



Siğ yeraltı yapılarının özdirenç ters-çözümünde güvenilirliğin irdelenmesi

Assessment of the reliability of resistivity inversion of shallow subsurface structures

**Mahmut G. DRAHOR^{1,2}, Meriç A. BERGE², Gökhan GÖKTÜRKLER²,
T. Özgür KURTULMUŞ¹**

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi, Siğ Jeofizik ve Arkeolojik Prospeksiyon Araştırma ve Uygulama Merkezi (SAMER), Tınaztepe Yerleşkesi, 35160 Buca, İZMİR

² Dokuz Eylül Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Tınaztepe Yerleşkesi, 35160 Buca, İZMİR

Geliş (*received*) : 19 Eylül (*September*) 2005

Kabul (*accepted*) : 09 Aralık (*December*) 2005

ÖZ

Bu çalışmada, siğ yeraltı yapılarının incelenmesinde yaygın olarak kullanılan elektrik özdirenç verilerinin ters-çözümünün güvenilirliği modelleme çalışmalarıyla irdelenmiştir. Çalışmada kullanılan modeller, gömülü bir blok ile dirençli ve iletken karstik boşluk modellerinden oluşmaktadır. Özdirenç yönteminde yaygın olarak kullanılan Schlumberger, Wenner, pol-pol ve dipol-dipol dizilimleri ile görünür özdirenç verisi üretilmiş ve çözümler düzgünlük-kısıtlı ters-çözüm algoritması ile elde edilmiştir. Karstik boşluk modelleri kullanılarak elde edilen verilere %5 Gaussian gürültü eklenmiştir. Çözümlerin güvenilirliği veri ve model çakışmazlık yaklaşımıyla irdelenmiştir. Özdirenç zıtlığı, gürültü düzeyi, dizilim türü ve yüzeye yakın tabakaların varlığının çözümlerin güvenilirliğini etkilediği gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Modelleme, özdirenç, siğ jeofizik, ters-çözüm, çakışmazlık.

ABSTRACT

In this study, the reliability of the resistivity inversion widely used for the investigation of shallow subsurface structures was analysed using modelling techniques. The models used in the study were composed of a buried block and a karstic model with resistive and conductive void. The Schlumberger, Wenner, pole-pole and dipole-dipole electrode configurations widely used in the resistivity method were employed to generate apparent resistivity data and the solutions were obtained by the smoothness-constrained inversion algorithm. 5% Gaussian noise was added to the data from the karstic models. The reliability of the solutions was studied by data and model misfit approaches. It was concluded that the resistivity contrast, level of noise, type of electrode configurations and presence of a layer closed the surface affected the reliability.

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

GİRİŞ

Elektrik özdirenç yöntemindeki ters-çözüm uygulamalarının özdirenç zıtlığı, yapı boyutları, dizilim türü, sönüm faktörü ve kullanılan farklı algoritmalar gibi etkenlere bağlı olarak başarısının sınanması üzerine çeşitli çalışmalar bulunmaktadır (Sasaki, 1992; Olayinka ve Yaramancı, 2000a, 2000b; Candansayar ve Başokur, 2001; Loke vd., 2003; Dahlin ve Zhou, 2004). Bu çalışmalar arasında çakışmazlık (misfit) çözümlenmeleri, ters-çözüm modellemesinin başarısının irdelenmesi açısından önem taşımaktadır. Bu çözümlenme, seçilen bir yeraltı modeli için düz-çözüm modellemesi kullanılarak yapay görünür özdirenç verisi üretmeyle başlar. Bu veri, ters-çözüm işleminde girdi olarak kullanılır ve hesaplanmış model elde edilir. Bu model, seçilen model ile karşılaştırılarak, yöntemin problem çözmedeki başarısı belirlenmeye çalışılır. Bu çözümlenme sırasında iki ayrı sınamaya kullanılır. Bunlardan biri, yapay görünür özdirenç ile hesaplanan görünür özdirenç arasındaki farkı tanımlayan veri rms (root mean squares) çakışmazlık değeridir ve bunun en aza indirgenmesi gerekir. İkincisi ise, ters-çözüm sonucunda elde edilen hesaplanmış özdirenç modeli ile seçilen modelin karşılaştırıldığı model rms çakışmazlık değeridir. Modelleme çalışmalarında veri rms çakışmazlık değerinde yinelemelere bağlı olarak ortaya çıkan azalma, doğru yeraltı modeline yaklaşıldığı anlamına gelmemektedir. Bazı çalışmalar ortam özelliklerine bağlı olarak çözümlenmenin ıraksayabildiğini göstermiştir (Olayinka ve Yaramancı, 2000a ve 2002). Ancak veri rms değerlerindeki azalma ile birlikte model rms değerlerinin de azalması özgün modele yaklaşıldığını gösterebilir. Özellikle ortamlar arasındaki yüksek özdirenç zıtlığı, yapının geometrik özellikleri, yüzeyde bir örtü tabakasının bulunması, ya da altta jeolojik bir temelin olması ve dizilim türü gibi etkenler nedeniyle; veri rms değerlerinin düşmesine karşın, model rms değerleri ıraksayabilir. Bu olgu, Olayinka ve Yaramancı (2000a ve 2000b) tarafından graben, horst ve fay türü yapılar için farklı etkenler göz önünde bulundurulmuş olarak incelenmiştir. Bu araştırmacılar, özellikle özdirenç zıtlığı ve yapı boyutlarının çözümler üzerinde etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Yukarıda değinilen olguların sığ yapılar üzerindeki etkilerinin çakışmazlık yaklaşımı açısından incelenmesinin amaçlandığı bu çalışmada, ön-

celikle blok modeli üzerinde benzetim çalışmaları yapılmıştır. Daha sonra sığ ortamlarda sık karşılaşılan sorunların benzetiminden (Drahor vd., 2004 ve 2005) yararlanılarak, veri ve model çakışmazlık çözümlenmeleri yapılmış ve sığ amaçlılıkla ilgili bazı sorunlar elektriksel ters-çözüm bağlamında irdelenmiştir. Bu amaçla, Loke ve Barker (1996) tarafından oluşturulan ve Loke (2001) tarafından geliştirilen RES2DINV ters-çözüm yazılımı (Geotomo Software, 2001) kullanılmıştır. Wenner, Schlumberger, pol-pol ve dipol-dipol dizimleri kullanılarak, düzgünlük-kısıtlı (smoothness-constrained) ters-çözüm algoritmasının model yapıyı tanımlamadaki başarısı irdelenmiştir. Elde edilen bulgular, model çakışmazlık değerlerinde önemli ıraksamaların görüldüğü karstik boşluk modelleri (Drahor vd., 2004 ve 2005) kullanılarak ayrıntılarıyla verilmeye çalışılmıştır. Böylece sığ jeofizik araştırmalarda önem taşıyan karstik yeraltı yapılarının belirlenmesinde elektrik özdirenç ters-çözüm yönteminin başarısı irdelenmeye çalışılmıştır.

BLOK MODEL

Elektrik özdirenç verisinin iki-boyutlu ters-çözümünde her bir yinelemeye hesaplanan görünür özdirenç değerlerinin gözlenen görünür özdirenç değerlerine yakınsaması, özgün modele yakınsadığı anlamına gelmez. Bu nedenle, veri ve model çakışmazlıklarının birlikte incelenmesi, elde edilen çözümün güvenilirliği hakkında fikir verebilir. Ancak, model çakışmazlık çözümlenmeleri yapay modeller üzerinde anlamlı olduğundan, alan çalışmalarında doğru modelin bulunması yorumcuya kalmaktadır. Bu nedenle, yorumlamayı güçlendirebilmek amacıyla; çözümlenmek istenilen sorunu temsil eden model çalışmalarında model çakışmazlığı hakkında bilgi edinilerek, yöntemin başarısı irdelenebilir.

Yukarıda da belirtildiği gibi ters-çözümde gözlenen ve hesaplanan veriler arasındaki fark en aza indirilmeye çalışılır ve yinelemelerin devam ettirilmesi, ya da durdurulması bu ölçüde bağlıdır. Bu fark, genellikle % veri rms çakışmazlığı (D_{rms}) olarak tanımlanır (Eşitlik 1) ve bir bütün olarak verideki çakışmazlığı ifade eden bir değerdir. Eşitlik (2) yardımıyla da her bir görünür özdirenç değeri için % veri rms çakışmazlığı (D_i) hesaplanabilir.

$$D_{rms} = \left[\frac{1}{N} \sum D_i^2 \right]^{0.5} \quad (1)$$

$$D_i = \left[\left(\rho_{a\text{ göz}}(j) - \rho_{a\text{ hes}}(j) \right) / \rho_{a\text{ göz}}(j) \right] 100\% \quad (2)$$

Burada; $\rho_{a\text{ göz}}$ gözlenen görünür özdirenci ve $\rho_{a\text{ hes}}$ ise hesaplanan görünür özdirenci ifade etmektedir.

Benzer şekilde, seçilen model ile ters-çözüm işlemi sonucu elde edilen model arasındaki çakışmazlık eşitlik (3) ve (4) yardımıyla hesaplanabilir ve böylece bir bütün olarak model çakışmazlığını ifade eden (M_{rms}) ve modeli oluşturan her bir elemana ait % model rms çakışmazlığı (M_i) belirlenebilir,

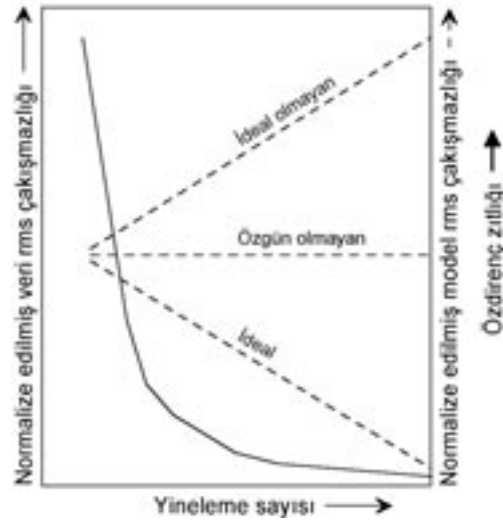
$$M_{rms} = \left[1/N \sum M_i^2 \right]^{0.5} \quad (3)$$

$$M_i = \left[\left(\rho_{\text{dogru}}(i) - \rho_{\text{hes}}(i) \right) / \rho_{\text{dogru}}(i) \right] 100\% \quad (4)$$

Burada; ρ_{dogru} seçilen modeldeki özdirenç değerleri ve ρ_{hes} ise ters-çözüm ile hesaplanan model özdirenç değerlerini göstermektedir (Olayinka ve Yaramancı, 2000a).

Veri rms çakışmazlığı (D_{rms}) genellikle gürültü düzeyini temsil eden değere asimptot olacak şekilde bir azalış göstermesine rağmen, model rms çakışmazlığı üç farklı davranış gösterebilir (Şekil 1). Birinci durumda kuramsal olarak veri çakışmazlığındaki azalmaya karşılık, model çakışmazlığında da azalma beklenir (ideal davranış). Bu tip bir davranış, araştırmacıyı ilerleyen yinelemelerde özgün modele götürebilir ve genellikle ortamda düşük özdirenç zıtlığı söz konusu ise gerçekleşebilir. İkinci durum, model çakışmazlık değerinin yinelemeler boyunca değişmeden kalmasıdır (özgün olmayan davranış). Her çözümün diğerleri kadar geçerli olmasından dolayı, doğru çözüme ulaşılması söz konusu değildir. Son durum veri çakışmazlığındaki azalmaya karşın model çakışmazlığındaki artış (ideal olmayan davranış) olup, diğer bir ifadeyle her yineleme sonucunda doğru çözümden uzaklaşılmasıdır. Bu olgu, genellikle yüksek özdirenç zıtlıklarının bulunduğu durumlarda ortaya çıkmaktadır (Olayinka ve Yaramancı, 2000a).

Şekil 2, 100 Ωm 'lik özdirenç değerindeki ortam içine 0.5 m derinlikte gömülü 500 Ωm 'lik 2.5x2.5 m boyutlarındaki bir blok modelinin iki-boyutlu elektrik özdirenç ters-çözümü ile D_i ve M_i değerlerinden oluşan çakışmazlık kesitlerini göster-

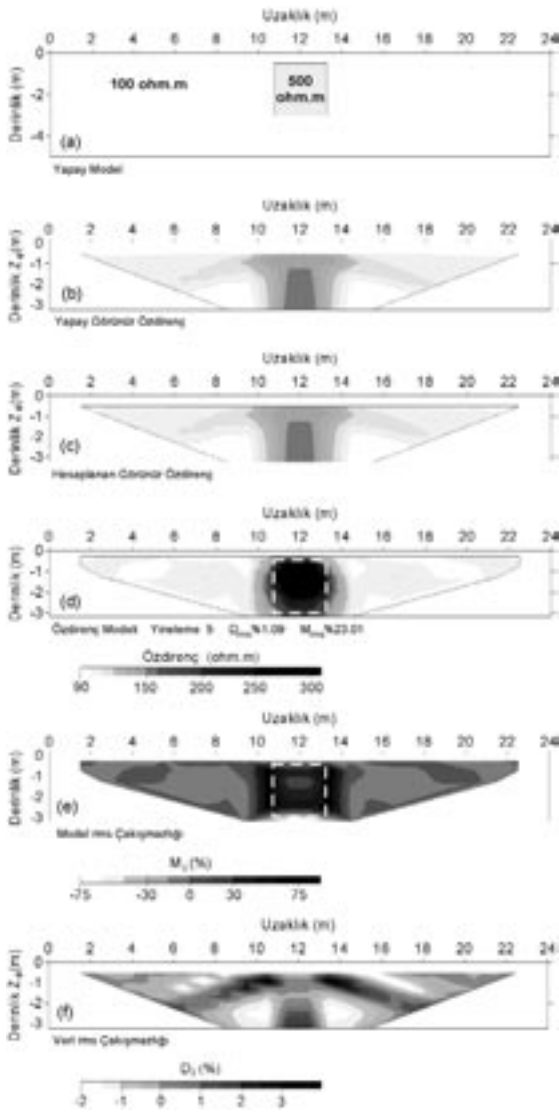


Şekil 1. İlk değerlerine göre normalize edilmiş veri ve model rms hatalarının değişimi (Olayinka ve Yaramancı, 2000a).

Figure 1. Variation in the data and model rms misfits normalized by their first values (Olayinka and Yaramancı, 2000a).

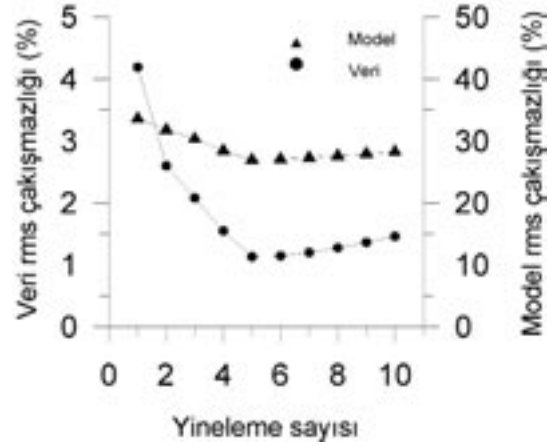
mektedir. Schlumberger dizilimine göre elde edilen yapay görünür özdirenç verisinin ters-çözümünde, sönüm faktörü $\lambda = 0.5$ olarak seçilmiştir. Bloğun gömülü olduğu ortamın özdirenç 100 Ωm iken, ters-çözüm sonucu elde edilen değer 90-110 Ωm (ortalama $105 \pm 14 \Omega\text{m}$) arasında değişmektedir. Aynı şekilde, bloğun özdirenç değeri de 180-380 Ωm (ortalama $231 \pm 90 \Omega\text{m}$) arasında elde edilmektedir. Özgün model ile ters-çözüm sonucu elde edilen model karşılaştırıldığında, düzgünlük-kısıtlı ters-çözümün bloğun kenarlarında yuvarlatma yaptığı ve hesaplanan özdirenç değerlerinin de doğru değerlerden düşük kaldığı gözlenmektedir (Şekil 2d). Model rms çakışmazlık kesiti incelendiğinde, düşük değerlerin toplandığı blok modelin alt kısmının, doğru özdirençten en çok iraksayan bölgeyi temsil ettiği görülmektedir (Şekil 2e). M_i değerlerinden oluşan kesitte blok modelin sınırları yaklaşık olarak gözlenmektedir. Diğer yandan düşük veri rms hatalarının elde edildiği Şekil 2f'deki kesitte ise, kesin bir model geometrisine yaklaşım gözlenmemektedir.

Şekil 3'de ise, on yineleme için veri ve model rms çakışmazlık değişimlerini gösteren grafik verilmiştir. Her iki eğride de beşinci yinelemeye kadar gözlenen düşüş ile başarılı yinelemelerin sürdürüldüğü ve ideal durumun ortaya çıktığı,



Şekil 2. Blok model üzerinde iki-boyutlu ters-çözüm sonucu: (a) model, (b) yapay gözlenen görünür öz direnç verisi, (c) hesaplanan görünür öz direnç verisi, (d) beşinci yineleme için ters-çözüm sonucu, (e) (a) ve (d)'deki sonuçlar kullanılarak elde edilen model hata kesiti, (f) (b) ve (c) 'deki sonuçlar kullanılarak elde edilen veri hata kesiti (Beyaz kesikli çizgi blok modeli göstermektedir).

Figure 2. Result of 2-D inversion of the block model: (a) model, (b) synthetic observed apparent resistivity data, (c) calculated apparent resistivity data, (d) inversion result at iteration 5, (e) model misfit section obtained from (a) and (d), (f) data misfit section obtained from (b) and (c) (White dashed line indicates the block model).

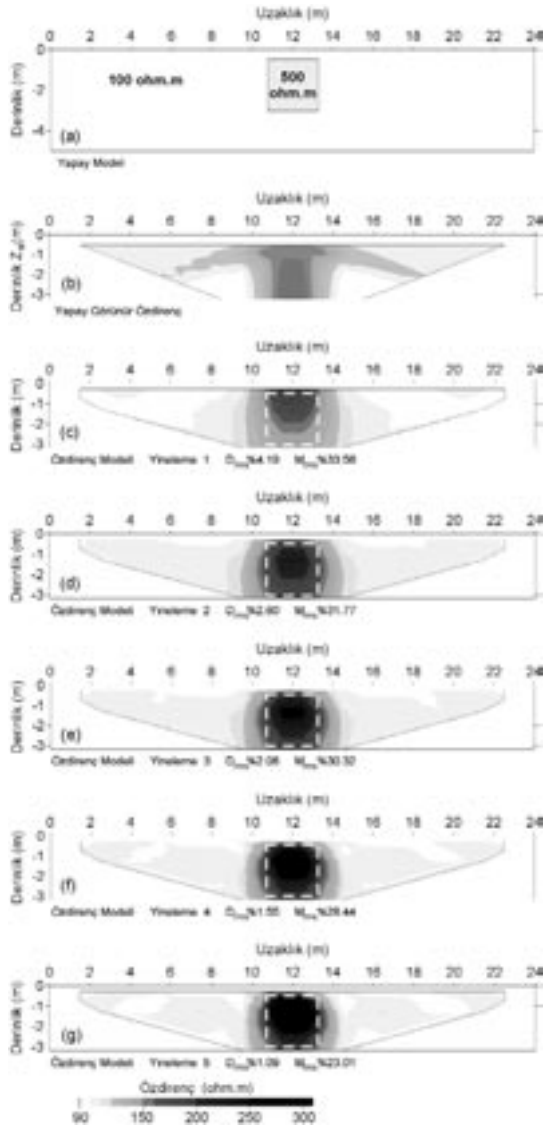


Şekil 3. Blok modelin ters çözümünde, veri ve model rms hatanın yinelemelere göre değişimi.

Figure 3. Variation in data and model rms misfit with respect to the iteration number in the inversion of the block model.

bu yinelemeden sonra ise çakışmazlıkların yükselme eğilimine girdiği ve çözümün de ıraksamaya başladığı söylenebilir. Bu durumda bu tip bir blok modeli için yapılacak ters-çözüm çalışmasında doğru çözüme beşinci yinelemede ulaşıldığı söylenebilir. Aynı modelin ilk beş yinelemede elde edilen ters-çözüm model kesitleri, D_{rms} ve M_{rms} değerleri ile birlikte Şekil 4'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde; ilk beş yineleme için modelin yeri, geometrisi ve doğru öz direnç değerlerine yaklaşıldığı ve bu sırada çakışmazlık değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu olguyu daha iyi vurgulayabilmek için 1.275 m derinlik düzeyindeki ilk beş yinelemeye ait model öz direnç değerleri Şekil 5'de verilmiştir. Bu şekil, bloğa ait 500 Ωm öz direnç değerine en iyi yaklaşımın beşinci yineleme sonunda yaklaşık 400 Ωm olarak hesaplanan öz direnç değeri ile elde edildiği ve doğru sonuca en uygun yaklaşımın bu yineleme değerinde bulunduğunu göstermektedir. Yukarıda değinilen blok modeli Wenner, dipol-dipol ve pol-pol dizilimleriyle de çalışılarak irdelenmiştir. Konu ile ilgili ayrıntılar, Berge (2005) tarafından verilmiştir.

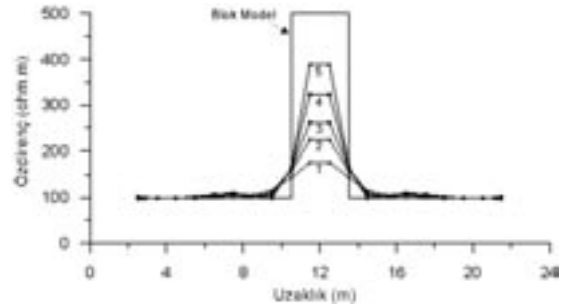
Blok modeli kapsamında ortaya çıkan olgular daha karmaşık (gerçekçi) problemlerin benzer yaklaşımla incelenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu amaçla; Drahor vd. (2004 ve



Şekil 4. Blok model üzerinde iki-boyutlu ters-çözüm sonucu: (a) model, (b) yapay görünümlü öz direnç verisi, (c), (d), (e), (f) ve (g) sırasıyla ilk beş yineleme için ters-çözüm sonuçları (Beyaz kesikli çizgi blok modeli göstermektedir).

Figure 4. Result of 2-D inversion of the block model: (a) model, (b) synthetic observed apparent resistivity data, (c), (d), (e), (f) and (g) inversion results for five successive iterations, respectively (White dashed line indicates the block model).

2005) tarafından ayrıntılı olarak incelenen modeller üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Özellikle yüksek öz direnç zıtlıklarının bulunduğu ortamlarda, önemli oranda iraksamaların olduğu göz-

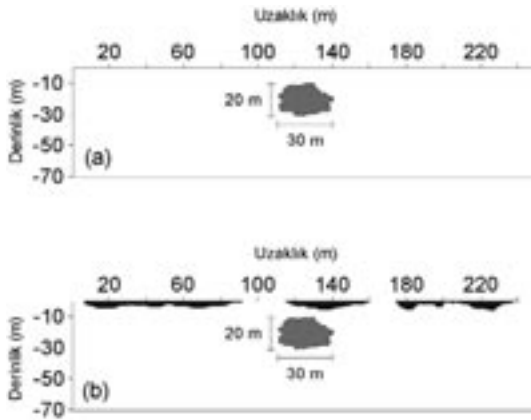


Şekil 5. Blok modelde 1.275 m derinlikte ilk beş yineleme için elde edilen öz direnç profilleri.
Figure 5. Resistivity profiles at the depth of 1.275 m for five successive iterations in the block model.

lenmiştir. Bu durum, bu çalışma kapsamında sığ amaçlı öz direnç aramalarında sıklıkla karşılaşılan karstik boşluk problemi temel alınarak tartışılmıştır.

KARSTİK BOŞLUK MODELLERİ

Drahor vd. (2004) tarafından verilen iki ayrı karstik model yukarıda açıklanan çakışmazlık analizi kapsamında incelenmiştir. Çözümlemeler, hedef karstik yapının iletken ve dirençli olduğu iki farklı durum için yapılmıştır. Şekil 6, bu amaçla kullanılan modelleri göstermektedir. Karstik yapı 250 m'lik profilin ortasına, 30 m genişliğinde 20 m boyunda ve yüzeyden 10 m derinde olacak şekilde yerleştirilmiştir. Oluşturulan karstik-1 modelinde (Şekil 6a) karst boşluğu ve çevre ortamın öz direnç değerleri sırasıyla dirençli durum için 30000 ve 1000 Ωm , iletken durum için ise 20 ve 2000 Ωm olarak seçilmiştir. Bu modelin yüzeye yakın bölümlerinin çeşitli iklimsel etkiler nedeniyle bozunmuş ve bunun sonucu oluşan oyukların da 80 Ωm 'lik öz direnç değerine sahip toprak ile dolduğu düşünülerek karstik-2 modeli oluşturulmuştur (Şekil 6b). Schlumberger, Wenner, pol-pol ve dipol-dipol dizilimleri kullanılarak yapılan benzetimler sırasında, verilere %5 Gaussian gürültü eklenmiş ve çözümler düzgünlük-kısıtlı ters-çözüm algoritması kullanılarak elde edilmiştir. Ayrıca blok tipi yapıyı belirleme amaçlı yapılan yapay modelleme çalışmaları sırasında yüksek gürültü düzeyleri için büyük sönüm faktörleri kullanmanın çözümde yarar sağlayacağı ortaya çıkmıştır. Ancak buradaki verilerin düşük gürültü düzeyleri içermesi nedeniyle, sönüm faktörü bu



Şekil 6. Karstik boşluk analizinde kullanılan (a) karstik-1 ve (b) karstik-2 modelleri.

Figure 6. (a) Karstic-1 and (b) karstic-2 models used in the analysis of the karstic void.

modeller için yapılan çalışmalarda 0.15 olarak seçilmiştir.

Karstik-1 Modeli

İletken ve dirençli bir karst boşluğunu tanımlamak için oluşturulan karstik-1 modelinden Schlumberger dizilimi için elde edilen sonuçlar Şekil 7'de verilmiştir. Her iki modelin görünür öz direnç kesitlerinde görülen gürültü etkisi, çözümde önemli bir sorun oluşturmamıştır. Ters-çözüm sonuçları incelendiğinde, hem dirençli hem de iletken modeller için yapı belirlenebilirliğinin yüksek olduğu gözlenmektedir (Şekil 7a ve 7b). Veri rms çakışmazlık değerleri her iki model için verilerdeki gürültü düzeyi olan % 5'e doğru bir azalma göstermesine karşın, model rms değerleri dirençli modelde üçüncü yinelemeye kadar düşmekte ve daha sonra hızla yükselerek, ideal olmayan durumda bir model çakışmazlık eğrisi göstermektedir (Şekil 7c). İletken modelde ise, model rms çakışmazlık değerleri tüm yinelemelerde düşme göstermekte ve böylece ideal bir davranış göstererek, özgün modele yaklaşıldığı ve yineleme sayısındaki artışla çözümün önemli oranda değişmeyeceği görülmektedir (Şekil 7d).

Modelin Wenner dizilimine göre dirençli ve iletken yeraltı koşulları için elde edilen ters-çözüm sonuçları Şekil 8a ve 8b'de verilmiştir. Her iki model için verilen görünür öz direnç kesitlerinde

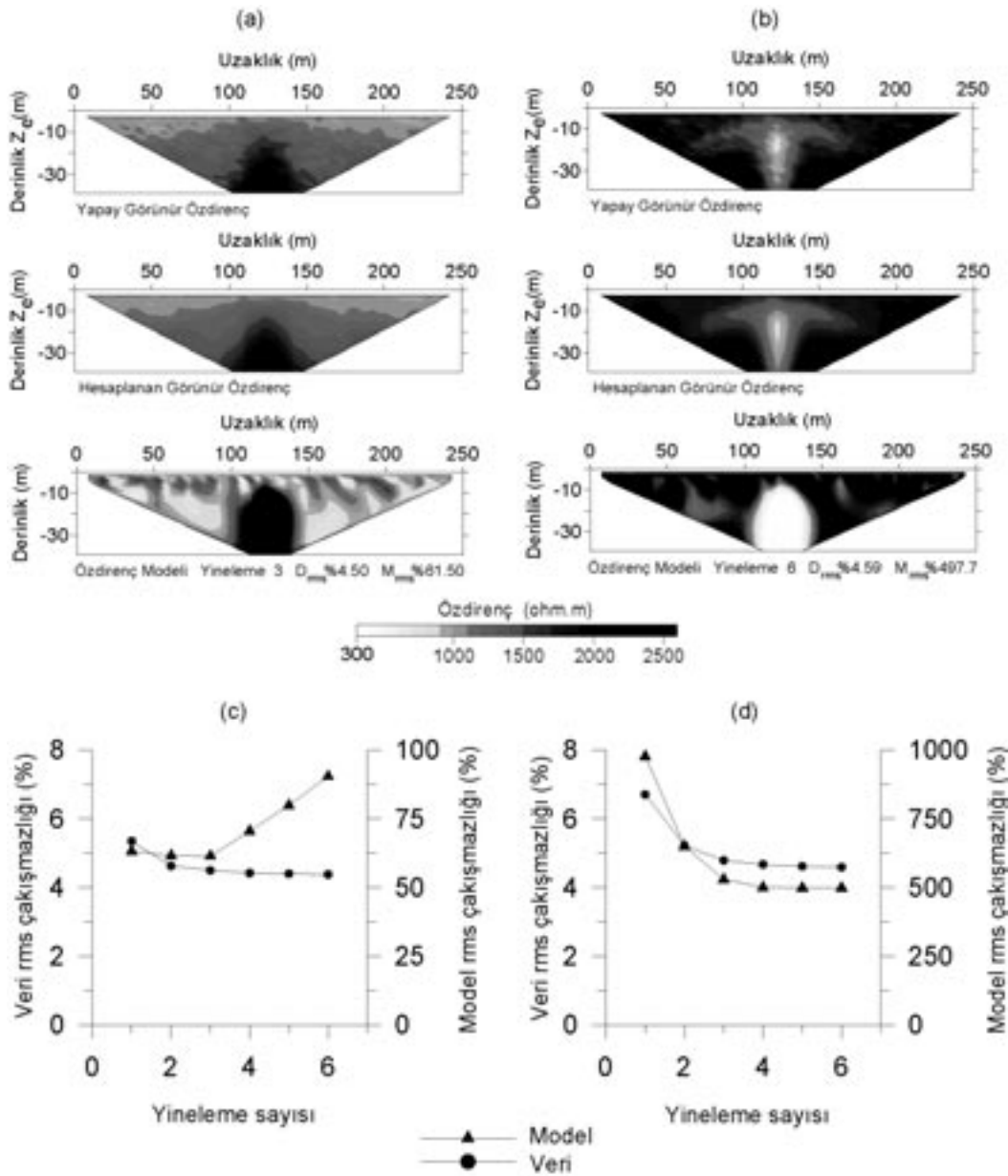
yapı belirlenebilirliğinin çok az olduğu gözlenmektedir. Bu dizilime göre altıncı yineleme sonucunda elde edilen veri ve model rms çakışmazlık değerleri Şekil 8c ve 8d'de verilmektedir. Model rms çakışmazlık değerleri dirençli yapı için sürekli bir artış göstermekte ve ideal olmayan bir davranış sergilemektedir. Oysa, iletken yeraltı durumu için yineleme değerlerine bağlı olarak, her iki değerde de benzer bir düşüş elde edilmektedir. Böylece iletken durumlu karst yapıları için gerçekleştirilen ters-çözüm çalışmalarının dirençli durumlara göre daha başarılı sonuçlar vereceği söylenebilir.

Aynı modelden pol-pol dizilimi için elde edilen sonuçlar Şekil 9a ve 9b'de verilmiştir. Hata analizleri pol-pol diziliminin bu tür dirençli yeraltı koşulları için model çakışmazlık değerlerinin tipik bir ideal olmayan durum gösterebileceğini ortaya çıkarmaktadır. Oysa, iletken yapı durumunda çözüm kararlı bir davranış sergilemekte ve artan yinelemelere bağlı olarak azalan çakışmazlık gözlenmektedir (Şekil 9c ve 9d). Her iki model kesitte de hedef yapı belirlenmekle birlikte, dirençli durum çözümünde, gürültü etkisine de bağlı olarak, yüksek genlikli yanıtıcı etkiler gözlenmekte ve hedef yapıyı maskeleyebilecek bir özellik göstermektedir.

Şekil 10a ve 10b'de dipol-dipol dizilimi için elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Dirençli boşluk durumunda ilk yinelemeden başlayarak, model çakışmazlık değerleri hızla yükselmektedir (Şekil 10c). Bu nedenle, ilk yinelemelerde elde edilen sonuçlar daha başarılı olmaktadır. İletken durumda ise, diğer dizilimlerde olduğu gibi daha başarılı bir çözüm söz konusudur (Şekil 10d).

Karstik-2 Modeli

İlk modelin üzerine bir örtü katmanının yerleştirilmesiyle karstik model daha da karmaşık hale getirilmiştir (Drahor vd., 2004). Schlumberger dizilimi kullanılarak elde edilen sonuçlar Şekil 11'de gösterilmiştir. Her iki durum (iletken/dirençli) için de hedef yapı ve örtü tabakasının etkileri model kesitleri üzerinde belirgin olarak görülmektedir (Şekil 11a ve 11b). Veri ve model çakışmazlık değerleri açısından karstik-1 modeliyle karşılaştırıldığında, karstik-2 modelinde veri çakışmazlık değerlerinde önemli bir değişim görülmemekle birlikte, model çakışmazlık değerlerinin daha yüksek olduğu gözlenmektedir (Şekil 11c ve 11d).



Şekil 7. Karstik-1 modelinin Schlumberger dizilimine göre ters-çözüm sonuçları: (a) dirençli, (b) iletken karstik boşluk, (c) dirençli, (d) iletken durum için veri ve model rms çakışmazlıklarının yineleme sayısına göre değişimi.

Figure 7. Inversion results of the karstic-1 model with the Schlumberger array: (a) resistive, (b) conductive karstic void; variation in the model and data rms misfit with respect to the iteration number for (c) the resistive and (d) conductive case.

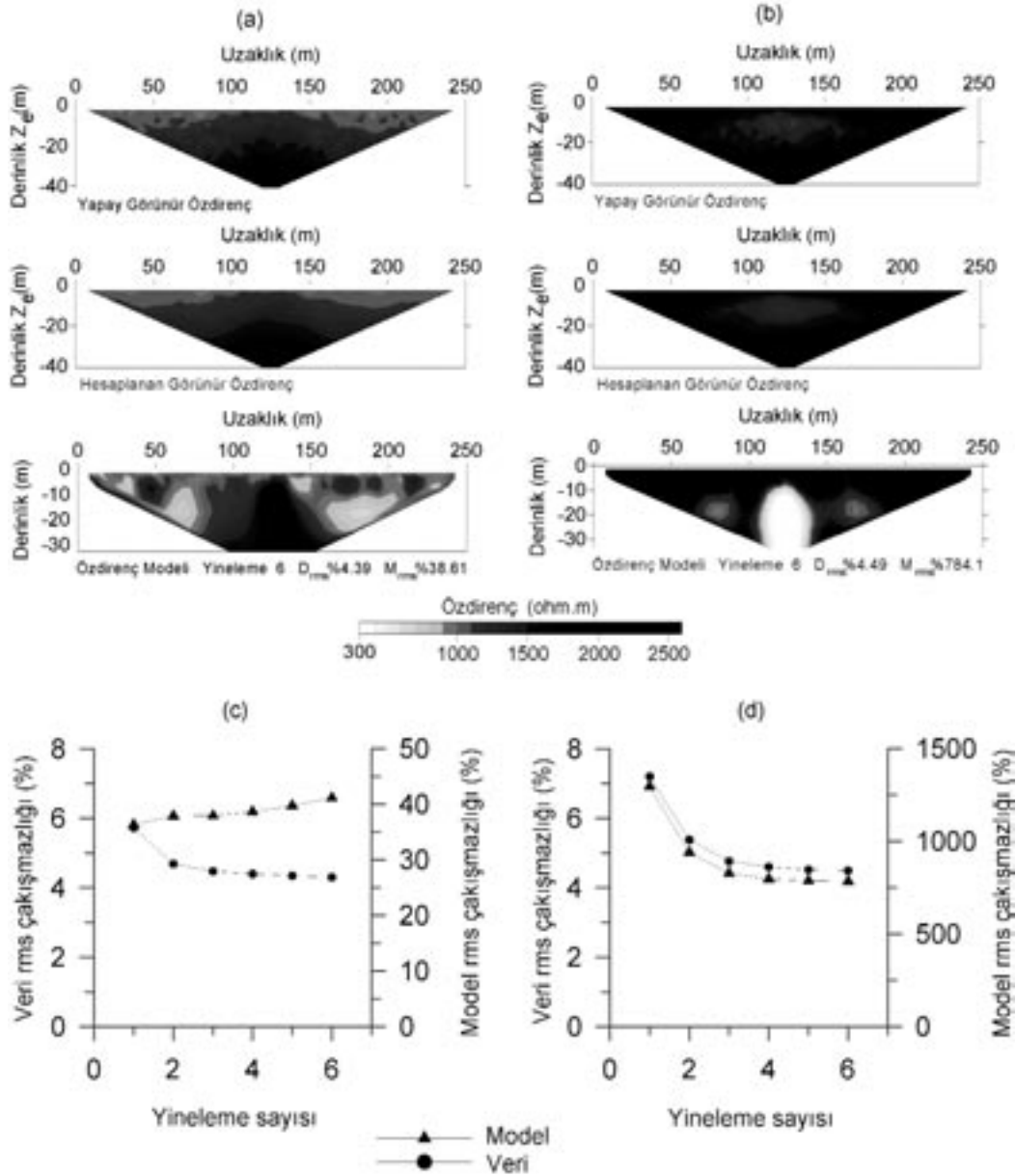
Wenner dizilimi kullanılarak elde edilen yapay veri ve onun ters-çözüm sonuçları Şekil 12a ve 12b'de verilmiştir. Bu çözümün sonucuna göre, ilk altı yineleme için bulunan veri ve model hata çakışmazlık değerleri ise, Şekil 12c ve 12d'de görülmektedir. Her iki model için veri çakışmazlık

değerleri azalma eğilimi göstermektedir. Karstik-1 modeli ile karşılaştırıldığında, yüzeydeki örtü katmanı çözüm gücünü büyük oranda düşürmektedir. Model kesitlerinde, hedef yapı ve örtü katmanının izlenebildiği söylenebilir. Özellikle iletken yeraltı durumu için elde

edilen model, seçilen modele daha yakın sonuçlar vermektedir. Ancak Schlumberger dizilimi ile karşılaştırıldığında, çözüm gücünün düştüğü gözlenmektedir.

Karstik-2 modelinde pol-pol dizilimi ile elde edilen sonuçlar Şekil 13'de görülmektedir. Model kesitleri incelendiğinde de; dirençli ve iletken

boşluk durumları için hedef yapının açıkça belirlenemediği ortaya çıkmaktadır. Ancak yüzeye yakın olarak verilen örtü tabakasının etkisi kesitlerde açıkça gözlenmektedir (Şekil 13a ve 13b). Veri çakışmazlık değerleri azalırken, model çakışmazlık değerleri artmaktadır (Şekil 13c ve 13d). Bu olgunun hem iletken hem de dirençli

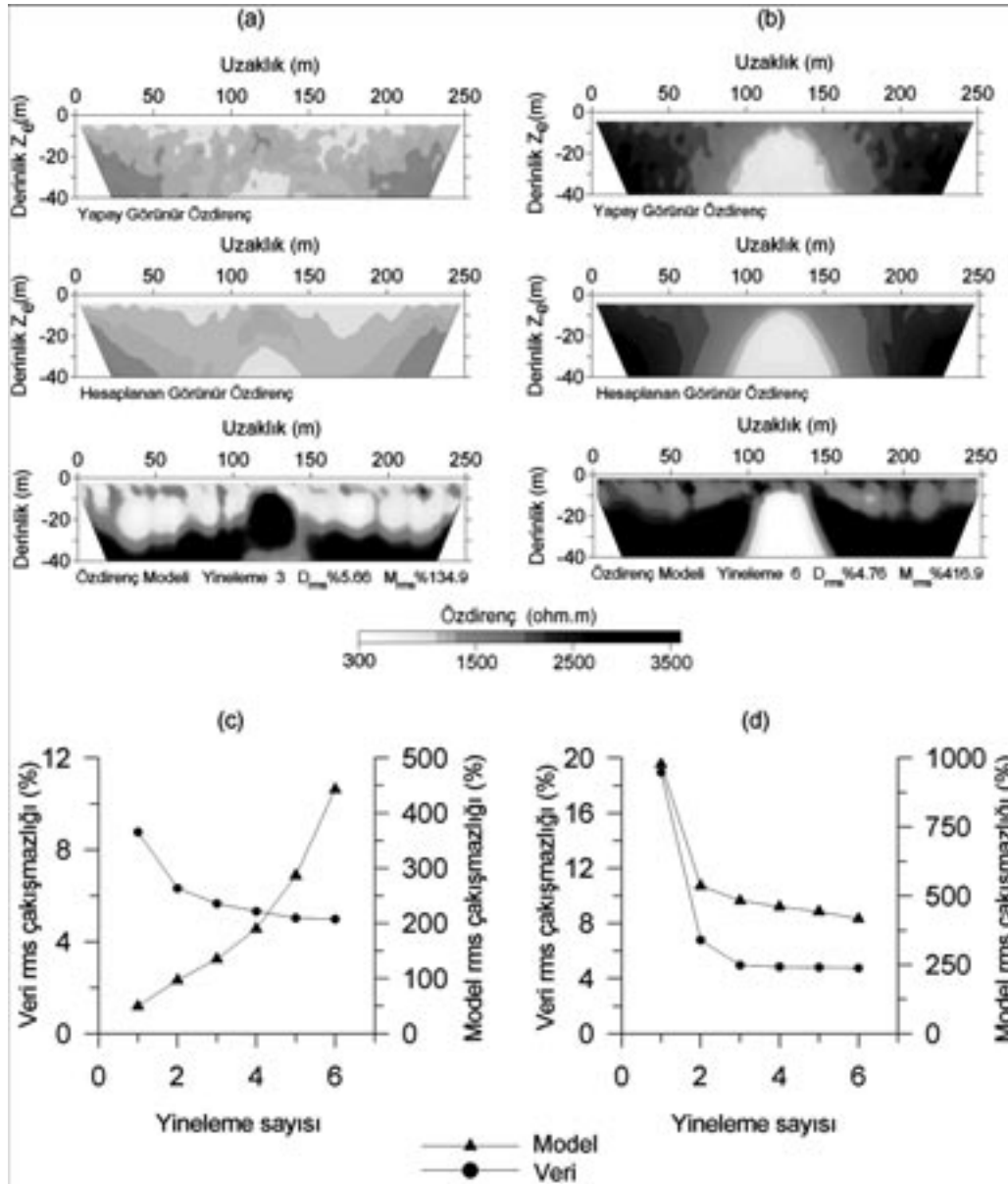


Şekil 8. Karstik-1 modelinin Wenner dizilimine göre ters-çözüm sonuçları: (a) dirençli, (b) iletken karstik yapı, (c) dirençli, (d) iletken durum için veri ve model rms çakışmazlık değişimleri.

Figure 8. Inversion results of the karstic-1 model with the Wenner array: (a) resistive, (b) conductive karstic void; variation in the model and data rms misfit with respect to the iteration number for (c) the resistive and (d) conductive case.

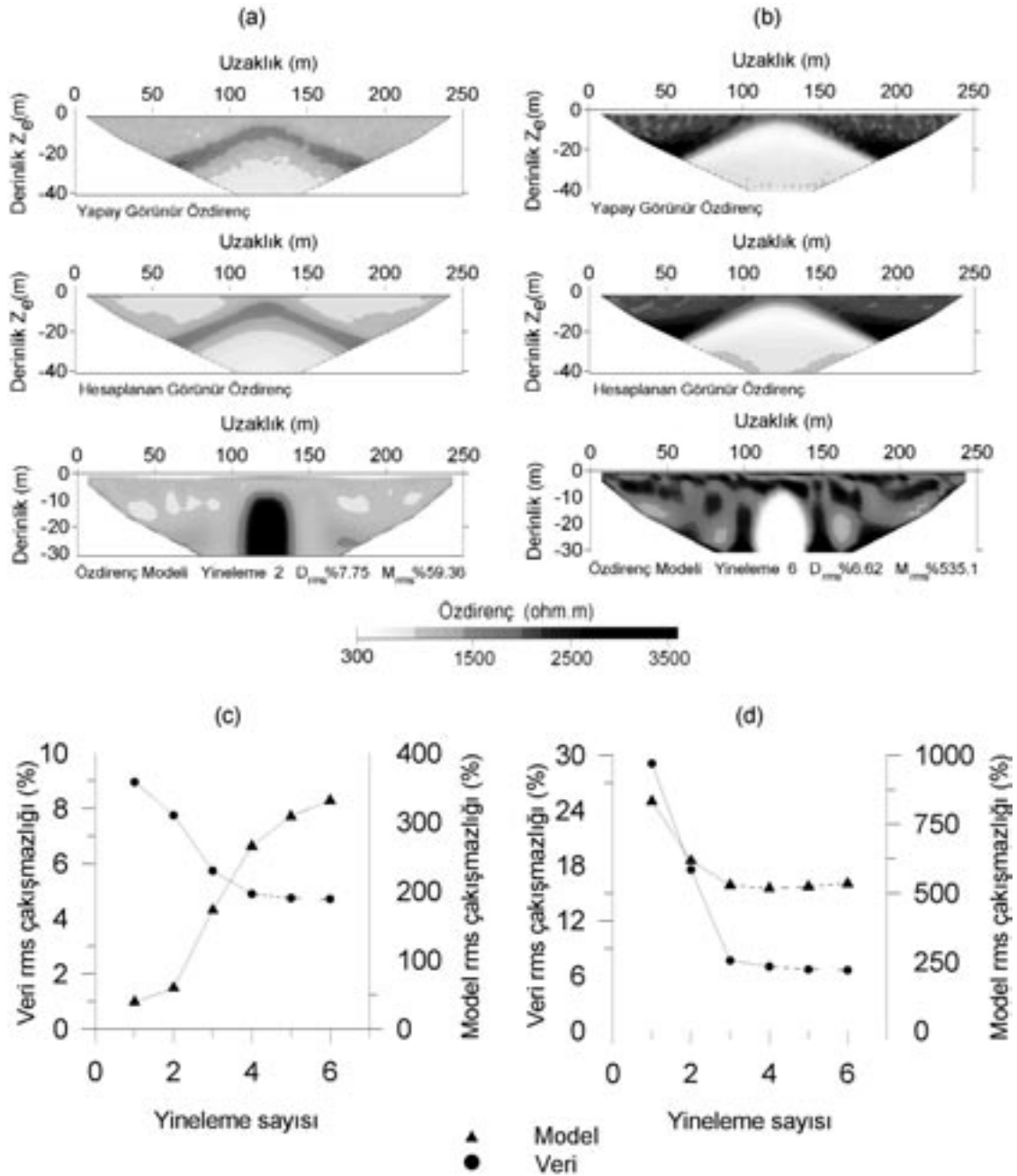
karst boşluğu için geçerli olması, bu dizilimin böyle bir model yapıya benzer jeolojik ortamlar için uygun bir dizilim olmadığını göstermektedir. Dipol-dipol dizilimine ait sonuçlar Şekil 14'de verilmiştir. Bu şekildeki kesitlerden de görüldüğü gibi, hedef yapı hem iletken, hem de dirençli durumda açıkça belirlenebilmektedir. Ancak,

yüzeyde bulunan örtü katmanı, verinin gürültülü olması nedeniyle seçilememektedir (Şekil 14a ve 14b). Veri rms değerlerinde hızlı bir düşüş olmasına karşın, model çakışmazlık değerlerinin yükseldiği ya da kararsız bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Dirençli yeraltı modeli için veri rms değerleri hızla azalırken, model rms de-



Şekil 9. Karstik-1 modelinin pol-pol dizilimine göre ters-çözüm sonuçları: (a) dirençli, (b) iletken karstik yapı, (c) dirençli, (d) iletken durum için veri ve model rms çakışmazlık değişimleri.

Figure 9. Inversion results of the karstic-1 model with the pole-pole array: (a) resistive, (b) conductive karstic void; variation in the model and data rms misfit with respect to the iteration number for (c) the resistive and (d) conductive case.



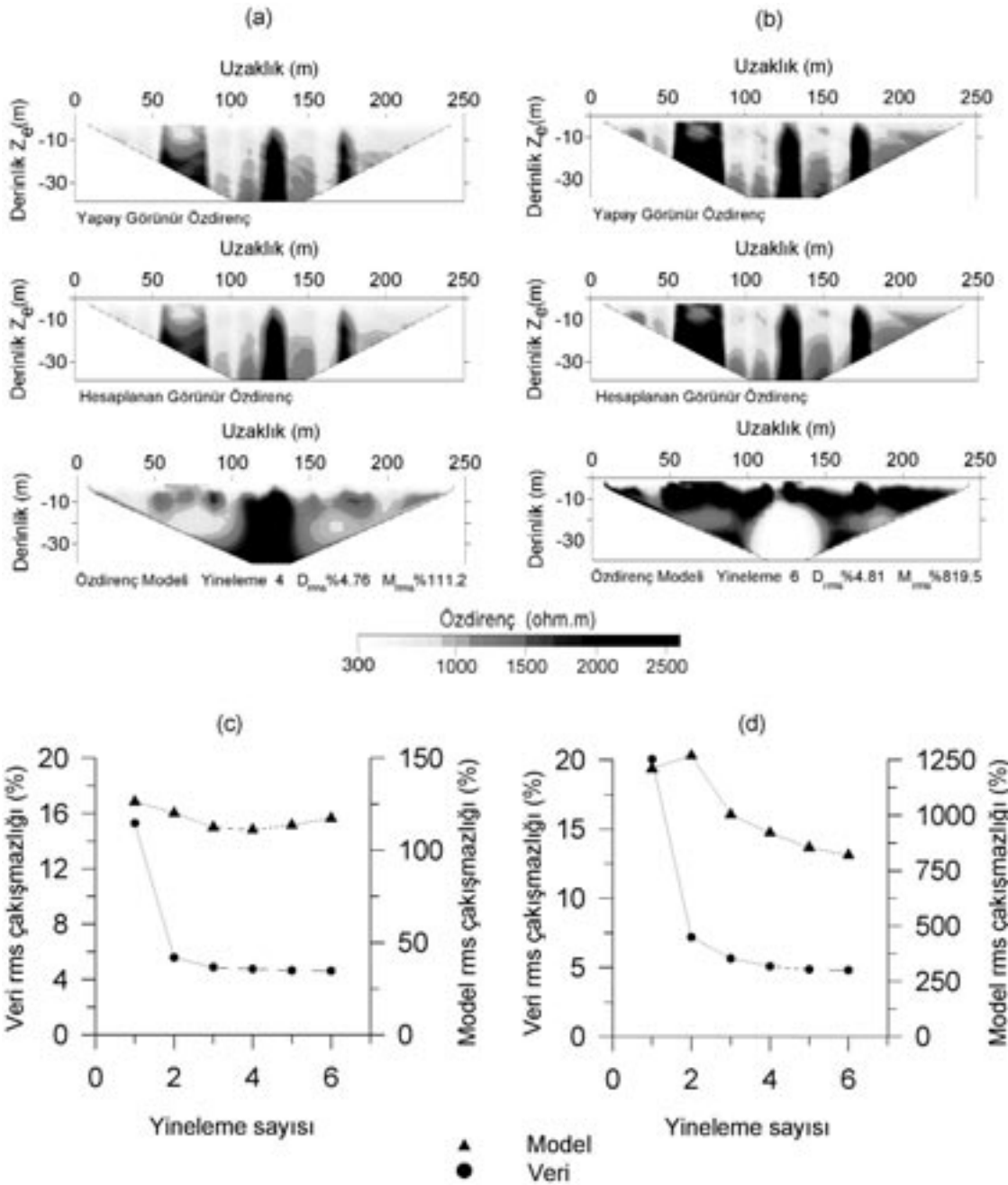
Şekil 10. Karstik-1 modelinin dipol-dipol dizilimine göre ters-çözüm sonuçları: (a) dirençli, (b) iletken karstik yapı, (c) dirençli, (d) iletken durum için veri ve model rms çakışmazlık değışimleri.

Figure 10. Inversion results of the karstic-1 model with the dipole-dipole array: (a) resistive, (b) conductive karstic void; variation in the model and data rms misfit with respect to the iteration number for (c) the resistive and (d) conductive case.

ğerleri de aynı hızla artmaktadır. Oysa iletken karst modeli için ikinci ile son yineleme arasında kararsız bir durum görülmektedir (Şekil 14c ve 14d).

SONUÇLAR

Bu çalışmada, düzgünlük-kısıtlı ters-çözüm algoritması öz direnç zıtlığı ve yapı boyutları dizi-



Şekil 11. Karstik-2 modelinin Schlumberger dizilimine göre ters-çözüm sonuçları: (a) dirençli, (b) iletken karstik yapı, (c) dirençli, (d) iletken durum için veri ve model rms çakışmazlık değışimleri.

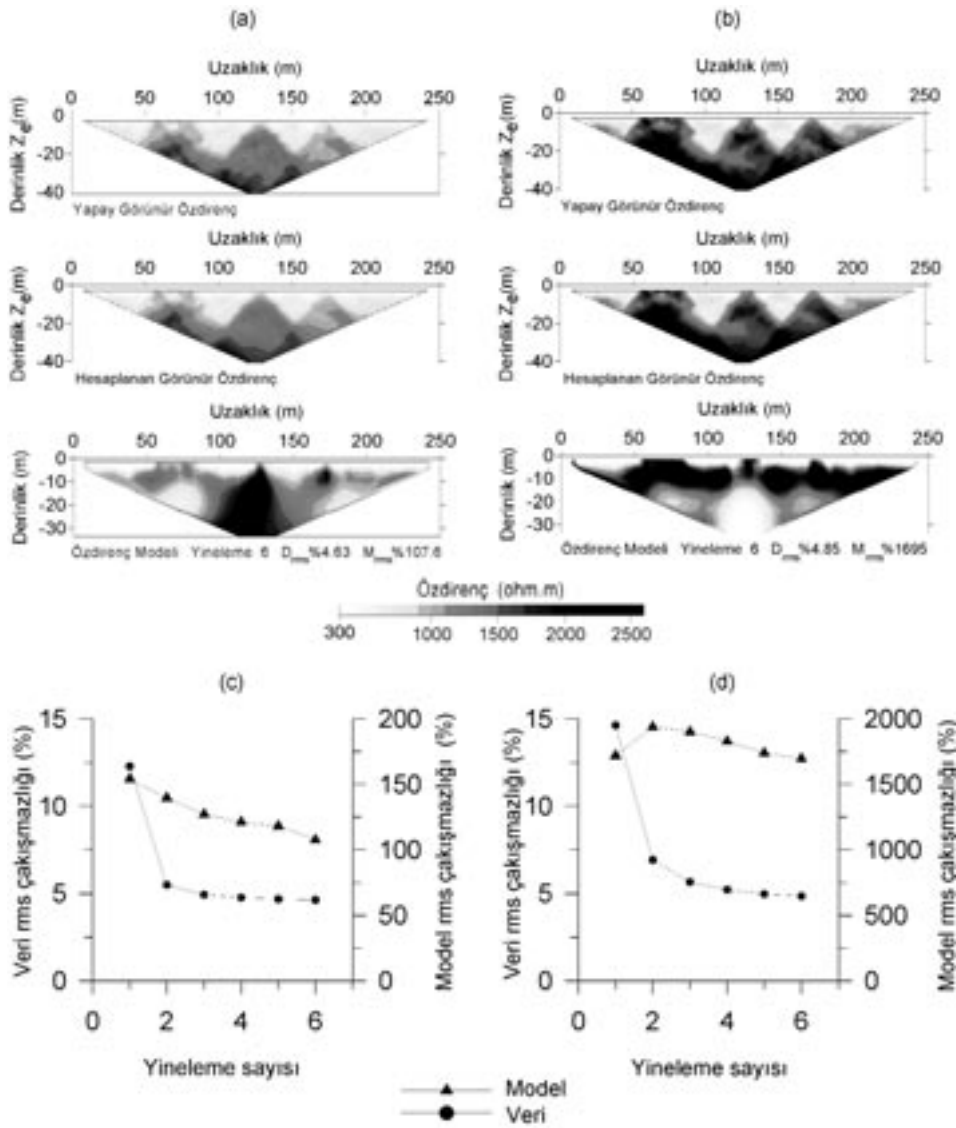
Figure 11. Inversion results of the karstic-2 model with the Schlumberger array: (a) resistive, (b) conductive karstic void; variation in the model and data rms misfit with respect to the iteration number for (c) the resistive and (d) conductive case.

lim türü açısından model çalışmaları ile sınıranmıştır. Bu amaçla; seçilen modeller için düz-çözüm işlemiyle görünür öz direnç verileri oluşturulmuş ve bazı modellere % 5 Gaussian gürültü eklenmiştir. Böylece elde edilen veriler ters-çözüm

işlemi için girdi olarak kullanılmıştır. Ters-çözüm işlemi sonucunda elde edilen öz direnç model kesitleri ise, seçilen modeller ile karşılaştırılmışlardır. Ancak bu karşılaştırmanın sağlıklı olabilmesi için, veri ve model rms çakışmazlıkla-

rı hesaplanarak, hangi modelin nereden sonra ıraksadığı ve hangi aşamadan sonra başarısız sonuçların elde edilebileceği üzerinde çözümler yapılmıştır. Ters-çözüm işleminde öz direnç modeli elde edilirken, gözlenen ve hesaplanan görünür öz direnç verileri arasındaki fark en aza indirilmeye çalışılmaktadır ve bu durum veri rms çakışmazlık çözümlemesi ile izlenebilir. Oysa, model rms çakışmazlık değerleri özgün

modelin bilindiği yapay modelleme çalışmalarında hesaplanabilir. Böylece, arazi verilerinden hareketle yeraltını temsil eden modelin belirlenmesi, yorumcunun jeolojik ve jeofizik veriler ışığında vereceği karara bağlı olacaktır. Modelleme çalışmalarında veri rms çakışmazlık değerlerinin yinelemelere bağlı olarak düşmesi, özgün modele yaklaşıldığı anlamına gelmez. Aksine öz direnç zıtlığı, yapı boyutu gibi bazı önemli

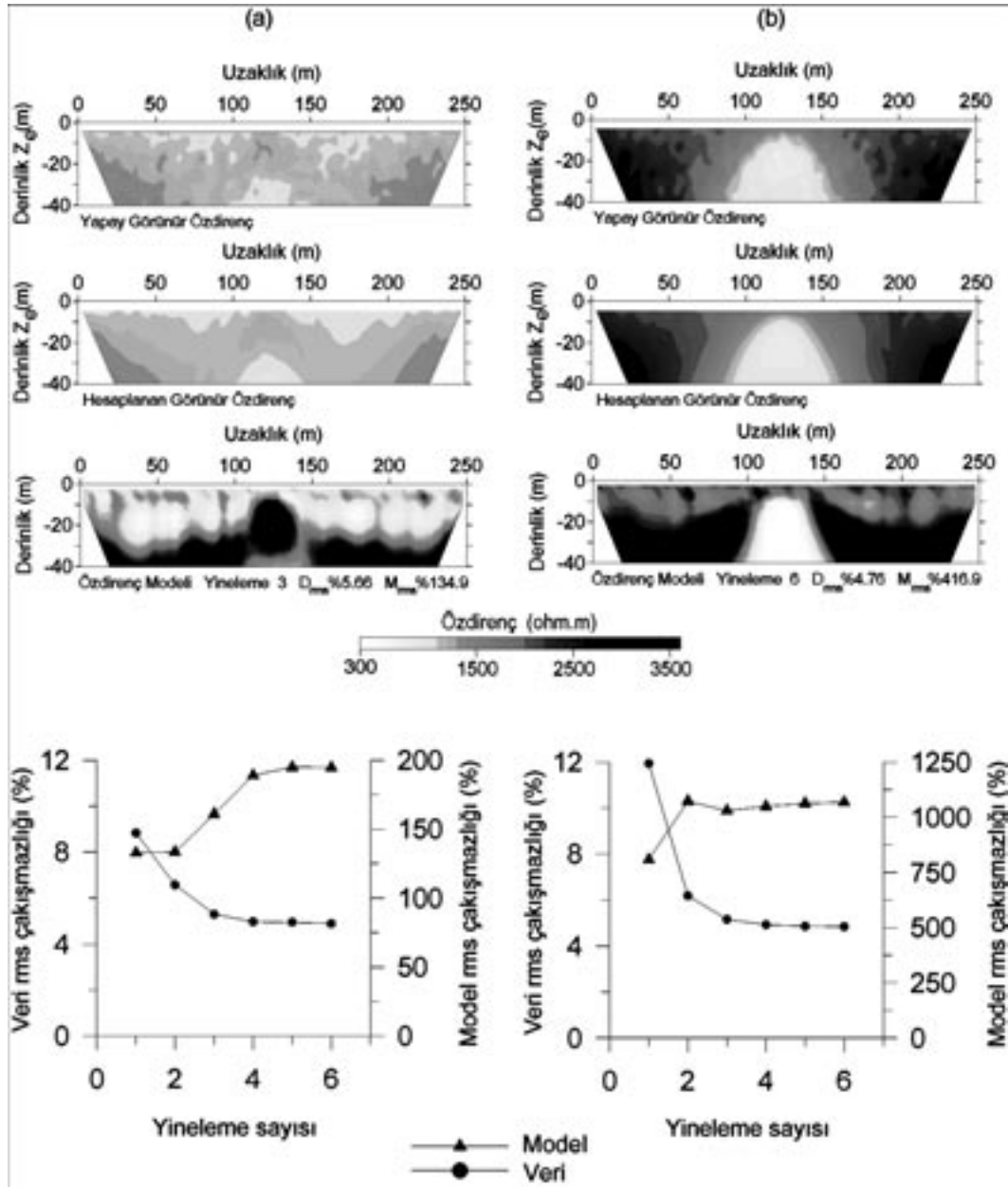


Şekil 12. Karstik-2 modelinin Wenner dizilimine göre ters-çözüm sonuçları: (a) dirençli, (b) iletken karstik yapı, (c) dirençli, (d) iletken durum için veri ve model rms çakışmazlık değişimleri.
Figure 12. Inversion results of the karstic-2 model with the Wenner array: (a) resistive, (b) conductive karstic void; variation in the model and data rms misfits with respect to the iteration number for (c) the resistive and (d) conductive case.

koşullara bağlı olarak önemli iraksamalar ortaya çıkabilir. Özellikle öz direnç zıtlığı bu olguda önemli bir etkidir. Eğer ortamlar arasındaki zıtlık az ise, model rms çakışmazlık değerlerinde önemli bir düşüş gözlenmektedir (ideal davranış durumu). Ancak bu zıtlığın hızlı biçimde

artması ya da önemli zıtlıklara sahip yapılar araya geldiğinde, yöntemin çözüm gücünde düşüşlerin olduğu gözlenmiştir.

Çalışmanın önemli bir aşamasını dizilim seçiminin model sonuçları üzerindeki etkileri ve farklı

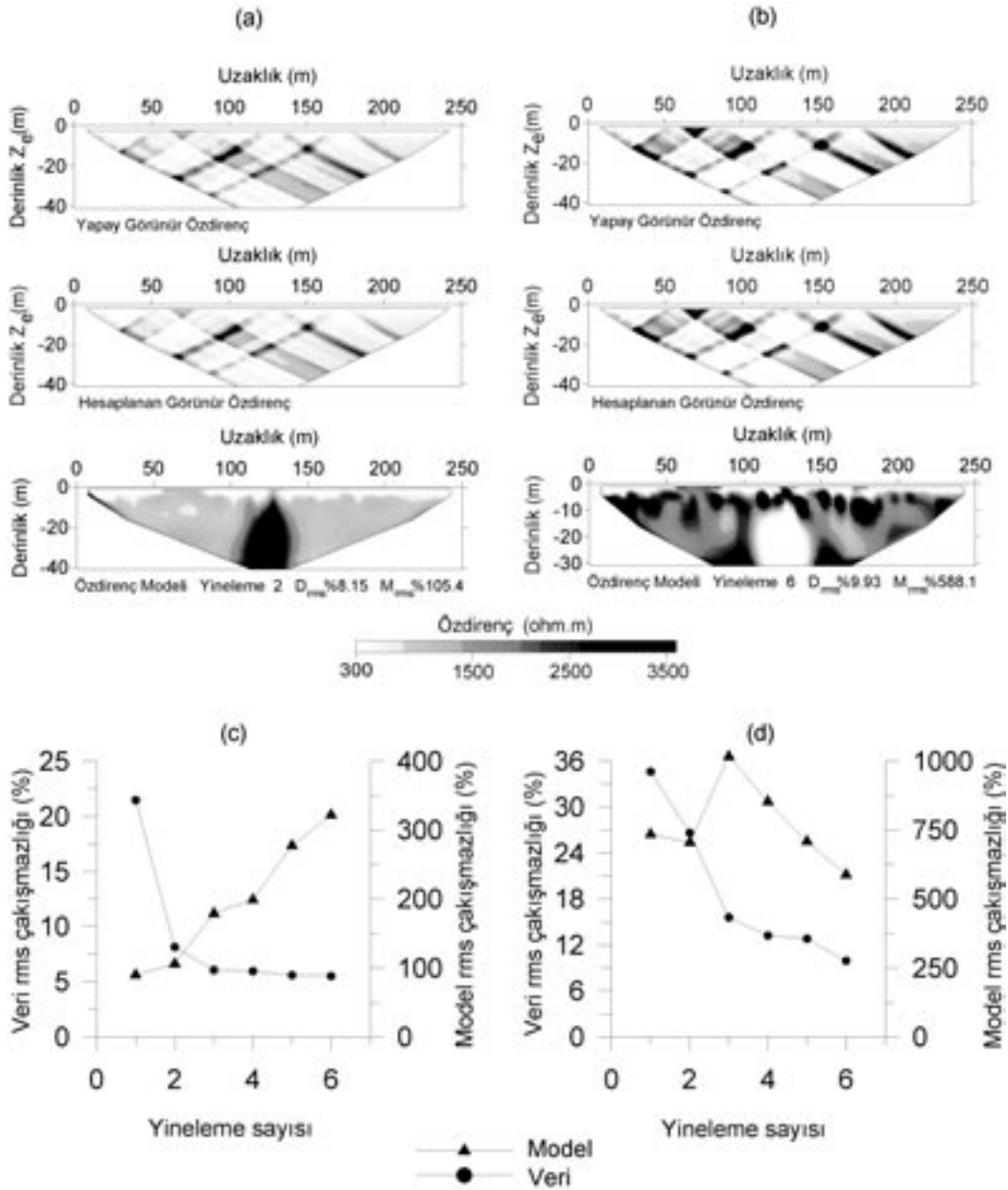


Şekil 13. Karstik-2 modelinin pol-pol dizilimine göre ters-çözüm sonuçları: (a) dirençli, (b) iletken karstik yapı, (c) dirençli, (d) iletken durum için veri ve model rms çakışmazlık değişimleri.

Figure 13. Inversion results of the karstic-2 model with the pole-pole array: (a) resistive, (b) conductive karstic void; variation in the model and data rms misfit with respect to the iteration number for (c) the resistive and (d) conductive case.

yeraltı durumları için uygun dizimleri belirlemek oluşturmaktadır. Bu amaçla öz direnç uygulamalarında yaygın olarak kullanılan Schlumberger, Wenner, pol-pol ve dipol-dipol dizimlerinin yapı belirlenebilirliğine etkisi çakışmazlık çözümü açısından incelenmiştir. Bu incelemeler

sonucunda, tekdüze bir ortamda gömülü durumda bulunan yapıların belirlenmesinde dizimler arasında çok önemli farklar gözlenmezken; yapıların karmaşıklaşmasıyla, dizimlerin özellikle yüzeye yakın yapılardan farklı şekillerde etkilendikleri ve hedef yapıya karşı farklı



Şekil 14. Karstik-2 modelinin dipol-dipol dizimine göre ters-çözüm sonuçları: (a) dirençli, (b) iletken karstik yapı, (c) dirençli, (d) iletken durum için veri ve model rms çakışmazlık değişimleri.

Figure 14. Inversion results of the karstic-2 model with the dipole-dipole array: (a) resistive, (b) conductive karstic void; variation in the model and data rms misfit with respect to the iteration number for (c) the resistive and (d) conductive case.

yeraltı durumları için değişik tepkiler verdikleri görülmüştür. Görünür öz direnç verisinin farklı düzeylerde gürültü içermesinin de çözümde önemli bir parametre olduğu açıktır.

Ayrıca yüzeyde yer alan bir örtü katmanının çözümlenmeyi hangi ölçüde etkilediği de incelenmiştir. Analizler, örtü katmanının sahip olduğu öz direnç değerinin büyük önem taşıdığını ortaya çıkartmış, ayrıca aşırı iletken ya da dirençli durumlarda hedef yapıyı belirlemenin önemli oranda etkilendiği ve hatta hedef yapının tümüyle maskelenebildiği belirlenmiştir.

Yapılan çalışmalar, genelde düzgünlük-kısıtlı ters-çözüm yönteminin doğru yeraltı modelini tanımlamada başarılı olduğunu ortaya koymuştur. Bu tür modelleme çalışmalarının, bir arazi çalışmasının öncesinde, eldeki jeolojik veriler ve diğer bilgiler ışığında mutlaka yapılmasının gerekli olduğu ve buradan elde edilecek sonuçlar doğrultusunda kullanılacak dizilim, elektrot aralığı gibi önemli ölçüm parametrelerinin belirlenmesiyle daha başarılı sonuçların elde edilebileceği de göz ardı edilmemelidir.

KAYNAKLAR

- Berge, M. A., 2005. İki-boyutlu öz direnç ters-çözüm modellemesi. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir (yayımlanmamış).
- 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.
- Dahlin, T., and Zhou, B., 2004. A numerical comparison of 2-D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical Prospecting*, 52, 379 -398.
- 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.
- Drahor, M. G., Göktürkler, G., Berge, M. A. ve Kurtuluş, Ö. T., 2005. Bazı sığ yeraltı yapılarının öz direnç ters-çözümü. *Yerbilimleri*, 26 (2), 1-14.
- Geotomo Software, 2001. RES2DINV software, ver. 3.4. <http://www.geoelectrical.com>, 15 November 2005.
- Loke, M. H., 2001. Tutorial: 2-D and 3-D electrical

imaging surveys. Penang, Malaysia, Universiti Sains Malaysia, unpublished course notes, 121pp, <http://www.geoelectrical.com>, 15 November 2005.

- Loke M. H., and Barker R. D., 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131-152.
- 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.
- Olayinka, A. I., and Yaramancı, U., 2000a. Assessment of the reliability of 2D inversion of apparent resistivity data. *Geophysical Prospecting*, 48, 293-316.
- Olayinka, A. I., and Yaramancı, U., 2000b. 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.
- Olayinka, A. I., and Yaramancı, U., 2002. Smooth and sharp-boundary inversion of two-dimensional pseudosection data in presence of a decrease in resistivity with depth. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 7, 139-165.
- Sasaki, Y., 1992. Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophysical Prospecting*, 40, 453-464.