

Şekil 2.5. Kuyu Yüzey elektrod dizimleri

2.6. Elektrod Dizilimlerinin Karşılaştırılması

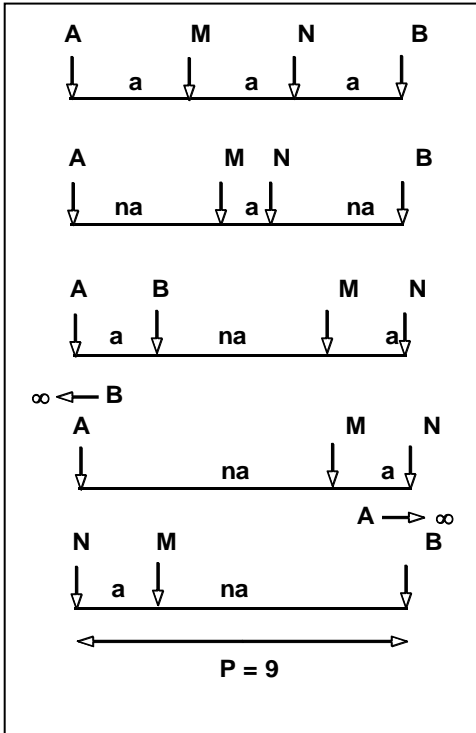
Birçok araştırmacı elektrod dizilimlerini araştırma derinliği, yanal ayrımlılık, düşey ayrımlılık vb. Bakımından birbiriyle karşılaştırmıştır (Roy and Apparao,1971; Barker, 1981;Edwards). Tablo 2.1' de en çok kullanılan dizilimler için bu karşılaştırmanın bir özeti görülmektedir. Tablo 2.2' de ise sinyal genliğinin hangi dizilimde en büyük olduğu gösterilmektedir.

Tablo 2.1. Klasik elektrod dizilimlerinin karşılaştırılması

	ARAŞTIRMA DERİNLİĞİ	YANAL AYRIMLILIK	DÜŞEY AYRIMLILIK	SİNYAL GENLİĞİ
ARTAN	Wenner (0.17P-0.11P)	Wenner	Pole-Dipole	Dipole-Dipole
	Schlumberger (0.19P-0.125P)	Schlumberger	Dipole-Dipole	Pole-Dipole
	Dipole-Dipole (0.25P-0.195P)	Pole-Dipole	Schlumberger	Schlumberger
	Pole-Dipole (0.35P)	Dipole-Dipole	Wenner	Wenner

Tablo 2.2. Klasik elektrod dizilimlerinde aynı elektrod açıklığı için sinyal genliği karşılaştırılması

Dizilim Adı	Geometrik Faktör (k)	P=9	k	Δf	r_a
Wenner	$2\pi a$	$a=3$	18.8	15.9	100
Schlumberger	$\pi n(n+1)a$	$a=1, n=4$	62.8	1.59	100
Dipole-Dipole	$\pi n(n+1)(n+2)a$	$a=1, n=7$	1583.4	0.063	100
Sol-yönlü Pole-Dipole (AMN)	$2\pi n(n+1)a$	$a=1, n=8$	452.4	0.22	100
Sağ yönlü Pole-Dipole (MNB)	$2\pi n(n+1)a$	$a=1, n=8$	452.4	0.22	100



2.7. 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; Candanayar 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 yönde 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 özdirenç, 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.

WENNER		Electrode Locations									
n-level	Number of Data	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	7		x		x	x		x		x	
2	4				x		x		x		
3	1						x				
TOTAL	12										

SCHLUMBERGER		Electrode Locations									
n-level	Number of Data	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	7			x		x		x		x	
2	5				x		x		x		
3	3					x		x			
4	1						x				
TOTAL	16										

DIPOL-DIPOL		Electrode Locations									
n-level	Number of Data	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	7			x		x		x		x	
2	6				x		x		x		
3	5					x		x		x	
4	4						x		x		
5	3							x			
6	2								x		
7	1									x	
TOTAL	28										

PD-L		Electrode Locations									
n-level	Number of Data	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	8			x		x		x		x	
2	7				x		x		x		x
3	6					x		x		x	x
4	5						x		x		x
5	4							x		x	x
6	3								x		x
7	2									x	x
8	1										x
TOTAL	36										

PD-R		Electrode Locations									
n-level	Number of Data	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	8		x		x		x		x		x
2	7			x		x		x		x	
3	6				x		x		x		
4	5					x		x			
5	4						x				
6	3							x			
7	2								x		
8	1									x	
TOTAL	36										

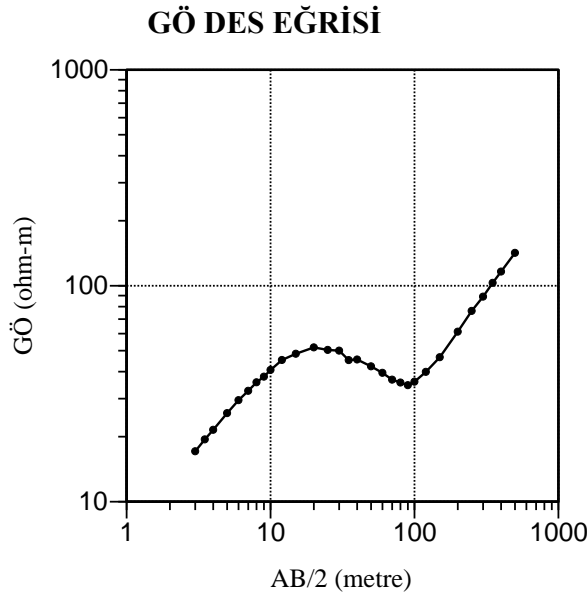
Şekil 2.6 Çok-elektrodlü (10-elektrod) sistem ile farklı dizilimler kullanarak ölçülebilecek veri sayısı ve yapma-kesit' de yazılacakları yerler.

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 yerinde düşey yöndeki özdirenç 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 $GÖ (\rho_a)$ 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 logaritmiktir. DES ölçüleri, yeraltı suyu, ana kaya üstündeki örtü kalınlığının bulunması vb. amaçlar için kullanılır.

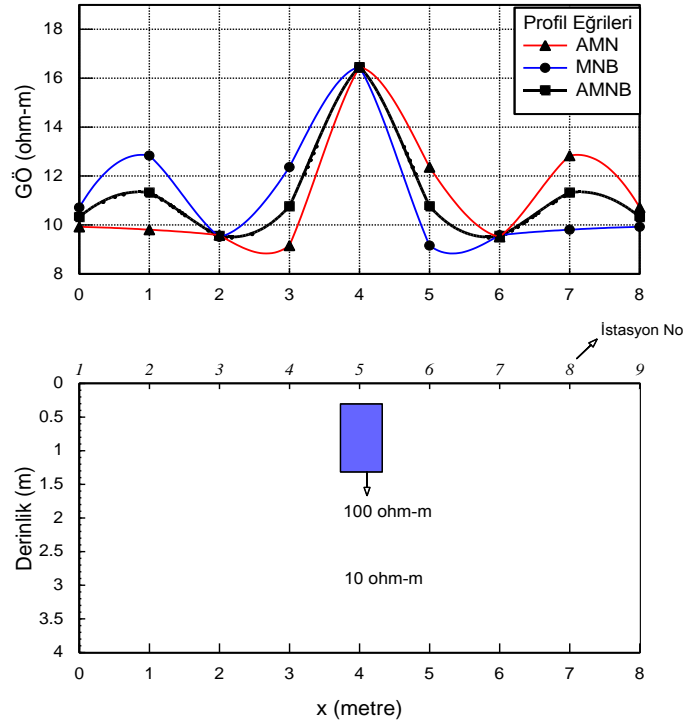
DES verilerinin nicel yorumunu yapmak için bu verilere ters çözüm uygulanmalıdır. DES verileri, yerininin 1-B olduğu kabul edilerek, 1-B ters çözüm yapılır. Ters çözüm sonunda, tabakalı ortama ait özdirenç ve kalınlıklar hesaplanır.

3.2. Profil Ölçüsü ve GÖ Profil Eğrisi

Yerinde 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 özdirençli 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.

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.

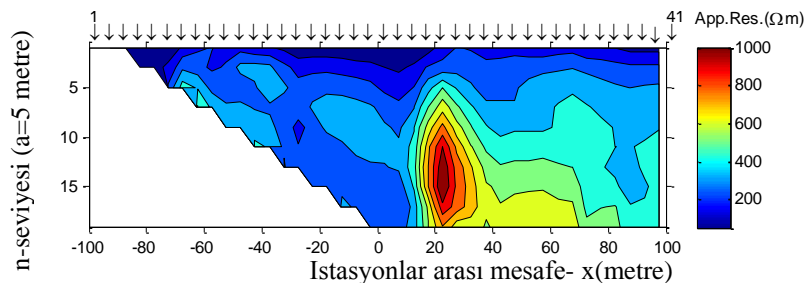


Şekil 3.2. İki-yönlü üç-elektrod dizilimi ve AMNB GÖ profil eğrileri ve GÖ değerlerini hesaplandığı 2-B model.

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 alımında 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).

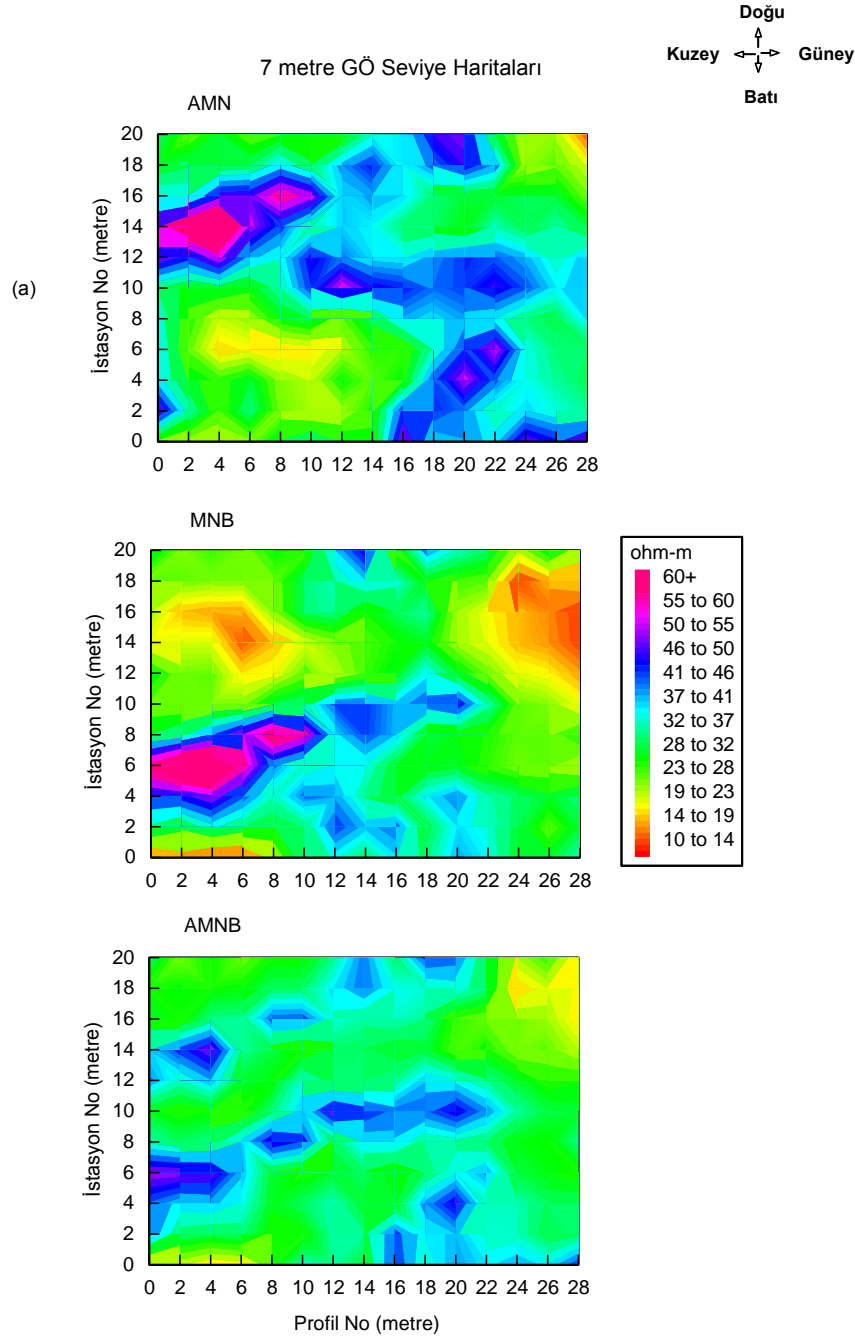
Günümüzde çok-elektrodlü ölçü aygıtları sayesinde, ölçü alımı hızlı ve kolay olmaktadır. Bu nedenle, sondaj-profil ölçüsü, yaygın ölçü tekniği olmuştur. Bu yöntem ile ölçülen verilerden yerindeki hem düşey hemde yatay yöndeki özdirenç yapısı hakkında bilgi edinilebilir. Yöntem DES ve profil ölçüsü tekniklerinin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



Şekil 3.3. Görünür özdirenç yapma-kesiti (pseudo-section).

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

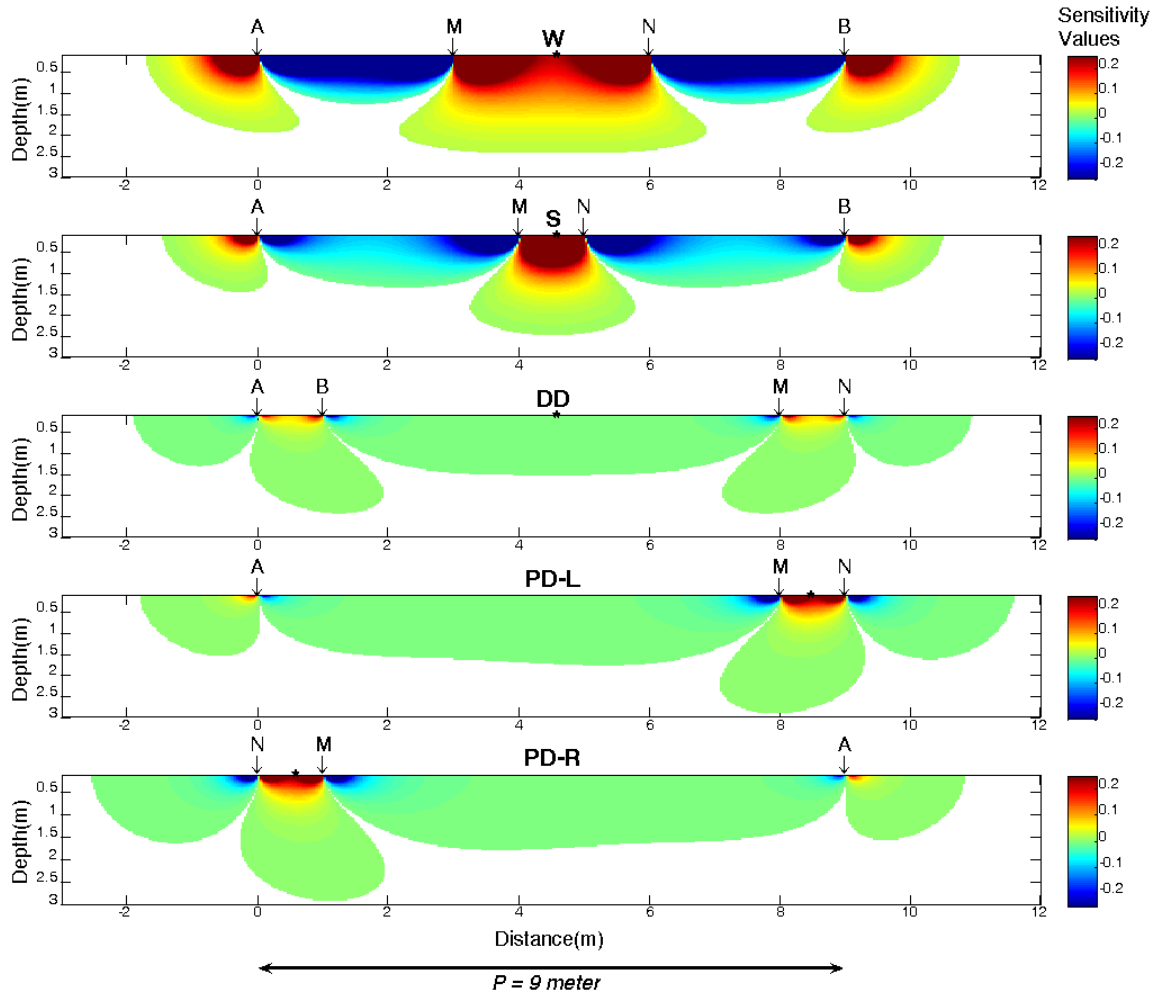
4. FARKLI ELEKTROD DİZİLEMLERİ İÇİN SİNYAL KATKI KESİTİ

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- $\Delta V(x, y, z)$,

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

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 ΔV ' na bölünür (Roy ve Apparao, 1971).

Barker (1979) (2.3) denklemini kullanarak x - z düzlemi üzerinde yeryüzünde ölçülen toplam ΔV ' 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 3.4. 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 elektrodları 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 özdirenç değerini kendi