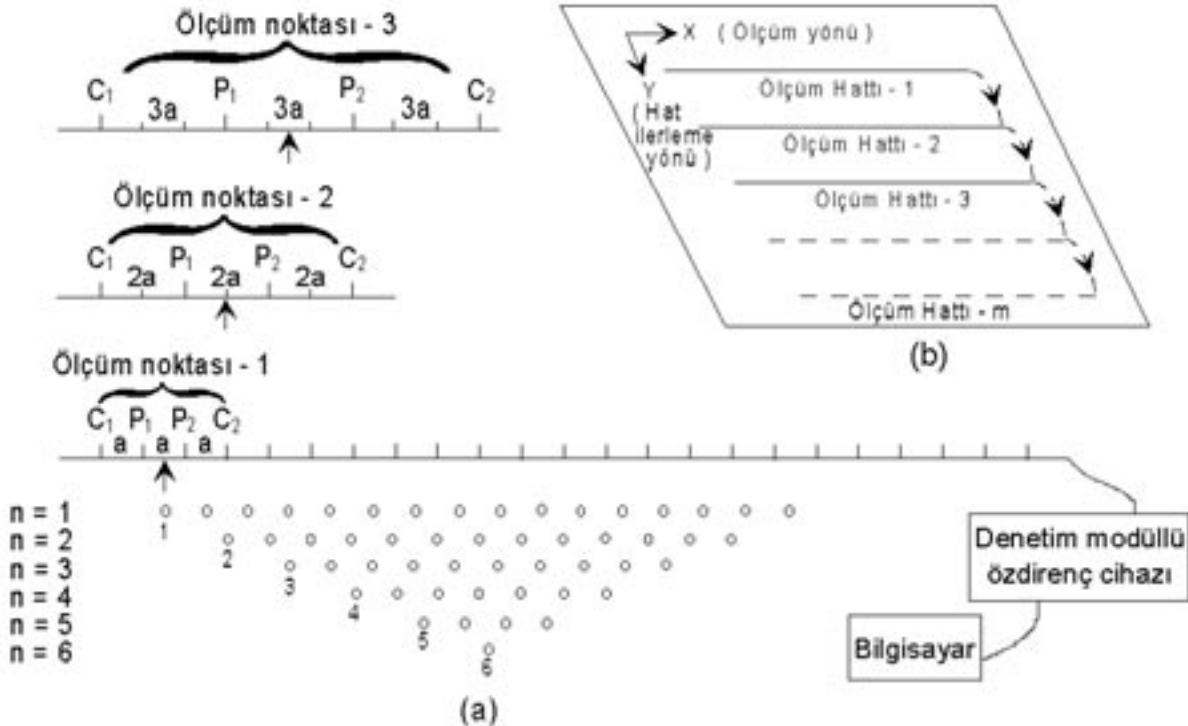
istenilen aralıklarda düzenlenebilmektedir. Genelde 1 ile 25 m aralıklar birçok araştırmada yeterliyken, daha geniş aralıklı düzen kurma olanağı da vardır. Çalışmalar sırasında elektrotların bağlandığı kablolar çalışma alanına serildikten sonra, elektrotlar yere çakılır ve kablolar elektrotlara bağlanarak sistem ölçüme hazır duruma getirilir. Veri toplamadan önce her bir elektrotun temas durumları ve diğer taramaları otomatik olarak yapılır. Bunlarda bir sorun çıkmazsa, ölçümler istenilen dizilim türleri için kısa süre içinde gerçekleştirilir ve ölçüm hattı bir sonraki hatta kaydırılır. Böyle bir sistemi oluşturan ana elemanlar ve ölçüm sistemi Şekil 1'de verilmiştir.

Şekil 1'de 32 elektrot, çoklu iletken bir kablo, denetim modülü ve taşınabilir bir bilgisayardan oluşan bir sistem ile Wenner dizilimine göre yapılan bir ölçüm gösterilmektedir. Öncelikle istasyon 1'de elektrot aralıklarının "a" olduğu durumda, akım elektrotları olarak 1 ve 4, potansiyel elektrot olarak da 2 ve 3 adreslenmekte ve böylece bu noktanın ölçümü 2 ile 3 noktasının ortasına atanarak, işlem tamamlanmaktadır. Benze-

ri işlem her bir elektrotun bir kez ötelenmesiyle oluşan yeni adreslemeler sırasında da yapılarak, işlem profil sonuna değin sürdürülür ve $n=1$ düzeyi için görünür öz direnç verileri elde edilir. Daha sonra elektrot aralıklarının "2a" olduğu durum için adreslemeler yeniden değiştirilir ve bir öncekine benzer işlem yinelenerek, bu düzeye ilişkin görünür öz direnç verileri toplanır. Ölçümler, tasarlan "n" düzeylerine göre sürdürülür ve böylece ilk ölçüm hattındaki veri toplama işlemi tamamlanır. Daha sonra sistem ölçülecek diğer ölçüm hattına kaydırılır ve benzer işlemler sürdürülür. Böylece tasarlanan "m" adet ölçüm hattı üzerinde "n" düzeyine değin yapılan ölçümlerle, ortamın üç boyutlu görünür öz direnç haritaları ve hacimsel görüntüleri elde edilir.

KURAMSAL MODELLER VE UYGULAMALAR

Bu çalışma; hidrojeolojik ve çevresel amaçlı sığ jeofizik araştırmalarda karşılaşılan bazı temel sorunlarda, yaygın olarak kullanılan dört elektrot dizilimiyle (Schlumberger, Wenner, pol-pol ve dipol-dipol) elde edilmesi olası görünür özdi-



Şekil 1. Çok kanallı öz direnç ölçü sistemi ve ölçüm aşamaları (Griffiths ve Barker, 1993).

Figure 1. Multi-electrode resistivity measuring system and measurement stages (Griffiths and Barker, 1993).

renç yanıtlarının bilgisayar ortamındaki benzetimine dayanmaktadır. Modeller oluşturulurken; bunların sorunu en iyi yansıtacak biçimde olmasına özen gösterilmiştir. Hesaplamalar mümkün olan en yüksek duyarlılıkta yapılmış olup, dizilim türü ve model boyutlarına göre inceleyebilecek en derin düzeyler irdelenmiştir. Her dizilim için elde edilen yapma görünür öz direnç kesitleri birbirleriyle karşılaştırılarak, dizilimlerin modellere karşı yanıtları incelenmiştir (Göktürkler ve Drahor, 2004).

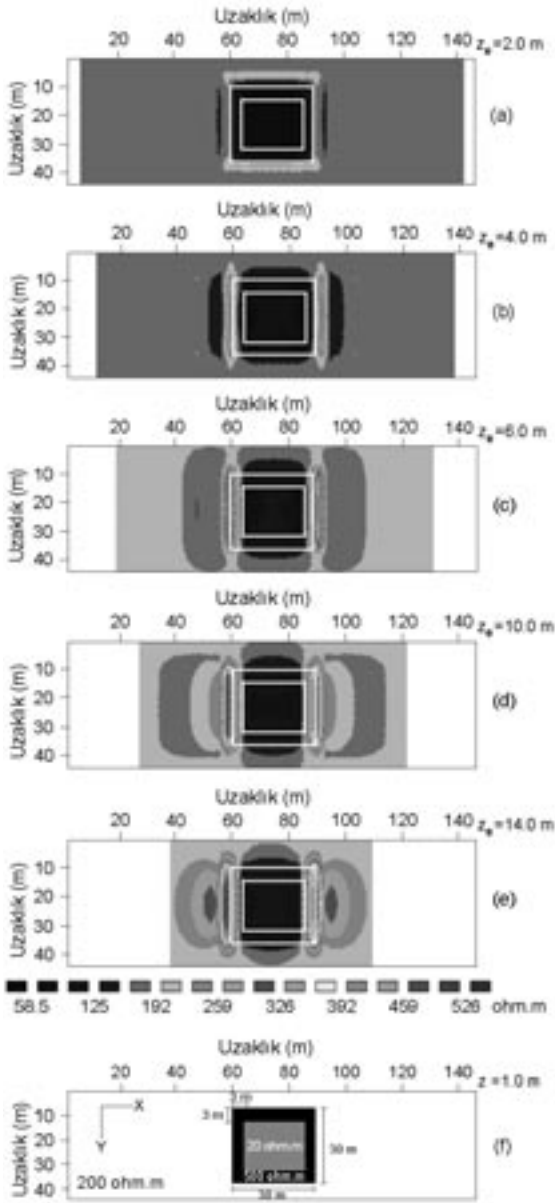
Karmaşık Modeller

Sığ amaçlı aramalarda sıkça karmaşık yeraltı durumları ile karşılaşmakta, dolayısıyla sorunların çözümü de karmaşıklık ölçüsünde zorlaşmaktadır. Karmaşık bir yeraltı benzeşim modeli kurulurken, oluşturulan modelin hedeflenen yapıya benzer olmasına özen gösterilmelidir. Böylece olası yeraltı durumuna en yakın benzeşim modeli elde edilebilecek ve yorumlamaya önemli bir katkı sağlanacaktır. Bu çalışmada; modeller karmaşılaştırılarak hidrojeolojik ve çevresel sorunlara uygun olacak biçimde tasarlanmıştır. Bu sorunlar üzerinde yukarıda değinilen dört ayrı elektrot dizilimi kullanılarak yapılan üç-boyutlu sonlu farklar hesaplamalarıyla, yapıların oluşturacağı görünür öz direnç haritaları ve yapma kesitleri elde edilmiştir. Bulunan öz direnç yapma kesitlerine ait görünür derinlik değerleri ise, Loke (2001b) tarafından verilen katsayılar çizelgesinden hesaplanmıştır. Bu çizelgenin oluşturulmasında, dizilime ait duyarlılık fonksiyonu kullanılmaktadır. Homojen yer modeli için araştırma derinliği ve dizilimin yeraltındaki yatay ve düşey öz direnç değişimlerine duyarlılığı, dizilim duyarlılık fonksiyonu tarafından tanımlanabilir (Mc Gillivray ve Oldenburg, 1990). Temelde duyarlılık fonksiyonu, potansiyeli etkileyecek olan yüzey altı öz direncindeki değişimin derecesini vermektedir. Ölçümde, duyarlılık değerinin yüksekliği, yeraltına daha fazla nüfuz anlamına gelmektedir. Duyarlılık fonksiyonu, matematiksel olarak, Frechet türevleri yardımıyla hesaplanmakta ve böylece etki derinliği, dizilimin toplam uzunluğuna ve elektrotlar arası uzaklığa göre hesaplanarak, değişik dizilimler için katsayılar biçiminde verilebilmektedir (Edwards, 1977). Böylece ortaya çıkan etki derinliği (z_e) kavramı, görünür öz direnç kesitlerinin araştırma derinliğinin hesaplanmasını sağlamaktadır. Hesaplanmış bu etki derinliklerine gö-

re elde edilen yapay görünür öz direnç haritaları, yoruma katkı sağlayacaktır. Bu nedenle; üç-boyutlu bir yeraltı modelini en iyi tanımlayabilecek seviyelerden hesaplanan etki derinliklerine göre elde edilen görünür öz direnç haritalarıyla; ortamdaki değişimler, yapı boyutları ve derinlikler için yorum yapılabilecektir.

Çevresel ve Sızıntı Amaçlı Tasarımlanan Modeller

Sıvı atıkların yeraltındaki yayılımının izlenmesi, sığ jeofizikğin önemli uygulama alanlarından biridir. Bu tür alanlar, özellikle sığ ölçekli öz direnç yöntemi ile etkili bir biçimde incelenebilmekte ve belirlenebilirlikleri üzerine son yıllarda yaygın modelleme çalışmaları yapılmaktadır. Bu çalışmada, böylesi bir sorunun irdelenmesi açısından oluşturulan iki ayrı model, sonlu farklar yöntemiyle üç-boyutlu olarak incelenmiştir. Bu amaçla (150 x 45) m boyutlarındaki bir alan içine yapılmış (30 x 30 x 7) m boyutlarında bir atık havuzu, altın üretiminde kullanılan bir siyanür havuzu olabileceği düşünülerek tasarlanmıştır (çevresel model-1). Modelleme çalışmasında, havuzda oluşabilecek herhangi bir deformasyonun (havuz çeperlerinde oluşabilecek çatlama gibi) ortamda yaratacağı öz direnç değişimlerinin etkisini görebilmek amacıyla, tasarımı ikinci model (çevresel model-2) ile de sızıntı öncesi ve sonrası durumu karşılaştırma olanağı ortaya çıkmıştır. Hesaplamalarda, alanın x ve y yönlerinde 3 m aralıklarla ölçüldüğü düşünülmüştür. (Şekil 3e ve 4e). Kullanılan dört ayrı dizilim için yapılan hesaplamalardan sonra; dizilimlere göre değişik etki derinliklerinden elde edilmiş görünür öz direnç haritaları karşılaştırılmıştır. Böylece, yorumlamaya katkı sağlayacağı düşünülmüş ve dizilimlerin böylesi bir yapıya karşı duyarlılığı araştırılmıştır. Şekil 2'de, tanımlanan atık havuzu için Schlumberger dizilimine göre beş ayrı etki derinliğine ($z_e=2, 4, 6, 10$ ve 14 m için) göre elde edilen görünür öz direnç haritaları verilmiştir. Bu şekilden de görüldüğü gibi, model yapı ile görünür öz direnç anomalisi 0-2 m aralığında birbirine çok benzerdir. Ancak derine doğru gittikçe, ayrımlılık azalmakta ve dizilim geometrisinin önemi ortaya çıkmaktadır. Ölçüm hattı olduğu varsayılan "x" doğrultusu boyunca hattın yapıyı dik kesmesi nedeniyle, yapının dış ve iç sınırları 6 ile 10 m arasında iyice belirginleşmekte ve model yapının üzerinde görünür öz dirençler gerçek öz direnç değerlerine yaklaş-



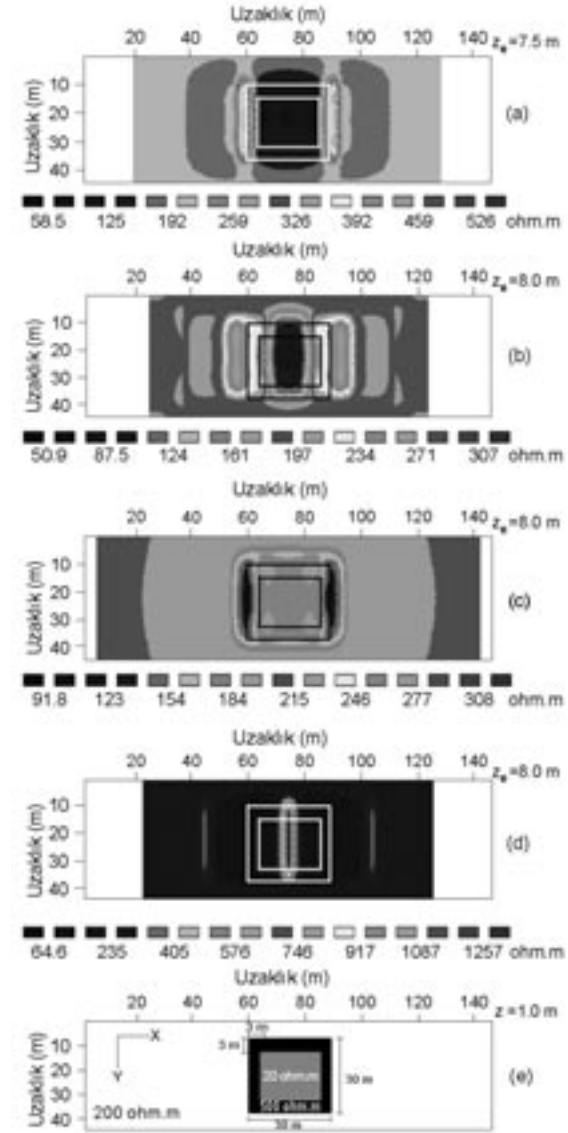
Şekil 2. Çevresel model-1'in Schlumberger dizilimi için değişik derinliklerdeki görünür öz direnç haritaları: (a) $z_e=2m$, (b) $z_e=4m$, (c) $z_e=6m$, (d) $z_e=10m$, (e) $z_e=14m$ ve (f) modelin $z=1m$ 'deki yatay kesiti.

Figure 2. Apparent resistivity maps for Schlumberger array in different depths of the environmental model-1: (a) $z_e=2m$, (b) $z_e=4m$, (c) $z_e=6m$, (d) $z_e=10m$ and (e) $z_e=14m$, (f) horizontal resistivity model at the depth of $z=1m$.

maktadır. Ayrıca, derine doğru indikçe, anomalilerin uzanımları havuz geometrisine uygun olarak daralmaktadır. Böylece; bu tür modelleme çalışmalarında, yüzeyden derine doğru elde

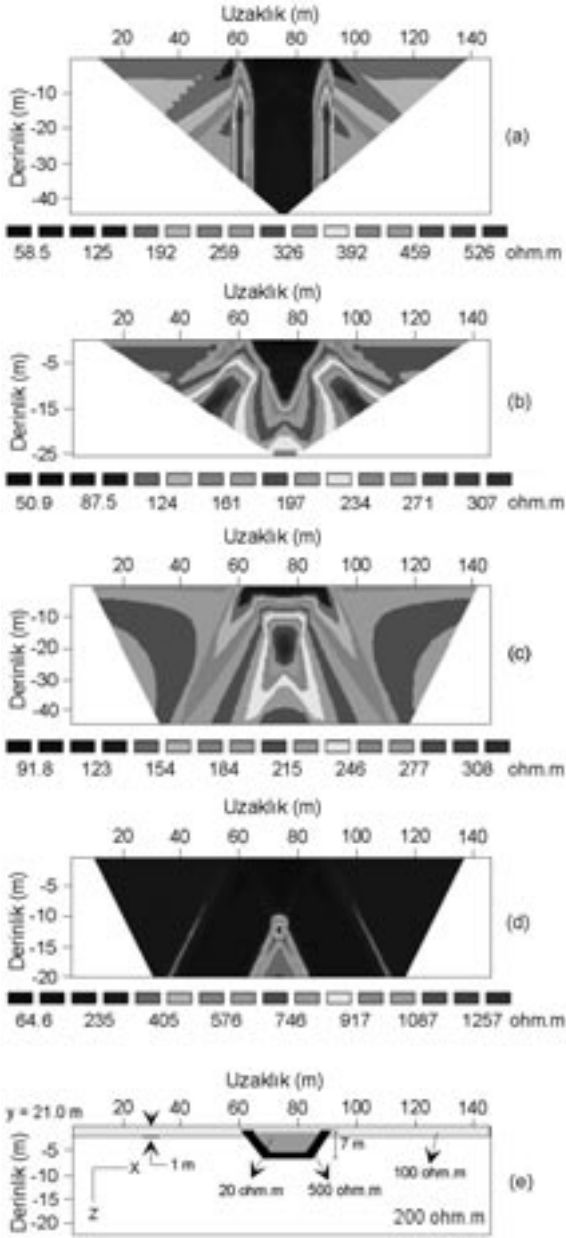
edilen ve etki derinlikleri ile tanımlanan görünür öz direnç haritaları yorumda kolaylık sağlayabilecektir.

Şekil 3 ve 4 birlikte incelendiğinde; tüm dizilimlerde yapıdan kaynaklanan görünür öz direnç anomalileri açıkça görülmektedir. Wenner dizili-



Şekil 3. Çevresel model-1'in görünür öz direnç haritaları: (a) Schlumberger, $z_e=7.5m$, (b) Wenner, $z_e=8m$, (c) pole-pole, $z_e=8m$, (d) dipole-dipole, $z_e=8m$ ve (e) modelin $z=1m$ 'deki yatay kesiti.

Figure 3. Apparent resistivity maps of the environmental model-1: (a) Schlumberger, $z_e=7.5m$, (b) Wenner, $z_e=8m$, (c) pole-pole, $z_e=8m$, (d) dipole-dipole, $z_e=8m$ and (e) horizontal resistivity model at the depth of $z=1m$.



Şekil 4. Çevresel model-1'in $y=21$ m'deki görünür öz-direnç yapma kesitleri: (a) Schlumberger, (b) Wenner, (c) pol-pol, (d) dipol-dipol, (e) modelin $y=21$ m'deki düşey kesiti.

Figure 4. Apparent resistivity pseudo-sections of the environmental model-1 at the y -horizontal distance of 21 m: (a) Schlumberger, (b) Wenner, (c) pole-pole, (d) dipole-dipole, (e) vertical resistivity model at the y -horizontal distance of 21 m.

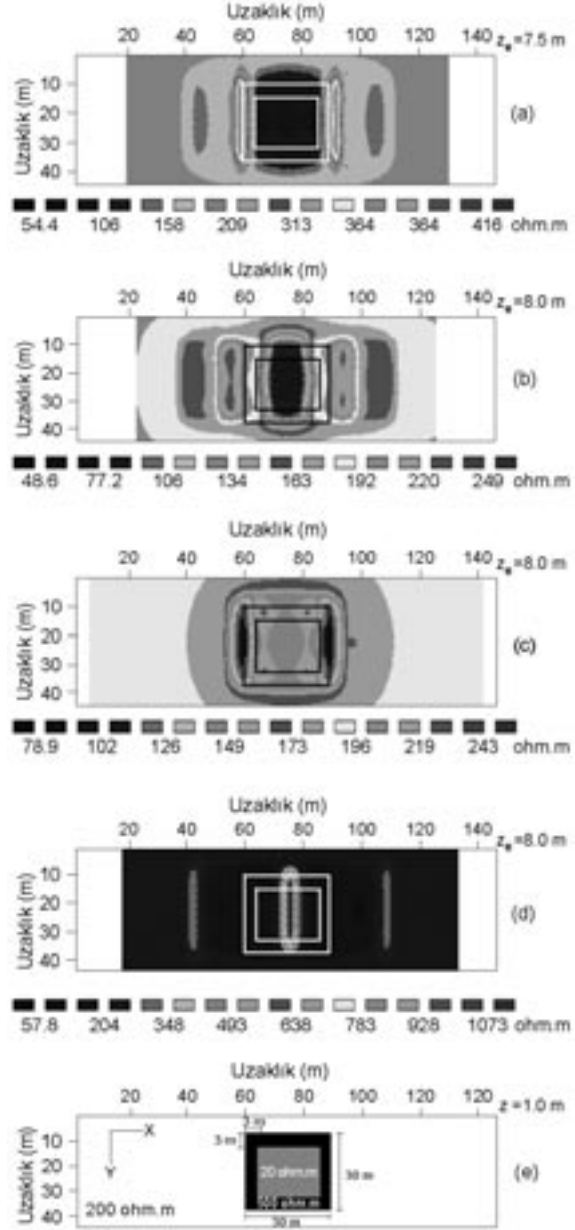
minden elde edilen görünür öz-direnç yapma kesitinde, havuzun şekli belirgin olarak ortaya çıkmaktadır. Havuz içi ve çevreleyen ortamın görünür öz-direnç değerleri model öz-direnç değerle-

rine oldukça yakındır. Ancak havuz içindeki iletken yapının etkisiyle havuzun altındaki ortamın görünür öz-direnç değerleri düşüş göstermektedir (Şekil 4b). $z_e=8$ m'den elde edilen yatay görünür öz-direnç haritasına göre, havuzun oluşturduğu anomaliyi ve havuz sınırlarını belirlemek oldukça zordur. Burada "M" ve "W" biçiminde anomaliler üreten Wenner diziliminin böylesi bir yapıyı tanımlamaktan ne derece uzak olduğu görülmektedir (Şekil 3b ve 4b). Havuz kenarındaki süreksizliklere en duyarlı dizilim Schlumberger'dir ve havuz içindeki görünür öz-direnç değerleri model öz-direnç değerlerine yakındır. Havuzun kenarlarından itibaren, derine doğru dik yönde uzanan ve yüksek görünür öz-direnç değerlerine sahip iki ayrı anomali grubu bulunmaktadır ve bunların havuz çeperlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Şekil 4a). Bu dizilimin $z_e=7.5$ m'den elde edilen görünür öz-direnç haritası ise, havuz sınırları ile havuz içi görünür öz-direnç değerlerini tanımlamada modele oldukça yaklaşmıştır (Şekil 3a). Dipol-dipol diziliminin yapma kesitinde; havuz içi ve çevresinde model öz-dirençce yakın görünür öz-direnç değerleri gözlenmesine karşın, dipol kollarının hiperbolik anomaliler ortaya çıkarması ayrımlılığı azaltmaktadır (Şekil 4d). Bu dizilimin $z_e=8$ m'den elde edilen görünür öz-direnç haritasında da ayrımlılık çok düşüktür (Şekil 3d). Pol-pol diziliminin yapma kesitinde ise, atık havuzunun içindeki görünür öz-direnç değerlerinin yükselmesine karşın, havuzu çevreleyen ortamın görünür öz-dirençleri model değerlere oldukça yakınsamıştır. Ancak anomali biçimi; dizilimin bir akım ve bir potansiyel kolu içermesinden dolayı, ters yönde bir uzanımına sahip olmakta ve derinde yüksek öz-dirençli görünür bir anomalinin oluşmasına neden olmaktadır. Dizilim duyarlılığının derinliğe bağlı olarak hızla azalması, atık havuzunun üst yüzünü tanımlamasına karşın, alt yüzünün tanımlanmasını engellemektedir (Şekil 4c). Bu dizilimin $z_e=8$ m'den oluşturulan görünür öz-direnç haritasında, atık havuzunun bulunduğu yerdeki anomali şekli açısından model yapıya çok benzemektedir. Ancak, görünür öz-direnç değerleri model yapıdan oldukça farklıdır ve genel olarak Schlumberger'den sonra böylesi bir modele uyum sağlayan ikinci dizilimin pol-pol olduğu belirtilmelidir (Şekil 3c). Böylece bu dizilimle atık havuzu gibi yüzeye yakın yapılardan elde edilecek görünür öz-direnç haritalarıyla oldukça iyi bir yorumlama yapılabileceği belirtilebilir.

Tasarımlanan ilk modelin zaman içinde çeşitli etkiler nedeniyle (deprem, heyelan, zemin sorunları vb.) sızdırdığını ve havuzu çevreleyen birime kimyasal içerikli bir akışkan sızıntısı olduğu düşünülerek, ikinci model tasarlanmıştır. Burada amaç; böylesi alanlar üzerinde periyodik olarak yapılacak öz direnç izleme ölçümlerinin, bir ölçüde de olsa, bilgisayar ortamında benzetiminin yapılmasıdır. Modelden sızan atık; akışkan havuzun altından başlayarak, yeraltına doğru gözenek iletimiyle hareket ederek, ortamın öz direnç değerlerini, içindeki kimyasal maddenin türüne bağlı olarak, azaltacak ya da artıracaktır. Bu örnekte öz direnç değerini azaltan bir model seçilmiştir. Bu durumun ortamın öz direncini atık içeren bölümlerde 200 ohm.m'den 50 ohm.m'ye düşürdüğü varsayılmıştır (Şekil 5e ve 6e). Hesaplamalar sonucunda elde edilen görünür öz direnç yapma kesitleri incelendiğinde; anomali biçimlerinin bir önceki örnekteki (pol-pol dizilimi hariç) oldukça benzediği, ancak havuzun altındaki görünür öz direnç değerlerinin sızan akışkan etkisiyle azaldığı görülmektedir (Şekil 6a, b, d). Pol-pol diziliminde ise, atık akışkanın ortama yayılması havuzun altındaki görünür öz direnç değerlerinin diğer dizilimlere göre daha fazla azalmasına neden olmuştur (Şekil 6c). Görünür öz direnç haritalarında da, sızıntı etkisi net biçimde ortaya çıkmaktadır (Şekil 5a, b, c, d). Bu haritalar içinde en iyi sonuç, yine Schlumberger dizilimiyle elde edilmiş ve bu dizilimi pol-pol diziliminin izlediği görülmüştür. Böylece bu iki dizilimin böylesi ortamları tanımlamada daha iyi olduğu, görünür öz direnç anlamında ve bu tür çalışmalarda öncelikli seçilmesi gerekli dizilimler olabileceği ortaya çıkmıştır. Bu benzetim, çevre kirliliği ve sızıntı izleme çalışmalarında, öz direnç yönteminin ortamdaki değişimlerin izlenmesinde yararlı bir yöntem olacağını göstermektedir.

Gömülü Bir Paleo-kanal Modeli

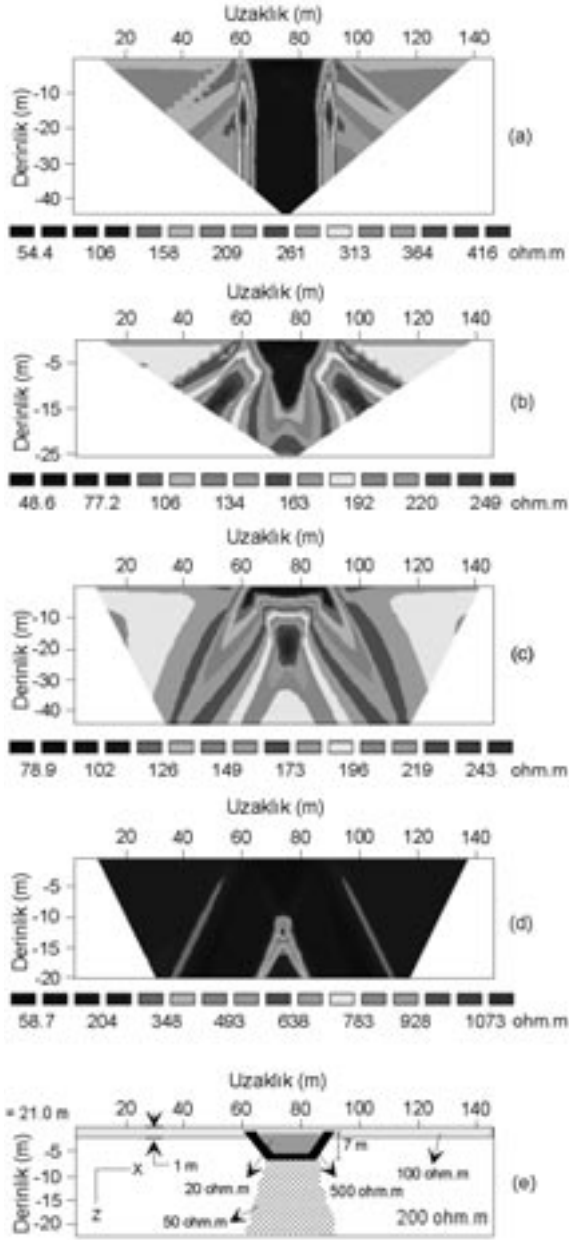
Yeraltı suyu tablasının belirlenmesi, jeofiziğin yaygın uygulama alanlarından biridir. Özellikle öz direnç yöntemi; bu tür ortamları belirlemedeki uygunluğu, uygulanış kolaylığı ve maliyeti dikkate alındığında, uygulamada oldukça sık kullanılmaktadır. Son yıllarda modelleme çalışmalarında ortaya çıkan gelişim, bu tür ortamların daha yorumlanabilir olmasını sağlayarak, yeraltı suyu araştırmalarında jeofizik öz direnç uygulamalarının önemini daha da artırmıştır.



Şekil 5. Çevresel model-2'nin görünür öz direnç haritaları: (a) Schlumberger, $z_e=7.5$ m, (b) Wenner, $z_e=8$ m, (c) pol-pol, $z_e=8$ m, (d) dipol-dipol, $z_e=8$ m ve (e) modelin $z=1$ m'deki yatay kesiti.

Figure 5. Apparent resistivity maps of the environmental model-2: (a) Schlumberger, $z_e=7.5$ m, (b) Wenner, $z_e=8$ m, (c) pole-pole $z_e=8$ m, (d) dipole-dipole, $z_e=8$ m and (e) horizontal resistivity model at the depth of $z=1$ m.

İlk model, yüzeye çok yakın yeraltı sularının etkisiyle akifer özelliği taşıyabilecek gömülü bir paleo nehir yatağının belirlenebilirliğini araştırmak amacıyla tasarlanmıştır (hidrojeolojik model).

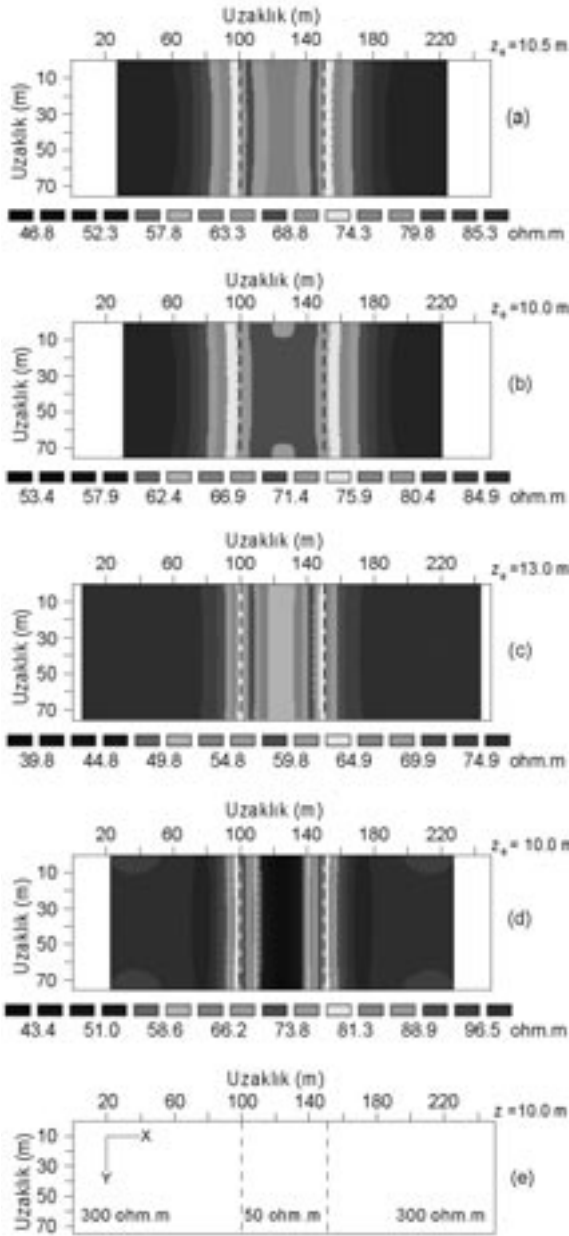


Şekil 6. Çevresel model-2'nin $y=21$ m'deki görünür özdirenç yapma kesitleri: (a) Schlumberger, (b) Wenner, (c) pol-pol, (d) dipol-dipol, (e) modelin $y=21$ m'deki düşey kesiti.

Figure 6. Apparent resistivity pseudo-sections of the environmental model-2 at the y - horizontal distance of 21 m: (a) Schlumberger, (b) Wenner, (c) pole-pole, (d) dipole-dipole, (e) vertical resistivity model at the y - horizontal distance of 21 m.

Bu amaçla (250 x 75) m boyutlarındaki yapay bir model oluşturulmuştur (Şekil 7e ve 8e). Hesaplamalar, alanın x ve y yönlerinde 5 m aralık-

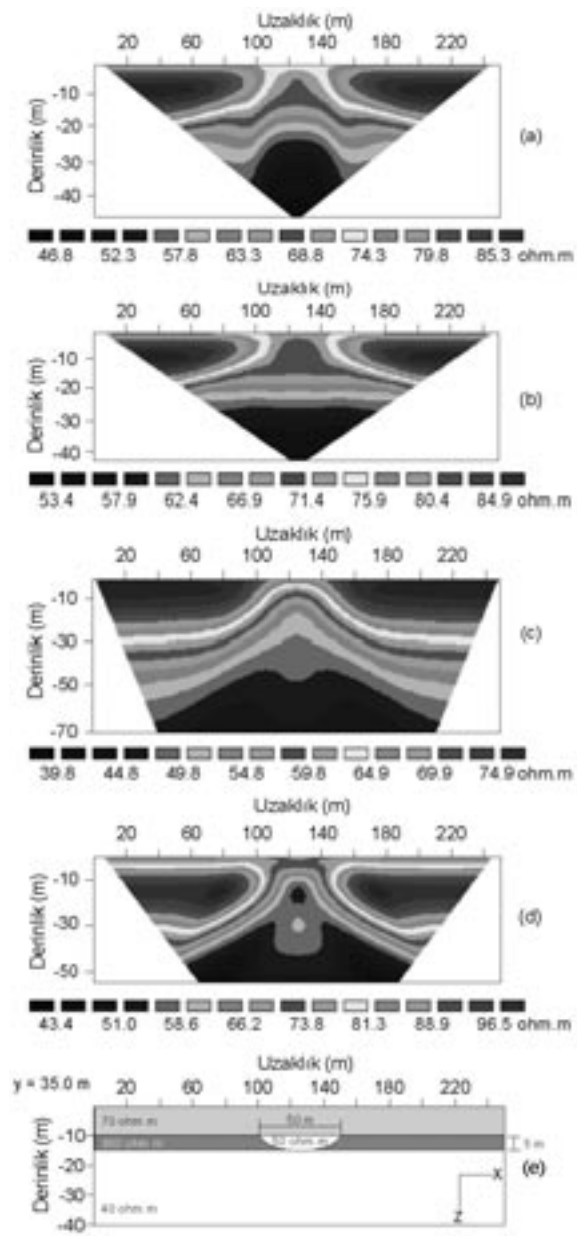
larla ölçüldüğü düşünülerek yapılmıştır. Daha önce belirtilen dizilim türlerine göre yapılan hesaplamalarla elde edilen görünür özdirenç yapma kesitleri incelendiğinde; bu model için en tanımsal anomaliyi dipol-dipol dizilimi vermektedir (Şekil 8d). Modelde tasarılan tüm yapıların yatay ve düşey yönlerdeki görüntüleri en belirgin şekilde bu dizilimde ortaya çıkmaktadır. Görünür özdirenç değerleri için de aynı tanımsallık devam etmektedir. Özellikle yaklaşık 10 m etki derinliğindeki görünür özdirenç kesitleri alındığında, tüm dizilimlerin yapı sınırlarını oldukça iyi tanımlamasına karşın, pol-pol ve dipol-dipol'un düşük özdirençli paleo kanalı gerçek özdirenç değerlerine daha yakın olarak tanımladığı görülmektedir (Şekil 7). Görünür özdirenç değerlerinin dipol-dipol diziliminde $z_e=10$ m kesitinden elde edilen haritada, paleo kanal yapısının belirgin biçimde ortaya çıktığı görülmektedir (Şekil 7d). Schlumberger dizilimi yapma kesitinde ise, örtü tabakası gömülü kanalın olduğu yerin dışında kalmaktadır. Ayrıca, gömülü kanalın etkisini gösteren anomali, alttaki yatay katman etkisini de bozmaktadır ve oluşan bu anomali, ortamdaki yapıyı tanımlamaktan uzaktır. Gömülü kanalın altında bulunan yatay katmanın olduğu yerdeki görünür özdirenç değerleri ise, modeldeki özdirenç değerine oldukça yakındır (Şekil 8a). $z_e=10.5$ m kesitinden elde edilen yatay görünür özdirenç haritasında da varsayılan yapı etkisinin modele uygun biçimde sürdüğü görülmektedir. Ancak varsayılan kanalın sınırları net olarak belirlenememekte ve görünür özdirenç değerleri de modele dipol-dipol ve pol-pol sonuçlarından daha uzaktır (Şekil 7a). $z_e=10$ m'den elde edilen Wenner görünür özdirenç haritasında, yapı sınırlarının belirginliği oldukça düşüktür (Şekil 7b). Yapma kesitte ise; örtü tabakası, kanalın üzeri hariç, açıkça gözlenmektedir. Gömülü kanal ve çevre birimlerin etkisi ise açıkça tanımlanamamaktadır. Ancak, en alttaki yatay katmanı simgeleyecek biçimde görünür özdirenç değerinin model ile uyumlu ve görünür değerlerinde model özdirenç değerine yakın olduğu görülmektedir (Şekil 8b). Pol-pol diziliminde örtü katmanı modele benzer bir anomali vermesine karşın, tasarlanan kanal biçimli yapı üzerinde anomali bozulması gözlenmektedir. Üstteki örtü katmanı için görünür özdirenç değeri, model özdirenç değerine çok yakın bir değer almaktadır. Ancak bu dizilimin duyarlılığının zayıf olması nedeniyle, derine doğru çevre ortamların etkisi açıkça gözlenememekte ve görünür



Şekil 7. Hidrojeolojik modelin görünür öz direnç haritaları: (a) Schlumberger, $z_e=10.5$ m, (b) Wenner, $z_e=10$ m, (c) pol-pol, $z_e=13$ m, (d) dipol-dipol, $z_e=10$ m ve (e) modelin $z=10$ m'deki yatay kesiti.

Figure 7. Apparent resistivity maps of the hydrogeological model: (a) Schlumberger, $z_e=10.5$ m, (b) Wenner, $z_e=10$ m, (c) pole-pole $z_e=13$ m, (d) dipole-dipole, $z_e=10$ m and (e) horizontal resistivity model at the depth of $z=10$ m.

öz direnç değerleri de yumuşatılmış bir anomali görüntüsü vermektedir. Varsayılan paleo-kanal türü yapının etkisi, andıran kesitte net şekilde



Şekil 8. Hidrojeolojik modelin $y=35$ m'deki görünür öz direnç yapma kesitleri: (a) Schlumberger, (b) Wenner, (c) pol-pol, (d) dipol-dipol, (e) modelin $y=35$ m'deki düşey kesiti.

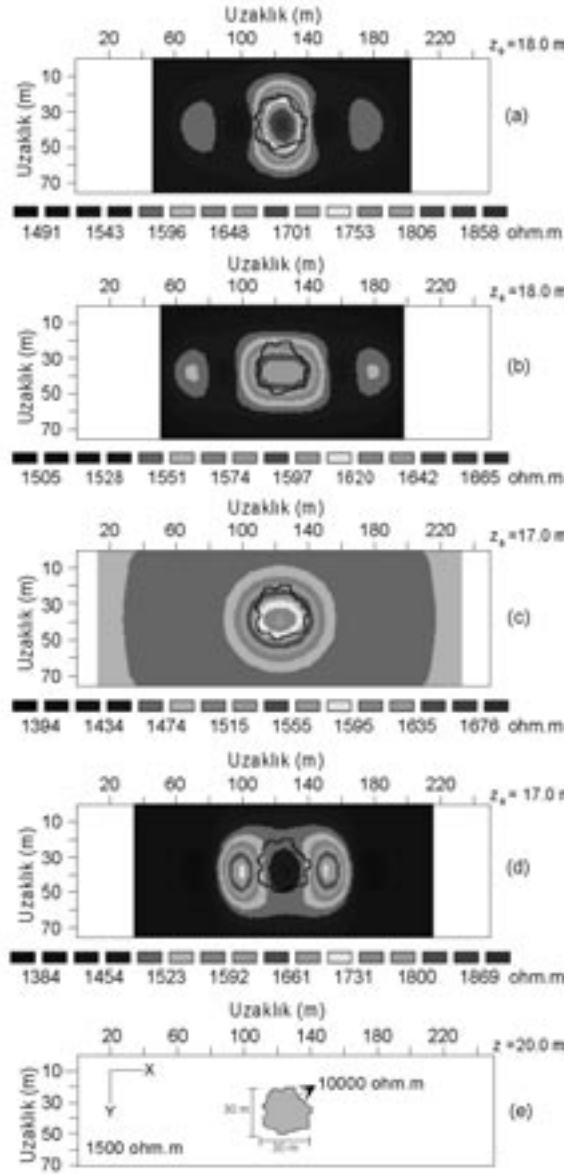
Figure 8. Apparent resistivity pseudo-sections of the hydrogeological model at the y -horizontal distance of 35 m: (a) Schlumberger, (b) Wenner, (c) pole-pole, (d) dipole-dipole, (e) vertical resistivity model at the y -horizontal distance of 35 m.

gözlenememesine rağmen, anomalilerde yukarı doğru bir uzanım gözlenmektedir (Şekil 8c). Bu dizilimin $z_e=13$ m'den elde edilen görünür öz direnç haritası ise, yapı hakkında Wenner ve

Schlumberger diziliminden daha iyi bir yorum olanağı sunmaktadır (Şekil 7c).

Karstik Boşluk Modelleri

Karstik yapılar, mühendislik uygulamalarda önemli bir sorun olarak ortaya çıkar ve bunların saptanması sığ jeofiziğin yaygın uygulama alanlarından birini oluşturur. Özellikle öz direnç yöntemi, bu tür yapıların yerlerinin belirlenmesinde önemli bir araştırma tekniğidir. Bu amaçla, bu tür yapıların üç-boyutlu öz direnç çalışmaları sonucunda belirlenebilirliğini göstermek için, karstik yapılara uygun değişik benzetim modelleri kurulmuştur. Bu modellerden ikisi, ayrıntılı olarak tartışılmıştır. Oluşturulan ilk yapay model, (250 x 70) m boyutlarındaki bir alanda, 1500 ohm.m öz direnç değerine sahip bir kireçtaşı, ya da dolomit içerisinde, ve 30 m genişliğinde, yüzeyden 10 m derindeki bir boşluğu göstermektedir (karstik model-1) (Şekil 9e ve 10e). Hesaplamalar, alanın x ve y yönlerinde 5 m aralıklarla ölçüldüğü düşünülerek yapılmıştır. Görünür öz direnç haritaları, yapıyı en iyi tanımlayan $z_e=17$ ve 18 m'den elde edilmiştir. Dört ayrı dizilim için elde edilen yapma kesitler ve görünür öz direnç haritaları incelendiğinde, modelin tüm dizilimlerde bir anomali oluşturduğu gözlenmektedir (Şekil 9 ve 10). Schlumberger dizilimi için elde edilen görünür öz direnç haritasında ($z_e=18$ m) böylesi bir yapı ve çevreleyen ortam açıkça belirlenirken (Şekil 9a), yapma kesitte anomali biçimi yüzeyden derine doğru artan görünür öz direnç değerlerine sahiptir ve tanımsallığı engellemektedir (Şekil 10a). Pol-pol diziliminin yapma kesitinde boşluk ve çevreleyen ortam açıkça belirlenirken, boşluğun altında görünür öz direnç değerleri azalmakta ve anomali derine doğru hiperbolik bir biçim almaktadır (Şekil 10c). Bu dizilimin $z_e=17$ m'den elde edilen görünür öz direnç haritasında, Schlumberger ve Wenner'den daha iyi bir belirlenebilirlik mevcuttur (Şekil 9c). Dipol-dipol, yapma kesitleri hiperbolik bir anomali oluşturmaya karşın, boşluğun bulunduğu yerde yüksek öz direnç değerleri görülmektedir (Şekil 10d). Bu dizilimin $z_e=17$ m'deki görünür öz direnç haritası, modeli diğer tüm dizilimlerden daha kötü tanımlamaktadır (Şekil 9d). Wenner diziliminde ise, karstik yapı belirlenmekle birlikte, hem $z_e=18$ m'den elde edilen görünür öz direnç haritasından, hem de yapma kesitten yapının sınırları hakkında yorum yapmak oldukça zordur (Şekil 9b ve 10b). Böylesi bir ya-

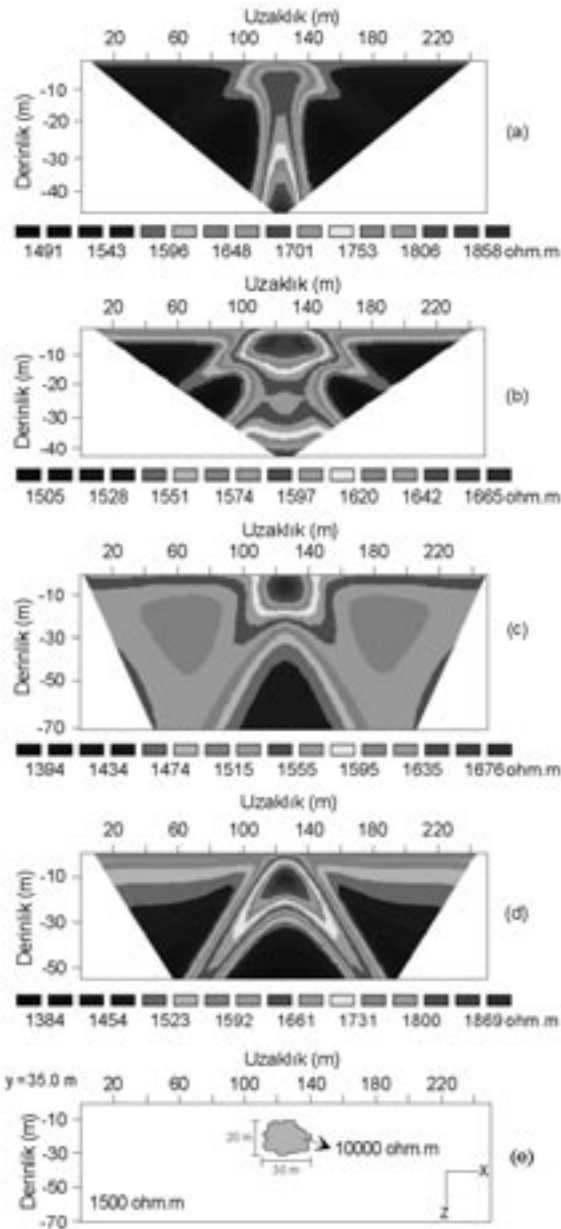


Şekil 9. Karstik model-1'in görünür öz direnç haritaları: (a) Schlumberger, $z_e=18$ m, (b) Wenner, $z_e=18$ m, (c) pol-pol, $z_e=17$ m, (d) dipol-dipol, $z_e=17$ m ve (e) modelin $z=20$ m'deki yatay kesiti.

Figure 9. Apparent resistivity maps of the karstic model-1: (a) Schlumberger, $z_e=18$ m, (b) Wenner, $z_e=18$ m, (c) pole-pole $z_e=17$ m, (d) dipole-dipole, $z_e=17$ m and (e) horizontal resistivity model at the depth of $z=20$ m

pı için en iyi dizilimin sırasıyla; pol-pol, Schlumberger, Wenner ve dipol-dipol olduğu ortaya çıkmıştır.

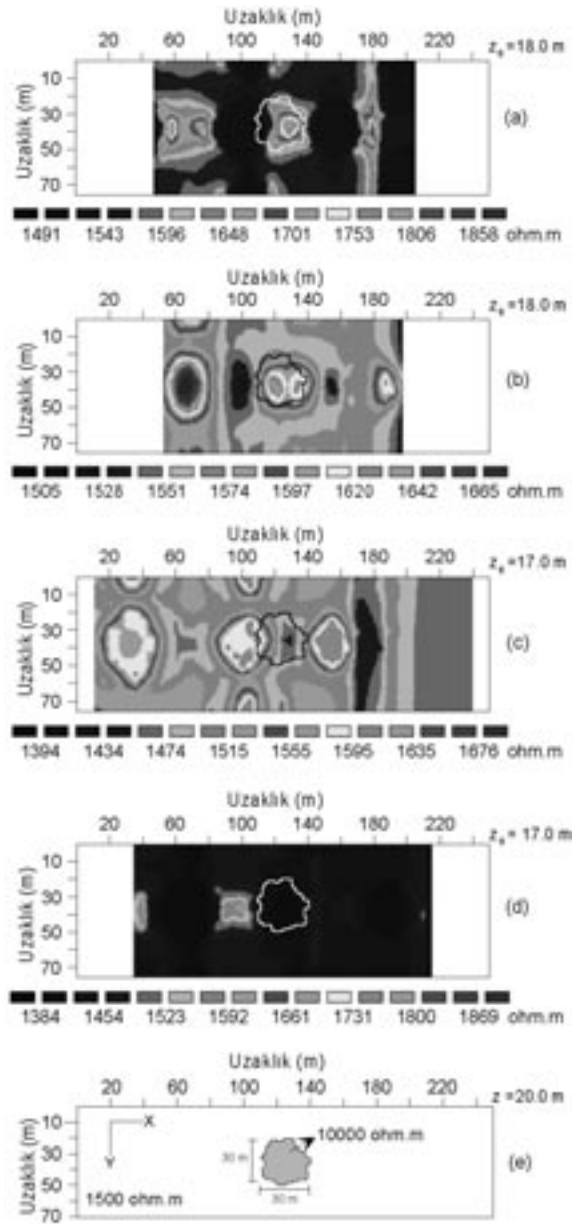
İkinci model ise, birinci modelin yüzeye yakın bölümlerinin çeşitli iklimsel etkiler nedeniyle bo-



Şekil 10. Karstik model-1'in $y=35$ m'deki görünür öz-direnç yapma kesitleri: (a) Schlumberger, (b) Wenner, (c) pol-pol, (d) dipol-dipol, (e) modelin $y=35$ m'deki düşey kesiti.

Figure 10. Apparent resistivity pseudo-sections of the karstic model-1 at the y -horizontal distance of 35 m: (a) Schlumberger, (b) Wenner, (c) pole-pole, (d) dipole-dipole, (e) vertical resistivity model at the y - horizontal distance of 35 m.

zunmuş ve bunun sonucu oluşan oyuklarında 80 ohm.m'lik öz-direnç değerine sahip toprak ile dolduğu düşünülerek oluşturulmuştur (karstik model-2) (Şekil 11e ve 12e). Bu modelle yapılan

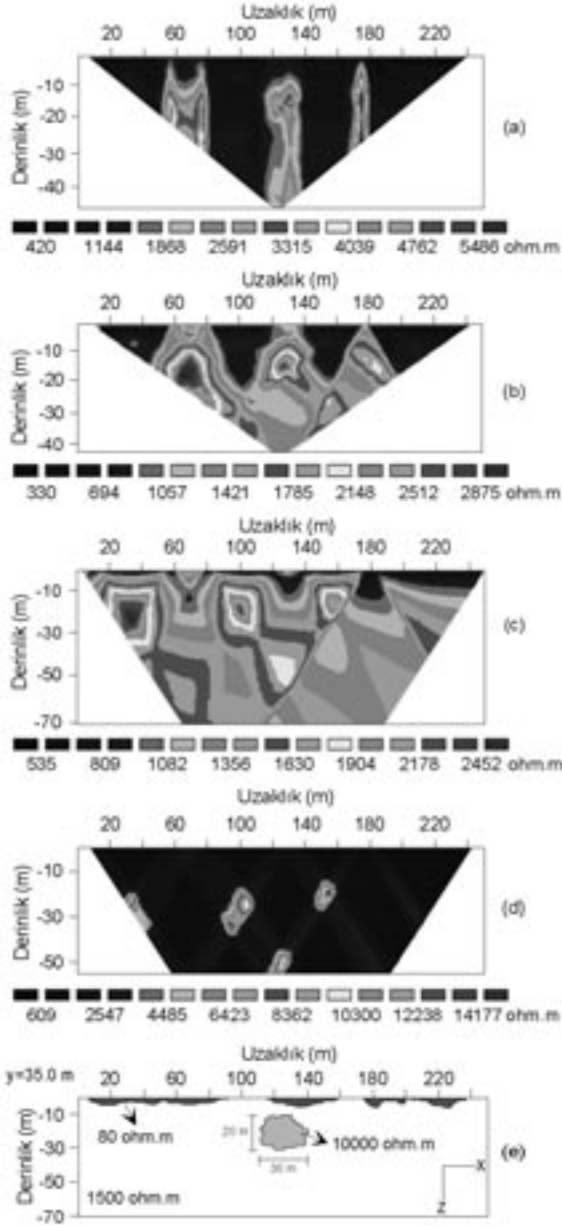


Şekil 11. Karstik model-2'nin görünür öz-direnç haritaları: (a) Schlumberger, $z_e=18$ m, (b) Wenner, $z_e=18$ m, (c) pol-pol, $z_e=17$ m, (d) dipol-dipol, $z_e=17$ m ve (e) modelin $z=20$ m'deki yatay kesiti.

Figure 11. Apparent resistivity maps of the karstic model-2: (a) Schlumberger, $z_e=18$ m, (b) Wenner, $z_e=18$ m, (c) pole-pole $z_e=17$ m, (d) dipole-dipole, $z_e=17$ m and (e) horizontal resistivity model at the depth of $z=20$ m.

hesaplamalar sonucu elde edilen haritalar ve yapma kesitler incelendiğinde, tüm dizilimlerde yüzeydeki bozunma ve burada bulunan düşük öz-dirençli katmandan dolayı gömülü yapının

anomalisi önemli oranda maskelenmekte ve ayrıca yüzey örtüsünden kaynaklanan birçok ikincil anomali grubu ortaya çıkmaktadır (Şekil 11 ve 12). Elde edilen görünür öz direnç haritaların-



Şekil 12. Karstik model-2'nin $y=35$ m'deki görünür öz direnç yapma kesitleri: (a) Schlumberger, (b) Wenner, (c) pol-pol, (d) dipol-dipol, (e) modelin $y=35$ m'deki düşey kesiti.

Figure 12. Apparent resistivity pseudo-sections of the karstic model-2 at the y-horizontal distance of 35 m: (a) Schlumberger, (b) Wenner, (c) pole-pole, (d) dipole-dipole, (e) vertical resistivity model at the y- horizontal distance of 35 m.

dan ($z_e=17$ ve 18 m için) aşağıda bulunan karstik yapıyı hemen hemen hiçbir dizilimle belirleme olanağı olmamasına karşın, yine de en iyi sonucu, sırasıyla, Wenner ve Schlumberger dizilimi vermektedir (Şekil 11a,b,c,d). Benzer biçimde yapma kesitlerden de gömülü karstik yapıyı belirleme olanağı yoktur. Karstik yapının etkisi Schlumberger ve Wenner dizilimlerinde, diğer anomalilerle karışmasına karşın, bir ölçüde olsa görülmektedir (Şekil 12a ve b). Ancak pol-pol ve dipol-dipol dizilimlerinden böylesi bir yapıyı tanımlama olanağı bulunmamaktadır (Şekil 12c ve d).

SONUÇLAR

Bu çalışmada; sığ ölçekli öz direnç çalışmalarında karşılaşılan sorunların bilgisayar ortamındaki benzetimi, sonlu farklar yöntemiyle elde edilmiştir. Üç boyutlu olarak yapılan bu modelleme çalışmasında dört farklı dizilim (Schlumberger, Wenner, pol-pol, dipol-dipol) kullanılmış ve bunların yanıtları elde edilmiştir. Çalışmalar; sorunların genel özellikleri bilindiğinde, doğaya uygun karmaşık modellerin ve kullanılan yöntem yardımıyla da bu yapılar üzerindeki öz direnç yanıtlarının kısa sürede oluşturulabileceğini ortaya koymuştur. Model yapının karmaşılaşması ve özellikle aranan hedef yapının üzerinde dirençli, ya da iletken başka yapıların bulunması durumunda oldukça farklı sonuçların elde edildiği görülmüştür. Böylece yapının karmaşılaşmasıyla aranan hedef yapının belirlenmesi zorlaşmaktadır. Bu sonuç, benzeri yeraltı durumlarının araştırılmasında elde edilen görünür öz direnç andıran kesitlerinden yorum yapmanın ne denli önemli sakıncalar doğuracağını açıkça ortaya koymaktadır. Bu gibi durumlarda; kullanılan dizilim sayısının fazlalığı, sahada farklı jeofizik yöntemlerin uygulanması, ters-çözüm modellemesi ve iyi bir jeoloji bilgisi yorumlamayı artıracaktır. Çalışmalar sırasında; anomaliye en büyük katkıyı genelde sığ derinlikte gömülü bulunanlar yapılar vermektedir. Böylece yeraltındaki hedef yapıların sığlaşmasıyla görünür öz direnç haritalarından yorum yapmanın, dizilime bağlı olarak değişmekle birlikte, genelde kolaylaştığı; yapıların derinleştiği durumda ise, hem yapma kesitlerin, hem de görünür öz direnç haritalarının daha da karmaşık bir durum aldığı saptanmıştır. Ayrıca; modellerin karmaşılaşması, öz direnç değerleri arasındaki zıtlığın artması ve yapıların farklı derinliklerde gömülü olma duru-

mu yapıların belirlenebilirliğini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle; bu çalışma sıg jeofizik araştırmalarda, üç boyutlu çalışma yapılmaz ise, görünür öz direnç değerleri yardımıyla yorum yapmanın önemli sakıncalar içereceğini ortaya çıkarmıştır.

Bu çalışmada olduğu gibi, kısa sürede ve kolayca elde edilebilen yapma kesitler ve haritalar; arkeoloji, çevre sorunları, mühendislik ve hidrojeoloji ile ilgili sıg ölçekli sorunların çözümünde yorumlamaya önemli oranda katkı sağlayacaktır. Ayrıca, yeraltındaki cisimlerin değişik dizilimlere göre farklı yanıtlar vermesi de, araştırmanın amacına uygun dizilimin seçilmesi açısından bu tür çalışmaların önemini ortaya koymaktadır. Böylece araştırılacak alanda, elde edilmesi olanca anomalilerin bilgisayar ortamında benzetimi ile araştırma sorunu hakkında çalışma öncesi bazı yorumlar yapılabilir ve arazi ölçümleri daha iyi planlanabilir.

KATKI BELİRTME

Yazarlar, yayının son şekline gelmesinde gösterdiği önemli katkılardan dolayı dergi editörü Prof. Dr. Reşat Ulusay'a ve isim belirtilmeyen hakeme teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

- Apparao, A., 1979. Model tank experiments on resolution of resistivity anomalies obtained over buried conducting dikes-inline and broadside profiling. *Geophysical Prospecting*, 27, 835 - 847.
- Berge, M.A., 2002. Sıg aramacılıkta sonlu farklar yöntemi ile iki-boyutlu düz çözüm öz direnç modellemesi. Lisans tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 77 s (yayımlanmamış).
- Brizzolari, E., and Bernabini, M., 1979. Comparison between Schlumberger electrode arrangement and some focused electrode arrangements in resistivity profiles. *Geophysical Prospecting*, 27, 233 - 244.
- Candansayar, M.E., and 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, 13 -25.
- Coggon, J.H., 1971. Electromagnetic and electrical modeling by the finite element method. *Geophysics*, 36, 132 -155.
- Dahlin, T., 2001. The development of dc resistivity imaging techniques. *Computer and Geosciences*, 27, 1019 -1029.
- Dahlin, T., and Zhou, B., 2004. A numerical comparison of 2-D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical Prospecting*, 52, 379 -398.
- Dahlin, T., Bernstone, C., and Loke, M. H., 2002. Case History: A 3-D resistivity investigation of a contaminated site at Lernacken, Sweden. *Geophysics*, 67, 1692-1700.
- Das, U.C., and Parasnis, D.S., 1987. Resistivity and induced polarization responses of arbitrarily shaped three-dimensional bodies in a two-layered earth. *Geophysical Prospecting*, 35, 98 -109.
- Dey, A., and Morrison, H.F., 1979a. Resistivity modeling for arbitrarily shaped two-dimensional structures. *Geophysical Prospecting*, 27, 106 -136.
- Dey, A., and Morrison, H.F., 1979b. Resistivity modeling for arbitrarily shaped three-dimensional structures. *Geophysics*, 44, 753 -780.
- Dieter, K., Paterson, N.R., and Grant, F.S., 1969. IP and resistivity type curves for three-dimensional bodies. *Geophysics*, 34, 615 - 632.
- Edwards, L.S., 1977. A modified pseudosection for resistivity and IP. *Geophysics*, 42, 1020-1036.
- Göktürkler, G. ve Drahor, M. G., 2004. Yinelemeli yöntemle üç boyutlu öz direnç modellemesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen ve Mühendislik Dergisi* (baskıda).
- Griffiths, D.H., and 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., Turnbull, J., and Olayinka, A.I., 1990. Two-dimensional resistivity mapping with a computer-controlled array. *First Break*, 8(4), 121 -129.
- Hohmann, G.W., 1975. Three-dimensional induced polarization and electromagnetic Modeling. *Geophysics*, 40, 309 - 324.
- Jepsen, A.F., 1969. Numerical modeling in resistivity prospecting. Ph. D. Thesis, University of California, Berkeley, USA (unpublished).
- Kurtulmuş, T.Ö., 2003. Sıg aramacılıkta sonlu farklar yöntemi ile üç-boyutlu öz direnç modellemesi. Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 69s (yayımlanmamış).
- Loke, M.H., 2001a. Res3dmod ver. 2.1, Three-dimensional resistivity and IP forward modeling using the finite difference and finite element methods. User's manual, www.geoelectrical.com.

- Loke, M.H., 2001b. *Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys*. Penang, Malaysia, Universiti Sains Malaysia, unpublished course notes, 121 pp, www.geoelectrical.com.
- McGillivray, P.R., and Oldenburg, D.W., 1990. Methods for calculating Frechet derivatives and sensitivities for the non-linear inverse problem, a comparative study. *Geophysical Prospecting*, 38, 499-524.
- Meyer, W.H., 1977. Computer modelling of electromagnetic prospecting methods. Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley, USA (unpublished).
- Mufti, I.R., 1976. Finite difference resistivity modeling for arbitrarily shaped two-dimensional structures. *Geophysics*, 41, 62 -78.
- Okabe, M., 1981. Boundary element method for the arbitrarily inhomogeneities problem in electrical prospecting. *Geophysical Prospecting*, 29, 39 - 59.
- Parasnis, D.S., 1965. Theory and practice of electric potential and resistivity prospecting using linear current electrodes. *Geoexploration*, 3(1), 3 - 69.
- Pridmore, D.F., Hohmann, G.W., Ward, S.H., and Sill, W.R., 1981. An investigation of finite element modeling for electrical and electromagnetic data in three dimensions. *Geophysics*, 46, 1009 -1024.
- Rijo, L., 1977. Modeling of electric and electromagnetic data. Ph.D. Thesis, University of Utah, USA (unpublished).
- Scriba, H., 1981. Computation of the electric potential in three-dimensional structures. *Geophysical Prospecting*, 29, 790 - 802.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., and Keys, D.A., 1976. *Applied Geophysics*, Cambridge University Press, Cambridge, 860 pp.
- Van Nostrand, R.G., and Cook, K.L., 1966. Interpretation of resistivity data. USGS Prof. Paper, Printing Office, Washington, USA, 449 pp.
- Van Overmeeren, R.A., and Ritsema, I.L., 1988. Continuous vertical electrical sounding. *First Break*, 6(10), 313 - 324.