



## Bazı sığ yeraltı yapılarının özdirenç ters-çözümü

### *Resistivity inversion of some shallow subsurface structures*

**Mahmut G. DRAHOR<sup>1,2</sup>, Gökhan GÖKTÜRKLER<sup>2</sup>, Meriç A. BERGE<sup>2</sup>,  
T. Özgür KURTULMUŞ<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Dokuz Eylül Üniversitesi, Sığ Jeofizik ve Arkeolojik Prospeksiyon Araştırma ve Uygulama Merkezi (SAMER), Kaynaklar Yerleşkesi, 35160 Buca, İZMİR

<sup>2</sup> Dokuz Eylül Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Kaynaklar Yerleşkesi, 35160 Buca, İZMİR

Geliş (*received*) : 30 March 2005

Kabul (*accepted*) : 28 June 2005

### ÖZ

Bu çalışma, son yıllarda sığ yeraltı yapılarının araştırılmasında yaygın olarak kullanılan elektrik özdirenç verilerinin ters-çözümünü bilgisayar benzetimleri ile irdelemektedir. Kullanılan modeller; sığ jeofizik araştırmalarda sık karşılaşılan, çevresel ve karstik sorunların çözümüne yönelik olarak tasarlanmıştır. Uygulamalar sırasında, her model için L1- (bloklulu) ve L2- (düzgünlük-kısıtlı) normları kullanılarak iki- ve üç-boyutlu ters-çözümler yapılmış ve her bir normun bu modellerdeki başarısı araştırılmıştır. Ters-çözüm uygulamaları sırasında; elektrik özdirenç yönteminde yaygın olarak kullanılan Schlumberger, Wenner, pol-pol ve dipol-dipol elektrot dizilimleri kullanılarak, bu dizilimlerin yapı belirlemedeki yeterliliği araştırılmıştır. Modelleme çalışmaları; yüzeye yakın yapıların ters-çözüm yöntemiyle daha iyi belirlenmesine karşın, yüzeyde veya yüzeye çok yakın iletken ya da dirençli katmanların olması durumunda, derindeki yapı/yapıların belirlenebilirliğinin zayıfladığını ortaya koymuştur. Ayrıca, dizilim türünün yapı belirlenebilirliği üzerinde önemli bir etkisi vardır. Çalışmaların diğer bir sonucu da; blok benzeri yapılarda L1-normu yapı belirlenebilirliğinde daha etkili olmasına karşın, ani değişim göstermeyen jeolojik modellerde L2-normunun daha iyi sonuç vermesidir.

**Anahtar Kelimeler:** Modelleme, özdirenç, sığ jeofizik, ters-çözüm.

### ABSTRACT

*This study analyses inversion of resistivity data widely used in applications for the investigation of shallow subsurface structures by using computer simulations. The models were designed to solve the environmental and karstic problems which are frequently encountered in near surface explorations. Two- and three- dimensional inversions were carried out for each model using the L1 (robust) and L2 (smoothness-constrained) norms and the success of each norm in these models was investigated. In the inversion studies, the Schlumberger, Wenner, pole-pole and dipole-dipole electrode configurations were employed and their performances in defining models were also investigated. Modelling studies showed that the structures buried in shallow depths could easily be determined by inversion while the determination of the deeply buried target structures decreased in the case of the presence of conductive or resistive layers located at or close to the surface. The type of electrode configuration has an important effect on the model determination. The other result of the studies is that the L1-norm is more effective in blocky structures, while the L2- norm yields better results in geological models without sharp changes.*

**Key Words:** Modelling, resistivity, near surface geophysics, inversion.

## GİRİŞ

Ters-çözüm, elektrik özdirençte yapı parametrelerinin saptanmasında önemli bir değerlendirme yöntemidir. Bu yöntem, uzun yıllardan beri bir-boyutlu (Düşey Elektrik Sondaj – DES) uygulamalarda etkili bir biçimde kullanılmaktadır (Inman vd., 1973; Inman, 1975). İki- ve üç- boyutlu yapıların bu yöntem yardımıyla araştırılması konusunda yaygın kuramsal çalışmaların 1990'lı yıllarda başlamasına karşın, uygulamadaki yaygınlığı son yıllarda artmıştır. Özellikle sığ jeofizik tekniklerin kullanımındaki hızlı artış, yöntemin geniş bir uygulama alanı bulmasına neden olmuştur. Yöntem, günümüzde sığ jeofizik uygulamalardaki birçok sorununun çözümünde etkili ve başarılı bir biçimde kullanılmaktadır. Araziden elde edilen veri, görünür özdirenç olduğundan; ortamın özdirenç zıtlığı, dizilim geometrisi ve derinlik gibi parametreler, bu değerlerin değişiminde etkilidir ve ortamdaki doğru elektriksel yeraltı modelini yansıtmaz. Diğer bir deyişle, belirtilen parametrelere bağlı olarak oluşan görünür değişimi yansıtır (Drahor vd., 2004). Bu nedenle, doğru yeraltı modelini elde etmek için ters-çözüm çalışmaları yapmak gerekmektedir. Elektrik özdirenç verisinin ters-çözümünde genellikle iki yaklaşım kullanılmaktadır. Bunlar, L1 (bloklü) ve L2 (düzgünlük-kısıtlı) normu olarak adlandırılan yöntemlerdir (Loke ve Barker, 1996a, 1996b; Claerbout ve Muir, 1973; Wolke ve Schwetlick, 1988). Bunlardan L1 normu, ortamda ani değişimlerin ve keskin sınırların olduğu durumlarda daha başarılıdır. L2 normu ise, yuvarlatılmış ya da daha düzgün değişimli yeraltı yapılarının modellenmesinde başarılı sonuçlar vermektedir. Genellikle sığ yapılar bu özelliklerin her iki türünü de içerdiğinden, etkili sonuçlar elde edebilmek için, arazi çalışması öncesinde yapılacak benzetim çalışmalarıyla, araştırmaların başarısına önemli bir katkı sağlanacaktır. Yöntemin etkin olmasında gömülü yapıların fiziksel özelliklerinin yanı sıra, kullanılan elektrot dizilimlerinin önemi de büyüktür. Bu nedenle etkili bir sonuç elde etmenin önemli bir diğer koşulu da, uygun dizilim kullanmaktan geçmektedir. Son yıllarda, iki ve üç-boyutlu ters çözüm işlemleriyle sığ ortamların modellenmesi üzerine birçok araştırma yapılmış olup, uygulama sıklığında da bir artış gözlenmektedir (Candansayar ve Başokur, 2001; Dahlin vd., 2002; Dahlin ve Zhou, 2004).

Bu çalışma, sığ yapıların belirlenmesinde özdirenç ters-çözüm yönteminin ne derece başarılı olduğunu ve seçilecek dizilim türünün yapı belirlenebilirliği üzerindeki etkisinin ne olabileceğini saptamak için yapılmıştır. Son yıllarda çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan benzeri çalışmalarla, elektrik özdirenç ters-çözüm yönteminin yapı çözümündeki etkinliği araştırılmaktadır (Olayinka ve Yaramancı, 1999, 2000; Dahlin ve Zhou, 2004). Çalışmalar sırasında; iki- ve üç-boyutlu yapıların belirlenmesinde bloklü ve düzgünlük-kısıtlı çözüm yöntemleri kullanılmıştır (Loke ve Barker, 1995, 1996a, 1996b ve Loke vd., 2003). Hesaplamalar, özdirenç uygulamalarında yaygın olarak kullanılan elektrot dizilimleri olan Schlumberger, Wenner, pol-pol ve dipol-dipol için iki- ve üç-boyutlu olarak RES2DINV ve RES3DINV (Loke, 2001) bilgisayar programları kullanılarak yapılmıştır. Bu makale; Drahor vd. (2004) tarafından düz çözüm modellemesi yapılan çalışmanın devamı niteliğinde olduğundan, kullanılan model yapılar yukarıda belirtilen makaledeki ile aynı özelliktedir. Çalışmalar, model yapıların hesaplanmasında dizilimlerin oldukça önemli bir yeri olduğunu ortaya koymuştur. Bu nedenle, araştırmaya uygun dizilimlerin önceden bilinmesi ya da belirlenmesi, başarıyı önemli ölçüde etkileyecektir. Bu çalışma, yapıların saptanmasında kullanılan ters-çözüm algoritmasının da önemli olduğunu göstermiştir. Özellikle sınırlarında ani değişim gösteren yapılar; bloklü çözüm algoritması ile daha iyi belirlenebilirken, yumuşak geçişli yapılar kısırlı-düzgünlük ile daha başarılı sonuçlar vermektedir.

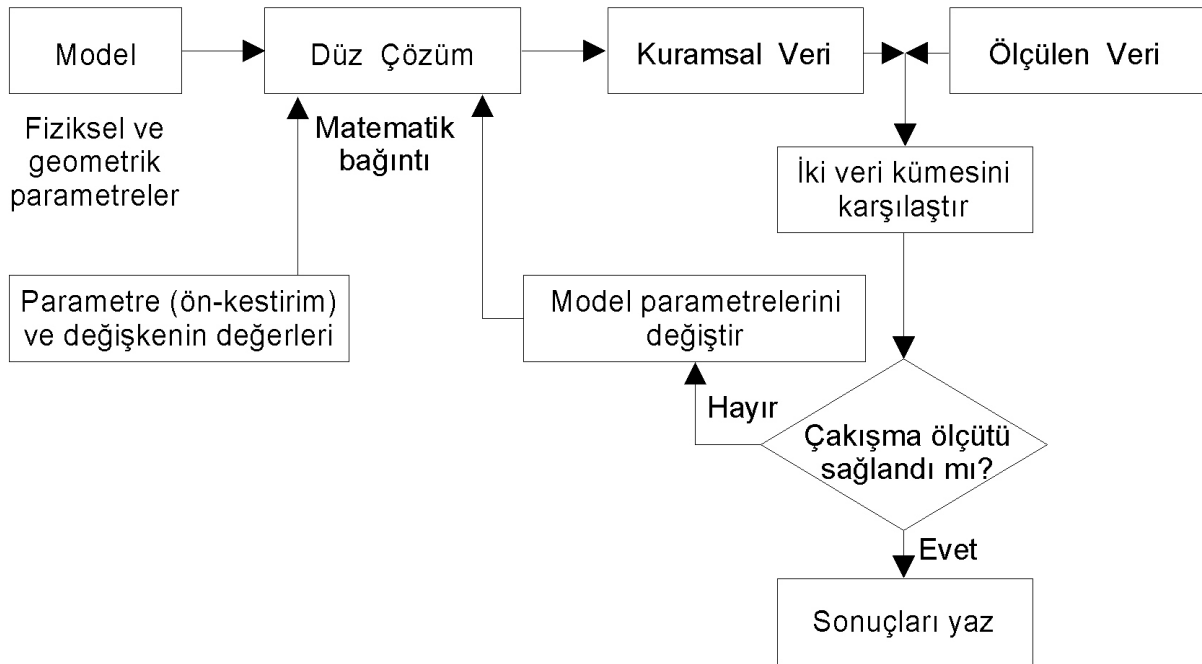
## ELEKTRİK ÖZDİRENÇ VERİLERİNİN TERS-ÇÖZÜMÜ

İki- ve üç-boyutlu elektrik özdirenç verileri, görünür yapma kesitler ve haritalar biçiminde sunulmaktadır ve yeraltına ait yaklaşık bir özdirenç görüntüsü elde edilmektedir. Eğer, aranan yapılar yüzeye çok yakınsa, bu görüntülerden yapıyı belirlemek olası olabilirken; yapıların derinde olması durumunda, bunların belirlenebilirliği önemli ölçüde azalmaktadır. Oysa, bu verilerin ters-çözümüne sokulmasıyla, özdirenç dağılımı daha gerçekçi bir biçimde elde edilebilmektedir. İki- ve üç-boyutlu ters-çözüm yöntemlerinin gelişimi (Smith ve Vozoff, 1984; Tripp vd., 1984; Constable vd., 1987; de Groot-Hedlin ve Constable, 1990; Sasaki, 1992, 1994; Ellis ve Oldenburg 1994a, 1994b; Loke ve Barker 1995,

1996a, 1996b), yeraltı özdirenç dağılımlarının daha hızlı ve duyarlı bir biçimde belirlenmesi olanağını sağlamıştır. Ters-çözüm modellemesi, eldeki veriden yeraltına ait parametrelerin saptanması ve bu parametrelere bağlı modelin oluşturulması işlemidir. Bu yöntemde yeraltı, sonlu sayıda sabit özdirenç değerine sahip bloklarla temsil edilir ve bu bloklara ait özdirenç değerleri saptanmaya çalışılır. Bu konuda Başokur (2003) tarafından önerilen ve konunun açıklanmasına önemli bir katkı sağlayacak akış şeması, Şekil 1'de verilmektedir. Akış şemasından da görüldüğü gibi, belirli bir ön-kestirime karşılık gelen kuramsal veri hesaplanarak, ölçülen veri ile karşılaştırılır ve ortaya bir çakışma ölçütü çıkar. Ters-çözüm işleminde; ölçülen ve hesaplanan veri arasındaki hata miktarı, bu ölçüte göre en aza indirilmeye çalışılır ve böylece veriler arasında en uygun çakışmanın olduğu durumdaki parametreler belirlenerek çözüme ulaşılar. Ancak, ters-çözüm işleminde; sadece belirli bir yinelemeye bağlı olarak elde edilen iyi bir çakışmayla sonuca ulaşmak her zaman için olası değildir. Verinin yüksek oranda gürültü içermesi, işlemler arasındaki yakınsamayı engelleyebileceği gibi, her bir yinelemede hesaplamalar arasındaki hata miktarları düşmesine karşın, doğru çözüme yakınsanacağına garantisi de yoktur

(Başokur, 2003). Özellikle özdirenç ters-çözüm çalışmalarında; yüzeye oldukça yakın aykırı jeolojik özellikler (yapının aşırı iletken, ya da dirençli oluşu gibi), çözümleme sırasında iraksamanın oluşmasına neden olabilmektedir. Bu konuda Olayinka ve Yaramancı (2000) tarafından yapılan çalışmalar özdirenç ters-çözümü sırasında dikkat edilmesi gereken noktaları açıkça ortaya koymuştur. Özellikle değişik özdirenç ortamları için model rms uyumsuzluk verilerinin karşılaştırılması sonucunda; çok düşük özdirenç zıtlıkları bulunan yapılarda model rms uyumsuzluk değerlerinde önemsiz bir düşüş bulunurken (ideal davranış), çok yüksek özdirenç zıtlıklarına sahip ortamlarda (10:1, ya da daha büyük) model rms uyumsuzluk değerleri oldukça artmaktadır (ideal olmayan davranış). Bu durumda, daha az sayıda yineleme ile modele ulaşılabilir ve veri ile model rms uyumsuzluk değerleri birbirinden hızla uzaklaşmaktadır (Olayinka ve Yaramancı, 2000). Benzer olgu, katmanlar arasındaki kalınlık ve derinlik oranlarında da ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, ters-çözüm çalışmalarında, modelin bu tür özellikleri de denetlenmelidir.

Özdirenç ters-çözümünde yaygın kullanılan iyileştirme yöntemlerinden biri de Gauss-Newton



Şekil.1. Ters-çözüm işleminin basitleştirilmiş akış şeması (Başokur, 2003).  
Figure 1. A simplified flow chart of inversion process (Başokur, 2003).

algoritmasıdır (Loke ve Barker 1995, 1996a, 1996b; Sasaki, 1992, 1994). Ters-çözüm işleminde yeraltını temsil eden modelin iyileştirilmesi sırasında, başlangıç modeline bağlı olarak işlemler yinelemeler biçiminde sürdürülür ve önceden belirlenen en düşük hata düzeyine karşılık gelen model çözüm olarak kabul edilir. Ters-çözüm işleminin dizey formundaki gösterimi genel olarak aşağıdaki biçimde verilebilir;

$$J\Delta p_i = \Delta g_i \quad (1)$$

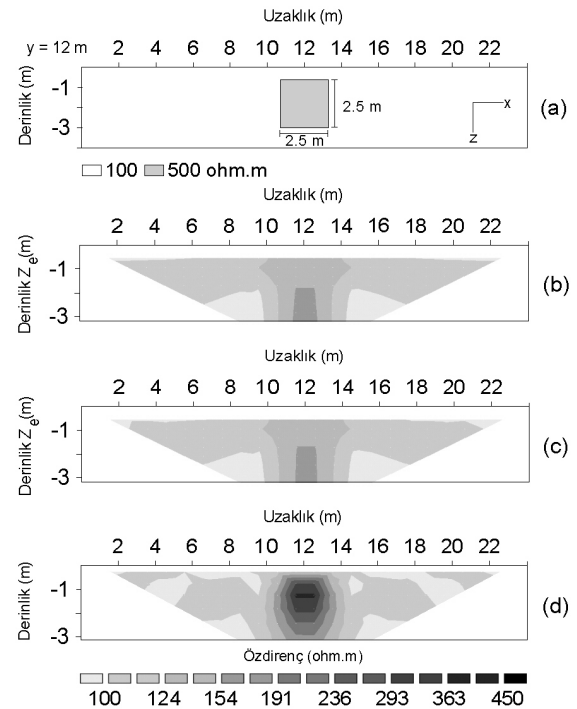
Burada;  $\Delta g_i$ , ölçülen ve hesaplanan veri arasındaki fark vektörü,  $p_i$ , model parametreleri düzeltme vektörü ve  $J$ , Jakobyen dizey yani düz-çözümde kullanılan matematiksel bağıntının model parametrelerine göre kısmi türevleridir. Gauss-Newton yönteminin modifikasyonu ile aşağıdaki normal denklemler sistemi elde edilmiştir ve sönümlü en-küçük kareler veya Levenberg-Marquardt yöntemi olarak anılmaktadır (Levenberg, 1944; Marquardt, 1963).

$$(J^T J + \lambda I)\Delta p_i = J^T \Delta g_i \quad (2)$$

Burada;  $I$ , birim (identity) matris,  $\lambda$ , Marquardt ya da sönüm faktörü ve  $i=1,2,3,\dots,N$ . Bu bağıntı, Constable vd. (1987) tarafından bazı değişiklikler yapılarak, düzgünlük-kısıtlı en küçük kareler (l2 normu) olarak tanımlanmıştır. Bağıntıya Ellis ve Oldenburg (1994a) tarafından veri uyumsuzluğu (data misfit) ve model pürüzlülük (roughness) vektörlerinin elemanlarını oluşturan ağırlık matrisleri de eklenerek, yöntem L1-normlu ters-çözüm olarak tanımlanmıştır. Yöntem, uygulamada yaygın olarak robust ya da bloklu ters-çözüm olarak adlandırılır. Denklemin ayrıntılı çözümleri Wolke and Schwetlick (1988) ve Ellis ve Oldenburg (1994a) tarafından ayrıntılı olarak verilmiştir. Bu ters çözüm yöntemi, blok biçimli yapıların tanımlanmasında diğer çözüm tekniğine göre daha iyi sonuçlar vermektedir.

L1- ve L2-normu ile çözüme ulaşan yöntemlerin yapı belirlenimindeki etkisini ortaya çıkarmak için yapay bir yapay blok modeli tanımlanmıştır. Bu bloğun boyutları, 2.5 X 2.5 m olup, 0.5 m derinlikte gömülü durumda bulunmakta ve öz direnci 500  $\Omega m$ 'dir. Yapının gömülü olduğu ortamın boyutları ise, 24 X 20 m ve öz direnci ise 100  $\Omega m$ 'dir (Şekil 2a). Böyle bir yapıda düz-çözüm modellenmesi ile yapıyı en iyi tanımlayan

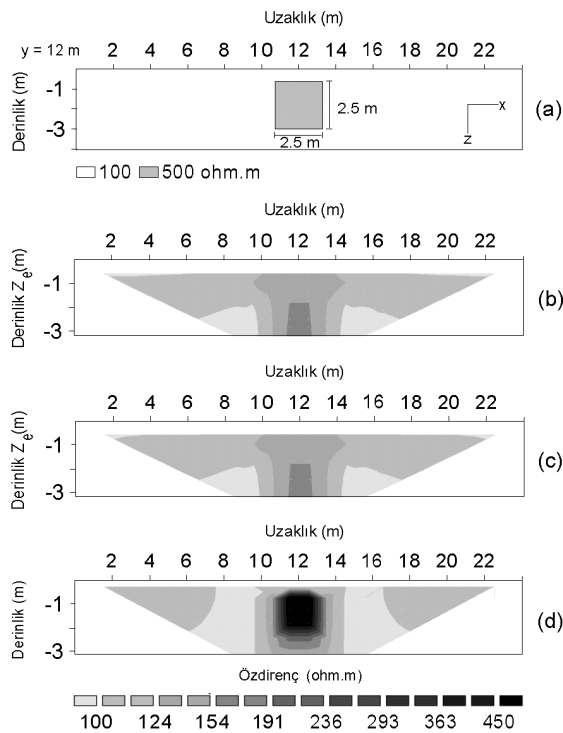
görünür öz direnç yapma kesiti Schlumberger diziliminde elde edilmiş ve bunun görüntüsü Şekil 2b'de verilmiştir. Elde edilen görünür öz direnç değerleri üzerinde Res2Dinv ters-çözüm programı kullanılarak, 2-boyutlu düzgünlük-kısıtlı ve bloklu ters-çözüm hesaplamaları yapılmıştır. Şekil 2c'de düzgünlük-kısıtlı algoritmaya göre elde edilen hesaplanmış görünür öz direnç yapma kesiti verilmektedir. Şekil 2b ile 2c karşılaştırıldığında; ters-çözüm modelinde verilen görünür öz direnç verileri ile ters-çözüm sonucunda hesaplanan görünür öz direnç verileri arasında oldukça düşük bir hata miktarı ile yaklaşım sağlanmıştır. Bu sonuç, beşinci yinelemede elde edilmiş ve bu yinelemede oluşan % RMS hata, 1.17'dir. Bu işlem sonucunda elde edilen model öz direnç kesiti ise, Şekil 2d'de görülmektedir.



Şekil 2. Gömülü bir dirençli küp modelinin düzgünlük-kısıtlı algoritma ile ters-çözümü: (a) yapay model, (b) yapay modelden üretilen görünür öz direnç yapma kesiti, (c) ters-çözümde elde edilen model kullanılarak hesaplanmış ters-çözüm yapma kesiti, (d) ters-çözüm sonucu elde edilen model.

Figure 2. Inversion of a buried block model by the smoothness-constrained algorithm: (a) synthetic model, (b) apparent resistivity pseudo-section obtained by using synthetic model, (c) calculated pseudo-section using the model obtained from the inversion, (d) model obtained by inversion.

Şekilden de görüldüğü gibi, yapay model ile hesaplanan model arasındaki benzerlik oldukça fazladır. Ancak, yapının tanımlanması yüzeye yakın bölümlerde daha iyi olmasına karşın; derine doğru bu etkinin yitildiği, yapı belirlenebilirliğinde bozulma başladığı ve yuvarlatma etkisinin ortaya çıktığı görülmektedir. Aynı model yapının bloklu ters-çözüm ile elde edilen sonuçları ise Şekil 3'de verilmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi, kullanılan bu yöntemde, verilen ile hesaplanan öz direnç değerleri arasındaki yaklaşım daha iyidir ve beşinci yineleme sonucunda oluşan % mutlak hata 0.2'dir (Şekil 3b, c). Şekil 3'den de görüldüğü gibi, hesaplanan model yapay modele daha yakın bir sonuç vermiştir. Özellikle hesaplanan öz direnç değerleri göz



Şekil 3. Gömülü bir dirençli küp modelinin bloklu algoritma ile ters-çözümü: (a) yapay model, (b) yapay modelden üretilen görünür öz direnç yapma kesiti, (c) ters-çözümde elde edilen model kullanılarak hesaplanmış ters-çözüm yapma kesiti, (d) ters-çözüm sonucu elde edilen model.

Figure 3. Inversion of a buried block model by the robust algorithm: (a) synthetic model, (b) apparent resistivity pseudo-section obtained by using synthetic model, (c) calculated pseudo-section using the model obtained from the inversion, (d) model obtained by inversion.

önüne alındığında, bloklu yaklaşım yönteminin daha iyi olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçtan da görüldüğü gibi, yapı sınırlarında ani değişimlerin bulunduğu yeraltı modellerinde bloklu yaklaşım, düzgünlük-kısıtlı yaklaşıma göre daha iyi sonuç vermektedir. Bunun da başlıca nedeni, düzgünlük-kısıtlı çözümün model öz direnç değerlerindeki değişimin karesini en-küçüklemeye çalışmasıdır. Böylece, daha yuvarlatılmış bir model üretilmekte ve ortamdaki ani değişimlerin bulunduğu yerlerde bir yuvarlatma etkisi ortaya çıkmaktadır. Oysa, en-küçük mutlak hata irdelemesini kullanan bloklu çözüm algoritmasında bu etki ortadan kalkmakta ve bu tür ani değişim bulunan ortamlar daha belirgin olarak belirlenebilmektedirler. Ayrıca, veride gelişigüzel ya da Gaussian olmayan ve genel gidişe uymayan hataların bulunması (ölçüm işlemi ve aletsel hatalar gibi) durumunda, mutlak hatalara göre çözüm yapan bloklu yöntem verinin genel davranışıyla daha uyumlu bir sonuç üretecektir. Böylece, sığ jeofizik alan araştırmalarının çoğunda (mühendislik, arkeolojik vb. sorunlarda) bloklu çözümün daha iyi sonuç vereceği düşünülmektedir. Oysa, ani değişimlerin beklenmediği jeolojik ortamlar ve veri hatalarının Gaussian olduğu durumlarda ise, düzgünlük-kısıtlı yaklaşımı kullanmak daha uygun olabilmektedir.

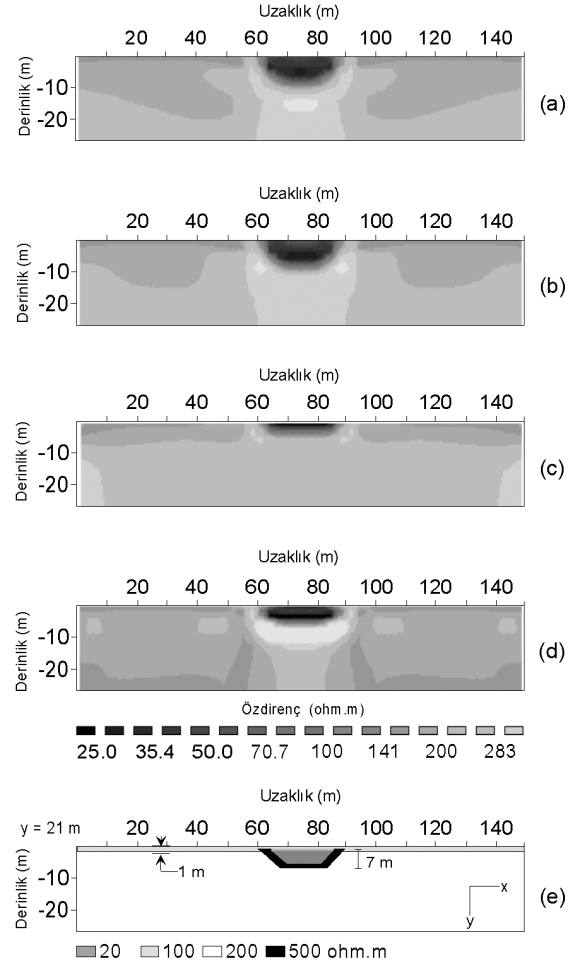
### BAZI SIĞ YERALTI YAPILARI İÇİN TERS-ÇÖZÜM MODELLEMESİNİN UYGULAMALARI

Siğ yeraltı yapılarının incelenmesinde elektrik öz direnç yöntemi son yıllarda oldukça yaygın biçimde kullanılmaya başlamıştır. Bunun başlıca nedeni, yöntemin ortamı iki- ve üç-boyutlu olarak incelenbilmesine olanak sağlamasıdır. Bu çalışmada amaç, farklı özelliklerdeki siğ yeraltı yapılarının belirlenmesi sırasında yöntemin başarı/başarısızlığı bilgisayar ortamı benzetimleriyle araştırmaktır. Ayrıca, iki ayrı ters-çözüm tekniğiyle (düzgünlük-kısıtlı ve bloklu) farklı yeraltı ortamları için belirlenebilirliğin incelenmesidir. Aynı zamanda diğer bir amaçta; Drahor vd. (2004) tarafından düz-çözümü yapılmış bazı siğ yeraltı ortamlarının ters-çözüm yöntemiyle değerlendirilmesidir. Yine, yapı belirlenebilirliğinin öz dirençte yaygın biçimde kullanılan dört elektrot dizilimine (Schlumberger, Wenner, pol-pol ve dipol-dipol) göre test edilmesi ve dizilim etkisinin önemini ortaya çıkarılması da hedef-

lenmiştir. Aşağıda, sıg jeofizikte karşılaşılabilecek bazı problemler irdelenerek, nelere dikkat edilmesi gerektiği üzerinde durulmuştur.

### Çevresel ve Sızıntı İzleme Amaçlı Tasarımlanan Modeller

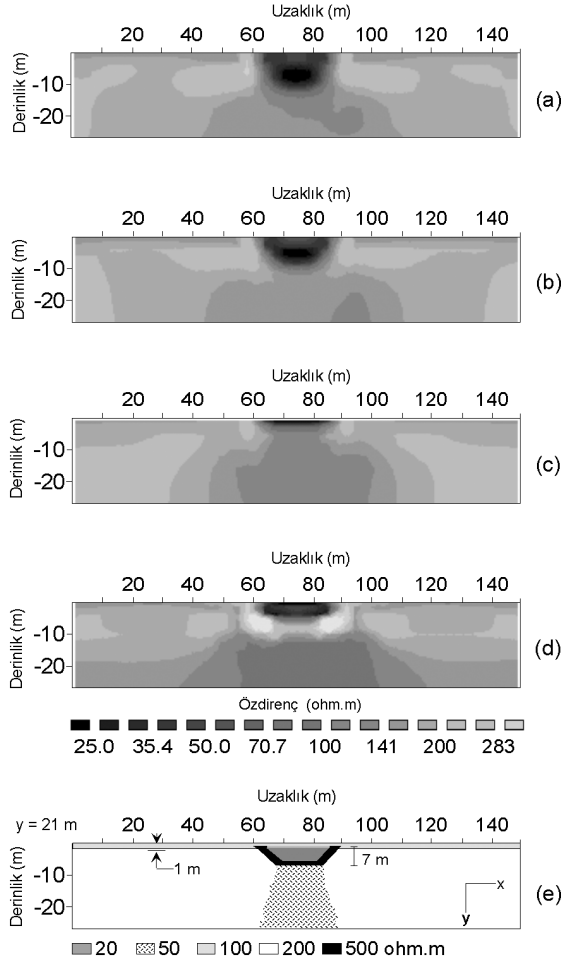
Jeofizikte akışkan içeren ortamlarda bu akışkanın zaman içerisindeki davranışlarının izlenmesi oldukça önemlidir. Özellikle elektrik özdirenç yöntemi bu tür akışkan değişimlerinin izlenmesinde yararlı bir yöntemdir. Bu amaçla, yöntemin bu tür değişimlere olan duyarlılığının araştırılması için, akışkan içeren bir ortamda zamana bağlı oluşan değişimler incelenmeye çalışılmıştır. Böylece, tasarımılanan ilk model (150 x 45 x 22) m boyutlarındaki bir alan içine yapılmış (30 x 30 x 7) m boyutlarında bir atık havuzudur (çevresel model-1). Havuzda oluşabilecek herhangi bir deformasyonun (havuz çeperlerinde oluşabilecek çatlama gibi) ortama sızan akışkan nedeniyle ortamda yaratacağı özdirenç değişimlerinin etkisini görebilmek amacıyla, tasarımılanan ikinci model (çevresel model-2) ile de sızıntı öncesi ve sonrası durumu karşılaştırma olanağı ortaya çıkmıştır (Drahor vd., 2004). Böylesi bir ortamdaki değişimin görünür özdirenç kesitleri ile belirlenmesi oldukça zordur. Bu nedenle, ortamdaki değişimi ve modeli oluşturan atık havuzunu belirlemek amacıyla yukarıda açıklanan ters-çözüm yöntemleriyle değerlendirilmeler yapılmıştır. Yapı, geometrik şekillidir ve ortamlar arasında yüksek özdirenç zıtlıkları vardır. Yapılan ters-çözüm uygulamaları, hata denetiminde gözlemsel ve hesaplanan değerler arasında mutlak değer farklarına göre çözüme giden bloklu yaklaşımın daha iyi sonuç verdiği ortaya çıkarmıştır. Bu yaklaşımla elde edilen sızıntı öncesi ve sonrası ortamları gösteren özdirenç model kesitleri Şekil 4 ve 5'te verilmiştir. Şekil 4'ten görüldüğü gibi, sızıntı öncesi ortamın fiziksel özellikleri hemen hemen tüm dizilimlerde açıkça ortaya çıkmıştır. Ancak, modeldeki özdirenç dağılımı ve model geometrisi dizilimlere göre farklılıklar göstermektedir. Atık havuzunun şekli, Schlumberger dizilimi (Şekil 4b) hariç, diğer tüm dizilimlerde açıkça ortaya çıkmıştır (Şekil 4a, c, d). Modeldeki havuzun özdirenç değerlerine en yakın sonuç, dipol-dipol dizilimiyle elde edilmiştir (Şekil 4d,e). Havuzu çevreleyen ortamın özdirenç dağılımını dipol-dipol ve pol-pol dizilimlerinin oldukça iyi bir biçimde tanımladığı şekillerde açıkça görülmektedir (Şekil 4c,d,e). Sızıntı sonrası ortamdaki özdirenç değeri-



Şekil 4. Çevresel model-1'in farklı elektrot dizilimleri için bloklu algoritma ile ters-çözümü sonucunda elde edilen özdirenç kesitleri: (a) Wenner, (b) Schlumberger, (c) pol-pol, (d) dipol-dipol, (e) yapay model.

Figure 4. Inverted resistivity sections for the environmental model-1 obtained by robust inversion for various electrode configurations: (a) Wenner, (b) Schlumberger, (c) pole-pole, (d) dipole-dipole, (e) synthetic model.

şimini saptamak amacıyla yapılan çalışmada da tüm dizilimler hem sızıntı, hem de ortama sızan akışkanın etkisi üzerinde tanımlayıcı sonuçlar vermiştir (bkz. Şekil 5). Schlumberger ve Wenner dizilimlerinin ortamdaki özdirenç dağılımının belirlenmesinde yeterince başarılı olmadıkları Şekil 5a ve b'de açıkça görülmektedir. Pol-pol dizilimi ortamdaki özdirenç değişimlerini tanımlamada bu iki dizilimden daha başarılı sonuç vermiştir (Şekil 5c). Model ve elde edilen özdirenç kesitleri karşılaştırıldığında; en başarılı dizilimin dipol-dipol olduğu görülmektedir (Şekil



Şekil 5. Çevresel model-2'in farklı elektrot dizilimleri için bloklu algoritma ile ters-çözümü sonucunda elde edilen özdirenç kesitleri: (a) Wenner, (b) Schlumberger, (c) pol-pol, (d) dipol-dipol, (e) yapay model.

Figure 5. Inverted resistivity sections for the environmental model-2 obtained by robust inversion for various electrode configurations: (a) Wenner, (b) Schlumberger, (c) pole-pole, (d) dipole-dipole, (e) synthetic model.

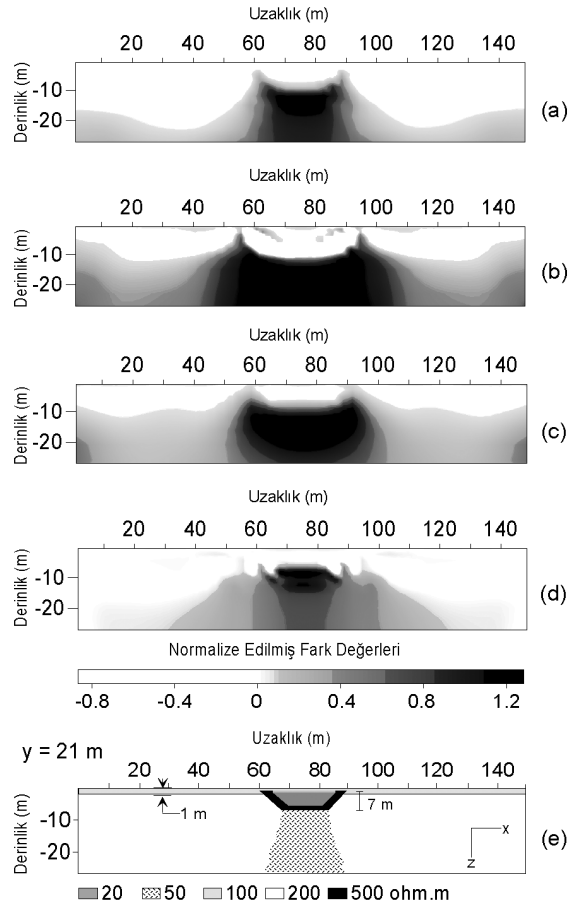
5d). Schlumberger dizilimi model geometrilerinin belirlenmesinde diğer dizilimler içinde en başarısız sonucu veren dizilimdir (Şekil 5b).

Bu tür izleme çalışmalarında; ortam içerisindeki değişimleri daha net olarak elde etmenin bir diğer yolu da, farklı zamanlarda toplanmış verilerden ters-çözüm ile elde edilen özdirenç dağılımları arasındaki farkı görmektir. Bu amaçla; her bir dizilim için sızıntı öncesi ve sonrası elde edilen özdirenç kesitleri arasındaki farklar hesaplanarak, değişimler belirlenmeye ve hangi dizili-

min daha başarılı biçimde değişimi saptadığı ir-delenmeye çalışılmıştır. Normalize edilmiş fark değerleri  $F(i)$ ,

$$F(i) = [M_1(i) - M_2(i)] / M(i) \quad (3)$$

bağıntısından elde edilebilir. Burada;  $M_1(i)$  modeldeki sızıntı öncesi ters-çözümde elde edilen model özdirenç değerlerini,  $M_2(i)$  sızıntı sonrası değerleri ve  $M(i)$  ise yapının gömüldüğü ortamın özdirenç değerini göstermektedir. Sızıntı sonrası modelde, her bir dizilim için hesaplanan normalize farklar Şekil 6'da verilmiştir. Tüm fark kesitlerinde çevre ortama sızan atık açıkça gözlenebilmektedir. Atık öncesi ortamın, özellikle de atık havuzunun, belirlenmesinde Wenner di-



Şekil 6. Çevresel model-1 ve 2'ye ait ters-çözüm-lerden elde edilen fark kesitleri: (a) Wenner, (b) Schlumberger, (c) pole-pole, (d) dipole-dipole, (e) yapay model.

Figure 6. The difference sections obtained from the inversions of the environmental model-1 and 2: (a) Wenner, (b) Schlumberger, (c) pole-pole, (d) dipole-dipole, (e) synthetic model.

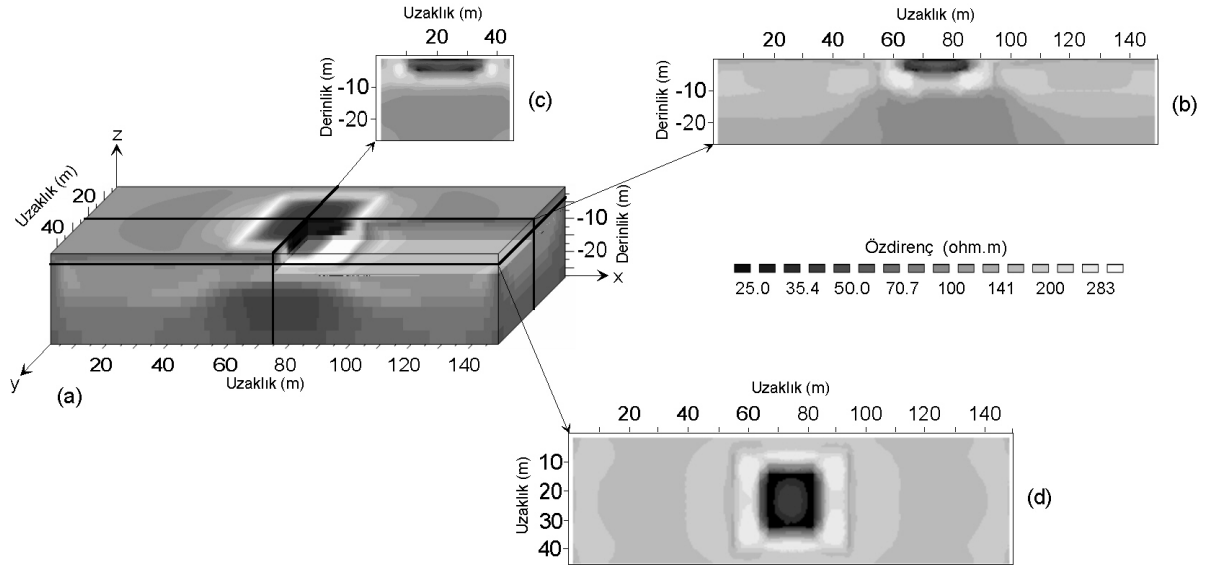
zilimi çok başarılı bir sonuç vermemesine karşın (bkz. Şekil 4a), havuzun sızdırması durumunda dizilim oldukça başarılı bir sonuç vermiştir (bkz. Şekil 5a). Bu iki sonuç arasındaki fark kesitine bakıldığında ise, dizilimin yeterince başarılı olduğu açıkça görülmektedir (Şekil 6a). Özellikle hem havuzun şeklinin hem de atık sınırının açıkça gözlemlendiği ve yapay modele (Şekil 6e) benzer biçimde bir fark kesitinin elde edildiği belirtilebilir. Schlumberger diziliminde, sızıntı öncesi modelde havuzun şekli bir ölçüde de olsa belirgin olmasına karşın, hem havuzun özdirenç değerlerinde hem de ortamın özdirenç değerlerinde önemli farklar gözlenmektedir (bkz. Şekil 4b). Bu modelin sızıntı oluşturması durumunda belirlenebilirlik daha da bozulmuş ve havuz ile sızıntı ortamı arasında özdirenç ve geometri açısından önemli bir belirsizlik ortaya çıkmıştır (bkz. Şekil 5b). Ancak sızıntı öncesi ve sonrası ortamların hesaplanmış özdirençlerinin farkları alındığında, yapı belirlenebilirliğinde önemli bir iyileşme sağlanmıştır. Özellikle hem sızıntının olduğu alanın sınırları, hem de atık havuzunun şekli ve derinliğinin belirlenmesinde başarı elde edilmiştir (Şekil 6b ve 6e). Böylece fark işleminin dizilimden kaynaklanan etkileri önemli ölçüde giderdiği belirtilebilir. Pol-pol, sızıntı öncesi ve sonrası ortamların belirlenmesinde etkili sonuç elde edilen bir dizilim olmuştur (bkz. Şekil 4c ve 5c). Bu dizilimin fark kesitinde de sızdıran havuz yapısının şekli ve sızıntı açık bir biçimde ortaya çıkmıştır (Şekil 6c ve 6e). Sızıntı öncesi ve sonrası ortamları tanımlamada en başarılı dizilim dipol-dipol'dür ve bu dizilimde havuzun biçimi her iki durumda da kolayca görülebilmektedir (bkz. Şekil 4d ve 5d). Ayrıca ortama sızan akışkan etkisi de belirgin olarak ortaya çıkmakta olup, özellikle özdirenç değerleri yapay model değerlerine çok yakındır. Bu dizilimde atık havuz etkisi gözlenmemesine karşın, ortamda değişime neden olan sızıntı etkisi açıkça görülmektedir. Bu etki, fark kesitinde de varlığını sürdürmektedir ve kesit Wenner fark kesiti ile birlikte sızıntı ortamını en iyi yansıtan kesitlerden biridir (bkz. Şekil 6d ve 6e). Yapılan ters-çözüm çalışmalarından da görüldüğü gibi, bu tür bir sorunun çözümünde Schlumberger dışında diğer üç dizilim de başarılı sonuçlar vermiştir. Dizilimlerin çoğu, sorunun farklı boyutlarını tanımlamada etkili olmasına karşın, dipol-dipol dizilimi sorunun genelinde en etkili dizilim olmuştur. Ayrıca, sızıntı öncesi ve sonrası hesaplanmış modellerin farklarının alınması sonucunda hemen hemen

tüm dizilimlerde yapıların ve olguların tanımlanması daha kolaylaşmış, böylece bir anlamda da olsa, bu işlem yoluyla sonuç daha etkili bir biçimde yorumlanabilmiştir. Bu durum, böylesi fark işlemlerinin sızıntı denetimi gibi izleme çalışmalarının yapıldığı araştırmalarda önemli olabileceğini göstermektedir. Sızıntı sonrası ortam değişimlerini daha iyi görebilmek amacıyla oluşturulan bloklu ters-çözüm modelinin üç-boyutlu görüntüsü ve x, y, z'den alınan kesitleri Şekil 7'de verilmektedir. Buradaki görüntü, ortamın belirlenmesinde en iyi yanıtı veren dipol-dipol diziliminden elde edilmiştir. Şekil 7a'dan da görüldüğü gibi, atık havuzu, içindeki atık malzeme ve ortama sızan atık etkisi açık bir biçimde görülmektedir. Ortamın x ve y yönündeki kesitleri, bu kesit doğrultularının orta noktalarından alınmıştır ve atık havuzu ile sızıntı etkisi açık olarak izlenmektedir (Şekil 7b, c). Atık havuzunu daha iyi görebilmek amacıyla derinlik (z) olarak 3.65-5.24 m arasındaki kesit alınmıştır (Şekil 7d). Havuzun bu dizilim yardımıyla açıkça tanımlandığı belirtilebilir. Modelleme çalışmaları, özellikle bu tür ortamlar üzerindeki olguların daha iyi kavranabilmesi için, üç-boyutlu ters-çözüm çalışmalarının son derece önemli olduğunu ortaya çıkarmıştır. Bu nedenle, özellikle izlemeye yönelik çalışmalarda yöntem son derece etkili sonuçlar verebilecek ve böylece yorum önemli oranda gelişecektir.

### Gömülü Bir Paleo-kanal Modeli

Yeraltında hidrojeolojik bir sorun olarak düşünülebilecek bir gömülü paleo-kanal modeli oluşturulmuştur. Model, (250 x 75) m boyutlarındadır ve 10 ile 15 m derinlik arasında kanal biçimli bir geometriye sahiptir (Şekil 8e). Ters-çözüm model çalışmalarında düzgünlük-kısıtlı ve bloklu çözüm algoritmalarının her ikisi de kullanılmıştır. Özellikle gömülü paleo-kanalın bulunduğu yüksek özdirençli ortam nedeniyle katmanlar arasında özdirenç zıtlığının yüksek olması ve ortamlar arasındaki ani özdirenç değişimleri bloklu çözüm algoritmasının daha iyi sonuç vermesine neden olmuştur. Bu algoritma ile yapılan ters-çözüm sonucunda, yüksek özdirençli yatay katman ve paleo-kanalın olduğu bölüm açıkça ortaya çıkmıştır. Wenner, Schlumberger ve dipol-dipol dizilimleri ortamları daha iyi belirlerken, pol-pol diziliminin diğerlerine göre modele daha uzak bir sonuç verdiği görülmektedir (Şekil 8). Kesitler arasında, özdirenç ve model





Şekil 7. Çevresel model-2'nin (a) üç-boyutlu görüntüsü, (b) x (c) y doğrultularından elde edilen model kesitleri ve (d) 3.65-5.24 m arasındaki derinlik kesiti.

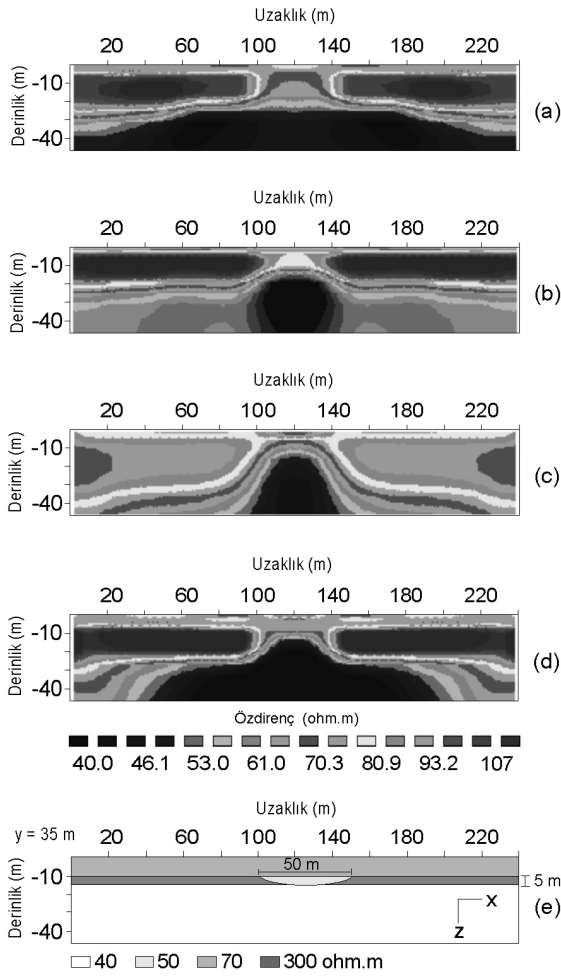
Figure 7. (a) 3-D view of the environmental model-2, (b) and (c) model sections obtained from x and y directions, respectively, and (d) depth slice from 3.65-5.24 m.

geometrisi açısından yapay modele en yakın kesit dipol-dipol diziliminden elde edilmiştir. Genelde her üç dizilim de oldukça iyi modeller üretmişlerdir. Bu modellerde 10 m kalınlığındaki ve 70  $\Omega\text{m}$  özdirenç değerindeki örtü katmanı pol-pol hariç tüm dizilimlerde  $\sim 70 \Omega\text{m}$  olarak elde edilmiştir. Böylece bu üç dizilimin bu katmanı özdirenç açısından oldukça iyi tanımladığı belirtilebilir (Şekil 8a, 8b, 8d ve 8e). Pol-pol'de ise üst katmanın etkisi oldukça zayıf bir biçimde görülmektedir (Şekil 8c ve 8e). Bu duruma katman kalınlığı açısından bakıldığında, gerçek model derinliğini veren tek dizilim dipol-dipol olmuştur (Şekil 8d ve 8e). Yüksek özdirençli yatay katmanın tüm dizilimlerde çok düşük özdirenç değerleri verdiği görülmüştür ( $\sim 100-120 \Omega\text{m}$  arası). Bu katmanın gerçek kalınlığı tüm dizilimlerde yapay modelden daha kısa belirlenmiştir. Asıl arama hedefi olan gömülü paleo-kanalın dizilimlere göre özdirençleri ise; Wenner'de 75-80, Schlumberger'de 60-65, dipol-dipol ve pol-pol'de ise 40-50  $\Omega\text{m}$  arasında değişmektedir. Görüldüğü gibi, dipol-dipol ve pol-pol özdirenç değerleri açısından yapay modeldeki ile aynıdır. Diğer iki dizilimde ise, bu değerler yükseldiği saptanmıştır. Model geometrisi açısından hiçbir dizilim gömülü paleo-kanalın şeklini vermemekle birlikte, özdirençteki azalma uygun yerlerde ortaya çıkmış olup, dipol-dipol ile Schlumberger'de bu katmanın varlığı ve kalınlığı yapay

modeldekine daha yakındır. En alta bulunan ve 40  $\Omega\text{m}$  özdirençli ortam ise, tüm dizilimlerde açıkça görülmektedir. İki katman arasındaki keskin sınır ve katmanın yatay özelliği ise, Schlumberger diziliminde daha iyi görülmektedir. Bu özellik Wenner ve dipol-dipol dizilimlerinde bir ölçüde de olsa gözlenebilmesine karşın, pol-pol diziliminde katmanların yataylığı derine doğru önemli oranda bozulmaktadır. Bunun nedeni, dizilimin etki derinliğinin fazla olmasından kaynaklanmış olabilir ve bu tür sorunlar üzerinde dizilimin çözümde yetersiz kalabileceği düşünülmektedir. Şekil 8b ve 8d'den de görüldüğü gibi, en iyi sonuçlar Schlumberger ve dipol-dipol dizilimlerinde elde edilmiştir. Ancak, aranan hedef yapı ve çevresindeki yapılar düşünüldüğünde, en başarılı dizilimin dipol-dipol olduğu açık biçimde görülmektedir.

### Karstik Boşluk Modelleri

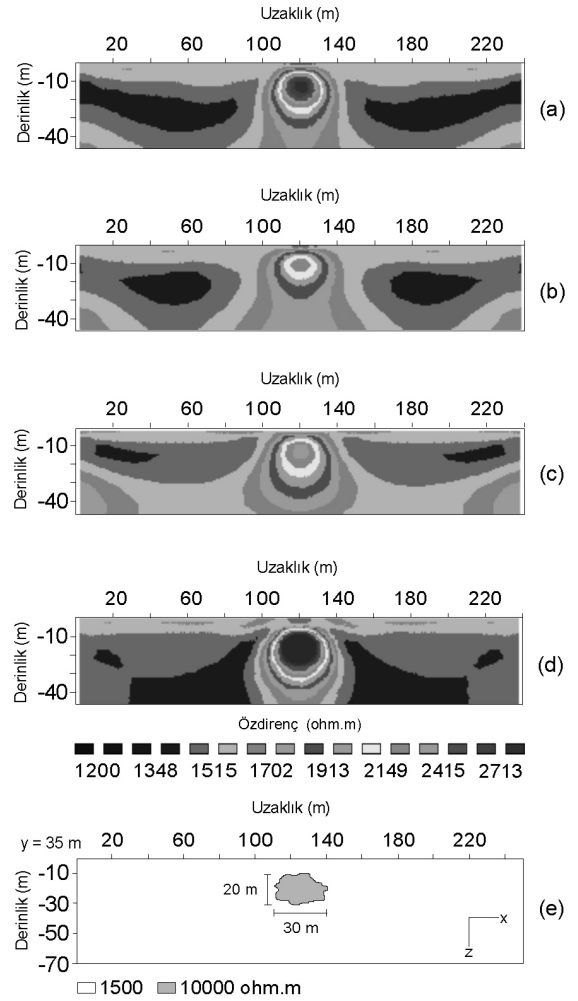
Karstik yapılar sıg jeofizik araştırmaların önemli hedeflerinden biridir. Doğada yaygın olarak gözlenen ve özellikle kentsel alanların bulunduğu yerler ile büyük mühendislik yapılarının inşa edileceği alanlarda bu tür yapıların bulunması, önemli mühendislik sorunlarına neden olabileceğinden, bu tür yerlerin jeofizik açıdan ayrıntılı olarak incelenmesi gerekmektedir. Özdirenç yöntemi bu tür yapıların aranmasında yaygın



Şekil 8. Paleo-kanal modelinin farklı elektrot dizilimleri için bloklu algoritma ile ters-çözümü sonucunda elde edilen özdirenç kesitleri: (a) Wenner, (b) Schlumberger, (c) pol-pol, (d) dipol-dipol, (e) yapay model.

Figure 8. Inverted resistivity sections for the paleo-canal model obtained by robust inversion for various electrode configurations: (a) Wenner, (b) Schlumberger, (c) pole-pole, (d) dipole-dipole (e) synthetic model.

kullanılan yöntemlerden biridir. Bu nedenle, bu tür yapılar üzerinde yapılacak özdirenç çalışmalarında ne tür sonuçların alınabileceğini saptamak amacıyla ters-çözüm model çalışmaları yapılmıştır. Oluşturulan ilk model, (250 x 70) m boyutlarında ve 1500  $\Omega$ m özdirençli bir kireçtaşı, ya da dolomit içerisinde bulunan ve 30 m genişliğinde, yüzeyden 10 m derinde ve özdirenci 10000  $\Omega$ m olan bir boşluğu göstermektedir (karstik model-1) (Şekil 9e). İkinci model ise, ilk modelin yüzeye yakın bölümlerinin çeşitli iklimsel etkiler nedeniyle bozunmuş ve bunun sonu-

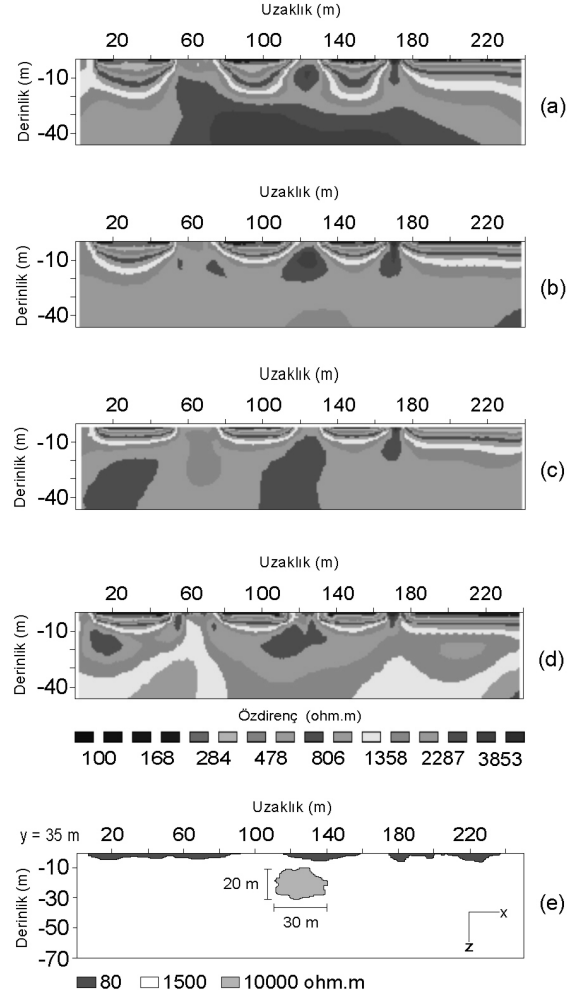


Şekil 9. Karstik boşluk modeli-1'in farklı elektrot dizilimleri için düzgünlük-kısıtlı algoritma ile ters-çözümü sonucunda elde edilen özdirenç kesitleri: (a) Wenner, (b) Schlumberger, (c) pol-pol, (d) dipol-dipol, (e) yapay model.

Figure 9. Inverted resistivity sections for the karstic void model-1 obtained by smoothness-constrained inversion for various electrode configurations: (a) Wenner, (b) Schlumberger, (c) pole-pole, (d) dipole-dipole, (e) synthetic model.

cu oluşan oyuklarında 80  $\Omega$ m özdirençli toprak ile dolduğu düşünülerek oluşturulmuştur (karstik model-2) (Şekil 10e) (Drahor vd., 2004). Bu ortamların hangi dizilim türleri ile daha kolay bulunabileceğini ve yapının derinlik ve özdirenç zıtlıklarına bağlı olarak ne derece başarılı belirlenebildiğini saptamak amacıyla ters-çözüm modelleme çalışmaları yapılmıştır. Modelleme çalışmalarında düzgünlük-kısıtlı yöntemin daha iyi

sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu nedenle, bu yöntemle elde edilen sonuçlar tartışılacaktır. İlk modelde, tekdüze bir ortam içinde gömülü durumda bulunan ve oldukça yüksek özdirençli karstik boşluk modeli irdelenmiştir. Şekil 9'dan da görüldüğü gibi, karstik boşluk tüm dizilimlerde açık bir biçimde belirlenmiştir. Ancak, dizilimlere bağlı olarak karstik boşluğun boyutu ve özdirenç değerlerinde model parametrelerinden sapmalar ortaya çıkmıştır. Schlumberger diziliminde karstik boşluk ve çevreleyen ortam oldukça iyi belirlenmesine karşın, özdirenç değerlerinde derinliğe doğru bir uzanım gözlenmektedir (Şekil 9a). Wenner dizilimi ise, böylesi bir yapının belirlenmesinde en başarısız dizilim olmuştur. Hem derinliğe doğru uzama oldukça fazla, hem de modellerin özdirenç değerleri arasındaki farkın en fazla bu dizilimde olduğu görülmüştür (Şekil 9b). Pol-pol dizilimi, yapay modele Wenner'den daha iyi bir yaklaşım sağlama adına karşın, benzeri nedenlerden yeteri kadar başarılı olduğundan söz edilemez (Şekil 9c). Dipol-dipol diziliminin ise, bu tür ortamların belirlenmesinde en başarılı dizilim olduğu saptanmıştır. Özellikle hem şekil, hem de özdirenç değerleri açısından yapay modele en yakın sonuçlar bu dizilimde elde edilmiştir. Şekil 9'dan da görüldüğü gibi, yapının yerleştiği derinlik ve özdirenç değerleri diğer dizilimlere göre daha doğru bir biçimde elde edilmiştir. Karstik boşluğun yerleştiği yüzeyi bozunmuş ortamın içinde 80  $\Omega$ m değerinde bir toprak dolgusunun olduğu düşünülerek, oluşturulan ikinci modelin bloklu tersçözüm sonucunda elde edilen model kesitleri Şekil 10'da görülmektedir. Burada görüldüğü gibi, yüzeyde bozunmaya uğramış yapının etkisi ile hedef yapının belirlenebilirliği ortadan kalkmaktadır. Bu olay, özdirenç çalışmalarında ne tür olumsuzluklar ve çözüm zorlukları ile karşılaşabileceğinin bir örneğini vermektedir. Değişik dizilimlerle elde edilen özdirenç kesitleri içinde hedef yapıyı bir ölçüde olsa, en iyi gösteren dizilimin Wenner olduğu görülmektedir (Şekil 10b). Oysa bu dizilim, bir önceki modelde en kötü dizilim olarak ortaya çıkmıştır (Şekil 9b). Wenner'den sonra hedef yapıyı belirlemede en iyi yanıt, Schlumberger dizilimi ile elde edilmiştir. Schlumberger aynı zamanda bozunmuş yapı etkisinin derinlik boyutunda en fazla abartıldığı dizilim özelliğini de göstermektedir (Şekil 10a). Pol-pol'de hedef yapının etkisi kesinlikle ortaya çıkmamaktadır. Oysa, yüzeye yakın bozunmuş bölümler geometri ve derinlik açısından

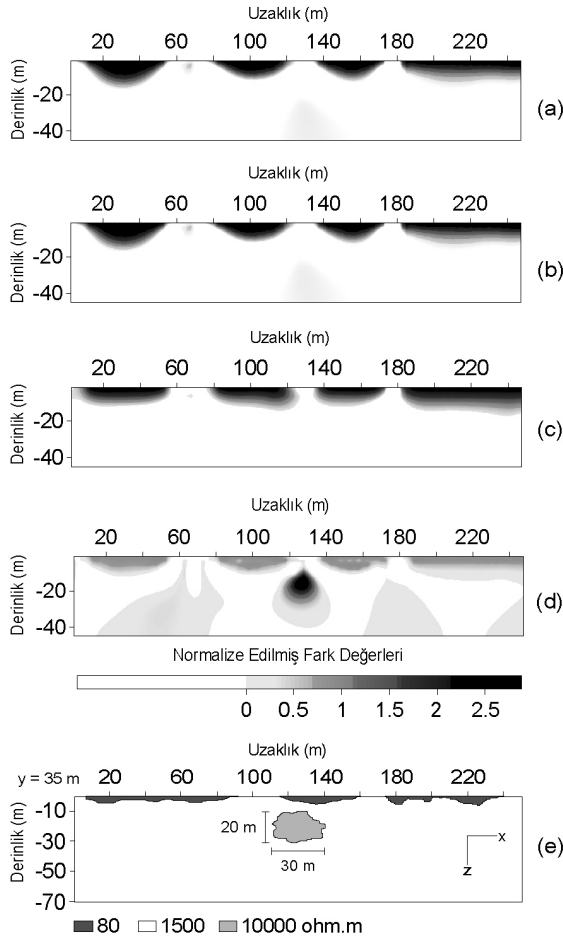


Şekil 10. Karstik boşluk modeli-2'in farklı elektrot dizilimleri için düzgünlük-kısıtlı algoritma ile tersçözümü sonucunda elde edilen özdirenç kesitleri: (a) Wenner, (b) Schlumberger, (c) pole-pole, (d) dipole-dipole, (e) yapay model.

Figure 10. Inverted resistivity sections for the karstic void model-2 obtained by smoothness-constrained inversion for various electrode configurations: (a) Wenner, (b) Schlumberger, (c) pole-pole, (d) dipole-dipole, (e) synthetic model.

diğer iki dizilime göre daha iyi belirlenmiştir (Şekil 10c). Dipol-dipol, bir önceki modelde en başarılı dizilim olarak ortaya çıkmasına karşın, burada hedef yapının şekli ve bu yapı ile onu çevreleyen ortam özdirençinin belirlenmesi açısından en kötü dizilim olduğu düşünülmektedir. Yüzeye yakın bozunmuş yapı açısından bakıldığında ise, en iyi dizilim olarak görülmektedir (Şekil 10d). Çözüm sonuçlarından görüldüğü gibi; yüzeye yakın ortam değişiklikleri, ortam ve

yapı belirlenebilirliğini önemli oranda etkilemektedir. Aynı zamanda, dizilim türlerinin belirleme özellikleri de böylesi bir değişimden çok fazla etkilenmektedir. Yüzeydeki yapı bozunmaları etkisini ve aranan hedef yapıyı daha iyi ortaya çıkarmak için daha önceki çevresel modelde kullanılan fark işlemi bu modeller içinde kullanılmıştır. Bu amaçla, (3) nolu denklemden yararlanılarak, iki farklı karstik boşluk modeli arasındaki normalize fark değerlerinden, fark kesitleri oluşturulmuştur (Şekil 11). Burada veriler, gömülü ortamın öz direncine göre ( $1500 \Omega m$ ) normalize edilmişlerdir. Fark kesitlerinin hepsinde yüzeye yakın olan bozunmuş yapının etkisi ol-



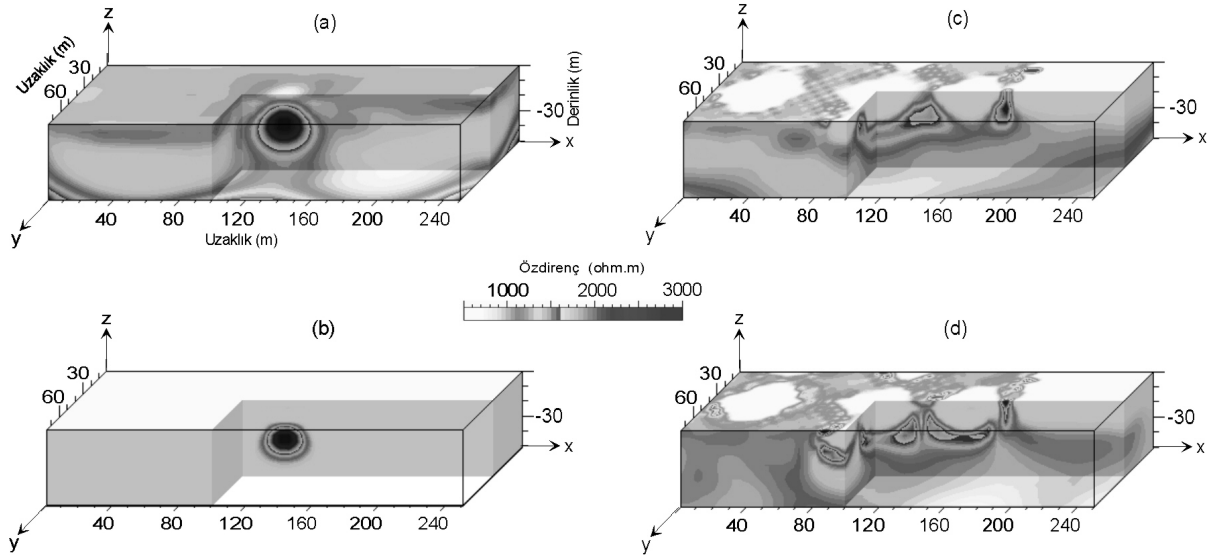
Şekil 11. Karstik boşluk modeli-1 ve 2'ye ait ters-çözümlerden elde edilen fark kesitleri: (a) Wenner, (b) Schlumberger, (c) pole-pole, (d) dipole-dipole, (e) yapay model.

Figure 11. The difference sections obtained from the inversions of the karstic void model-1 and 2: (a) Wenner, (b) Schlumberger, (c) pole-pole, (d) dipole-dipole, (e) synthetic model.

dukça iyi bir biçimde ortaya çıkmıştır (Şekil 11 a, 11 b, 11 c, 11 d). Burada pozitif fark değerleri irdelendiğinde, sadece dipol-dipol diziliminde hedef yapının etkisi belirlenmektedir (Şekil 11 d). Diğer dizilimlerde sadece yüzeye yakın olan bozunmuş değerlerin etkisinin olduğu yerlerde pozitif fark değerleri bulunmaktadır. Böylece, bu tür bir çözüm yardımıyla yüzeye yakın yapı etkisi ve dipol-dipol'de olduğu gibi bazen aranan hedefi belirleme olanağı bulunabilecektir. Elde edilen her iki karstik model için iyi çözüm verdiği düşünülen Wenner ve dipol-dipol dizilimlerine göre elde edilen sonuçlar Şekil 12'de üç-boyutlu olarak verilmiştir. Şekil 12a ve 12b'den de görüldüğü gibi, homojen bir ortam içinde yüksek öz dirençli karstik boşluk modeli her iki dizilimde de açıkça ortaya çıkmaktadır. Boşluk, özellikle dipol-dipol diziliminde daha belirgindir ve yapay model şekline de oldukça uygundur (Şekil 12b). Yüzeyi ayrışmış ve düşük öz dirençli toprak katmanı ile dolmuş karstik boşluk modelinin üç-boyutlu gösteriminde ise, yüzeyde bulunan düşük öz dirençli katman etkisi her iki dizilimde de belirgin olarak ortaya çıkmaktadır. Oysa, bu yüzeyin altında ve derinliği 10 ile 30 m arasında bulunan  $20 \times 30$  m boyutlarındaki karstik boşluk, Wenner diziliminde azda olsa görülebilmese karşın, dipol-dipol diziliminde çok geniş bir alanı kaplayan yüksek öz dirençli bir özellik göstermektedir. Böylece, burada boşluk ile ilgili bir yorumda bulunmak oldukça zordur ve bu problem jeofizik öz direnç araştırmalarında sık karşılaşılabilecek bir durumdur. Özellikle katmanlar, ya da ortamlar arasında gözlenen yüksek zıtlık oranı, bu tür sorunların çözümünde belirlenebilirliği ve yorumlamayı önemli oranda zorlaştırmaktadır.

## SONUÇLAR

Bu çalışma; sığ ölçekli öz direnç çalışmalarında sık karşılaşılan bazı ortam sorunlarının bilgisayar ortamında ters-çözüm benzetim modellerinin oluşturulmasını ve bu sorunların çözümünde ters-çözüm yönteminin yeterlilik düzeyini belirleme amacıyla yapılmıştır. Yapılan çalışmalarla, çevresel ve hidrojeolojik araştırmalarda sık karşılaşılan bazı yeraltı yapılarının öz direnç ters-çözüm yöntemiyle belirlenebilirlikleri araştırılmıştır. Bu aşamada ters-çözüm uygulamalarında yaygın olarak kullanılan düzgünlük-kısıtlı ve bloklu çözüm tekniklerinin model üzerine etkisi ve dizilimlerin yapı belirlemedeki önemi ir-



Şekil 12. Karstik boşluk modeli-1'in (a) Wenner, (b) dipol-dipol, ve karstik boşluk modeli-2'nin (c) Wenner ve (d) dipol-dipol dizilimi için üç-boyutlu görüntüleri.  
 Figure 12. 3-D view of karstic void model-1 for (a) Wenner, (b) dipole-dipole and karstic void model-2 for (c) Wenner, (d) dipole-dipole.

delenmiştir. İki- ve üç-boyutlu ters-çözüm yöntemleriyle yapılan bu çalışmada özdirenç uygulamalarında yaygın olarak kullanılan dört farklı dizilim (Schlumberger, Wenner, pol-pol, dipol-dipol) kullanılmış ve elde edilen yanıtlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Yapılan ters-çözüm modelleme çalışmaları; genelde tekdüze bir ortam içinde gömülü durumdaki yapıların ters-çözüm yöntemiyle kolayca saptanabildiğini, ancak model yapının karmaşılaşması ve özellikle aranan hedef yapının üzerinde aşırı dirençli, ya da iletken başka yapıların bulunması durumunda yapı belirlenebilirliğinin önemli ölçüde etkilendiğini ortaya koymuştur. Bu olgu, ortamlar arasındaki özdirenç zıtlığından kaynaklanmakta olup, yapının saptanmasını önemli oranda etkilemektedir. Ayrıca, yapı derinliğindeki artış da yapı saptanabilirliğini azaltan diğer bir etkidir. Çalışmalar, genelde yuvarlatılmış özelliklerdeki yeraltı sorunlarının düzgünlük-kısıtlı ters-çözüm yöntemi ile daha iyi ortaya çıktığını göstermiştir. Eğer yapı bloklı bir özelliğe sahipse ve ortamlarda çok ani değişimler bulunuyorsa, bu durumda bloklu çözüm yöntemi daha iyi bir yaklaşım sağlamaktadır. Modelleme çalışmaları, kullanılan dizilimin de sonuçları önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Sızıntı denetimi çalışmaları, araştırma hedefi yüzeye yakın ve ortam önemli jeolojik karmaşıklıklar içermiyorsa, sızıntının ters-çö-

züm çalışmalarıyla belirlenebileceğini ortaya çıkarmıştır. Özellikle sızıntı denetimi amaçlı ve belirli periyotlarda yapılacak izleme çalışmalarının sızıntıyı saptamadaki önemi, bu çalışmada açıkça ortaya çıkmıştır. Bu tür çalışmalarda sızıntının daha iyi incelenmesi için, normalize edilmiş ters-çözüm fark kesit ve haritalarının oluşturulması da başarıyı önemli ölçüde arttıracaktır. Genelde uygulanan yöntem birçok yeraltı yapısının belirlenmesinde etkili sonuçlar verirken, üzerinde düşük özdirençli katman içeren karstik boşluk modeli gibi bazı özel yeraltı durumları için, yöntemin yapıyı saptaması oldukça zor, hatta bazı durumlarda olanaksız olabilmektedir. Bu nedenle, önceden uygulanacak yapay model çalışmaları yardımıyla kullanılacak dizilim türüne araştırma öncesi karar vermek büyük önem taşır. Ayrıca, ortamın jeolojik ve diğer fiziksel özelliklerinin iyi bilinmesi de yorumlamayı önemli ölçüde güçlendirecektir. Eğer, çalışma koşulları ve zaman uygun ise, üç-boyutlu çalışma yapmak yapı uzanımlarının daha iyi belirlenmesi ve yorumlanması açısından önem taşıyacaktır. Böylece, yapılacak üç-boyutlu özdirenç ters-çözüm çalışmalarıyla; çevre sorunları, mühendislik, hidrojeoloji ve arkeoloji gibi sığ ölçekli sorunların çözümünde yorumlamaya önemli katkılar sağlanabilir.

## KATKI BELİRTME

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

## KAYNAKLAR

- Başokur, A.T., 2003. Doğrusal ve doğrusal olmayan problemlerin ters-çözümü. TMMOB Jeofizik Mühendisleri Odası Eğitim Yayınları, No. 4, 166 s.
- 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.
- Claerbout, J.F., and Muir, F., 1973. Robust modeling with erratic data. *Geophysics*, 38, 826-844.
- Constable, S.C., Parker, R.L., and Constable, C.G., 1987. Occam's inversion: a practical algorithm for generating smooth models from EM sounding data, *Geophysics*, 52, 289-300.
- 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.
- deGroot-Hedlin, C., and Constable, S., 1990. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, 55, 1613-1624.
- Drahor, M.G., Göktürkler, G., Berge, M.A. ve Kurtuluş, Ö.T., 2004. Dört farklı elektrot dizilimine göre bazı üç-boyutlu sığ yeraltı yapılarının görünür öz direnç modellemesi. *Yerbilimleri*, 30, 115-128.
- Ellis, R.G., and Oldenburg, D.W., 1994a. Applied geophysical inversion. *Geophysical Journal International*, 116, 5-11.
- Ellis, R.G., and Oldenburg D.W., 1994b. The pole-pole 3-D DC-resistivity inverse problem: a conjugate-gradient approach. *Geophysical Journal International*, 119, 187-194.
- Inman, J.R., 1975. Resistivity inversion with ridge regression. *Geophysics*, 40, 798-817.
- Inman, J.R., Ryu, J., and Ward, S.H., 1973. Resistivity inversion. *Geophysics*, 38, 1088-1108.
- Levenberg, K., 1944. A method for the solution of certain nonlinear problems in least squares. *Quarterly of Applied Mathematics*, 2, 164-168.
- Loke, M.H., 2001. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. Penang, Malaysia, Universiti Sains Malaysia, unpublished course notes, 121pp, [www.geoelectrical.com](http://www.geoelectrical.com).
- Loke M. H., and Barker, R. D., 1995. Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. *Geophysics*, 60, 1682-1690.
- Loke M.H., and 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., and Barker, R. D., 1996b. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion techniques. *Geophysical Prospecting*, 44, 499-524.
- Loke M.H., Acworth I., and Dahlin T., 2003. A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2-D electrical imaging surveys. *Exploration Geophysics*, 34, 182-187.
- Marquardt, D.W., 1963. An algorithm for least squares estimation of non-linear parameters. *Journal of the society of Industrial and Applied Mathematics*, 11, 431-441.
- Olayinka, A.I., and Yaramanci, U., 1999. Choice of the best model in 2-D geoelectrical imaging: case study from a waste dump site. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 3, 221-244.
- Olayinka, A.I., and Yaramanci, U., 2000. Use of block inversion in the 2-D interpretation of apparent resistivity data and its comparison with smooth inversion: *Journal of Applied Geophysics*, 45, 63-82.
- RES2DINV software, ver. 3.4, 2001. Geotomo software, <http://www.geoelectrical.com>.
- RES3DINV software, ver. 2.1, 2001. Geotomo software, <http://www.geoelectrical.com>.
- 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.
- Smith, N.C., and Vozoff, K., 1984. Two-dimensional DC resistivity inversion for dipole-dipole data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 22, 21-28.
- Tripp, A.C., Hohmann, G.W., and Swift Jr, C.M., 1984. Two-dimensional resistivity inversion. *Geophysics*, 49, 1708-1717.
- Wolke R., and Schwetlick H., 1988. Iteratively reweighted least squares algorithms, convergence analysis, and numerical comparisons. *SIAM Journal of Scientific and Statistical Computations*, 9, 907-921.