

**Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Jeofizik Mühendisliği Bölümü**

**JFM316 ELEKTRİK YÖNTEMLER
LİSANS DERS NOTU**

II- DOĞRU AKIM ÖZDİRENÇ YÖNTEMİ

Dr. M. Emin CANDANSAYAR

Ankara Üniv., Müh. Fak., Jeofizik Müh. Böl., 06100, Beşevler-Ankara.

E-posta: candansa@eng.ankara.edu.tr

**Mart 2007
ANKARA**

DOĞRU AKIM ÖZDİRENÇ YÖNTEMİ

1. GİRİŞ

Özdirenç (Resistivity) yöntemi olarak da bilinen doğru akım özdirenç (DAÖ) yöntemi, arama jeofiziği'nde kullanılan başlıca jeofizik yöntemlerdendir. Bu yöntemde amaç, yerinin jeolojik yapısını, elektrik özelliğine (özdirenç) göre haritalamaktır. Yöntem, maden, mineral, jeotermal enerji kaynağı ve petrol aramaları ile hidrojeoloji ve mühendislik jeolojisi problemlerinin çözümünde kullanılır. Özellikle 1980'lerden itibaren, arkeolojik yapıların aranmasında da yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır.

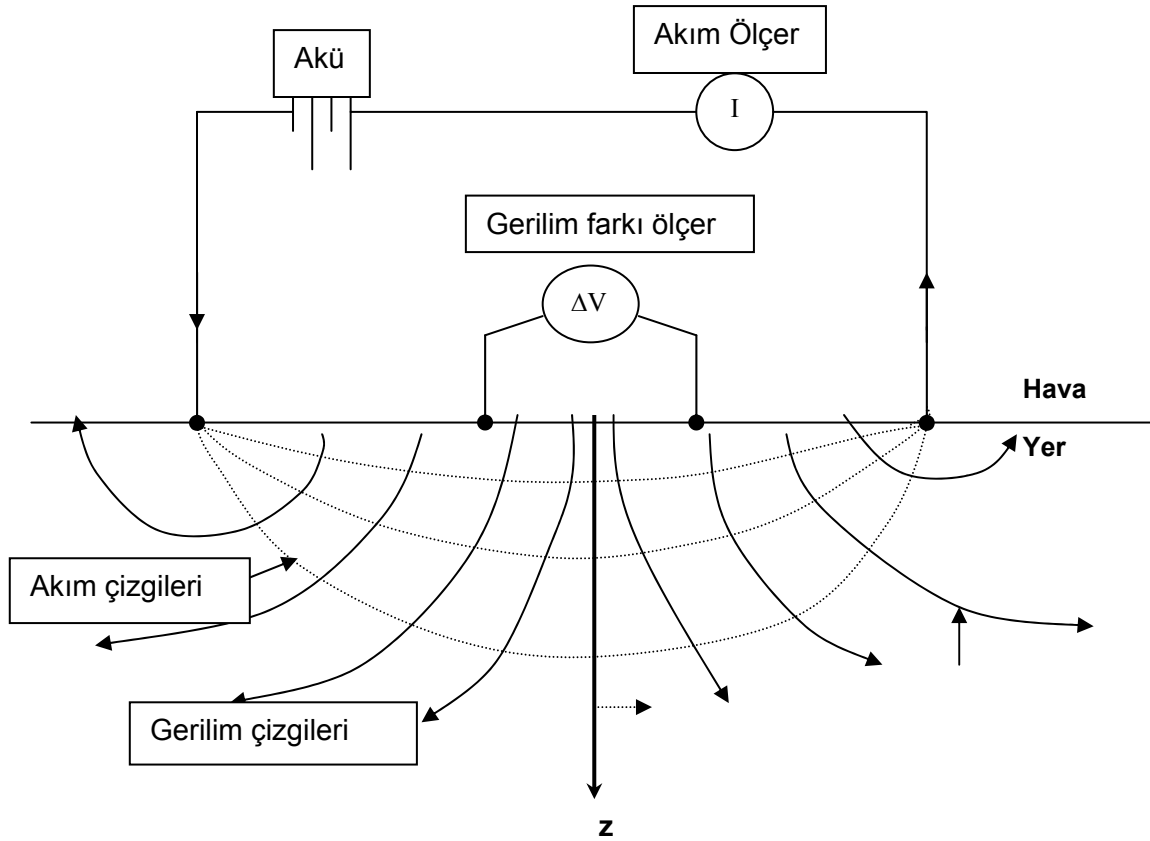
DAÖ yöntemi; kuramı ve uygulamasının kolay olması, ölçü aletinin basit olması ve etkili sonuçlar vermesinden dolayı günümüze kadar yaygın olarak kullanılmıştır.

Yöntem hakkında İngilizce'nin yanı sıra, dilimizde de birçok kaynak bulunmaktadır. Fakat gelişen bilgisayar ve elektronik teknolojisine bağlı olarak, yöntemde de birçok gelişme olmuştur. Örneğin çok-elektrodlu (multi-elektrode) ölçü düzenekleri sayesinde, artık veriler çok daha hızlı toplanmakta ve ölçülen bu veriler iki-boyutlu (2-B) ve üç-boyutlu (3-B) yorumlanmaktadır.

2. YÖNTEM

2.2. Ölçü Sistemi

DAÖ ölçü düzeneği Şekil 2.1'deki gibi gösterilebilir. Bu düzenekte, bir güç kaynağı (akü), bir akım ölçer (current meter) ve bir gerilim farkı ölçer (voltage meter) gereklidir. Burada, iki noktada yere çakılmış elektrodlar yardımı ile akım uygulanır (A ve B akım elektrodları) ve diğer iki noktada çakılmış elektrodlar arasında oluşan gerilim farkı ölçülür (M ve N gerilim elektrodları). Kullanılan elektrodlar genelde paslanmaz çelik'ten yapılmıştır. Eskiden, gerilim elektrodları için bakır-sülfat çözeltili fincanlar (pot'lar) kullanılırdı. Fakat günümüzde imal edilen ölçü aletleri, doğal kutuplaşma (self potensiyel) etkisini giderecek şekilde imal edildiğinden gerilim elektrodu için de çelik'ten yapılmış elektrodlar kullanılır.



Şekil 2.2. Arazide ölçü sistemi. A ve B akım elektrodları, M ve N gerilim elektrodları. Akım çizgileri noktalı çizgi ve buna dik gerilim çizgileri düz çizgi olarak çizilmiştir. (Van Nostran ve Cook' dan (1966) alınmıştır).

Burada A' dan (Source) yere verilen akım, yer içinden geçer ve B' ye (Sink) ulaşır. Bu akımdan dolayı, M ve N elektrodlarının arasında oluşan gerilim farkı ölçülür. Ölçülen bu gerilim farkı, tüm elektrodlar arasındaki uzaklığa ve ortamın jeolojik yapısına bağlıdır. Ayrıca elektrodların çakıldığı yer' de ölçülen gerilim farkını etkiler. Örneğin, akım elektrodları, iki taş arasına sıkıştırılırsa, akım geçmez ve M ve N arasında gerilim farkı oluşmaz.

2.2. Yarı Sonsuz Homojen Bir Ortamda Gerilim ve Özdirenç Bağlılıları

Ohm kanunu (2.2.9) ve statik elektrik alanın konservatif olması özelliklerinden (2.2.10) yararlanarak homojen ve sonsuz izotrop ortamın herhangi bir noktasından nokta akım kaynağı uygulandığında kaynaktan R kadar uzaklıktaki akım yoğunluğu aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$J = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \phi}{\partial R} \quad (2.1)$$

Akım yoğunluğu; akımın, geçtiği alana oranı olarak,

$$J = \frac{I}{A} \quad (2.2)$$

şeklinde tanımlanır. Burada A nokta kaynağının etki alanıdır (metrekare). Kaynaktan R uzaklıktaki noktaların bir küre yüzeyi oluşturduğu düşünülürse ve (2.1) ile (2.2) eşitlenirse

$$\frac{I}{A} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \phi}{\partial R} \quad (2.3)$$

elde edilir. ϕ gerilimi (2.3) denkleminin integrali alınarak,

$$\phi = \frac{\rho I}{4\pi R} + C \quad (2.4)$$

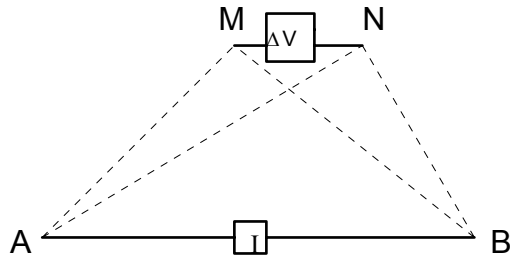
şeklinde çözülebilir. Kaynaktan çok uzak noktalarda gerilim sıfır olması gerektiğinden (2.4) denklemindeki C integrasyon sabitinin değeri sıfır olmalıdır. Yeryuvarı hava ile sınırlı ve iletildiğinden, ortamın yarısonsuz olması gerekir (Başokur, 1984). Denklem (2.4), yarısonsuz ortam için aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\phi = \frac{\rho I}{2\pi R} \quad (2.5)$$

Pratikte, akım yeryüzünden I (source) ve $-I$ (sink) olmak üzere iki elektrodla uygulanır ve gerilim bütün noktalarda bu iki kutuplu (bipolar) düzenele ölçülür (Bhattacharya ve Patra, 1968).

I akımı homojen ve izotrop yarısonsuz bir ortama, yeryüzünden A ve B noktalarındaki elektrodlar ile verilsin. Bu durumda M ve N noktalarındaki gerilim elektrodları arasındaki gerilim farkı aşağıdaki gibi hesaplanır (Şekil 2.1).

$$\Delta\phi = \phi_M - \phi_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad (2.6)$$



Şekil 2.2. Elektrod dizilimlerinin genel gösterimi.

Denklem (2.6) dan homojen ortamın özdirenci

$$\rho = K \frac{\Delta\phi}{I} \quad (2.7)$$

şeklinde çözülebilir. Burada

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}\right)} \quad (2.8)$$

olduğu görülmektedir. K geometrik faktör olarak isimlendirilir ve uzaklık boyutundadır.

2.2.2. Görünür Özdirenç Kavramı

Denklem (2.6) da hesaplanan gerilim farkı elektrodlar arasındaki uzaklığa, yere uygulanan akıma ve homojen ortamın özdirencine bağlıdır. Fakat gerçekte yer homojen değildir ve arazide ölçülen gerilim farkı ($\Delta\phi$) kullanılarak (2.7) denkleminde hesaplanan özdirenç; Görünür Özdirenç (GÖ) olarak adlandırılır. GÖ, jeolojik yapının şekline, özdirencine ve kullanılan elektrod dizilimine bağlıdır. GÖ tanımlamasına göre; ortam homojen ve izotrop ise ölçülen GÖ ortamın özdirencine eşit olmalıdır. Tabakalı bir ortamda GÖ eğrisi AB/2' nin küçük değerleri için birinci tabakanın özdirencine, AB/2' nin büyük değerleri için son tabakanın özdirencine asimtot olmalıdır. Ayrıca GÖ, AB/2 nin ara değerlerinde de ara tabakaların özdirencine yakın olmalıdır (Başokur 1994).

Arazide ölçülen gerilim farkları, homojen ve izotrop ortama ait olmadığından bundan sonraki bölümlerde GÖ kavramı ($\rho_a = \rho$) kullanılacaktır.

2.2. Elektrod Dizilimleri

A, B akım ve M, N gerilim elektrodlarının farklı konumlarına göre farklı elektrod dizilimleri önerilmiştir. Aynı yer için farklı elektrod dizilimi ile ölçülen gerilim farkları ve dolayısı ile GÖ değerleri de farklı olmaktadır. Geleneksel elektrod dizilimleri, elektrodların bir bakışım (simetri) merkezine göre çizgi boyunca dizilmesinden elde edilen; Schlumberger, Wenner, dipol-dipol (dipole-dipole) ve pole-dipol (pole-dipole) dizilimleridir (Şekil 2.2). Bu dizilimlerin yanı sıra, kullanılan çok-elektrodlü ölçü sistemlerine uygun ve uygulamada etkili olan dizilimler önerilmektedir.

Bu dizilimler amaca yönelik seçilmektedir. Schlumberger ve Wenner dizilimi derin amaçlı araştırmalarda kullanılmaktadır. Yanal süreksizliklerin belirlenmesinde ise "pole-dipole" dizilimi iyi sonuç vermektedir. Maden aramacılığında ise daha çok dipol-dipol ve "Gradient" dizilimleri kullanılmaktadır. Ülkemizde en çok kullanılan Schlumberger elektrod dizilimi bölüm 6.3' de ayrıntılı olarak anlatılmaktadır.

Arkeolojik amaçlı çalışmalarda ise yarım-Wenner, yarım-Schlumberger, twin probe (Aspinall ve Lynam, 1970), Gradient (Schlutz, 1985), odaklanmış (focused) dizilimler (Gravinetti, 1967), üç gerilim elektrod (Wenner α , Wenner β ve Wenner γ) (Carpenter ve Haberjam, 1956), iki-yönlü üç-elektrod (Candansayar ve diğ., 1999; Candansayar ve Başokur, 2001) dizilimleri kullanılmaktadır. Bu dizilimlerin birçoğu, araştırmacılar tarafından incelenmiş ve arkeolojik araştırmalarda geleneksel dizilimlerden daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir (Brizzollari ve Bernabini 1979, Orlando ve diğ., 1987).

Elektrod Dizilimi	Geometrisi	K	Ölçülen
(a) Schlumberger		<p>Genel olarak</p> $K = \frac{\pi}{4} MN \left[\frac{AB^2}{MN^2} - 1 \right]$ <p>dir. Eğer, $MN=a$ ve $AM=NB=na$ alınırsa $\pi n(n+1)a$</p>	$\rho_a(AMNB)$
(b) Wenner		$2\pi a$	$\rho_a(AMNB)$
(c) Dipol-dipol		$\pi n(n+1)(n+2)a$	$\rho_a(ABMN)$
(d) "Pole-dipol" sol (AMN)		$2\pi n(n+1)a$	$\rho_a(AMN)$
(e) "Pole-dipol" sağ (MNB)		$2\pi n(n+1)a$	$\rho_a(MNB)$
(f) İki-Yönlü Üç-Elektrod (İYÜE) dizilimi		$2\pi n(n+1)a$	$\rho_a(AMN)$ ve $\rho_a(MNB)$

Şekil 2.2. Kullanılan başlıca elektrod dizilimleri. Burada $n=1,2, \dots$ dir.

2.2.2. Çok-Elektrodlü Ölçü Sistemi ve İki-Yönlü Üç-Elektrod Dizilimi

DAÖ yöntemini arazide uygulamak zahmetli ve pahalı olduğundan eskiden amaca yönelik, profil ölçüsü veya düşey elektrik sondajı verisi toplanırdı. Günümüzde geliştirilen çok-elektrodlü (multi-electrod) düzenekler sayesinde ölçü alımı kolay ve hızlı hale getirildiğinden (van Overmeeren ve Ritsema, 1988; Griffiths ve all.,1996; Dahlin,1996) sondaj-profil ölçüleri alınabilmekte ve ölçüler 2-B değerlendirilmektedir.

Çok-elektrodlü ölçü aletleri için iki-yönlü üç-elektrod (İYÜE) dizilimi kullanışlıdır (Şekil 2.2.f). Bu dizilim ile ölçülen verilerin 2-B ters çözümünün, geleneksel elektrod dizilimleri (dört elektrod dizilimleri olan Wenner ve Schlumberger, pole-dipol ve dipol-dipol) ile ölçülmüş verilerin ters çözümünden daha iyi sonuç verdiği gösterilmiştir (Candansayar ve diğ., 1999; Candansayar ve Başokur, 2001). Araştırmacılar, İYÜE diziliminin özellikle arkeolojik araştırmalarda diğer elektrod dizilimlerine göre daha kullanışlı olduğunu göstermişlerdir.

İYÜE diziliminin uygulanmasında, A ve C noktalarından akım uygulanır ve M, N arasındaki ΔV ölçülür. Daha sonra B ve C noktaları için ölçü alımı tekrarlanır. $n=2$ için aynı işlemler uygulanır. n sayısı araştırılmak istenen araştırma derinliğine göre belirlenir. Ölçüler iki yöndende ayrı ayrı akım verilerek alındığından iki yönlü olarak adlandırılır. A ve B noktalarındaki elektrodların nokta akım kaynağı gibi davranabilmesi için $\overline{CO} \geq 5\overline{AO} = 5\overline{BO}$ olmalıdır.

C elektrodu profil doğrultusuna dik uzak bir noktaya yerleştirilirse bir profil ölçüsü boyunca yerinde sabit tutulabilir. Bu dizilimle bir noktada "Düşey Elektrik Sondajı" yapmak için sadece A (veya B) elektrodu her ölçü alımı sonucu 'a' mesafesi kadar kaydırılır. Profil ölçüsü alabilmek için her ölçüm sonunda A,B,M ve N noktalarındaki elektrodlar 'a' mesafesi kadar profil doğrultusu boyunca kaydırılır. C elektrodu profil doğrultusuna dik ve kullanılacak en büyük $AB/2$ değerinde en az on kat uzak bir noktaya konursa, bütün profil ölçüsü boyunca yerinde sabit kalabilir.

İYÜE dizilimi için geometrik katsayı ve GÖ hesabı izleyen şekilde yapılabilir. A ve C noktasından yere akım uygulandığında (2.1) bağıntısından öz direnç , ρ_{aA} (AMN); ve geometrik katsayı- k_A

$$\rho_{aA} = k_A \frac{\Delta V}{I} \quad k_A = 2\pi an(n+1), \quad n = 1,2,3,\dots \quad (2.9)$$

olarak bulunur. Benzer şekilde B ve C elektrodları ile yere akım uygulandığında ρ_{aMNB} (MNB) ve k_B

$$\rho_{aMNB} = k_B \frac{\Delta V}{I} \quad k_B = 2\pi an(n+1), \quad n=1,2,3,\dots \quad (2.10)$$

Eğer A ve B' den akım verilirse, GÖ ve k değerleri

$$\rho_{aAB} = k_{AB} \frac{\Delta V}{I} \quad k_{AB} = \pi an(n+1), \quad n=1,2,3,\dots \quad (2.11)$$

şeklinde bulunur. Burada k_A ve k_B birbirine eşit ve k_{AB} ile

$$k_A = k_B = 2k_{AB}$$

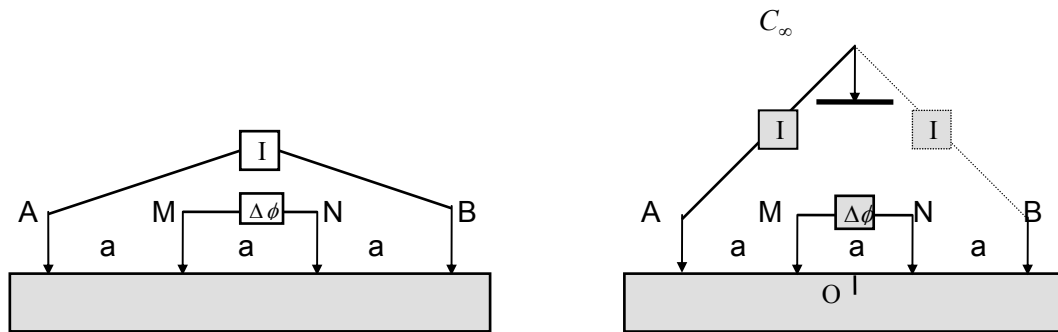
ilişkisi bulunmaktadır. Ayrıca süperpozisyon ilkesine göre

$$\rho_{aAB} = \frac{\rho_{aA} + \rho_{aB}}{2}$$

şeklinde hesaplanabilir (Karous ve Pernu 1985). $n \geq 3$ olması durumunda yukardaki elektrod dizilimi "İki Yönlü Yarım-Schlumberger Dizilimi" olarak isimlendirilebilir.

2.2.2. Wenner ve İki Yönlü Yarım-Wenner dizilimi

Wenner dizilimi Şekil 2.2 de görülmektedir. Bu dizilimde A ve B den akım uygulandığında M ve N gerilim elektrodları arasındaki $\Delta\phi$ ölçülür.



Şekil 2.2. Wenner Dizilimi (a), iki yönlü yarım-Wenner dizilimi

Şekil 2.2' de görüldüğü gibi, $\overline{AB} = \overline{MN} = a$ için k_W denklem (2.8) kullanılarak

$$k_W = 2\pi a \quad (2.12)$$

şeklinde bulunur. ρ_{aW} ise denklem (2.7) kullanılarak

$$\rho_{aW} = k_W \frac{\Delta\phi}{I} \quad (2.12.a)$$

şeklinde hesaplanır.

İki yönlü yarım-Wenner dizilimi Şekil 2.2.b de görülmektedir. Burada A,B ve C noktalarında akım elektrodu, M ve N noktalarında ise gerilim elektrodları vardır. Uygulamada A ve C noktalarından akım uygulanır ve M, N arasındaki $\Delta\phi$ ölçülür. Daha sonra A noktasındaki akım elektrodunun, O merkezine göre simetriği olan B ile C den akım verilerek ölçü alımı tekrarlanır. Ölçüler iki yönden ayrı ayrı akım verilerek alındığından iki yönlü olarak adlandırılır. A ve B noktalarındaki elektrodların nokta akım kaynağı gibi davranabilmesi için $\overline{CO} \geq 5\overline{AO} = 5\overline{BO}$ olmalıdır (Bhattacharya ve Patra, 1968, s.35). A ve C akım elektrodlarından yere akım uygulandığında, k_A ve ρ_{aA} sırasıyla aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$k_A = 4\pi a \quad (2.13)$$

$$\rho_{aA} = k_A \frac{\Delta\phi}{I} \quad (2.14)$$

B ve C den akım verildiğinde ise k_B ve ρ_{aB}

$$k_B = 4\pi a \quad (2.15)$$

$$\rho_{aB} = k_B \frac{\Delta\phi}{I} \quad (2.16)$$

şeklinde hesaplanır. Burada,

$$k_A = k_B = 2k_W$$

olduğu görülmektedir. Homojen ve izotrop bir ortam için

$$\rho_{aA} = \rho_{aB} = \rho_{aW}$$

dir. Ayrıca Wenner elektrod dizilimi ile elde edilen GÖ süperpozisyon (superposition) ilkesine göre (Karus ve Pernu 1985),

$$\rho_{aW} = \frac{\rho_{aA} + \rho_{aB}}{2} \quad (2.17)$$

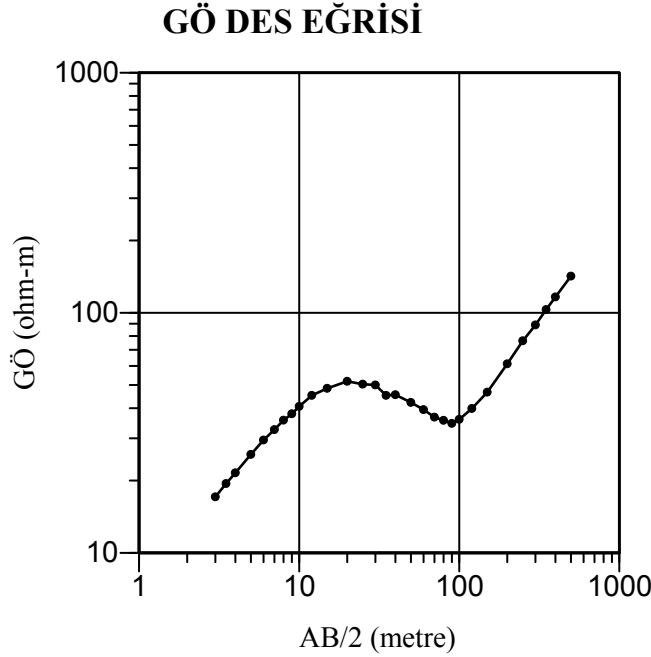
şeklinde de hesaplanabilir.

3. ÖLÇÜ ALIM TEKNİKLERİ VE VERİ SUNUMU

DAÖ yönteminde genel olarak Sondaj Ölçüsü, Profil Ölçüsü ve Sondaj-Profil Ölçüsü olmak üzere üç farklı ölçü toplama tekniği vardır. Ölçülen veriler GÖ sondaj eğrileri, profil eğrileri ve yapam-kesitleri şeklinde sunulur. Ayrıca birbirine paralele profiller boyunca ölçülmüş profil ölçüsü verileri birlikte kullanılarak GÖ seviye haritaları elde edilir.

3.1. Sondaj Ölçüsü (Yer-elektrik Sondajı) ve GÖ Sondaj Eğrisi

Yerelektrik delgisinde (sondajında) (geoelectric sounding) sabit bir nokta bakışım (symmetry) merkezi olacak şekilde, her ölçüm sonucunda bu noktanın iki tarafında elektrodların bir çizgi boyunca açılmasıyla uygulanır. Böylece yeriçinde düşey yöndeki öz direnç değişimi incelenmeye çalışılır. Bu nedenle yöntem, "Düşey Elektrik Sondajı" (DES) (vertical electrical sounding) olarak da isimlendirilmektedir (Bhattacharya ve Patra, 1968).



Şekil 3.1. Schlumberger elektrod dizilimi için DES eğrisi.

Bu şekilde ölçülen veri, x-ekseni AB/2 ve y-ekseni ölçülen GÖ (ρ_a) değerleri olacak şekilde çizilir (Şekil 3.1). Elde edilen eğri, "**DES eğrisi**" olarak adlandırılır. AB/2 ve ölçülen GÖ değerlerinin çok geniş aralıkta değişmesinden dolayı, genel olarak DES eğrisinde her iki eksen' de logaritmikdir. DES ölçüleri, yeraltı suyu, ana kaya üstündeki örtü kalınlığının bulunması vb. amaçlar için kullanılır.

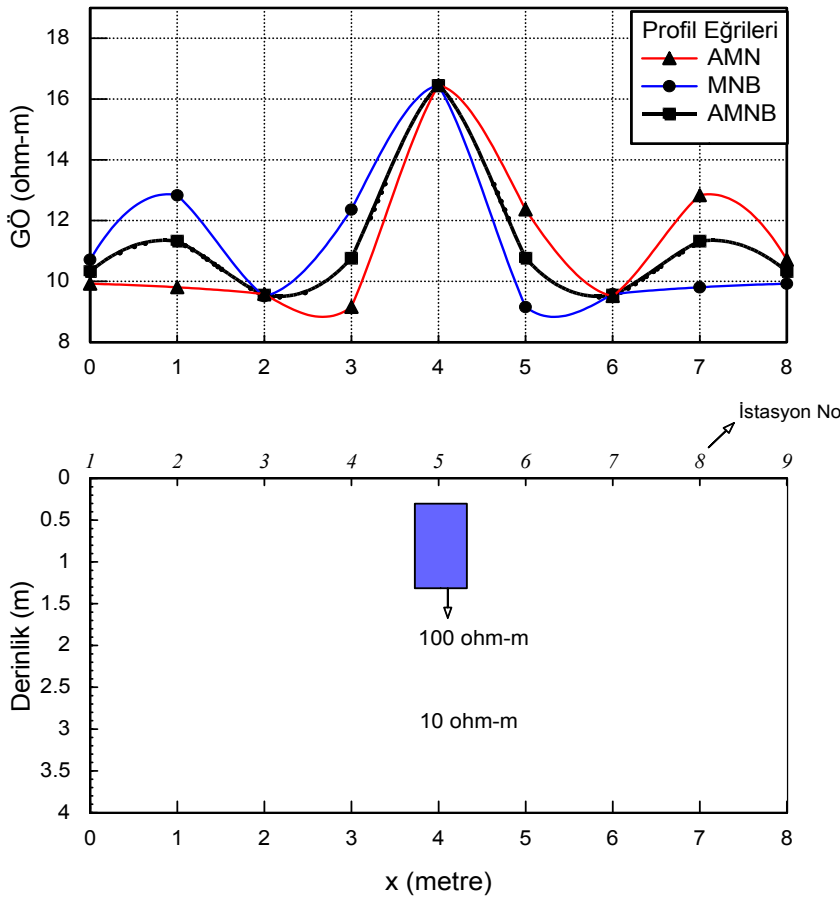
DES verilerinin nicel yorumunu yapmak için bu verilere ters çözüm uygulanmalıdır. DES verileri, yeriçinin 1-B olduğu kabul edilerek, 1-B ters çözüm yapılır. Ters çözüm sonunda, tabakalı ortama ait öz direnç ve kalınlıklar hesaplanır.

3.2. Profil Ölçüsü ve GÖ Profil Eğrisi

Yeriçinde yanal süreksizlikleri belirlemek amacı ile profil ölçüsü alınır. Bunun için, elektrod dizilimine bağlı olarak elektrodlar arası uzaklık araştırılmak istenen derinliğe

göre sabit tutulur (geometrik katsayı sabit). Bu şekilde, bir doğru boyunca her ölçü sonucu elektrodlar belli örnekleme aralıklarında kaydırılır. Burada $AB/2$ uzaklığı, araştırılmak istenen derinliğe bağlı olarak seçilir. Örneğin, 2 m. eninde ve 1m. derinlikteki tarihi bir sur duvarı araştırılmak isteniyorsa, iki-yönlü üç elektrod dizilimi için MN aralığı 2 m. ve $AB/2$ mesafesi 3, 5, 7 m. seviyeleri için profil ölçüsü alınmalıdır. Fakat bazı şartlarda, örtü tabakasının yüksek öz dirençli olması durumunda, bu mesafe yetersiz olabilir ve $AB/2$ mesafesi artırılmak zorunda kalınabilir.

Profil ölçüsü verileri, x-ekseni ölçü noktalarının koordinatı (veya istasyon noktalarının numarası) ve y-ekseni ölçülen GÖ değerleri olacak şekilde bir eğri olarak sunulur. Bu eğri, "**profil eğrisi**" olarak adlandırılır (Şekil 3.2). Klasik elektrod dizilimlerinde, akım ve potansiyel elektrodları bir doğru boyunca bakışım merkezine göre dizilmekte idi. Bu bakışım merkezleri "İstasyon noktaları" olarak isimlendirilmektedir. Ölçülen GÖ değerleri bu noktanın altına yazılmaktadır.



Şekil 3.2. İki-yönlü üç-elektrod dizilimi ve AMNB GÖ profil eğrileri ve GÖ değerlerini hesaplandığı 2-B model.

Profil ölçüsü verilerine çeşitli süzgeçler (Brizollari ve diğ. 1989) ve dönüşümler (Candansayar ve diğ., 1997) uygulanarak, yanal süreksizliklerin daha net görülmesi sağlanmaya çalışılabilir.

Ayrıca, eğer araştırılan yapı biliniyorsa, bu yapıya benzer iki-boyutlu modeller oluşturularak düz çözüm yapılır. Düz çözüm sonucu hesaplanan profil eğrileri ve arazide ölçülen profil eğrileri karşılaştırılarak, yanal süreksizliği oluşturan yapı belirlenmeye çalışılır.

Bu ölçü tekniği daha çok baraj yeri seçimlerinde, ana kaya' da kırık ve çatlakların belirlenmesi, arkeolojik yapıların bulunması, fay yapılarının uzanım ve doğrultularının bulunması amacı ile kullanılır.

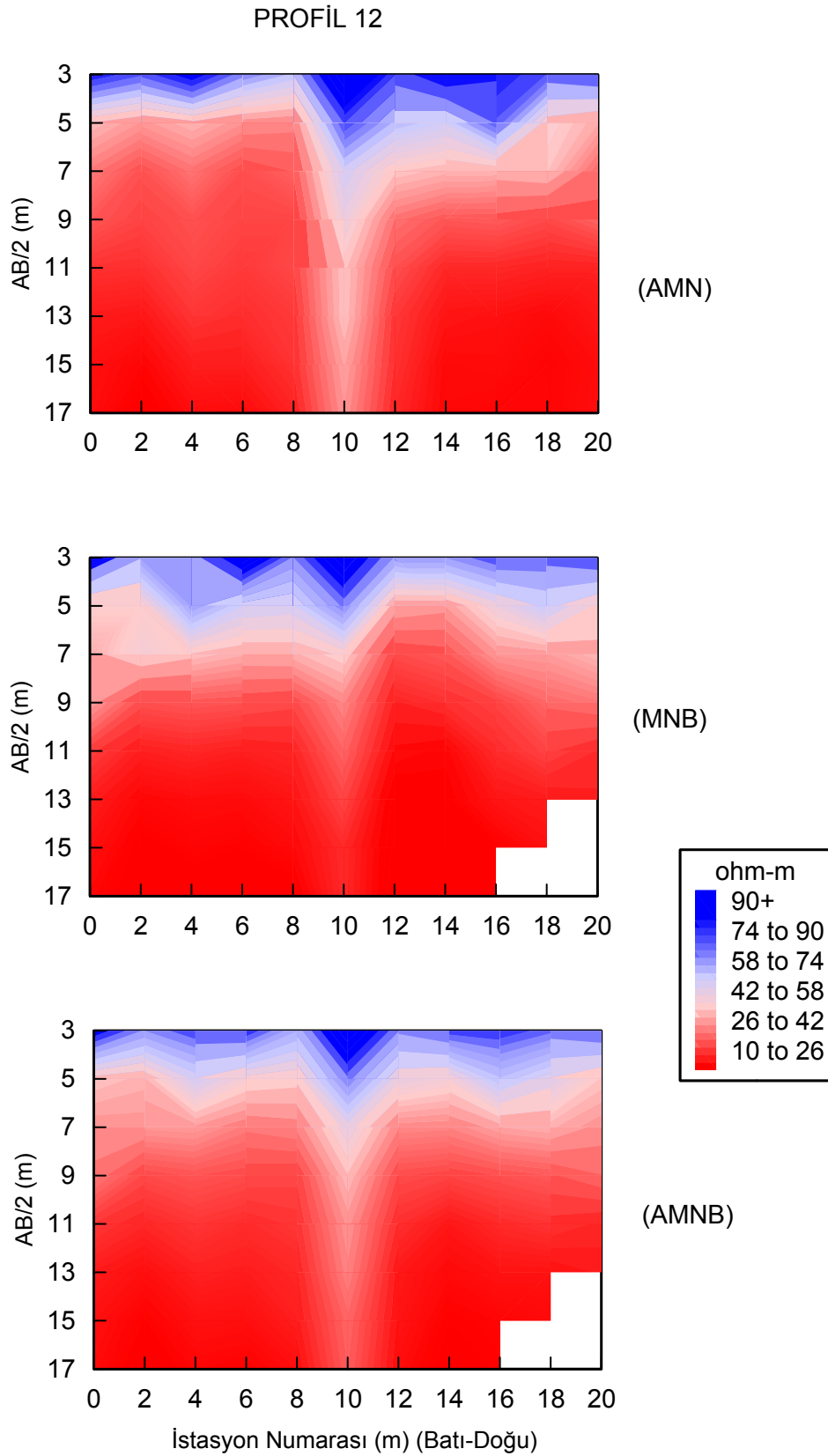
3.3. Sondaj-Profil Ölçüsü ve GÖ Yapma-Kesiti

Bu ölçü tekniği, sondaj ve profil ölçü tekniklerinin birarada kullanılmasıdır. Bir çizgi boyunca, belirlenen noktalarda (istasyonlarda) ölçülen DES verilerinin biraraya getirilmesi ile elde edilir. Burada, tüm istasyonlarda farklı AB/2 değerleri için ölçü alınımında elektrodların doğrultusu aynı olmalıdır. Aksi durumda, ölçü değerleri anizotropiden etkilenir ve bu şekilde ölçülen verinin 2-B ters çözümü yapılamaz. Ölçülen verilerden, her farklı AB/2 seviyesi için profil eğrisi ve her istasyon için sondaj eğrisi elde edilebilir. Ayrıca, tüm veriler kullanılarak yapma-kesit (Pseudo-section) elde edilir (Şekil 3.3).

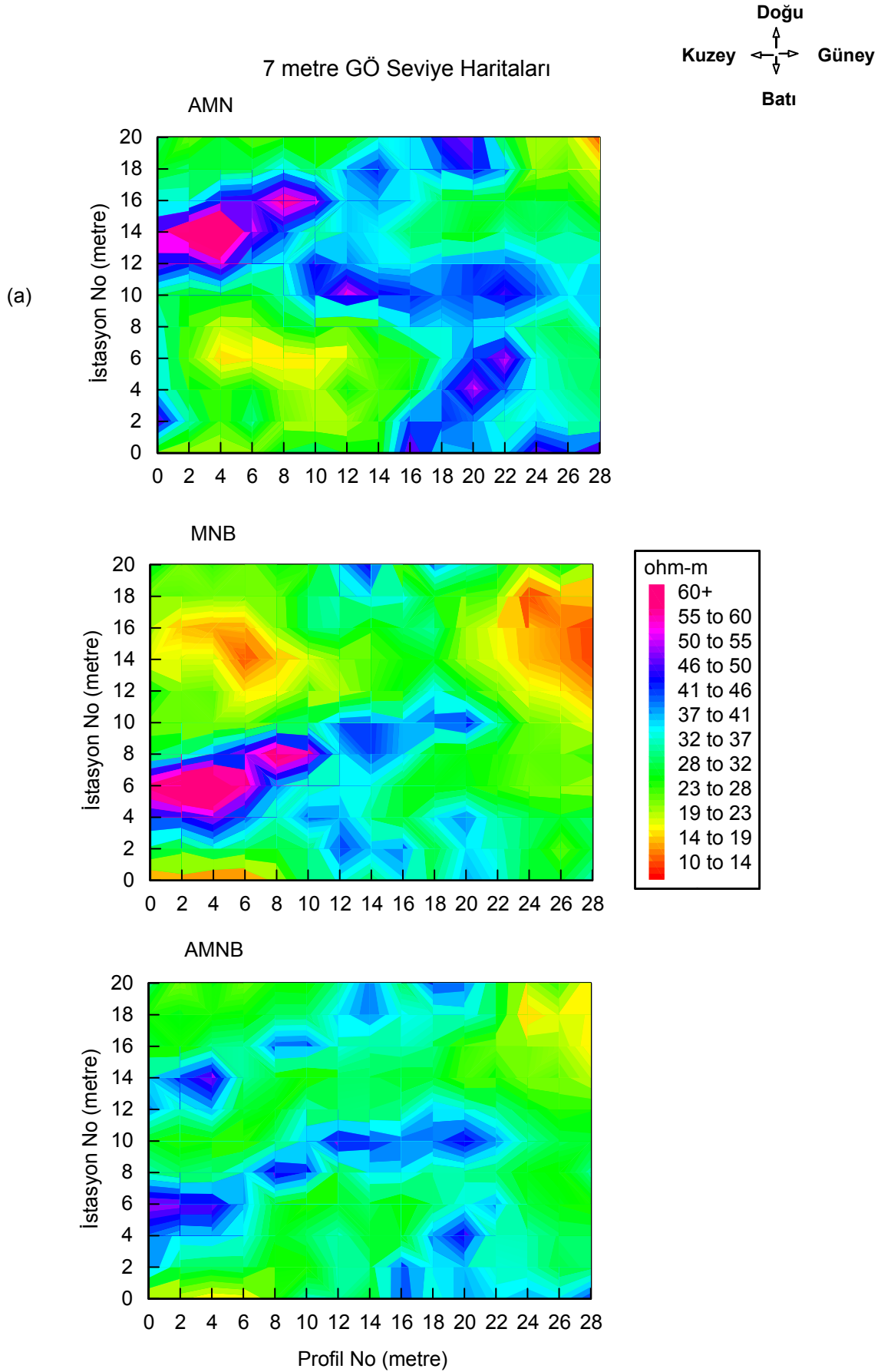
Günümüzde çok-elektrodlü ölçü aygıtları sayesinde, ölçü alımı hızlı ve kolay olmaktadır. Bu nedenle, sondaj-profil ölçüsü, yaygın ölçü tekniği olmuştur. Bu yöntem ile ölçülen verilerden yerindeki hem düşey hemde yatay yöndeki öz direnç yapısı hakkında bilgi edinilebilir. Yöntem DES ve profil ölçüsü tekniklerinin faydalarını kapsamaktadır.

3.3. GÖ Seviye Haritası

x-y düzlemi üzerinde, birbirine paralel çizgiler boyunca, sabit bir AB/2 seviyesi için ölçülmüş profil ölçüsü verileri olsun. Ölçü istasyonlarının bu xy-düzlemi üzerinde işaretlenmesi ve her istasyonda ölçülmüş tüm GÖ verileri ile çizilen kontur haritalarına GÖ seviye haritası denilmektedir. Seviye haritalara, belirli bir seviyede, x- ve y- yönündeki yerin öz direnç yapısı hakkında bilgi verir. Bu tip haritalar, arkeolojik amaçlı araştırmalarda çok kullanılmaktadır. Örneğin, Şekil 2.12' de, Alaca Höyük arkeolojik sahasında AB/2=7 metre seviyesi için GÖ seviye haritası görülmektedir.



Şekil 3. 3. Profil 12 için sırasıyla, AMN (a), MNB (b) ve AMNB (c) yapma kesitleri (Alacahöyük, 1997).



Şekil 3.4. $AB/2=7$ metre için İki-yönlü üç-elektrod dizilimi AMN, MNB ve AMNB GÖ seviye haritaları. (Alacahöyük,1997).

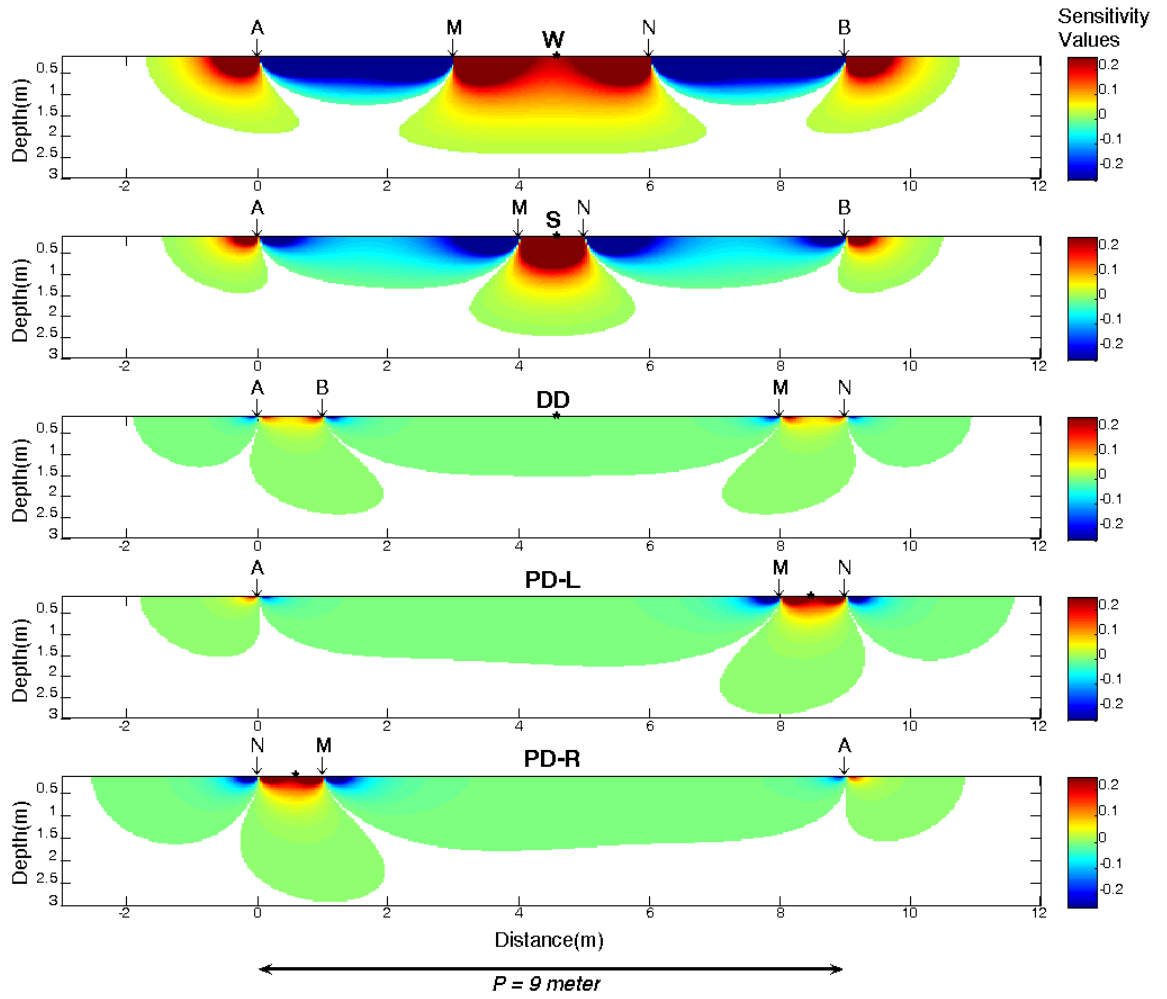
4. FARKLI ELEKTROD DİZİMLERİ İÇİN SİNYAL KATKI KESİTİ

Yeryüzünde herhangi bir elektrod dizilimi için ölçülen toplam gerilim farkı (ΔV), tekdüze (izotrop), yarısonsuz (homogen) ortam için yarım küre hacmi içindeki tüm noktaların gerilim farklarının toplamıdır. Roy ve Apparao (1971) yarısonsuz, tekdüze bir ortamda ölçülen toplam gerilim farklarına (ΔV) katkısı olan yarım küre hacmi içindeki herhangi bir noktanın gerilim farklarının- $\Delta V(x, y, z)$,

$$\Delta V(x, y, z) = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{x(x-a)+y^2+z^2}{(x^2+y^2+z^2)^{3/2} \{(x-a)^2+y^2+z^2\}^{3/2}} - \frac{(x-a)(x-a-b-c)+y^2+z^2}{\{(x-a)^2+y^2+z^2\}^{3/2} \{(x-a-b-c)^2+y^2+z^2\}^{3/2}} \right. \\ \left. - \frac{x(x-a-b)+y^2+z^2}{(x^2+y^2+z^2)^{3/2} \{(x-a-b)^2+y^2+z^2\}^{3/2}} + \frac{(x-a-b)(x-a-b-c)+y^2+z^2}{\{(x-a-b)^2+y^2+z^2\}^{3/2} \{(x-a-b-c)^2+y^2+z^2\}^{3/2}} \right] dx dy dz \quad (4.1)$$

bağıntısı ile hesaplanacağını göstermiştir. Burada ρ yarısonsuz ortamın özdirenci ve I yere uygulanan akımdır. Bu bağıntı (x, y, z) kartezyen koordinatlarda yazılmıştır. Burada (x, y) yeryüzü düzlemini ve z -ekseni ise yeriçi doğrultusunu göstermektedir. Elektrodlar x -doğrultusu boyunca dizilmiş olsun. Bu durumda A, B akım elektrodu ve M, N gerilim elektrodu olmak üzere; A elektrodu $(0, 0, 0)$ noktasında, M elektrodu $(a, 0, 0)$ noktasında, N elektrodu $(a+b, 0, 0)$ noktasında, B elektrodu ise $(a+b+c, 0, 0)$ noktasındadır. (x, y, z) noktalarındaki $\Delta V(x, y, z)$ larını istenen elektrod diziliminde hesaplamak için a, b ve c katsayılarını değiştirmek yeterlidir. Örneğin $a=b=c$ alınırsa, $\Delta V(x, y, z)$ ları Wenner elektrod dizilimi için hesaplanır. Denklem (2.3) ile herhangi bir (x, y, z) noktasında hesaplanan $\Delta V(x, y, z)$, yarısonsuz ortamın cevabı olan toplam $\Delta V'$ na bölünür (Roy ve Apparao, 1971).

Barker (1979) (2.3) denklemini kullanarak $x-z$ düzlemi üzerinde yeryüzünde ölçülen toplam $\Delta V'$ na katkısı olan noktaların $\Delta V(x, y, z)$ ' nı hesaplayarak Schlumberger, Wenner, dipol-dipol ve üç gerilim elektrod dizilimleri (Wenner α , Wenner β , Wenner γ) için eşdeğer eğri (contour) haritası çizmiştir. Çizdiği bu haritalarına genel olarak "**Sinyal Katkı Kesiti**" (Signal Contribution Section) demiştir. Sinyal katkı kesiti, elektrodların belli bir konumunda, ölçülen toplam gerilim farkına (ΔV) katkısı olan bütün noktalardaki gerilim farklarının ($\Delta V(x, y, z)$) elektrod dizilimi doğrultusuna dik düşey yönde bir düzlem üzerinde işaretlenerek çizilen kontur haritalarıdır.



Şekil 1. Farklı elektrod dizilimleri için sinyal katkı kesitleri (Signal Contribution Section-Sensitivity Section).

Wenner, Schlumberger, dipol-dipol ve pole-dipol elektrod dizilimleri için SKK Şekil 4.1 de, yarım-Wenner için Şekil 4.2' de ve İYÜE dizilimi için Şekil 4.3' de görülmektedir. Elektrod dizilimleri için çizilen bütün sinyal katkı kesitlerinde, akım ve gerilim elektrodları arasında kalan bölgede $\Delta V(x,y,z)$ değerleri negatif değerli, gerilim elektroları arasında kalan bölgede $\Delta V(x,y,z)$ ise pozitif değerli hesaplanmıştır.

Bu durum şu şekilde açıklanabilir. Özdirenci ρ olan tekdüze bir ortamda, ρ_0 özdirençli bir cisim düşünelim. Burada iki durum söz konusudur. Birinci durum, gömülü cisim bir akım ve gerilim elektrodu arasında kalıyor ise, kendi özdirencinin tersi yönünde ölçülen özdirenci değiştirir. Örneğin $\rho_0 > \rho$ ise, ölçülen $GÖ-\rho_a < \rho$ olur. Ters durumda, yani $\rho_0 < \rho$ ise, ölçülen $GÖ-\rho_a > \rho$ olur.

İkinci durum ise gömülü cismin iki gerilim veya dipol-dipol elektrod dizilimi için özel durum olan iki akım elektrodu arasında kalmasıdır. Bu durumda gömülü cisim, ölçülen öz direnç değerini kendi yönünde değiştirir. Örneğin $\rho_0 > \rho$ ise, ölçülen $GÖ-\rho_a > \rho$ olur. Ters durumda, yani $\rho_0 < \rho$ ise, ölçülen $GÖ-\rho_a < \rho$ olur.

Bu nedenle birbirine yakın bir akım ve bir gerilim elektrodu arasında kalan bölge "**Negatif Katkı Bölgesi**", iki gerilim veya iki akım elektrodu arasında kalan bölge ise "**Pozitif Katkı Bölgesi**" olarak isimlendirilebilir.

Bu kavramları daha açık anlatmak için Şekil 4.4c' deki gibi bir model ele alınsın. Burada $\rho = 100 \text{ ohm-m}$ öz direncinde tekdüze bir ortam içinde yeryüzünden 0.25 m. derinlikte $0.5 \times 0.75 \text{ m}$ boyutunda, ve $\rho_0 = 10 \text{ ohm-m}$ öz dirençli bir cisim konsun. Bu model için Wenner, yarım-Wenner ve İYÜE dizilimine göre 2-B modelleme yapıldığında GÖ profil eğrilerinde cisim negatif katkı bölgesinde iken ortamdaki öz dirençten büyük GÖ' lerin hesaplandığı, pozitif katkı bölgesinde iken ortamdaki öz dirençten küçük öz direnç değerinin hesaplandığı görülmektedir (bkz. Şekil 4.4). Yine aynı model için tekdüze ortamın öz direnci $\rho = 10 \text{ ohm-m}$ ve cismin öz direnci $\rho_0 = 100 \text{ ohm-m}$ alındığında ise bu olayın tam tersi gözlenmektedir (Şekil 4.4).

Bu modele göre elektrodlar arasındaki mesafeden küçük ve yüzeye yakın bir kütle, negatif veya pozitif katkı bölgesinde olmasına göre ölçülen ΔV ' nı, artıracak veya azaltacak yönde bir etkisi olur.

DAÖ yönteminin başlıca sorunu elektrodlar ile çevre jeolojisi arasındaki kontak sorunudur. Bu sorun Şekil 4.1-3' deki SKK' inde görülmektedir. Burada, ölçülen toplam ΔV ' na en çok elektrodların yakınındaki noktaların katkısı olmaktadır. Bu nedenle yüzeye yakın ve küçük cisimler eğer elektrodlara yakın ise ölçülen toplam ΔV ' na büyük oranda bu cismin katkısı olacaktır. Eğer amaç derin araştırmalar ise yüzeye yakın gömülü kütlelerin sinyale katkısı gürültü olarak değerlendirilecektir ve bu etki giderilmeye çalışılacaktır. Bu gürültüyü gidermek için Barker (1981) offset-Wenner elektrod dizilimini önermiştir. Fakat arkeolojik amaçlı jeofizik çalışmalarda amaç daha çok yüzeye yakın gömülü kütlelerin araştırılması olduğundan, bu kütlelerin ölçülen toplam ΔV ' na katkısı sinyal olarak değerlendirilir. Bu nedenle bu kütle için iyi temsil eden belirtiyi verecek elektrod dizilimi araştırılmalıdır.

4.1. Schlumberger elektrod dizilimi sinyal katkı kesiti

Bu dizilim için SKK, Şekil 4.1' de görülmektedir. Burada, pozitif katkı bölgesi olan M ve N elektrodları arası, sinyale katkısı en çok olan bölgedir. Küçük ölçekli bir cisim bu bölge arasında olursa, ölçülen sinyal büyük oranda bu cisimden etkilenecektir. Eğer DES yöntemi ile veri ölçülüyor ise, bu etki yüzünden veri çok yanlış yorumlanabilir. Yanal süreksizliklerin belirlenmesinde, bu yöntem yerine yarım-Schlumberger ve iki-yönlü üç-elektrod dizilimleri önerilebilir.

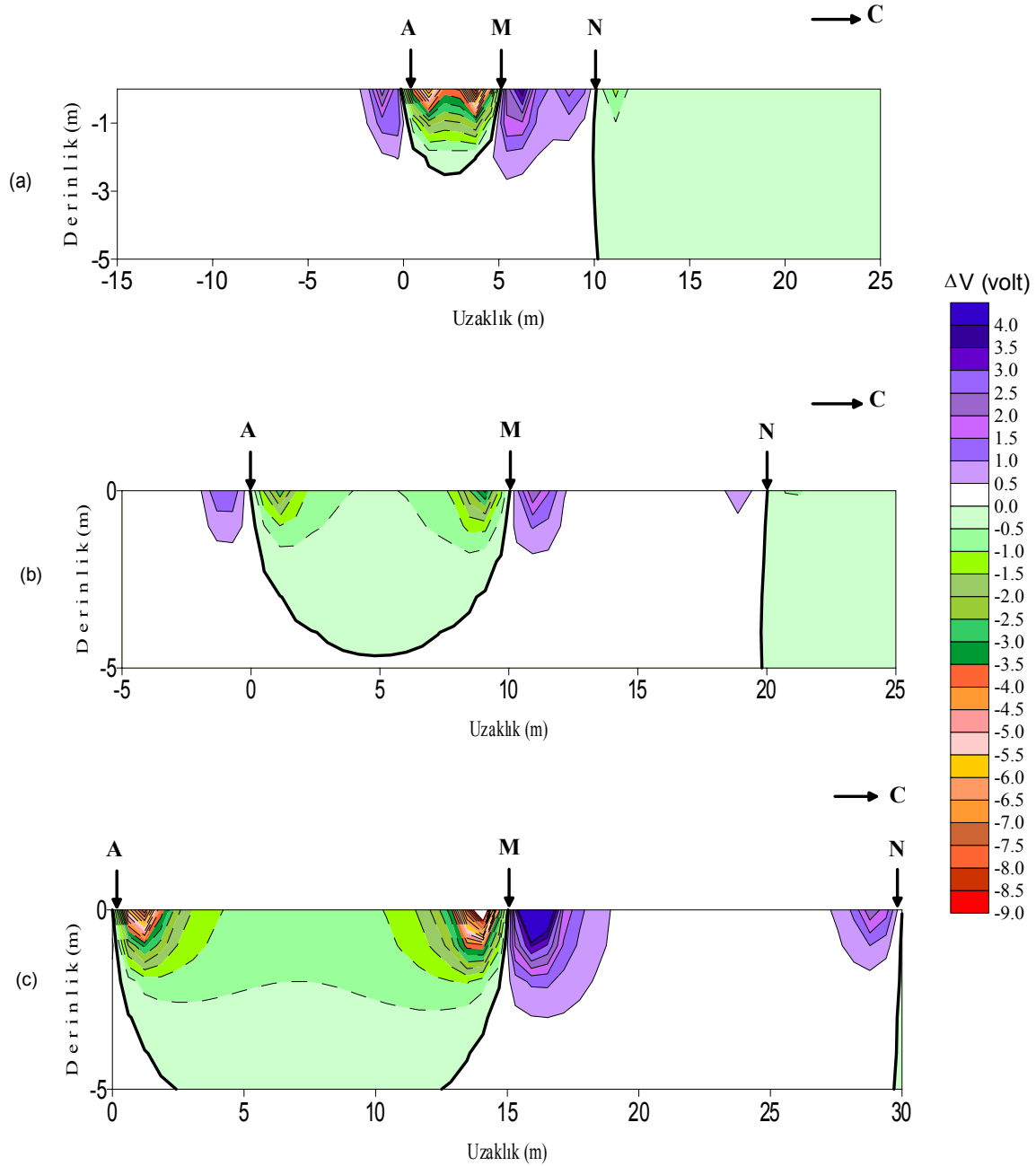
4.2. Wenner ve yarım-Wenner elektrod dizilimi sinyal katkı kesiti

Şekil 4.1' de Wenner ve Şekil 4.3' de yarım-Wenner elektrod dizilimi sinyal katkı kesitleri görülmektedir. Burada sinyale en çok elektrodlara yakın noktaların katkısı vardır. Pozitif katkı bölgesi ve negatif katkı bölgeleri ise eşit hacimli ve yaklaşık eşit değerlerde sinyale katkısı vardır. Şekil 4.4c' de görülen model için Wenner elektrod dizilimine göre 2-B modelleme yapıldığında, cisim negatif ve pozitif katkı bölgesinde iken, genel olarak bütün AB/3 seviyelerinde ortamın öz direncinden küçük GÖ değerleri hesaplanmıştır (Şekil 4.4b3). Yarım-Wenner dizilimi için ise cisim negatif katkı bölgesinde iken ortamın öz direncinden biraz büyük GÖ değerleri hesaplanmış. Cisim pozitif katkı bölgesinde iken ise, ortamın öz direncinden biraz küçük GÖ değerleri hesaplanmıştır (Şekil 4.4b1, b2). Genel olarak GÖ seviye eğrilerinde cisimden dolayı ani bir sıçrama görülmemektedir. Cismin etkisi tüm eğrilerde; genel bir azalma veya artma şeklinde görülmektedir. Buna göre, Wenner ve yarım-Wenner elektrod dizilimi ile yanıl ayrımlılığın iyi incelenemeyeceği söylenebilir. Tabakalı bir ortamda (1-B) ise bu dizilimin düşey ayrımlılığı büyüktür (Barker, 1981).

4.4. Dipol-dipol elektrod dizilimi sinyal katkı kesiti

Bu dizilimde akım elektrodları ve gerilim elektrodları arasındaki bölgeler pozitif katkı bölgesidir. Sinyale en çok bu bölgelerin katkısı olmaktadır. Eğer, bu dizilim ile DES ölçüsü alınmıyor ise, akım veya gerilim elektrodları arasındaki gömülü bir cismin sinyale katkısı büyük olacaktır. Amaç, yerininin 1-B öz direnç yapısını incelemek ise, bu cismin etkisi gürültü olacaktır ve yanlış yorumlara sebep olacaktır.

Dipol-dipol elektrod dizilimi ile ölçülen GÖ değerleri, AB-akım ve MN-gerilim elektrodu çiftlerinin orta noktasından, 45° açı ile inilen doğruların kesim noktasına konur. Bu nokta N ve B elektrodları arasında bir noktadır. Eğer yanıl yöndeki süreksizlikler inceleniyor ise, en fazla pozitif katkı bölgesindeki cisimlerin, sinyale katkısı olacaktır. Ancak ölçülen GÖ B ve N arasına yazıldığından, cismin yeri doğru bulunamayacaktır. Bu açıklamalara göre, dipol-dipol elektrod diziliminin pek kullanışlı olduğu söylenemez.



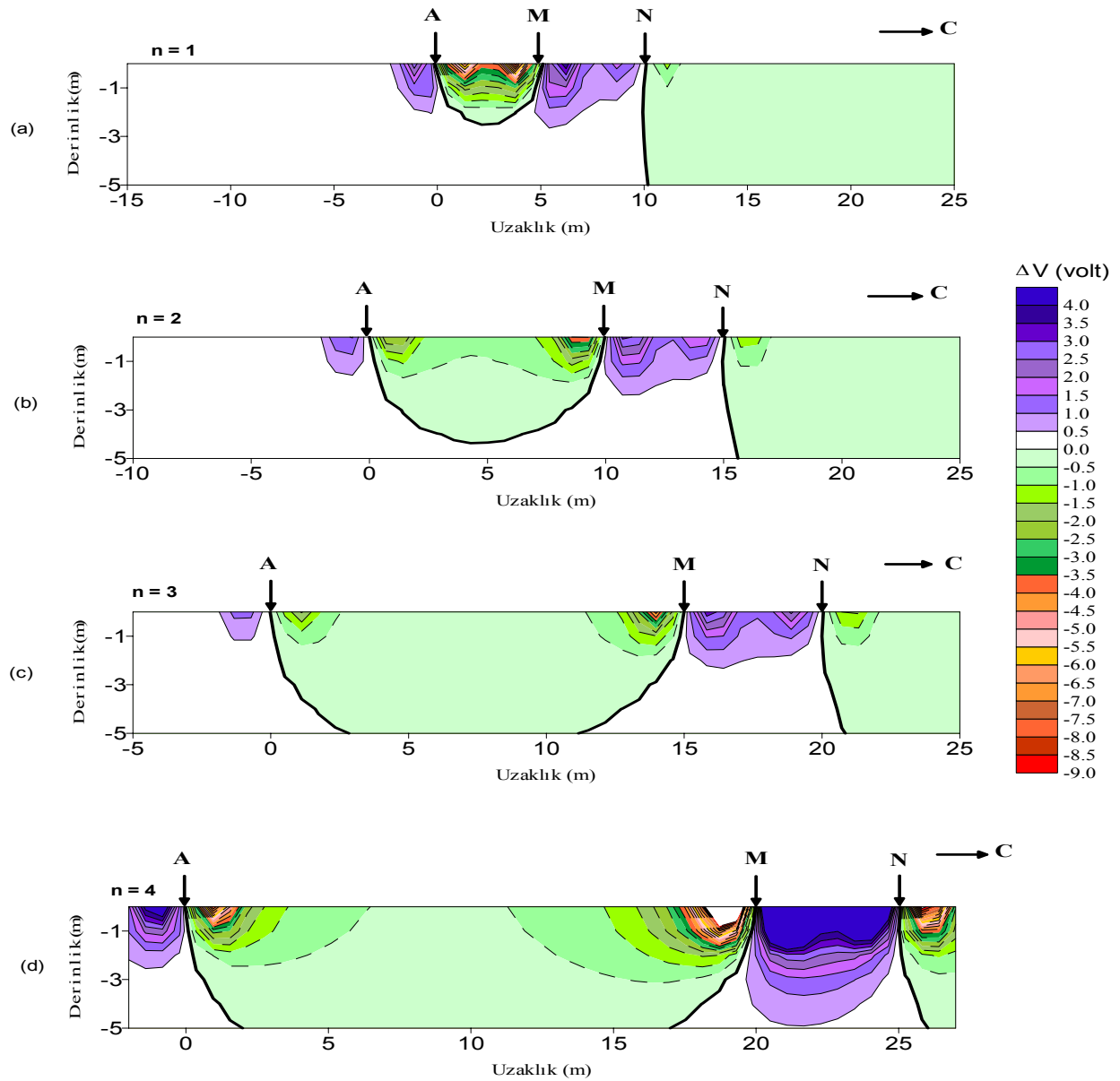
Şekil 3.3.Yarım-Wenner elektrod diziliminde; $AB/3 = 5, 10$ ve 15 m değerleri için AMN sinyal katkı kesiti (a), (b) ve (c).

4.4. İki-yönlü üç elektrod dizilimi sinyal katkı kesiti

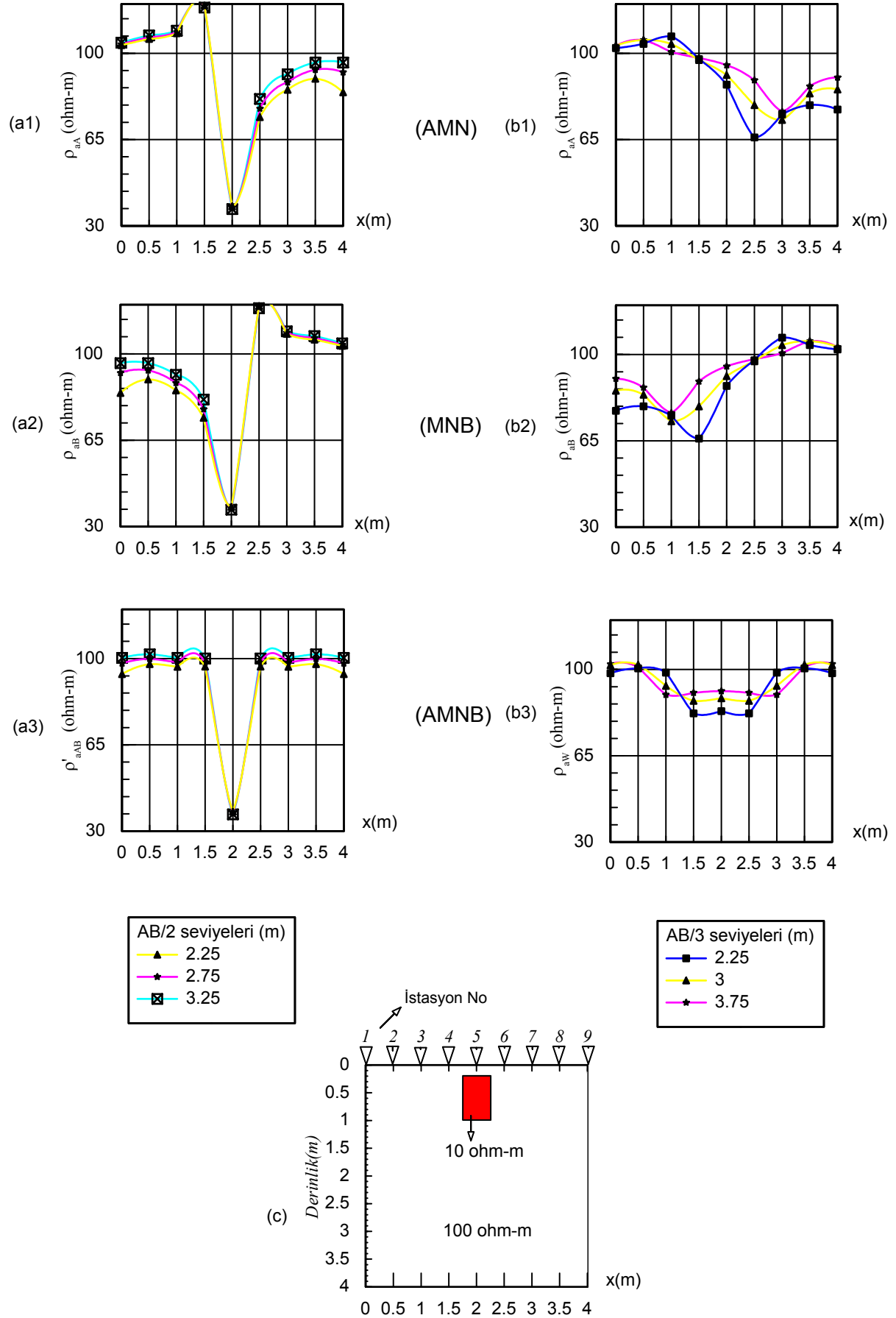
İYÜE dizilim için sinyal katkı kesiti Şekil 4.2 de görülmektedir. Burada, sinyale en çok pozitif katkı bölgesindeki noktaların katkısı olduğu görülmektedir. Derin amaçlı DES ölçüsü alınıyorsa pozitif katkı bölgesindeki yüzeye yakın gömülü bir kütlenin sinyale katkısı çok

büyük (veya küçük) değerli gürültü olacaktır (Şekil 4.4a1,a2). Fakat yüzeye yakın gömülü kütlelerin araştırılması amaçlı profil ölçüsü alınıyorsa, aynı cisim negatif katkı bölgesinde ise sinyale katkısı az görülecektir. Cisim pozitif katkı bölgesinde iken ise sinyale katkısı çok büyük olacaktır.

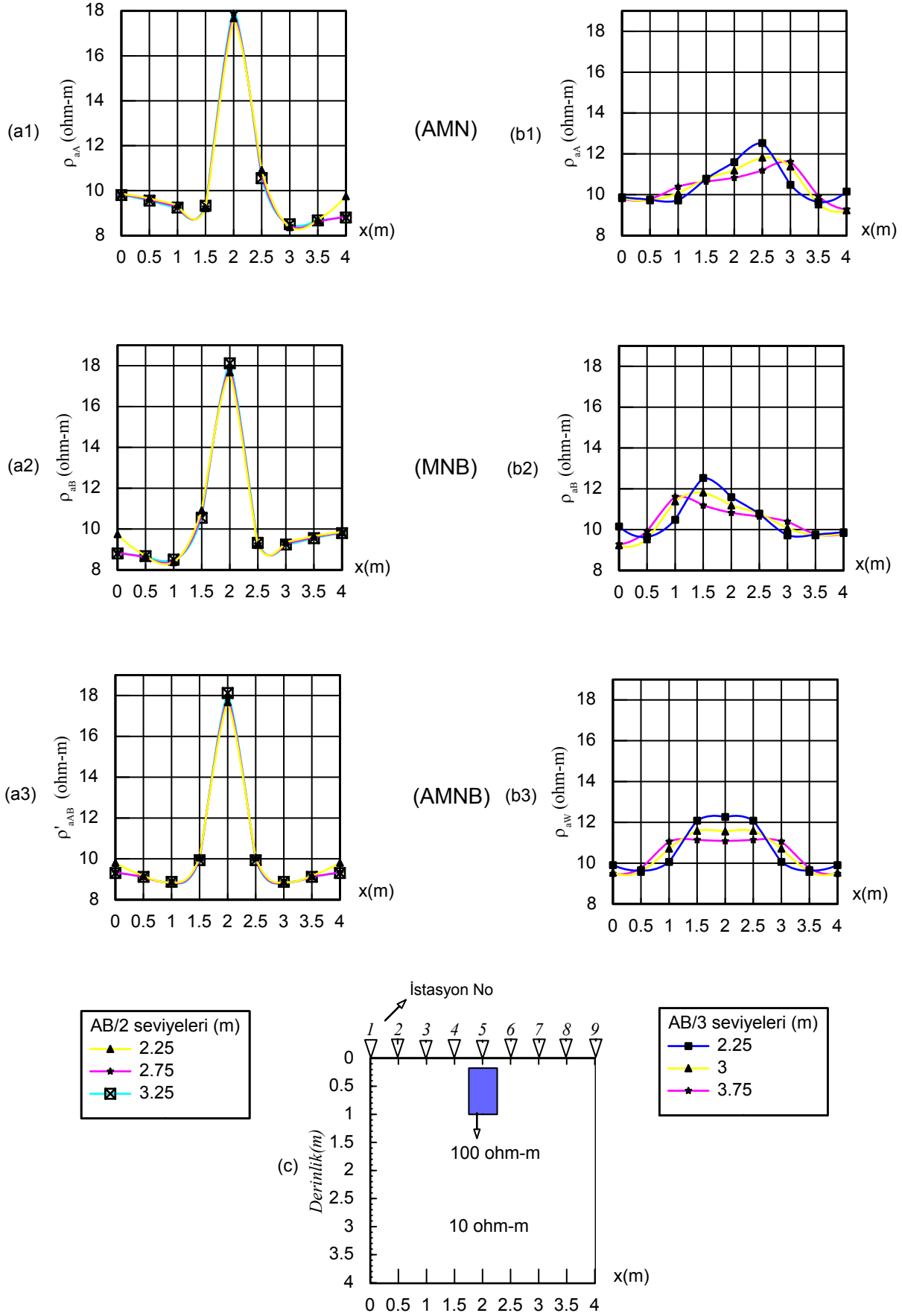
İYÜE diziliminde ölçülen GÖ değeri M ve N elektrodlarının orta noktasının altına yerleştirilmektedir. Buna göre pozitif katkı bölgesindeki bir cismin yeri doğru olarak belirlenmiş olacaktır. Ayrıca cisim negatif katkı bölgesinde iken sinyale katkısı az olmaktadır ve bu etki İYÜE dizilimi ile ölçülen GÖ değerlerine uygulanan iki-yönlü gradyen dönüşümü (Candansayar ve diğ., 1999) ile giderilebilir.



Şekil 3.2. İki-yönlü üç-elektrod diziliminde; $a=5$ m ve $n=1,2,3$ ve 4 değerleri için AMN sinyal katkı kesiti (a), (b), (c) ve (d).



Şekil 4.4. İki-yönlü üç-elektrod dizilimi için; AMN (a1), MNB (a2) ve AMNB (a3) profil eğrisi. İki-yönlü yarım-Wenner dizilimi için; AMN (b1), MNB (b2), Wenner dizilimi (AMNB) (b3) GÖ profil eğrileri ve 2-B model (c).



Şekil 4.5. İki-yönlü üç-elektrod dizilimi için; AMN (a1), MNB (a2) ve AMNB (a3) profil eğrisi. İki-yönlü yarım-Wenner dizilimi için; AMN (b1), MNB (b2), Wenner dizilimi (AMNB) (b3) GÖ profil eğrileri ve 2-B model (c).

4.5. İYÜE Dizilimi Profil Verilerinin İki-Yönlü Gradient (TSG) Dönüşümü

İYÜE dizilimi ile sabit bir “n” değeri için profil ölçüsü alındığında iki farklı GÖ profil eğrisi elde edilir. Bunlardan birisi A ve C akım elektrodları ile M ve N gerilim elektrodları kullanılarak ölçülen ρ_{aAMN} (veya AMN) GÖ profil eğrisi, diğeri ise B ve C akım elektrodları ile M ve N gerilim elektrodları kullanılarak ölçülen ρ_{aMNB} (veya MNB) GÖ profil eğrisidir. ρ_{aAMN} ve ρ_{aMNB} profil eğrileri homojen ve izotrop katmanlardan oluşan yeraltı yapılarında üst üste çakışırlar. Yeraltındaki yanal süreksizliklerden dolayı bu eğriler farklı davranış gösterebilirler. Eğrilerin birbirlerine göre davranışları yeraltı hakkında daha fazla bilgi edinmemizi sağlar. ρ_{aAMN} ve ρ_{aMNB} değerlerini kullanarak yeraltının yanal yöndeki değişimi incelenebilir. Bu amaç için, her iki GÖ profil eğrisi verisini kullanarak TSG dönüşümü aşağıdaki gibi yazılabilir (Candansayar, 1997; Candansayar ve diğ. 1999)

$$TSG^i(a) = \frac{\rho_{aAMN}^i(a)}{\rho_{aAMN}^{i-1}(a)} + \frac{\rho_{aAMN}^i(a)}{\rho_{aAMN}^{i+1}(a)} + \frac{\rho_{aMNB}^i(a)}{\rho_{aMNB}^{i-1}(a)} + \frac{\rho_{aMNB}^i(a)}{\rho_{aMNB}^{i+1}(a)} - 4, \quad i = 2, 3, \dots, J-1. \quad (4.1)$$

Burada a, elektrodlar arası uzaklığı, J ise profil boyunca toplam istasyon sayısını göstermektedir. J-adet istasyon için (J-2) adet TSG değeri hesaplanabilmektedir. Bu dönüşümün başarısını göstermek için Şekil 2c’ deki gibi, homojen bir ortam içinde öz direnci yüksek gömülü bir yapı ele alınmıştır. Ortamın ve cismin öz direnci ve boyutları şekil üzerinde görülmektedir. Bu modelin İYÜE dizilimi tepkisini 2-B modelleme ile hesaplandığında Şekil 2a’ daki profil eğrileri elde edilmektedir. Bu GÖ profil eğrileri verilerinin TSG dönüşümü ise Şekil 2b’ de görülmektedir. Burada görüldüğü gibi yapı üzerinde TSG değeri büyük genlikli bir belirti vermektedir.

TSG dönüşümünün yapı üzerinde büyük genlik vermesinin sebebini açıklayabilmek için Şekil 2c’ de görülen model üstündeki 6 nolu istasyon için (1) denklemini yeniden

$$TSG^6(a) = \frac{\rho_{aAMN}^6(a)}{\rho_{aAMN}^5(a)} + \frac{\rho_{aAMN}^6(a)}{\rho_{aAMN}^7(a)} + \frac{\rho_{aMNB}^6(a)}{\rho_{aMNB}^5(a)} + \frac{\rho_{aMNB}^6(a)}{\rho_{aMNB}^7(a)} - 4 \quad (4.2)$$

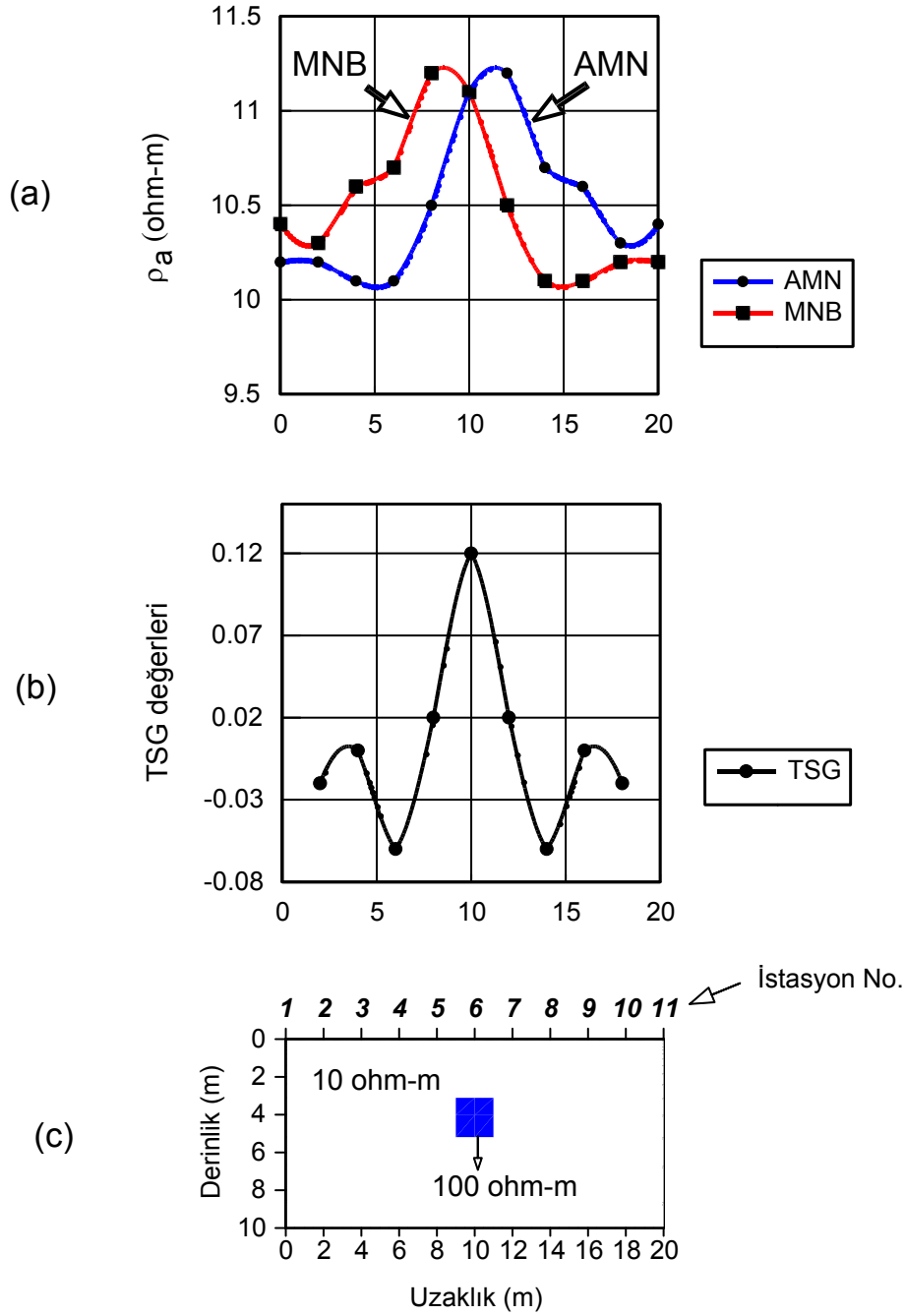
şeklinde yazılabilir. Bu denklem, sinyal katkı kesitlerindeki (signal contribution section), pozitif katkı bölgesi ve negatif katkı bölgesi kavramları kullanılarak şu şekilde açıklanabilir (Candansayar ve diğ. 1999). Şekil 4.6c, deki gibi, 10 ohm-m öz dirençli homojen bir ortamda

6 numaralı ölçü noktası altında 100 ohm-m özdirençli küçük bir cisim olsun. Altı numaralı ölçü noktasında cisim pozitif katkı bölgesinde (MN arasında) olduğundan ortamda olmayan yüksek bir özdirenç değeri ölçülecektir. Beş ve yedi numaralı ölçü noktalarında ise cisim negatif katkı bölgesinde (sırasıyla A-M ve M-B arasında) kalacak ve buralarda ortamda olmayan küçük değerler ölçülecektir. Bu durumda (4.2) denklemindeki tüm oran değerleri birden büyük olacak TSG⁶(a) değeri sıfırdan büyük hesaplanacaktır.

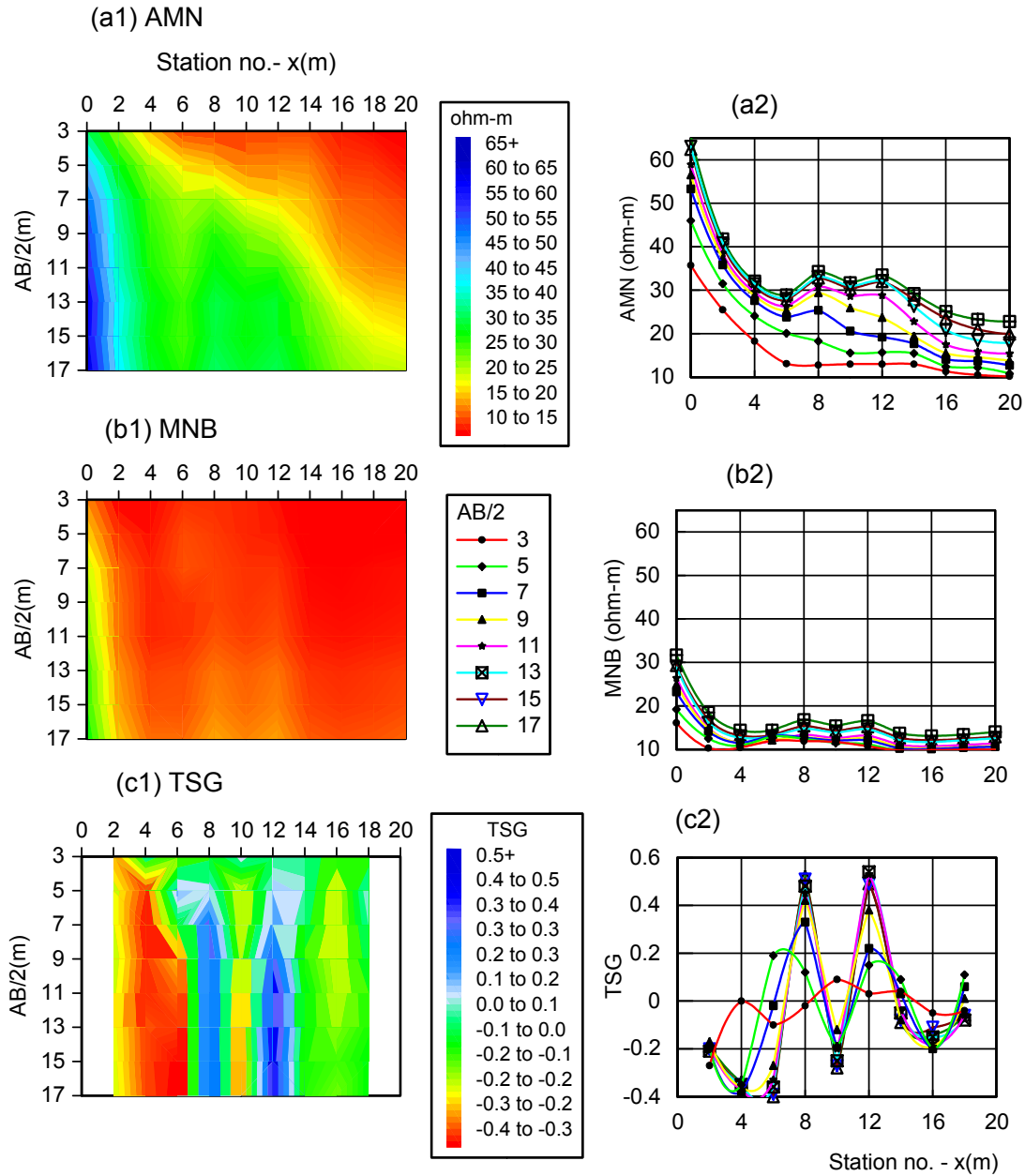
Bu dönüşümün başarısını göstermek için Şekil 4.7.d' deki modeli ele alalım. Eğimli arayüzeyi olan iki tabakalı bir ortamda özdirenci çevresinden büyük iki gömülü yapı görülmektedir. Bu modele benzer yapılara daha önce yapılan birkaç arkeolojik sahada raslanmıştır (Candansayar ve Başokur 2001). Gömülü cisimlerin boyutları, özdirençleri ve tabakaların özdirençleri şekil üzerinde görülmektedir. İki metre aralıklı toplam 11 istasyonda ve her istasyonda toplam n=8 (a=MN=2m, AB/2 = 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17) seviye için bu modelin İYÜE dizilimine göre 2-B tepkisi Şekil 4.7.a1,a2 ve 4.7.b1,b2' de görülmektedir. GÖ yapma-kesitleri (Şekil 4.7.a1, b1) ve profil eğrilerine (Şekil 4.7.a2,b2) bakarak gömülü yapılar ayırt edilememektedir. AMN ve MNB GÖ değerlerinden elde edilen TSG yapma-kesitlerine bakıldığında (Şekil 4.7.c1), her iki yapıda kolayca belirlenmektedir. Farklı AB/2 değerleri için çizilmiş TSG profil eğrilerinden de bu iki yapıyı belirlemek mümkündür (Şekil 4.7.c2).

Diğer bir model, yine arazi çalışmalarımızda rastladığımız yapılara benzer, özdirenci sırasıyla 100 ohm-m ve 10 ohm-m olan iki tabakalı bir ortamda, özdirenci 1000 ohm-m olan ve ikinci tabakada gömülü bir yapı ele alınmıştır. Bu modelde de, istasyon sayısı, istasyon aralıkları ve elektrod açıklıkları bir önceki modelde kullanılanlar ile aynı seçilmiştir. Bu modelin İYÜE dizilimine göre 2-B tepkisi Şekil 4.a1,a2 ve 4.b1,b2' de görülmektedir. GÖ yapma-kesitleri ve profil eğrilerine bakıldığında, yüzeydeki yüksek özdirençli tabakanın, altındaki gömülü yapıyı maskeleyiği görülmektedir. TSG yapma-kesit ve profil eğrilerine bakıldığında ise, yüzeydeki yüksek özdirençli tabakanın maskeleyme etkisinin ortadan kalktığı görülmektedir (Şekil 4.c1, c2). TSG grafiklerinden, gömülü yapı kolayca ayırt edilmektedir.

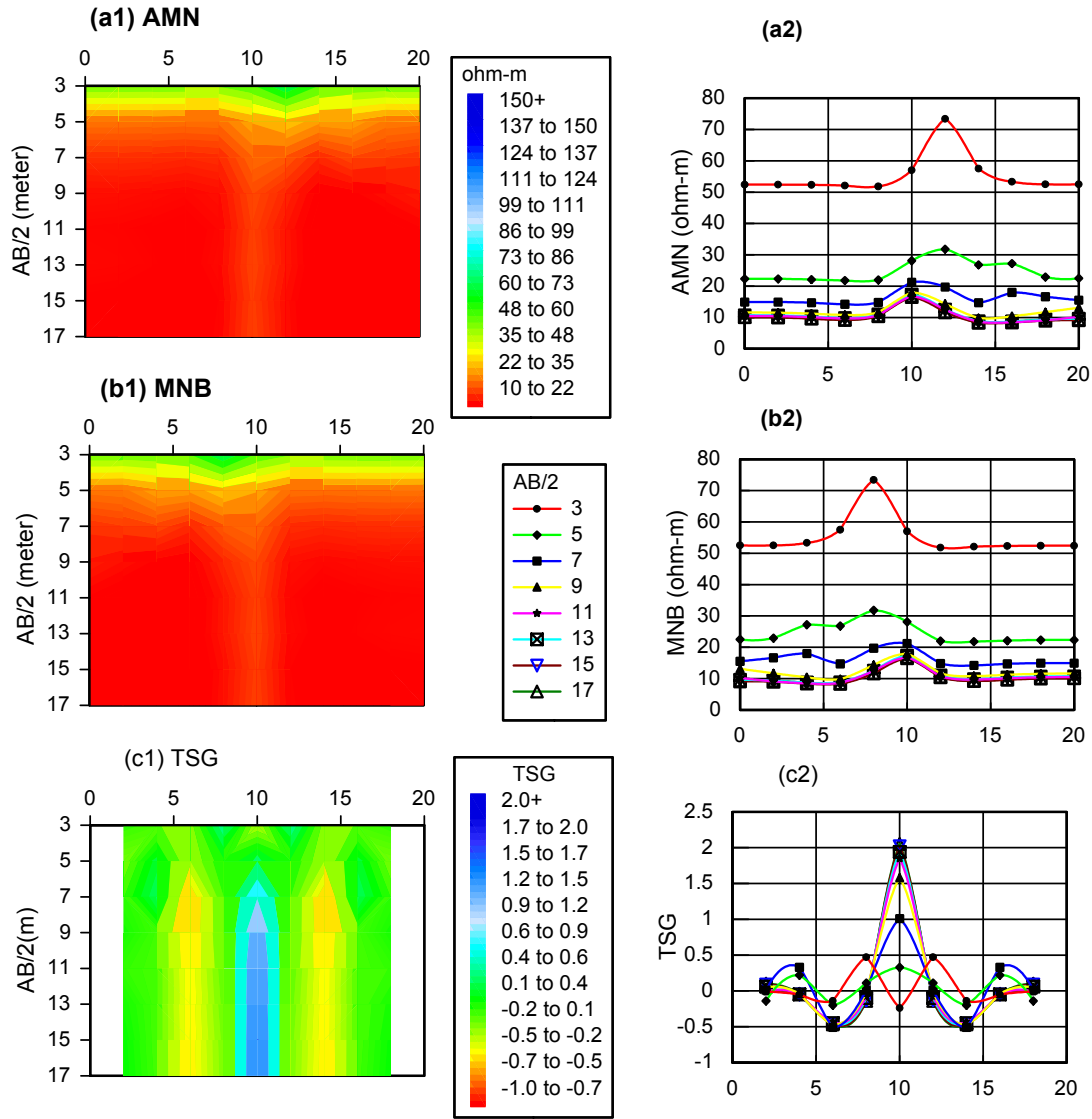
Şekil 4.8' de de benzer şekilde yüzeydeki yalıtkan yapı (100 ohm-m) nedeni ile altındaki 10 ohm-m özdirençli temelde gömülü 1000 ohm-m özdirençli yapının etkisi görülememektedir. TSG dönüşümü ise buy yapının konumunu tam olarak göstermektedir (bkz.Şekil 4.8.c1 ve c2).



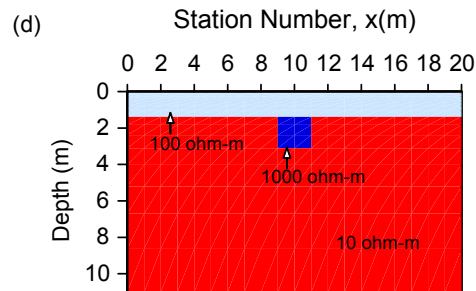
Şekil 4.6. $AB/2 = 13$ metre ($n=5$) ve $a=MN = 2$ m
 (a) AMN and MNB profil eğrileri
 (b) TSG profil eğrisi ve
 (c) 2-B model (Candansayar ve diğ., 1999).



Şekil 4.7. GÖ yapma kesitleri; AMN (a1) ve MNB (b1), GÖ profil eğrileri; AMN (a2) ve MNB (b2), TSG dönüşümü verilerinin yapma kesitleri (c1) ve profil eğrileri (c2) ve 2B öz direnç modeli (d). (Candansayar ve diğ. 2001)



2-D model



Şekil 4.8. GÖ yapma kesitleri; AMN (a1) ve MNB (b1), GÖ profil eğrileri; AMN (a2) ve MNB (b2), TSG dönüşümü verilerinin yapma kesitleri (c1) ve profil eğrileri (c2) ve 2B öz direnç modeli (d) (Candansayar ve diğ. 2001)

5. VERİ YORUMU

DAÖ yönteminde veriler, 1-B, 2-B ve 3-B olarak yorumlanabilir. Veriler nitel ve nicel olarak iki farklı şekilde yorumlanır. Nitel yorum, doğrudan Jeofizik veri üzerinden yapılan yorumdur. DAÖ yönteminde, jeofizik veri arazide ölçülmüş gerilim farklarından elde edilen GÖ değerleridir. Bu tip yorum jeolojik yapı hakkında kabaca bir bilgi verir. DAÖ yönteminin ilk uygulanmaya başladığı yıllarda bu tip yorum yapılırdı.

Nicel yorum ise jeofizik verilerin (görünür öz direnç), bir matematiksel işleç' ten geçirildikten sonra elde edilen yerelektrik parametreler (öz direnç) ile yapılan yorumdur. Jeofizik veriden, tanımlanan bir modeli fiziksel parametrelerinin elde edilmesi işlemine "**Ters Çözüm**" (inversion) denmektedir. Jeofizik' te ters çözüm konusunda ayrıntılı bilgi için Tarantola(1987), Menke(1989), Parker(1994) ve Meju(1994)' ya bakılabilir. Bu konuda yazılmış tek Türkçe kitap ise Başokur (1999) tarafından yazılmıştır. Ters çözüm, günümüzde kullanılan tüm jeofizik yöntemlerde temel veri işlem tekniğidir. DAÖ yönteminde de verilerin nicel yorumunu yapabilmek için, ters çözüm veri işlemi standart olmuştur.

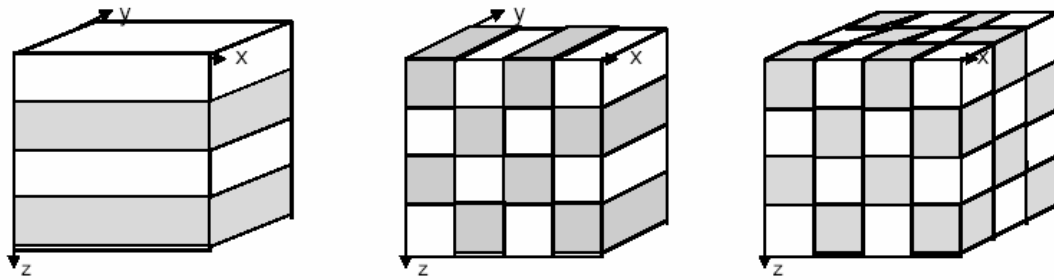
Günümüzde ölçülen DAÖ verilerinin, uygunluğuna göre 1-B, 2-B ve 3-B ters çözüm yapılmaktadır. Sonuçta elde edilen modellere bakılarak yorum yapılmaktadır. Ters çözüm işleminde, kuramsal verilerin ve kısmi türevleri içeren dizeyin (Jacobian matrix) hesaplanması için düz çözüm yapmak gerekir. Yapılan ters çözümde, düz çözüm için oluşturulan modelin boyutu ters çözümün boyutunu belirtir. Başka bir deyişle, ters çözümün 1B, 2B veya 3B olması demek, oluşturulan modelin bu boyutlardan birisi olması demektir. Örneğin, 1B ters çözüm ile 2B ters çözüm arasındaki fark; 1B ters çözümde kuramsal veri ve kısmi türevler dizeyin 1B modelleme ile elde edilmesi, 2B ters çözümde ise 2B modelleme ile elde edilmesidir. Dolayısıyla önce modelleme kavramını bilmek gerekir.

5.1. DAÖ Yönteminde Modelleme

Modelleme, varsayılan bir modelin fiziksel parametreleri ile jeofizik tepkisini ilişkilendiren matematiksel bir bağıntı ile tanımlanması ve bu bağıntı yardımıyla modelin jeofizik tepkisini sayısal olarak hesaplamak şeklinde tanımlanabilir.

Ölçülen jeofizik verilerin yeterliliğine göre nitel yorum yapılırken yerçi 1-B, 2-B veya 3-B bir model ile ifade edilir. Bu modelin jeofizik tepkisi ise ters çözümde kuramsal veri olarak kullanılır. DAÖ verilerinin 1-B modellemesinde, iletkenlik dağılımına göre yerçinin homojen ve izotrop katmanlardan oluştuğu varsayılır (Şekil 5.1.1.a). Tanımlanan bu modelde fiziksel parametreler olan her tabakanın kalınlık ve öz dirençlerine istenilen değerler atanır.

Oluşturulan bu 1B model için istenilen elektrod dizilimi için GÖ düşey elektrik sondajı verileri hesaplanır. 2-B modellemede ise yeriçinin iletkenliğinin x ve z yönünde değişen y yönünde sabit kalan bloklardan oluştuğu varsayılır (Şekil 5.1.1.b). Oluşturulan bu modelde her bloğun x- ve z-yönünde kalınlıkları kullanıcı tarafından belirlenir. Her bloğa ise istenen öz direnç değerleri atanır ve sonuçta istenilen elektrod dizilimi için GÖ yapma-kesit verileri hesaplanır. 3-B modellemede ise yeriçi, iletkenliğe göre kendi içinde homojen ve izotrop küpler' den oluştuğu varsayılır (Şekil 5.1.1.c) ve sonuçta x-y düzleminde istenilen elektrod dizilimi için istenilen elektrod mesafelerinde GÖ' ler hesaplanır. Bu GÖ değerleri ile paralele doğrultular boyunca birçok yapma-kesit verisi elde edilebilir.



Şekil 5.1.1. 1-B iletkenlik modeli (a), 2-B iletkenlik modeli (b), 3-B iletkenlik modeli (c) (Candansayar, 1997' den alınmıştır).

Modelleme yapabilmek için modeli tanımlayan bir matematiksel bağıntı gereklidir. 1-B modellemede bu bağıntı

$$\phi = \frac{I}{2\pi_0} \int_0^{\infty} T(\lambda) J_0(\lambda a) d\lambda$$

şeklindedir (Koefod, 1970). Burada I yere uygulanan akım, $T(\lambda)$ dönüşük öz direnç fonksiyonu, $J_0(\lambda a)$ sıfırıncı dereceden birinci cins Bessel fonksiyonu ve ϕ ise gerilimdir. Denklem (1.1) ile ilgili ayrıntılı olarak Başokur' a (1984) bakılabilir. 2-B modellemede ise kullanılan bağıntı,

$$-\nabla(\sigma(x, z) \cdot \nabla \phi(x, y, z)) = I \delta(x - x_s) \delta(y) \delta(z)$$

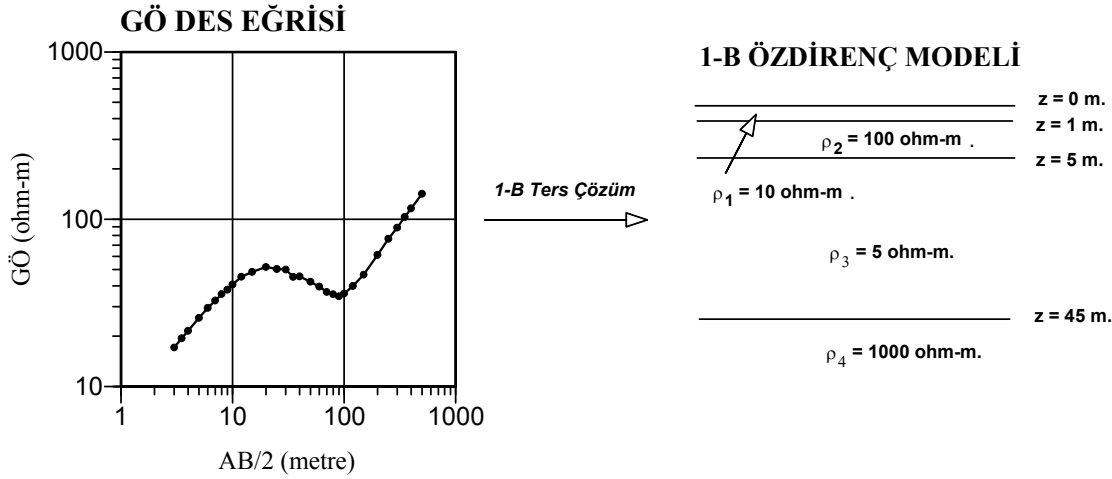
şeklinde tanımlanan Poisson denklemdir. Ayrıntı için Candansayar' a (1997) bakılabilir. 3-B modellemede ise (1.2) denklemi

$$-\nabla(\sigma(x, y, z) \cdot \nabla \phi(x, y, z)) = I(x, y, z)$$

şeklinde yazılır. Denklem (1.2) ve (1.3)' de kullanılan değişkenler izleyen bölümlerde verilmiştir. Yukarıda yazılan model bağıntılar sınır koşulları kullanılarak çözülür.

6. DAÖ VERİLERİNİN 1-B YORUMLANMASI VE 2B-YAPILARIN ETKİSİ

Bir noktada ölçülmüş DES verisi bize düşey yönde özdirenç değişimi hakkında bilgi verir. Bu nedenle bir tek DES verisi ile 1-B yorum yapılabilir. Bu verilerin nicel yorumunun yapılabilmesi için, verilere 1-B ters çözüm uygulanmalıdır.



Şekil 5.1. GÖ DES eğrisi ve 1-B ters çözüm sonucu elde edilen 1-B özdirenç modeli.

DES verilerinin 1-B ters çözümünde, yerinin özdirenç'e göre kendi içinde homojen ve izotrop katmanlardan oluştuğu varsayılır. Bu varsayım'a göre DES GÖ verilerine uygulanan ters çözüm sonucu bu tabakalara ait özdirenç ve kalınlıklar hesaplanır (Şekil 5.1). Bu konuda ayrıntılı bilgi için Inman(1975), Başokur' a (1984,1990,1999) bakılabilir. 1B ters çözüm yapan programlara günümüzde ücretsiz olarak internet sayfalarından ulaşılmaktadır. Örneğin, ülkemizde yaygın olarak kullanılan Prof.Ahmet T.Başokur' un IPES6 isimli programına "http://www.eng.ankara.edu.tr/geophysical_eng " veya "<http://jeofizik.ankara.edu.tr>" adreslerinden ulaşılabilir.

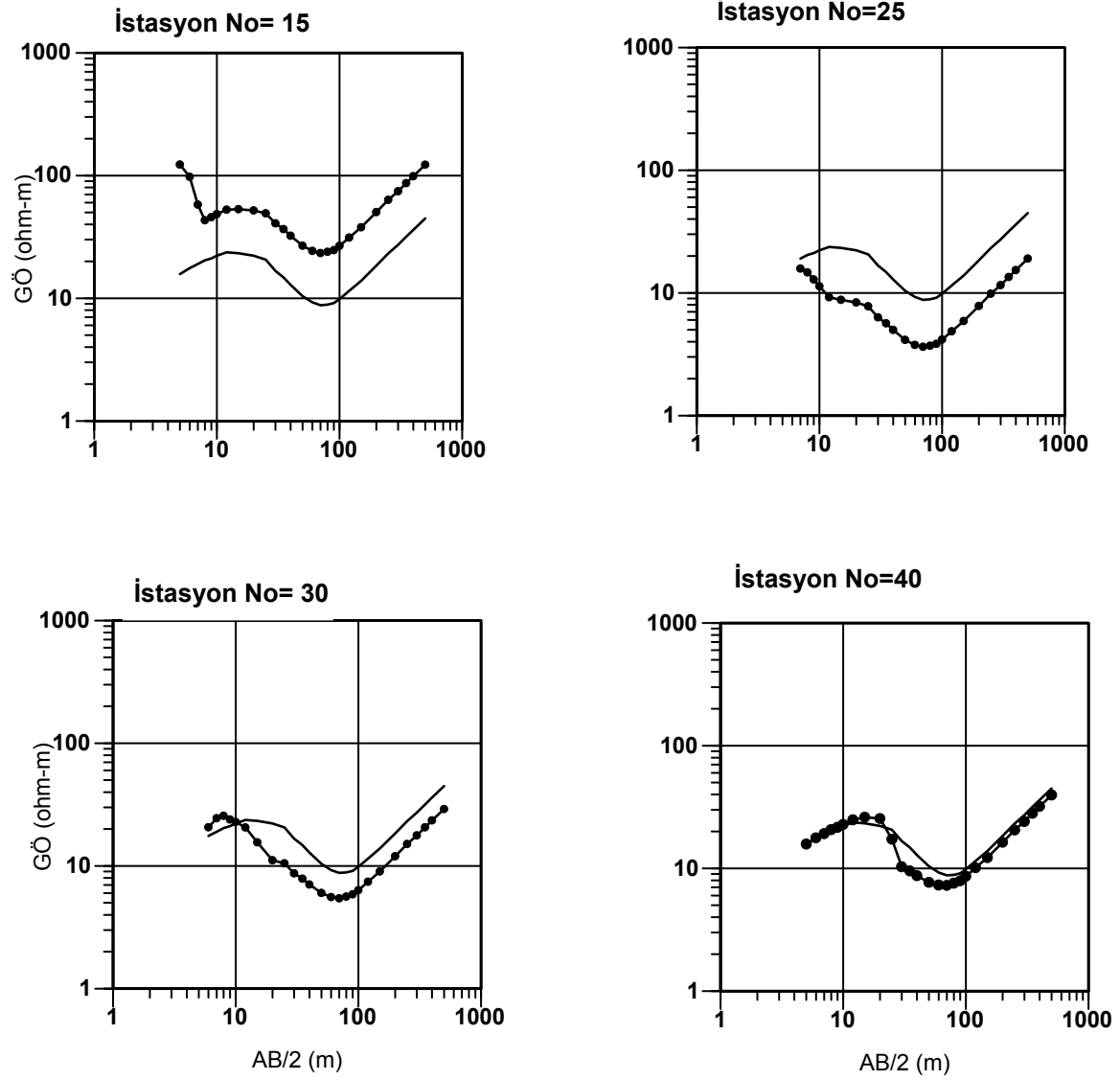
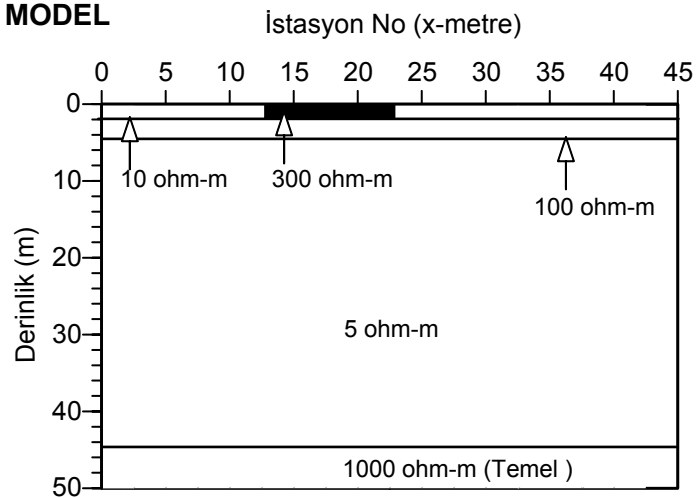
1-B yorumda yüzeye yakın küçük ölçekli 2-B ve 3-B' lu yapıların etkisi düşünülmelidir. İletkenliği çevresine göre çok küçük veya büyük olan bu tip yapılar, ölçülen GÖ DES verilerini büyük oranda değiştirirler. Bu yapıların etkisinden dolayı, DES eğrilerinin 1-B yorumlanması sırasında ortamda olmayan ince tabakalar bulunabilir. Yada tabakaların özdirenç değerleri olduğundan çok büyük yada küçük hesaplanabilir. Bu durum, uygulamacıların çok karşılaştıkları ve 1-B yorumda hata yapmalarına sebep olan önemli bir konudur.

Bu problemi daha açık anlatmak için Şekil 5.2' deki modeli ele alalım. Burada, tabakalı ortamda, yüzeye yakın küçük ölçekli bir yapı görülmektedir. Cismin eni 5 ve boyu ise 2 metre' dir. Cismin özdirenci ile tabakaların kalınlıkları ve özdirençleri ise şekil üzerinde yazılmıştır. Önce bu cismin olmadığı tabakalı durum (1-B) için Schlumberger elektrod dizilimine göre

DES GÖ değerleri hesaplanmıştır. Bu cismin olması durumunda (2-B) ise 15, 20, 30 ve 40. metrelerde yine aynı dizilim için GÖ DES değerleri hesaplanmıştır.

1-B model için hesaplanan GÖ DES eğrisi düz çizgi ve cismin olması durumu için hesaplanan DES eğrileri ise yuvarlak işaretli eğrilerdir. Tabakalı ortam için çizilen DES eğrisinin 4-tabakalı modeli temsil ettiği görülmektedir. Fakat cismin olması durumunda çizilen DES eğrilerine bakıldığında, özellikle cisme yaklaştıkça saçılmalar görülmektedir. Bu cismin varlığından habersiz olduğunda, bu eğriler 5-tabakalı olarak değerlendirilebilirler. Ayrıca tam cismin üstünde (15 no' lu istasyon), 2-B model için hesaplanan DES eğrisinin, diğer eğriye paralel olarak yukarı doğru kaydığı görülmektedir. Bu etki, Manyetotellürik yönteminde olduğu gibi DAÖ yönteminde de kayma etkisi' nin (Shift effect) olduğunu göstermektedir.

Bu etkinin sebebi SKK' deki negatif ve pozitif katkı bölgesi kavramları kullanılarak açıklanabilir. 15 no' lu istasyonun tam altında öz direnci, çevresine göre yüksek olan bir yapı vardır. Bu yapı gerilim elektrodları arasında kalmaktadır ve ölçülen GÖ değerlerini kendi öz direnci doğrultusunda artırmıştır. Bütün AB/2 değerleri için alınan ölçülerde, bu cisim gerilim elektrodları arasında kaldığından tüm DES eğrisi yukarı doğru sıçramıştır. 20 no' lu istasyonda ise cisim A akım elektrodunun solunda, yani pozitif katkı bölgesinde kaldığından ve bu az da olsa ölçülen değeri artırmıştır. Diğer tüm AB/2 değerleri için ise, cisim A-akım ve M-gerilim elektrodu arasında, yani negatif katkı bölgesinde kalmıştır. Bu nedenle, ölçülen GÖ değeri, bu cismin öz direncinin tersi yönünde değişmiştir. Yani tüm eğride aşağı doğru bir kayma görülmüştür. 20 no' lu istasyondaki kaymış veriye 1-B ters çözüm yapılması durumunda, tabakaların kalınlıkları ve öz dirençleri, gerçek değerinden çok farklı hesaplanacaktır. Özellikle 1-B yorum yapan uygulamacıların bu konuya önem vermeleri gerekmektedir.

1-B ve 2-B Modellerden Hesaplanan GÖ DES Eğrileri**2-B MODEL**

Şekil 5.2. Tabakalı ortam (1-B) (sürekli eğri) ve örtü tabakasına gömülü öz direnci yüksek küçük bir cismin olması durumunda (2-B) (yuvarlak sembol' lü eğri) hesaplanan GÖ DES eğrileri ve 2-B model.

Ankara Üniv. Müh. Fak. Jeofizik Müh. Böl., 06100, Tandoğan

Bu notu yazardan habersiz fotokopi ile çoğaltmak yasaktır.

6.1. Schlumberger Elektrod Dizilimi ile Sondaj Ölçüsü Alma ve Değerlendirme

Düşey yönde yerinin öz direnç yapısını araştırma amaçlı uygulanan DAÖ yönteminde daha çok DES yöntemi kullanılır. Bu yöntemin uygulanmasında ise yaygın olarak Schlumberger elektrod dizilimi kullanılır. Bu dizilim için geometrik faktör ve GÖ bağıntıları tekrar aşağıdaki gibi verilebilir.

$$k = \frac{\pi}{4} \overline{MN} \left[\frac{\overline{AB}^2}{\overline{MN}^2} - 1 \right], \quad \rho_a = k \frac{\Delta V}{I}$$

Burada ΔV ölçülen gerilim farkı (milivolt) ve I ise yere uygulanan akımdır (mili Amper). GÖ' in birimi ise ohm-m dir. Hesaplanan GÖ değeri log-log kağıtta yerine konur ve yeni $AB/2$ değeri için ölçüye geçilir. Bu konu çok önemlidir. Arazide, işçilik hataları, elektrodlar arası uzaklığın yanlış belirlenmesi ve benzeri yanlışlıkları kontrol etmek için GÖ değeri log-log kağıda işaretlenmeden bir sonraki $AB/2$ konumuna geçilmemelidir. Arazide yapılan yanlışlık, arazide düzeltilmelidir.

Tablo 6.2' de genel olarak DES ölçüsü almada kullanılan Schlumberger elektrod dizilimi için bir örnek ölçü karnesi görülmektedir. Bu dizilimde, elektrik alanın ölçüldüğü varsayılmaktadır. Bu nedenle, Schlumberger diziliminde dikkat edilmesi gereken en önemli konu; akım elektrodları arasındaki mesafenin, gerilim elektrodları arasındaki mesafenin en az 5 katı olmasıdır ($\overline{AB} \geq 5\overline{MN}$) (Bhattacharya ve Patra, 1968, Sayfa 8).

Kuramsal olarak elektrik alan ölçülmek istendiğinden \overline{MN} mesafesinin çok küçük olması gerekir. Fakat uygulamada, $AB/2$ mesafesi artırıldıkça, artık gerilim farkı aletin ölçemeyeceği kadar küçülür bu durumda \overline{MN} mesafesi artırılır. Arazide bunu artırırken; örneğin \overline{MN} nin ilk değerinde ardarda iki $AB/2$ mesafesi için ölçüler alınır. Daha sonra \overline{MN} mesafesi artırılır ve bir önceki $AB/2$ mesafeleri için tekrar ölçü alınır. Bunun sebebi ise, ölçü alımı tamamlandıktan sonra, veri işlem aşamasında, sabit \overline{MN} değerleri için çizilmiş GÖ eğrilerini birleştirmektir.

Bunu daha açık göstermek için, Tablo 6.3' de görülen arazide Schlumberger dizilimi için ölçülmüş GÖ değerlerini ele alalım. Bu değerler kullanılarak çizilen GÖ DES eğrileri Şekil 6.1' de görülmektedir. Burada görüldüğü gibi farklı \overline{MN} değerleri için GÖ eğrileri parçalı

durumdadır. Bu verinin yorumu için parçalı bu eğrileri birleştirmek gerekmektedir. Bu eğriler birleştirilirken önce soldan ilk iki parça ele alınır. Bu eğrilerden soldaki sabit kalır ve bunun sağındaki parça diğerine paralel olarak kaydırılarak bu iki eğri birleştirilir. Kaydırma işlemi yapılırken akım elektrodlarının sabit bir konumu için iki \overline{MN} mesafesi için GÖ değerleri vardır. Bu GÖ değerlerinin oranlarına bakılır. Örneğin \overline{MN} ' nin büyük değeri için ölçülen GÖ' in, \overline{MN} ' nin küçük değeri için ölçülen GÖ' e oranı hesaplanıyorsa, \overline{MN} ' nin büyük değeri için ölçülen GÖ değerleri, bulunan oran değerine bölünür. Eğer ardarda iki nokta için akım elektrodlarının sabit değerleri için, iki farklı \overline{MN} değerlerinde GÖ ölçülmüş ise, iki oran değeri bulunacaktır. Bu durumda ise, \overline{MN} ' nin büyük değeri için ölçülen GÖ değerleri, bu iki oran değerinin geometrik ortalamasına bölünerek kaydırma işlemi gerçekleştirilir. Bu şekilde, sağdaki eğri soldaki ile birleştirilmiş olur (Şekil 6.1b).

Daha sonra birleştirilen bu eğrinin sağındaki ilk parça' da aynı şekilde birleştirilir. Tüm eğriler tek eğri haline gelinceye kadar bu birleştirme işlemine devam edilir. Sonuçta Şekil 6.2' deki gibi sürekli bir eğri elde edilmiş olur. Nicel yorum için ise elde edilen bu sürekli GÖ DES eğrisine 1-B ters çözüm uygulanır. Ters çözüm sonucu, ölçü alınan nokta altındaki tabakalı ortama ait öz direnç ve kalınlıklar hesaplanmış olur.

Elde edilen bu sürekli eğrilerin değerlendirilmesinde, eskiden belli tabakalı modeller için hesaplanmış model eğrileri kullanılırdı (Mooney ve Wetzel, 1956; LaCampagnie, Geophysique, 1963). Günümüzde gelişen bilgisayar teknolojisine bağlı olarak, DES verilerinin yorumlanmasında 1-B ters çözüm tekniği bir standart olmuştur.

Tablo 6.2. Schlumberger dizilimi ölçü karnesi.

SCHLUMBERGER ELEKTROD DİZİLİMİ ÖLÇÜ KARNESİ

TARİH:../... / 20...

ÇALIŞILAN ALAN:

PROFİL NO :

ÖLÇÜYÜ ALAN :

KOORDİNAT :

AÇIKLAMA :

NO	AB/2	MN	K	I (mA)	Att	Ver.	Skala	ΔV	ρ _a
1	2	0.5	24.73						
2	2.5	0.5	38.86						
3	3	0.5	56.13						
4	4	0.5	100.09						
5	5	0.5	156.61						
6	5	1	77.72						
7	6	0.5	225.69						
8	6	1	112.26						
9	7	1	153.08						
10	8	1	200.18						
11	10	1	313.21						
12	15	1	705.72						
13	20	1	1255.22						
14	25	1	1961.72						
15	25	2	979.68						
16	30	1	2825.22						
17	30	2	1411.43						
18	40	2	2510.43						
19	50	2	3923.43						
20	50	2	3923.43						
21	60	2	5650.43						
22	70	2	7691.43						
23	80	2	10046.43						
24	80	5	4015.28						
25	90	2	12715.43						
26	90	5	5082.88						
27	100	5	6276.08						
28	120	5	9039.28						
29	150	5	14126.08						
30	200	5	25116.08						
31	250	5	39246.08						
32	250	10	19617.15						
33	300	5	56516.08						
34	300	10	28252.15						
35	400	10	50232.15						
36	500	10	78492.16						
37	600	10	113032.20						
38	700	10	153852.20						
39	800	10	200952.20						

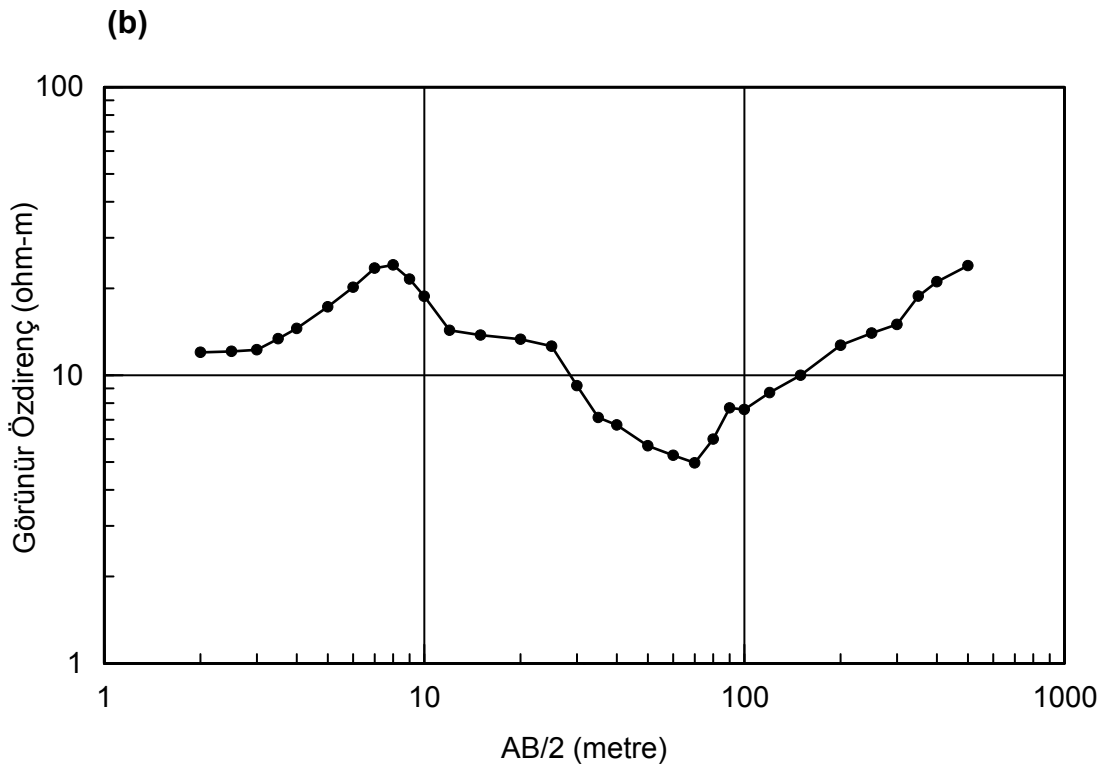
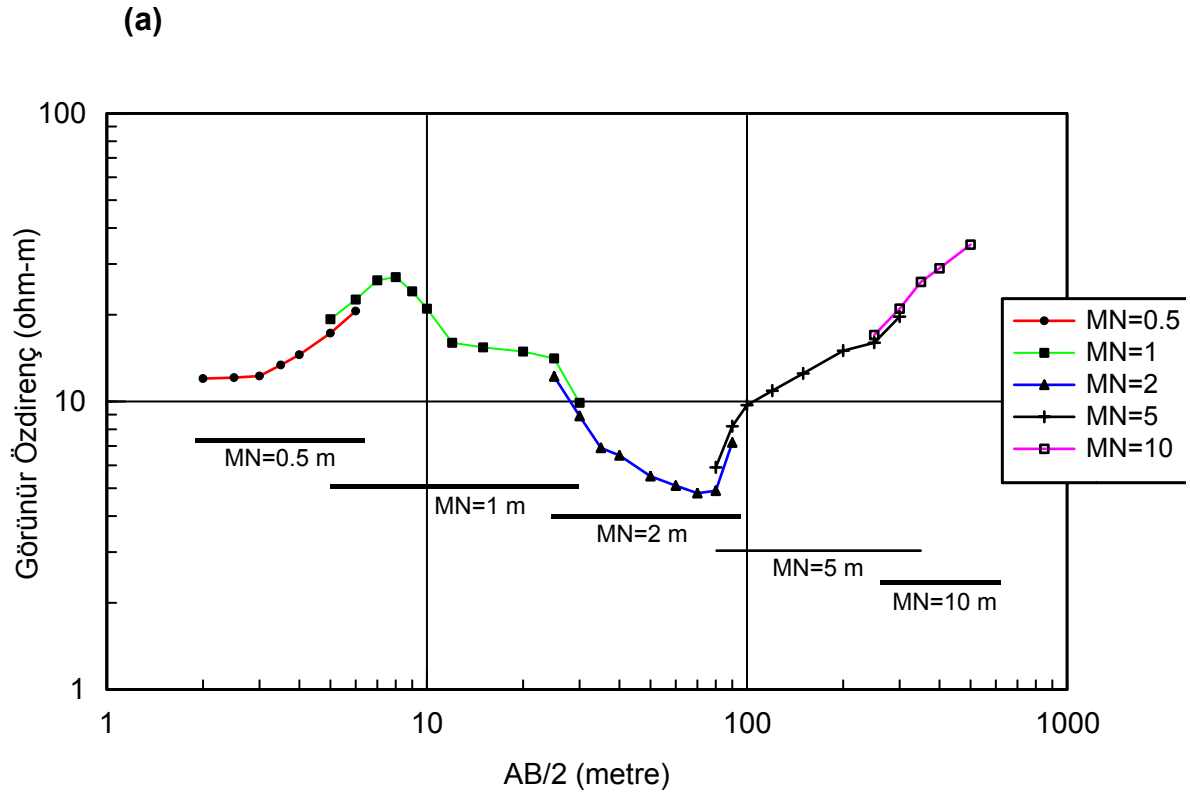
$$K = \frac{\pi}{4} \overline{MN} \left[\frac{\overline{AB}^2}{\overline{MN}^2} - 1 \right]$$

$$\Delta V = \frac{\text{Skala} * \text{Att}}{10 * \text{Verniye}}$$

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I}$$

Tablo 6.3. Schlumberger dizilimi ile ölçülmüş GÖ DES verileri.

AB/2	MN	GÖ
2	0.5	12
2.5	0.5	12.1
3	0.5	12.25
3.5	0.5	13.38
4	0.5	14.53
5	0.5	17.26
5	1	19.3
6	0.5	20.58
6	1	22.58
7	1	26.3
8	1	27
9	1	24.1
10	1	21
12	1	16
15	1	15.4
20	1	14.9
25	1	14.1
25	2	12.2
30	1	9.9
30	2	8.9
35	2	6.9
40	2	6.5
50	2	5.5
60	2	5.1
70	2	4.8
80	2	4.9
80	5	5.9
90	2	7.2
90	5	8.2
100	5	7.7
120	5	8.9
150	5	10.5
200	5	13.65
250	5	13.9
250	10	15.9
300	5	17.69
300	10	19.7
350	10	23.78
400	10	26.79
500	10	34



Şekil 6.1. (a) Farklı \overline{MN} mesafeleri için çizilmiş Schlumberger GÖ DES eğrileri. Düz çizgi eğrilerin kaydırılması ile bulunan DES eğrisi. (b) Elde edilen GÖ DES eğrisi.