

**Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Jeofizik Mühendisliği Bölümü**



**JFM316 ELEKTRİK YÖNTEMLER
LİSANS DERS NOTU**

Prof. Dr. M. Emin CANDANSAYAR

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

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

NOT: Bu ders notları 2003 yılından itibaren Ankara Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Bölümünde ders notu olarak kullanılmaktadır. 25-26 Ekim 2014 tarihlerinde **TMMOB Jeofizik Mühendisleri Odasının** düzenlediği kurs kapsamında sadece kursiyerlerin kullanımı için çoğaltılabilir. Başka bir amaçla yazardan izinsiz kullanılamaz.

**10 Ocak 2016
ANKARA**

İçindekiler

1. GİRİŞ	4
2. YÖNTEM	4
2.2. Ölçü Sistemi	4
2.3. Yarı Sonsuz Homojen Bir Ortamda Gerilim ve Özdirenç Bağlıları	5
2.4. Görünür Özdirenç Kavramı	7
2.5. Elektrod Dizilimleri	7
2.5.1. Kuyu-kuyu ve kuyu-yüzey elektrod dizilimleri	10
2.6. Elektrod Dizilimlerinin Karşılaştırılması	12
2.7. Çok-Elektrodlü Ölçü Sistemi ve İki-Yönlü Üç-Elektrod Dizilimi	12
3. ÖLÇÜ ALIM TEKNİKLERİ VE VERİ SUNUMU	15
3.1. Sondaj Ölçüsü (Yer-elektrik Sondajı) ve GÖ Sondaj Eğrisi	15
3.2. Profil Ölçüsü ve GÖ Profil Eğrisi	15
3.3. Sondaj-Profil Ölçüsü ve GÖ Yapma-Kesiti	17
3.4. GÖ Seviye Haritası	18
4. FARKLI ELEKTROD DİZİMLERİ İÇİN SİNYAL KATKI KESİTİ	19
4.1. Schlumberger elektrod dizilimi sinyal katkı kesiti	21
4.2. Wenner ve yarım-Wenner elektrod dizilimi sinyal katkı kesiti	21
4.3. Dipol-dipol elektrod dizilimi sinyal katkı kesiti	22
4.4. İki-yönlü üç elektrod dizilimi sinyal katkı kesiti	22
4.5. İYÜE Dizilimi Profil Verilerinin İki-Yönlü Gradient (TSG) Dönüşümü	25
5. VERİ YORUMU	30
5.1. DAÖ Yönteminde Modelleme	30
6. DAÖ VERİLERİNİN 1-B YORUMLANMASI VE 2B-YAPILARIN ETKİSİ	32
6.1. Schlumberger Elektrod Dizilimi ile Sondaj Ölçüsü Alma ve Değerlendirme	35
6.2. Ölçü Karnesi Nasıl Hazırlanır?	36
7. DOĞRU AKIM ÖZDİRENÇ YÖNTEMİNDE 2B ve 3B MODELLEME VE TERS ÇÖZÜM	40
7.1. Modelleme	40
7.2. Model Bağlılığı	41
7.3. 2B ve 3B Poisson Denkleminin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile çözümü	42
7.3.1. İntegral Denkleminin Elde Edilmesi	43
7.3.2. Alanın Elemanlara Ayrılması	44
7.3.3. Eleman Dizey Denkleminin Elde Edilmesi	45
7.3.4. Genel Dizey Denkleminin (Global Matrix Equation) Elde Edilmesi	46

7.3.5. Gerilim Alanın Çözümü	48
7.3.6. Gerilimin (x, k_y, z) Uzayından (x, y, z) Uzayına Dönüştürülmesi ve GÖ Hesabı	49
7.4. DAÖ Yönteminde, 2-B Modelleme Uygulaması için Yararlı Bilgiler	52
Tablo 1.1. 2-B modellemede kullanılan örnek veri dosyası	53
8. DAÖ VERİLERİNİN 2B ve 3B TERS ÇÖZÜMÜ	58
8.1. Kısmi Türevler İçeren Dizeyin Hesaplanması	60
8.2. Programın Akış Şeması	61
8.3. DAÖ verilerinin 2-B Ters Çözümü' nde Pratik Bilgiler	64
8.3.1. Veri Dosyasının Hazırlanması	65
8.3.2. Model ağının oluşturulması	66
8.3.3. Ön-kestirim modelinin oluşturulması	66
8.3.4. Ters çözüm parametrelerinin okunması ve algoritmanın çalıştırılması	66
8.4. Uygulama Örnekleri	66
8.4.1. Yapay Veri Uygulaması	66
8.4.2. Moğolistan' da Yapılan DAÖ çalışması	69
9. YAPAY UÇLAŞMA YÖNTEMİ (INDUCED POLARIZATION-IP)	71
9.1. YU Yönteminin Tarihçesi	71
9.2. YAPAY UÇLAŞMAYI (YU) OLUŞTURAN ETKİLER	72
9.2.1. Elektrot Uçlaşması (Electrode Polarization)	73
9.2.2. Zar Uçlaşması (Membrane Polarization)	73
9.3. YU YÖNTEMİNDE ÖLÇÜ ALIMI VE YU PARAMETRELERİ	74
9.3.1. Zaman Ortamı YU Ölçüsü	74
9.3.2. Frekans Ortamı YU Ölçüsü	75
9.4. Görünür Yüklenebilirlik (m_a) ve Görünür Frekans Etki (FE_a) Kavramları	77
9.5. YU YÖNTEMİNDE VERİ TOPLAMA TEKNİKLERİ	77
9.6. YU YÖNTEMİNDE VERİ YORUMU	78
9.6.1. Yapay Uçlaşma Verilerinin Nitel Yorumu	78
9.6.2. YU Verilerinin Nicel Yorumu: Modelleme ve Ters Çözüm	78
9.7. YU Yönteminde Düz Çözüm	79
9.8. YU Verilerinin Ters Çözümü	81
9.9. SPEKTRAL YU YÖNTEMİ (Faz YU Yöntemi)	83
9.9.1. Spektral YU Yanıtı	83
10. KAYNAKLAR	86

DOĞRU AKIM ÖZDİRENÇ YÖNTEMİ

1.GİRİŞ

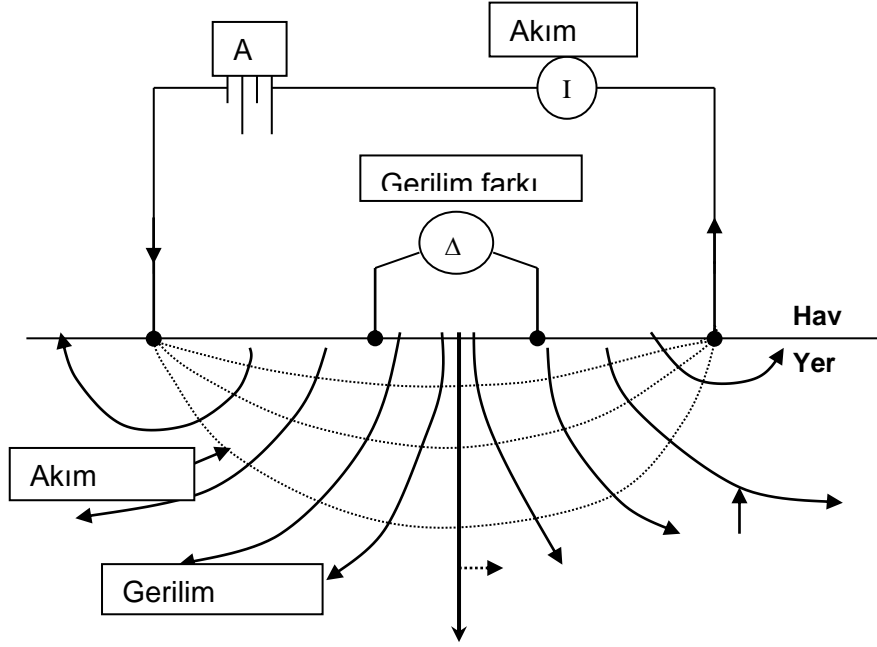
Özdirenç (Resistivity) yöntemi olarak' da bilinen doğru akım özdirenç (DAÖ) yöntemi, arama jeofiziği' nde kullanılan başlıca jeofizik yöntemlerdendir. Bu yöntemde amaç, yerinin jeolojik yapısını, elektrik özelliğine (özdirenç) göre haritalamaktır. Yöntem, maden, mineral, jeotermal enerji kaynağı ve petrol 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 kullanılanmıştır.

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 düzende, 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 potansiyel) etkisini giderecek şekilde imal edildiğinden gerilim elektrodu için de çelik' ten yapılmış elektrodlar kullanılır.



Şekil 2.1. 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.

2.3. Yarı Sonsuz Homojen Bir Ortamda Gerilim ve Özdirenç Bağlıları

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 uygulveığında 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,

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

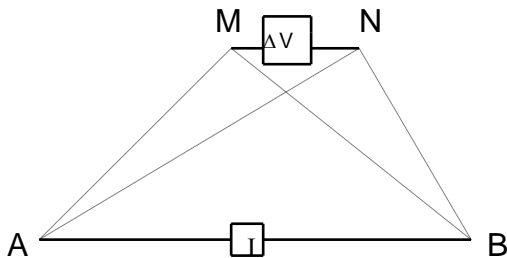
şeklinde çözülebilir. Kaynaktan çok uzak noktalarda gerilim sıfır olması gerektiğinden (2.4) denklemindeki C integrasyon sabitinin değeri sıfır olmalıdır. Yeryuvarı hava ile sınırlı olmadığından, ortamın yarısonsuz olması gerekir (Başokur, 1984). Denklem (2.4), yarısonsuz ortam için aşağıdaki gibi yazılabilir.

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

Pratikte, akım yeryüzünden I (source) ve $-I$ (sink) olmak üzere iki elektrodla uygulanır ve gerilim bütün noktalarda bu iki kutuplu (bipolar) düzenekle 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 öz direnci

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

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.

2.4. 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) denkleminden 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.

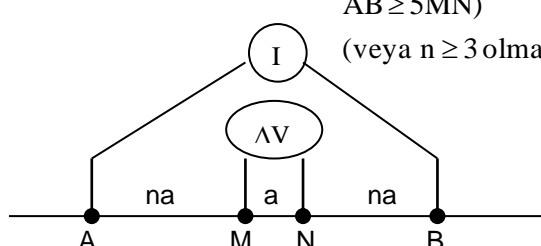
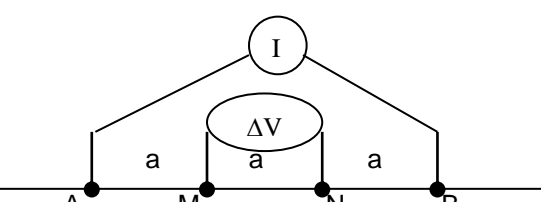
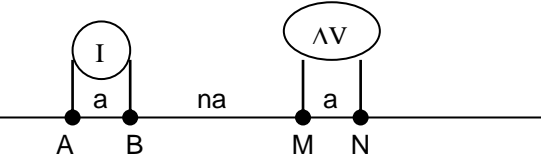
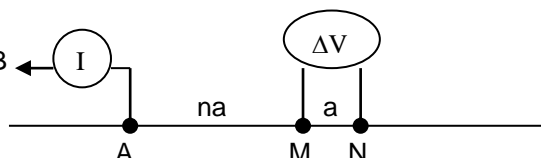
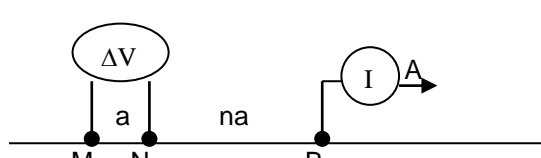
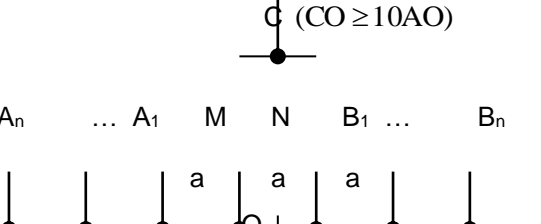
2.5. Elektrod Dizilimleri

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.



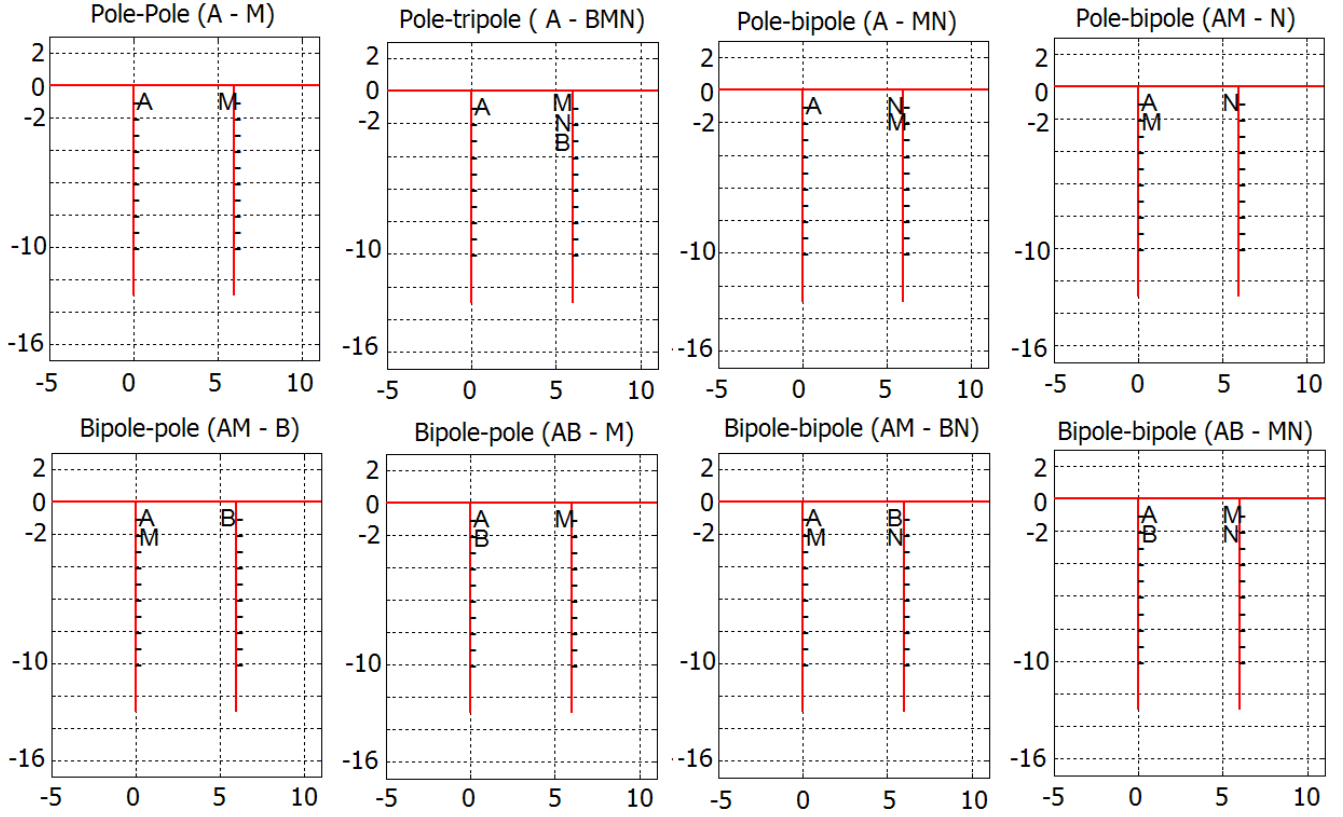
Arkeolojik amaçlı çalışmalarda ise yarım-Wenner, yarım-Schlumberger, twin probe (Aspinall ve Lynam, 1970), Gradient (Schlutz, 1985), odaklanmış (focused) dizilimler (Gravinetti, 1967), üç gerilim elektrod (Wenner α , Wenner β ve Wenner γ) (Carpenter ve Haberjam, 1956), iki-yönlü üç-elektrod (Candansayar 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	$\overline{AB} \geq 5\overline{MN}$ (veya $n \geq 3$ olmalı) 	Genel olarak $K = \frac{\pi}{4} \frac{\overline{AB}^2}{\overline{MN}^2} - 1$ dir. Eğer, $MN=a$ ve $AM=NB=na$ alınırsa $\pi n(n+1)a$	$\rho_a(AMNB)$
(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	$C (\overline{CO} \geq 10\overline{AO})$ 	$2\pi n(n+1)a$	$\rho_a(AMN)$ ve $\rho_a(MNB)$

Şekil 2.3. Kullanılan başlıca elektrod dizimleri. Burada $n=1,2, \dots$ dir.

2.5.1. Kuyu-kuyu ve kuyu-yüzey elektrod dizilimleri

Kuyu-kuyu ve kuyu-yüzey elektrod dizilimleri ise Şekil 2.4 ve 2.5' de görülmektedir.



Şekil 2.4. Kuyu-kuyu elektrod dizilimleri