



YİNELEMELİ YÖNTEMLE ÜÇ BOYUTLU ÖZDİRENÇ MODELLEMESİ  
(3D RESISTIVITY MODELLING BY ITERATIVE METHOD)

Gökhan GÖKTÜRKLER\*, Mahmut G. DRAHOR\*

ÖZET/ABSTRACT

Karmaşık bir yer altı yapısının iki ve üç boyutlu modelinin kurulmasında, sonlu farklar eşitlikleri yardımıyla potansiyelin hesaplanması ve görünür öz direnç değerlerinin elde edilmesi olasıdır. Böylece, yeraltının görünür öz direnç dağılımının oldukça kısa bir süre içinde belirlenmesi olanaklıdır. Sonlu farklarla yapılan bu modelleme, topoğrafyanın ihmal edilebileceği tüm yeraltı öz direnç dağılımlarının hesaplanmasında kullanılabilir. Bu çalışmada; tekdüze yeraltı yapısı, fay ve tekdüze bir ortam içine gömülmüş değişik boyutlardaki blok modellerinin farklı dizilim türleri kullanılarak, görünür öz direnç değerleri hesaplanmıştır. Böylece karmaşık yeraltı yapılarından kaynaklanacak öz direnç değerleri, daha gerçekçi bir biçimde hesaplanmış olmaktadır. Yapılan çalışmalar, analitik ve sonlu fark modelleri arasında çok iyi bir uyumun olduğunu ortaya çıkarmıştır.

*Electrical modeling of complex earth models is possible with finite-difference method in two or three dimensions. Apparent resistivity distribution of subsurface can be obtained in a short time. Finite-difference method might be used in modeling studies when topography of the earth is negligible. This study includes modeling for different subsurface models, such as homogeneous earth, vertical fault and semi-infinite spaces including resistive blocks of different sizes. According to results, there is a good agreement between analytical and numerical solutions.*

ANAHTAR KELİMELELER/KEYWORDS

Modelleme, Öz direnç, Sonlu farklar  
*Modeling, Resistivity, Finite difference*

---

\* DEÜ Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Müh. Bölümü Kaynaklar Buca, İZMİR

## 1. GİRİŞ

Son yıllarda elektrik özdirenç sistemlerindeki gelişmeler, verilerin değerlendirilmesi aşamasında sayısal yöntemlerin kullanılmasını kaçınılmaz kılmıştır. Bilindiği gibi jeofizik verilerin değerlendirilmesinde düz ve ters çözüm kullanılan temel algoritmalarıdır. Parametreleri bilinen bir yer altı modelinden hareketle, bu modelin neden olacağı tepkinin hesaplanması olarak tanımlayabileceğimiz düz çözüm jeofiziğin en temel değerlendirme yaklaşımıdır. Bu özelliğinden dolayı ters çözüm algoritmalarının temel adımlarından da biridir. Bilgisayar teknolojisi ve sayısal yöntemlerdeki gelişmelere bağlı olarak sonlu farklar ve sonlu elemanlar yöntemleri düz çözümde giderek artan sıklıkta kullanılmaya başlanmış sayısal yöntemlerdir. Bu sayede gerek iki boyutlu ve gerekse üç boyutlu elektrik verisinin değerlendirilmesi bir çok elektrot dizilimi için kolayca yapılabilecek duruma gelmiştir. Bu yöntemler ile değerlendirmenin en önemli avantajı, ortama ait heterojenitenin bir sadeleştirilmeye ihtiyaç duyulmadan çözüme katılabilmesidir. Bu kompleks yer altı modellerinin değerlendirilebilmesine olanak sağlar.

Sonlu farklar ile modelleme doğrudan (direct) ve yinelemeli (iterative) olarak iki genel gruba ayrılır. Jepsen ve Aiken vd. yinelemeli yöntemle elektrik özdirenç verisinin modellenmesine ait ilk örnekleri vermişlerdir (Jepsen, 1969; Aiken vd., 1973). Mufti yine bir yinelemeli yöntem olan ardışık aşırı rahatlatma (successive overrelaxation) ile iki boyutlu heterojen ortamlarda özdirenç modellemesini gerçekleştirmiştir (Mufti, 1976). Scriba yöntemin üç boyutlu ortamlardaki uygulamasını göstermiştir (Scriba, 1981). Yine Mufti, silindirik koordinatlarda, büyük grid aralıklarıyla duyarlı sonuçlar üreten modelleme çalışmaları yapmıştır (Mufti, 1978). Dey ve Morrison direkt yöntemle iki ve üç boyutlu özdirenç modellemesini gerçekleştirmişlerdir (Dey ve Morrison, 1979a; Dey ve Morrison, 1979b). Ayrıca iki boyutlu modellemede noktasal kaynak kullanımını (2.5 boyutlu modelleme) göstermişlerdir. Sonlu elemanlar ile çözümün en önemli avantajı yüzey topografyasının doğrudan modellemeye dahil edilebilmesidir. Coggon ve Pridmore vd. sonlu elemanlar yönteminin elektrik ve elektromanyetik verilerin modellenmesindeki kullanımını göstermişlerdir (Coggon, 1971; Pridmore vd., 1981).

Bu çalışma kapsamında bir üç boyutlu sonlu farklar algoritması kullanılarak yinelemeli yöntemle gerçekleştirilen modelleme çalışmalarına ait örnekler yer almaktadır. Bu yöntem yardımıyla tekdüze yeraltı modeli, fay ve blok türü yapılar için potansiyel değerleri hesaplanmış ve 3B yeryüzü modeli için görünür özdirenç değerleri elde edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, 3B heterojen ortamların sonlu farklar yöntemiyle kolayca modellenebildiği görülmüştür. Ayrıca, analitik ve yinelemeli sonlu farklar yöntemleriyle yapılan model çalışmaları arasında iyi bir uyumun bulunduğu da saptanmıştır. Böylece, analitik açıdan çözülemeyen karmaşık yeraltı yapılarının kısa sürede çözümlenerek, bu yapılara uygun modellerin üretilmesi olanağı ortaya çıkmıştır.

## 2. YÖNTEM

Üç boyutlu (3B) heterojen bir ortamda  $q$  akım yoğunluğuna sahip bir kaynağın yaratacağı potansiyel dağılımı Poisson denklemi ile

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( s \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( s \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( s \frac{\partial v}{\partial z} \right) + q = 0 \quad (1)$$

tanımlanır. Burada,  $s(x, y, z)$  ortamın elektriksel iletkenliği [mhos m<sup>-1</sup>],  $v(x, y, z)$  elektriksel potansiyel [volt],  $q(x, y, z)$  akım yoğunluğu [amp m<sup>-3</sup>] olup  $x$ ,  $y$  ve  $z$  ise uzay koordinatlarıdır. Bilindiği gibi  $s(x, y, z) = \frac{1}{r(x, y, z)}$  olup,  $r$  ortamın elektrik özdirencini [ohm-m] temsil etmektedir. Ayrıca  $q(x, y, z) = \frac{\partial Q(x, y, z)}{\partial t}$ . Burada  $Q$  yük yoğunluğu [coul m<sup>-3</sup>],  $t$  ise zamandır.

Eşitlik 1'in sonlu farklar algoritması ile çözümünde birinci adım, denklemde yer alan kısmi türevler için sonlu fark operatörlerini kullanarak; denklemi sonlu farklar cinsinden yeniden ifade etmektir. Aşağıda bu denklemin sonlu farklar cinsinden ifadesi yer almaktadır.

$$-C_P V_{i,j,k} + C_U V_{i,j,k-1} + C_D V_{i,j,k+1} + C_W V_{i-1,j,k} + C_E V_{i+1,j,k} + C_S V_{i,j-1,k} + C_N V_{i,j+1,k} + q_{i,j,k} = 0 \quad (2)$$

Burada ( $C_E, C_W$ )  $x$  yönündeki katsayılar, ( $C_N, C_S$ )  $y$  yönündeki katsayılar, ( $C_U, C_D$ )  $z$  yönündeki katsayılar olup,  $C_P = C_E + C_W + C_N + C_S + C_U + C_D$ . Bu katsayıların açık formlarının elde etmek için Mufti ve Scriba'dan yararlanılabilir (Mufti, 1976; Scriba, 1981).

Elektrik potansiyel dağılımının hesaplanacağı ortamın sonlu sayıda ve sabit özdirenç değerlerine sahip elemanlara bölünerek ayrıklaştırılması çözümün ikinci adımını oluşturur. Böylece her bir elemana ait özdirenç değerinin elemanın merkezine atanmasıyla sonlu sayıda düğüm noktasından (node) oluşan bir sonlu farklar ağı (network) elde edilir. Şekil 1 elektrik özdirenç modelleme çalışmalarında kullanılan standart bir 3B sonlu farklar ağını göstermektedir. Buradaki en önemli özellik, yanal ve düşey yöndeki grid aralıklarının, kenarlara yaklaştıkça giderek artmasıdır. Bu artış genellikle logaritmik artan ( $10 \cdot h$ ,  $100 \cdot h$ ,  $1000 \cdot h$ ,  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = h$ ) bir çarpan kullanılarak kontrol edilir. Buradaki amaç potansiyelin sonsuzda sıfır olmasından hareketle model kenarlarındaki potansiyel değerlerinin sıfıra yaklaşmasını sağlamaktır. Ayrıca kaynaktan uzak noktadaki potansiyel gradyanının küçük olması diğer bir değişle yavaş değişmesi daha büyük grid aralıklarıyla çalışmayı mümkün kılar çünkü bu durumda oluşacak hata ihmal edilebilecek düzeydedir (Scriba, 1981). Modelin sınırlarını tanımlayan düğüm noktalarına seçilen sınır koşullarına göre belirli potansiyel değerlerinin atanarak sınır koşullarının sağlanması ise çözümün diğer bir önemli adımını oluşturur. Elektrik modelleme çalışmalarında genellikle iki tip sınır koşulu kullanılır. Bunlar Neumann ve Dirichlet sınır koşullarıdır. Modelde iletken yer ile yalıtkan atmosfer arasındaki sınırı temsil eden serbest yüzey boyunca Neumann sınır koşulu

$$\left. \frac{\partial v}{\partial z} \right|_{z=0} = 0 \quad (3)$$

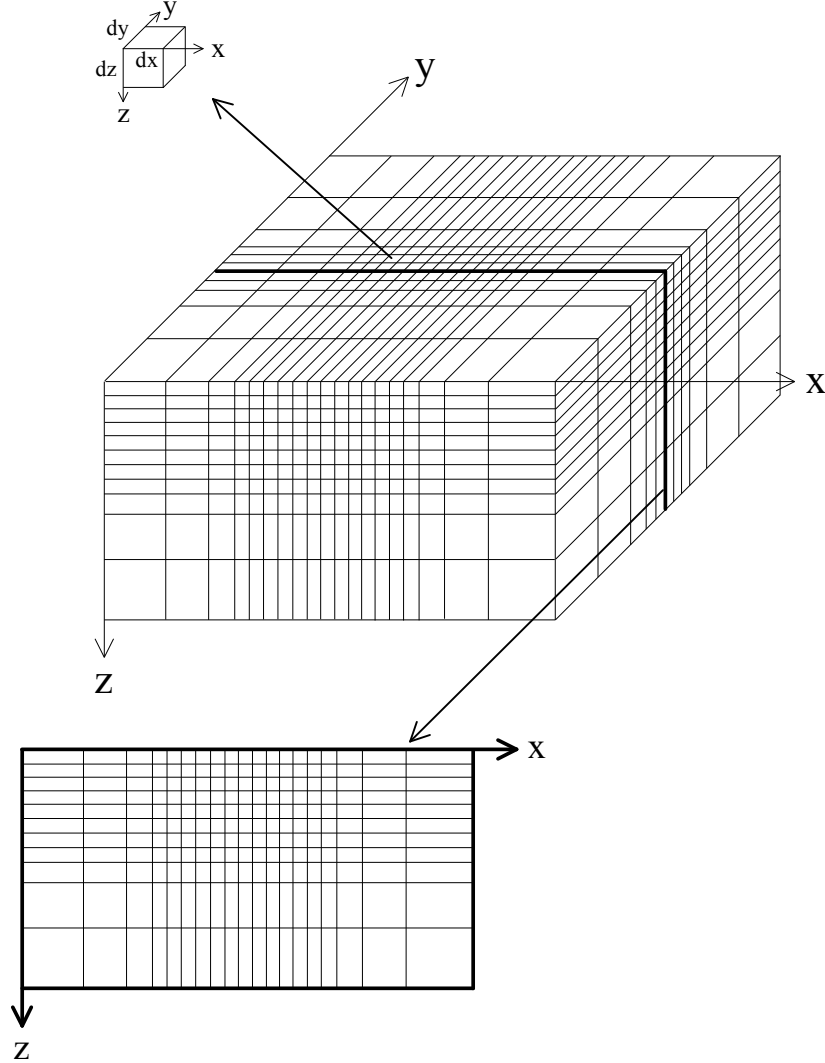
modelin diğer kenarlarında ise Dirichlet sınır koşulu

$$v(x, y, z) = 0 \quad (4)$$

kullanılır.

Sonlu farklar ağının diğer düğüm noktalarına ait potansiyel değerlerinin hesaplanmasıyla modelleme genel anlamda tamamlanmış olur. Hesaplanan bu değerler her bir elemana ait ortalama potansiyel değerleridir. Potansiyellerin hesaplanmasında kullanılan algoritmaya göre sonlu farklarla modelleme doğrudan veya yinelemeli olarak iki genel gruba ayrılır. Üç

boyutlu modellenmenin söz konusu olduğu durumlarda uygulama kolaylığı ve büyük boyutlu matrislerin terslenmesini gerektirmediği için yinelemeli yöntemle çözüm doğrudan yöntemle



Şekil 1. Modelleme çalışmalarında kullanılan 3 boyutlu sonlu farklar ağı

çözümüne kıyasla daha avantajlı gözükmektedir. Bu nedenle izleyen satırlarda yinelemeli yöntemle çözüm genel hatlarıyla ele alınacaktır.

Eşitlik 2 aşağıdaki gibi düzenlenerek, yinelemeli yöntemle çözülebilecek duruma getirilebilir.

$$V_{i,j,k}^{m+1} = [C_U V_{i,j,k-1}^{m+1} + C_D V_{i,j,k+1}^m + C_W V_{i-1,j,k}^{m+1} + C_E V_{i+1,j,k}^m + C_S V_{i,j-1,k}^{m+1} + C_N V_{i,j+1,k}^m + q_{i,j,k}] / C_P \quad (5)$$

Burada  $m$  iterasyon adımını göstermektedir. Bu ifadeye göre her hangi bir  $i,j,k$  noktasındaki potansiyel değeri bu noktaya komşu olan düğüm noktalarındaki potansiyel değerleri kullanılarak ve bir başlangıç değerinden hareketle yinelemeli olarak hesaplanabilir. Gauss-Siedel denklemi olarak da adlandırılan bu ifade çok yavaş bir hızla yakınsadığından kullanışlı değildir. Ancak aşağıdaki ifade daha hızlı yakınsayan çözümler üretebilmektedir.

$$V_{i,j,k}^{m+1} = V_{i,j,k}^m + \frac{w}{C_P} [ -C_P V_{i,j,k}^m + C_U V_{i,j,k-1}^{m+1} + C_D V_{i,j,k+1}^m + C_W V_{i-1,j,k}^{m+1} + C_E V_{i+1,j,k}^m + C_S V_{i,j-1,k}^{m+1} + C_N V_{i,j+1,k}^m + q_{i,j,k} ] \quad (6)$$

Burada  $w$  yakınsama hızını belirleyen bir parametre olup  $0 < w < 2$  arasında değerler almaktadır. Bu ifadeyi temel alarak çözüm üreten algoritma Ardışık Aşırı Rahatlatma (Successive Overrelaxation) olarak adlandırılır. Bu yöntemle modellemeye ait daha detaylı bilgi Mufti ve Scriba'dan elde edilebilir (Mufti, 1976; Scriba, 1981).

### 3. UYGULAMA

Uygulamada özellikle analitik çözüm ile olan yaklaşımı görmek açısından temel modeller kullanılmış ve ortamların potansiyel dağılımları 3B ortamda sonlu farklar eşitlikleri kullanılarak çözümlenmişlerdir. Bu aşamada homojen yeraltı ortamı, fay olarak tanımlanabilecek bir çizgisellik etrafında ani değişime uğrayan iki farklı öz dirence sahip ortam ve homojen bir ortam içerisine değişik boyutlarda yerleştirilmiş ve gömüldüğü ortamdan daha yüksek ya da düşük öz direnç değerlerine sahip model yapılar üzerinde çözümler yapılmıştır.

#### 3.1. Homojen Yarı-Sonsuz Ortam Modeli

Herhangi bir yöntemle yapılacak modellemede yöntemin performansını görebilmenin en iyi yolu, homojen yarı-sonsuz ortamdaki davranışları gözlemlemektir. Bu nedenle uygulanan 3B öz direnç modellemesinde de ilk model olarak homojen bir yeraltı ortamı seçilmiştir. Ortam  $50 \times 50 \times 12$  m boyutlarında tekdüze ve  $1 \Omega\text{m}$  öz direnç değerine sahip olacak biçimde tasarlanmıştır. Böylesi 3B ortamın üzerinden alınacak bir kesitte  $50 \times 12$  m boyutlarında olacaktır. Uygulama açısından düşünüldüğünde;  $50\text{m}$ 'lik bir hat boyunca  $12$  m derinliğe değin oluşacak potansiyel değerlerinin elde edilmesidir. Böylece uygulamada kare biçimli araştırma yüzeyinin ortasında ( $y=25$  m) bulunan hattan alınacak ve yeryüzü kesitinin yüzeyine yerleştirilen herhangi iki  $C^{(+)}$  ve  $C^{(-)}$  akım elektrotlarından yere akım verildiği düşünülerek model oluşturulmuştur. Elektrotlar  $50$  m'lik ölçüm hattının orta noktasına göre simetrik ve birbirleri ile arasındaki uzaklık  $12$  m olacak biçimde yerleştirilmişlerdir. Modelleme sırasında; her düğüm noktasındaki potansiyel değerleri  $0$ 'dan  $-12$  m'ye değin hesaplanmıştır ve işlem  $y$  yönünde  $h=\Delta x=\Delta y=\Delta z=0.5$  m aralıklı olacak biçimde tüm hatlar için tekrarlanarak, 3B potansiyel dağılımı elde edilmiştir. Hesaplama sonuçlarında da görüldüğü gibi,  $y=25$  m profili üzerinde akım elektrotlarının yerleştirildiği bölümlerde  $\infty$ , elektrotlardan uzaklaştıkça hızla düşen ve tanjant eğrisi olarak tanımlanan kuramsal eğri elde edilmiştir (Şekil 2). Şekilden de görüldüğü gibi, analitik ve sayısal sonuçlar arasında iyi bir uyum vardır. Şekil 3'te hesaplanan 3B potansiyelin yüzeyde ve düşey yöndeki dağılımı ile model görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi, pozitif ve negatif potansiyel değerleri kuramsal sonuca uygun olarak simetrik biçimde ortaya çıkmışlardır.

#### 3.2. Fay Modeli

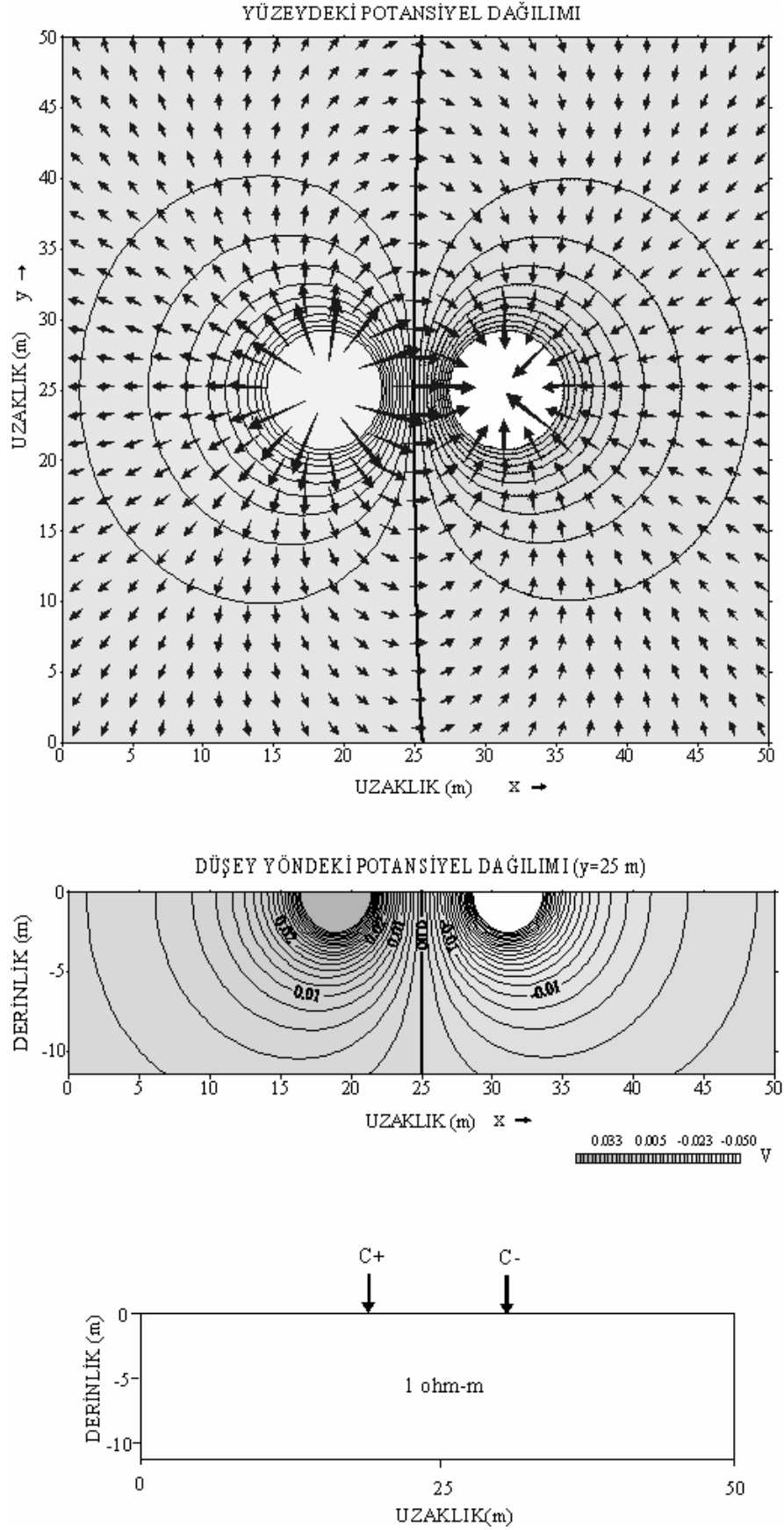
Bu modelde de hesaplama ortamının boyutları ( $50 \times 50 \times 12$  m), akım elektrotlarının yerleştirildiği yer ve grid aralıkları bir önceki model ile aynıdır. Modelde tek değişiklik,  $x$  yönündeki uzanımın orta noktasından başlamak üzere sol tarafında  $200 \Omega\text{m}$ , sağ tarafında ise  $100 \Omega\text{m}$ 'lik farklı öz dirence sahip iki ayrı yapıyı yani bir fayı simgelemesidir. Yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen 3B potansiyelin yüzeyde ve düşey yöndeki dağılımı Şekil 4'te görülmektedir. Yüzeyde ve düşey yöndeki potansiyel değerlerine bakıldığında, yüksek öz dirençli bölümdeki potansiyel değerlerinin daha geniş bir alanda değişim gösterdiği ve pozitif ile negatif potansiyel konturlarının asimetrik özelliğe sahip olduğu görülmektedir. Sıfır konturu hemen hemen yapının sınırında bulunmakta ve böylece sınır açıkça

tanımlanmaktadır. Bu sonuç, akımın ortamdaki dirençlilik (ya da iletkenlik) ile ilişkisini ve davranışını ortaya koymaktadır. Aynı modeli elektrot aralıkları 4 m olan bir Wenner dizilimi ile kaydırma ölçümüne uygun olarak modellediğimizde elde edilen eğri Şekil 5’de görülmektedir. Hem analitik olarak, hem de sayısal olarak hesaplanan bu modelin görünür özdirenç eğrileri arasındaki uyum, sayısal modellemenin oldukça düşük bir yanılğı oranıyla çalıştığını ortaya koymuştur. Wenner dizilimine göre tipik fay durumunu gösteren anomaliden de görüldüğü gibi, ortamın gerçek özdirençleri olan 100 ve 200  $\Omega\text{m}$  eğrilerin kanatlarında açıkça görülmektedir (Şekil 5). Diğer bir fay modeli de 100m uzunluklu ve 5m derinlikli yeraltı ortamının tam orta noktasından sol tarafı 100  $\Omega\text{m}$  (iletken) ve sağ tarafı 1000  $\Omega\text{m}$  (dirençli) özdirenç değerlerine sahip bir yapıdır. Yapı Schlumberger dizilimi kullanılarak 2B olarak yinelemeli sonlu farklar yöntemiyle modellenmiştir. Bir düşey süreksizliğı gösteren yapıya ait görünür özdirenç eğrisi ve kullanılan model Şekil 6’da görülmektedir. Görünür özdirenç eğrisinin her iki kanadının da gerçek özdirenç değerlerine oldukça yaklaştığı görülmektedir.

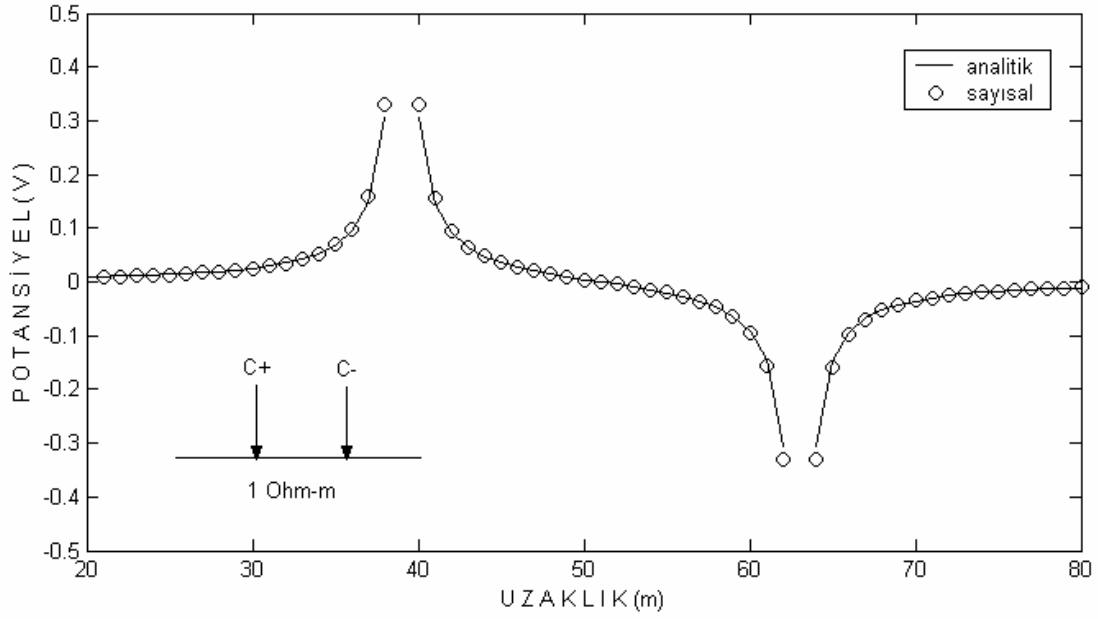
Düşey süreksizlik sınırında özdirenç değerleri 100’dan 850  $\Omega\text{m}$  değerine sıçramakta ve ikinci bir sıçramadan sonrada 980  $\Omega\text{m}$  değerine ulaşmaktadır.

### 3.3. Blok Modeli

Tekdüze bir ortam içinde gömülü durumda bulunan değişik blok yapıların oluşturacakları görünür özdirenç anomalileri modelleme çalışması ile ortaya konmuştur. Bu amaçla oluşturulan model yapılar yinelemeli sonlu farklar yoluyla değerlendirilmiştir. Bunlardan biri Şekil 7’de görülen ve 2x2x2m boyutlarında ve yüzeyden itibaren gömülmüş yapıdır. Yapı 400  $\Omega\text{m}$  özdirenç değerine sahiptir ve 100  $\Omega\text{m}$ ’lik bir ortamın içinde bulunmaktadır. Hesaplama ortamı 15x25x14m boyutlarındadır. Yapının, modelleme sonucunda elde edilen Wenner dizilimine göre görünür özdirenç haritaları sırasıyla AB=3, 9 ve 15m için Şekil 7a,b,c’de görülmektedir. Şekil 7a’da içi boş bir kare ile gösterilen blok yapının bulunduğu yerde AB=3m için en yüksek özdirenç değerleri bulunmaktadır ve karenin dışında dizilim geometrisine bağlı olarak bu değerler hızla düşerek, tekdüze bir ortamı simgelemektedir. AB=9m için oluşturulan görünür özdirenç haritasında ise, yüksek özdirençli değerler model yapıya uygun anomali vermesine karşın, elektrot aralığının büyümesinden dolayı bloğu çevreleyen ortamdaki görünür özdirenç dağılımları tekdüzelikten uzaklaşmaktadır. Model yapı üzerinde (116-125  $\Omega\text{m}$ ) ve çevresinde (92-116  $\Omega\text{m}$ ) görünür özdirenç değerleri önemli oranda düşmüştür (Şekil 7b). AB=15 m olduğunda ise, alandaki görünür özdirenç değerleri 85-106  $\Omega\text{m}$  arasında değişmekte ve yapı üzerinde de değerler 103-106  $\Omega\text{m}$  arasında değerlere sahip olmaktadır (Şekil 7c). Şekillerden de görüldüğü gibi, bu tür yüzeylenmiş blok modelin görünür özdirençleri elektrot aralıklarının açılmasıyla hızla azalmakta ve anomali tiplerinde de önemli değişiklikler ortaya çıkmaktadır. Şekil 8a, Şekil 8b ve Şekil 8c’de yapının orta noktası, 2.5 ve 5m ötesinden geçen profil kesitleri 3 ayrı derinlik düzeyinde görülmektedir. Yapının izdüşüm ve kesit görüntüsü de Şekil 8d ve Şekil 8e’de verilmektedir. Şekil 8a’dan da görüldüğü gibi, yapının bulunduğu bölümlerdeki görünür özdirenç değerleri yüksek değerler verirken, bu değerlerde uzaklık ve derinlik artışıyla birlikte hızlı bir azalma görülmektedir. Ayrıca profillerin yapıdan uzaklaşmasıyla da yüzeyden derine doğru azalan ve düşük zıtlıklı görünür özdirenç kesitleri elde edilmektedir (Şekil 8b ve Şekil 8c).



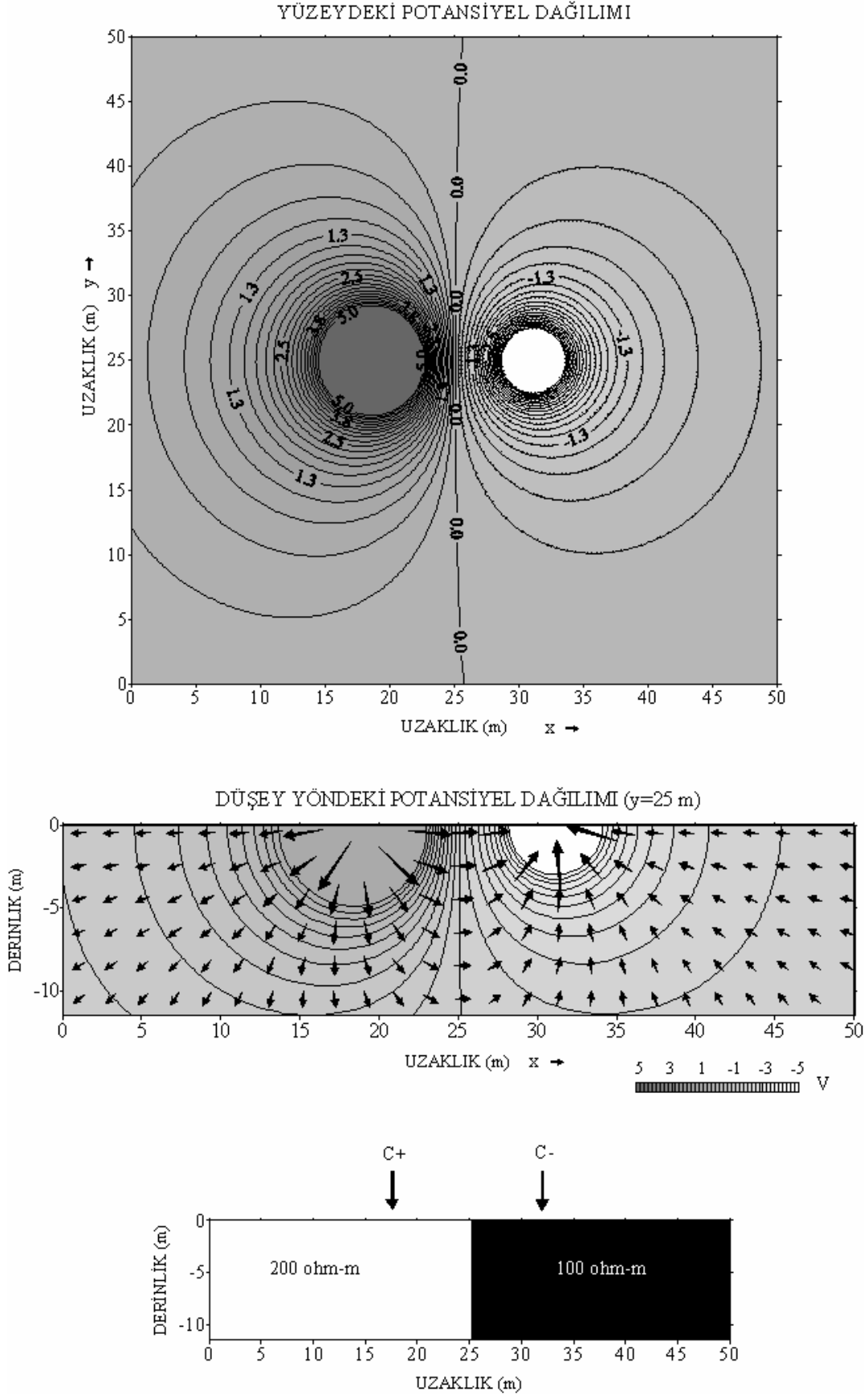
Şekil 2. Homojen yarı sonsuz ortam yüzeyindeki potansiyel dağılımı ve elektrik alan vektörleri (üst), düşey yöndeki potansiyel dağılımı (orta) ve model (alt).



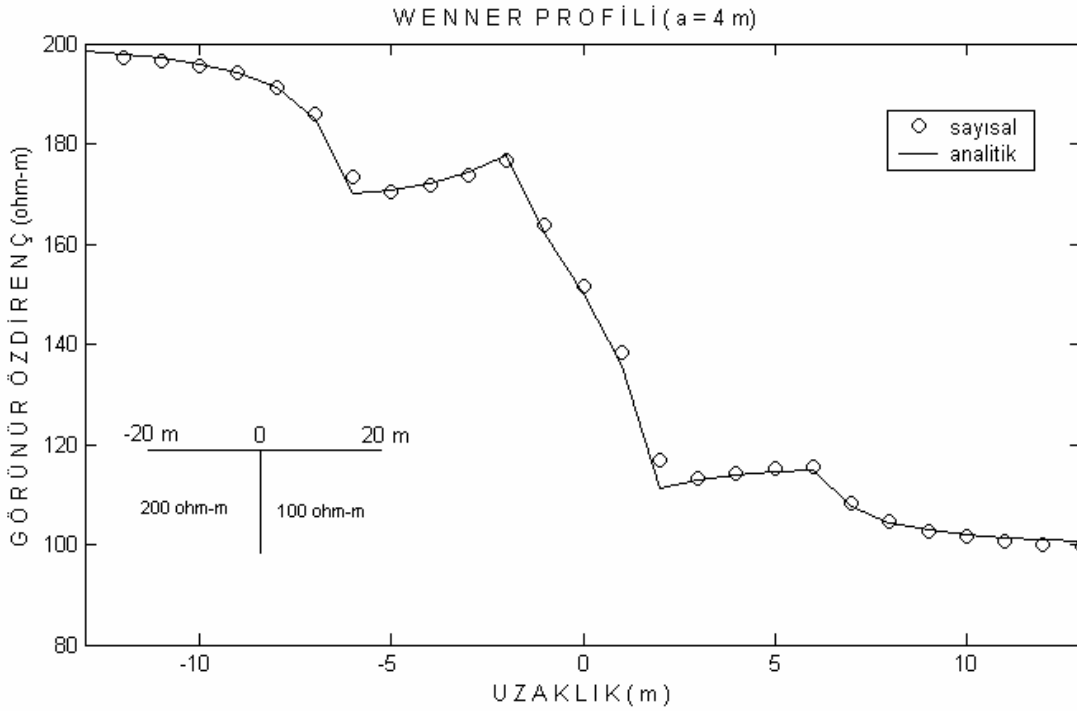
Şekil 3. Homojen yarı sonsuz bir ortamdaki potansiyel dağılımına ait analitik ve sayısal çözümlerin karşılaştırılması

Diğer model ise 2x4x6 m boyutlarında ve yüzeyden 1 m aşağıda gömülü durumdadır. Yapının öz direnci 400  $\Omega$ m ve gömüldüğü ortamın öz direnci de 100  $\Omega$ m'dir. Hesaplama ortamı, dizilim türü ve açılım oranları ise bir önceki modelle aynıdır. Şekil 9a, Şekil 9b ve Şekil 9c'de sırasıyla AB = 3, 9 m ve 15 m için hesaplanan görünür öz direnç haritaları verilmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi, yapının içinde öz direnç değerleri yükselir ve öz direnç zıtlığı elde edilirken (Şekil 9b), diğer durumlarda öz direnç zıtlığının oldukça azaldığı görülmektedir. Görünür öz direnç anomalileri yapı içinde açılım doğrultusunda bir uzanım göstermekle birlikte yapı dışında yapı uzanımına benzer anomaliler vermektedir. Yapının iz düşüm ve kesit görüntüleri Şekil 9d ve Şekil 9e'de verilmektedir. Yapının orta noktası, 2.5 ve 5 m ötesinden geçen profil kesitleri ise 3 ayrı derinlik düzeyinde Şekil 10a, Şekil 10b ve Şekil 10c'de görülmektedir. Profil I ve II yapıyı kestiğinden, her ikisinde de yapı etkisinden kaynaklanan ve yapının bulunduğu bölümde derine doğru uzanan yüksek öz dirençli anomaliler gözlenmektedir (Şekil 10a, Şekil 10b). Oysa, yapının uzağında bulunan profil III bir önceki modelin sonucuna benzer bir biçimde öz direnç değerleri yüzeyden derine doğru azalan bir özellik göstermektedir (Şekil 10c). Böylece yapının derine doğru gömülmesiyle görünür öz direnç anomalilerinin genliğinde önemli değişimler ortaya çıkmaktadır.





Şekil 4. Düşey süreksizliğin yüzeyindeki potansiyel dağılımı (üst), düşey yöndeki potansiyel dağılımı ve elektrik alan vektörleri (orta) ve model (alt).



Şekil 5. Düşey süreksizlik üzerindeki bir Wenner profilinin (a=4m) analitik ve sayısal görünür öz direnç eğrileri.

#### 4. SONUÇLAR

Üç boyutlu öz direnç modellerinin bir yinleme tekniği olan aşırı ardışık rahatlatma (AAR) ile yapılan sonlu fark çözümleriyle, düz çözüm öz direnç modellemesi açısından aşağıda belirtilen birçok kolaylık ve avantaj ortaya çıkmıştır.

Sonlu farklarla 2B ve 3B heterojen ortamlar kolayca modellenebilmektedir. Özellikle çok sayıda denklem sisteminin çözülmesine gereksinim duyulan 3B modellemede yinlemeli yöntemle çözüm direkt yöntemlere göre önemli bir avantaj sağlamaktadır. Analitik çözüm ve yinlemeli sonlu farklar yöntemi ile elde edilen sayısal çözüm arasındaki uyum oldukça yüksektir.

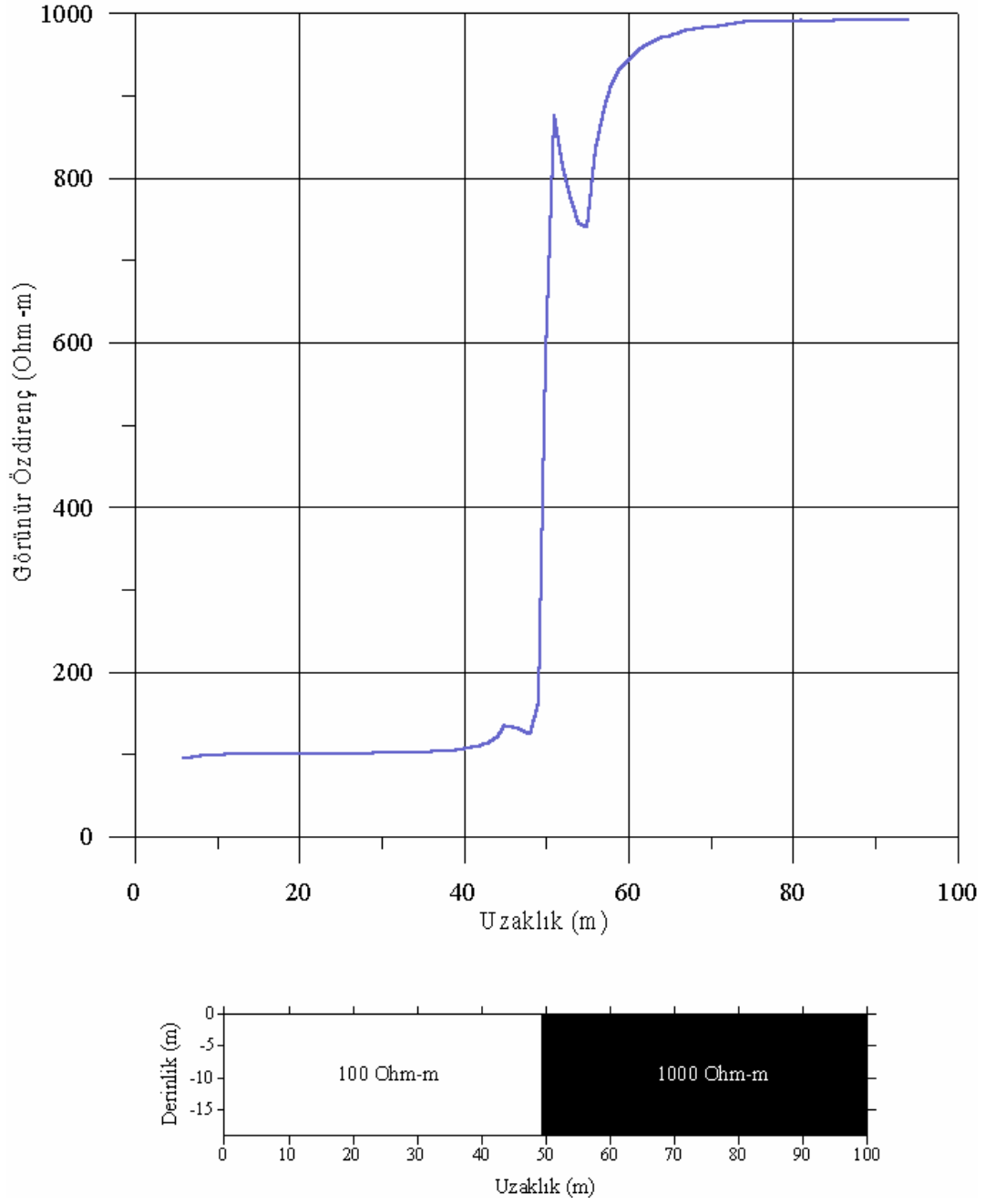
Yatay ve düşey süreksizlikler üzerinde yapılan kuramsal modelleme çalışmalarıyla; pratikte karşılaşılan modellerin değişik elektrot düzenleri içinde kısa süreli bir bilgisayar zamanı ile çözülmesi yönteminin kullanımı açısından bir avantajdır.

Bu yöntem yardımıyla, analitik olarak çözülemeyen karmaşık jeolojik yapılara ait modellemeler kısa sürede gerçekleştirilerek, yorumlamaya katkı sağlanabilir.

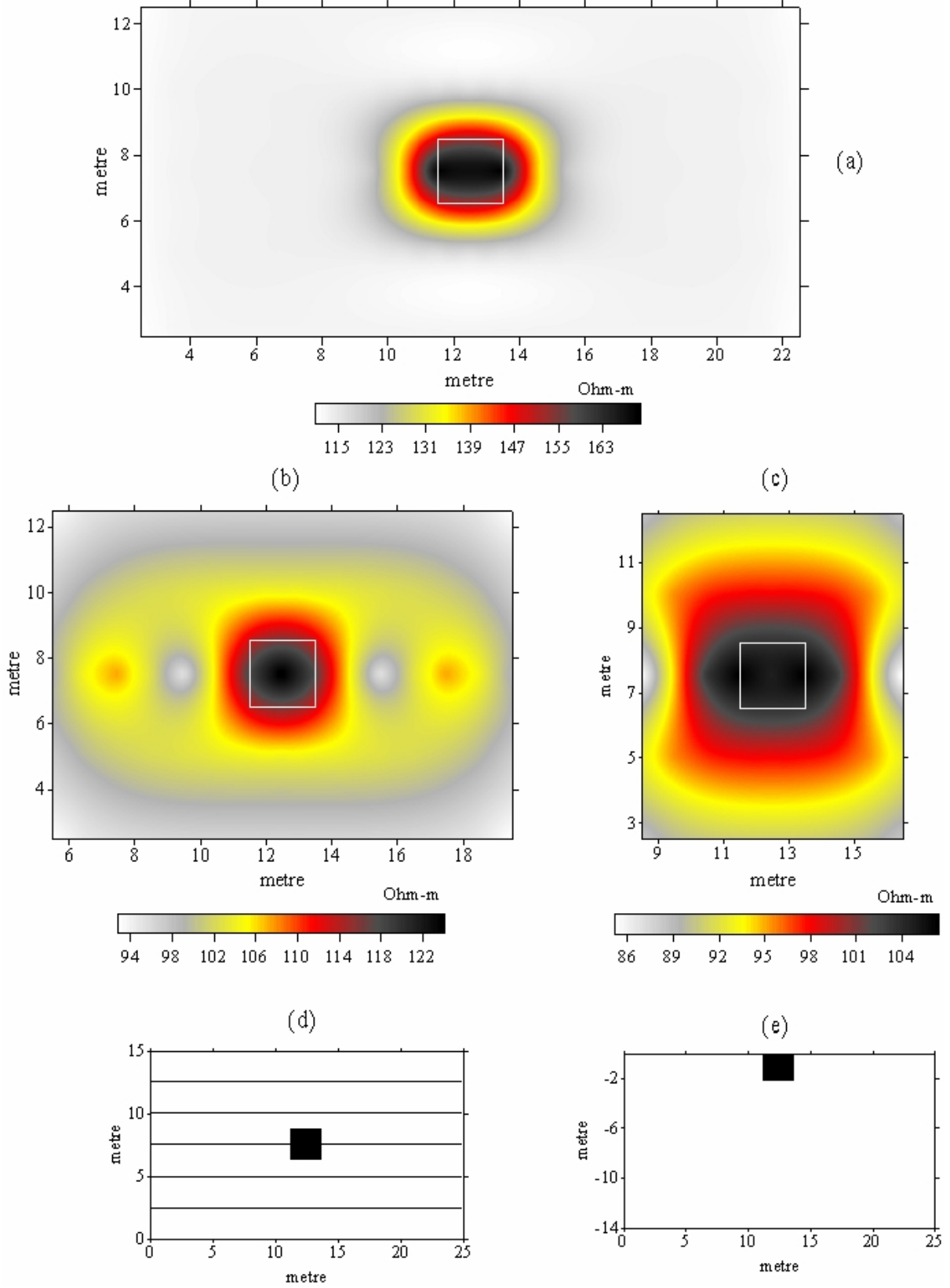
Değişik yapılar üzerinde yapılan modellemelerde belirlenen özellikler şu biçimde tanımlanabilir;

Anomali tipi ve genlikleri açılım geometrisi ve açılım aralığıyla önemli değişimler göstermektedir.

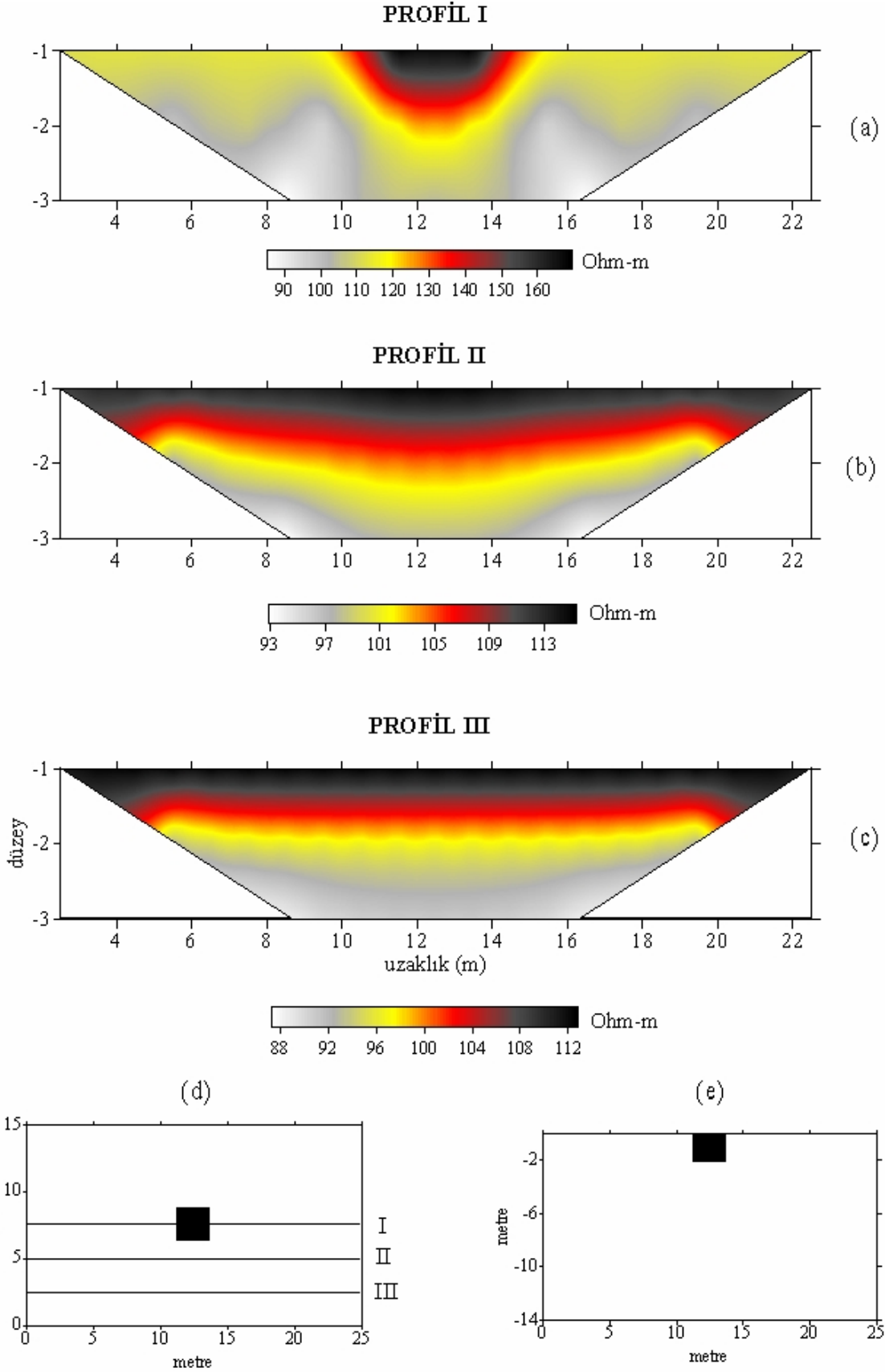
Yapının gömülü olması, görünür öz direnç genliklerini önemli oranda azaltmaktadır.



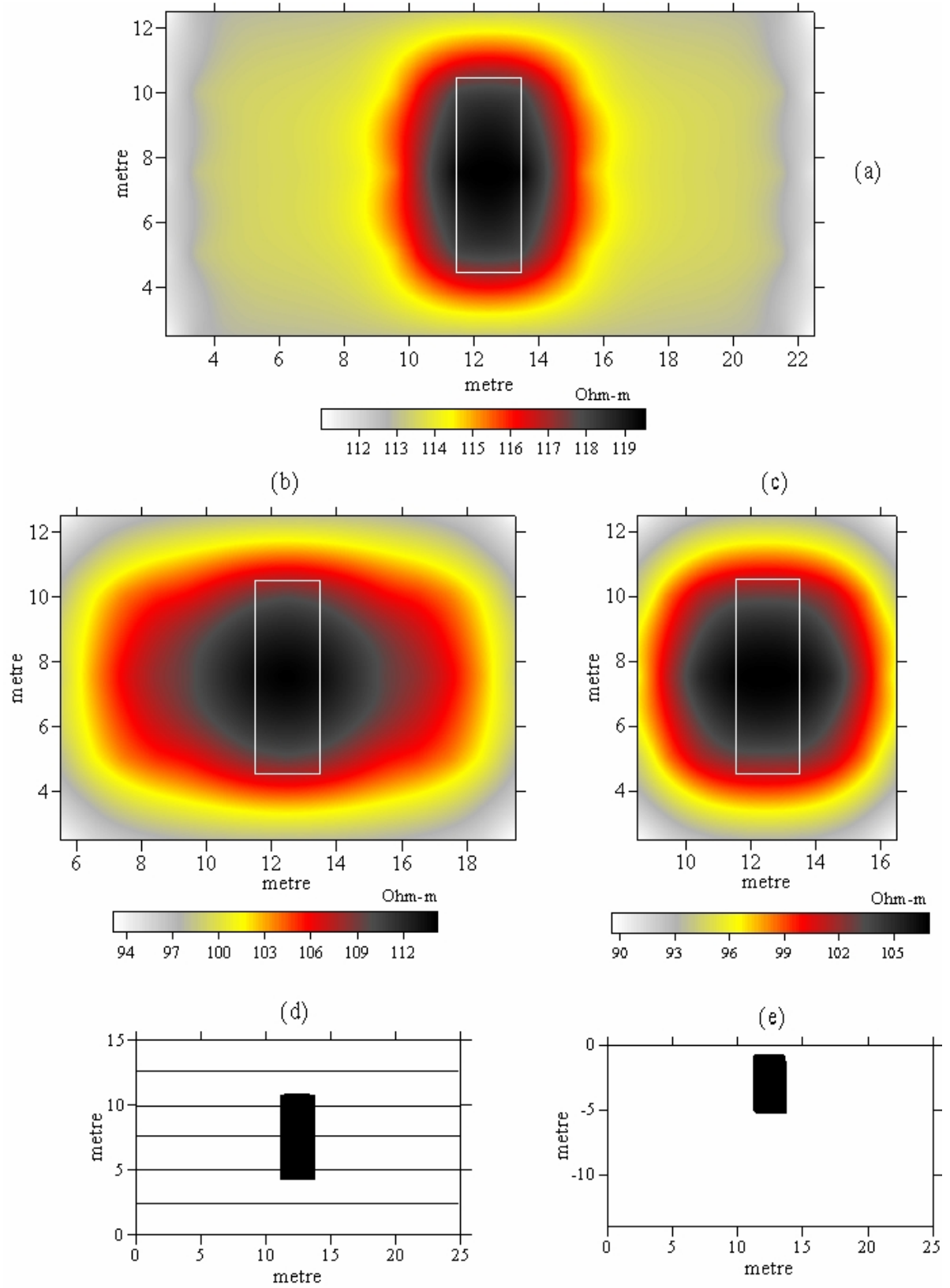
Şekil 6. Düşey süreksizlik üzerindeki bir schlumberger profilinin sayısal olarak hesaplanmış görünür öz direnç eğrisi.



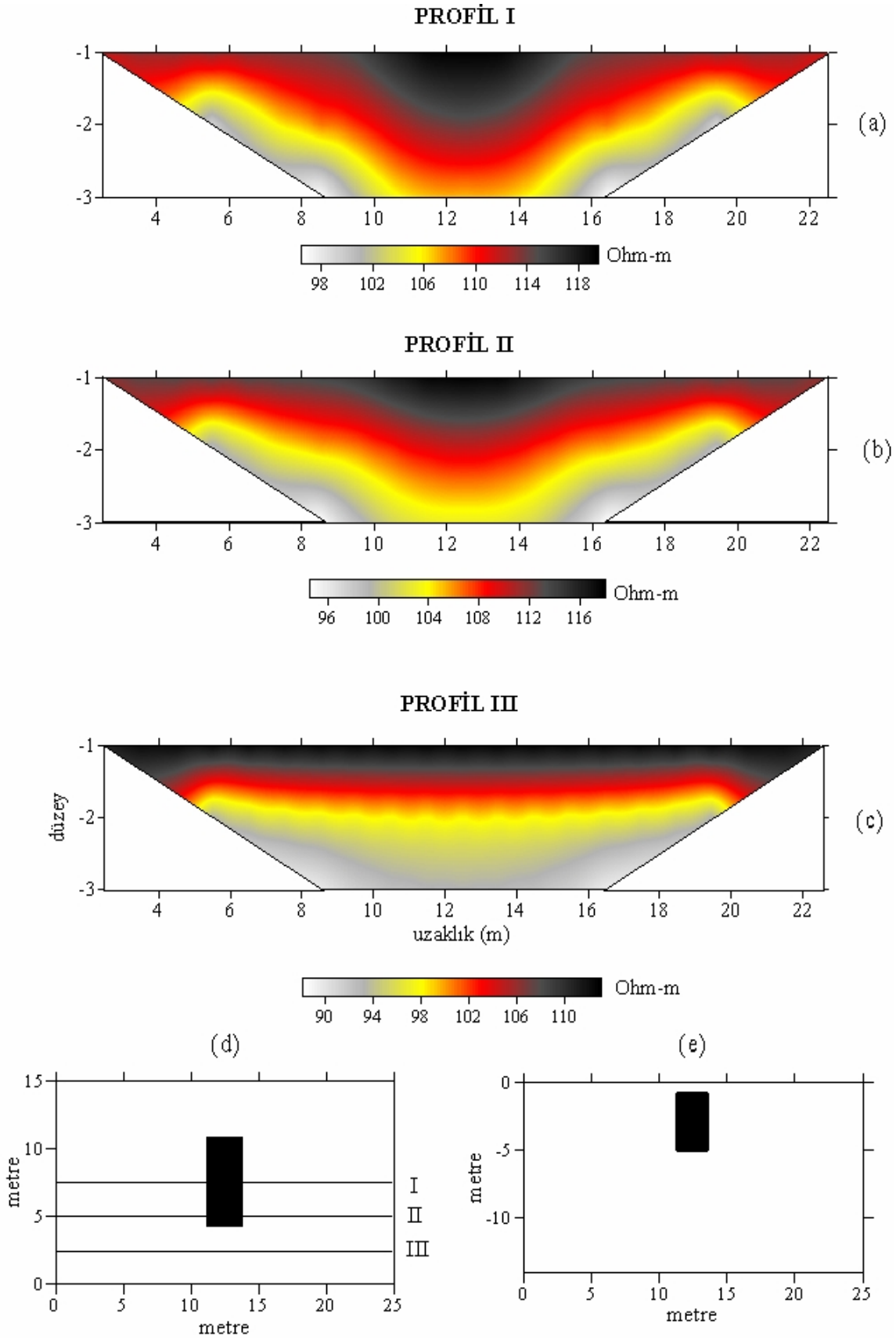
Şekil 7. Yüzeyli bir blok modeli (2x2x2 m) a)  $AB = 3$ , b)  $AB = 9$  ve c)  $AB = 15$  m için görünür öz direnç haritaları, d) modelin kuşbakışı görünüşü ve modellemede kullanılan profiller, e) modelin  $y = 7.5$  m'deki düşey kesiti



Şekil 8. Yüzeylemiş bir blok modeli (2x2x2 m) a) profil I, b) profil II ve c) profil III için görünür öz direnç andıran kesitleri, d) modelin kuşbakışı görünüşü, e) modelin  $y = 7.5$  m'deki düşey kesiti



Şekil 9. Gömülü bir blok modeli (2x4x6 m) a) AB = 3, b) AB = 9 ve c) AB = 15 m için görünür öz direnç haritaları, d) modelin kuşbakışı görünüşü ve modellemede kullanılan profiller, e) modelin  $y = 7.5$  m'deki düşey kesiti



Şekil 10. Gömülü bir blok modeli (2x4x6 m) a) profil I, b) profil II ve c) profil III için görünür öz direnç andıran kesitleri, d) modelin kuşbakışı görünüşü, e) modelin  $y = 7.5$  m'deki düşey kesiti

**KAYNAKLAR**

- Aiken C.L., Hastings D.A., Sturgul J.R. (1973): "Physical and Computer Modelling of Induced Polarization", *Geophysical Prospecting*, 21, 763-782.
- Coggon J.H. (1971): "Electromagnetic and Electrical Modeling by the Finite Element Method", *Geophysics*, V. 36, 132-155.
- Dey A., Morrison H.F. (1979a): "Resistivity Modeling for Arbitrarily Shaped Two-dimensional Structures", *Geophysical Prospecting*, 27, 106-136.
- Dey A., Morrison H.F. (1979b): "Resistivity Modeling for Arbitrarily Shaped Three-dimensional Structures", *Geophysics*, 44, 753-780.
- Jepsen A.F. (1969): "Numerical Modeling in Resistivity Prospecting", Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley.
- Mufti I.R. (1976): "Finite-difference Resistivity Modelling for Arbitrarily Shaped Two-dimensional Structures", *Geophysics*, 41, 62-78.
- Mufti I.R. (1978): "A Practical Approach to Finite-Difference Resistivity Modelling", *Geophysics*, 43, 930-942.
- Pridmore D.F., Hohmann G.W., Ward S.H., Sill, W.R. (1981): "An Investigation of Finite-Element Modelling for Electrical and Electromagnetic Data in Three Dimensions", *Geophysics*, 46, 1009-1024.
- Scriba, H. (1981): "Computation of the Electric Potential in Three-dimensional Structures", *Geophysical Prospecting*, 29, 790-802.