

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

No
—

ETKİSEL KUTUPLAŞTIRMA YÖNTEMİ İLE
BAZİ JEOLOJİK BİRİMLERİN AYRIMI İÇİN

YENİ BİR PARAMETRE

AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
KÜTÜPHANESİ

DOKTORA TEZİ

Yük. Müh. M. Ali KAYA

T588/1-1

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20 Eylül 1991
Tezin Savunulduğu Tarih : 28 Kasım 1991

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ali KEÇELİ
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Kurultay ÖZTÜRK
Prof. Dr. Ahmet ERCAN

EYLÜL 1991

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
GÖSTERİMLER	IV
ÖZET	VI
ABSTRACT	VII
1. GİRİŞ	1
2. TARİHSEL DEĞİNİM	3
3. TEMEL KAVRAMLAR	6
3.1. Kayaçlarda Elektriksel İletim	6
3.2. Öz direnç için Temel Kavramlar	7
3.2.1. Nokta Akım Kaynağının Homojen Ortamda Oluşturduğu Potansiyel	7
3.2.2. Nokta Akım Kaynağının Katmanlı Ortamda Oluşturduğu Potansiyel	9
3.2.3. Yorum Yöntemleri	16
3.2.4. Araştırma Derinliği	18
3.2.5. Akım Dağılımı	21
3.2.5.1. Homojen Ortamda Akım Dağılımı	21
3.2.5.2. Heterojen Ortamda Akım ve Potansiyel Dağılımı	24
3.3. Kayaçlarda Kutuplaştırma Olayı	27
3.3.1. Doğal Kutuplaştırma Olayı	27
3.3.2. Etkisel Kutuplaştırma Olayı	30
3.3.2.1. Arayüzey Olayı Olarak IP	30
3.3.2.2. Geometrik Etkiden Dolayı IP	37
3.3.3. IP Ölçü Alım Teknikleri ve Parametreler	41
3.3.4. Karmaşık Öz direnç	46
3.3.5. Negatif IP	51
3.3.6. IP Ölçümlerindeki Gürültüler ve Verilerden Çıkarılması	53
3.3.7. Doğrusal Olmayan IP	54
4. TEZ KONUSUNUN ORTAYA KONULMASI	82

5.	KURAMSAL GELİŞME	83
5.1.	Arayüzey Kutuplaştırmasına Sahip Ortamlarda Özdirencin Elektrik Akımı ile Değişimi	83
5.2.	Geometrik Olarak Özdirenç-Akım İlişkisi	86
6.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	105
6.1.	Laboratuvar Deneylerinde Kullanılan Aletler	106
6.2.	Laboratuvar Modellerinin Hazırlanması	108
6.3.	Deneysel Sonuçlar	109
6.3.1.	Ortamların İncelenmesi	110
6.3.1.1.	Elektrolit Ortamı Musluk Suyu	110
6.3.1.2.	Elektrolit Ortamı 10^{-2} N NaCl	122
7.	ARAZİ ÇALIŞMALARI	134
7.1.	Arazide Kullanılan Aletler	134
7.2.	Akım - Özdirenç İlişkisi	135
7.3.	Kuramsal ve Arazi Eğrilerinin Karşılaştırılması	149
8.	SONUÇ VE ÖNERİLER	153
	TEŞEKKÜR	156
	KAYNAKÇA	158

GÖSTERİMLER

A	: Akımın geçtiği kesit alan
AC	: Alternatif Akım
B ₁	: Ağırlık Fonksiyonu
CR	: Karmaşık Özdirenc
DC	: Doğru Akım
E	: Elektrik Alan
F	: Formasyon Faktörü
F(x)	: Sin. Fonksiyonu
HD	: Harmonik Bozulma
I	: Akım
I _x	: Akımın Yatay Bileşeni
J	: Akım Yoğunluğu
J _{k1}	: k ₁ Yansım Katsayısına Sahip Ortamın Akım Yoğunluğu
J _x	: Akım Yoğunluğu Yatay Bileşeni
J _z	: Akım Yoğunluğu Düşey Bileşeni
J ₀ (λ)	: Sıfırıncı dereceden 1. nci cins Bessel Fonksiyonu
K(λ)	: Slichter Çekirdek Fonksiyonu
K _e	: Dielektrik Sabit
L	: Akım elektrodları arası uzaklık
PFE	: Yüzde Frekans Etkisi
PCE	: Yüzde Akım Etkisi
R ₀	: Kayacın DC Direnci
T	: Sıcaklık
T(λ)	: Dönüşük Özdirenc Fonksiyonu
V	: Gerilim, Hacim
V _{im}	: Gerilim Sanal Bileşeni
V _{Re}	: Gerilim Gerçel Bileşeni
V _P	: Yere Verilen Gerilimin Genliği
V _e	: Sönüm Geriliminin Genliği
V ₁	: Yüksek Frekans Gerilim Genliği
V ₂	: Düşük Frekans Genliği
X(λ)	: Çekirdek Fonksiyonu

$Z(i\omega)$: Cole - Cole Modelinin Eşdeğer Devresinin Empe-
	dansı
a ve b	: Deneysel Sabitler
c	: Frekans Bağlılığı Parametresi, Konsantrasyon
d	: Yayınık Tabakanın Kalınlığı
e	: Eksponansiyellik, Elemanter Yük
f	: Frekans
h_n	: Katman derinliği
k	: Boltzman Sabiti
k_n	: Yansıma katsayısı
m	: Yüklenebilirlik, Çimentolanma Faktörü
m_a	: Görünür Yüklenebilirlik
n_1	: Birim Hacimdeki İyon Sayısı
r	: Uzaklık
s	: Çift Tabakadaki Yük Yayılımı
t	: Zaman
t_n	: Katman Kalınlığı
v_1	: İyonların Hızları
u_1	: İyonların Hareketliliği
z	: Derinlik
x, y, ϕ	: Silindirik Koordinat Sistemi Değişkenleri
θ	: Katman Sınırlarında Akım Çizgilerinin Normalle Yaptığı Açısı
$\theta(\lambda)$: Stefanescu Çekirdek Fonksiyonu
ϕ	: Faz Açısı, Gözeneklilik
$\phi(\omega)$: Karmaşık Özdirenç Faz Spektrumu
Λ	: Ekvivalent İletkenlik
α	: Mineral Yüzeyinin Alanı
η	: Kutuplaştırma
λ	: Integral Değişkeni, Orantılılık Sabiti
ρ_a	: Görünür Özdirenç
ρ_1	: İlk Katmanın Özdirenci
$\rho(i\omega)$: Karmaşık Özdirenç
$\rho_G(\omega)$: Karmaşık Özdirenç Gerçek Bileşeni
$\rho_S(\omega)$: Karmaşık Özdirenç Sanal Bileşeni
τ	: Zaman Sabiti

ÖZET

Literatürden bilindiği gibi, kayaçların öz dirençleri akım yoğunluğu ile değişmektedir ve bazı araştırmacılar, laboratuvar bazında, doğrusal olmayan Etkisel Kutuplaştırma (IP) yöntemi aracılığıyla mineral ayırımı yapılabileceğini göstermişlerdir. Bu tezde, doğrusal olmayan IP olayı laboratuvar ve arazide ayrıca kuramsal olarak incelenmiş ve bir akım etkisi parametresi tanımlanabileceği ortaya konmuştur.

Laboratuvar çalışmalarında, elektrod ve zar kutuplaştırmasına sahip değişik modellerin doğrusal olmayan IP ölçümleri alınmıştır.

Model çalışmaları, elektrod kutuplaştırmasını temsil eden metalik levhalar ve zar kutuplaştırmasını temsil eden değişik oranlardaki kil-kum karışımları ile yapılmıştır. Ölçümlerde, 10^{-2} N konsantrasyonunda NaCl çözeltisi ve musluk suyu kullanılmıştır. Model çalışmalarında, (.0625 - 2048) Hz. arasında 16 farklı frekansda (156×10^{-3} - 156) $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ arasında 4 farklı akım yoğunluğu kullanılarak öz direnç ve faz açısı ölçümleri alınmıştır. Model çalışmalarının sonuçlarına göre, elektrod kutuplaştırması ölçümleri, zar kutuplaştırması ölçümlerine göre daha şiddetli doğrusal olmayan davranış göstermektedir. Elektrod ve zar kutuplaştırma ölçümleri, kil-kum karışımı, metalik levha ve çözeltilere bağlı olarak farklı frekanslarda farklı faz açıları göstermektedir.

Arazi çalışmalarında, doğrusal olmayan IP davranışını saptamak için farklı yer ortamlarında farklı akım yoğunlukları kullanılarak Düşey Elektrik Sondajları (DES) yapılmıştır. Laboratuvar denemelerinde olduğu gibi, akım yoğunluğunun artması ile öz direncin azaldığı izlenmiştir. Frekans ortamı IP de olduğu gibi, iki farklı akım kullanılarak farklı DES eğrileri elde edilmiştir. Bu benzerlikten yararlanarak, frekans ortamı IP de frekans ile öz direncin değişmesi gibi, akım ortamı IP veya nonlinear IP için akım yoğunluğu ile öz direncin değişimine bağlı bir akım etkisi parametresi tanımlanmıştır.

Kuramsal çalışmalarda, nokta akım kaynağının katmanlı ortamdaki potansiyel dağılımından yararlanarak yatay iki ve üç katmanlı ortamlar için akım yoğunluğu dağılımı elde edilmiştir. Geometrik faktörün akım yoğunluğu dağılımına etkisi araştırılmıştır. Buradan akım etkisi değerlerinin kuramsal ve pratik olarak uyumlu olduğu görülmüştür.

Böylece, akım etkisi parametresinin, frekans etkisi parametresi gibi kullanılabileceği gösterilmiştir.

ABSTRACT

It is known from the Induced Polarization (IP) literature that rocks resistivities vary with current densities and that some authors have shown that mineral discrimination can be made by means of nonlinear IP method in the base of laboratory. In this thesis, laboratory, field and theoretical works have been made on the nonlinear IP and a current effect parameter has been defined.

In the laboratory works, a number of nonlinear IP measurement have been taken by preparing various models including membrane and electrode polarization.

The model experiments are made by setting sand-clay samples with various mixing ratio for representing membrane polarization and by setting metallic plates for representing electrode polarization. To control model conductivity, NaCl solution with 10^{-2} N concentration and water are put in the tank. In the model experiments, resistivity and phase measurement are taken by applying the current density for four different values between $(156 \times 10^{-3} - 156) \text{ A/cm}^2$ and at sixteen different frequencies between (.0625 - 2048) Hz. According to the results of model experiments, the electrode polarization measurements show more nonlinear IP than the membrane IP does. Electrode and membrane polarizations measurements show different phase angles at different frequencies, depending on the sand-clay mixing, metallic plates and the solutions.

In the field works, in order to investigate nonlinear IP phenomena various depth sounding have been applied to various geological structures, by using various current densities. As in the laboratory experiments, as the current density increases, it is seen that resistivity decreases gradually. As in the variable frequency IP, different depth sounding curves have been obtained by using two current amount. Utilizing from this similarity, a current effect parameter has been defined for nonlinear IP or variable current IP which means varying of resistivity by current density as in the variable frequency IP which means varying of resistivity by frequency.

In the theoretical work, a current density relation for two and three horizontal layers have been obtained by using the potential relation for a point source. The effect on the current density distribution of the geometric factors has also been investigated. It is seen that current effect values obtained theoretically and practically are in the convenient.

Thus, it is shown that the current effect parameter can be used as the frequency effect parameter.

1. GİRİŞ

Etkisel Kutuplaştırma (Induced Polarization, IP) yöntemi, kayaçların iyon içeren bölgelerinin belirlenmesinde kullanılan bir jeofizik yöntemidir. Temel nedeni, iyonların kayaç içerisindeki arayüzeylerde yoğunlaşmalarıdır. Bu özelliğinden dolayı, özellikle, arayüzey miktarı fazla olan dissemine sülfürlü maden yataklarının aranmasında temel yöntem durumundadır. Bunun yanı sıra, hidrojeoloji ve mühendislik jeolojisi sorunlarının çözümünde de oldukça fazla kullanılan bir yöntemdir. Son on yılda yapılan çalışmalarda, petrol aramalarında da kullanılabileceği ortaya konmuştur. Kömür aramaları da bir diğer uygulama alanı olarak görülebilmektedir.

IP'nin uygulama alanlarından biri de, laboratuvar koşullarında mineral ayırımıdır. Bilindiği gibi, öz direnç yönteminde yere uygulanan akım ile yerden ölçülen gerilim doğrusal ilişkilidir, yani, Ohm yasası geçerlidir. Son 25 yıl içinde yapılan araştırmalarda, bu doğrusal ilişkinin her zaman geçerli olmadığı; belirli akım yoğunluğu değerlerinden sonra akım-gerilim ilişkisinin doğrusal olmayan (Non-linear) bir davranış gösterdikleri saptanmıştır (Shaub 1965, 1969; Baudoin, 1968; Scott ve West, 1969; ...) ve bu özellik "Doğrusal Olmayan IP Davranışı" olarak tanımlanmıştır. Bu özellik yardımıyla, laboratuvar koşullarında, jeolojik birimlerin ayırımına çalışılmaktadır (Shaub 1971a, b, c; Katsube ve diğ., 1973; Klein, 1978; ...). Bu güne kadar yapılan çalışmalar, özellikle elektrod kutuplaştırmasına sahip metalik mineral örneklerinde, olumlu sonuçlar vermiştir. Ayrıca, kuyu içi ölçümler yardımıyla mineral ayırımının başarılı olabileceği gösterilmiştir (Saub, 1969 ve 1971; Olhoeft, 1985).

Tarihçe Bölümünde verileceği gibi 20-25 yıllık çalışmalarda, laboratuvar koşullarında olay araştırılırken, klasik IP gibi, yerinde (In-situ) çalışmalarla jeolojik birimlerin ayırımına katkısı, çok az araştırmaya konu olmuştur. IP ile ilgili yayınlarda yerinde çalışmalarla olayın çözümünün güçlüğü belirtilerek ancak kuyu içi ölçümlerde kullanılabileceği ve olumlu sonuçlar alınabileceği vurgulanmıştır (Shaub 1969; Shaub ve diğ., 1971; Bertin ve Loeb, 1976; Klein ve Shuey, 1978; Olhoeft, 1985). Bu nedenle, doğrusal olmayan IP davranışı yardımıyla, bir akım etkisi parametresi tanımlanarak, yerinde jeolojik birimlerin ayırımının koşulları, bu tez'in konusunu oluşturmaktadır.

Bu amaca ulaşmak için Isparta civarında, mekanik sondaj ile jeolojik özellikleri bilinen yerortamları üzerinde uygulamalar yapılmıştır. Ek olarak, laboratuvar koşullarında olayın gelişimi, öz direnç, PFE ve faz parametrelerinde incelenmiştir. Ayrıca, olayın matematik gelişimi, ortaya konmaya çalışılmıştır.

2. TARİHSEL DEĞİNİM

IP' deki ilk çalışmalar 1920 yıllarında Schlumberger kardeşler tarafından başlatılmıştır. Ölçümler zaman ortamında ve sülfürlü maden yatakları üzerinde alınmıştır. 1950 yılında frekans ortamındaki çalışmalar Collett ve Seigel tarafından başlatılmıştır. Collett (1959) ve Wait (1959) ile Ness (1959) bu konudaki çalışmalarını yayınlamışlardır. IP ile ilgili geniş yayın listesi, Sumner (1976) ve Bertin ve Loeb (1976) da bulunmaktadır. Burada konu ile ilgili çalışmalar verilecektir.

Shaub (1965, 1969, 1973 ve 1974) ve Shaub ve diğ. (1971 a, b, c) doğrusal olmayan davranışı gerek laboratuvar gerekse kuyu içi ölçümlerle araştırmışlardır.

Baudoin (1968), laboratuvarında örnekler üzerinde yaptığı çalışmalarla IP'nin doğrusal olmayan bir olay olduğunu vurgulamıştır.

Scott ve West (1969) çalışmalarında, IP parametrelerinin $0.1 \mu A/cm^2$ akım yoğunluğundan itibaren akım yoğunluğu arttıkça azaldığını ortaya koymuşlardır. Ek olarak, akım yoğunluğu arttıkça öz dirençde de küçülme gözlenmiştir.

Katsube, Ahrens ve Collett (1973), doğrusal olmayan IP davranışını faz açısı parametresinde izlemişlerdir. Akım yoğunluğunun artmasıyla faz açısındaki değişimi izleyerek mineral ayrımının olabirliğini göstermişlerdir.

Olhoeft ve diğ. (1977), Olhoeft (1977, 1985) ve Hall ve Olhoeft (1986), doğrusal olmayan karmaşık öz direnç ve doğrusal olmayan elektriksel özellikler konusunda

araştırma yapmışlardır. Bu çalışmalarında doğrusal olmayan davranışın tanınması, uygulanabilirliği ve mineral ayırımına katkısını geniş olanak incelemişlerdir. Olhoft'in bu konuda bir çok bildiri ve yayını olmasına karşılık bir kısmına ulaşmak mümkün olmamıştır. Kendisine defalarca yazılıp istenmesine karşılık herhangi bir yanıt alınamamıştır.

Klein ve Shuey (1978), elektrokimyasal kuramlarla doğrusal olmayan IP davranışını açıklamışlar ve 10 Hz. frekansında 5 mA/cm² ye kadar akım yoğunluklarında Katsube, Ahrens ve Collett (1973)'e benzer sonuçlara ulaşmışlardır. Klein ve Shuey (1978) Rus araştımacılara atıf yapmıştır. Buna göre Ryss ve diğ. (1967) ve Ryss (1971, 1973, 1975) 10⁻³ Hz frekansında olayın varlığını araştırmışlar ve bir nevi kuyu içi ölçümler yapmışlardır.

Keçeli (1979), bu konuda, Türkiyede, ilk arazi çalışmasını yapan araştırmacıdır. Türkiyenin değişik yerlerinde, elektrod kutuplaştırmasına sahip ortamlar üzerinde doğrusal olmayan davranışı incelemiştir.

Anderson (1981), Elektrolit ile kontakt durumundaki sülfür minerallerinin doğrusal olmayan elektriksel davranışını açıklamıştır.

Klein ve Shuey (1982), kil taşıyan yapay kumtaşlarının elektriksel özelliklerini incelerken doğrusal olmayan davranışı da gözlemişlerdir.

Erdoğan A. (1982), IP yönteminde akım-frekans ilişkisini incelerken akım yoğunluğunun artmasıyla özdirencin azaldığını, bu azalmanın özellikle özdirenç sanal bileşeninde daha fazla olduğunu gözlemiştir.

Erdoğan A.R. (1988), akım-özdirenç ilişkisini yerinde inceleyen bir diğer araştırmacıdır. Bakır yatakları üzerinde yaptığı çalışmalarda bu olayı vurgulamıştır.

Literatürden de izlendiği gibi, çalışmaların çoğu laboratuvar koşullarında gerçekleştirilerek "ince ayırım" olarak tanımlanabilecek mineral ayırımı başarılırken, yerinde çalışmalarla "kaba ayırım" olarak tanımlanabilecek yapısal ayırımın başarılabilceğine ilişkin çok sayıda araştırma bulunmamaktadır.

3. TEMEL KAVRAMLAR

3.1. KAYAÇLARDA ELEKTRİKSEL İLETİM

Kayaç ve minerallerde elektrik akımının iletimi üç yolla olmaktadır; Elektronik, Elektrolitik ve Dielektrik iletim (Telford ve diğ., 1981).

Elektronik iletim, metaller gibi, serbest elektronlar içeren materyallerde akım iletiminin normal şeklidir.

Elektrolitik iletimde, akım iyonlarla taşınmaktadır.

Dielektrik iletim ise değişen elektrik alan nedeniyle elektronik, iyonik ve moleküler kutuplaştırma değişimi sonucudur.

Bu konuda ayrıntılı bilgi Sumner (1976), Telford ve diğ. (1981) ve Dizioğlu ve Keçeli (1981) de bulunmaktadır.

Öztürk (1978), bütün yüzey kayaçlarında iletimin, çoğunlukla, elektrolitik olduğunu belirtmiştir. Çünkü kayaçlar içinde gözenekler bulunmakta ve iletimin önemli miktarı bu gözeneklerle sağlanmaktadır.

Gözenek-iletim ilişkisi için formasyon faktörü kavramı kullanılmaktadır. Kayaç öz direncinin, gözenek içindeki çözelti öz direncine oranı olarak tanımlanan formasyon faktörü ile gözeneklilik arasında Archie Kanunu (1942) olarak bilinen $F = \phi^{-m}$ ilişkisi vardır. Burada F, formasyon faktörü; ϕ , gözeneklilik ve m, çimentolanma faktörüdür. Gözeneklilik küçüldükçe formasyon faktörü, dolayısıyla kayaç iletkenliği azalmaktadır.

Bir kayacın elektrik akımı iletimini gözenek içindeki; çözeltilinin iyon konsantrasyonu, iyonların hareketliliği (Mobility), çözeltilinin sıcaklığı ve kil'ler oldukça etkilemektedir. İletimi etkileyen diğer önemli etken frekans ve akım yoğunluğu olup frekans bağımlılığı Bölüm 3.3 de ve akım yoğunluğu konusu Bölüm 5.1 de verilecektir.

Her bir iyon belirli miktarda yük taşıyabildiği için çözeltide fazla iyon bulunması durumunda taşınabilen yük sayısı daha fazladır. Bu nedenle iyon sayısı yüksek bir çözelti daha iletkenidir.

Sıcaklıktaki bir artma, çözeltideki iyonların daha hareketli olması sonucu, çözeltilinin iletkenliği artmaktadır.

Gözenek içindeki kil'in iletimde önemli bir etkisi vardır. Kil mineralleri yüksek dereceden iyon değişimine (ion change) sahiptir. Bu nedenle de kil içeren bütün kayalar yüksek dereceden iletkenliğe sahiptir. Kil, özellikle, zar kutuplaştırmasında önemli olduğu için Bölüm 3.3 de ayrıca incelenecektir.

3.2. ÖZDİRENÇ İÇİN TEMEL KAVRAMLAR

3.2.1. NOKTA AKIM KAYNAGININ HOMOJEN ORTAMDA OLUŞTURDUĞU POTANSİYEL

Bilindiği gibi, ρ öz dirençli sonsuz izotrop bir ortama herhangi bir yerindeki nokta kaynaktan akım verildiği zaman kaynaktan R kadar uzaklıkta akım yoğunluğu,

$$J = E/\rho = (1/\rho) \cdot (-\partial V/\partial R) \quad (3.2.1)$$

olarak tanımlanır. J, Akım yoğunluğu, genel olarak, uygulanan I, akım miktarının geçtiği A, kesit alanına oranı olup

Bir kayacın elektrik akımı iletimini gözenek içindeki; çözeltinin iyon konsantrasyonu, iyonların hareketliliği (Mobility), çözeltinin sıcaklığı ve kil'ler oldukça etkilemektedir. İletimi etkileyen diğer önemli etken frekans ve akım yoğunluğu olup frekans bağımlılığı Bölüm 3.3 de ve akım yoğunluğu konusu Bölüm 5.1 de verilecektir.

Her bir iyon belirli miktarda yük taşıyabildiği için çözeltide fazla iyon bulunması durumunda taşınabilen yük sayısı daha fazladır. Bu nedenle iyon sayısı yüksek bir çözelti daha iletkenidir.

Sıcaklıktaki bir artma, çözeltideki iyonların daha hareketli olması sonucu, çözeltinin iletkenliği artmaktadır.

Gözenek içindeki kil'in iletimde önemli bir etkisi vardır. Kil mineralleri yüksek dereceden iyon değişimine (ion change) sahiptir. Bu nedenle de kil içeren bütün kayalar yüksek dereceden iletkenliğe sahiptir. Kil, özellikle, zar kutuplaştırmasında önemli olduğu için Bölüm 3.3 de ayrıca incelenecektir.

3.2. ÖZDİRENÇ İÇİN TEMEL KAVRAMLAR

3.2.1. NOKTA AKIM KAYNAĞININ HOMOJEN ORTAMDA OLUŞTURDUĞU POTANSİYEL

Bilindiği gibi, ρ öz dirençli sonsuz izotrop bir ortama herhangi bir yerindeki nokta kaynaktan akım verildiği zaman kaynaktan R kadar uzaklıkta akım yoğunluğu,

$$J = E/\rho = (1/\rho) \cdot (-\partial V/\partial R) \quad (3.2.1)$$

olarak tanımlanır. J, Akım yoğunluğu, genel olarak, uygulanan I, akım miktarının geçtiği A, kesit alanına oranı olup

$$J = I/A \text{ (Amper/m}^2\text{)} \quad (3.2.2)$$

şeklinde gösterilir. Burada E uygulanan elektrik alan, V potansiyeldir. (3.2.1) ve (3.2.2) bağıntılarından küresel bir ortam için gerilim ifadesi,

$$\partial V = - (\rho I / 4\pi R^2) \cdot \partial R$$

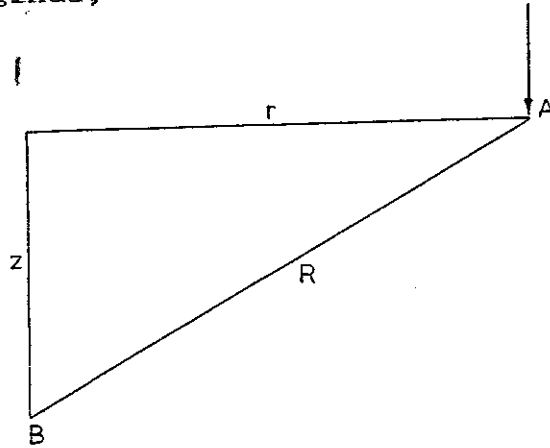
ve

$$V = (\rho I / 4\pi R) + C$$

olarak elde edilir. Kaynaktan çok uzak noktalarda potansiyelin sonlu bir değeri olamayacağından C sıfır olmalıdır. Ayrıca yeryuvarı hava ile sınırlı olduğu için ortam yarı sonsuz alınır ve

$$V = \rho I / 2\pi R \quad (3.2.3)$$

potansiyel bağıntısı elde edilir. Şekil 3.1 gözönüne alındığında,



Şekil 3.1

$$V = \rho I / 2\pi (r^2 + z^2)^{1/2}$$

şeklinde yazılabilir. Aşağıdaki gibi tanımlanan Weber-Lipschitz bağıntısı (Koefoed, 1979),

$$\int_0^{\infty} e^{-\lambda z} J_0(\lambda r) d\lambda = 1/(r^2+z^2)^{1/2} \quad (3.2.4)$$

kullanılarak potansiyel bağıntısı integral şeklinde yazılabilir. Bir nokta akım kaynağının homojen, izotrop bir yer ortamında oluşturduğu gerilimin integral ifadesi Başokur (1984) tarafından aşağıdaki gibi verilmiştir,

$$V = (\rho I/2\pi) \int_0^{\infty} e^{-\lambda z} J_0(\lambda r) d\lambda \quad (3.2.5)$$

Burada λ integral değişkeni olup uzaklığın tersi boyuttadır ve $J_0(\lambda r)$ ise Sıfırıncı dereceden birinci cins Bessel fonksiyonudur.

3.1.2. NOKTA AKIM KAYNAGININ KATMANLI ORTAMDA OLUŞTURDUĞU POTANSİYEL

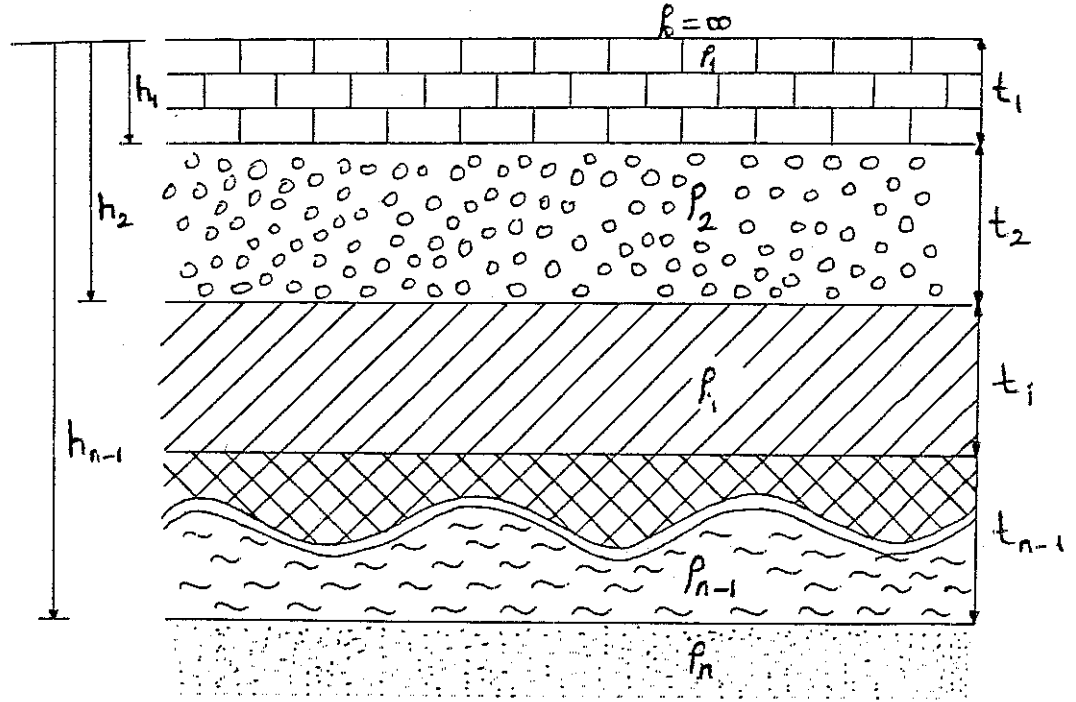
(3.1.3) Bağıntısı ile verilen potansiyelden yararlanarak arazide görünür öz direnç değerleri değişik elektrod açılımları için elde edilir. Görünür öz direnç değerleri, ancak, izotrop ve yarı sonsuz ortam durumunda gerçek öz dirence eşit olur. Gerçekte yeryuvarı katmanlardan oluşmuş olup katman parametrelerinin (öz direnç ve kalınlık) saptanması için görünür öz direnç bağıntıları elde edilmelidir.

Görünür öz direnç bağıntılarının elde edilmesi için yeryuvarının yatay katmanlı, homojen ve izotrop katmanlardan oluştuğu varsayılır (Şekil 3.2).

Potansiyel doğru akım durumunda Laplace denklemini gerçeklemelidir. Koefoed (1979) da belirtildiği gibi,

$$\partial^2 V / \partial x^2 + \partial^2 V / \partial y^2 + \partial^2 V / \partial z^2 = 0$$

gibi verilen laplace denklemi silindirik koordinatlarda yazıldığı zaman,



Şekil 3.2 n Katmanlı yerortamı modeli (Başokur, 1984).

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \left(\frac{1}{r}\right) \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} + \left(\frac{1}{r^2}\right) \frac{\partial^2 V}{\partial \theta^2} = 0$$

elde edilir. Kısmi diferansiyel denklemlerin çözümünden yararlanarak izleyen çözümün bulunduğu varsayılınsın,

$$V(r, z) = U(r) \cdot W(z)$$

buradan ,

$$U = C \cdot J_0(\lambda r) ; W = C \cdot e^{-\lambda z} \text{ ve } W = C \cdot e^{\lambda z}$$

ve

$$V = C \cdot e^{-\lambda z} J_0(\lambda r) \text{ ve } V = C \cdot e^{\lambda z} J_0(\lambda r)$$

kısmi çözümleri elde edilir. Buradan, Katmanlı ortam için, potansiyel bağıntısı, aşağıdaki gibi, yazılabilir,

$$V = (\rho I / 2\pi) \int_0^{\infty} (\theta(\lambda) e^{-\lambda z} + X(\lambda) e^{\lambda z}) J_0(\lambda r) d\lambda \quad (3.2.6)$$

Bu denkleme nokta akım kaynağının homojen ortamdaki potansiyel bağıntısı (3.2.5) eklenerek,

$$V_1 = (\rho I / 2\pi) \int_0^{\infty} (e^{-\lambda z} + \theta_1(\lambda) e^{-\lambda z} + X_1(\lambda) e^{\lambda z}) J_0(\lambda r) d\lambda \quad (3.2.7)$$

şeklinde potansiyel bağıntısı yazılabilir. Burada $\theta_1(\lambda)$ ve $X_1(\lambda)$ çekirdek fonksiyonları olup sınır koşullarında çözülebilmektedirler. Yatay katmanlı ortamlar için izleyen sınır koşulları sağlanmalıdır;

1. Yeraltındaki her sınır düzleminde potansiyel sürekli olmalıdır. Yani, $V_i = V_{i+1}$.
2. Yeraltındaki her sınır düzleminde akım yoğunluğunun düşey bileşeni sürekli olmalıdır. Yani, $J_{z1} = J_{z1+1}$.

Sınır koşullarının uygulanması ile ayrıntısı yine Başokur (1984) veya Dizioğlu ve Keçeli (1981) de bulunabilecek olan aşamalar sonucu, iki katmanlı bir yer ortamı için $\theta_1(\lambda)$ izleyen şekilde tanımlanır.

$$\theta_1(\lambda) = k_1 \cdot e^{-2\lambda h_1} / (1 - k_1 \cdot e^{-2\lambda h_1}) \quad (3.2.8)$$

Burada,

$$k_1 = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$$

olup yansımaya katsayısı adını alır. Daha genel bir yazılım, n katmanlı ortam için,

$$k_{n-1} = (\rho_n - \rho_{n-1}) / (\rho_n + \rho_{n-1}) \quad (3.2.9)$$

şeklindedir.

Katman sayısının artması durumunda çekirdek fonksiyonlarının elde edilmesi güçleşir. Bunun nedeni, denklem ve bilinmeyen sayısının artmasıdır. Bu güçlük matris uygulamalarıyla aşılmıştır (Stefanescu ve Schlumberger, 1930; ...; Kuznetz, 1966; Koefoed, 1968).

1. ve 2. sınır koşullarının uygulanması ile izleyen denklem takımları kurulabilir.

$$\theta_1(e^{\lambda h_1} + e^{-\lambda h_1}) - \theta_2 e^{-\lambda h_1} - X_2 e^{\lambda h_1} = 0$$

$$\theta_1(e^{\lambda h_1} - e^{-\lambda h_1}) + (\rho_1/\rho_2)\theta_2 e^{-\lambda h_1}$$

$$- (\rho_1/\rho_2)X_2 e^{\lambda h_1} = (1 - (\rho_1/\rho_2))e^{-\lambda h_1}$$

$$\theta_2 e^{-\lambda h_2} + X_2 e^{\lambda h_2} - \theta_3 e^{-\lambda h_2} - X_3 e^{\lambda h_2} = 0 \quad (3.2.10)$$

$$-\theta_2 e^{-\lambda h_2} + X_2 e^{\lambda h_2} + (\rho_2/\rho_3)\theta_3 e^{-\lambda h_2}$$

$$- (\rho_2/\rho_3)X_3 e^{\lambda h_2} = (1 - (\rho_2/\rho_3))e^{-\lambda h_2}$$

|

.....

$$\theta_{n-1} e^{-\lambda h_{n-1}} + X_{n-1} e^{\lambda h_{n-1}} - \theta_n e^{-\lambda h_{n-1}} = 0$$

$$-\theta_{n-1} e^{-\lambda h_{n-1}} + X_{n-1} e^{\lambda h_{n-1}}$$

$$+ (\rho_{n-1}/\rho_n)\theta_n e^{-\lambda h_{n-1}} = (1 - (\rho_{n-1}/\rho_n))e^{-\lambda h_{n-1}}$$

Bu genel bağıntı üç katmanlı ortam için yazılarak Cramer kuralının uygulanması ile θ_1 elde edilir.

$$\Delta = \begin{array}{cccc} e^{\lambda h_1} + e^{-\lambda h_1} & -e^{-\lambda h_1} & -e^{\lambda h_1} & 0 \\ e^{\lambda h_1} - e^{-\lambda h_1} & (\rho_1/\rho_2)e^{-\lambda h_1} - (\rho_1/\rho_2)e^{\lambda h_1} & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\lambda h_2} & e^{\lambda h_2} & -e^{-\lambda h_2} \\ 0 & -e^{-\lambda h_2} & e^{\lambda h_2} & (\rho_2/\rho_3)e^{-\lambda h_2} \end{array}$$

$$N = \begin{array}{cccc} 0 & -e^{-\lambda h_1} & -e^{\lambda h_1} & 0 \\ (1 - (\rho_1/\rho_2))e^{-\lambda h_1} & (\rho_1/\rho_2)e^{-\lambda h_1} & -(\rho_1/\rho_2)e^{\lambda h_1} & 0 \\ 0 & e^{-\lambda h_2} & e^{\lambda h_2} & -e^{-\lambda h_2} \\ (1 - (\rho_2/\rho_3))e^{-\lambda h_2} & -e^{-\lambda h_2} & e^{\lambda h_2} & (\rho_2/\rho_3)e^{-\lambda h_2} \end{array}$$

Buradan üç katmanlı ortam için çekirdek fonksiyonu,

$$\theta_1 = (k_1 e^{-2\lambda h_1} + k_2 e^{-2\lambda h_2})$$

$$/ (1 - k_1 e^{-2\lambda h_1} - k_2 e^{-2\lambda h_2} + k_1 k_2 e^{-2\lambda(h_2 - h_1)}) \quad (3.2.11)$$

olarak yazılabilir.

Çekirdek fonksiyonlarının elde edilmesinde matris uygulamaları basit bir yol ise de genel olarak, yineleme (Recurrence) bağıntıları daha az zaman alması ve hesaplamaya uygunluğu nedeniyle, matris uygulamalarına karşı iyi bir seçenektir. Pekeris (1940) yineleme bağıntısı ise bilgisayar uygulamalarına daha elverişli olduğu için tercih edilmektedir (Başokur, 1984).

Pekeris (1940) yineleme bağıntısı, orijinal katman dağılımı üzerine yeni bir katmanın eklenmesi ve ölçü sisteminin bu yeni katman üzerine taşınması ile yürütülür. Örneğin üç katmanlı bir yer ortamı için çekirdek fonksiyonunu elde etmek için ρ_2 ve ρ_3 öz dirençli iki katmanlı ortam için çekirdek bağıntısı bulunur ve ρ_1 öz dirençli katman eklenerek üç katmanlı ortama ait çekirdek fonksiyonu yineleme bağıntısı kullanılarak iki katmanlı ortama ait çekirdek fonksiyonu hesaplanabilir.

Yineleme bağıntıları için Stefanescu çekirdek fonksiyonu $\theta(\lambda)$ yerine Slichter çekirdek fonksiyonu $K(\lambda)$ daha elverişlidir. Bunun için (3.2.7) bağıntısında $z=0$ almakla yeryüzündeki potansiyel bağıntısı,

$$V = (\rho_1 I / 2\pi) \int_0^{\infty} (1 + 2\theta_1(\lambda)) J_0(\lambda r) d\lambda \quad (3.2.12)$$

elde edilir. Burada,

$$K_1(\lambda) = 1 + 2\theta_1(\lambda) \quad (3.2.13)$$

olup Slichter çekirdek fonksiyonudur ve

$$V = (\rho_1 I / 2\pi) \int_0^{\infty} K_1(\lambda) J_0(\lambda r) d\lambda \quad (3.2.14)$$

olarak potansiyel ifadesi yazılabilir. Üç katmanlı bir ortam için Slichter çekirdek fonksiyonu,

$$K_2 = (1 + (\rho_2 / \rho_3) \tanh(\lambda(h_2 - h_1))) / ((\rho_2 / \rho_3) + \tanh(\lambda(h_2 - h_1))) \quad (3.2.15)$$

ve

$$K_1 = (K_2 + (\rho_1 / \rho_2) \tanh(\lambda h_1)) / ((\rho_1 / \rho_2) + K_2 \tanh(\lambda h_1)) \quad (3.2.16)$$

Pekeris yineleme bağıntısından elde edilir. Koefoed (1970), dönüşük öz direnç fonksiyonunu (Resistivity Transform) tanımlamıştır. Günümüzde en çok kullanılan doğrudan değerlendirilmenin temelini dönüşük öz direnç oluşturmaktadır. Dönüşük öz direnç, Slichter çekirdek fonksiyonu cinsinden,

$$T_1 = K_1 \rho_1 \quad (3.2.17)$$

olup Pekeris yineleme bağıntısını kullanarak,

$$T_1 = (T_{i+1} + \rho_1 \tanh(\lambda(h_i - h_{i-1}))) / (1 + T_{i+1} \tanh(\lambda(h_i - h_{i-1}))) / \rho_1 \quad (3.2.18)$$

elde edilir. Burada, λ uzaklığın tersi boyutta olduğu için $u=1/\lambda$ ve $t_1=h_i-h_{i-1}$ kalınlık tanımlaması yapılarak,

$$T_1(u) = (T_{i+1}(u) + \rho_1 \tanh(t_1/u)) / (1 + T_{i+1}(u) \tanh(t_1/u)) / \rho_1 \quad (3.2.19)$$

şeklinde yazılabilir. Trigonometrik özellikler dikkate alınarak,

$$T_1(u) = \rho_1 \tanh(\text{Argtanh}(T_{i+1}(u)/\rho_1) + t_1/u) \quad (3.2.20)$$

elde edilir. Bu bağıntı $T_{i+1}(u)/\rho_1 < 1$ olduğu zaman geçerlidir. Zira $T_{i+1}(u)/\rho_1 \geq 1$ olduğu zaman $\text{Argtanh}(T_{i+1}(u)/\rho_1)$ belirsiz olur. $T_{i+1}(u)/\rho_1 \geq 1$ durumu için,

$$T_1(u) = \rho_1 / \tanh(\text{Argtanh}(\rho_1/T_{i+1}(u)) + t_1/u) \quad (3.2.21)$$

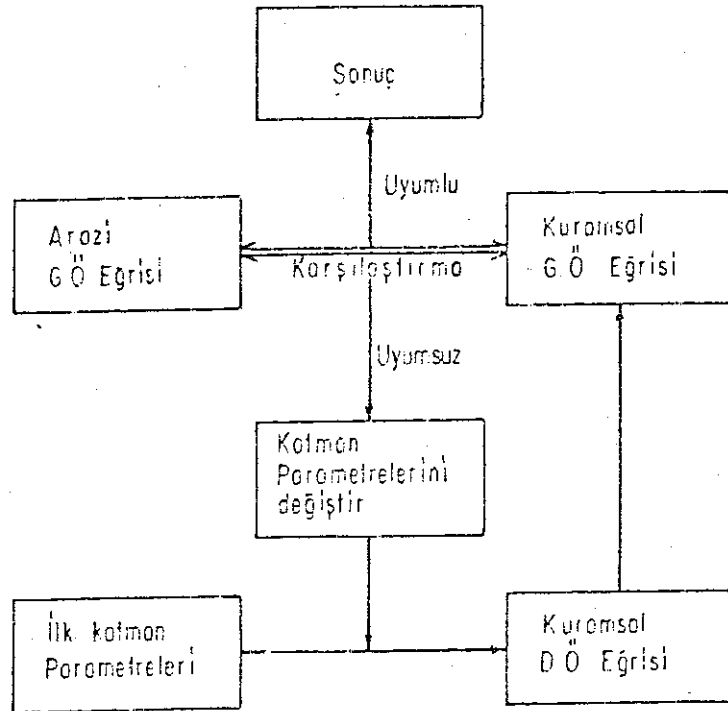
bağıntısı kullanılır. Daha kapsamlı bilgi için Koefoed (1979), Dizioğlu ve Keçeli (1981) ve Başokur (1984) kaynak oluşturabilir.

3.1.3. YORUM YONTEMLERİ

Görünür öz direnç model eğrileri ile yorum:

Yorum amacı için arazide elde edilen Görünür Öz direnç eğrisi önceden hesaplanmış model eğrilerle karşılaştırılmaya çalışılır ve uyum sağlanıyor ise, yeraltının, uyum sağlanan model eğriye ait katman parametrelerine sahip olduğu varsayılır ve bu yorum yöntemine "Eğri karşılaştırma yöntemi" denir. Bunun için katman sayısının artması durumunda çok sayıda eğriye gereksinim olduğu açıktır.

Günümüzde model eğrileri hesaplamak için Ghosh (1970) tarafından geliştirilen lineer süzgeç kuramı, Bessel fonksiyonlarının hesabından kaçındığı için, en pratik yol olarak görülmektedir (Başokur, 1984). Ghosh (1970) tarafından önerilen yöntem Şekil 3.3 deki gibi özetlenebilir.



Şekil 3.3 Görünür öz direnç model eğriler ile yorum'un şematik gösterimi (Başokur, 1984).

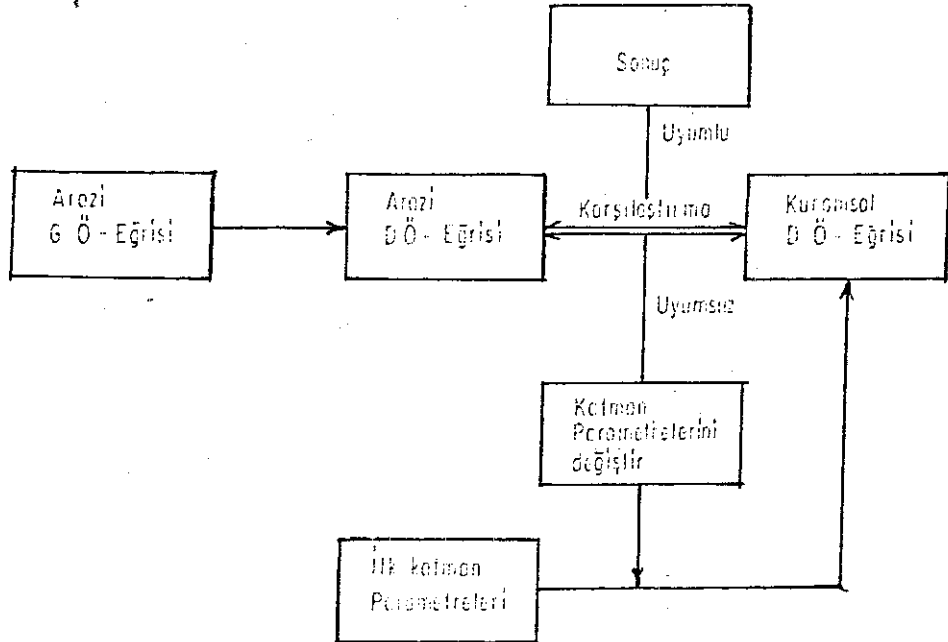
Böylece katman parametreleri sürekli değiştirilerek görünür öz direnç arazi verisine uyumlu en iyi model eğri elde edilmeye çalışılır. Elde edilen model eğrinin katman parametreleri, aynı zamanda arazi verisini en iyi temsil edecek katman parametreleridir.

Yaklaşık yorum yöntemleri:

İki ve üç katmanlı yerortamları için hazırlanmış model eğrilerle değerlendirme ve yardımcı nokta kartlarıyla değerlendirme olmak üzere iki grupta toplanır. Son yıllara kadar ülkemizde en çok kullanılan yorum yöntemi olduğu bilinmektedir.

Ardışık yaklaşma yorum yöntemleri:

Arazide ölçülen veriler ile önceden öngörülen katman parametrelerinden hesaplanan model verilerin karşılaştırılması ile yürütülür. Yorum, görünür öz direnç verileri ile yürütülüyor ise daha önce anlatılan "Model eğriler ile yorum" bölümündeki gibi işlemler yapılır.



Şekil 3.4 Dönüşük öz direnç yardımıyla ardışık yaklaşma yorum yönteminin şematik gösterimi (Başokur, 1984).

Eğer dönüşük öz direnç verileri ile çalışılıyor ise öncelikle katman parametrelerinden dönüşük öz direnç fonksiyonu hesaplanır. Daha sonra şekil 3.4 deki şemadan görüleceği gibi, arazi görünür öz direnç değerlerinden arazi dönüşük öz direnç fonksiyonu hesaplanarak, bu iki dönüşük öz direnç değeri karşılaştırılır.

Arazi verisi ile kuramsal veri sürekli karşılaştırılarak en iyi uyum sağlanıncaya kadar bu işlemler sürdürülür.

Doğrudan yorum yöntemleri:

Görünür öz direnç arazi verisi yerine, çekirdek fonksiyonlarından katman parametrelerinin elde edilmesi doğrudan yorum yöntemi olarak tanımlanmaktadır. Bunun için, görünür öz direnç eğrisinden dönüşük öz direnç eğrisi elde edilir. Buradan modifiye çekirdek fonksiyonu elde edilerek Pekeris (1940) yineleme bağıntısı yardımıyla katman parametreleri elde edilir.

3.2.4. ARAŞTIRMA DERİNLİĞİ

Bilindiği gibi, öz direnç düşey elektrik sondajı (DES) çalışmalarında akım elektrodları arası uzaklığı artırmakla akımın daha derinlere inmesi dolayısıyla daha derinlerin araştırılması amaçlanır. Akım elektrodları arası uzaklığı artırmakla elde edilen derinlikler, ortamın öz direnci ile orantılı olarak toplam akımın derinliğe nüfus edebilen kısmına bağlıdır. Buna akım penetrasyonu denir ve sadece akım elektrodlarının konumuna bağlıdır (Dizioğlu ve Keçeli, 1981).

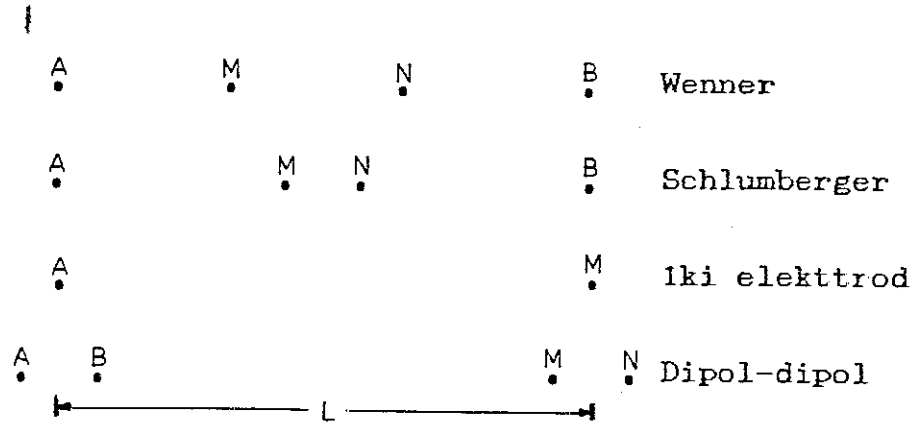
Araştırma derinliği (Depth of Investigation) kavramı ise, oluşturulan yapay alana karşı yeryüzünde ölçülen sinyalin büyük bölümüne neden olan, yeryüzüne paralel yatay katmanı tanımlar (Sheriff, 1982; Başokur, 1984).

Araştırma derinliği, Roy ve Apparao (1971) tarafından ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu araştırmaya göre, gözlenen sinyal, sadece yeryüzüne paralel yatay katmanın değil aynı zamanda daha derinlerdeki katmanların da etkilerini içerir. Fakat araştırma derinliği, gözlenen sinyale etkisi en fazla olan derinliktir.

Homojen yerortamında araştırma derinliği, farklı elektrod açılımları için izleyen şekilde verilmiştir;

iki elektrod açılımı için	:: 35 L
Ekvatoryal veya Azimutal açılımı için	:: 25 L
Dik dipol açılımı için	:: 20 L
Polar veya Radyal açılımı için	:: 195 L
Paralel dipol açılımı için	:: 18 L
Schlumberger açılımı için	:: 125 L
Wenner açılımı için	:: 11 L

Burada L, izleyen şekilde gösterilen uzaklığı tanımlamaktadır.



Şekil 3.5 Elektrod açılımları ve L'nin tanımı
(Roy ve Apparao, 1971).

Homojen yerortamı için elde edilen bu sonuçlar, elektrod açılımlarının karşılaştırılmasını olanaklı kılmaktadır. Yukarıda verilen sonuçlara göre;

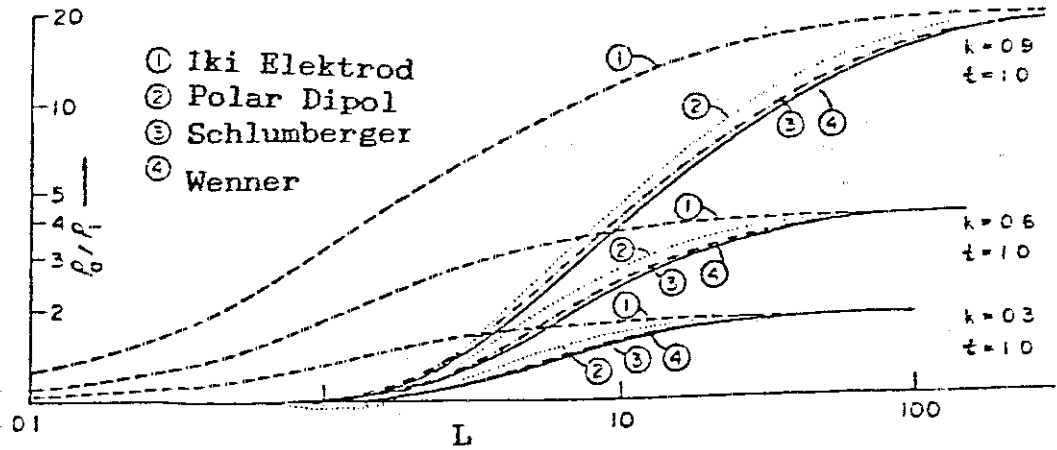
1. En fazla araştırma derinliğine iki elektrod açılımı ve en az araştırma derinliğine Wenner açılımı sahiptir.

2. Araştırma derinliği, hem akım hem de potansiyel elektrodlarının konumlarına bağlıdır.

3. Akımın daha derinlere odaklanması, açılımın araştırma derinliğini diğer açılımlara oranla üstün kılmaktadır.

Çalışmalarında iki katmanlı bir yer modeli için farklı elektrod açılımlarında elde edilebilecek görünür öz direnç eğrileri ve damar şekilli yapıların model çalışmalarından örnekler vermişlerdir.

iki katmanlı bir yer ortamı üzerinde ($\rho_2 > \rho_1$) çeşitli elektrod açılımlarında üç farklı yer modeli için elde edilebilecek eğriler çizilmiştir (Şekil 3.6). Yukarıda verilen sonuçlara uygun olarak, ikinci katmanın daha yüksek olan öz direncine ilk yanıtı veren iki elektrod açılımıdır. Daha sonra ise araştırma derinliği sıralamasına uygun olarak Polar dipol, Schlumberger ve Wenner açılımları sıralanmaktadır.



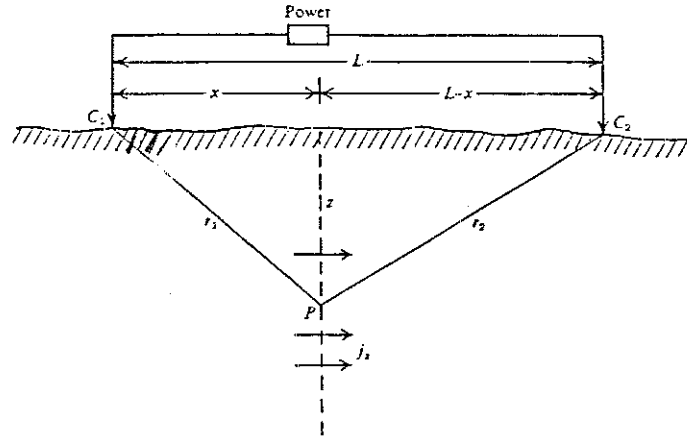
Şekil 3.6 $h_1=1$ ve $k=.3, .6$ ve $.9$ için farklı elektrod açılımlarında elde edilen iki katman modeli DES eğrileri (Roy ve Apparao, 1971).

Roy ve Apparao (1971), ayrıca, araştırma derinliği belirtkenini (Depth Investigation Characteristic, DIC) homojen ve heterojen yerortamı için her bir elektrod açılımında hesaplamışlardır.

3.2.5. AKIM DAGILIMI

3.2.5.1. HOMOJEN ORTAMDA AKIM DAGILIMI

Homojen ortamda akım yoğunluğu dağılımı Telford ve diğ. (1981) tarafından ayrıntılı olarak incelenmiştir. Buna göre şekil 3.7 gözönüne alınsın.



Şekil 3.7 iki akım elektrodu durumunda homojen yer ortamı için akım yoğunluğunun saptanması (Telford ve diğ., 1981).

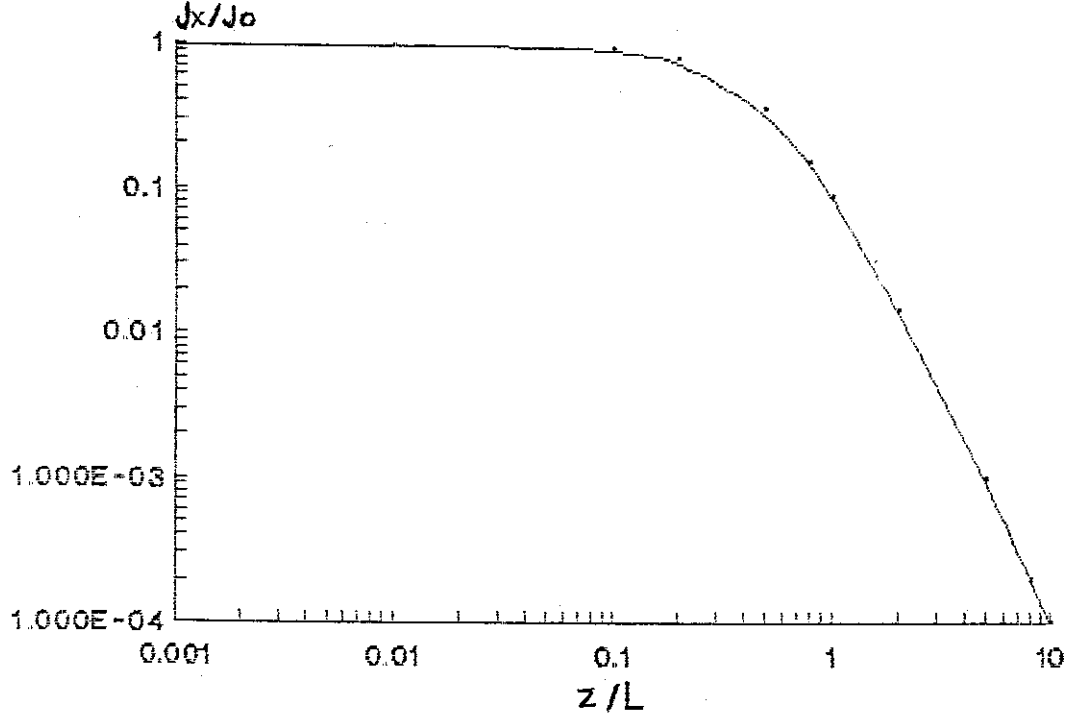
Buradan P noktasındaki akım yoğunluğu yazılırsa,

$$J_x = -(1/r_1) \cdot \partial V / \partial x = (I/2\pi) \left(\frac{x}{r_1^3} - \frac{(x-L)}{r_2^3} \right) \quad (3.2.22)$$

elde edilir. Eğer $r_1 = r_2 = r$ ise,

$$J_x = (I/2\pi) (L/(z^2+(L/2)^2)^{3/2} \quad (3.2.23)$$

olur. $L = (2z)^{1/2}$ olduğu zaman, j_x , maksimum değerine ulaşmaktadır (şekil 3.8).



Şekil 3.8 Homojen ortamda, derinlikle akım yoğunluğunun değişimi.

C_1 ve C_2 den geçen düşey düzlemin özel herhangi bir alanı, diyelim z_1 ve z_2 derinlikleri arasındaki bölge içinden geçen akım akış parçası hesaplanabilir. Düzlemdeki bir $dy dz$ elemanı içinden geçen akım,

$$\oint I_x = J_x dy dz = (I/2\pi)$$

$$\cdot (L/((L/2)^2+y^2+z^2)^{3/2}) dy dz$$

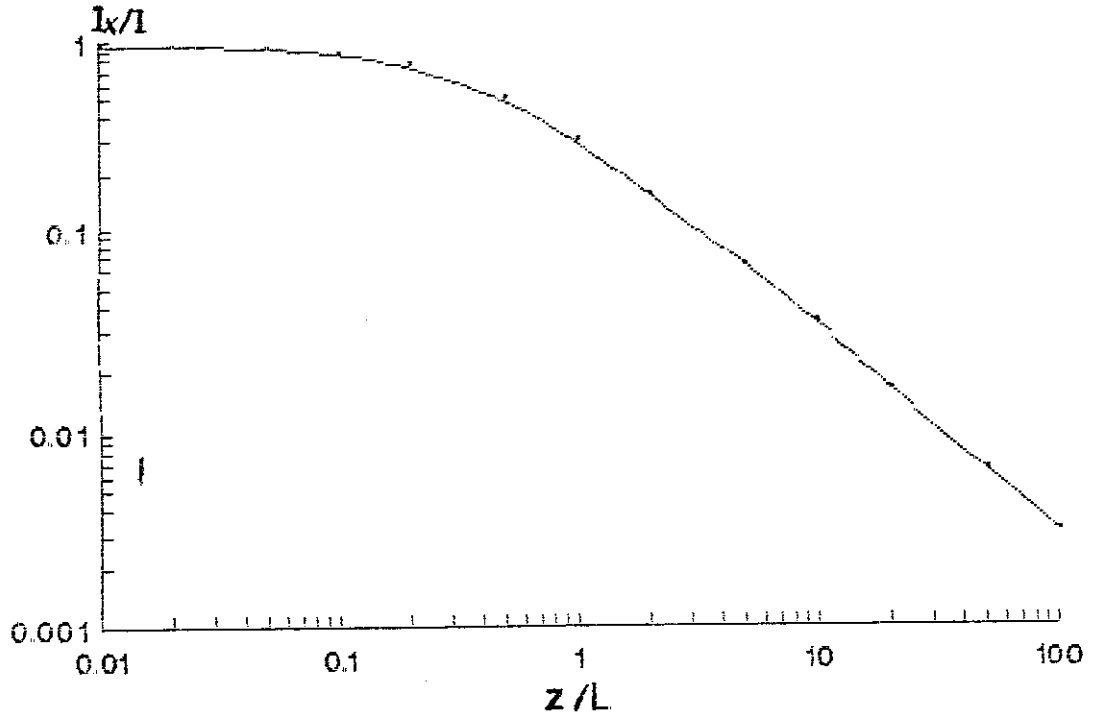
ve

$$I_x/I = (2/\pi) (\tan^{-1}(2z_2/L) - \tan^{-1}(2z_1/L))$$

elde edilir. Burada $z_2 \rightarrow \infty$ olması durumunda,

$$I_x/I = 1 - (2/\pi) \tan^{-1}(2z_1/L) \quad (3.2.24)$$

şeklinde elde edilen akım dağılımı bağıntısının derinlik ve elektrod açıklığına göre davranışı Şekil 3.9 de verilmiştir. $L = 2z_1$ olduğu zaman, I_x/I , maksimum değerinin yarısını almaktadır.



Şekil 3.9 Homojen ortamda derinlikle akımın değişimi.

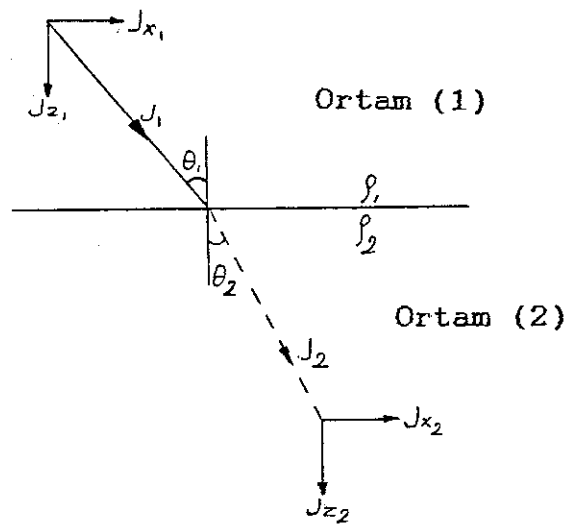
Akım yoğunluğu davranışı incelendiği zaman, z/L oranı büyüdükçe, J_x/J_0 değeri minimum olmakta belirli bir değerden sonra ise, homojen ortam için, sifıra asimtot olarak devam etmektedir. Aynı sonuçlar akım dağılımı

için de geçerlidir. Sabit bir derinlik için, akım elektrodları arası uzaklık ne kadar artırılırsa o kadar yüksek akım yoğunluğu elde edilmektedir ya da sabit bir elektrod aralığı için derinlik ne kadar artırılırsa o kadar düşük akım yoğunluğu elde edilmektedir.

Yüzeyde ölçülen gerilim, akım akışına bağlı olduğu için yer içine mümkün olduğunca çok akım gönderilmek istenir. Yukarıdaki bağıntılar, aynı zamanda, sınırlı bir güç kaynağı ile özel bir derinlikte yere enerji vermek için gereken uygun elektrod aralığını göstermektedir (Öztürk, 1985).

3.2.5.2. HETEROJEN ORTAMDA AKIM VE POTANSİYEL DAĞILIMI

Homojen yer ortamı, olayın çözümüne bir katkı getirmekle beraber, uygulamada çok az raslanan bir durumdur. Uygulamada ise bir jeofizikcinin çözmesi gereken, çeşitli şekillerde anomali veren üç boyutlu yapılar, dayklar, faylar ve katmanlar arasındaki düşey ve yanal değişimlerdir (Öztürk, 1985).



Şekil 3.10 Bir sınırdaki akım akış çizgisinin kırılması (Öztürk, 1985).

Akım akış çizgileri, farklı öz dirençli iki ortam arasındaki bir sınırdan geçerken kırılırlar. x sınıra paralel ve z ona dik doğrultu olsun. ρ_1 öz dirençli ortamda J_{x1} ve J_{z1} bileşenlerine sahip akım yoğunluğu J_1 ve ρ_2 öz dirençli ortamda J_{x2} ve J_{z2} bileşenlerine sahip akım yoğunluğu J_2 olsun. Bölüm 3.2.2. de verilen sınır koşulları gereği,

$$(J_{x1} \rho_1) / J_{z1} = (J_{x2} \rho_2) / J_{z2}$$

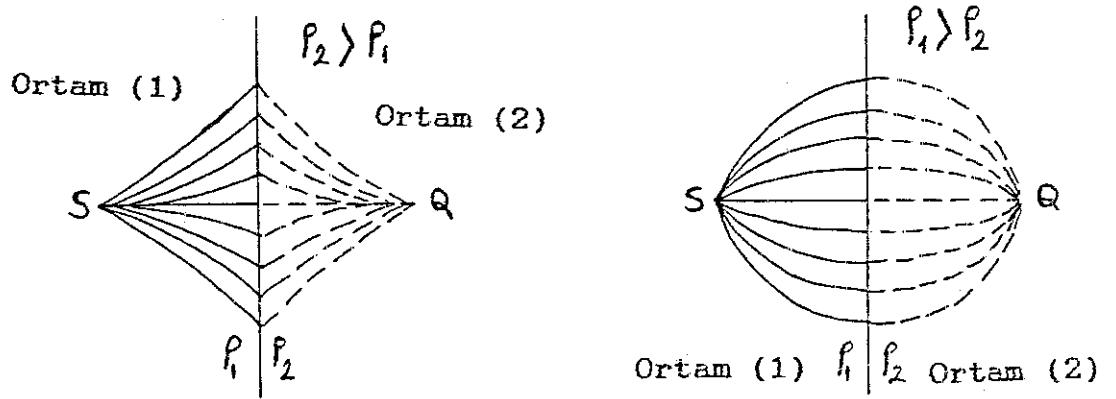
yazılabilir. Ayrıca, θ_1 ve θ_2 , sınırdaki normal ile akım çizgilerinin yaptığı açı ise,

$$\tan \theta_1 = J_{x1} / J_{z1} \quad \text{ve} \quad \tan \theta_2 = J_{x2} / J_{z2}$$

ve buradan,

$$\tan \theta_1 / \tan \theta_2 = \rho_2 / \rho_1$$

elde edilir. Bu durum, $\rho_2 > \rho_1$ olması durumunda akım çizgilerinin normale doğru; $\rho_2 < \rho_1$ olması durumunda ise akım çizgilerinin normalden uzaklaşarak kırılacağını göstermektedir (Şekil 3.11).

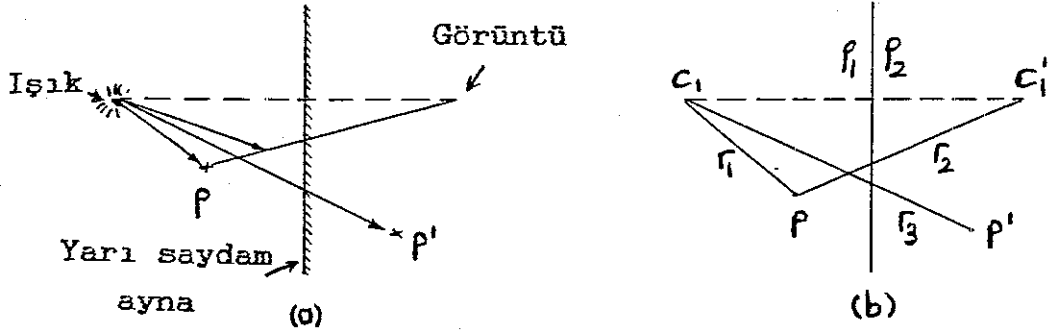


Şekil 3.11 Akım akış çizgilerinin dağılımı üzerine bir sınırın etkisi (Öztürk, 1985).

Sınırın tek etkisi, akım çizgilerinin kırılması değildir. Eşpotansiyeller de bir ortamdaki diğerine geçerken biçim değişikliğine uğrarlar.

Potansiyelin bir çözümü Bölüm 3.2.2. da anlatıldığı gibi, mümkündür. Potansiyelin bir diğer çözümü için basit bir yaklaşım, geometrik optiğe benzer olarak, elektriksel görüntüleri kullanmaktır. Bu yaklaşım, yalnızca düzlem sınır ve küre gibi sınırlı sayıda potansiyel sorunlarını çözmeye geçerlidir (Öztürk, 1985).

Elektriksel durumla optik arasındaki benzeşim, ışık ışını gibi akım yoğunluğunun da bir nokta kaynaktan uzaklığın karesi ile ters orantılı olarak azalması esasına dayanmaktadır (şekil 3.12).



Şekil 3.12 Optik (a) ve elektrik (b) görüntüler arasındaki benzeşim (Öztürk, 1985).

Şekil 3.12 deki durum dikkate alınsın. Optikteki durum, yansıtma (reflection) ve geçirme (transmission) katsayıları k ve 1-k olan yarı saydam bir ayna ile diğerinden ayrılmış bir ortam içindeki bir nokta ışık kaynağı olmasıdır. Eğer nokta ışık kaynağı yerine nokta akım kaynağı ve bu noktadaki ışık şiddeti yerine de potansiyel konulursa olay elektriksel olacaktır. Bu durumda 1. ortamdaki potansiyel,

$$V = (\rho_1 I / 2\pi) \cdot ((1/r_1) + (k/r_2))$$

ve 2. ortamdaki (P' deki) potansiyel,

$$V' = (\rho_2 I / 2\pi) \cdot ((1-k)/r_3)$$

elde edilir. Sınır koşulları yardımıyla ve $r_1=r_2=r_3$ almakla,

$$k = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$$

yansıma katsayısı elde edilir.

Buradan hareketle yatay katmanlı ortamlar için de potansiyel bağıntısı bulunabilmektedir. Ayrıntısı Telford ve diğ.(1981) de bulunan yolun izlenmesi ile elde edilen potansiyel bağıntısının çekirdek fonksiyonlarının çözümü ile elde edilen potansiyel bağıntısına (5.2.2) eşdeğer olduğu görülür.

3.3. KAYAÇLARDA KUTUPLAŞTIRMA OLAYI

Kayaçlarda kutuplaştırma olayı iki şekildedir; doğal ve yapay (etkisel) kutuplaştırma. Tez konusuyla ilgili olan Etkisel Kutuplaştırma olayı (Induced Polarization) olup doğal kutuplandırmadan burada kısaca söz edilecektir.

3.3.1. DOĞAL KUTUPLAŞTIRMA OLAYI

Yerelektrik yöntemlerde yere elektrik akımı göndermeden işleyen tek yöntemdir. Doğal gerilim yöntemi olarak tanımlanmakla beraber, kökeni, yeriçindeki doğal kutuplandırmadan kaynaklandığı için "Doğal Kutuplaştırma Yöntemi" kavramını kullanmak yanlış olmayacaktır (Çağlar, 1991).

Gerek maden jeofiziğinde gerek ise hidrojeoloji ve mühendislik jeofiziği sorunlarının çözümünde oldukça yaygın olarak kullanılan bir yöntem olan doğal gerilimin (Self Potential, SP) nedenleri izleyen şekilde verilmektedir;

Elektrokinetik Gerilim:

Özdirenç ve viskozitesine sahip bir çözelti kapilar veya geçirimli bir ortamdan basınç yoluyla geçirilirse bu ortam üzerinde ölçülen gerilim, elektrokinetik (akma) gerilimi olarak tanımlanır. Kuyu logu ölçümlerinde önemlidir. Bu gerilimin büyüklüğüne bakarak sondaj kuyusunun çeşitli derinliklerindeki çatlaklık ve gözeneklilik derecesi saptanmaktadır. Yeraltısuyu aramalarında yeraltısuyunun gözenekli kayalardan geçerek aktığı yerler ve bunların yönü saptanmaktadır. Sadece kuyu logu değil, aynı zamanda hidrojeoloji sorunlarının çözümüne de katkıda bulunmaktadır. Akiferler içindeki su, bazen yeraltındaki gözenekli ve çatlaklı kayalar yardımıyla bir basınç altında bir yerden bir yere akarak yer değiştirir. Bu akış, bir elektrokinetik gerilimi ortaya çıkarır.

Difüzyon Gerilimi:

Farklı konsantrasyonlu çözeltilerde yer alan anyon ve katyonların hareketlerinden dolayı ortaya çıkmaktadır.

Nernst Gerilimi:

Homojen bir çözelti içerisine batırılan iki metal elektrod arasında bir elektriksel gerilim ölçülemez. Ancak bu elektrodlar farklı konsantrasyonlu çözelti içine batırılırsa iki elektrod arasında bir ΔV gerilim farkı ölçülür. Bu gerilim Nernst gerilimi olarak tanımlanmaktadır. Özellikle petrol ve su arayüzeylerinde ve nehirlerle denizlerin karıştığı dokanaklar civarında ölçülebilecek gerilim Nernst gerilimidir. Difüzyon gerilimiyle beraber elektrokimyasal doğal gerilim olarak adlandırılır.

Jeotermal alanlarda farklı sıcaklıktaki çözeltiden dolayı benzer bir gerilim ölçülmektedir. Bu gerilim

termoelektrik kökenlidir. Yeraltındaki ısı farklılıkları nedeniyle gözenek çözeltilerinin termal difüzyonu bu çözeltiler arasında bir ΔV gerilim farkı yaratır. Bir ΔT sıcaklık farkı için elde edilen ΔV geriliminin niteliği ortamdaki kayaç türü ile ilgilidir.

Elektrokimyasal Gerilim:

Sülfürlü metalik cevher sahalarında ölçülen doğal gerilimdir. İletken cevher kapanlarında tuz miktarına, sıcaklığa ve ıslaklık koşullarına bağlı olarak oluşan elektrokimyasal olaylar bu sahalarda ölçülen doğal gerilimi oluşturur. Mineralizasyon gerilimi olarak da tanımlanan bu gerilim, cevherleşmenin üst düzeyinde negatif bir merkez oluşturacak şekilde değerler vermektedir.

SP anomalisinin oluşması için yeraltındaki cevherleşme kuşağının bir kısmının oksidasyon zonu içinde bulunması gerekir. Bu zon oksidasyon açısından oldukça zengin olmasına karşılık cevher kuşağının alt kısımları, oksijence daha fakir olan, redüksiyon zonu içinde bulunmaktadır. Böylece oksidasyon zonunda oksijen dengesinin sağlanması işlemi sırasında bu zonan altında oksijen kaybedilir. Bu döngü nedeniyle cevher içinde oluşan elektrod akışının oluşturduğu zayıf akımlar yeryüzünde ölçülebilecek bir gerilimi ortaya koyar.

SP nin oluşumu için tellürik akımlar, yapay akım kaçakları ve yeraltı boru hatları gibi bir kısım etkenler daha olmakla beraber, bunlar daha çok gürültü niteliğindedir.

SP konusunda ayrıntılı bilgi Parasnis (1973), Telford ve diğ. (1981), Dizioğlu ve Keçeli (1981) ve Çağlar (1991) de bulunmaktadır.

3.3.2. ETKİSEL KUTUPLAŞTIRMA OLAYI

Doğal kutuplaştırmanın tersine, yapay olarak oluşturulmaktadır. Giriş bölümünde de açıklandığı gibi özellikle, sülfürlü maden yataklarının aranmasında temel yöntemdir. Etkisel kutuplaştırma (Induced Polarization, IP) yöntemi, esas olarak, iki şekilde ortaya çıkmaktadır; arayüzey olayı olarak ve geometrik etkiden dolayı. Kökeni arayüzey olayı olmasıdır ve geometrik etki, bu arayüzey olmaksızın ortaya çıkmaz. Arayüzey olayı olarak IP olayını açıklayabilmek için, olaya elektrod ve zar kutuplaştırması olarak bakılmaktadır.

3.3.2.1. ARAYÜZEY OLAYI OLARAK IP

ELEKTROD KUTUPLAŞTIRMASI

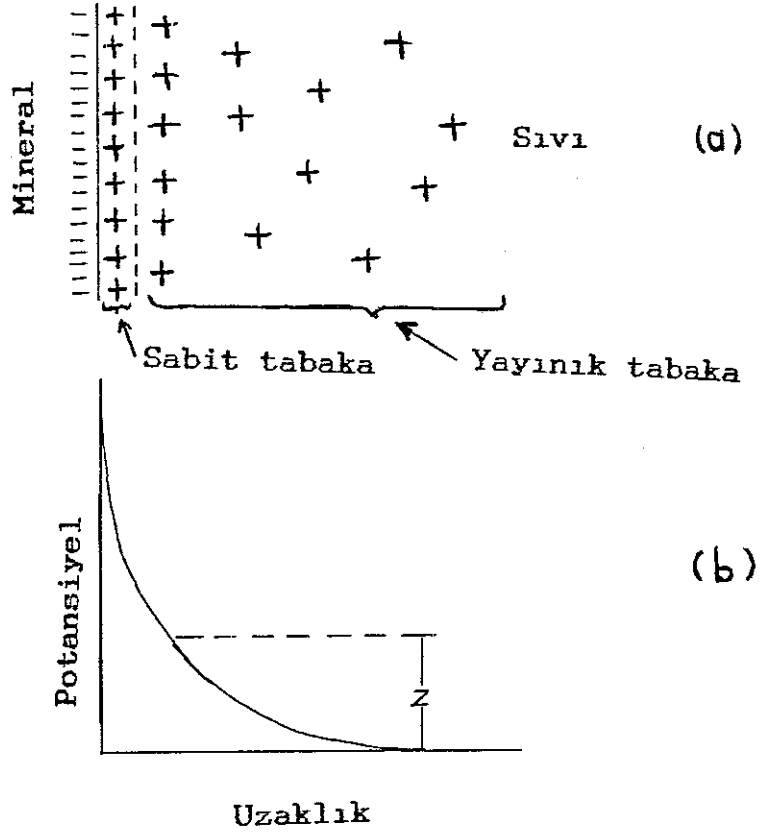
Elektrik akımı iletiminde bir değişme olduğu zaman, örneğin iyonikten metaliğe, arayüzeyden akım akışı için bir enerjiye gereksinim vardır. Bu enerji gereksinimi ek bir elektrik empedansın oluşmasını sonuçlandırmakta olup bu olayın açıklaması, metal-sıvı arayüzeyinde oluşan iyonik çift tabaka kavramıyla açıklanmaktadır (Şekil 3.13).

Çoğu metallerin yüzeyleri katyonlar veya anyonlar için çok küçük net çekime sahiptir (Adhesion). Bu çekim sonucu, metal yüzeyine en yakın bir sabit iyonlar tabakası (Fixed layer) oluşur. Sabit tabaka bitişiğinde ya aynı yüklü ya da ters yüklü daha hareketli iyonlar grubu vardır ve yayınık tabaka (Diffuse layer) olarak adlandırılmaktadır. Bu tabakadaki iyonların sayısı, sabit tabakadan itibaren normal iyon konsantrasyonuna doğru eksponansiyel olarak azalır ve bu yayınık tabakanın kalınlığı izleyen şekilde verilmektedir,

$$d = (K_e k T / 8 \pi e^2 v^2)^{1/2}$$

(3.3.1)

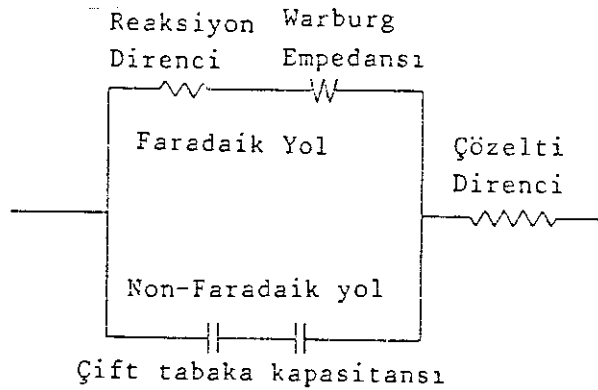
Burada n , normal iyon konsantrasyonu; v , iyonların birleşme değeri; e , elemanter yük; K_e , dielektrik sabiti; k , Boltzman sabiti ve T , sıcaklıktır. Buradaki potansiyel düşmesi, Zeta potansiyeli olarak tanımlanır.



Şekil 3.13 İyonik çift tabaka. a) Metal-sıvı arayüzeyi yakınında iyon dağılımı, b) Karşılık gelen potansiyel dağılımı (Öztürk, 1978).

Çift tabakanın varlığı, arayüzeyden olan tüm iletimi etkilemektedir. Zira arayüzey bir kondansatör gibidir ve bu kondansatör, çözelti direnci ile seri durumdadır. Bu çift tabaka kapasitansı, düşük frekanslarda frekansa bağımlıyken yüksek frekanslarda hemen hemen frekansdan bağımsızdır.

Bu frekansa bağımlılık olayını açabilmek için akımın taşınma yollarının bilinmesi gerekmektedir. Akımın taşınma yolları ideal olarak iki türdür; Faradaik ve non-faradaik yollar. Faradaik yol, elektrokimyasal reaksiyon yolu olup arayüze yaklaşan veya arayüzeyden uzaklaşan iyonların yayılmasını içerir. Yük, fiziksel olarak, atomun iyonla veya iyonun atoma dönüşmesi ile arayüzey içinden taşınır. İkinci yol ise, çift tabakanın dolması veya boşalması ile akımın iletilmesini sağlayan non-faradaik yoldur.



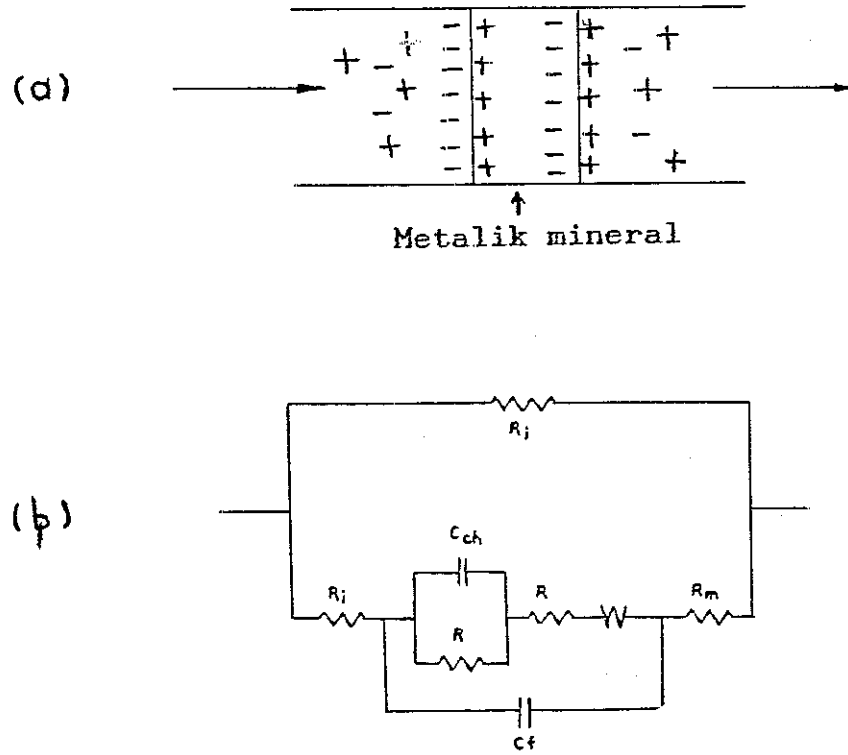
Şekil 3.14 Faradaik ve non-faradaik yolların eşdeğer devresi (Sumner, 1976).

Faradaik yol durumunda, iyon yayılım empedansı basit bir şekilde sabit kapasite ve dirençlerle, yeteri kadar, temsil edilemez. Bu durumda olayı Warburg empedansı ile açıklamak gelenek olmuştur (Şekil 3.14).

Arazi çalışmalarında kullanılan frekansların üzerindeki frekanslarda akımın çoğu, non-faradaik yolla taşınmaktadır ve onun empedansı veya kapasitif reaktansı frekans ile ters orantılı olarak ($i/2\pi fC$) değişir (Sumner, 1976). Bu yüksek frekans değerleri Öztürk (1978) de 1000 Hz. ve üzerindeki frekanslar olarak verilmiştir. Frekans düştükçe akım faradaik yolla taşınmaya başlar ve

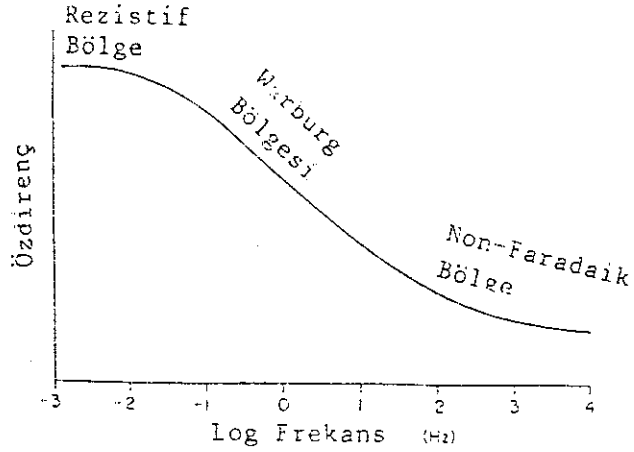
$f^{-1/2}$ ile orantılı olarak değişen Warburg empedansı gösterimi $W=k(1+i)/f^{-1/2}$ olup f frekansı sifira yaklaştıkça, giderek artar.

Warburg empedansı, mineralize olmuş kayaların elektrod (mineral) reaksiyon empedansını göstermek için gerekli olan çok karmaşık dağılımı da basitleştirir (Şekil 3.15).



Şekil 3.15 a) Mineralize olmuş kayacın basit gösterimi, b) Karşılık gelen devre (Sumner, 1976).

Warburg empedansını kullanarak idealize devrenin frekans-özdirenc ilişkisi çizilebilir (Şekil 3.16).



Şekil 3.16 Mineralize olmuş bir kayaç için ideal özdirenç-frekans ilişkisi (Sumner, 1976).

Bu eğrinin eğimi IP frekans yanıtı olup özdirençle bölünerek normalize edilirse frekans etkisi (PFE) elde edilir (Sumner, 1976). Mineralizasyon miktarları (dissemine, masif veya damar) ve kayaç türlerine göre Warburg bölgesinin altında veya üstünde farklı özdirenç spektrumları olabileceği Fraser ve diğ. (1964) de belirtilmiştir.

Yukarıda verilen modelden başka, IP olayını açıklamak için farklı modeller de geliştirilmiştir. Cole-Cole (1941), tarafından çeşitli karmaşık dielektrik davranışı deneysel olarak tanımlamak için önerilen model birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır (Öztürk, 1986).

Şekil 3.17 de verilen Cole-Cole modelinin empedansı izleyen şekilde verilmektedir,

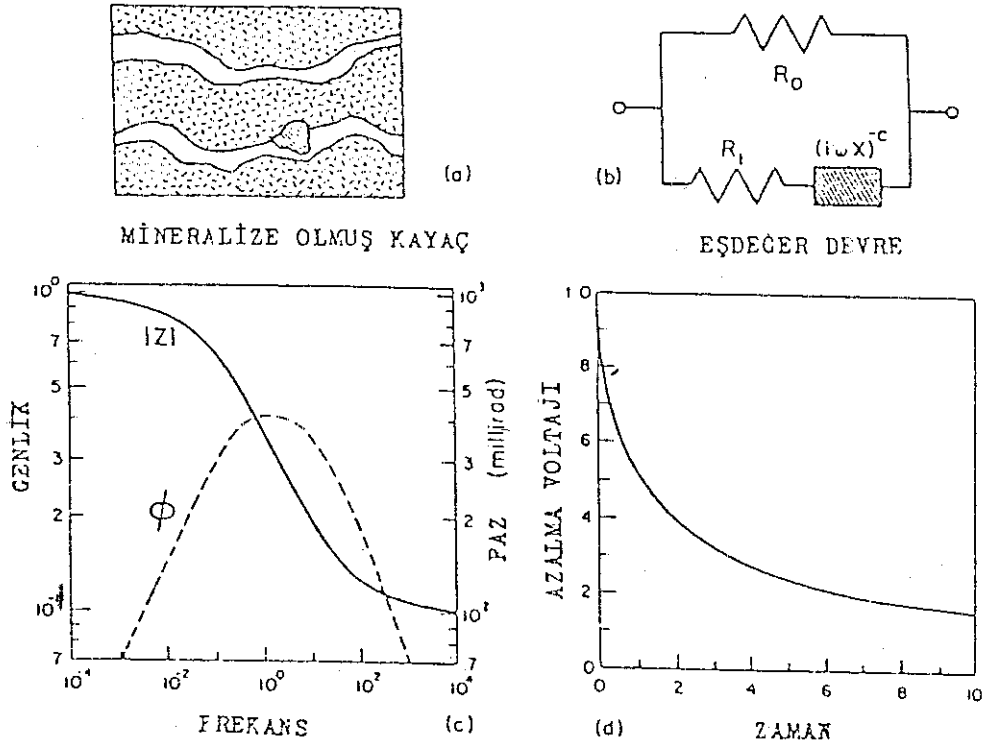
$$Z(\omega) = R_0(1 - m(1 - 1/(1 + (i\omega\tau)^c))) \quad (3.3.2)$$

Burada,

$$m = 1/(R_1/R_0)$$

$$\tau = x(R_0/m)^{1/c}$$

R_0 , kayacın DC direnci; m , yüklenebilirlik; c , frekans bağımlılığı parametresi ve τ , zaman sabitidir. c , .25-.35 arasında değer alırken m ve τ , mineralizasyon tipi ve miktarı ile değişmektedir.

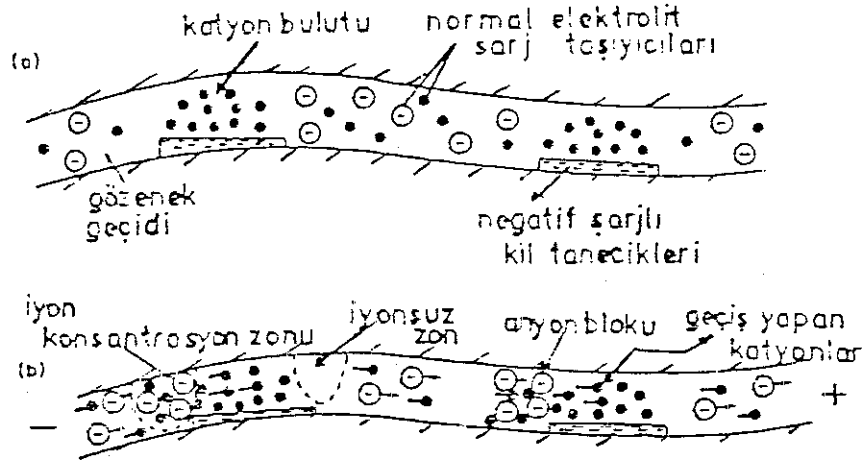


Şekil 3.17 IP etkisinin temel mekaniği (Pelton ve diğ., 1978).

Yere Alternatif Akım (AC) verildiği zaman, arayüzde bulunan iyonlar, alternatif akımın frekansına göre titreşim yapacaklardır. Akımın frekansı arttıkça titreşim hareketi de artacağı için iyonların ısısı yükselecektir. Isı yükseldiği zaman iletkenlik artacağı için, iletkenliğin tersi olan özdirenc düşecektir. Frekans-özdirenc ilişkisini bu şekilde de açıklamak mümkündür.

ZAR KUTUPLAŞTIRMASI

Zar kutuplaştırması, kayacın her yerine dağılmış, kil içeren kayalarda önemlidir ve özellikle, kil tane- ciklerinin iyonik çözelti yollarını kısmen kapattığı gö- zenekli kayalarda oluşur (Şekil 3.18).



Şekil 3.18 Kayaçlarda zar kutuplaştırması.

a) Elektrik alan uygulamadan önce,

b) Elektrik alanın uygulanmasından sonra gözenek geçidi (Sumner, 1976).

Bir kil yüzeyi civarındaki yayınlık katyon bulutu, kil-çözelti sisteminin karakteristiğidir. Bir elektrik alanın uygulanması ile negatif yük taşıyıcıları (Anyon) bu katyon bulutundan geçemeyip yığılırlar. Bu iyon yığılını akım akışına karşı koyar. Anyonların hareketliliğindeki bu azalma, frekanslı akım uygulandığı zaman frekansın artması ile önceki bölümde verilen nedenlerden dolayı, artırılır. İyon hareketliliğinin sağlanması ile, yine önceki bölümde verildiği gibi, frekansın artması ile öz direnç azalır.

Buraya kadar bir arayüzey olayı olarak IP incelenmiştir. IP aynı zamanda bir geometrik etki olayı olup bunun açıklaması izleyen şekilde verilebilir.

3.3.2.2. GEOMETRİK ETKİDEN DOLAYI IP

Bölüm 3.3.3 de verilecek olan IP parametrelerinden görünür yüklenebilirlik (m_a), Heterojen bir ortam için,

$$m_a = \sum m_i \rho_i (\partial \rho_a / \partial \rho_i) (1/\rho_a) \quad (3.3.3)$$

olarak yazılabilir. Logaritmik türev özelliğinden dolayı,

$$m_a = \sum m_i (\partial \log \rho_a / \partial \log \rho_i) \quad (3.3.4)$$

$$\sum (\partial \log \rho_a / \partial \log \rho_i) = 1 \quad (3.3.5)$$

olup iki katmanlı bir yer ortamı için,

$$m_a = m_1 (\partial \log \rho_a / \partial \log \rho_1) + m_2 (\partial \log \rho_a / \partial \log \rho_2)$$

buradan,

$$(m_a - m_1) / (m_2 - m_1) = (\partial \log \rho_a / \partial \log \rho_2) \quad (3.3.6)$$

elde edilir. (3.3.4) bağıntısının anlamı; görünür IP yanıtlarının her bir ortamın gerçek IP yanıtları ile özdeşleşmelerindeki değişim miktarlarının çarpımlarının bir fonksiyonu olduğudur (Seigel, 1959). (3.3.5) bağıntısı,

$$B_1 = (\partial \log \rho_a / \partial \log \rho_1) \text{ ve } B_1 = 1$$

olarak yazılırsa, (3.3.4) bağıntısı,

$$m_a = \sum m_i B_i \quad (3.3.7)$$

olarak yazılabilir. Burada B_i , ağırlık fonksiyonudur.

Zaman ortamı yüklenebilirlik parametresindeki bu bağıntı, Hallof (1964) tarafından frekans ortamı için, frekans etkisi parametresi için de tanımlanmıştır. (3.3.7) bağıntısına benzer olarak,

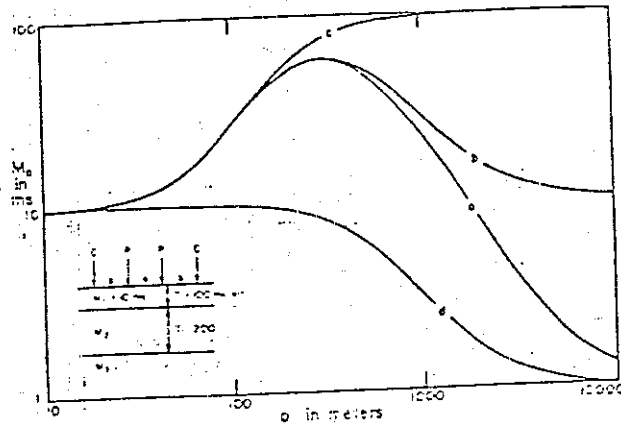
$$(PFE)_a = \sum (PFE)_i B_i \quad (3.3.8)$$

olarak yazılabilir. İki katmanlı bir ortam için (3.3.6) bağıntısına benzer olarak,

$$(((PFE)_a - (PFE)_1) / ((PFE)_2 - (PFE)_1)) = B_2 \quad (3.3.9)$$

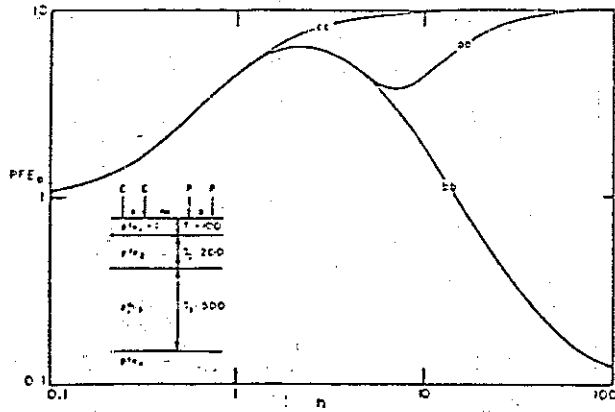
elde edilir.

Heterojen ortam için yazılan bu bağıntılar, özdi-renc farklılığı olmayan bir ortamda, bir arayüzey olayı olması durumunda, ortamın yukarıdaki bağıntılar ile aydınlatılabileceğini göstermektedir.



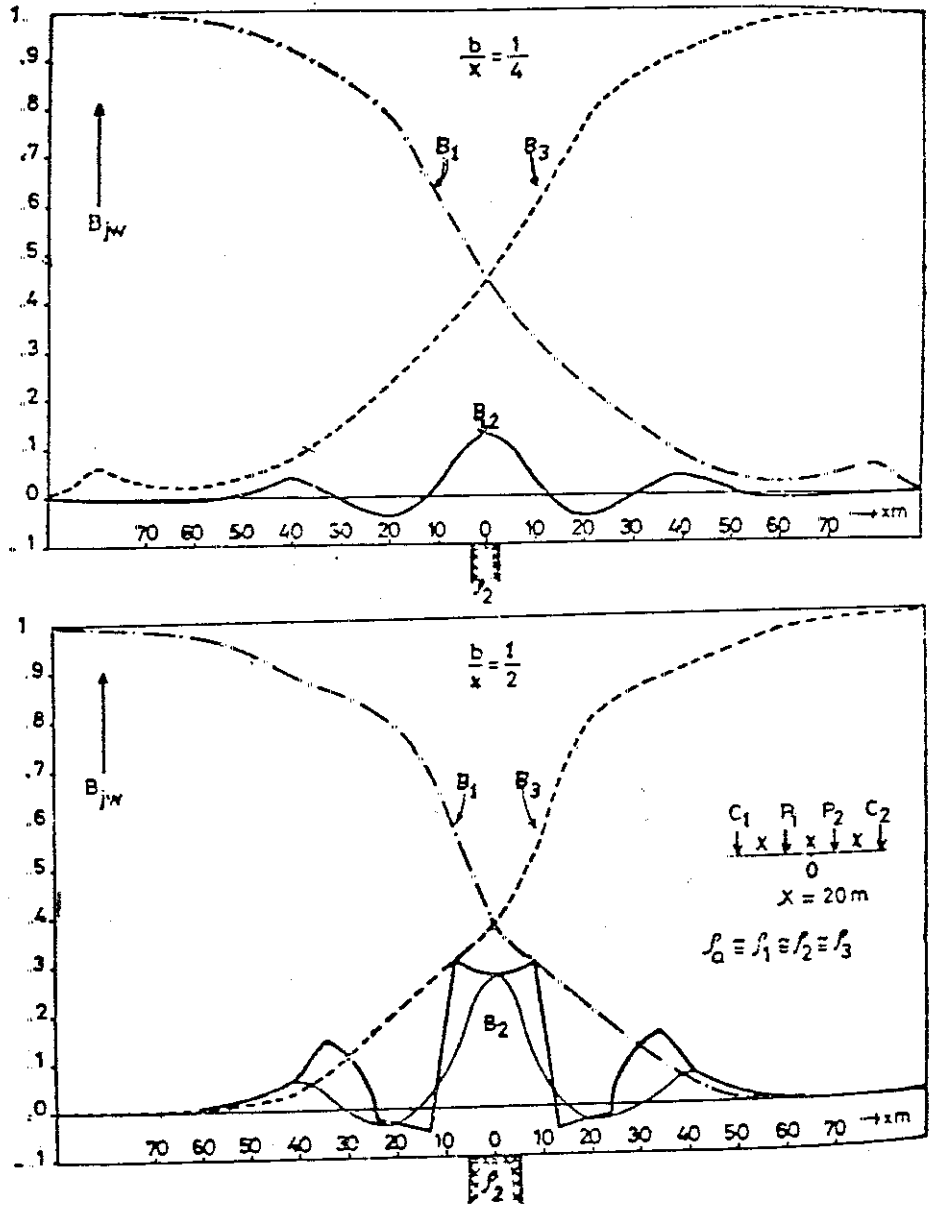
Şekil 3.19 Üç katmanlı yerortamı için Wenner açılımında elde edilmiş kuramsal IP sondaj eğrileri (Elliot ve Lauritsen, 1976).

Elliot ve Lauritsen (1976), ağırlık fonksiyonları yardımıyla, öz direnç farklılığı olmayan yatay katmanlı ortamlar için IP yanıtını incelemişlerdir. Üç katmanlı bir ortam için izleyen eğriler elde edilmiştir (Şekil 3.19). Dört katmanlı ortamlar için elde ettikleri (PFE)_a eğrileri ise Şekil 3.20 de gösterilmiştir.

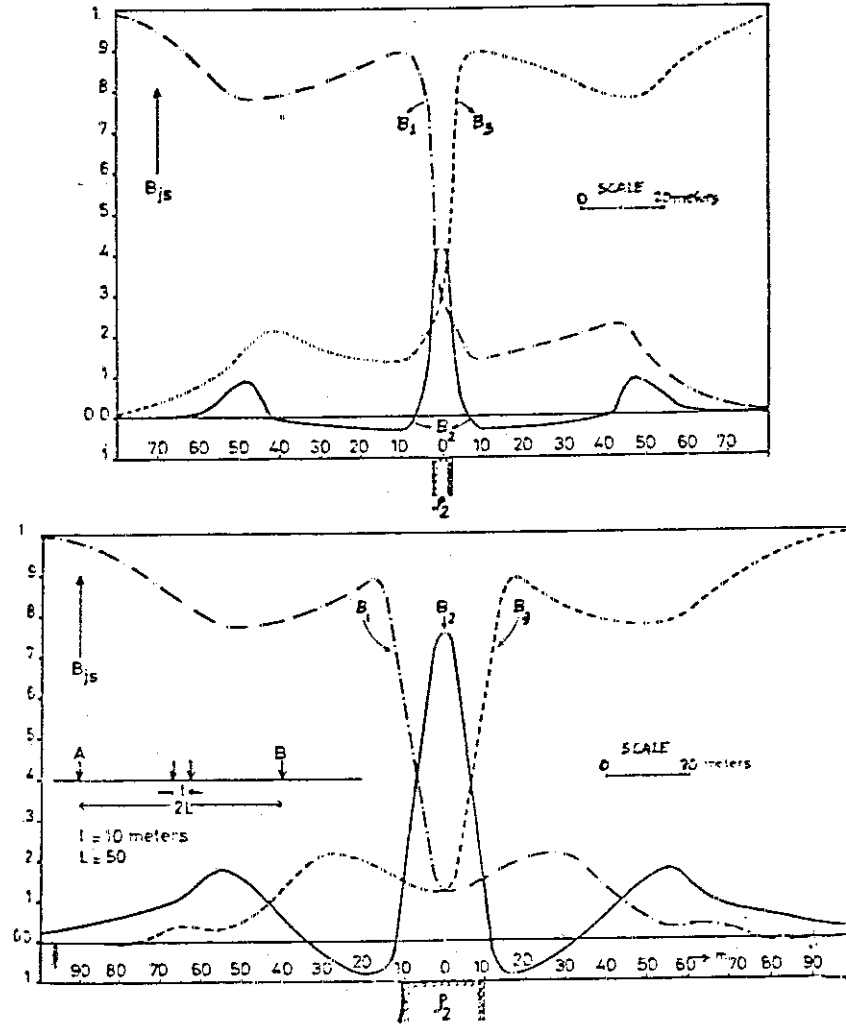


Şekil 3.20 Dört katmanlı yerortamı için dipol-dipol açılımı ile elde edilmiş kuramsal IP sondaj eğrileri (Elliot ve Lauritsen, 1976).

Yatay katmanlı ortamlar için yapılan bu çalışmayı, Keçeli (1980), yanal süreksizlikler için geliştirmiştir. Matematik olarak bağıntıların ayrıntısı Dizioğlu ve Keçeli (1981) de bulunmaktadır. Farklı elektrod açılımları ve farklı dayk genişlikleri için elde edilen eğrilere ait iki örnek Şekil 3.21 ve Şekil 3.22 de görülmektedir.



Şekil 3.21 Wenner açılımı için bir dayk üzerinde yatay kayma ile elde edilen ağırlık katsayıları (Dizioğlu ve Keçeli, 1981).



Şekil 3.22 Gradient açılı için bir dayk üzerinde yatay kayma çalışması ile elde edilmiş ağırlık katsayıları (Dizioğlu ve Keçeli, 1981).

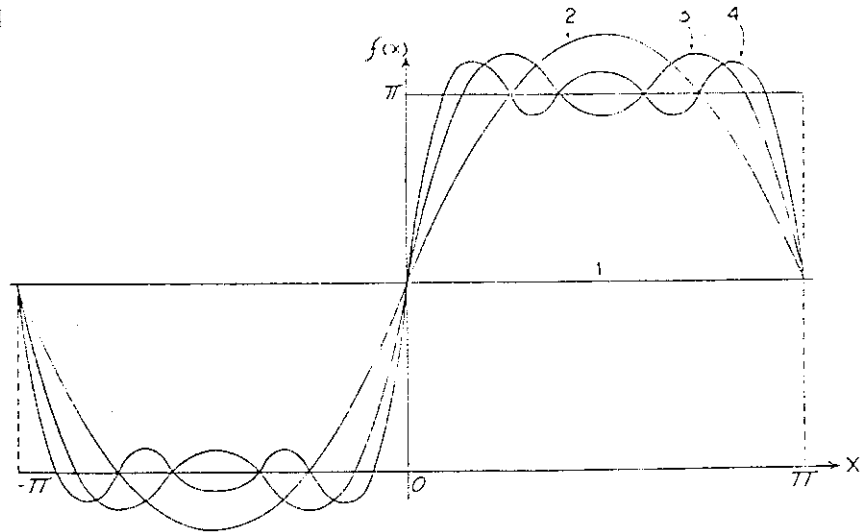
3.3.3. IP ÖLÇÜ ALIM TEKNİKLERİ VE PARAMETRELER

IP olayını inceleyen bir çok yayında, gerek yüklenebilirlik gerekse yüzde frekans etkisi ve faz açısı parametre olarak tanımlandığı için burada da aynı tanımlar kullanılacaktır (Halloy, 1964; ... ; Erdoğan, 1982; Çağlar, 1986).

IP çalışmalarında kullanılan dalganın şekli, birçok sinüs harmoniğinden oluşan kare dalgadır. Şekil 3.23, böyle bir kare dalgayı göstermekte olup, sinüs harmonikleri terimleri,

$$F(x) = (\pi/2) + (2\text{Sin}x) + (2\text{Sin}3x/3) + (2\text{Sin}5x/5) \\ + (2\text{Sin}7x/7) + (2\text{Sin}9x/9) \dots \quad (3.3.10)$$

bağıntısı ile verilir. Yere verilen kare dalga, sinüs harmoniklerinin toplu bir görünümünü içerdiğinden iyon kutuplaştırmasında her bir harmoniğin sinüs dalgacıklarındaki küçük bozucu etkisi alınan kare dalgada toplam olarak izlenir. Bu nedenle uygulamada kare dalga bir seçenektir. Diğer yandan, uygulanan akım ile ölçülen gerilim arasındaki faz açısının ölçülmesinde sinüs dalgasının kullanımı bir zorunluluktur. Ayrıca deneysel çalışmalar göstermiştir ki, kuplaj etkileri (Gürültü) kare dalga uygulaması ile minimum olmaktadır (Dey ve Morrison, 1973).



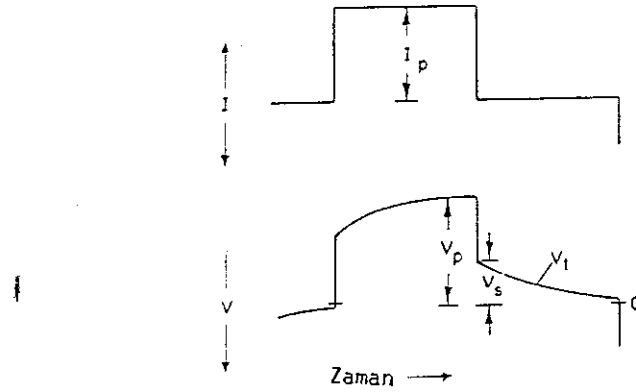
Şekil 3.23 Bir kare dalganın sinüs harmoniklerinin gösterimi (Sumner, 1976).

Zaman Ortamı Tekniği:

DC gerilim yere kare dalga şeklinde verilir. Potansiyel elektrodlarından ölçülen yanıtta elektriksel gerilimin sönüm eğrisi incelenir. Şekil 3.24, ölçülen IP yanıtını göstermektedir. Yer yapısının elektriksel özelliklerine göre, davranış gösterecek IP yanıtını bu sönüm eğrisinden çıkarmak amacıyla, yüklenebilirlik (Chargeability) parametresi tanımlanmıştır,

$$m_a = V_e/V_P \quad (\text{mVSn/V}) \quad (3.3.11)$$

Burada V_P , uygulanan gerilimin genliği ve V_e , t anında sönen gerilimin genliğidir.



Şekil 3.24 Zaman ortamında elde edilen sönüm eğrisi (Sumner, 1976).

Aletsel gelişmeler sonucu bir diğer gösterim,

$$m_a = (1/V_P) \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt \quad (3.3.12)$$

şeklindedir. t_1 ve t_2 zamanları arasında sönüm eğrisi $V(t)$ 'nin tümleви m_a yüklenebilirliğini verir.

Frekans ortamı tekniği:

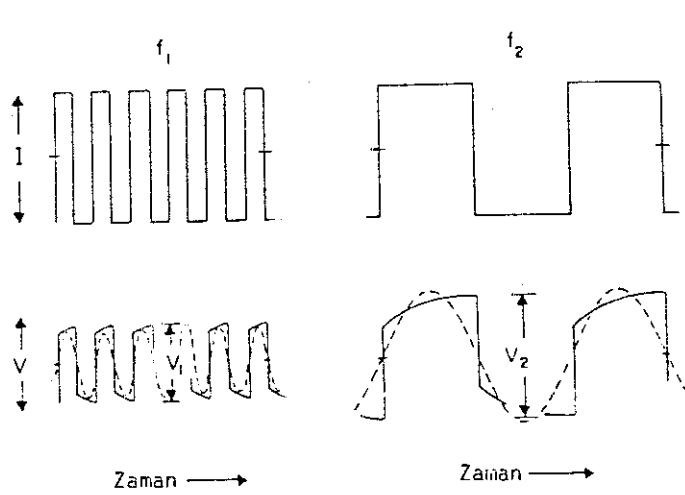
Yere verilen yine kare dalgadır. Bu kare dalgalar iki frekanstaki başka kare dalgaların toplamından elde edilmiş de olabilir. Yerdeki IP yanıtını verebilecek bozulmuş kare dalganın genlikleri ölçülerek yüzde frekans etkisi (Percent Frequency Effect, PFE) parametresi tanımlanır,

$$PFE = ((V_2 - V_1) / V_1) \cdot 100 \quad (3.3.13)$$

Bir diğer gösterim şekli, iki farklı frekansta ölçülen görünür öz direnç değerlerinden elde edilir,

$$PFE = ((P_a(f_1) - P_a(f_2)) / P_a(f_1)) \cdot 100 \quad (3.3.14)$$

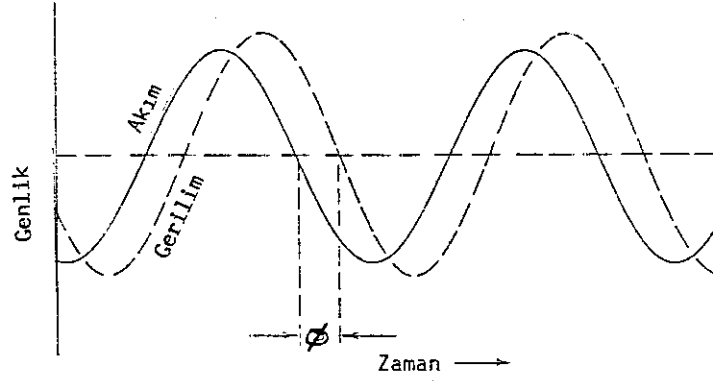
Burada $P_a(f_1)$, düşük frekansta ölçülen görünür öz direnç değeri ve $P_a(f_2)$, yüksek frekansta ölçülen görünür öz direnç değerleridir. Şekil 3.25, Frekans ortamı ölçü tekniği dalga şekillerini göstermektedir.



Şekil 3.25 IP frekans ortamı ölçü tekniği dalga şekilleri (Sumner, 1976).

Faz Açısı:

Yere verilen akım ile ölçülen gerilim arasında, yerin kapasitif etkisinden kaynaklanan, bir faz kayması bulunur. Yere verilen kare dalga akımı I ile ölçülen gerilim V'den ayıklanan ve aralarında ϕ kadar faz farkı olan sinüs dalgaları Şekil 3.26 de gösterilmiştir.



Şekil 3.26 Yere verilen I akımı ve ölçülen V gerilimi ve aralarındaki faz kayması (Sumner, 1976).

IP faz farkı akım dalga şekline göre iki bileşene ayrılabilir; Gerçel (In-phase, Real) ve Sanal (Out-phase, Imaginary). Akım ve gerilim arasındaki faz açısı,

$$\phi = \tan^{-1} (V_{Im}/V_{Re}) \quad (3.3.15)$$

bağıntısıyla verilir. Burada V_{Im} , sanal bileşen ve V_{Re} ise gerçel bileşendir.

Faz açısındaki gerçel ve sanal bileşenlerin ayrılmasına benzer olarak öz direnç de gerçel ve sanal bileşenlerine ayrılabilir. Bu, karmaşık öz direnç (Complex Resistivity) kavramını geliştirir.

3.3.4. KARMAŞIK ÖZDİRENÇ

Etkisel kutuplaştırma yöntemi, ayrıntısı Sumner (1976) veya Bertin ve Loeb (1976) da bulunabileceği gibi, uzun yıllardır başarılı olarak kullanılmaktadır. Bunun yanısıra izleyen şekilde sıralanabileceği gibi, bir kısım yetersizlikleri de bulunabilmektedir (Öztürk, 1986).

a) Volkanik kökenli masif sülfürlü mineral yapıları ile grafitli şistler benzer iletkenlik ve yaklaşık aynı büyüklükte IP yanıtına sahip oldukları için grafitli sahalarda sülfürlü mineral aramaları çok güç olmaktadır.

b) Pirotit gibi, sülfürlü mineraller ultrabazik çevrelerde bulunduğu için, ultrabaziklerde bulunan magnetit de benzer IP yanıtı verdiği için, bunları nikel sülfürlerden ayırmak güçtür.

c) Porfir bakır sistemleri çok iyi IP yanıtı vermelerine karşılık bu sistem içindeki cevherin yerinin tesbiti güç olmaktadır.

d) İletken alüvyon sedimanlar altında bulunan porfir bakır depolarının yanıtlarını elektromanyetik kublajdan ayırmak oldukça güçtür.

Yapılan çalışmalar, bir kısmı yukarıda verilen bu güçlüklerin, iki frekans yerine daha çok frekans kullanmakla çözümlenebileceğini ortaya koymuştur. Bunun için aynı fazlı ve 90° fazlı bileşenleri gözlemek suretiyle geniş bir frekans bandı kullanılır. Böylece, frekans değerlerinin bir spektrumu üzerinde ölçülen karmaşık öz direnç belirtkenlerinin tümü biliniyor demektir. Bu ölçümler, giriş-çıkış dalga şekillerinin genlik ve faz karşılaştırmalarını yaparlar.

Yer bir sistem olarak alındığı zaman yere verilen akım yoğunluğu giriş ve elektrik alan çıkış ise sistem fonksiyonu (transfer function) karmaşık öz dirençdir. Bütün mineral ve kayaçların, bir elektriksel uyarıya karşı yanıt olarak elde edilen bütün bilgi, karmaşık öz direnç ve onun frekans bağımlılığıdır (Öztürk, 1986).

Olhoeft ve diğ. (1977), elektrik ve elektromanyetik verinin sunumu için amaçlanan standartları verirken karmaşık öz direncin sunumu için de standartlar vermişlerdir. Tezin bu bölümüne kadar, yaygın sunum şekilleri dikkate alındığı için karmaşık öz direnç de bilinen genel şekliyle verilecektir.

Karmaşık öz direnç izleyen şekilde yazılabilir,

$$P(i\omega) = P_G(\omega) - iP_S(\omega) \quad (3.3.16)$$

Burada $P_G(\omega)$, karmaşık öz direncin gerçel bileşeni ve $P_S(\omega)$, karmaşık öz direncin sanal bileşenidir. Bu yazılım genlik ve faz spektrumları cinsinden,

$$P(i\omega) = |P(\omega)| e^{i\phi(\omega)} \quad (3.3.17)$$

şeklinde yazılır. Burada $|P(\omega)|$, karmaşık öz direncin genlik spektrumu ve $\phi(\omega)$, karmaşık öz direncin faz spektrumudur. Gerçel ve sanal bileşenler,

$$P_G(\omega) = |P(\omega)| \cos\phi$$

$$P_S(\omega) = |P(\omega)| \sin\phi$$

olarak trigonometrik fonksiyonlar cinsinden yazılır ise genlik ve faz spektrumları da, sırasıyla,

$$|P(i\omega)| = ((P_G(\omega))^2 + (P_S(\omega))^2)^{1/2} \quad (3.3.18)$$

$$\phi = \tan^{-1} (P_S(\omega)/P_G(\omega)) \quad (3.3.19)$$

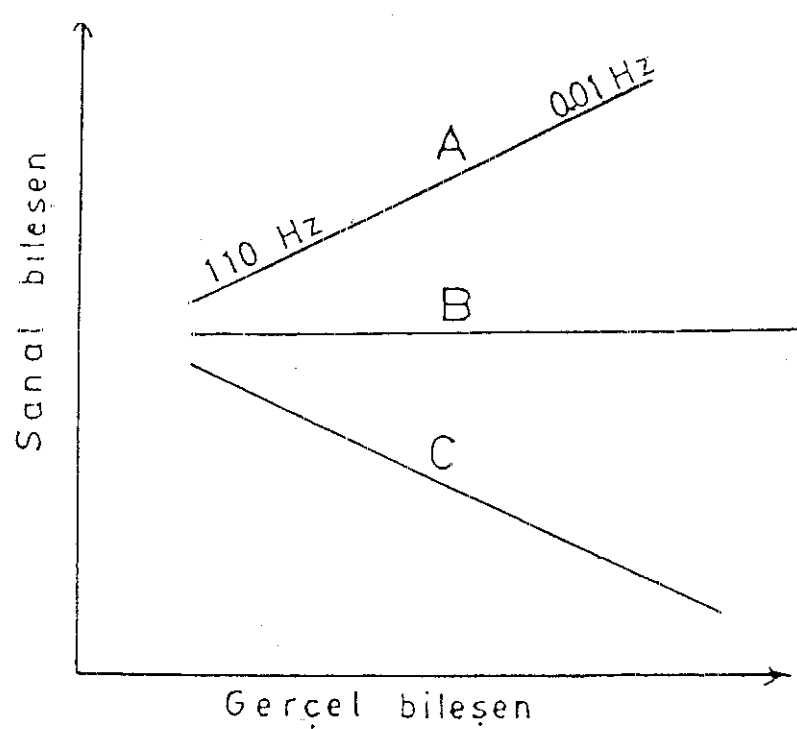
olarak tanımlanır.

Olhoeft ve diğ. (1977), karmaşık öz direnç spektral ölçümleri sonuçlarının izleyen şekilde sunulabileceğini belirtmişlerdir,

- a) $P_G(w)$ ve $P_S(w)$: Gerçel ve sanal özdirenç
- b) $P(w)$ ve $\phi(w)$: Toplam özdirenç (genlik) ve faz
- c) $P_G(w)$ ve $\phi(w)$: Gerçel özdirenç ve faz.

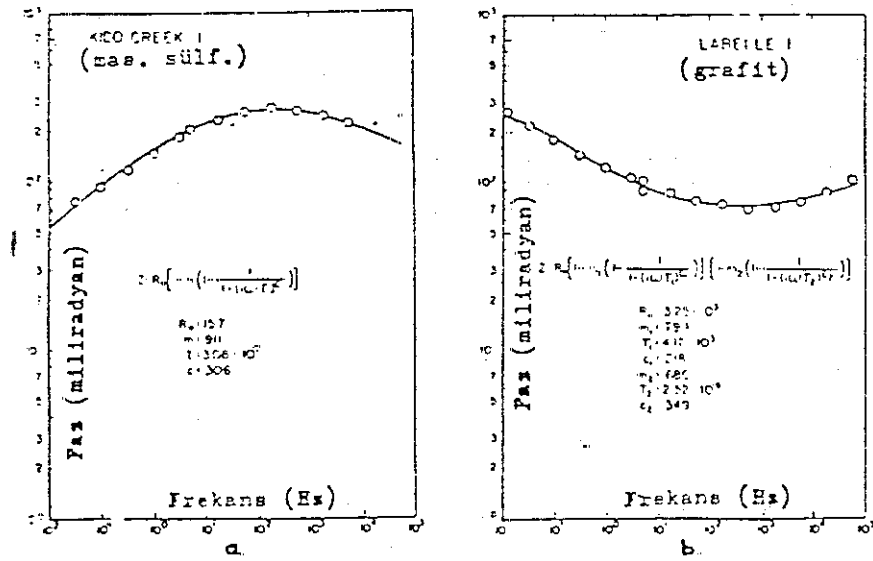
Bölüm 6.2 de açıklanacak olan ve hem laboratuvar hem de arazi çalışmalarında kullanılan alıcı sistemi karmaşık özdirenç (Complex resistivity, CR) çalışmalarında a) ve b) ve özdirenç-faz çalışmalarında b) şıkında verilen parametreleri ölçmektedir.

Karmaşık özdirençten yararlanarak elde edilen genlik ve faz spektrumları yardımıyla değişik kayaç tipleri ayrılabilir. Öztürk (1986). Zonge (1975), özdirençin frekansla değişimini incelemiş ve gerçel ve sanal bileşenler yardımıyla çizilen Argan diyagramlarının değişik jeolojik ortamların belirtkeni (Characteristic) olabileceğini göstermiştir (şekil 3.27). Burada A tipi masif sülfid ortamını, B tipi dissemine mineralizasyon ortamını ve C tipi zayıf dissemine ve sediman ortamını tanımlar.

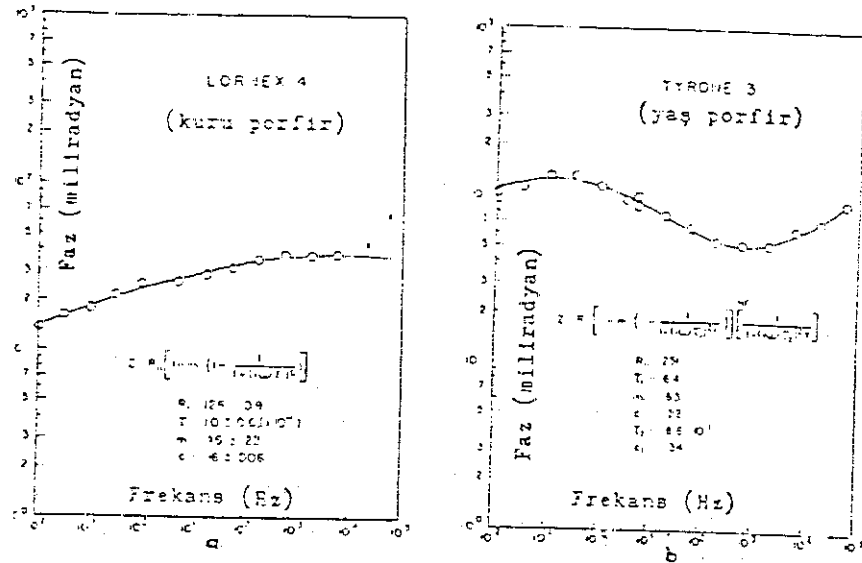


Şekil 3.27 Gerçel ve Sanal bileşenlerden çizilen idealize edilmiş argan diyagramı (Zonge, 1975).

Pelton ve diğ. (1978), IP spektrumları yardımıyla bazı mineralizasyon tiplerini ayırmışlar ve spektrum değişimlerini açıklamak için Bölüm 3 de verilen, Cole-Cole modelini kullanmışlardır. Masif sülfid ile grafit yatakları birarada bulunduğu zaman her iki birim de aynı genlikte PFE yanıtı vermektedir. Böyle ortamlarda klasik IP çözüm getirmeyebilir. Faz spektrumu, 10^{-1} - 10 Hz frekansları arasında masif sülfidlerde artarken grafitlerde azalmaktadır (Şekil 3.28). Sülfürlü mineral konsantrasyonu düşük porfir "kuru" ve konsantrasyonu yüksek ve minerallerin daha çok damar veya damarcık şeklinde bulunduğu porfir "yaş" olarak tanımlanır ise bunların faz spektrumu şekil 3.29 da verilmiştir.



Şekil 3.28 Farklı iki grafit yatağında elde edilmiş faz açısı spektral ölçümleri (Pelton ve diğ., 1978).



Şekil 3.29 Farklı iki porfir yatağında elde edilmiş faz açısı spektral ölçümleri (Pelton ve diğ., 1978).

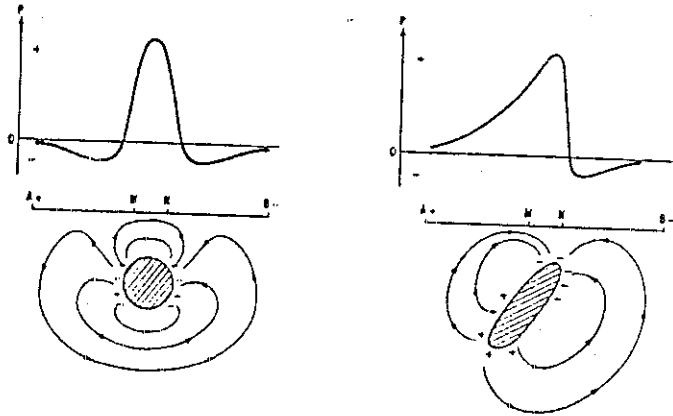
Van Voorhis ve diğ. (1973), 10⁻²-10 Hz frekans aralığında, porfir bakır depozitleri üzerinde yaptıkları ölçümlerde, mineralize olmuş kayacın öz direnç spektrumunun, sabit bir faz değişimi ile yaklaşık olarak, frekansın logaritması ile doğrusal azalan bir genlik yanıtı ile belirtilebileceğini göstermişlerdir.

Wong (1979 ve 1981), faz spektrumunun maksimum noktasını gösteren kritik frekansın tane boyutu küçüldükçe arttığını göstermiştir.

3.3.5. NEGATIF IP

Görünür öz direnç DC ve görünür öz direnç AC çalışmalarında $\epsilon(\text{DC}) > \epsilon(\text{AC})$ olduğu bilinmektedir. Başka deyişle düşük frekanslarda elde edilen görünür öz direnç değeri yüksek frekansta elde edilen görünür öz direnç değerinden büyüktür. Buna göre, (3.3.14) bağıntısında, $\epsilon(f_1) < \epsilon(f_2)$ ise elde edilen negatif IP değeri olarak tanımlanır.

Bertin (1976), negatif IP'nin kutuplaştırılabilen yapının geometrik şekliyle ilgili olduğunu belirtmiştir. Diğer bir deyişle bölüm 3.3.2 de anlatılanlara benzer olarak, kutuplaştırılabilen geometrik bir yapıda köşe etkisinden dolayı negatif IP oluşabilmektedir (Şekil 3.30).



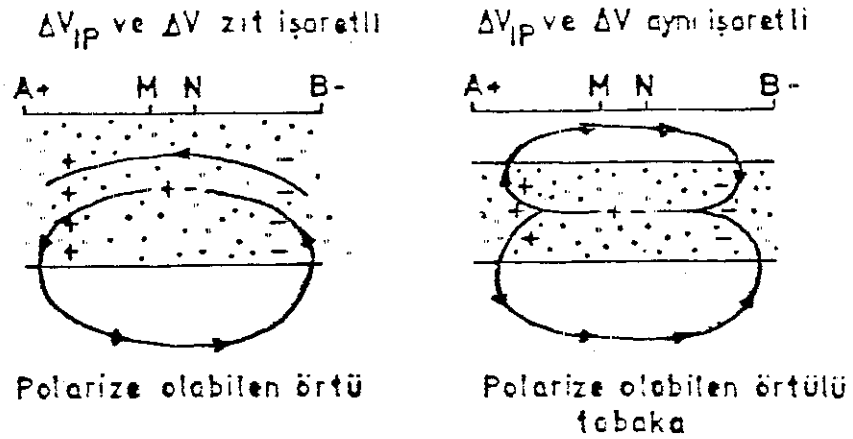
Kutuplaştırılabilen Küresel Yapı

Kutuplaştırılabilen Eğimli Yapı

Şekil 3.30 Negatif IP olayının geometrik etkilerle açıklanması: (a) Kutuplaştırılabilen küresel yapı ve (b) Kutuplaştırılabilen meyilli yapı (Bertin ve Loeb, 1976).

Negatif IP sadece geometrik şekle bağlı değildir. Katmanlı ortamlarda da sık sık negatif IP değerleri elde edilebilmektedir. Bertin ve Loeb (1976), kutuplaştırılabilen yeryüzü katmanı üzerine yerleştirilebilen elektrod- lar arasında A dan B ye yönelen birincil akıma zıt yönde

depolarizasyon akımları oluştuğunu belirtmiştir. Bu nedenle V_{IP} gerilimine zıt yönde oluşan ve negatif IP'ye karşılık gelen birincil bir ΔV gerilim farkı ölçülür. Eğer kutuplaştırılabilen ortam gömülü ise, depolarizasyon akımları birincil akım ile aynı yönde bulunur (Şekil 3.31).



Şekil 3.31 Kutuplaştırılabilen örtü katmanı ve örtülü katman durumlarında negatif IP olayı (Bertin ve Loeb, 1976).

Madden ve Cantwell (1967)'ye göre negatif IP verici ve alıcı aletler arasındaki akım kaçakları tarafından oluşturulmaktadır (Çağlar, 1986). Bertin ve Loeb (1976), boru hattı ve tel çit gibi kültürel etkiler nedeniyle de negatif IP'nin elde edilebileceğini ve bunun da bir tür gürültü sayılabileceğini ortaya koymuştur.

3.3.6. IP ÖLÇÜMLERİNDEKİ GÜRÜLTÜLER VE VERİLERDEN ÇIKARILMASI

IP ölçümleri sırasında bazen yerden kaynaklanan doğal, bazen de insan etkisinden kaynaklanan yapay gürültüler ölçümlere karışarak özgün IP verisini bozarlar. Gerek veri işlem gerekse yorum aşamalarında zaman alıcı ve yanıltıcı etki yapan bu gürültülerin tanınması ve önlenmesi bir jeofizikçi için zorunluluktur.

Bozucu endüstriyel akımlar, başıboş akımlar, doğal gerilim, elektrod gürültüsü, tellürik akımlar, ölçü kablosu salınımları, kapasitif kuplaj, rezistif kuplaj ve elektromanyetik kuplaj gibi türlere ayrılan bu gürültüler konusunda kapsamlı bilgi (Bertin ve Loeb, 1976; Sumner, 1976; Çağlar, 1986;...) da bulunabilir. Her bir IP ölçüm tekniği için etkin olan gürültüler ve verilerden bu gürültülerin giderilmesi farklı olmaktadır ve bu konuda (Dey ve Morrison, 1973; Hohmann, 1973; Hallof, 1974;...) ayrıntılı olarak çalışmışlardır.

Her ne kadar gürültü giderme işlemleri ile IP parametrelerindeki gürültüler bir ölçüde giderilebilirse de veri toplama aşamasında alınacak bir dizi önlem ile daha başlangıçta bu gürültüler en az'a indirilmeye çalışılmalıdır. Elektrod açılım türünden, kullanılan akımın dalga şekline kadar bir çok değişken olayı etkilediğinden elektrod açılım türünün ve akım dalga şeklinin seçiminde dikkatli olmak gerekmektedir. Dipol dipol açılımı ve kare dalga kullanılması ile gürültüler minimum yapılabilmektedir. Güç hatlarına dik çalışılması, alıcı ve verici kabloların birbirinden uzak ya da dik ve hatta kabloların mümkünse yerden yüksekte geçirilmesi önlemlere örnek olarak sayılabilir.

3.3.7. DOGRUSAL OLMAYAN IP (NON-LINEAR IP)

Bir kayaç ortamındaki elektriksel gerilim, bu kayaca uygulanan elektrik akımı ile doğru orantılıdır, yani, Ohm kanununa uygundur. Bununla beraber, bazı kayaç (veya mineral) ortamlarında akımın değişimi ile gerilimin değişimi doğru orantılı yani doğrusal değildir. Doğrusal olmayan (Non-linear) özellik olarak bilinen bu durum kayaç (veya mineral) özelliğine bağlı olduğundan, kayaçların bazı belirtkenlerinin (Karakteristik) saptanmasında kullanılabilir. .

Doğrusal olmayan özellik konusunda yapılan çalışmalarda daha çok mineral ayırımı üzerinde durulmuştur. Bu güne kadar yapılan laboratuvar çalışmaları sonuçlarına göre, karmaşık öz dirençle birlikte mineral ayırımının en iyi yaklaşımlarından biridir. Giriş ve Tarihsel Değininim bölümlerinde de yazıldığı gibi, arazide bu davranış saptanmışsa da bir jeolojik sorunun çözümüne yönelik parametre durumuna getirilmemiştir. İzleyen paragraflarda da görüleceği gibi, elde edilen matematik bağıntılar, bir parametreden çok, doğrusal olmayan davranışı açıklamak için kullanılmıştır.

Shaub (1965), doğrusal olmayan davranışı iletkenlik olarak incelemiştir (Non-linear conductivity). Akıma bağlı olarak öz direnç değişimini izleyen şekillerde vermiştir;

a) Akımla orantılıdır,

$$\rho = \rho_0(1 + \lambda_1 I) \quad (3.3.20)$$

b) Akımın modülüyle orantılıdır,

$$\rho = \rho_0(1 + \lambda_2 |I|) \quad (3.3.21)$$

c) Akımın karesiyle orantılıdır,

$$\rho = \rho_0(1 + \lambda_3 I^2) \quad (3.3.22)$$

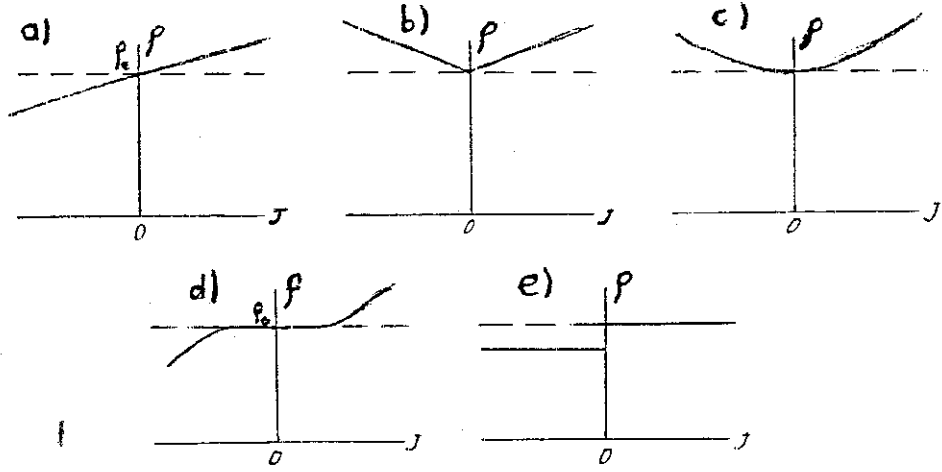
d) Akımın kübüyle orantılıdır,

$$\rho = \rho_0(1 + \lambda_4 I^3) \quad (3.3.23)$$

e) Akımın doğrultusuna bağımlıdır,

$$\rho = \rho_0(1 + \lambda_5 I) , \quad I < 0 \quad (3.3.24)$$

Burada λ_n , orantılılık faktörü olarak tanımlanmıştır. Bu bağımlılıkla ilgili şekiller, şekil 3.32 de verilmiştir.



Şekil 3.32 I akımına bağlı olarak öz direncin değişik formları (Shaub, 1965).

Bu beş durumun her biriyle ilgili olarak gerilim izleyen şekillerde verilmiştir,

$$\begin{aligned} \text{a) } V = RI = R_0 I_0 (\sin 2\omega t + \sin 3\omega t + \lambda_1 I (\sin 2\omega t \\ + \sin 3\omega t)^2) \end{aligned} \quad (3.3.25)$$

$$\text{b) } V = RI = R_0 I_0 (1 + \lambda_2 |I|) (\sin 2\omega t + \sin 3\omega t) \quad (3.3.26)$$

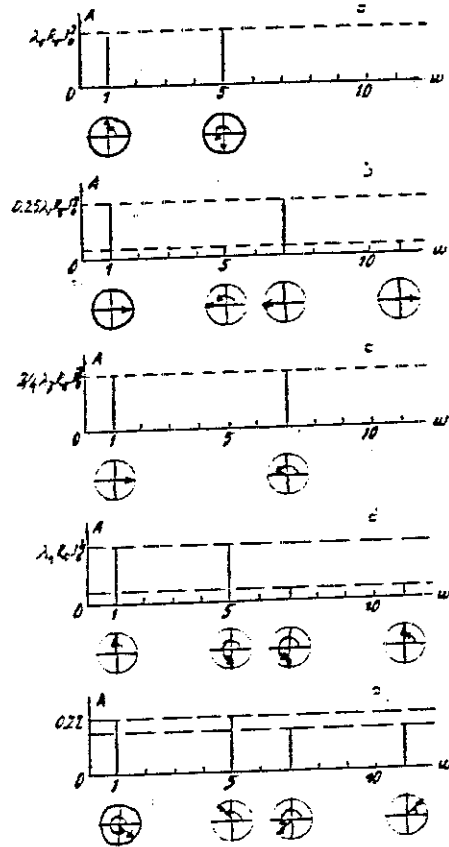
$$\text{c) } V = RI = R_0 I_0 (1 + \lambda_3 I^2) (\sin 2\omega t + \sin 3\omega t) \quad (3.3.27)$$

$$\begin{aligned} \text{d) } V = \lambda_4 R_0 I^3 & \left((18/8) + 3\cos\omega t + (3/4)\cos 2\omega t - (1/2)\cos 3\omega t \right. \\ & - 2\cos 4\omega t - 3\cos 5\omega t - 2\cos 6\omega t - (1/2)\cos 7\omega t + (1/8) \\ & \cos 8\omega t + (1/2)\cos 9\omega t + (3/4)\cos 10\omega t + (1/2)\cos 11\omega t \\ & \left. + (1/8)\cos 12\omega t \right) \end{aligned} \quad (3.3.28)$$

$$\text{e) } V = R_0 I_0 (\sin 2\omega t + \sin 3\omega t), \quad V \geq 0$$

$$V = R_0 I_0 (1 + \lambda_5) (\sin 2\omega t + \sin 3\omega t), \quad V < 0 \quad (3.3.29)$$

Bu bağıntıların daha açık yazılımları adı geçen yayında bulunmaktadır. Bu bağıntılardan hareketle, Şekil 3.32 de verilen doğrusal olmayan davranışın değişik formlarının frekans, genlik ve faz karakteristikleri Şekil 3.33 de verilmiştir.



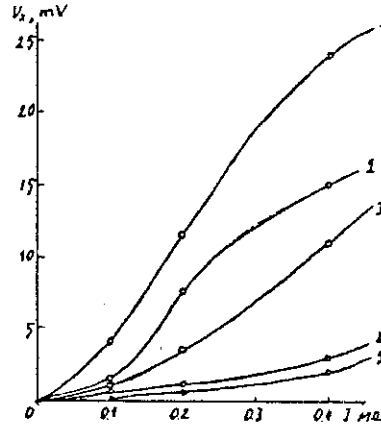
Şekil 3.33 Şekil 3.32 de verilen doğrusal olmayan davranışın değişik formlarının frekans, genlik ve faz belirtkenleri (Shaub, 1965).

Shaub (1969), bir çok Sovyet bilim adamının, IP olayının doğrusal olmayan bir olay olduğunu vurguladıklarını ve yine aynı araştırmacıların bu doğrusal olmayan özelliğin farklı yapı tipleri ve kayaçların ayırımına rehberlik edebileceğini ortaya koyduklarını belirtmiştir. Dissemine sülfidlerin ayırımı için yapılan çalışmalarda elde edilen görünür öz dirençler, akım yoğunluğuna bağlı olarak değişmektedir. Farklı dissemine mineraller için elde edilen gerilim-akım eğrileri Şekil 3.34 de gösterilmiştir.

Şekil 3.34 de görülen genlik,

$$V_k = V_k \cos(\omega_k t + \phi_k) \quad (3.3.30)$$

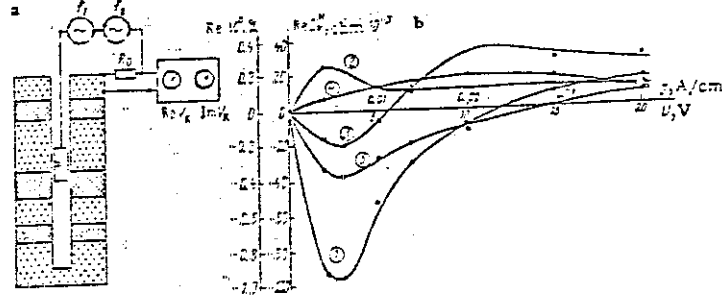
olup $\omega_k = m\omega_1 + n\omega_2$ birleştirilmiş frekanslar ve m ve n, tam sayılardır.



Şekil 3.34 Farklı dissemine sülfidler için akım-gerilim ilişkisi. 1) Pirinç, 2) Kalkopirit, 3) Pirotit, 4) Grafit, 5) Galen (Shaub, 1969).

Shaub ve Ivanov (1971), grafitlerden sülfidlerin değil aynı zamanda, sülfidlerin de kendi içlerinde, ayrılabilirliğini göstermişler ve olayın arazi koşullarını araştırmak için bir prototip model kuyu hazırlamışlar ve

bu dizayn içinde doğrusal olmayan iletkenliği incelemişlerdir. Bu prototip kuyu ve elde edilen veriler Şekil 3.35 de gösterilmiştir.

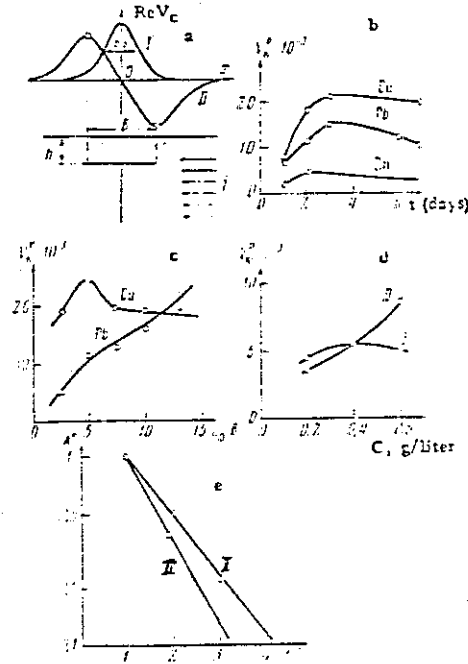


Şekil 3.35 Model kuyu ölçümleri ve sonuçları.

- 1) Pirotit, 2) Galen, 3) Grafit,
- 4) Kalkopirit, 5) Pirit, 6) Çimento (Shaub ve Ivanov, 1971).

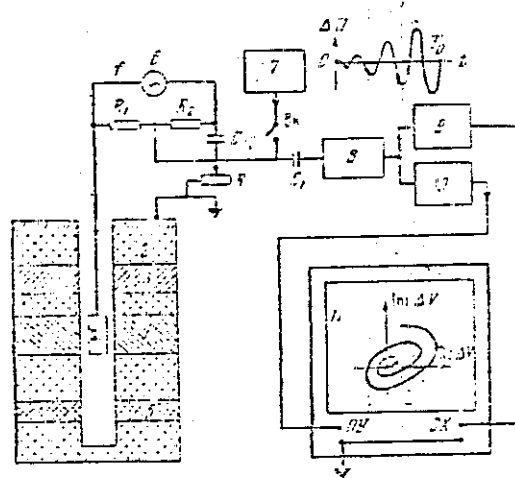
Shaub ve diğ. (1971), kuyu ölçümleri ile doğrusal olmayan iletkenliği incelemişlerdir.

Shaub ve diğ. (1971), elde edilen doğrusal olmayan davranışın, akım yoğunluğu dışında, etkilenebileceği etkenleri incelemişlerdir. Örneğin, zaman süreci arttıkça (gün olarak) numunenin genliği azalmaktadır. Akım yoğunluğu sabit kalmak üzere, NaCl konsantrasyonu artırılırsa, etkinin arttığı izlenir. Bu model çalışmasında yatay veya düşey katmanlı durumlar için anomalilerde, yatay katmanlı durumun, düşey katmanlı duruma göre, artan derinlikle daha hızlı azalan anomali çizdiği izlenir. Buna ait örnekler Şekil 3.36 da görülmektedir.

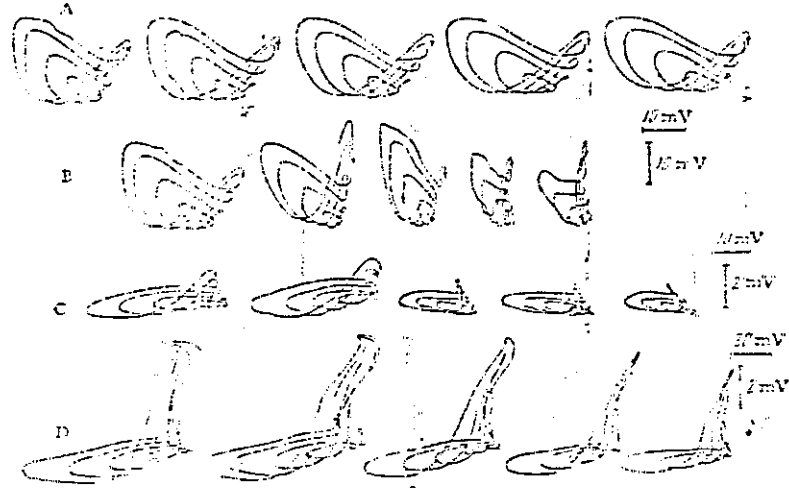


Şekil 3.36 Model ölçümlerinin sonuçları (Shaub ve diğ., 1971).

Shaub (1974), spiral yöntemiyle sülfid minerallerinin doğrusal olmayan kutuplaştırmasını ölçmüştür. Şekil 3.37, spiral yöntemin kaydı için blok diyagramı göstermektedir. Katsube ve diğ. (1973)'e benzer olarak, gerçel ve sanal bileşenleri kaydederek lisajus eğrilerine benzer eğriler çizmişlerdir. Galen, Kalkopirit ve Pirit örnekleri için elde edilen eğriler Şekil 3.38 de gösterilmiştir.



Şekil 3.37 Spiral kayıtların blok diyagramı (Shaub, 1974).



Şekil 3.38 Farklı sülfidler için spiral kayıtlar (Shaub, 1974).

Katsube ve diğ. (1973), olayı bir doğrusal olmayan sistem olarak varsayarak bu doğrusal olmayan sistemin özelliklerini izleyen şekilde sıralamışlardır;

- 1) Sistemde sadece tek doğrusal olmayan eleman vardır.
- 2) Doğrusal olmayan elemanın çıkışı, sadece giriş'in geçmiş tarihine ve şimdiki değerine bağlıdır.
- 3) Eğer doğrusal olmayan elemana giriş, sinüzoidal dalga ise, çıkışın esası gözönüne alınır.

Doğrusal olmayan dalga formu, zamanın periyodik-fonksiyonudur. Bu nedenle Fourier analizi uygulamasıyla,

$$I(t) = I_0 + \sum (I_{An} \sin n\omega t + I_{Bn} \cos n\omega t) \quad (3.3.31)$$

olarak bozulmuş akım (Distorted current) gösterilir. Burada I_0 , I_{An} ve I_{Bn} Fourier katsayılarıdır. Bu $I(t)$ akımına bağlı olarak tanımlanmış bir kısım parametreler adı geçen yayında bulunmaktadır. Bozulma akımına benzer olarak bozulma gerilimi (Distorted voltage) izleyen şekilde yazılabilir,

$$V(t)=V_0+\sum (V_{An}\text{Sinnwt}+V_{Bn}\text{Cosnwt}) \quad (3.3.32)$$

Gerek Shaub (1965, 1969, 1971a, 1971b, 1971c) ve gerekse Katsube diğ. (1973) den izlendiği gibi, Sinüs ve Cosinüs fonksiyonları şeklinde akım ve gerilim verilebilmektedir. Öztürk (1986), bu yayınları da vererek, doğrusal olmayan davranış için matematik bağıntıları oldukça anlaşılır bir şekilde vermiştir.

Eğer verilen bir elektriksel uyarı doğrusal olarak orantılı bir yanıt oluşturursa, gerceğin elektrik özelliklerinin doğrusal olduğu söylenir. Doğrusal sistemlerin iki ölçülebilir özelliği vardır;

1) Bir doğrusal sistemin transfer fonksiyonu, sisteme giriş'in genliğine bağlı değildir.

2) Bir doğrusal sistemin çıkış'ı, sisteme giriş durumunda görünmeyen yeni bilgiler içermez.

Bazı gereçler, elektrik uyarı ile yanıt arasında doğrusal bir orantıya bağımlı değildirler. Doğadaki bir çok mineral bu davranışı göstermektedir. Bir yarıiletken mineral ile bitişik bulunduğu su arayüzeyinden elektrik akışı, yük'ün bu arayüzeyden geçişi ile sağlanır ve işlem çoğu kez doğrusal değildir. Kil gibi yüksek yüzey alanı ve iyon değiş-tokuş kapasitesine (ion change) sahip gereçlerde de katyon değiş-tokuş mekanizması, doğrusal olmayan yük iletim işleminin bir diğer nedenidir. Eğer uygulanan elektriksel uyarı yeteri kadar küçük genlikli veya çok yüksek frekansda ise, bilinen bütün doğrusal olmayan materyallerde yanıt, doğrusal olur.

Bir kayacın laboratuvar koşullarında doğrusal veya doğrusal olmayan davranışını ölçmenin en basit yolu, uygulanan elektrik akımının (uyarı) genliğini değiştirmek ve ölçülen transfer fonksiyonunun değişip değişmediğini gözlemektir. Doğrusal bir sistem için akım yoğunluğunun değişimi ile öz dirençte değişme olmaması gerekmektedir.

Diğer bir yöntem, temiz bir sinüzoidal dalgayı uygulamak ve yanıtın harmonik miktarını ölçmektir. Doğrusal bir sistemde yanıt, harmonik içermeyecektir.

Bu açıklamalardan sonra, doğrusal durumda (Ohm yasasına uyan durumda),

$$V(t) = V_e + V_o(\sin \omega t + \phi_v) \quad (3.3.33)$$

$$I(t) = I_e + I_o(\sin \omega t + \phi_i)$$

olarak genlik ve akım yazılabilir. Burada V_e ve I_e , sabitlerdir ve V_e , doğal kutuplaştırma gerilimi iken I_e , sıfırdır. V_o ve I_o , gerilim ve akımın genlikleri, $\omega = 2\pi f$ ve ϕ_v ve ϕ_i ise gerilim ve akım için fazlardır.

Doğrusal olmayan bir sistem için bu bağıntılar,

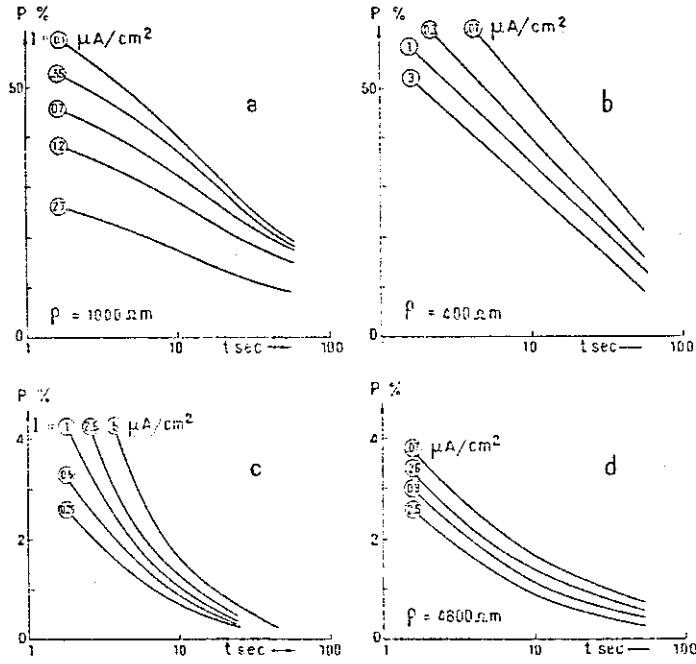
$$V(t) = V_e + \sum \sin(m\omega t + \phi_{vm}) \quad (3.3.34)$$

$$I(t) = I_e + \sum \cos(m\omega t + \phi_{im})$$

şeklinde yazılabilir. Öztürk (1986) da bu gösterimler Olhoeft ve diğ. (1977) de sunulan standartlara uygun $E(t)$ ve $J(t)$ olarak verilmiş olup burada, akım ve gerilim için önceden sunulan gösterimlerle gösterilmiştir.

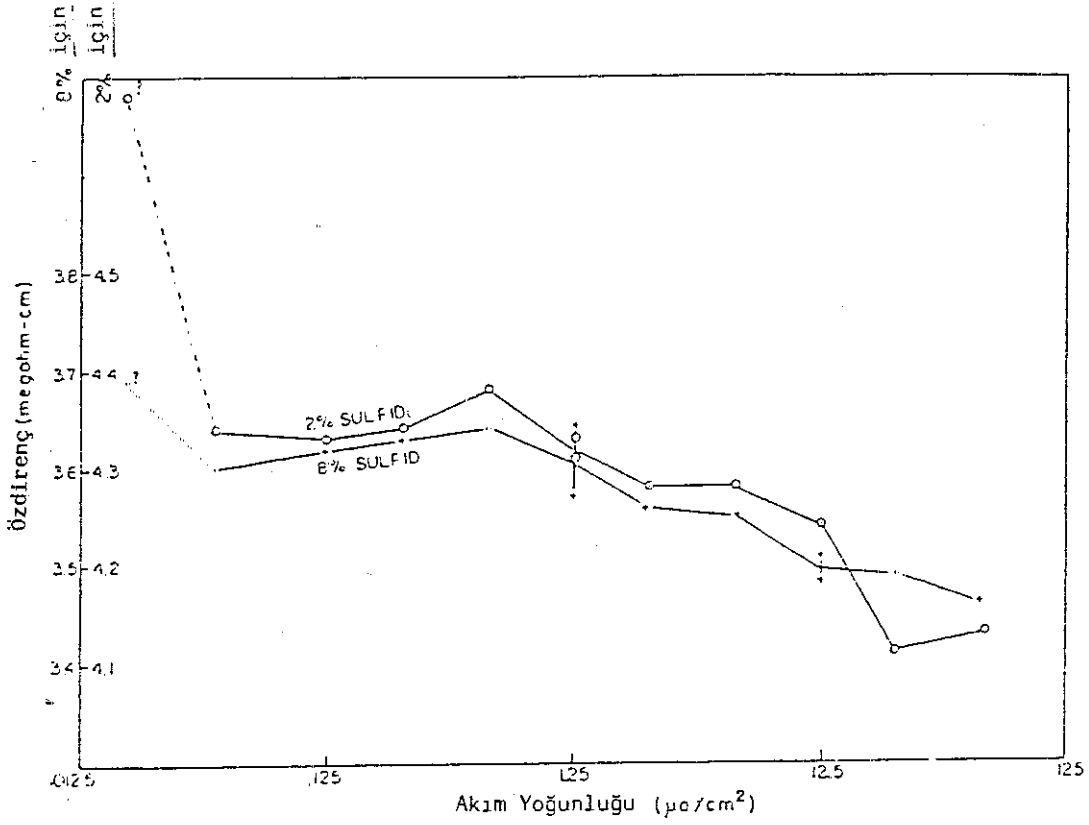
Doğrusal olmayan davranışın bu matematik bağıntılarından sonra, Tarihsel Değerim bölümünde verilen çalışmalardan kısaca söz edilecektir.

Baudoin (1968), IP zaman ortamı çalışmalarında farklı akım yoğunlukları için IP eğrilerinin davranışını incelemiştir. Farklı öz dirençli örnekler üzerinde yaptığı çalışmalarda akım yoğunluğunun artması ile IP'nin azaldığını ve doğrusal olmayan bir olay olduğunu göstermiştir (Şekil 3.39).



Şekil 3.39 Akım yoğunluğu ile IP'nin değişimi (Baudoin, 1968).

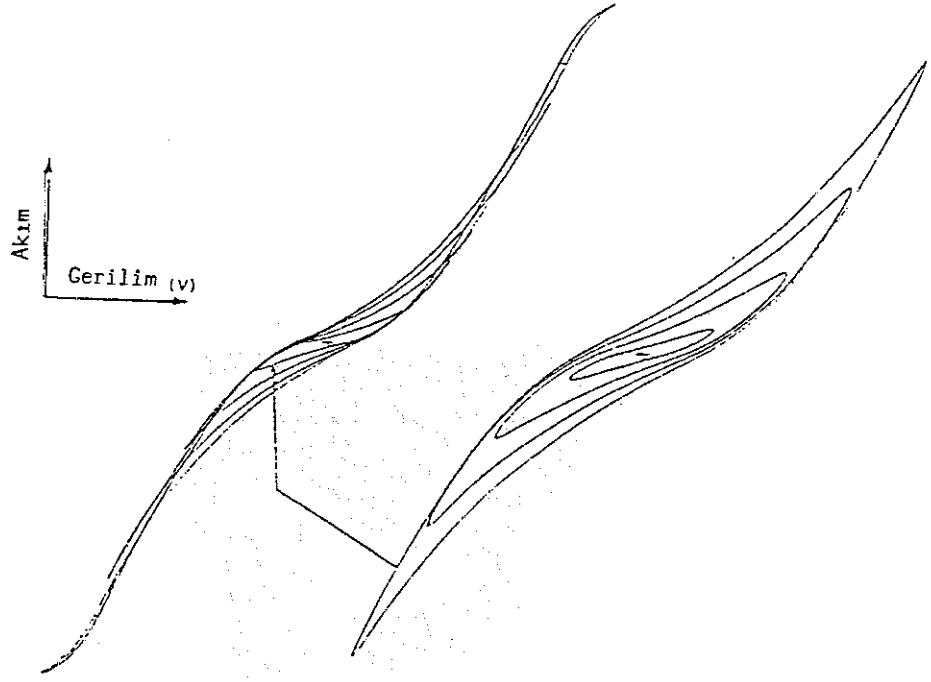
Scott ve West (1969) ise IP zaman ortamı çalışmalarında yüklenebilirlik parametresinin, $.01-.1 \mu A/cm^2$ akım yoğunlukları arasında yaklaşık olarak sabit olduğunu, $.1-100 \mu A/cm^2$ akım yoğunlukları arasında ise her bir onluk logaritmik ölçekte %20 azalma olduğunu yapay örnekler üzerinde yaptıkları ölçümler ile göstermişlerdir. Ek olarak, $100 \mu A/cm^2$ lik akım yoğunluğundan sonra, yüklenebilirlik parametresi ölçülemeyecek kadar küçülmektedir (Şekil 3.40).



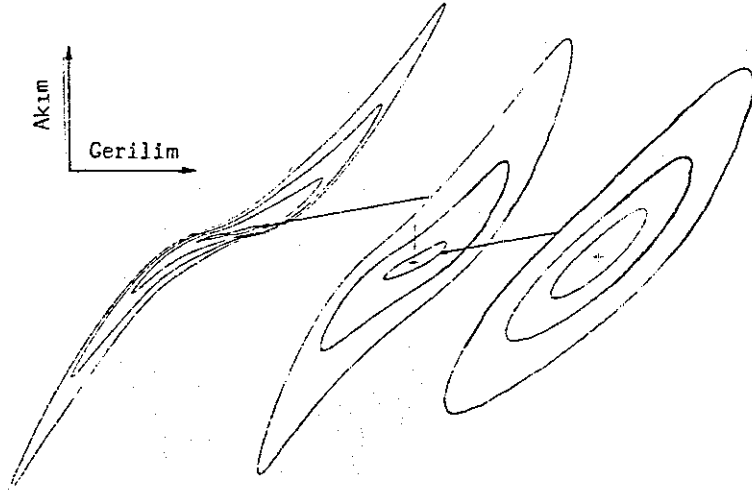
Şekil 3.40 Özdirencin akım yoğunluğu ile değişimi (Scott ve West, 1969).

Katsube, Ahrens ve Collett (1973), doğrusal olmayan IP davranışını faz açısı parametresinde incelemişlerdir. Elde ettikleri Lisajus eğrilerinin doğrusal olmayan özelliği yardımıyla Pirit, Kübanit, Galen ve Serpantin ile Asbest gibi değişik minerallerin ayrılabilceğini göstermişlerdir.

Serpantin ve Asbest için düşük akım yoğunluklarında elde edilen elips şeklinin akım yoğunluğunun artırılmasıyla Lisajus şekline dönüşümü, sırasıyla, Şekil 3.41 ve Şekil 3.42 de gösterilmiştir.

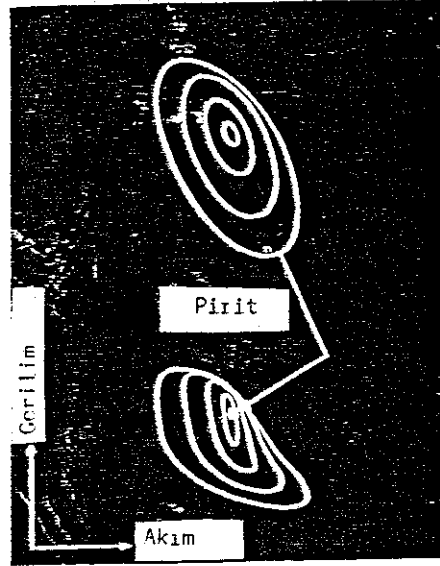


Şekil 3.41 Serpantin için Lisajus eğrisi. Akım yoğunluğu ok yönünde artmaktadır (Katsube ve diğ., 1973).

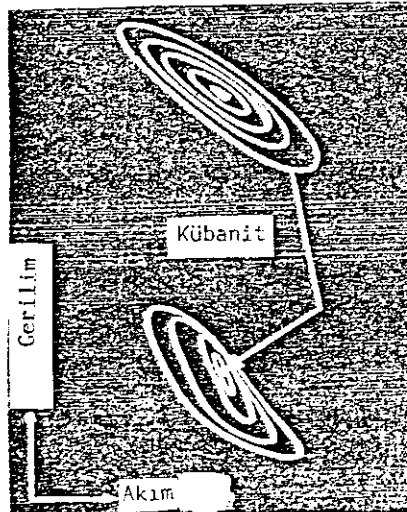


Şekil 3.42 Asbest için Lisajus eğrisi (Katsube ve diğ., 1973).

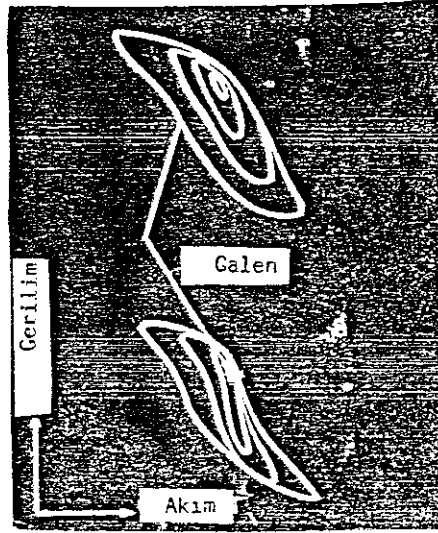
Pirit, Kübanit ve Galen örnekleri için de benzer sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 3.43, Şekil 3.44 ve Şekil 3.45'da sırasıyla, pirit, kübanit ve galen'in Lisajus eğrileri görülmektedir. Burada da akım yoğunluğu içten dışa ve ok yönünde artmaktadır.



Şekil 3.43 Pirit'in 1 Hz.frekansındaki Lisajus eğrisi (Katsube ve diğ., 1973).



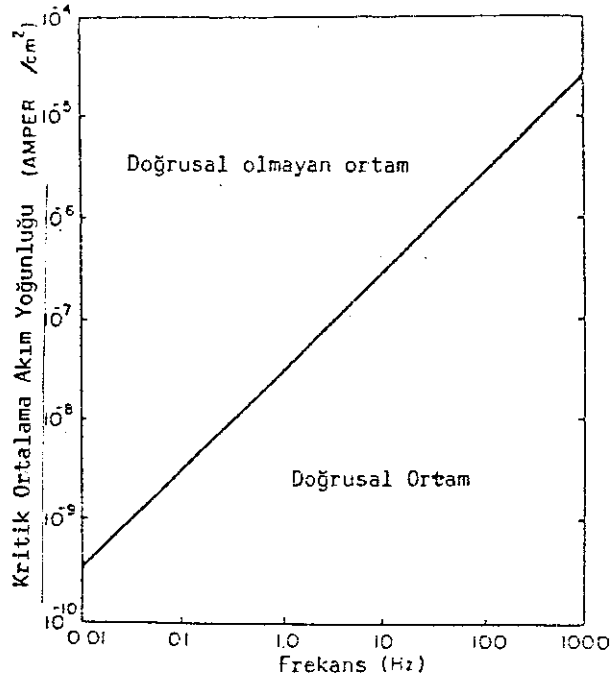
Şekil 3.44 Kübanit'in Lisajus eğrisi (Katsube ve diğ., 1973).



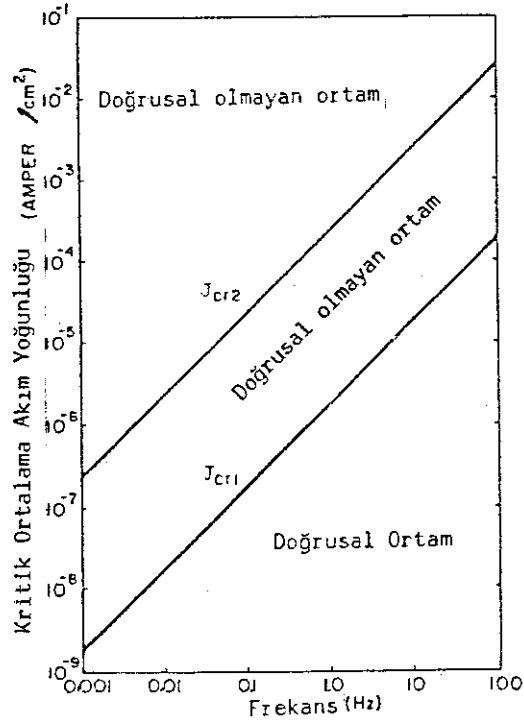
Şekil 3.45 Galen'in Lisajus eğrisi (Katsube ve diğ., 1973).

Serpantin ve Asbest örnekleri için şekillerin sağında ve iç tarafındaki elips 10^{-9} A/cm² akım yoğunluğunda elde edilmiştir ve ok yönünde akım yoğunluğu artırılarak solda ve dıştaki elipsde 10^{-7} A/cm² akım yoğunluğuna ulaşmaktadır. Pirit, kübanit ve galen için aynı özellik üstte ve içteki elipsten altta ve dışta bulunan elipse doğrudur.

Çalışmaları sırasında Galen için iki ve Serpantin için bir kritik akım yoğunluğu saptamışlardır. Bu kritik akım yoğunlukları Serpantin'de 10^{-2} Hz. de $3.1 \cdot 10^{-10}$ A/cm² veya 10 Hz. de $3.1 \cdot 10^{-7}$ A/cm² dir (Şekil 3.46). Galen için ilk kritik akım yoğunluğu 10^{-2} Hz. de $1.9 \cdot 10^{-8}$ A/cm² veya 10 Hz. de $1.9 \cdot 10^{-5}$ A/cm² ve ikinci kritik akım yoğunluğu 10^{-2} Hz. de $2.5 \cdot 10^{-6}$ A/cm² veya 10 Hz. de $2.5 \cdot 10^{-3}$ A/cm² dir (Şekil 3.47).



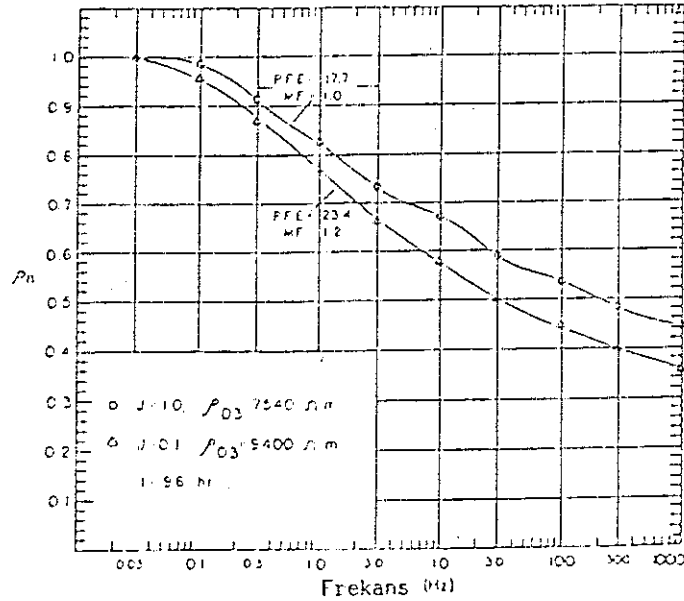
Şekil 3.46 Serpantin için kritik akım yoğunluğu (Katsube ve diğ., 1973)



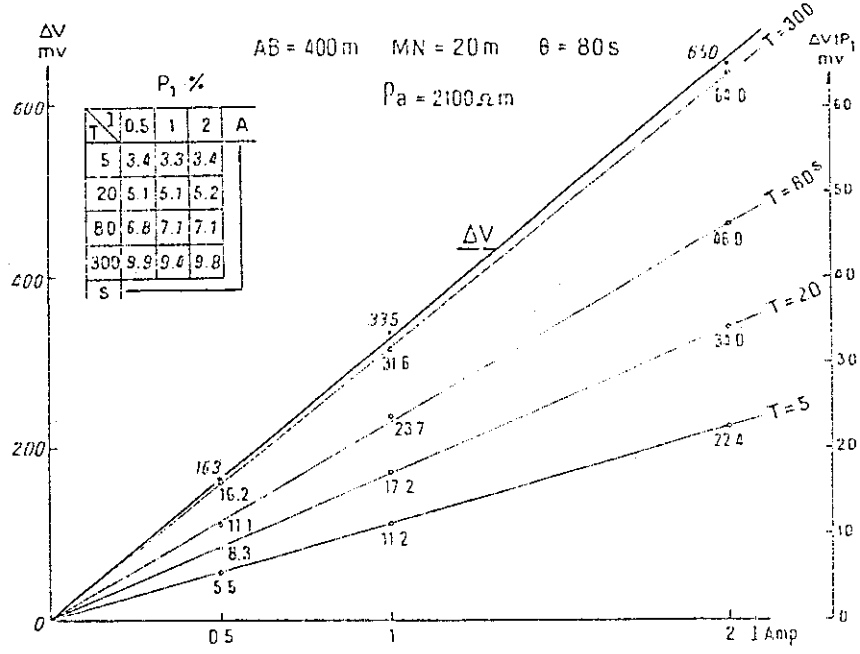
Şekil 3.47 Galen için kritik akım yoğunlukları (Katsube ve diğ., 1973)

Sumner (1976), özdirencin frekansla değişimini incelerken akım yoğunluğunu değiştirerek frekans etkisi parametresini incelemiştir. Bu konuda bir örnek Şekil 3.48 da izlenmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, aynı frekansta akım yoğunluğu arttıkça özdirenç düşmektedir. Fakat belirgin bir kayacı tanımladığına ilişkin bir belirti bulunmamaktadır. Sumner (1976) da, Scott ve West (1969)'e benzer olarak, arazide kullanılan düşük frekanslarda IP etkisinin $10^{-2} \mu\text{A}/\text{cm}^2$ den yüksek akım yoğunluklarında azaldığını belirtmiştir. Özdirenç değerleri .03 Hz. deki özdirence göre normalize edilmiştir.

Bertin (1976), arazi denemelerinde, kullanılan akım ile IP olayının doğrusal olduğunu belirtmiştir. Bunu ise arazide yeteri kadar akım yoğunluğu uygulanamamasına bağlamıştır (Şekil 3.49).

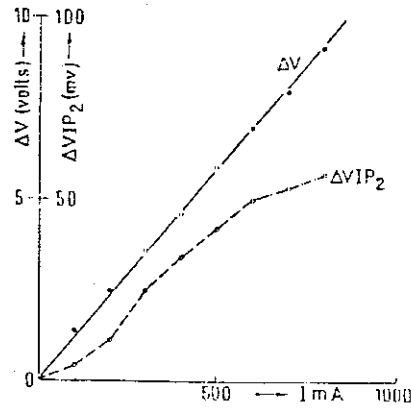


Şekil 3.48 Farklı akım yoğunluklarında özdirencin değişimi (Sumner, 1976).



Şekil 3.49 Akım ile IP'nin değişimi (Bertin, 1976).

Yine Bertin (1976), yapılan laboratuvar çalışmalarında akım ile IP parametresinin doğrusal olmayan davranışının gözlemlendiğini belirtmiştir (Şekil 3.50).



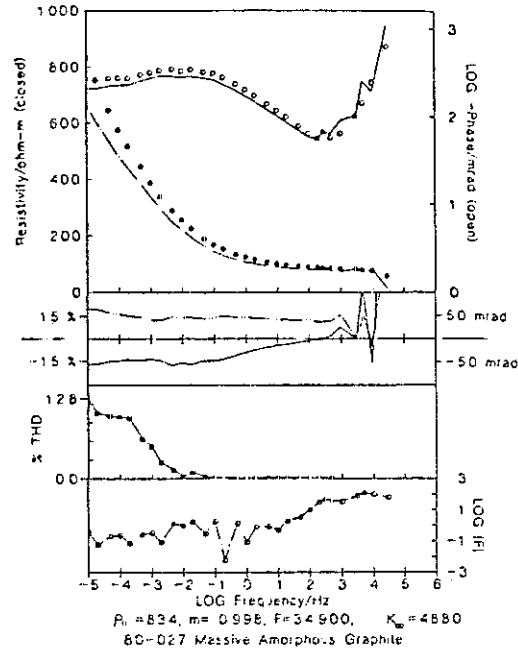
Şekil 3.50 Akım ile IP'nin doğrusal olmayan davranışı (Bertin, 1976).

Bu sonuçlara göre, Bertin (1976), Laboratuvar ve yerinde ölçümlerin bu farklılığının laboratuvarında istenen seviyede akım yoğunlukları kullanılmasından kaynaklanabileceğini belirtmiştir.

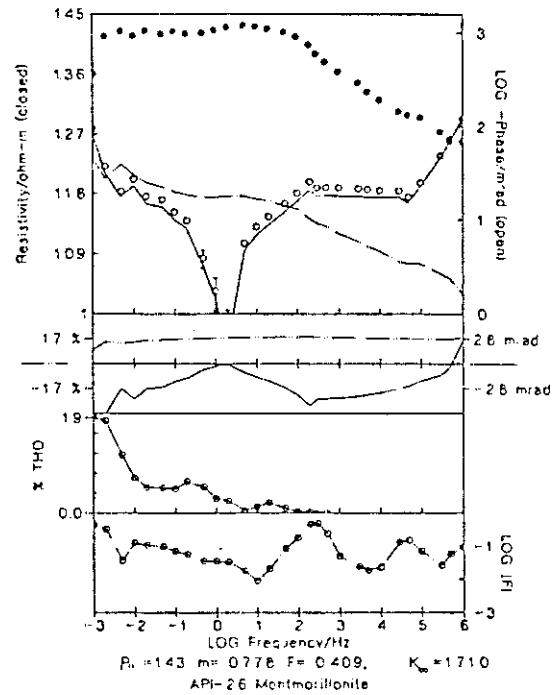
Doğrusal olmayan davranışı karmaşık öz direnç bazında tanımlayan ve buna "doğrusal olmayan karmaşık öz direnç (non-linear complex resistivity, NLCR)" olarak adlandıran Olhoeft, konuyla ilgili araştırmacıların başında gelmektedir. Bir çok yazışmaya karşılık kendisinden yanıt alınamayan bu araştırmacının literatürde bulunan bir çok bildiri ve yayınına ulaşılammıştır. Burada elimizde bulunan yayınlarından örnekler verilecektir.

Olhoeft (1977), yeraltısuyu kimyasını doğrusal olmayan karmaşık öz direnç yardımıyla incelerken, yukarıda verilen, doğrusal olmayan bir sistemin özelliklerini de açıklamıştır. Çalışmasında olayın kuyu içi uygulamalarının başarılı olacağını belirtmiştir.

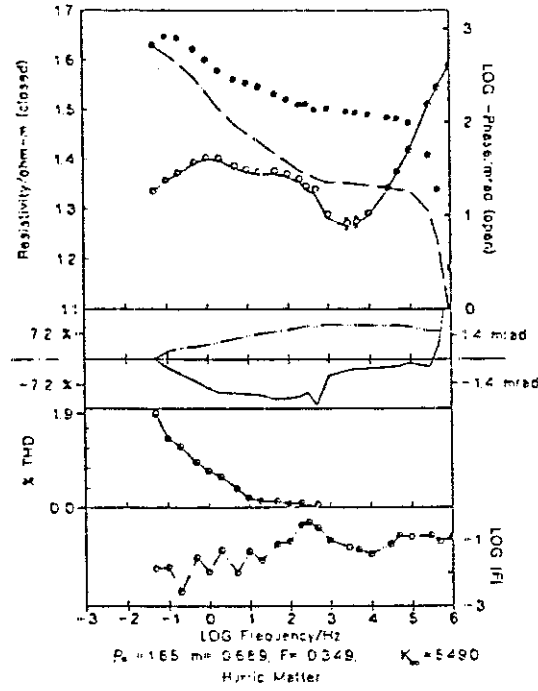
Olhoeft (1985), düşük frekanslarda kayaçların elektriksel özelliklerini incelemiştir. Burada karmaşık öz direncin frekans bağımlılığı ve doğrusal olmayan belirtkeni (karakteri) yardımıyla mineral ayırımı yapılabileceğini ve 1000 Hz nin altındaki frekanslarda olayın kimyasal reaksiyonlar, 1000 Hz nin üstündeki frekanslarda ise olayın fiziksel reaksiyonlarla saptanabileceğini belirtmiştir. Düşük frekanslarda yaptığı çalışmalarda indirgenme-yükseltgenme reaksiyonları ile ekonomik materyallerin, katyon değiş-tokuşu ile kil ve zeolitlerin ve kil-organik reaksiyonlar ile toksit maddelerin ve petrol yataklarının belirlenebileceğini göstermiştir. Bu reaksiyonlara ait 3 şekil, şekil 3.51, şekil 3.52, şekil 3.53 de görülmektedir.



Şekil 3.51 Masif amorf grafit'in karmaşık özdi-
renç spektrumu (Olhoeft, 1985).



Şekil 3.52 Amerikan petrol endüstrisinde kulla-
nılan standart bentonit'in karmaşık
özdiğerç spektrumu (Olhoeft, 1985).



Şekil 3.53 Organik materyallerin karmaşık özdi-renc spektrumu (Olhoeft, 1985).

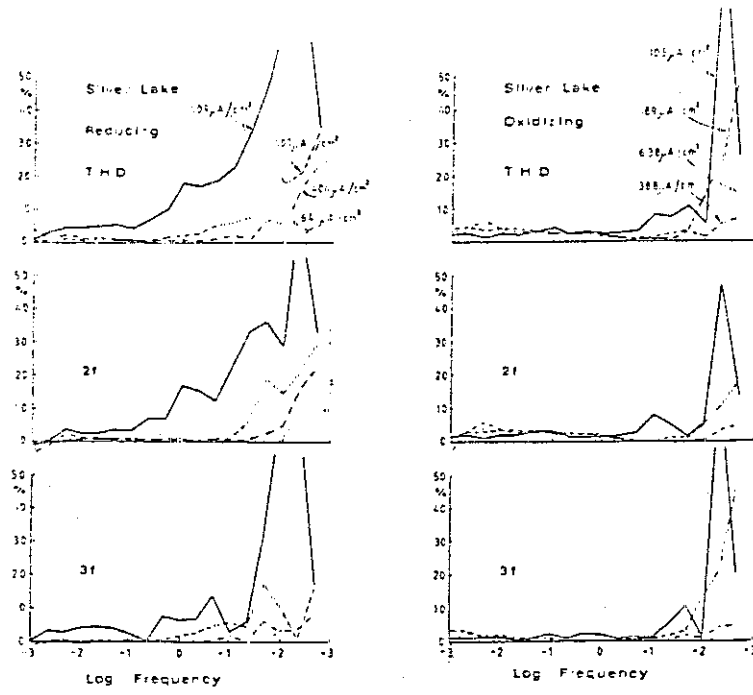
Gerek bu yayında gerekse Hall ve Olhoeft (1986), Anderson (1981) ve Klein ve Sill (1982) de kullanılan harmonik bozulma (Harmonic Distortion), Hall ve Olhoeft (1986) da izleyen şekilde verilmiştir,

$$2fHD = (|V_2|/|V_1|) - (|I_2|/|I_1|)$$

$$3fHD = (|V_3|/|V_1|) - (|I_3|/|I_1|) \quad (3.3.35)$$

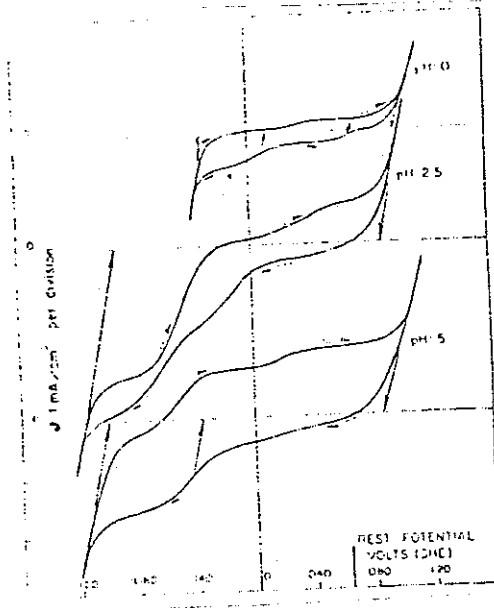
$$THD = (|2fHD|^2 + |3fHD|^2 + \text{Yük. mer. ter.})^{1/2}$$

Burada 2fHD, ikinci harmonik bozulma; 3fHD, üçüncü harmonik bozulma ve THD, toplam harmonik bozulmadır. V ve I, ise (3.3.34) bağıntısında verilmiştir. Hall ve Olhoeft (1986), bu yolla nikel sülfidlerin ayırımına çalışmışlardır. Farklı akım yoğunlukları ile harmonik bozulmaların değişimini inceleyerek bu ayırımı gerçekleştirmişlerdir. Bu konuda bir örnek şekil 3.54 de verilmiştir.

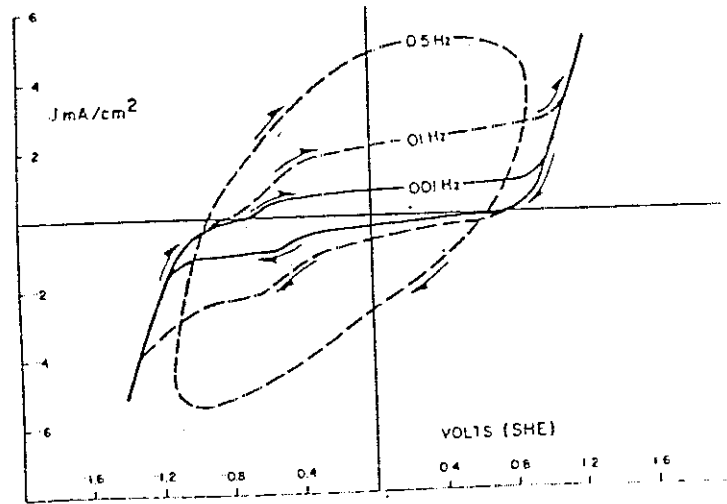


Şekil 3.54 Farklı akım yoğunluklarında indirgenme - yükseltgenme koşulları altında % harmonik bozulma (Hall ve Olhoeft, 1986).

Klein ve Shuey (1978), doğrusal olmayan davranışın arazi koşullarında uygulanabilmesi için; a) yeraltı suyunun pH'ı, b) sülfürlü mineral tane büyüklüğü ve geometrisi, c) elektrod açılımı, d) elektrik akımının dalga şekli ve e) akım yoğunluğunun iyi araştırılması gerektiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, sülfürlü metalik minerallerin pH değerlerine göre kutuplaştırma eğrilerini veya elektrod gerilimine göre akım yoğunluklarının doğrusal ve doğrusal olmayan bölgelerini bozuk Lisajus eğrileriyle incelemişlerdir. Pirit örneklerinin anodik geriliminin pH'a çok az bağımlı olmasına karşılık katodik gerilimin pH'nın artmasıyla farklı değiştiğini göstermişlerdir. Pirit örneği için sabit frekansda değişen pH ve sabit pH da değişen frekans için Lisajus eğrileri Şekil 3.55 ve 3.56 de gösterilmiştir. Düşük frekanslarda doğrusal olmayan olayın daha belirgin olduğu şekillerden izlenmektedir.



Şekil 3.55 Pirit örneğinin $2 \cdot 10^{-3}$ Hz. de değişen pH değerleri için gösterdiği doğrusal olmayan davranış (Klein ve Shuey, 1978).

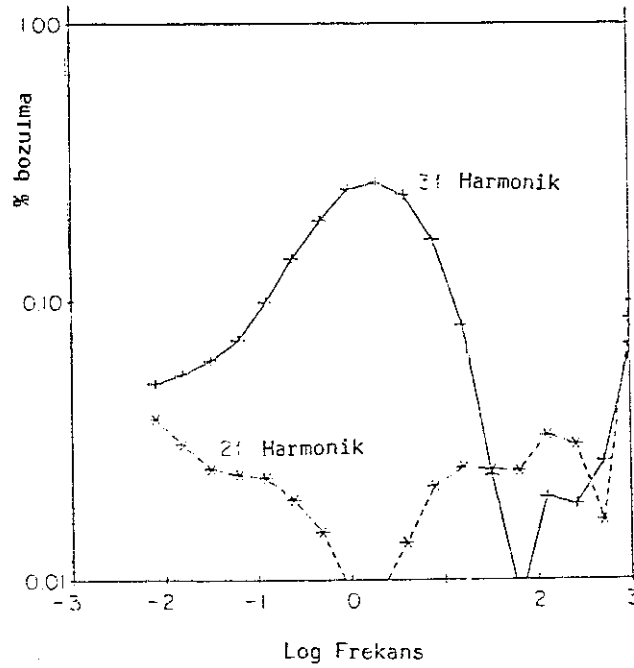


Şekil 3.56 Pirit örneğinin 5 pH'da değişen frekanslar için gösterdiği doğrusal olmayan davranış (Klein ve Shuey, 1978).

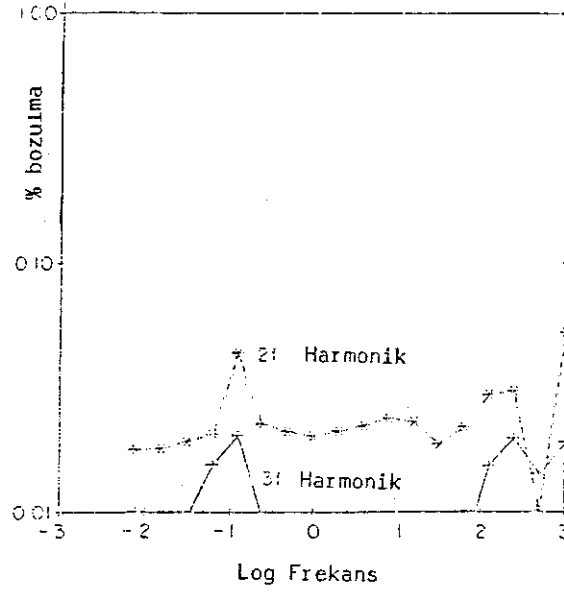
Klein ve Sill (1982), yapay örneklerde kil taşıyan kumtaşlarının elektriksel özelliklerini incelemişler ve doğrusal olmayan IP yanıtını araştırmışlardır. Araştırmada doğrusal olmayan davranışı açıklamak için harmonik bozulma (Harmonic Distortion) parametresini kullanmışlardır,

$$\text{Harmonik Bozulma} = (V/V_0) \cdot 100 \quad (3.3.36)$$

Burada f , verilen akımın frekansı olmak üzere, V , $2f$ veya $3f$ frekansındaki gerilim ve V_0 , f frekansındaki gerilimdir. Pirit (Şekil 3.38) ve yapay örnekler (Şekil 3.58) karşılaştırılarak killerin özel bir doğrusal yanıtı sahip olmadıklarını fakat kil ve dissemine pirit'in ayrımı için bazı belirtiler olduğuna dikkat çekmişlerdir. Zira pirit 3. harmoniğinde yüksek bozulma değerleri gösterirken killer doğrusal görülmektedir.



Şekil 3.57 Dissemine pirit'in 2f ve 3f harmoniklerinde ölçülen doğrusal olmayan harmonik bozulma (Klein ve Sill, 1982).



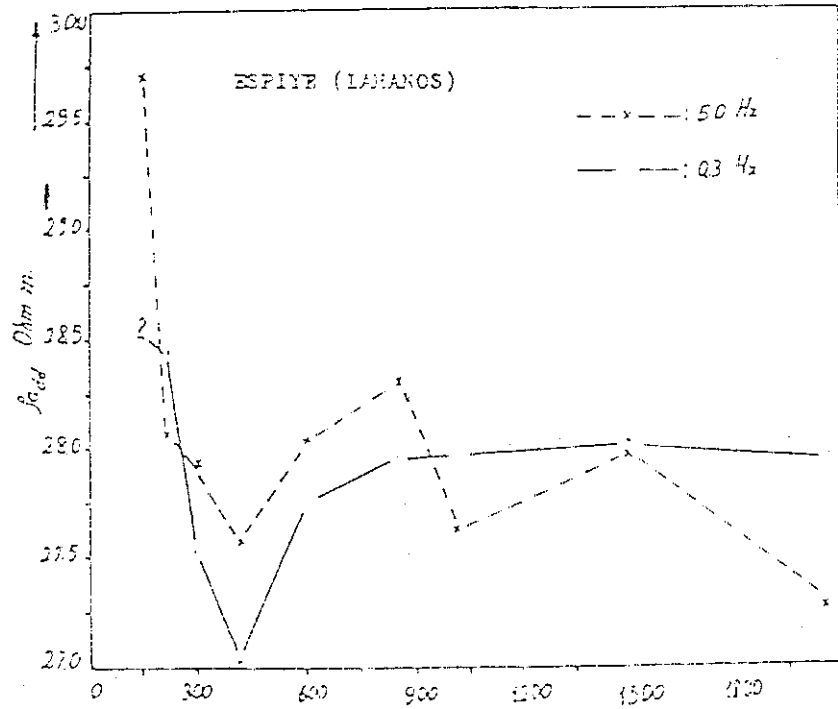
Şekil 3.58 Ca-Montmorillonit karışımının 2f ve 3f harmoniklerinde ölçülen doğrusal olmayan harmonik bozulma (Klein ve Sill, 1982).

Laboratuvar çalışmaları yardımıyla IP de doğrusal olmayan davranışı inceleyen araştırmacılardan biri de Anderson (1981) dir. Elektrolit çözeltisi ile kontakt durumunda bulunan sülfid minerallerinin doğrusal olmayan davranışını iki aşamalı bir çalışmayla ortaya koymuştur. İlk aşamada $200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ akım yoğunluğu uygulanarak NaCl çözeltisi ile kontakt durumunda bulunan pirit, kalkopirit ve galen'in doğrusal olmayan davranışı incelenirken ikinci aşamada akım yoğunluğu artırılarak sülfid taneciklerinden oluşmuş yapay örneklerin doğrusal olmayan davranışı incelenmiştir.

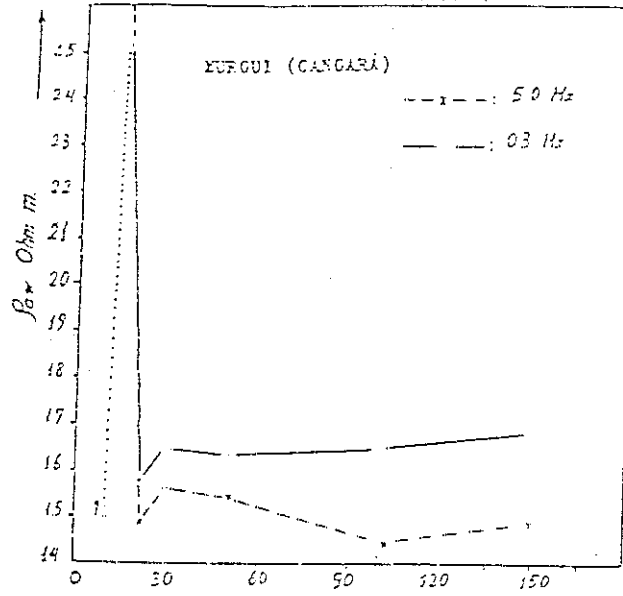
Mineral ayrımını amaçlayan bu çalışmalar laboratuvar koşullarında yürütülmüştür. Bu olayın arazi koşullarında, kuyu ölçümleri dışında, yürütülebileceğine ilişkin istatistiksel veriler sunan bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır. Arazi koşullarında akım yoğunluğu deneyleri ile yapısal ayırım yapılabileceği Keçeli (1979) tarafından bir dizi ölçüm yardımıyla gösterilmiştir.

Keçeli (1979), çalışmasında, mineral ve doku karmaşıklığı arayüzey miktarını artırdığı ve buna bağlı olarak da IP değerini yükselttiği için elektrod kutuplaştırması içeren metalik mineral ortamlarını seçmiştir.

Espiye ve Murgul'da sülfid yatakları üzerinde alınan ölçümlerde çift frekans kullanılmış ve akıma bağlı değişimi görmek amacıyla aynı açılım uzaklığı için akımı sürekli artırmıştır. Espiye (Lahanos) sülfid yatağı, Murgul (Cangara) sülfid yatağına oranla daha masif olmasına karşılık aynı zamanda Cu, Pb, Zn mineralizasyon türlerini de içermektedir. Mineralizasyonun zengin fakat karmaşık olduğu bölgelerde doğrusal olmayan davranış daha belirgindir. Bu açıdan, Espiyede alınan ölçümlerin daha fazla doğrusal olmayan davranış gösterdiği izlenir (Şekil 3.59 ve Şekil 3.60).



Şekil 3.59 Akıma bağlı öz direnç değişimi (Keçeli, 1979).



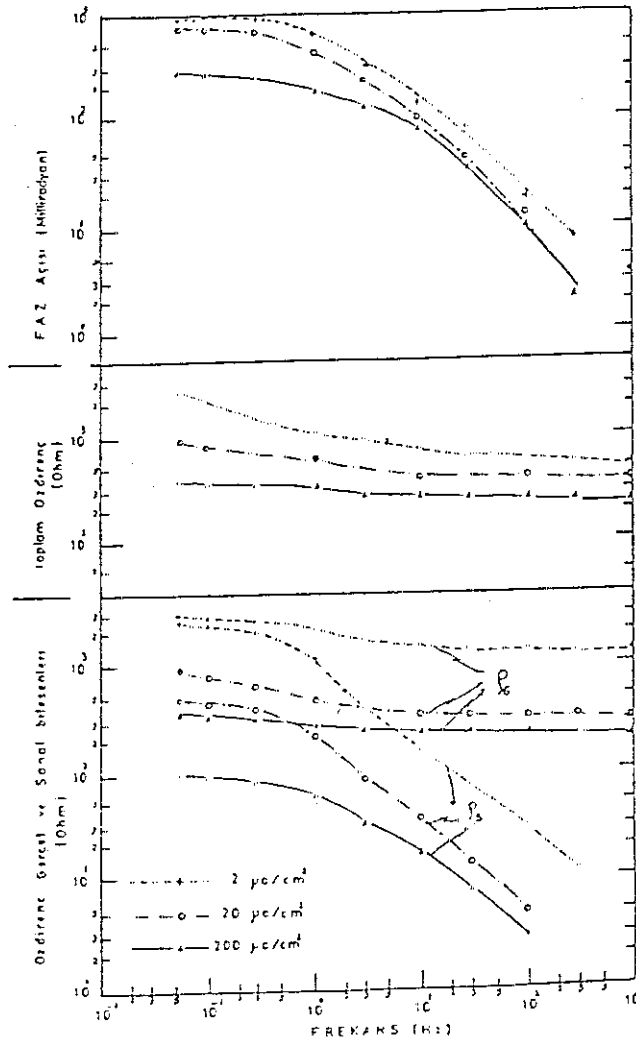
Şekil 3.60 Akıma bağlı öz direnç değişimi (Keçeli, 1979).

Bu çalışmalarda düşük akım yoğunluklarında (küçük akımlarda) doğrusal olmayan davranışın daha belirgin olduğu izlenir. Keza damar şeklinde yapıların köşelerinde negatif IP'nin sürdüğü ve doğrusal olmayan davranışın doğruya yakın olduğu gözlenir.

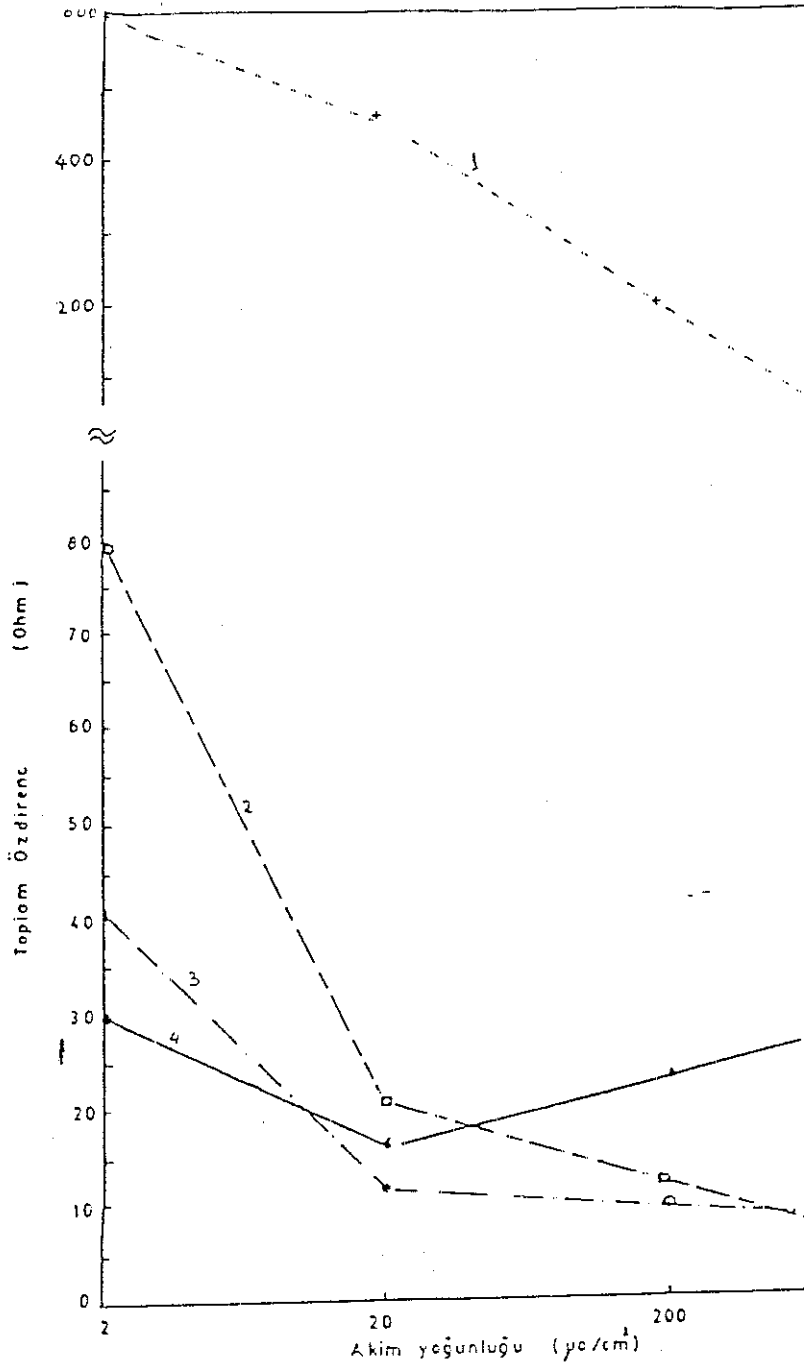
Keçeli (1979), mineralizasyon bölgesinin yanıtının yankayaç yanıtından daha şiddetli olduğunu ve buna bağlı olarak da yapısal bir ayrımın olabileceğini belirtmiş ve bu olayı " Doğrusal olmayan öz direnç-frekans bileşenleri (Nonlinear resistivity spectra) " olarak tanımlamıştır.

Erdoğan (1982), doğrusal olmayan davranışı laboratuvar koşullarında inceleyen bir diğer araştırmacıdır. Kil-Kum, Kil-Pirit ve Kalkopirit örnekleri üzerinde yaptığı çalışmalarda 10^{-2} Hz. - 10^3 Hz. frekanslarını ve 2-200 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ akım yoğunluklarını kullanarak; faz spektrumunun .1 Hz. - 1 Hz. frekansları arasında metalik sülfidlerde artma,

grafit'te azalma göstermesi özelliğinin ortamın elektrolit konsantrasyonuna göre alçak veya yüksek frekanslara kayabileceği, kritik frekansın akım yoğunluğuna bağlı olmadığı, metalik olmayan ortamların davranışının akım yoğunluğuyla değişmediği ve metalik ortamların ise akım yoğunluğunun artması ile daha şiddetli doğrusal olmayan özellik gösterdiklerini ortaya koymuştur. Şekil 3.61 ve 3.62, sırasıyla, kil-kum karışımının faz spektrumu ve öz direncin akım yoğunluğu ile değişimini vermektedir.



Şekil 3.61 10^{-1} normalitedeki NaCl çözeltisinde kum-kil (1.5 mm çapında kum) karışımının IP spektrumları (Erdoğan, 1982).



Şekil 3.62 Özdirençlerin akım yoğunluğuna göre değişimi (1.Kum-kil, 2.Grafit, 3.Bakır,4.Paslanmaz çelik)(Erdoğan,1982).

Şekillerden de görüldüğü gibi akım yoğunluğunun artmasıyla özdirenç ve faz spektrumu değerleri azalmaktadır.

4. TEZ KONUSUNUN ORTAYA KONULMASI

Doğrusal olmayan IP kısmında belirtildiği gibi, Pirit, Kalkopirit ve Galen gibi metalik minerallerin, laboratuvar koşullarında, tanınması (ayırımı) akım yoğunluğu değişimleriyle olanaklı olmaktadır. Fakat bu ayırım, bir jeofizikcinin pratikte kullanabileceği bir parametreye dönüşmemiştir. Zira, hem istatistiksel olarak yeteri kadar veri bulunmamakta hem de çok sayıda yerinde çalışmayla bu konu henüz ortaya konmamıştır. Bu nedenle pratikte, yerinde, uygulanmayan bir kuram olarak nitelenebilir.

Bu çalışmada, yerinde ve laboratuvarda yapılan ölçümler yardımıyla doğrusal olmayan IP'nin ortaya konması ve yeteri kadar veri toplayarak doğrusal olmayan IP'i tanımlayacak bir arazi parametresinin tanımlanması amaçlanmıştır. Bu amacı gerçekleştirmek için özellikleri, mekanik sondajla bilinen metalik ve sediman yer ortamlarında ve bu arazi çalışmalarının yanında laboratuvarda IP verebilecek ortamlarda ölçümler alınmıştır. Böylece, yeni bir parametrenin geliştirilmesiyle hem yapısal ayırıma hem de hidrojeoloji ve mühendislik jeolojisi sorunlarının çözümüne katkıda bulunulabileceği görüşüyle çalışmalar yürütülmüştür.

Ayrıca değişken frekanslı IP ölçümleri sırasında ölçümlere bir çok gürültü karışmakta olup bu da veri işleme aşamasını hem uzatmakta ve hem de bazen yanılgılara neden olmaktadır. Akıma bağlı olarak geliştirilen parametre yardımıyla gürültü sorununun nisbeten ortadan kalacağı düşünülebilir.

Bu bakımdan yukarıda üzerinde durulan konuların bir doktora tezi adı altında araştırılabileceği görüşü ile bu tez çalışması yapılmıştır.

5. KURAMSAL GELİŞME

Akımla özdirencin değişimi, frekansla özdirencin değişimine benzediği için, olayın kuramsal gelişimi arayüzey olayı ve geometrik etki olarak iki şekilde verilme-ye çalışılacaktır.

5.1. ARAYÜZEY KUTUPLAŞTIRMASINA SAHİP ORTAMLARDA ÖZDİRENCİN ELEKTRİK AKIMI İLE DEĞİŞİMİ

Bilindiği gibi, kutuplaştırma içermeyen ortamlarda, Ohm yasası doğrusal olup I akımı ve V gerilimi arasındaki ilişki,

$$V=RI \quad (5.1.1)$$

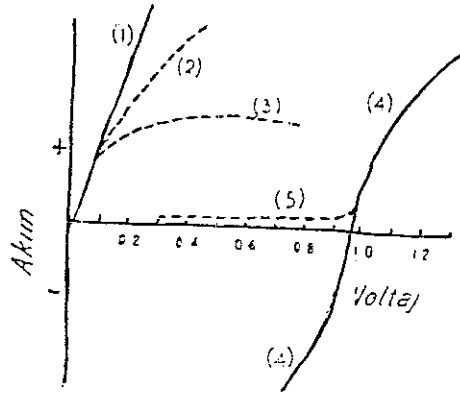
bağıntısı ile verilmektedir. Ancak, Berkem (1978), kutuplaştırma ortamlarında Ohm yasasının doğrusal olmadığı belirterek akım ile gerilim arasındaki ilişkiyi,

$$V=RI+E \quad (5.1.2)$$

bağıntısıyla vermiştir. Burada RI, ohmik düşme ve E, karşı elektromotor kuvvet olup farklı elektrolit ve elektrod durumları için elde edilebilecek doğrusal olmayan, akım-gerilim ilişkisi şekil 5.1 de verilmiştir.

Bir arayüzeyde akım-gerilim ilişkisinin doğrusal olmaması, özdirenc-akım ilişkisinin de doğrusal olmadığı yani özdirencin akımla değiştiği anlamına gelmektedir. (3.2.1) bağıntısı, iletkenliğin özdirencin tersi olması nedeniyle, izleyen şekilde yazılabilir,

$$\sigma = J/E \quad (5.1.3)$$



Şekil 5.1 Akım-Gerilm ilişkisi (Berkem, 1978).

Burada σ , iletkenliktir. Bir arayüzey için bu bağıntı geçerlidir. Bu durumda J arayüzey akım yoğunluğu, Berkem (1978) de olduğu gibi verilebilir,

$$J = \sum n_i e_i v_i \quad (5.1.4)$$

Burada n_i , birim hacimdeki iyon sayısı; e_i , iyonların yükleri ve v_i , iyonların hızlarıdır.

Bir katı, sıvı veya çözelti halindeki elektrolitin iletkenliğinin birim hacimdeki ekivalengram olarak ifade edilen konsantrasyon oranına ekivalen iletkenlik denir ve Λ ile gösterilir. Eğer V hacminde (cm^3) bir ekivalengram elektrolit bulunur ise konsantrasyon, $c=1/V$ dir (Berkem, 1965). O halde,

$$\Lambda = \sigma/c = \sigma V_{(\text{cm}^3)} \quad (\Omega^{-1} \text{ cm}^2) \quad (5.1.5)$$

dir. Eğer c , litrede ekivalengram cinsinden ifade edilmiş ise,

$$\Lambda = 1000 \cdot \sigma \cdot V_{(\text{lt})} = 1000 \cdot \sigma \cdot 1/c \quad (5.1.6)$$

yazılabilir. Ekvivalen iletkenliğin birimi ($\Omega^{-1}\text{cm}^2$) veya ($\text{mho}\cdot\text{cm}^2$) dir. (5.1.3), (5.1.4) ve (5.1.6) bağıntılarından,

$$\Lambda = 10^{-8} \sum n_1 e_1 u_1 / c = A \sum \alpha_1 u_1 = \sigma / c$$

ve buradan,

$$\sigma = 10^{-8} \sum n_1 e_1 u_1$$

elde edilir. Burada u_1 , iyonların hareketliliği (Mobility) olup $u_1 = v_1 / E$ dir.

Bu son bağıntıdan görüleceği gibi, u_1 iyon hareketliliği tanımından da bilindiği gibi, J akım yoğunluğu arttığı zaman arayüzeyde iyon hareketliliği artacağı için arayüzey iletkenliği de artmaktadır. Bir başka deyişle, J arayüzey akım yoğunluğu arttıkça u_1 iyon hareketliliği artacağı için arayüzey özdirenci akım yoğunluğu arttıkça azalacaktır. Buradan, kayaçlardaki elektrod veya zar kutuplaştırması ortamlarına uygulanan akım miktarı arttıkça elektrod veya zar kutuplaştırması ortamlarındaki birim alanda akım yoğunluğu artacağı için bu ortamlardaki iyon hareketliliği artacak ve kayaç ortamının özdirencinin de uygulanan akım artışı ile azalacağı sonucuna varılabilir.

Ayrıca, Sumner (1976), aşırıgerilim olayını açıklarken aşırıgerilimin akım yoğunluğu ile ilişkisi üzerinde de durmuştur. Bilindiği gibi, aşırıgerilim, arayüzeyde yığılan iyonların gerektirdiği ek gerilim olarak tanımlanabilir. Aşırıgerilim, mineral-elektrolit arayüzeyinde çok büyüktür ve burada kimyasal aktivite çok yüksek olup iletim, çözelti içindeki iyonikten katıda elektroniğe geçmektedir. Düşük akımlarda aşırıgerilim, akım yoğunluğuyla doğru orantılı olarak değişmektedir ve orantı sabiti, kutuplaştırma direnci olarak bilinir ve bu, akımın doğrultusu, ısı, çözelti ve metalin türüne göre değişmektedir. Aşırıgerilim, arayüzey potansiyeli $26/n$ mV. üzerindeki termal enerji seviyelerini geçtiği zaman doğrusal olmamaktadır ve burada n , molar ekvivalen sayısıdır.

Sumner (1976), akım yoğunluğu ve kutuplaştırma arasındaki doğrusal ilişkiyi,

$$\eta = -4\pi\alpha sJt/K \quad (5.1.8)$$

olarak vermiştir. Burada η , kutuplaştırma; α , mineral yüzeyinin alanı; s , çift tabakadaki yük yayılımı; J , akım yoğunluğu; t , zaman ve K , dielektrik sabittir. Büyük akım yoğunluğu değerleri için ise Tafel bağıntısı izleyen şekilde verilmektedir,

$$\eta = a - b \log_{10} J \quad (5.1.9)$$

Burada a ve b , deneysel olarak saptanabilen sabitlerdir. Bu bağıntıya göre, $\log_{10} J$ ile η doğrusal ilişkilidir ama η ve J , doğrusal olmayan ilişkidir.

Bu sonuçlar, kayaçların öz dirençlerinin, uygulanan akım miktarının artması ile azalması olayını açıklamaktadır.

Bölüm 3.3.2.2 de Geometrik olarak IP olayının açıklanması gibi, akım yoğunluğunun da geometrik etkiye bağımlılığı açıklanmalıdır.

5.2. GEOMETRİK OLARAK ÖZDİRENÇ - AKIM İLİŞKİSİ

(3.2.8) bağıntısı seriye açıldığı zaman,

$$\theta_1 = \sum_{n=1}^{\infty} k_1^n e^{-2n\lambda h_1} \quad (5.2.1)$$

bağıntısı elde edilir. (5.2.1) bağıntısı (3.2.7) bağıntısında yerine konularak,

$$V_1 = \left(\rho_{11} I / 2\pi \right) \left(\int_0^{\infty} e^{-\lambda z} J_0(\lambda r) d\lambda + \sum_{n=1}^{\infty} k_1^n \int_0^{\infty} e^{-2n\lambda h_1} (e^{-\lambda z} + e^{\lambda z}) J_0(\lambda r) d\lambda \right)$$

elde edilir. (3.2.4) bağıntısı ile verilen Weber-Lipschitz bağıntısının uygulanması ile,

$$V_1 = (\rho_1 I / 2\pi) \left((1/(r^2+z^2))^{1/2} + \sum_{n=1}^{\infty} k_1^n \left((1/(r^2+(2nh_1+z)^2))^{1/2} + (1/(r^2+(2nh_1-z)^2))^{1/2} \right) \right)$$

ve yeryüzündeki potansiyel ($z = 0$ için),

$$V_1 = (\rho_1 I / 2\pi) \left((1/r) + \sum_{n=1}^{\infty} 2k_1^n (1/(r^2+(2nh_1)^2))^{1/2} \right) \quad (5.2.2)$$

yazılabilir. Buradan elektrik alan ifadesi

$$E = -\partial V / \partial r$$

$$E = (\rho_1 I / 2\pi) \left((1/r^2) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} k_1^n (r/(r^2+(2nh_1)^2))^{3/2} \right)$$

elde edilir. (3.2.1) bağıntısında yerine konularak,

$$J = (I / 2\pi) \left((1/r^2) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} k_1^n (r/(r^2+(2nh_1)^2))^{3/2} \right) \quad (5.2.3)$$

akım yoğunluğu iki katmanlı ortam için elde edilir. Sch-lumberger açılımı için,

$$\rho_{ae} = 2\pi r^2 \cdot E / I \quad (5.2.4)$$

olduğu bilinmektedir. Buradan,

$$\rho_{ae} = \rho_1 \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} k_1^n (r^3/(r^2+(2nh_1)^2))^{3/2} \right)$$

elde edilir. (5.2.3) ve (5.2.4) bağıntılarına gözönüne alınarak,

$$\rho_{ae} / \rho_1 = 2\pi r^2 \cdot J / I$$

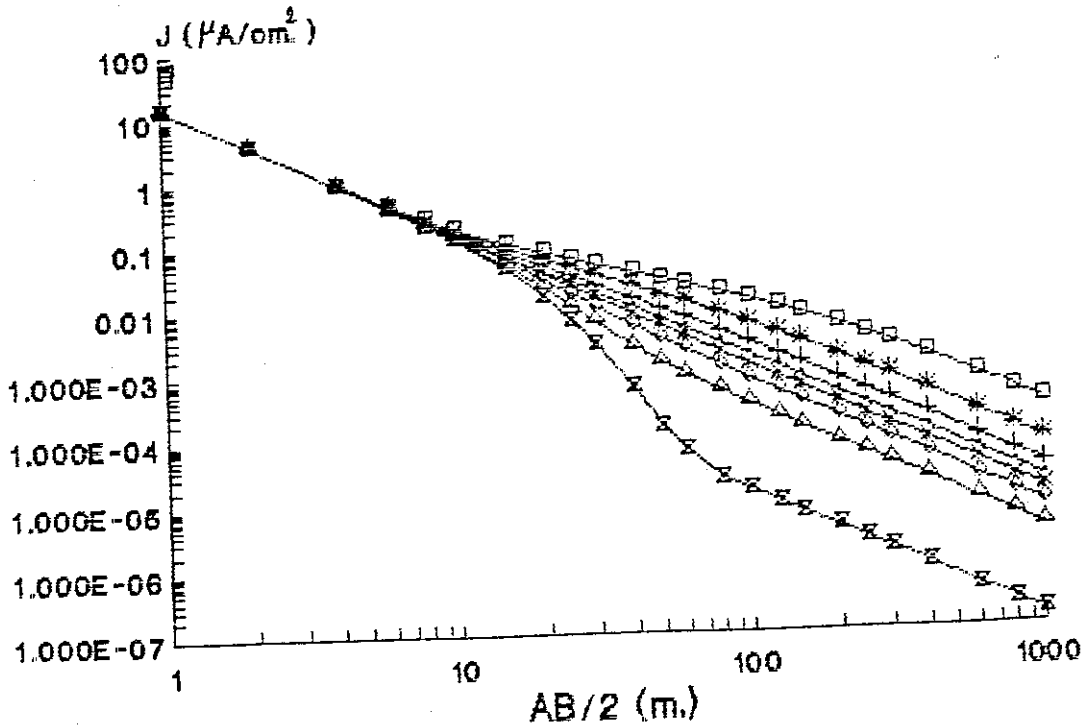
ve

$$J = (\rho_{ae} / \rho_1) \cdot I / 2\pi r^2 \quad (5.2.5)$$

olarak akım yoğunluğu elde edilir. $n = 20$ için (5.2.3) ve (5.2.5) bağıntılarından elde edilen sonuçların yaklaşık olarak aynı olduğu izlenmiştir.

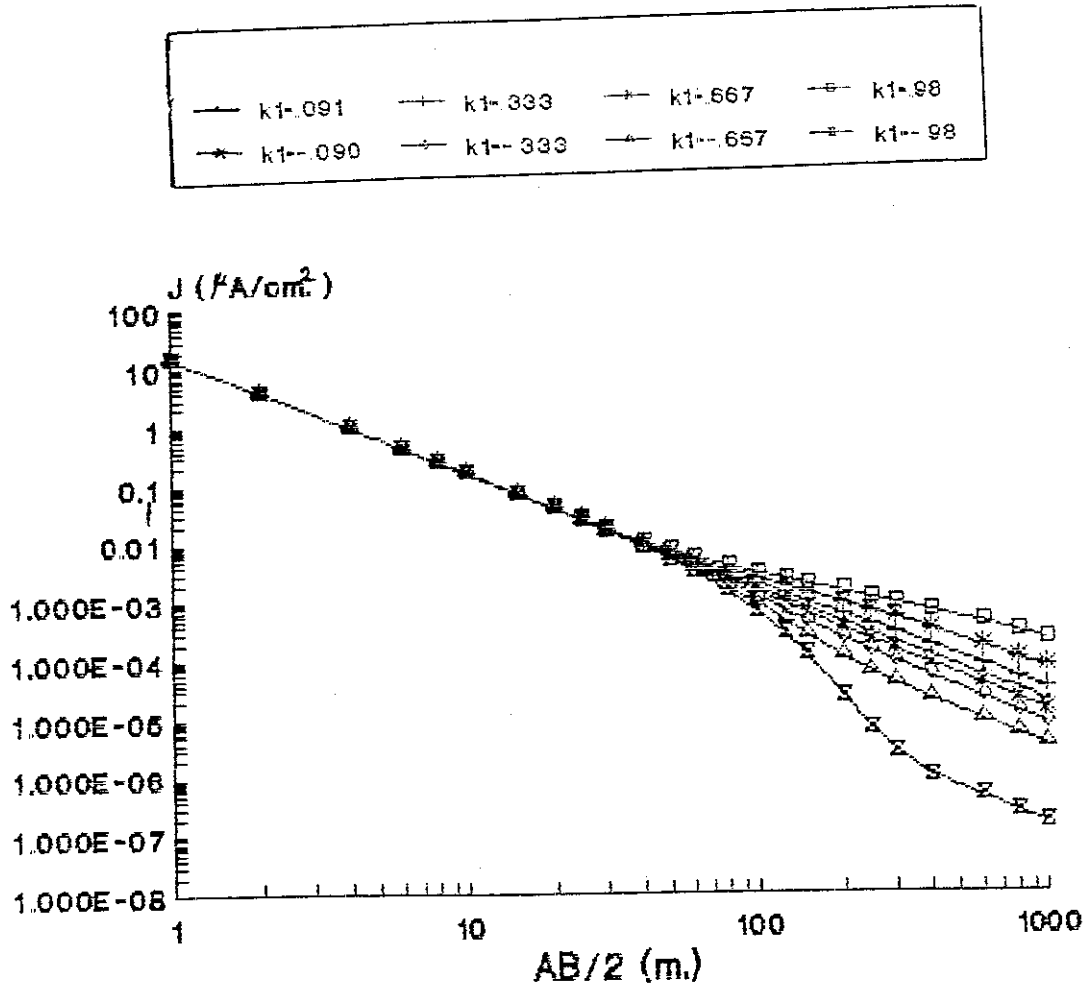
ρ_{ae}/ρ_1 değerleri, Başokur (1990) da ayrıntısı verilen ve bölüm 3.2.3 de anlatılan yorum tekniklerini içeren "IPES Version - 2" (Interpretation Package for Electrical Sounding Data) paket programından elde edilmiştir. Bunun nedeni, programdan elde edilen verilerin kuramsal eğrilere en az yanılğı ile en iyi yaklaşımı sağlamasıdır.

(5.2.3) ve (5.2.5) bağıntılarından da anlaşılacağı gibi, akım yoğunluğu ortamın öz direncine de bağlıdır. Bu nedenle öz dirence bağlı değişimin akım yoğunluğunda da izlenmesi beklenir. İki katmanlı ortamlar için azalan ve artan eğri gruplarında akım yoğunlukları elde edilmiş ve değişen katman kalınlıkları için şekil 5.2 - şekil 5.4 de gösterilmiştir.

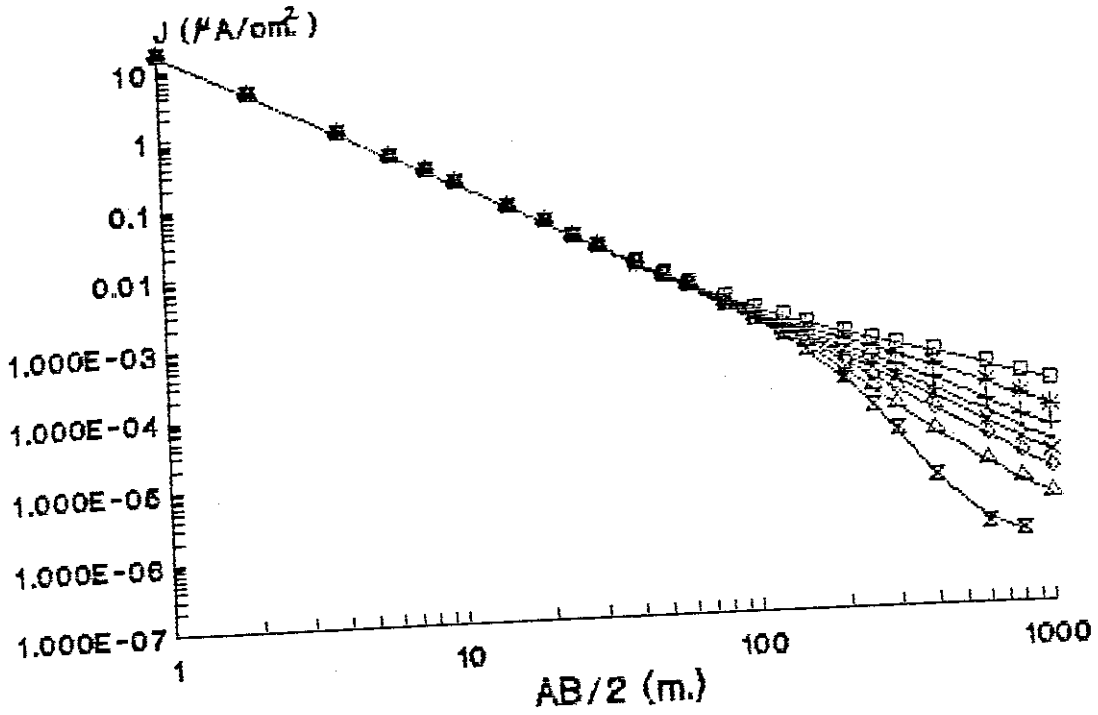


Şekil 5.2 İki katmanlı ortam için $h_1 = 10$ m. ve değişen yansımaya katsayıları için akım yoğunluğunun değişimi.

Burada iki katmanlı ortam için yansımaya katsayıları $k_1 = .09$, $k_1 = .333$, $k_1 = .667$, $k_1 = .98$ ve $k_1 = -.09$, $k_1 = -.333$, $k_1 = -.667$, $k_1 = -.98$ ve kalınlıklar; $h_1 = 10$ m, $h_1 = 50$ m. ve $h_1 = 100$ m. alınmıştır. Akım (I) 1000 A olarak alınmış ve akım yoğunluğu (J) A/cm² olarak elde edilmiştir. Her üç şekil için gösterimler izleyen şekillerde verilmiştir.



Şekil 5.3 İki katmanlı bir ortam için $h_1 = 50$ m. ve değişen yansımaya katsayıları için akım yoğunluğunun değişimi.



Şekil 5.4 İki katmanlı bir ortam için $h_1=100$ m. ve değişen yansımaya katsayıları için akım yoğunluğunun değişimi.

Şekillerden izlendiği gibi, katman sınırına kadar doğrusal giden eğriler, katman sınırından itibaren ki yansımaya katsayısına bağlı olarak daha hızlı veya daha yavaş olarak azalmaktadır. Aynı elektrod açılımı için, ikinci katmanın öz direncinin yüksek olması durumunda (pozitif yansımaya katsayıları) J akım yoğunluğu değerleri daha yavaş azalmaktadır. İkinci katmanın öz direncinin düşük olması durumunda (negatif yansımaya katsayıları) ise J akım yoğunluğu değerleri daha hızlı azalmaktadır. Bu sonuç beklenen sonuçtur. Zira doğada akım kolay geçebileceği yolu tercih eder. Göreceli olarak, civarına göre daha düşük öz dirence sahip ortam akımın geçmesi için elverişli yoldur. Aynı elektrod açılımı değeri için, $\rho_2 > \rho_1$ olması durumunda akım ρ_1 öz dirençli ortamdaki için akım

yoğunluğu değeri, $\rho_1 > \rho_2$ durumunun aynı elektrod açılımına göre daha yüksek olacaktır. Çünkü $\rho_1 > \rho_2$ durumunda akım, ρ_1 öz dirençli ortamdan çok, ρ_2 öz dirençli ortamdan geçecektir.

İki katmanlı ortamlar için elde edilen bu sonuçların üç katmanlı ortamlarda geçerli olup-olmadığı da bilinmelidir.

(5.2.5) bağıntısı üç katmanlı ortamlara da uygulanabilmektedir. Fakat öncelikle, (3.2.11) bağıntısı ile verilen üç katmanlı ortama ait çekirdek fonksiyonunun çözümüne gidilmiştir.

Van Dam (1965), Stefanescu çekirdek fonksiyonunu

$$E_n(u) = P_n(u)/Q_n(u) = P_n(u)/(H_n(u)-P_n(u))$$

şeklinde tanımlamış olup, $u = e^{-2\lambda}$ dır. Üç katmanlı ortam için,

$$P_3(u) = k_1 u^{h_1} + k_2 u^{h_2}$$

$$H_3(u) = 1 + k_1 k_2 u^{(h_2 - h_1)}$$

elde etmiştir. $P_3(u)$ ve $H_3(u)$ yerine konulduğu zaman (3.2.11) bağıntısının elde edildiği görülür. Bu bağıntının seriyeye açılmasıyla,

$$V = (\rho_1 I / 2\pi) \left((1/r) + 2 \int_0^\infty P_n(u) J_0(\lambda r) d\lambda \right.$$

$$+ 2 \int_0^\infty P_n(u) (1 - Q_n(u)) J_0(\lambda r) d\lambda$$

$$+ 2 \int_0^\infty P_n(u) (1 - Q_n(u))^2 J_0(\lambda r) d\lambda$$

.....

$$+ 2 \int_0^\infty P_n(u) (1 - Q_n(u))^{p-1} J_0(\lambda r) d\lambda \quad (5.2.6)$$

şeklinde p.nci dereceden yaklaşım elde edilir. Bu, üç katmanlı bir ortam için, 2. dereceden bir yaklaşımla,

$$2 \int_0^{\infty} P_3(u) (1 - Q_3(u))^{2-1} J_0(\lambda r) d\lambda$$

Burada,

$$P_3(u) = k_1 e^{-2\lambda h_1} + k_2 e^{-2\lambda h_2}$$

$$Q_3(u) = 1 - k_1 e^{-2\lambda h_1} - k_2 e^{-2\lambda h_2} + k_1 k_2 e^{-2\lambda(h_2 - h_1)}$$

olup V'e göre düzenlenirse,

$$\begin{aligned} V = & (\rho_1 I / 2\pi) \left((1/r) + 2 \left((k_1 / (r^2 + 4h_1^2))^{1/2} \right) \right. \\ & + \left((k_2 / (r^2 + 4h_2^2))^{1/2} \right) + \left((k_1^2 / (r^2 + 16h_1^2))^{1/2} \right) \\ & + \left((2k_1 k_2 / (r^2 + 4(h_1 + h_2)^2))^{1/2} \right) - \left((k_1^2 k_2 / (r^2 + 4h_2^2))^{1/2} \right) \\ & \left. + \left((k_2^2 / (r^2 + 16h_2^2))^{1/2} \right) - \left((k_1 k_2^2 / (r^2 + 4(2h_2 - h_1)^2))^{1/2} \right) \right) \end{aligned}$$

ve

$$\begin{aligned} E = & (\rho_1 / 2\pi) \left((1/r^2) + 2r \left((k_1^2 / (r^2 + 16h_1^2))^{3/2} \right) + \left((2k_1 k_2 \right. \right. \\ & \left. \left. / (r^2 + 4(h_1 + h_2)^2))^{3/2} \right) - \left((k_1^2 k_2 / (r^2 + 4h_2^2))^{3/2} \right) \right. \\ & + \left((k_2^2 / (r^2 + 16h_2^2))^{3/2} \right) \\ & \left. - \left((k_1 k_2^2 / (r^2 + 4(2h_2 - h_1)^2))^{3/2} \right) \right. \\ & \left. + \left((k_1 / (r^2 + 4h_1^2))^{3/2} \right) + \left((k_2 / (r^2 + 4h_2^2))^{3/2} \right) \right) \end{aligned}$$

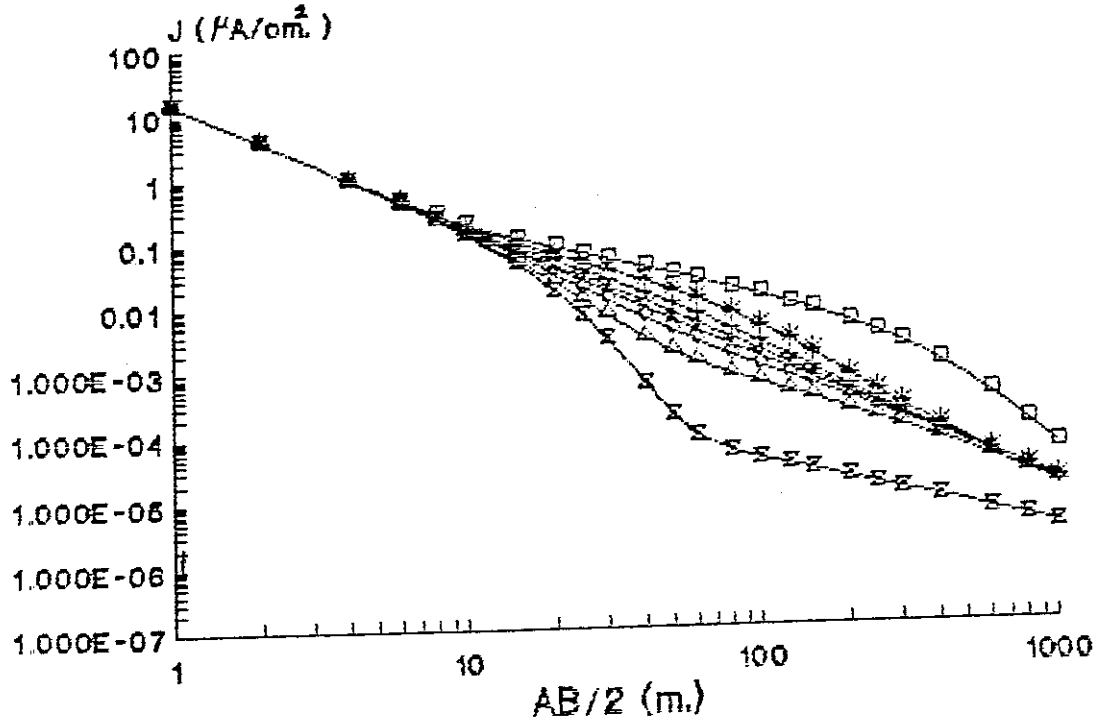
$$\begin{aligned} P_{ae} = & P_1(1+2r^3((k_1/(r^2+4h_1^2)^{3/2})+(k_2/(r^2+4h_2^2)^{3/2}) \\ & +(k_1^2/(r^2+16h_1^2)^{3/2})+(2k_1k_2/(r^2+4(h_1+h_2)^2)^{3/2}) \\ & -(k_1^2k_2/(r^2+4h_2^2)^{3/2})+(k_2^2/(r^2+16h_2^2)^{3/2}) \\ & -(k_1k_2^2/(r^2+4(2h_2-h_1)^2)^{3/2}))) \end{aligned} \quad (5.2.7)$$

elde edilir. Buradan (5.2.5) bağıntısı yardımıyla elde edilen akım yoğunluğu dağılımı ile Başokur (1990)'dan elde edilen akım yoğunluğu dağılımları farklı çıkmıştır. Bunun nedeni, Başokur (1990) da arazi verisi ve katman parametreleri yardımıyla dönüşük öz direnç ortamına geçilip $T(\lambda)$ hesaplanmakta ve daha sonra tekrar öz direnç ortamına dönüşmektedir. Bu sırada süzgeçleme işlemleri yapıldığı için arazi verisine en uygun parametreler elde edilmektedir. Bu nedenle de, iki hesaplama sonucu elde edilen akım yoğunlukları birbirini tutmamaktadır.

P_a/P_1 oranına göre elde edilen J akım yoğunluğu üç katmanlı ortam için çizilmiştir. Burada her bir eğri tipi (K,H,A ve Q) için iki katmanlı ortam için kullanılan yansıma katsayıları kullanılmıştır. Çizimlerde K ve H,A ve Q eğrileri, farklı karakterlerle aynı ortama çizilmiştir.

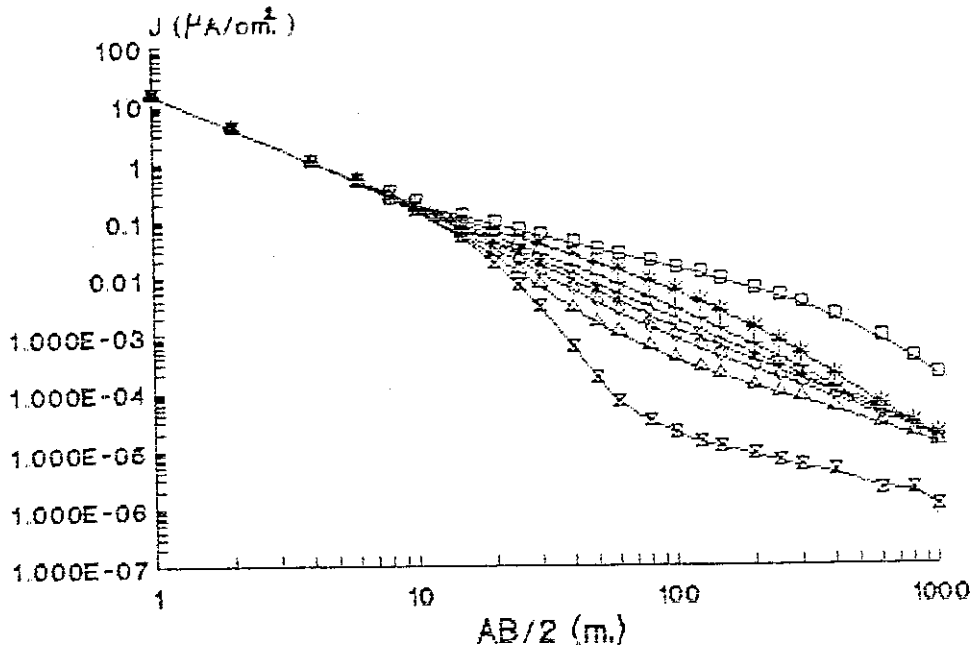
$k_1 = .09 - k_2 = -.09$; $k_1 = .333 - k_2 = -.333$;
 $k_1 = .667 - k_2 = -.667$; $k_1 = .98 - k_2 = -.98$ yansıma katsayıları ve $h_1 = 10$ m., $h_2 = 50$ m. alınarak K türü eğriler ve $k_1 = -.09 - k_2 = .09$; $k_1 = -.333 - k_2 = .333$; $k_1 = -.667 - k_2 = .667$; $k_1 = -.98 - k_2 = .98$ ve $h_1 = 10$ m., $h_2 = 50$ m. alınarak H türü eğriler veren ortamlara ait akım yoğunluğu eğrileri Şekil 5.5 da gösterilmiştir. Bu üç şeklin gösterimleri izleyen şekildedir.

—•—	$k_1 = .09 - k_2 = -.09$	—+—	$k_1 = .333 - k_2 = -.333$
—*—	$k_1 = .667 - k_2 = -.667$	—□—	$k_1 = .98 - k_2 = -.98$
—x—	$k_1 = -.09 - k_2 = .09$	—◇—	$k_1 = -.333 - k_2 = .333$
—△—	$k_1 = -.667 - k_2 = .667$	—▽—	$k_1 = -.98 - k_2 = .98$



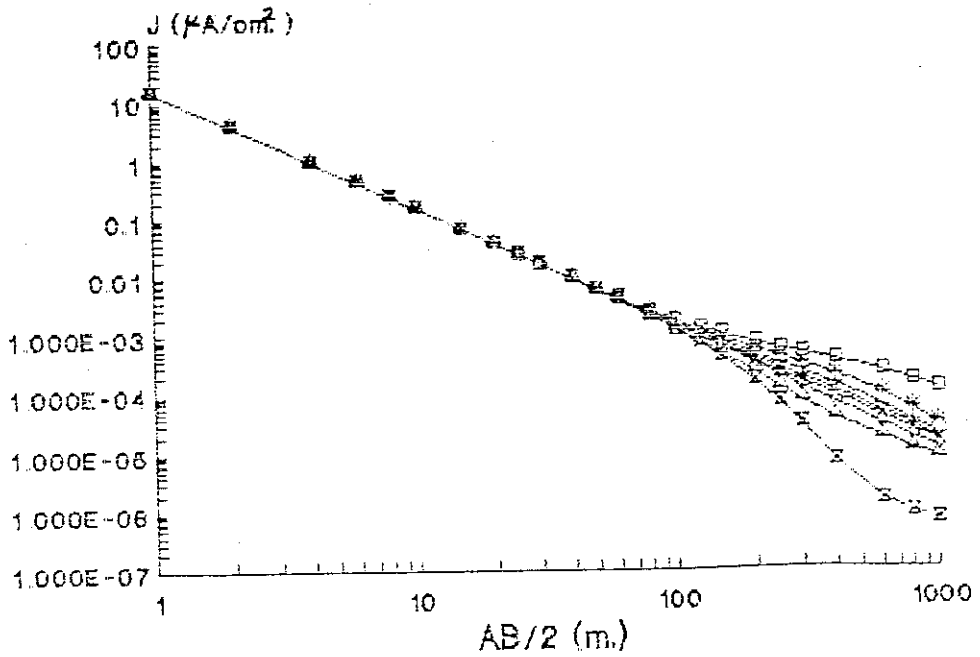
Şekil 5.5 K ve H türü öz direnç eğrisi veren ortamlar için akım yoğunluğu dağılımı.

Yansımaya katsayıları aynı kalmak üzere $h_1 = 10$ m. ve $h_2 = 110$ m. derinlikler için elde edilen eğriler Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.6 K ve H türü öz direnç eğrisi veren ortamlar için akım yoğunluğu dağılımı.

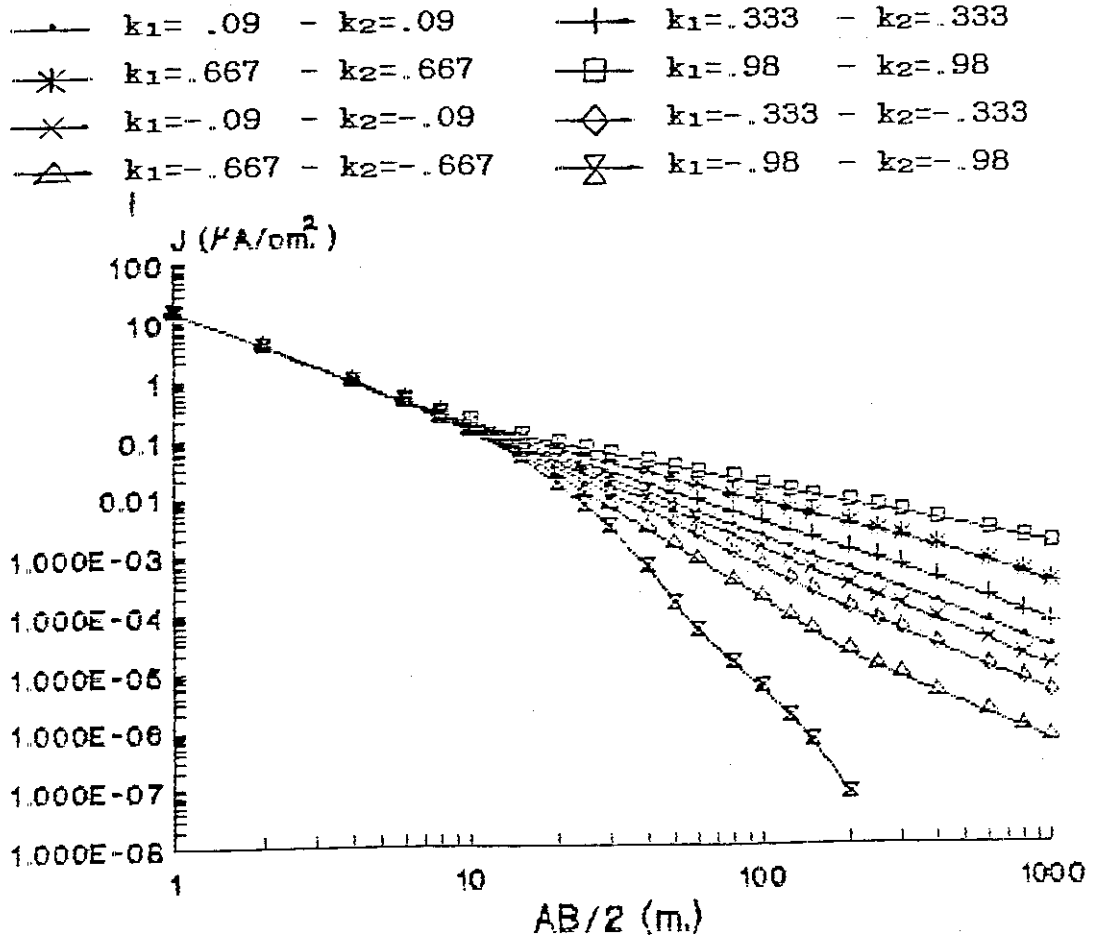
Yansımaya katsayıları aynı kalmak üzere $h_1 = 100$ m. ve $h_2 = 300$ m. alınarak elde edilen akım yoğunluğu eğrileri Şekil 5.7 de gösterilmiştir.



Şekil 5.7 K ve H türü öz direnç eğrisi veren ortamlar için akım yoğunluğu eğrileri.

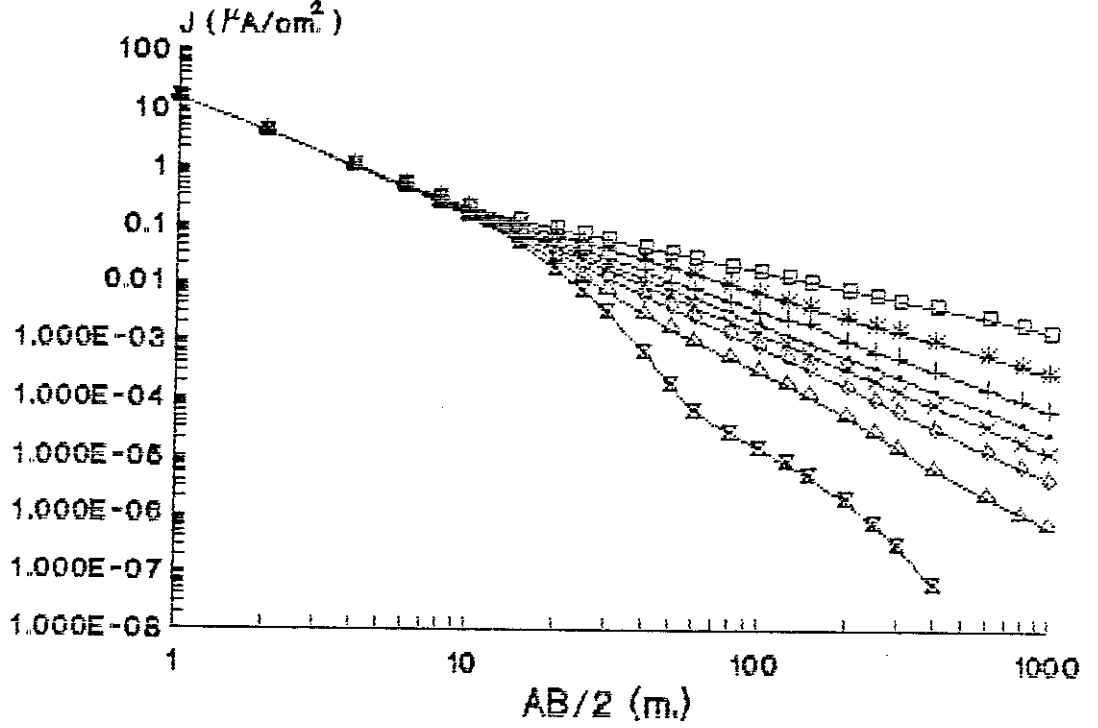
Eğriler incelendiği zaman; ilk katman sınırında açıldıkları ve ikinci katmanın ince olması durumunda $AB/2$ 'nin büyük değerleri için birbirlerine yaklaştıkları izlenir (şekil 5.5 ve şekil 5.6). Hem ilk hem de ikinci katmanın derinde olması durumunda ise elektrod açılımı artırılırsa olayın değişmediği izlenir (şekil 5.7).

$k_1 = .09 - k_2 = .09$; $k_1 = .333 - k_2 = .333$; $k_1 = .667 - k_2 = .667$; $k_1 = .98 - k_2 = .98$ yansıma katsayıları ve $h_1 = 10$ m., $h_2 = 50$ m. alınarak A türü ve $k_1 = -.09 - k_2 = -.09$; $k_1 = -.333 - k_2 = -.333$; $k_1 = -.667 - k_2 = -.667$; $k_1 = -.98 - k_2 = -.98$ yansıma katsayıları ve $h_1 = 10$ m., $h_2 = 50$ m. alınarak Q türü öz direnç eğrisi veren ortamlara ait akım yoğunluğu eğrileri şekil 5.8 de gösterilmiştir. Bu üç şekil için gösterimler izleyen şekilde verilmiştir.



Şekil 5.8 A ve Q türü öz direnç eğrisi veren ortamlarda akım yoğunluğu dağılımı.

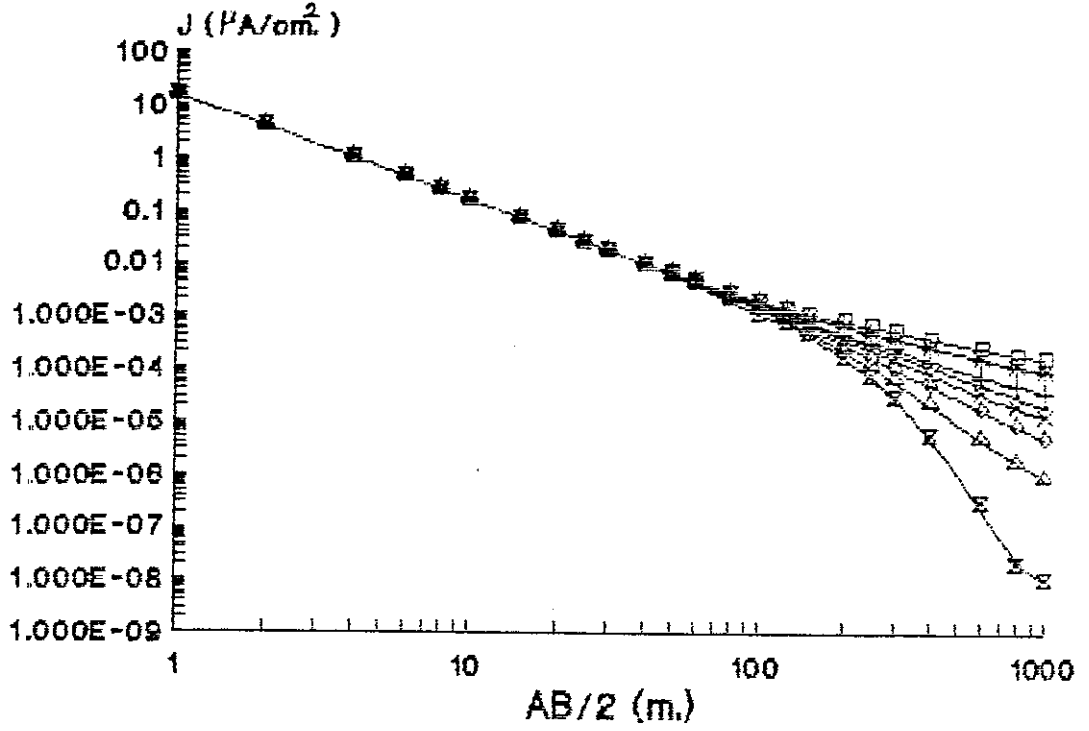
Yansımaya katsayıları aynı kalmak üzere $h_1 = 10$ m. ve $h_2 = 110$ m. derinlikleri alınarak elde edilen akım yoğunluğu dağılımları şekil 5.9 da gösterilmiştir.



Şekil 5.9 A ve Q türü öz direnç eğrisi veren ortamlarda akım yoğunluğu dağılımı.

Yansımaya katsayıları aynı kalmak üzere $h_1 = 100$ m. ve $h_2 = 300$ m. derinlikler alınarak elde edilen akım yoğunluğu dağılımı şekil 5.10 da gösterilmiştir.

Akım yoğunluğu dağılımı incelendiği zaman, A türü öz direnç eğrisi verebilen ortamlarda yansımaya katsayısı büyüse bile eğrilerin birbirine yakın oldukları izlenir. Q türünde ise eğriler birbirinden uzaklaşmaktadır.



Şekil 5.10 A ve Q türü öz direnç eğrisi veren ortamlarda akım yoğunluğu dağılımı.

İki ve üç katman eğrilerinden izlendiği gibi, yansıma katsayılarına ve kalınlığa göre akım yoğunluğu katman içinde, değişmektedir.

Akım yoğunluğu değişimiyle olayı ortaya koyabilmek amacıyla, bölüm 6 ve bölüm 7'de ayrıntısı ile verilecek olan, laboratuvar ve arazi çalışmaları sırasında, sabit bir elektrod açılımı için akım yoğunluğu ile öz direncin değişimi incelenmiştir. Bölüm 3'de verildiği gibi, IP frekans ortamı çalışmalarında frekans büyüdükçe öz direncin azalmasına benzer olarak, akım yoğunluğu büyüdükçe öz direncin azaldığı gözlenmiştir. Ayrıca bu bölümde de

incelendiği gibi, olay, arayüzey olayı olarak IP(PFE) parametresine büyük benzerlik gösterirken geometrik etkiden de etkilenmektedir. Bu durumda IP (PFE) parametresine benzer bir parametre tanımlamak mümkündür. Akıma bağlı bir değişim olduğu için, akım etkisi anlamında Yüzde Akım Etkisi, Percent Current effect (PCE)" olarak tanımlanmıştır. Buna göre,

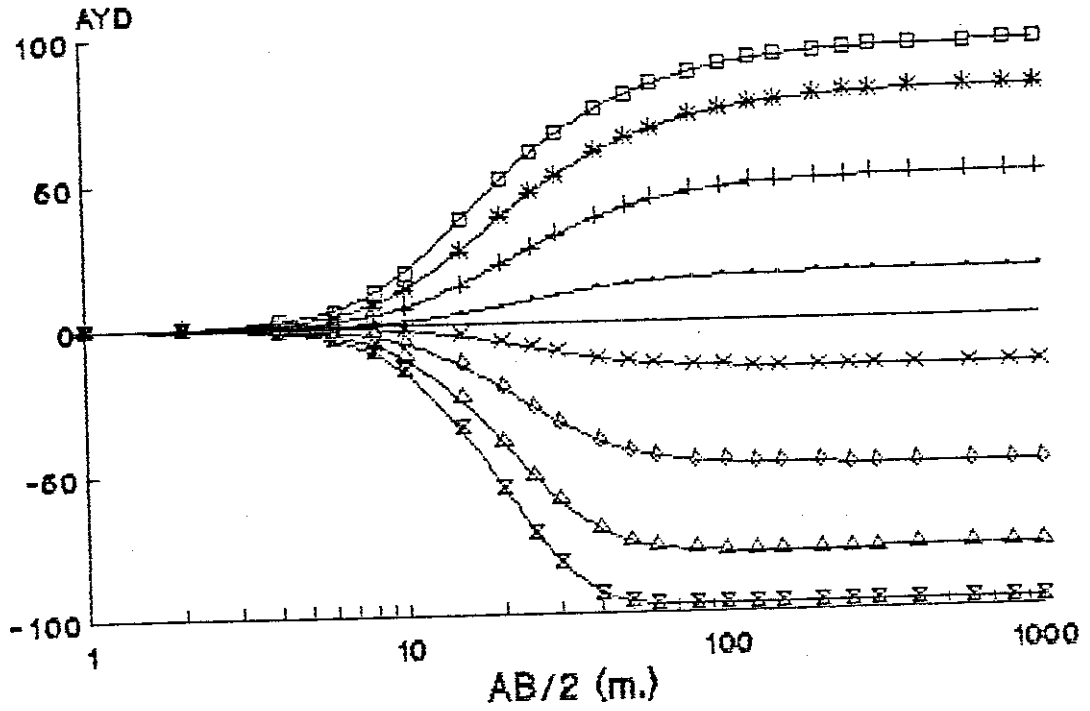
$$PCE = ((\rho_a(I_1) - \rho_a(I_2)) / \rho_a(I_1)) * 100 \quad (5.2.8)$$

dır. Burada $\rho_a(I_1)$, I_1 (Düşük) akım değerinde elde edilen görünür özdirenç ve $\rho_a(I_2)$ ise I_2 (Yüksek) akım değerinde elde edilen görünür özdirençtir. Bölüm 7 de, ayrıntısı ile yerinde uygulamaları verilen parametre bu şekilde tanımlanırken akım yoğunluğunun katmanlı ortamda değişimini izleyebilmek amacıyla da, benzer olarak, izleyen bağıntı tanımlanabilir,

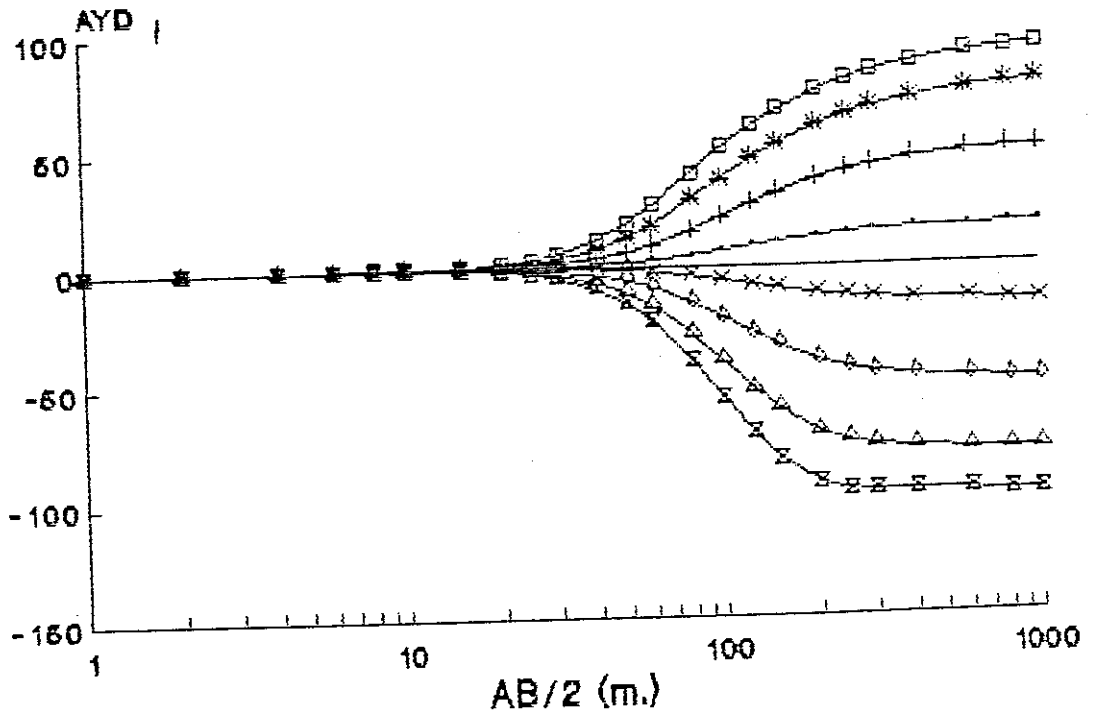
$$AYD = ((J_{k1} - J_{k1}^h) / J_{k1}) * 100 \quad (5.2.9)$$

Akım Yoğunluğu Değişimi (AYD) parametresinde J_{k1} , k_1 yansıma katsayısına sahip ortamın akım yoğunluğu değeri ve J_{k1}^h ise homojen ortama ait akım yoğunluğu değeridir. Böylece frekans etkisi parametresine benzer olarak akım yoğunluğunun ortama göre farklılığını izlemek de olanaklı olmaktadır. AYD değişimini görmek için şekil 5.4 ve şekil 5.5 - şekil 5.10 daki eğriler dikkate alınmıştır.

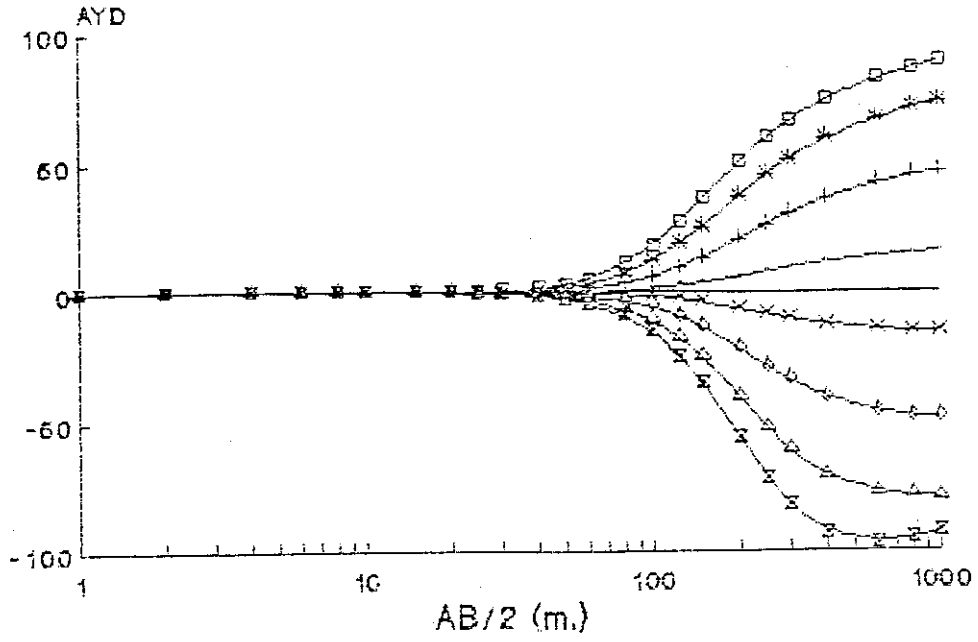
Şekil 5.11 - Şekil 5.13, iki katman için verilen parametre değerleri için çizilen AYD parametresini göstermektedir. Yansıma katsayısını gösteren simgeler iki katman akım yoğunluğunu gösteren simgelerle aynıdır. Negatif değerler de elde edildiği için, AYD değerleri lineer ölçekte çizilmiştir. Sıfır değeri homojen ortama ait olmak üzere, eğrilerin kalınlığa bağlı olarak, yansıma katsayısı negatif veya pozitif yönde büyüdükçe, birbirlerinden uzaklaştıkları izlenir.



Şekil 5.11 $h_1 = 10$ m. için AYD eğrisi.

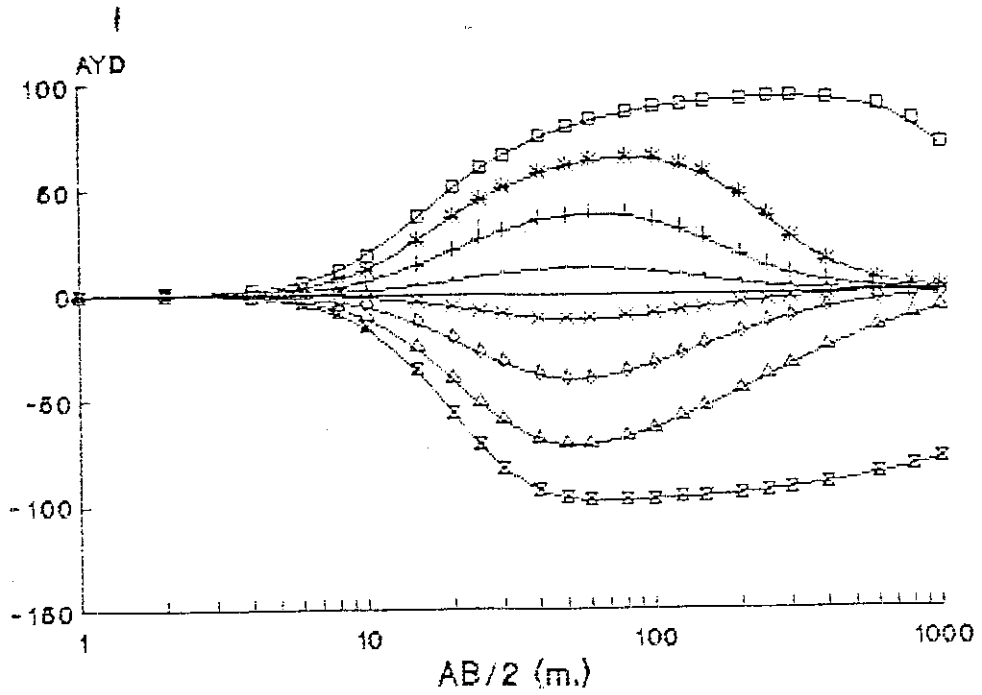


Şekil 5.12 $h_1 = 50$ m. için AYD eğrisi.

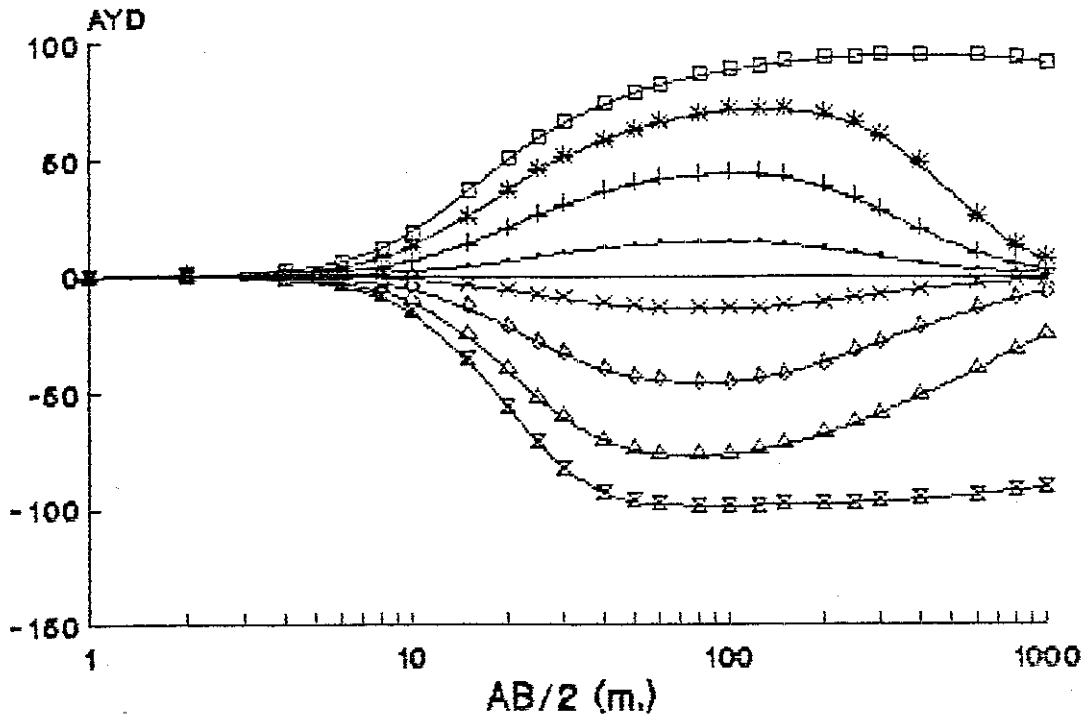


Şekil 5.13 $h_1 = 100$ m. için AYD eğrisi.

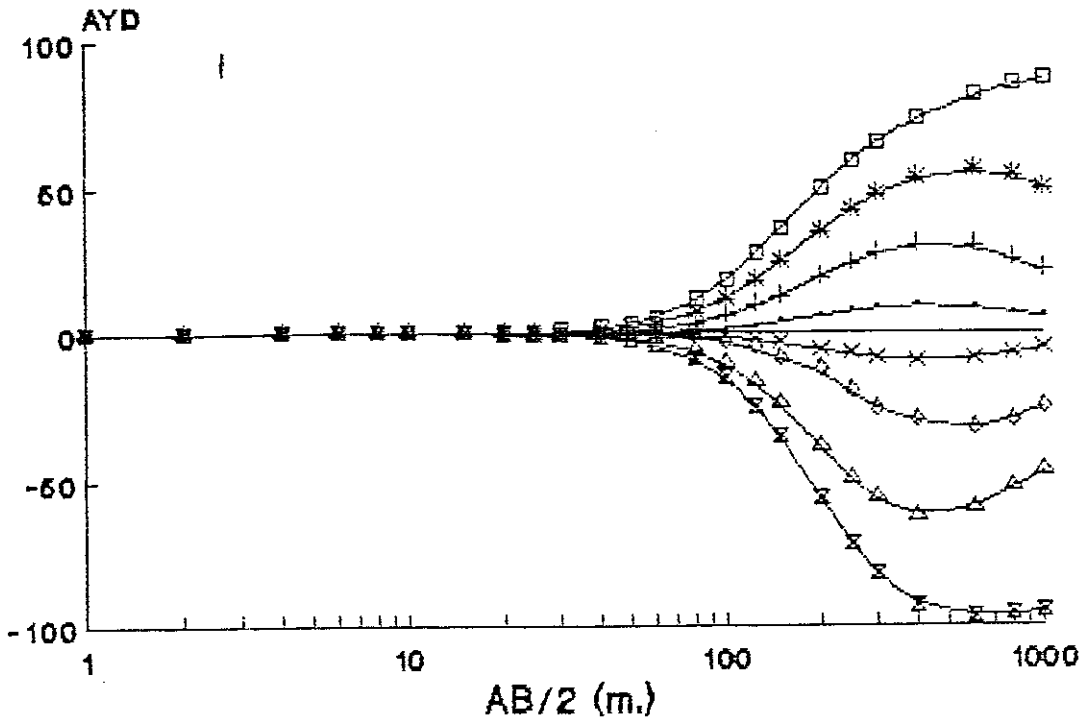
Üç katmanlı ortamlar için elde edilen eğriler Şekil 5.14 - Şekil 5.19 da verilmiştir. K, H ve A, Q türü öz direnç eğrileri için kullanılan semboller, burada da aynı ortamlar için kullanılmıştır.



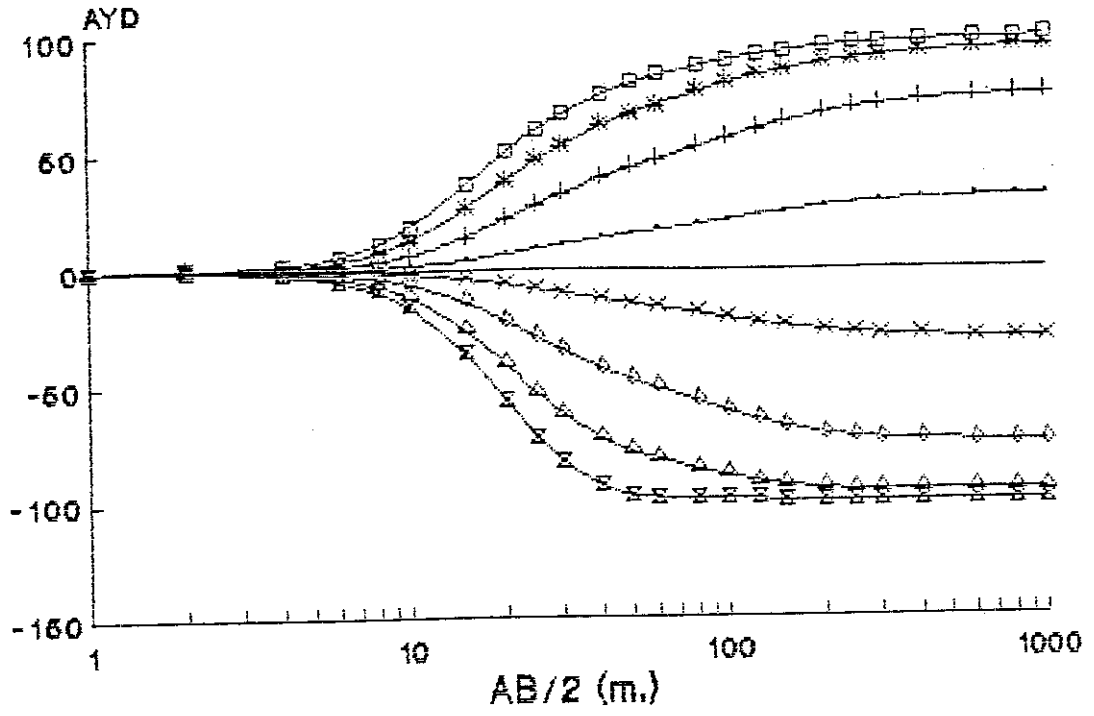
Şekil 5.14 K ve H türü öz direnç eğrisi veren ortamların AYD yanıtı.



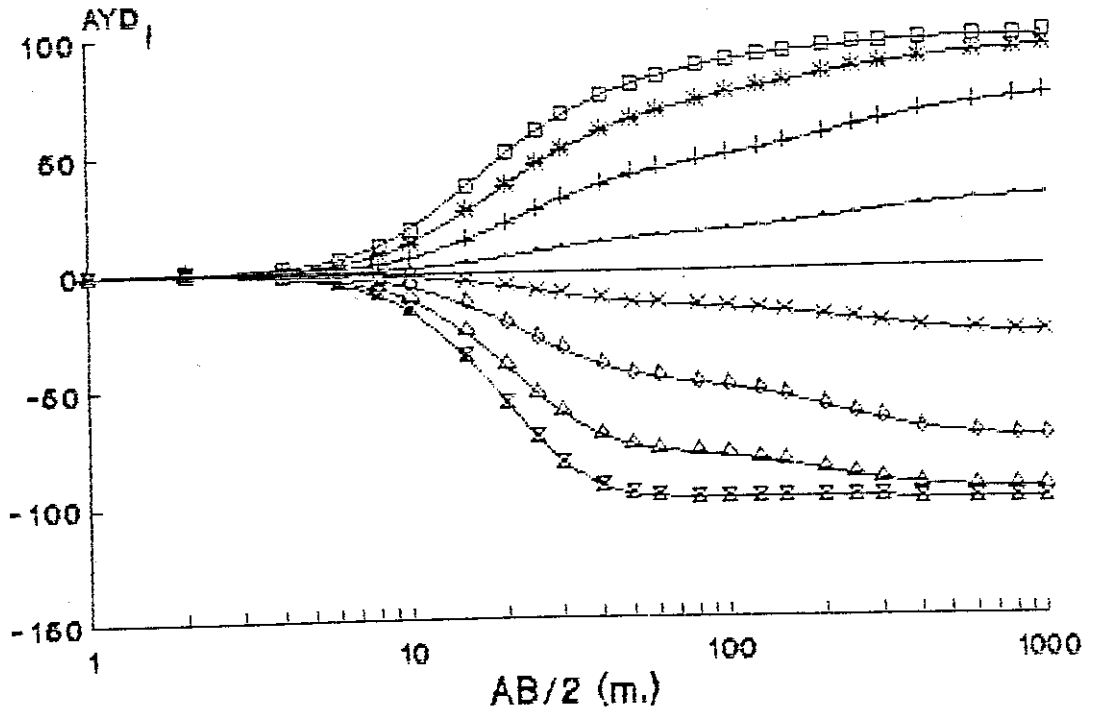
Şekil 5.15 K ve H türü öz direnç eğrisi veren ortamların AYD yanıtı.



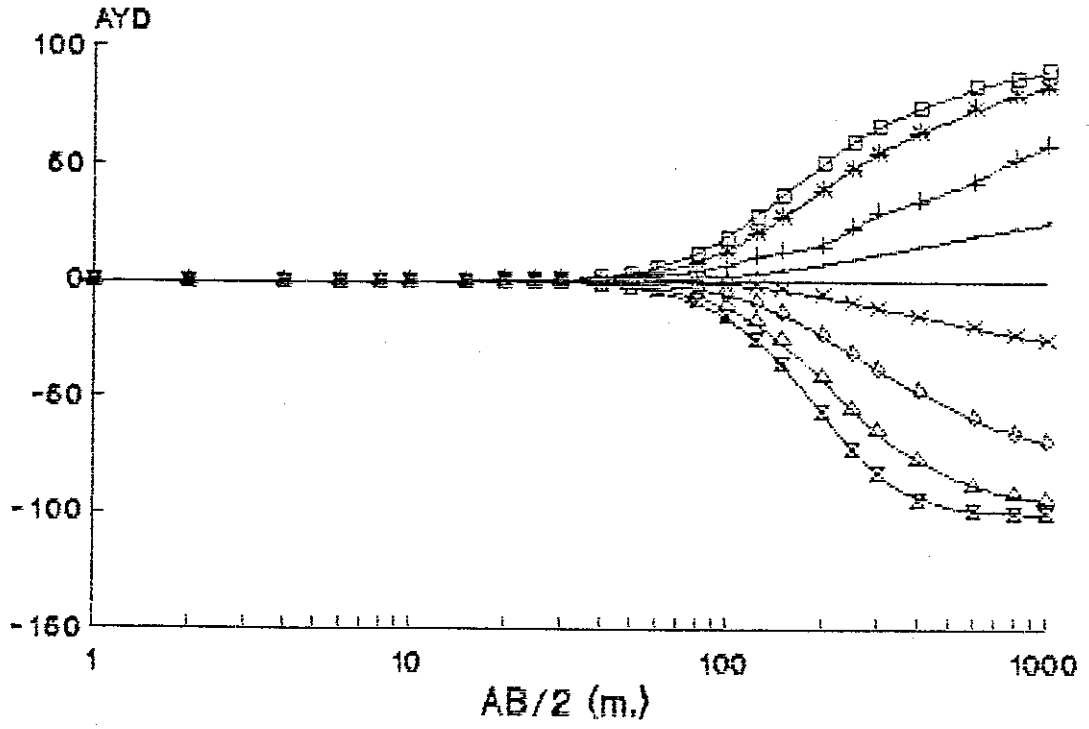
Şekil 5.16 K ve H türü öz direnç eğrisi veren ortamların AYD yanıtı.



Şekil 5.17 A ve Q türü özdirenc eğrisi veren ortamların AYD yanıtı.



Şekil 5.18 A ve Q türü özdirenc eğrisi veren ortamların AYD yanıtı.



Şekil 5.19 A ve Q türü öz direnç eğrisi veren ortamların AYD yanıtı.

AYD yanıtlarının, ait oldukları ortamın akım yoğunluğu dağılımı ile uyumlu olduğu izlenir.

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Laboratuvar çalışmalarında öncelikle Vacquier ve diğ. (1957) ve Roussel (1967) tarafından da yapıldığı gibi (Bertin, 1976), yerinde koşullara uygun olarak, prototip model hazırlanarak ölçüm alınmıştır. Bunun nedeni, yerinde izlenen ve bir parametre ile tanımlanmaya çalışılan doğrusal olmayan davranışı, laboratuvar koşullarında da izlemek ve parametre ile olan uyumunu araştırmaktır. Aşağıda ayrıntısı verilecek olan laboratuvar vericisinin max. 10 mA. çıkarması ve çıkış geriliminin de + 10 mV. olması model tankı küçük boyutlu olmaya zorlamıştır. Vericinin bu özelliklerinden dolayı, çıkış gerilimini küçük tutmak için elektrodların batırıldığı yerlerin ıslatılması gerekmektedir. Diğer taraftan, hem yanal hem de düşey süreksizlikler içeren ortamlar, model tank içerisinde oluşturulurken kutuplaştırma elde etmek için ıslatılmışlardır. Tüm bunlar sonucunda yüzey ıslaklığı dolayısıyla akımın derinliğe nüfus etmesi sağlanamamıştır. Bu nedenle gerek DES. gerekse yatay kayma çalışmalarından literatüre uygun P_a -IP eğrileri elde edilemediği gibi, doğrusal olmayan IP davranışı da izlenememiştir.

Laboratuvar koşullarında ikinci olarak lineer akım dağılımında, hazırlanan modeller üzerinde, elektrod ve zar kutuplaştırması model çalışmaları yapılmıştır. Amaç, literatürde doğal kayac örneklerinde elde edilen doğrusal olmayan davranışı yapay örnekler üzerinde elde etmektir. Elektrod kutuplaştırmasını temsil etmek üzere paslanmaz çelik, bakır, sac, çinko ve alüminyum levhalar seçilmiştir. Zar kutuplaştırmasını temsil edebilecek ortam olarak da değişik oran ve boyutlarda kil-kum modelleri hazırlanmıştır. Böylece yüksek IP verebilecek ortamlarda doğrusal olmayan davranışı ve elde edilen parametre ile uyumunu izlemek olanaklı olacaktır.

6.1. LABORATUVAR DENEYLERİNDE KULLANILAN ALETLER

Laboratuvar deneylerinde " Zonge Engineering and Research Org." (ABD) firmasının yapımı olan GDP-12 (Geophysical Data Processor) alıcı sistemi ile LDT-10 (Laboratory Transmitter) verici sistemi ve yardımcı aletleri kullanılmıştır. Bunun nedeni, öncelikle, elimizde varolan alet sistemi budur. Ayrıca, doğrusal olmayan davranışı inceleyen bir çok araştırmacı benzer aletler veya bu aletin prototipini kullanmıştır (Anderson, 1981 gibi).

GDP-12 alıcı sistemi:

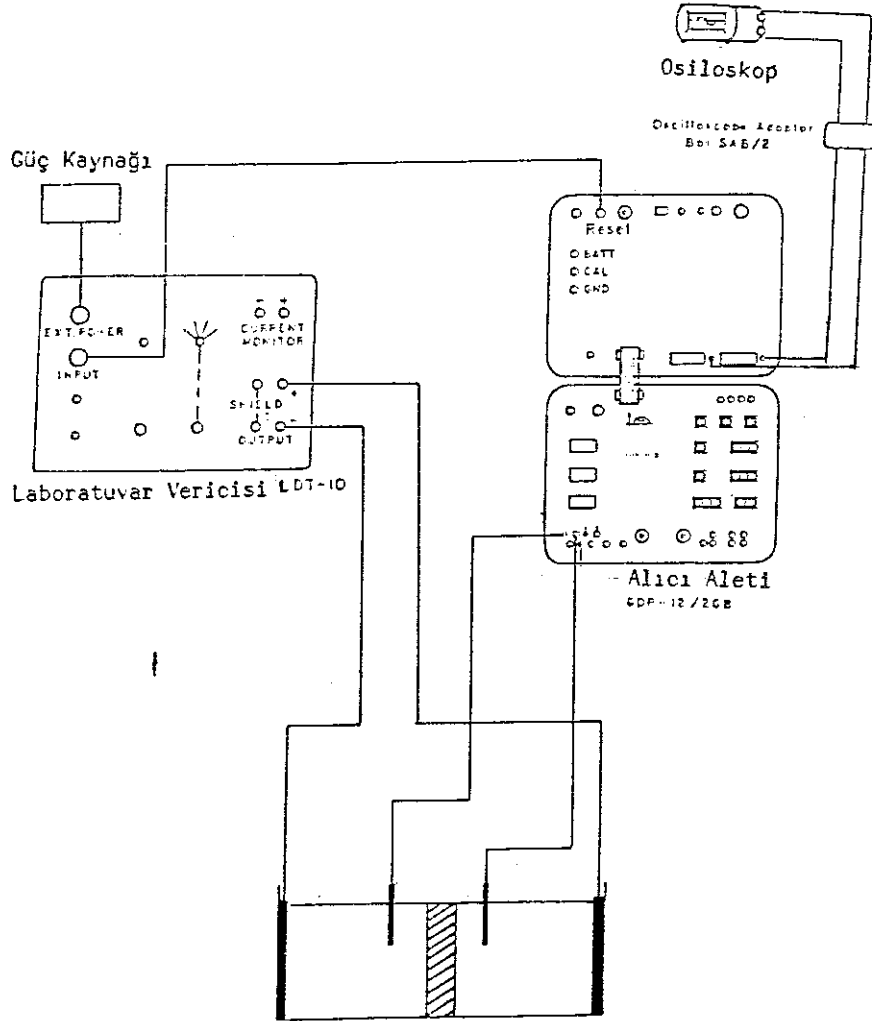
GDP-12 alıcı sistemi (Receiver); Öz direnç-faz, zaman ve frekans ortamı IP, CR (Complex Resistivity), CSAET (Control Source Audio Frequency Electrotelluric) ve CSAMT (Control Source Audio Frequency Magnetotelluric) parametrelerini ölçebilecek şekilde programlanmış olup bir bilgisayar niteliğindedir. Ölçülecek parametreye göre, parametrenin programları ya EPROM'lar aracılığıyla ya da hard disc'ten yüklenmektedir. Bu programlar aynı zamanda DVM (Digital Voltmeter), ayarlama (Calibration) ve kuplaj kaldırma (Decoupling) gibi alt programları da kapsamaktadır ki, tamamen kullanıcının denetimindedirler.

Ölçümlere girebilecek gürültüleri en az'a indirmek amacıyla veya Sinyal/Gürültü oranını en fazla yapmak için süzgeç (FILTER), biriktirme (STACK) ve GAIN ayarları alette bulunmaktadır ve ölçüm sırasında kullanıcının seçimine göre çalışmaktadırlar.

İki kanallı olan alet, öz direnç-faz çalışmaları sırasında 0.0625 Hz. den 2048 Hz.'e kadar 16 frekans kullanılarak verici sisteminin üreteceği AC akımı yönlendirmektedir.

LDT-10 verici sistemi:

LDT-10 verici sistemi hem laboratuvar hem de kuyu logu ölçümleri için geliştirilmiştir. Üretilen akım aralığı $.01 \mu\text{A} - 10 \text{ mA}$ arasındadır. 12 V.luk bir güç kaynağından beslenen alet gerektiğinde alıcı aletinden de beslenebilmektedir (Şekil 6.1a).

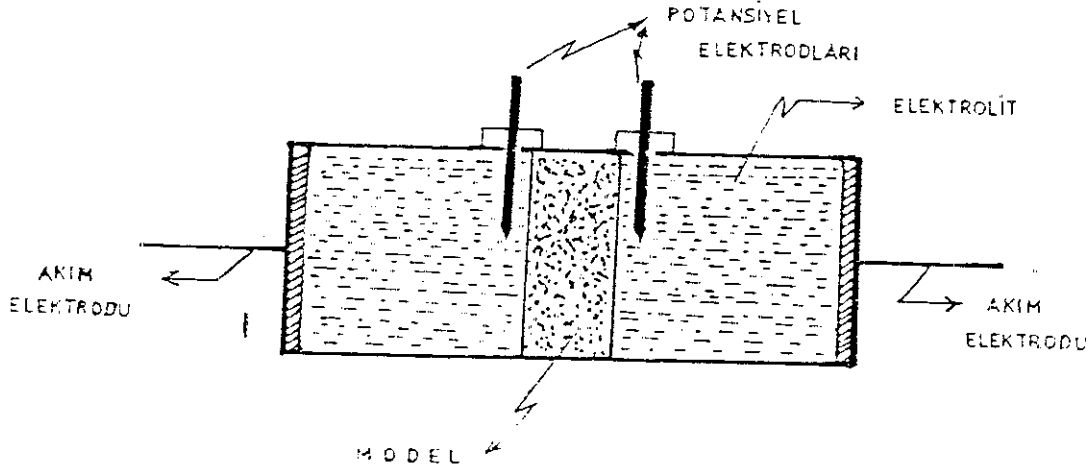


Şekil 6.1a Laboratuvarda kullanılan ölçü sisteminin şematik gösterimi.

Ek olarak CAP-12 kayıt-yazıcı (Cassette-Printer) sistemi ile taşınabilir osiloskop vardır. CAP-12 sistemi bütün programlarda kullanılabileceği gibi, esas olarak CR çalışmaları için gereklidir. Taşınabilir osiloskop, üretilen akımın ve ölçülen gerilimin kare dalga olup olmadığını denetlemek açısından gereklidir.

Laboratuvarda kullanılan model tank:

Deneysel çalışmalar için laboratuvarda kullanılan model tank 16*8*8 cm. boyutlarında olup camdan yapılmıştır. Ölçü düzeneği, jeofizikte kullanılan dört elektrodlu ölçü düzeneğine uygun olarak hazırlanmıştır. Şekil 6.1b de görülen model tank içerisinde akım hatlarının doğrusal dağılımını sağlamak için akım elektrodları model tankın iki yüzeyine, bakışimli olarak, levha şeklinde yerleştirilmiş olup paslanmaz çelikten yapılmıştır. Gerilim elektrodları da tankın içine konulan elektrolitten etkilenmemesi için, aynı şekilde, paslanmaz çelikten yapılmıştır.



Şekil 6.1b Laboratuvar çalışmalarında kullanılan model tank ve elektrod düzeneği.

6.2. LABORATUVAR MODELLERİNİN HAZIRLANMASI

Laboratuvar çalışmalarında, kayaçların elektrod ve zar kutuplaştırmalarını temsil edecek şekilde yapay modeller hazırlanmıştır. Bu modeller üzerinde yapılan çalışmalarda 10^{-2} N normalite değerinde NaCl elektroliti ile musluk suyu kullanılmıştır. Her ne kadar alışılmış sistem özellikle metal modellerde o metal türüne göre elektrolit seçmek ise de arazi çalışmalarında elektrolit türünü seçme olanağı olmadığı için yukarıda sözü edilen elektolitler seçilmiştir.

Elektrod kutuplaştırması model çalışmaları:

Bu model çalışmalarında; paslanmaz çelik, bakır, çinko, sac ve alüminyum levhalar kullanılmıştır. Literatürdeki çalışmalarda ise pirit, kalkopirit gibi doğal modeller kullanıldığı için bu doğal modellerden kaçınılmıştır. Modellerin boyutları 8*8*.1 cm olup ölçümler sırasında oksidasyonu önlemek amacıyla her ölçümden önce elektrodlar temizlenmiştir. Ayrıca arayüzey miktarını artırıp IP yanıtını yükseltmek amacıyla iki model yanyana konularak ölçümler alınmıştır.

Zar kutuplaştırması model çalışmaları:

Zar kutuplaştırması model çalışmalarında kil-kum gibi doğal örnekler model olarak seçilmiştir. Kum tane çapına göre elekten geçirilerek iri, orta ve ince kum olmak üzere üç grupta toplanmıştır. Tane boyutuna göre ayrılan kumlar yıkanarak kum/kil oranı 1/10, 2/10 ve 3/10 olacak şekilde Bentonit kil'i ile karıştırılmış ve bu şekilde kutuplaştırma etkisinin artırılması öngörülmüştür. Montmorillonit kilinin daha iyi kutuplaştırma etkisi verdiği literatürden bilinmektedir. Isparta civarında Montmorillonit-Illit karışımı killer bulunmuştur. Montmorillonit-Illit karışık olduğu için doğrusal akım dağılımında Bentonit kullanılmıştır. Kil-kum modellerinin boyutları her ölçüm için 8*8*4.5 cm olarak alınmıştır.

6.3. DENEYSEL SONUÇLAR

Hazırlanan modeller üzerinde .0625 Hz.-2048 Hz. frekanslarında ölçümler alınmıştır. Özdirenç-faz programı uygulanarak spektrumları çizilmiştir. Uygulanan akım

$$J=I/A (\mu A/cm^2)$$

$$(3.1.2)$$

bağıntısından $156 \cdot 10^{-3}$, $156 \cdot 10^{-2}$, $156 \cdot 10^{-1}$ ve $156 \mu A/cm^2$ olarak seçilmiştir. Özdirenç ve faz spektrumları, Sumner (1976)' a benzer olarak, her bir akım yoğunluğu için ayrı

ayrı çizilerek her bir frekans için akım yoğunluğunun etkisi izlenmiştir. Burada sabit bir frekans için (.25 Hz) PCE parametresine değerlendirmek olanaklı olup min. ve max. akım yoğunluğu değerlerinden elde edilen görünür öz direnç değerleri kullanılarak (5.8) bağıntısı yardımıyla PCE değerleri bulunmuştur. Diğer yandan sabit bir frekansdaki akım yoğunluğu etkisini görmek amacıyla, akım yoğunluğuna bağlı öz direnç ve faz değerleri çizilmiştir. Modeller için farklı belirtenler kullanılmış, böylece aynı elektrolit ortamında aynı akım yoğunluğu için modellerin farklı davranışları izlenmiştir.

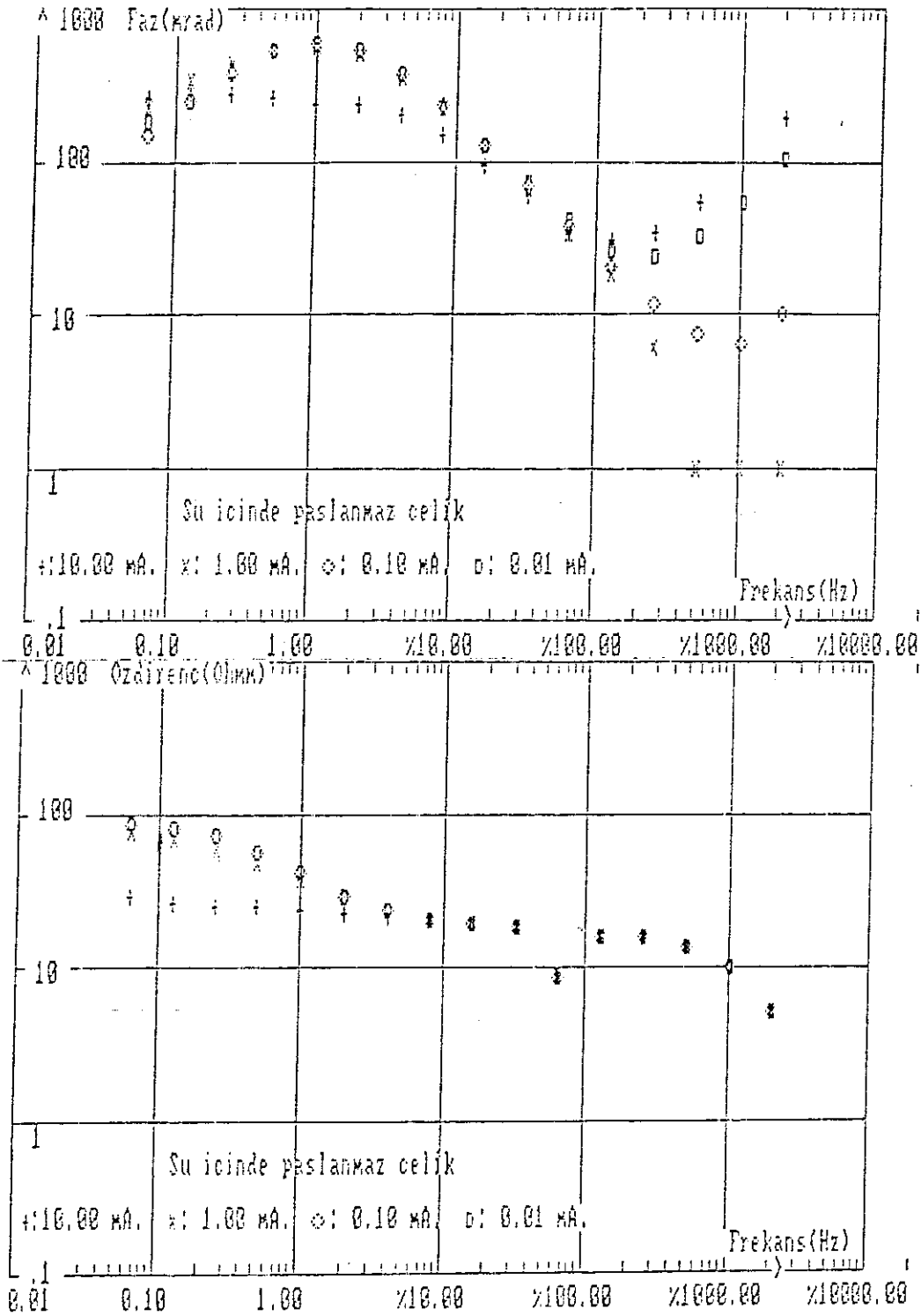
Bu çizimler için seçilen frekanslar, DC'yi temsil edebilecek .0625 Hz. ile IP (PFE) parametresinin hesaplanmasında kullanılan .25 Hz. ve 4 Hz. frekanslarıdır. Bu frekanslara göre çizim yapmanın bir diğer nedeni de akım yoğunluğu etkisinin öz direnç için düşük frekanslarda etkin olması, faz için ise model türüne bağlı olarak, 10² Hz. frekansından sonra gürültüden etkilenmesidir.

Çizimler, öz direnç ve faz açısı değerlerinin geniş bir aralıkta değişmesi nedeniyle, log-log kagıda yapılmıştır. Akıma bağlı değerler çizilirken 4 Hz. frekansında IP(PFE) parametresi de doğrusal ekseninde çizilmiştir.

6.3.1. ORTAMLARIN İNCELENMESİ

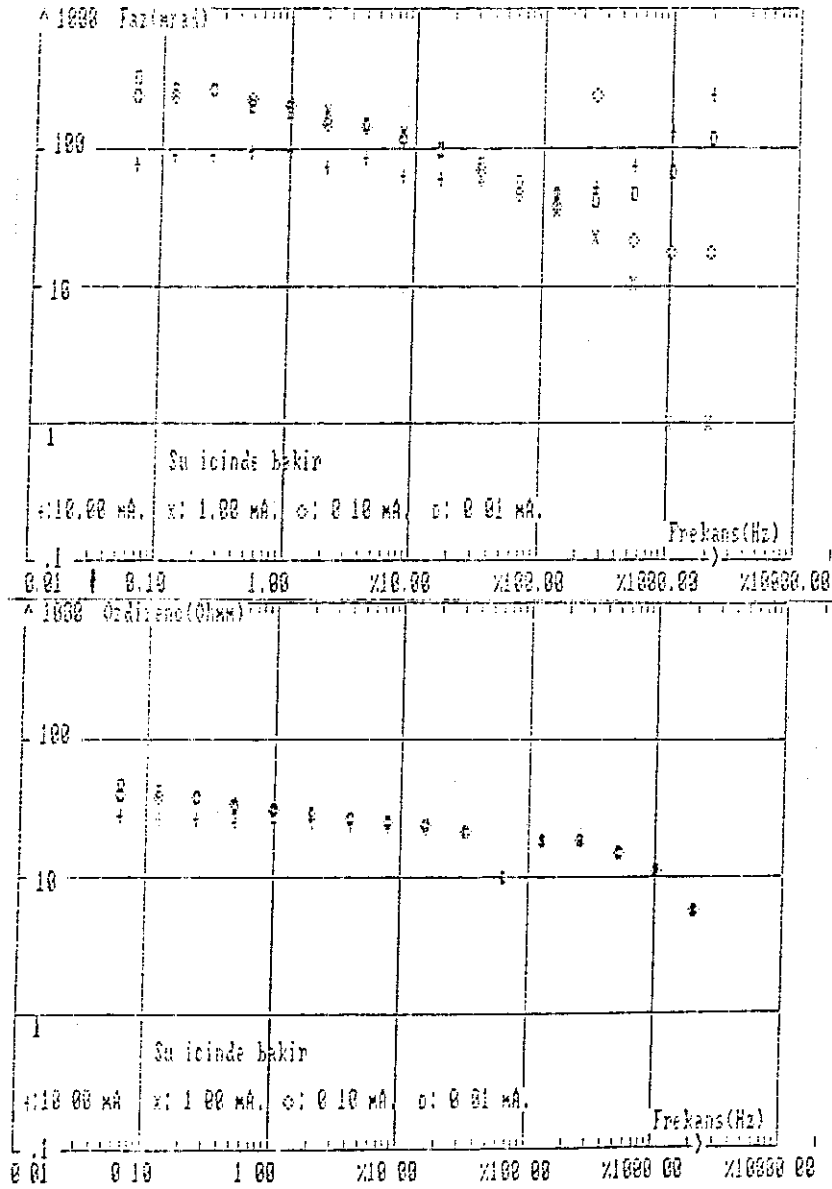
6.3.1.1. Elektrolit Ortamı Musluk Suyu:

Şekil 6.2, Paslanmaz çelik modelinin öz direnç ve faz spektrumlarını göstermektedir. Öz direnç spektrumları, düşük frekanslarda, farklı akım yoğunlukları için farklı olmasına karşılık, özellikle 16 Hz. den yüksek frekanslarda aynı genliğe sahiptir ve PCE değeri 65 dir. Faz spektrumu, 1 Hz. frekansında max. değerine ulaşmakta ve 156 A/cm² akım yoğunluğu dışında bir çan eğrisi çizmektedir. Faz spektrumlarının akım yoğunluğuna bağlı değişimi yine düşük frekanslardadır.



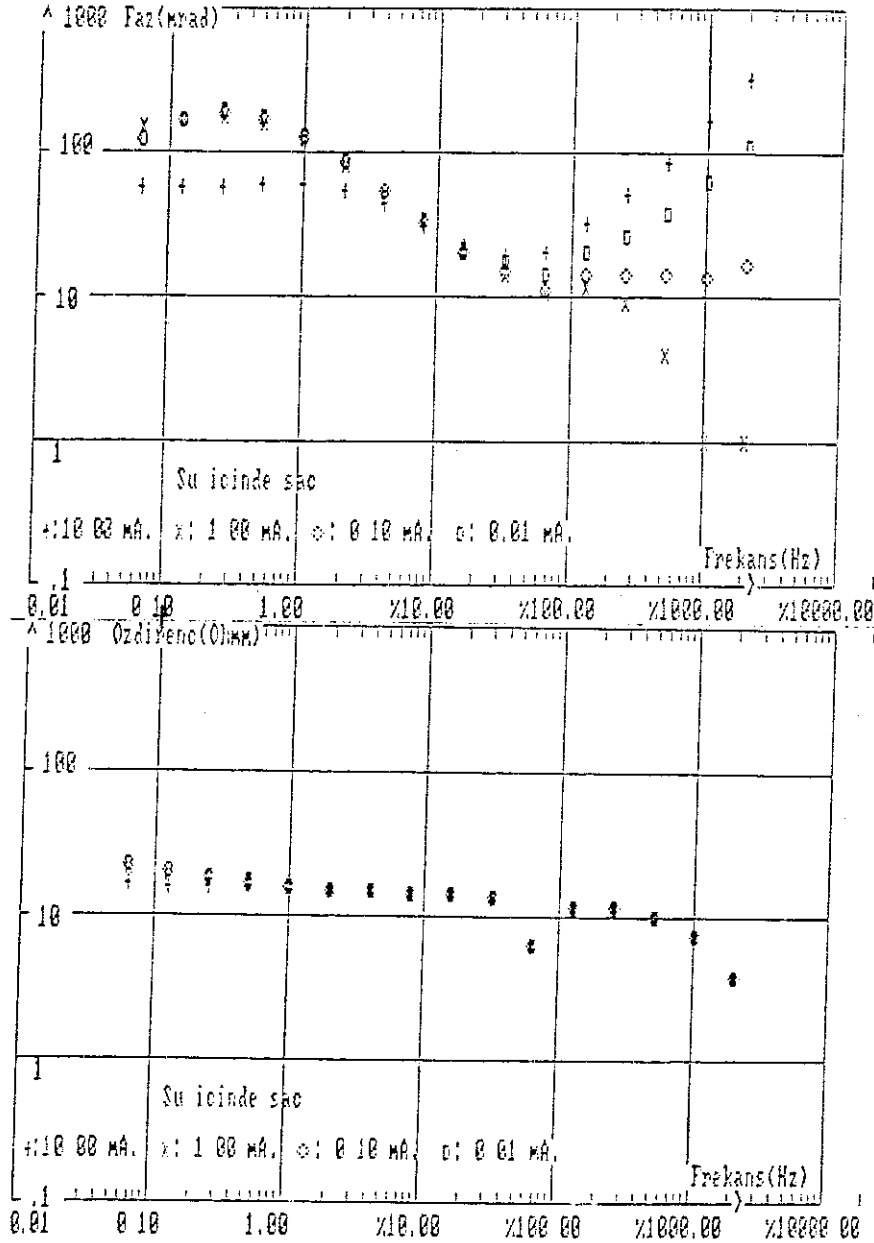
Şekil 6.2 Paslanmaz çelik levha modelinin özdi-
renç ve faz spektrumları.

Şekil 6.3, bakır levha modelinin öz direnç ve faz spektrumlarını göstermektedir. Öz direnç spektrumlarında akım yoğunluğu etkisi, yaklaşık 8 Hz. frekansına kadardır ve akım yoğunluğuna bağlı olarak PCK değeri 30 civarındadır. Faz spektrumunda max. değer düşük frekanslarda olup akım yoğunluğundan ve yüksek frekanslarda gürültüden etkilenmektedir.



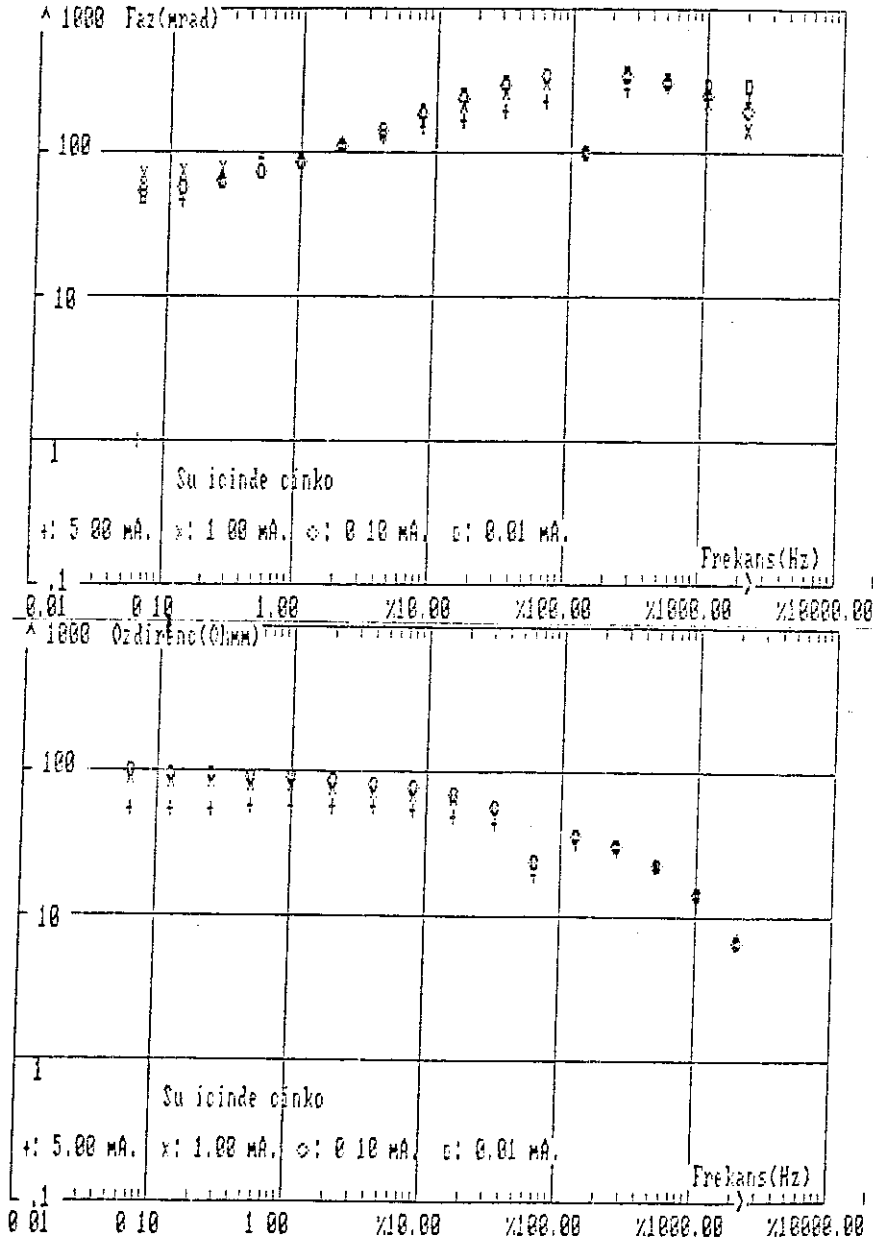
Şekil 6.3 Bakır levha modelinin öz direnç ve faz spektrumları.

Şekil 6.4, Sac levhanın özdirenç ve faz spektrumlarını göstermektedir. Özdirenç spektrumu, 2 Hz. frekansına kadar değişim göstermektedir ve PCR değeri 12 dir. Faz spektrumu, düşük akım yoğunluklarında .25 Hz. frekansı civarında bir çan eğrisi çizmekte olup yüksek frekanslarda, gürültüden etkilenmektedir.



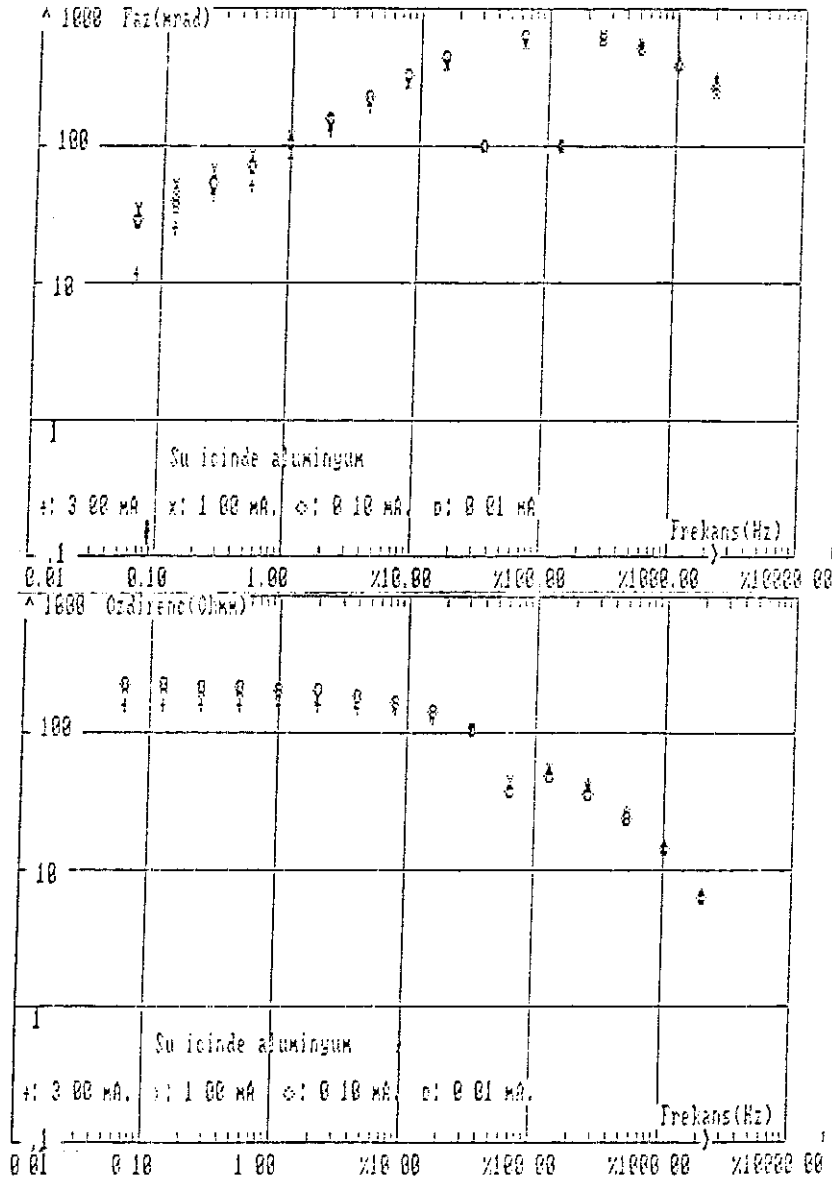
Şekil 6.4 Sac levhanın özdirenç ve faz spektrumları.

Şekil 6.5, Çinko levhanın özdirenç ve faz spektrumlarını göstermektedir. Akım yoğunluğu değişimine göre özdirenç spektrumunda 10^2 Hz. frekansına kadar değişim izlenmekte olup $PCE=41$ dir. Faz spektrumu ise , yaklaşık, 128 Hz. frekansında max. noktası bulunan bir çan eğrisi çizer. Bunun en önemli yanı, faz spektrumunun max. noktasının yüksek frekanslara kaymasıdır.



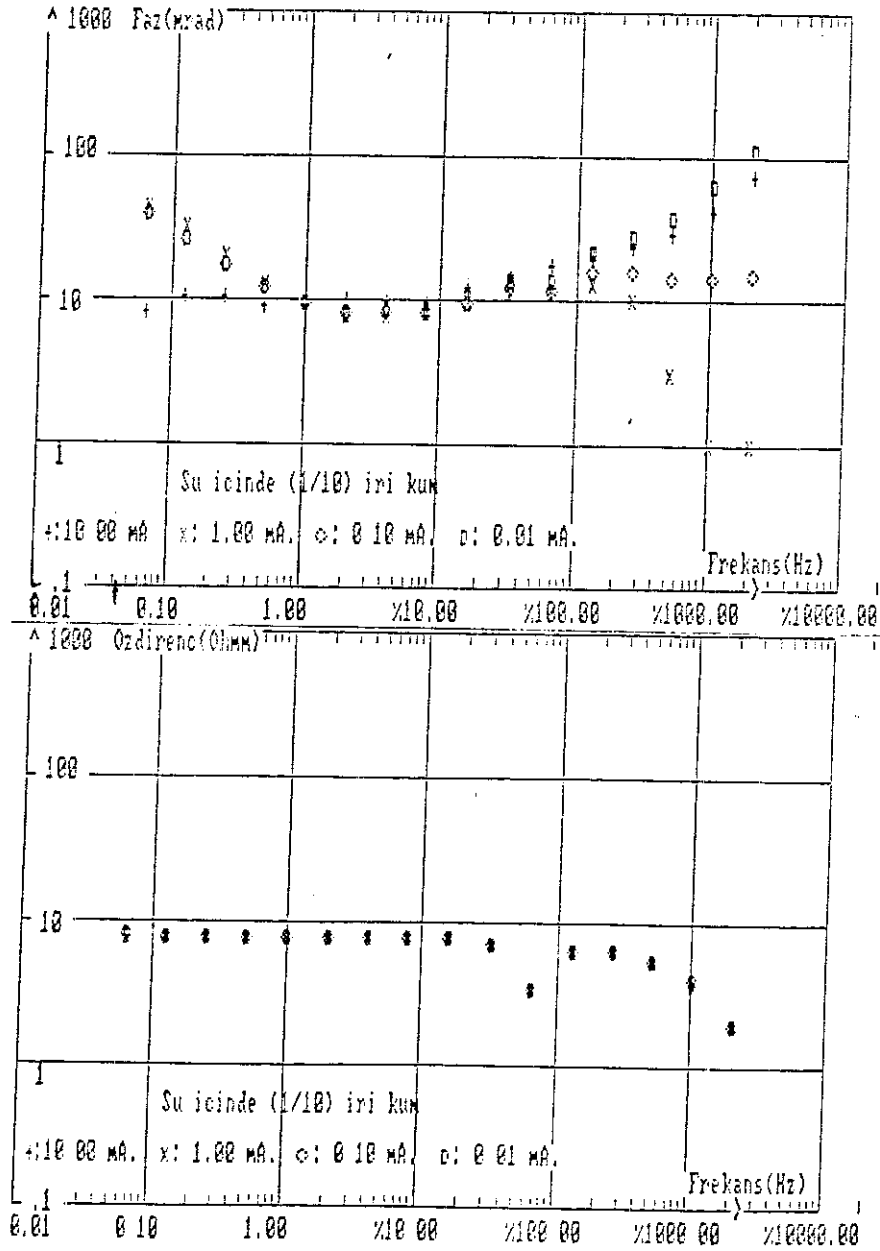
Şekil 6.5 Çinko levhanın özdirenç ve faz spektrumları.

Şekil 6.6, Alüminyum levhanın özdirenç ve faz spektrumlarını göstermektedir. Yaklaşık 16 Hz. frekansına kadar özdirenç spektrumunda akım etkisi izlenmekte olup PCE=26 dır. Faz spektrumu, DC'ye yakın düşük frekanslarda hem frekans hem de akım yoğunluğu değişimlerinden etkilenirken, yaklaşık 128 Hz. frekansı civarında max. bulunan bir çan eğrisi çizmektedir. Faz spektrumunun genel yapısı çinko levhanın faz spektrumuna benzer ise de, genlik değerleri Alüminyum levhada daha büyüktür.



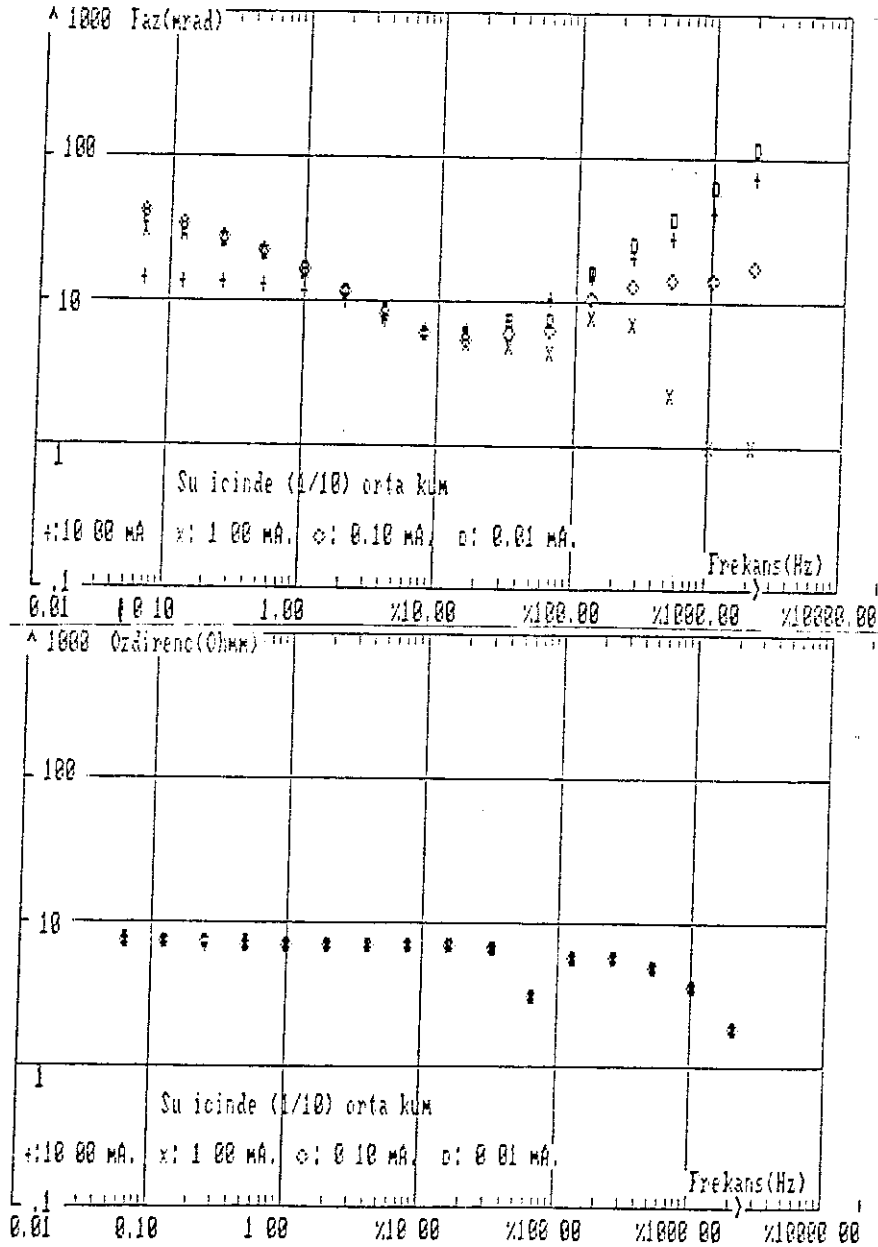
Şekil 6.6 Alüminyum levhanın özdirenç ve faz spektrumları.

Şekil 6.7, %10 iri kum içeren kil-kum modelinin özdirenç ve faz spektrumlarını göstermektedir. Özdirenç spektrumunda frekansa göre değişim çok küçüktür. Akım yoğunluğuna bağlı değişim de çok küçük olup $PCE = -0.5$ dir. Faz spektrumunda akım yoğunluğu etkisi belirgin olup düşük frekanslarda max. değerini almaktadır. %20 ve %30 iri kum içeren kil-kum modelleri de benzer eğriler çizmektedir.



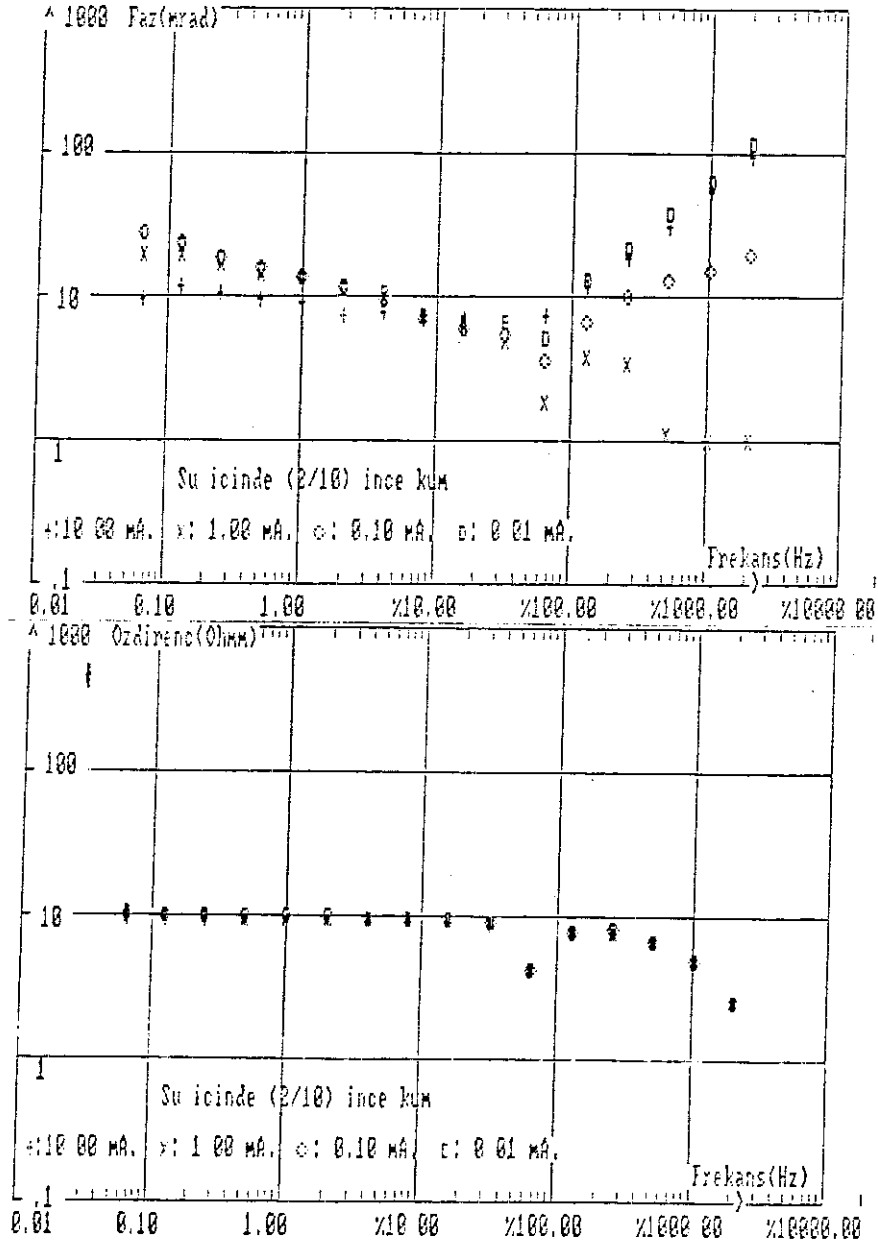
Şekil 6.7 %10 iri kum içeren kil-kum modelinin özdirenç ve faz spektrumları.

Şekil 6.8, %10 orta kum içeren kil-kum modelinin öz direnç ve faz spektrumlarını göstermektedir. Öz direnç spektrumunda hem frekans hem de akım yoğunluğu etkisi çok az olup $PCR=2.1$ dir. Faz spektrumunda düşük frekanslarda max. değer elde edilirken akım yoğunluğu etkisi de, öz direnç spektrumuna göre, daha belirgindir. %20 ve %30 orta kum içeren kil-kum modelleri için de aynı sonuçlar doğrudur.



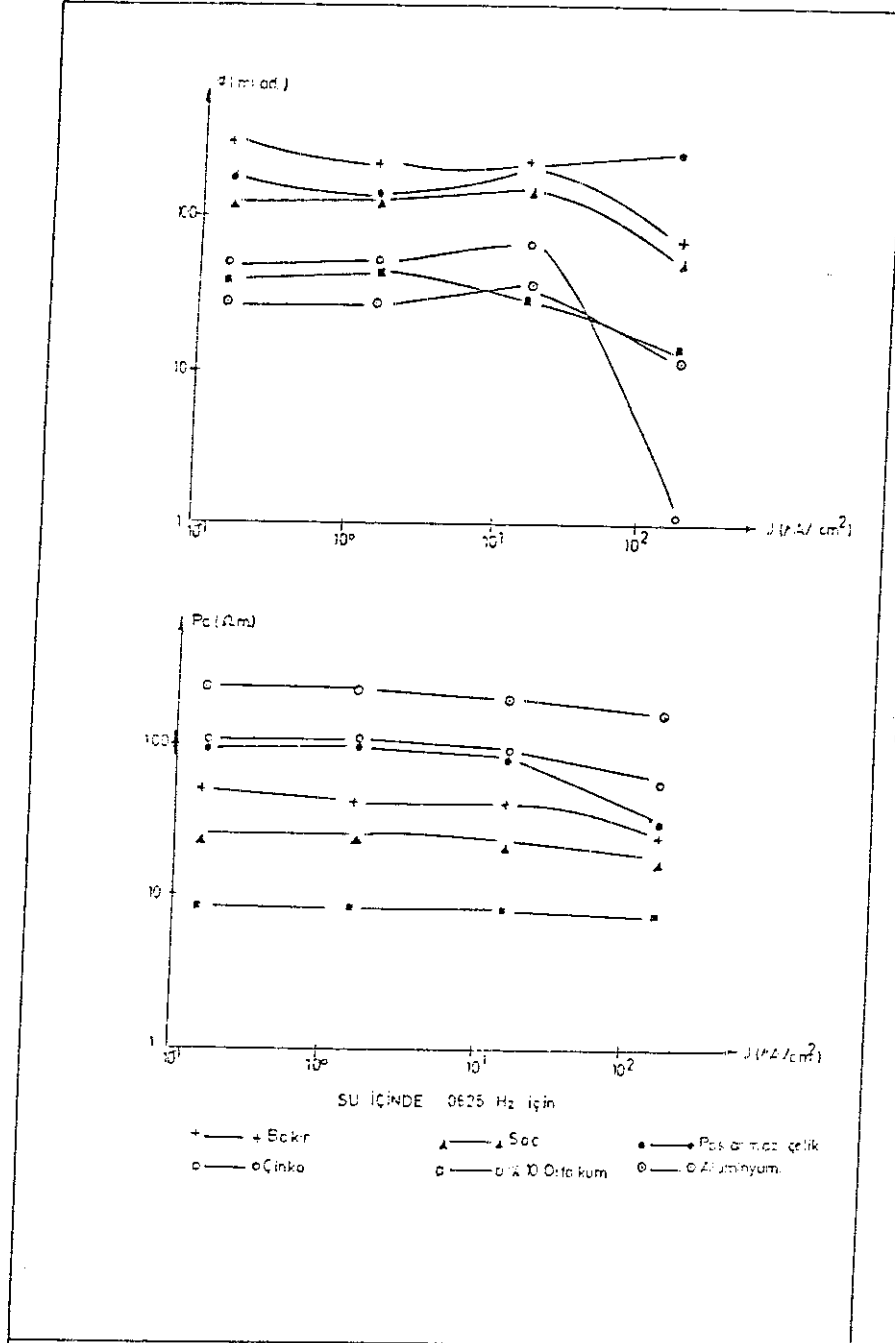
Şekil 6.8 %10 Orta kum içeren kil-kum modelinin öz direnç ve faz spektrumları.

Şekil 6.9, %10 ince kum içeren kil-kum modelinin öz direnç ve faz spektrumlarını göstermektedir. İri kum ve Orta kum içeren kil-kum modelleri için bulunan sonuçların, genel olarak, ince kum için de geçerli olduğu izlenir. PCE=2.7 civarında değer almaktadır.



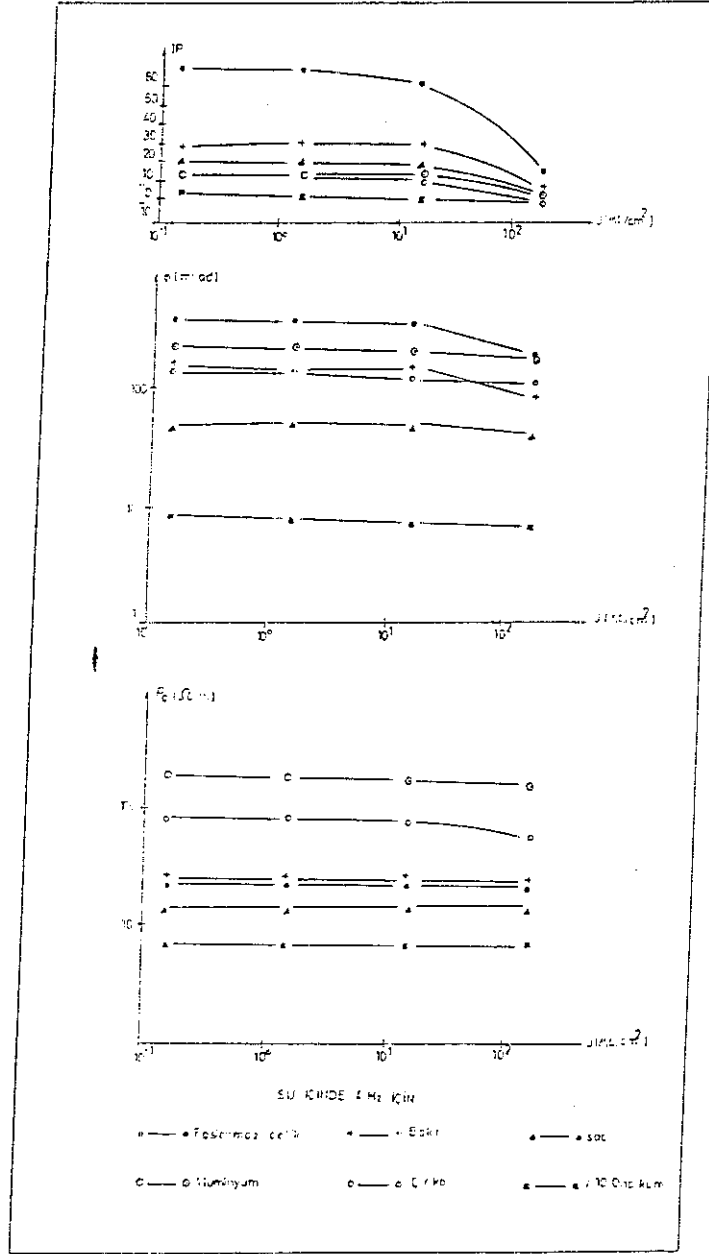
Şekil 6.9 %10 İnce kum içeren kil-kum modelinin öz direnç ve faz spektrumları.

Akım yoğunluğuna göre çizilen özdirenç ve faz değerleri, .0625 Hz. frekansı için Şekil 6.10 da gösterilmiştir. Akım yoğunluğu arttıkça yapay modellerin hepsinde özdirenç değerlerinin azaldığı izlenirken faz değerleri de genel olarak aynı yapıdadır.



Şekil 6.10 .0625 Hz. frekansında bütün modellerin akım yoğunluğu özdirenç ve faz değerleri.

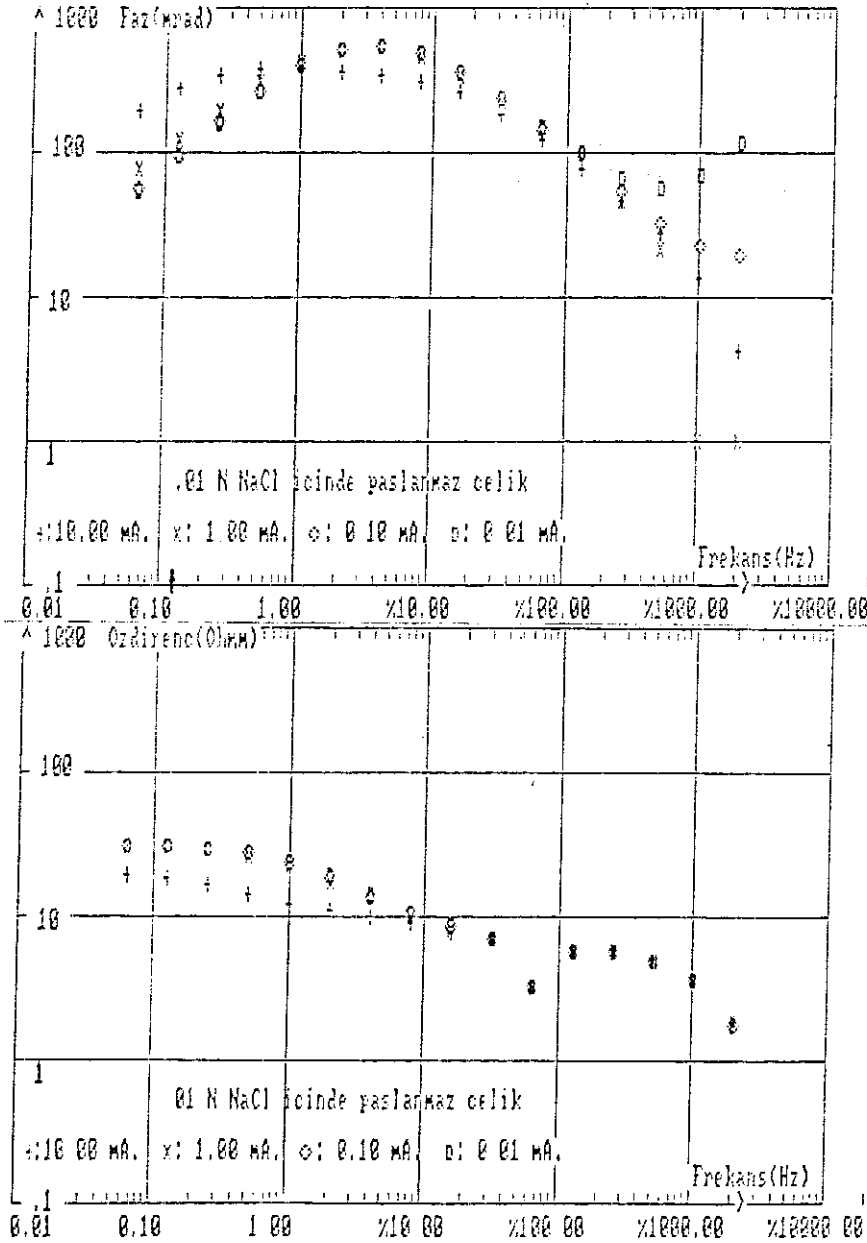
Şekil 6.12, 4 Hz. frekansı için özdirenç ve faz değerleri göstermektedir. Özdirenç ve faz değerlerine göre IP'deki akım yoğunluğuna bağlı azalma daha belirgindir. Her bir model için elde edilen PFE ve PCE değerlerinin uyumlu olmadığı izlenir. Örneğin sac levha modelinin PCE değeri 12 olup yapay modeller içinde min. iken PFE değeri bir kısım modellere göre daha yüksektir.



Şekil 6.12 4 Hz. frekansında bütün modellerin akım yoğunluğu özdirenç ve faz değerleri ve IP yanıtları.

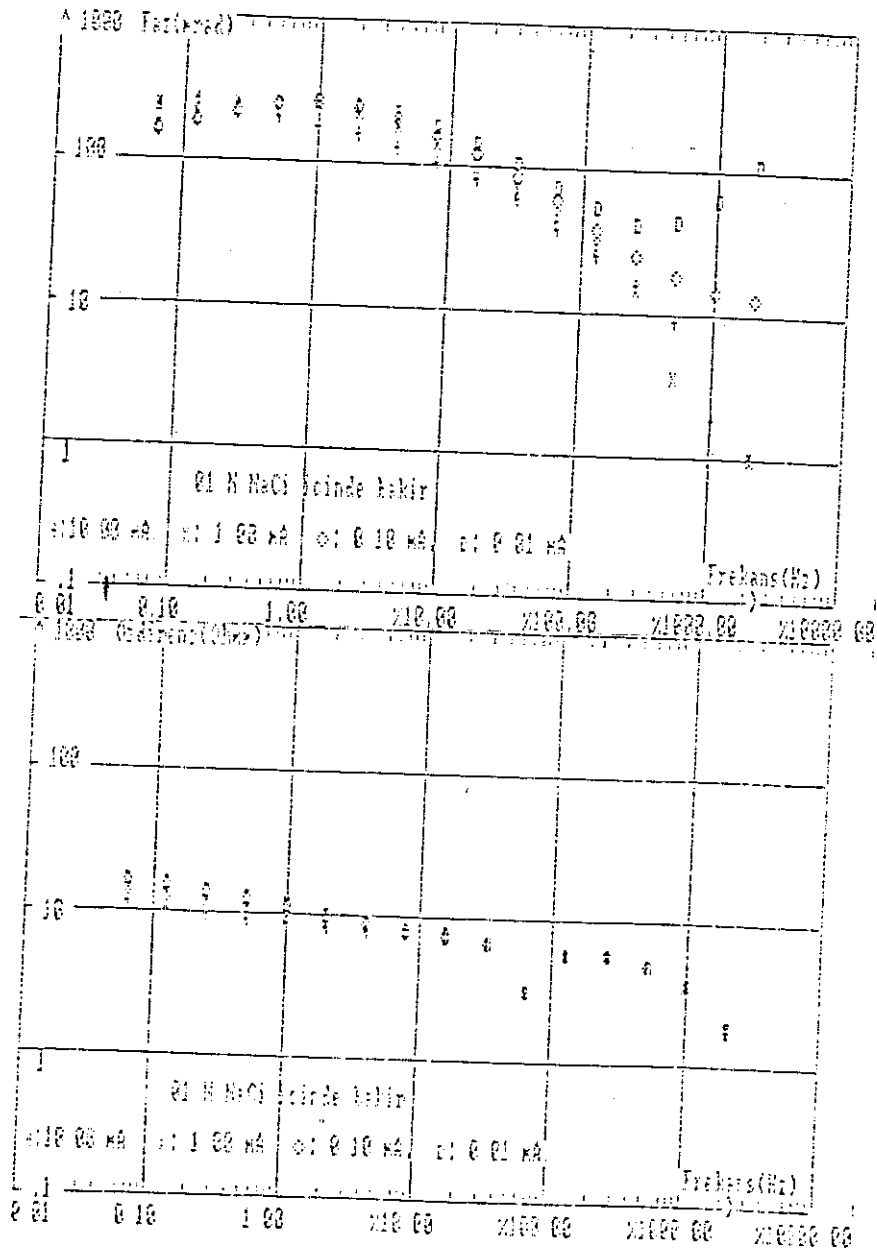
6.3.1.2. Elektrolit Ortamı 10^{-2} N NaCl:

Şekil 6.13, Paslanmaz çelik levha modelinin özdi-
renç ve faz spektrumlarını göstermektedir. Özdi-
renç spektrumu akım yoğunluğu ile değişmekte olup $PCB=45$ dir.
Faz spektrumu max. değeri 4 Hz. frekansında bulunan bir
çan eğrisi çizmekte olup akım yoğunluğu ile değişmekte-
dir.



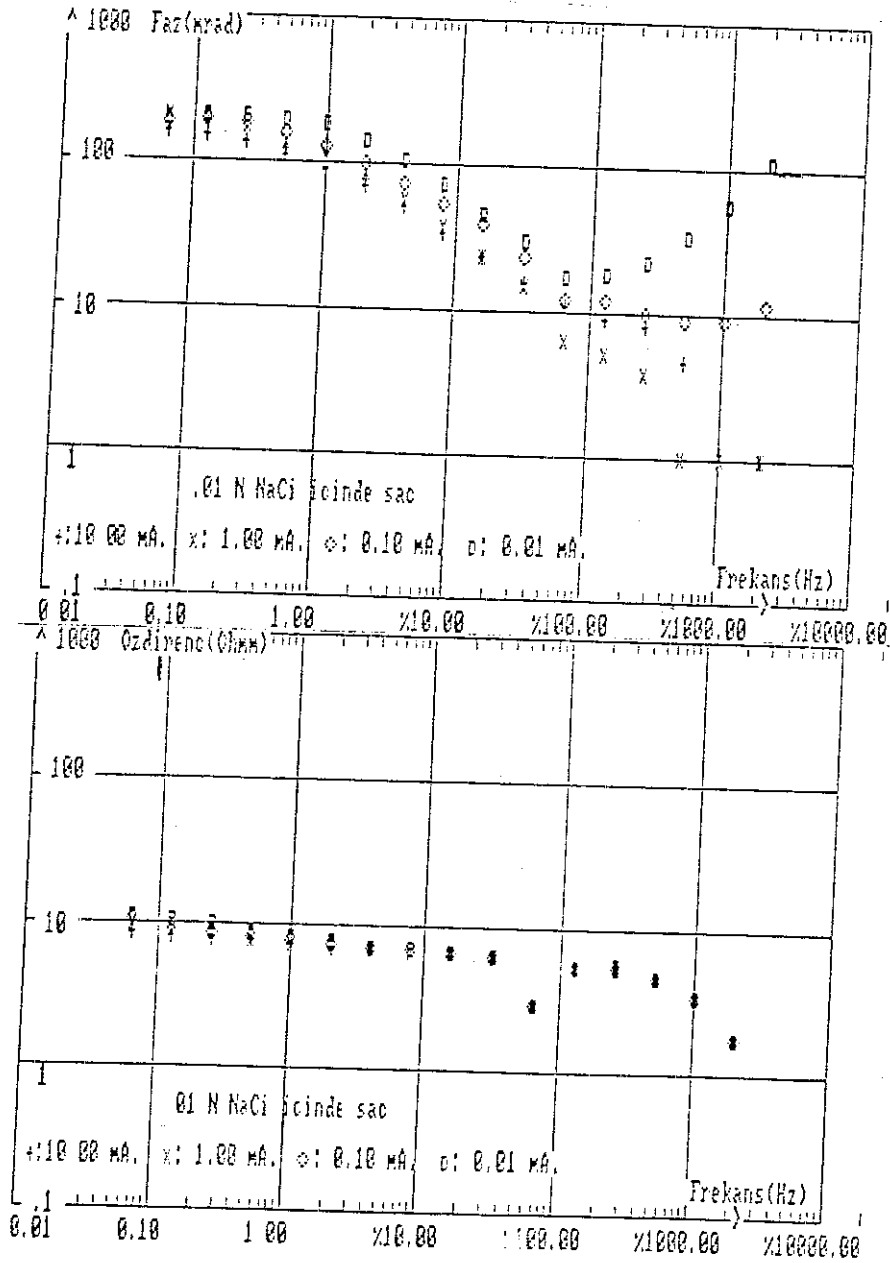
Şekil 6.13 Paslanmaz çelik levha modelinin özdi-
renç ve faz spektrumları.

Şekil 6.14, Bakır levha modelinin öz direnç ve faz spektrumlarını göstermektedir. Öz direnç spektrumunda akım yoğunluğuna bağlı değişim 8 Hz. frekansına kadar olup $PCR=34$ dir. Faz spektrumu, düşük frekanslarda max. değerini almaktadır ve yaklaşık 128 Hz. frekansına kadar akım yoğunluğundan etkilenmektedir.



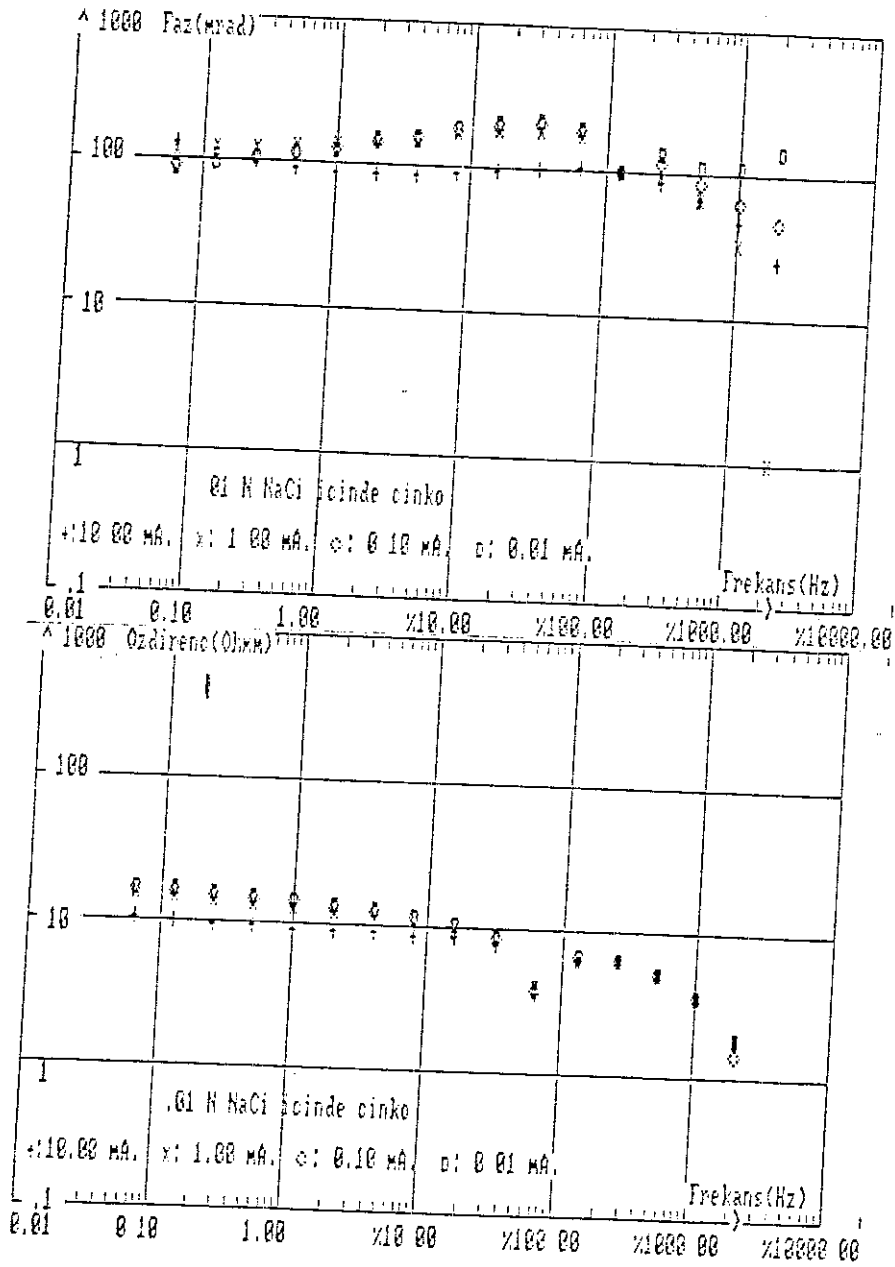
Şekil 6.14 Bakır levha modelinin öz direnç ve faz spektrumları.

Şekil 6.15, Sac levha modelinin özdirenç ve faz spektrumlarını göstermektedir. Özdirenç spektrumunda akım yoğunluğuna bağlı değişim düşük frekanslardadır ve PCE=14 dir. Faz spektrumu ise düşük frekanslarda max. değerini almakta olup 128 Hz frekansına kadar değişim vardır.



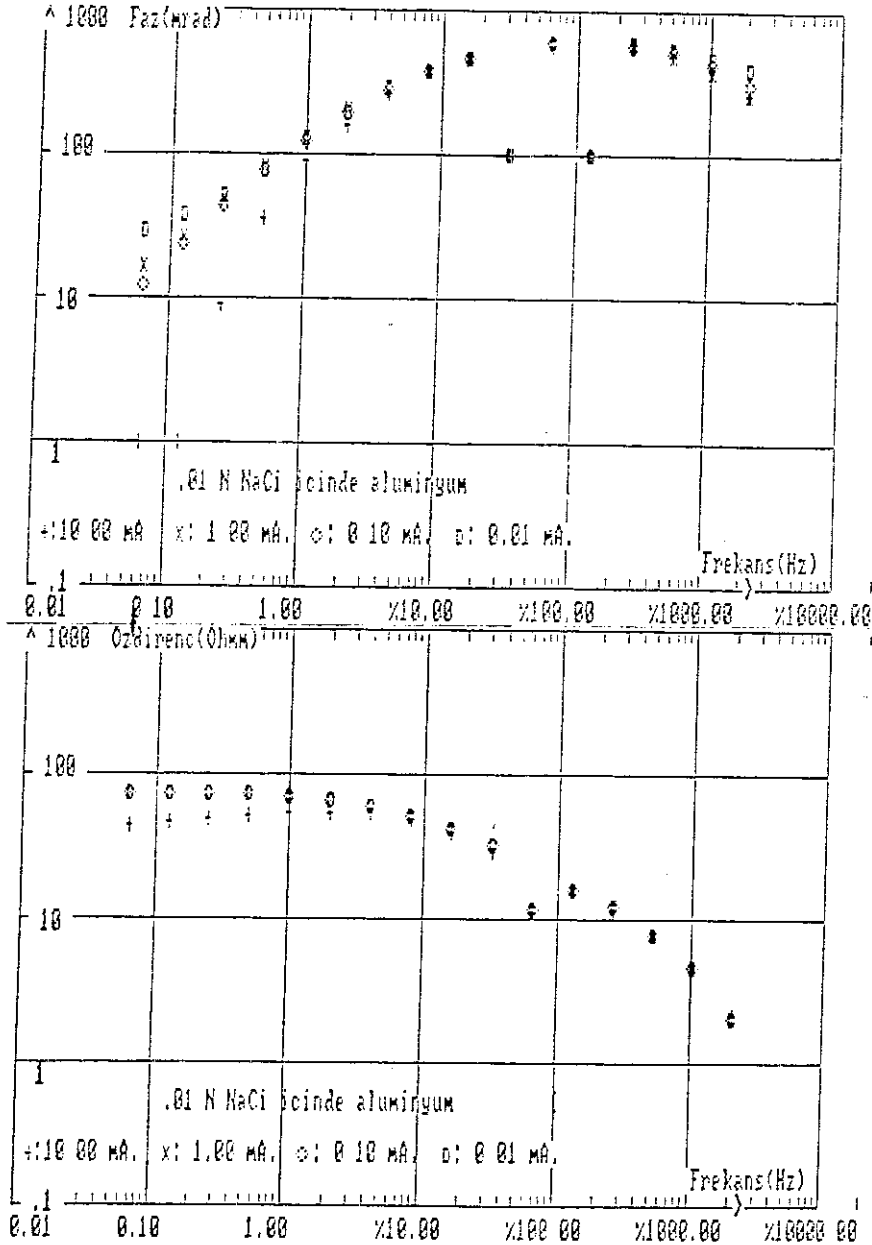
Şekil 6.15 Sac levha modelinin özdirenç ve faz spektrumları.

Şekil 6.16, Çinko levha modelinin öz direnç ve faz spektrumlarını göstermektedir. Öz direnç spektrumu, akım yoğunluğuna bağlı olarak bütün frekanslarda değişmektedir ve $PCE=39$ dur. Faz spektrumunun max. noktası düşük akım yoğunluklarında olup 102 Hz. frekansına kaymıştır.

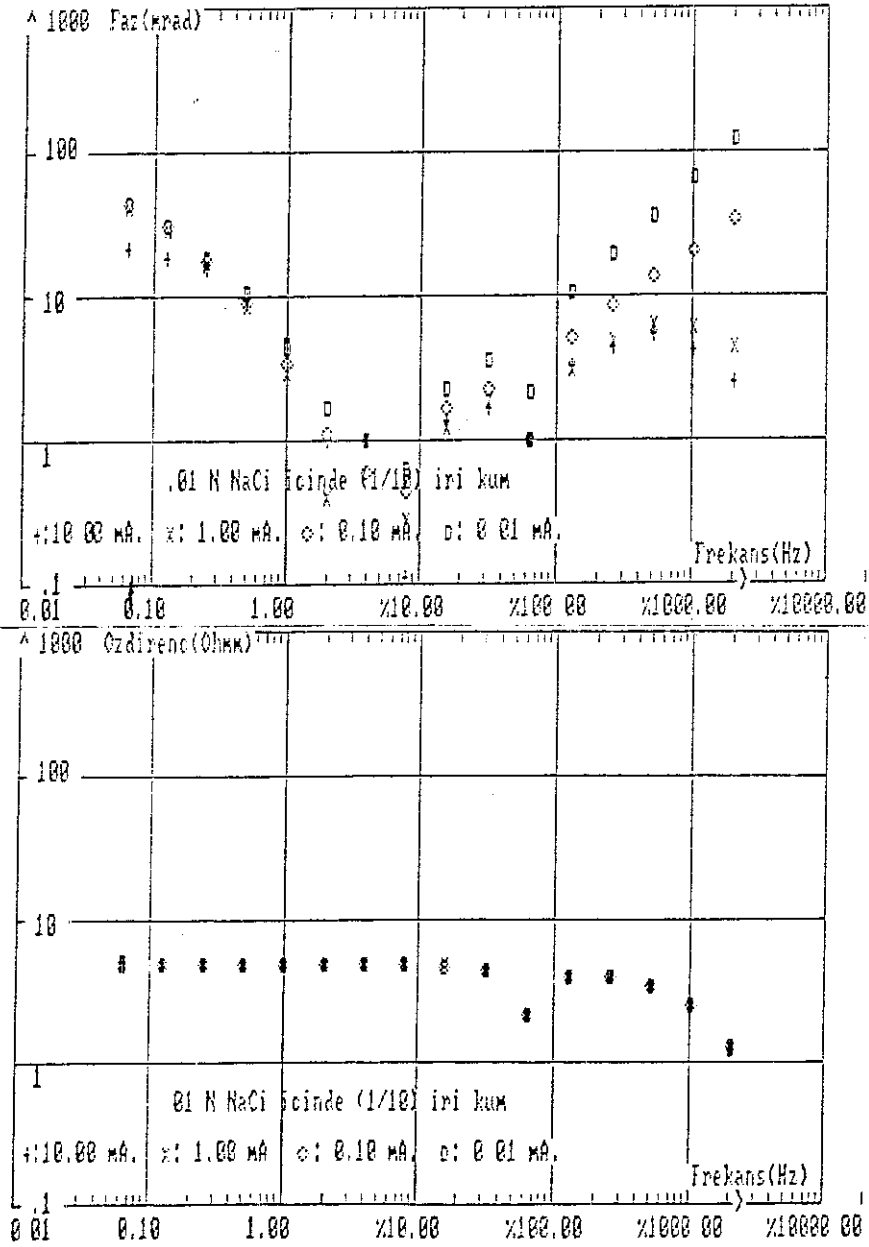


Şekil 6.16 Çinko levha modelinin öz direnç ve faz spektrumları.

Şekil 6.17, Alüminyum levha modelinin özdirenç ve faz spektrumlarını göstermektedir. Özdirenç spektrumu, düşük akım yoğunluklarında değişmezken yüksek akım yoğunluklarında yüksek frekanslara kadar değişmekte olup PCE=34 dir. Faz spektrumu, max. noktası yine 128 Hz. olacak şekilde bir çan eğrisi çizmektedir. Burada, musluk suyuna oranla, faz spektrumu genlikleri daha yüksektir.

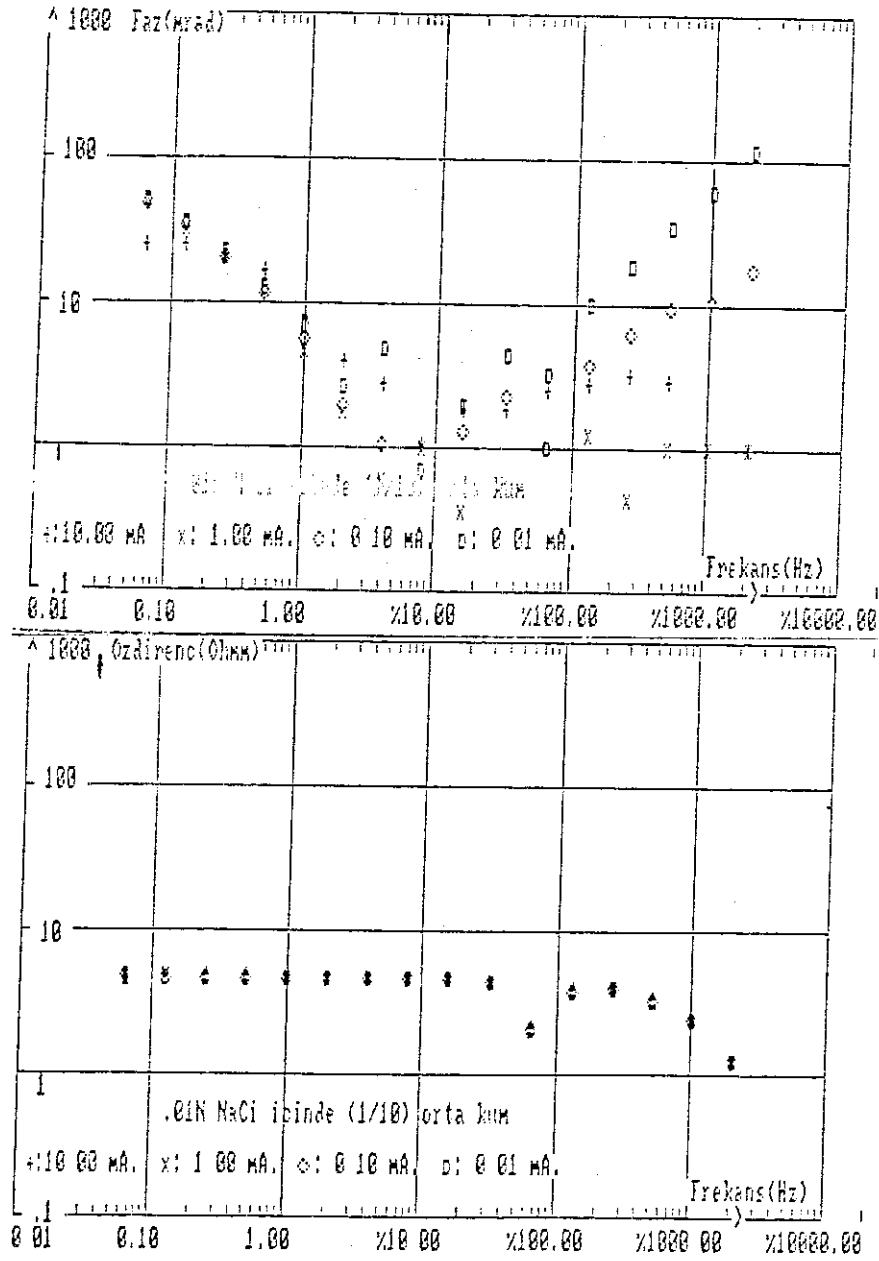


Şekil 6.18, %10 iri kum içeren kil-kum modelinin özdirenc ve faz spektrumlarını göstermektedir. Özdirenc spektrumu, akım yoğunluğu ve frekansdan bağımsız görünmekte olup PCE=0 dır. Faz spektrumu, 4 Hz. frekansına kadar azalmakta daha sonra ise artmaktadır. %20 ve %30 iri kum içeren kil-kum modelleri için özdirenc spektrumu aynı, buna karşılık, faz spektrumunun min. değerleri daha yüksek frekanslara kaymaktadır.



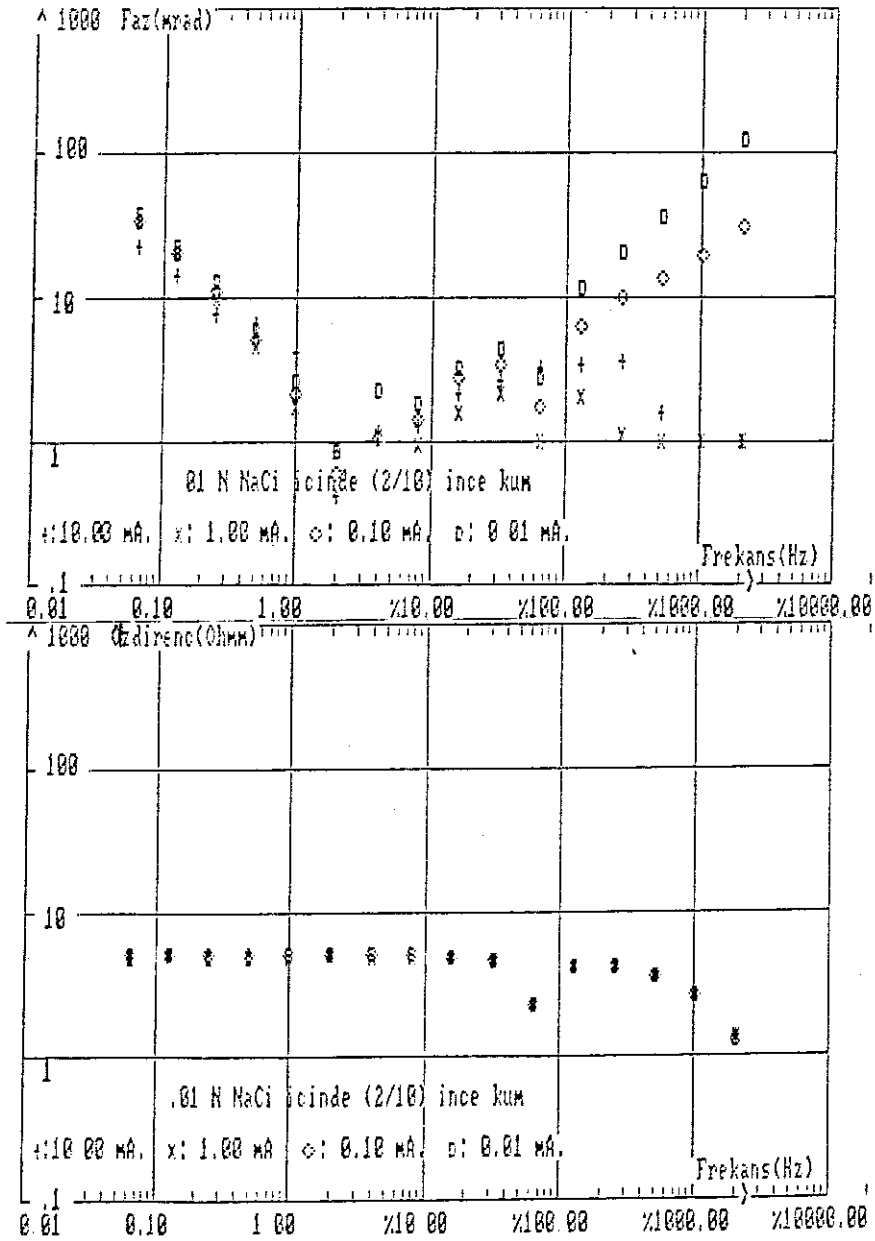
Şekil 6.18 %10 iri kum içeren kil-kum modelinin özdirenc ve faz spektrumları.

Şekil 6.19, %10 orta kum içeren kil-kum ortamının özdirenç ve faz spektrumlarını göstermektedir. Özdirenç spektrumu, frekans ve akım yoğunluğundan etkilenmemektedir ve $PCE = -2.7$ dir. Faz spektrumu düşük frekanslarda max. dur. %20 ve %30 orta kum içeren kil-kum modeli için özdirenç spektrum değişmezken, faz spektrumunun min. noktası biraz daha yüksek frekanslara kaymıştır.



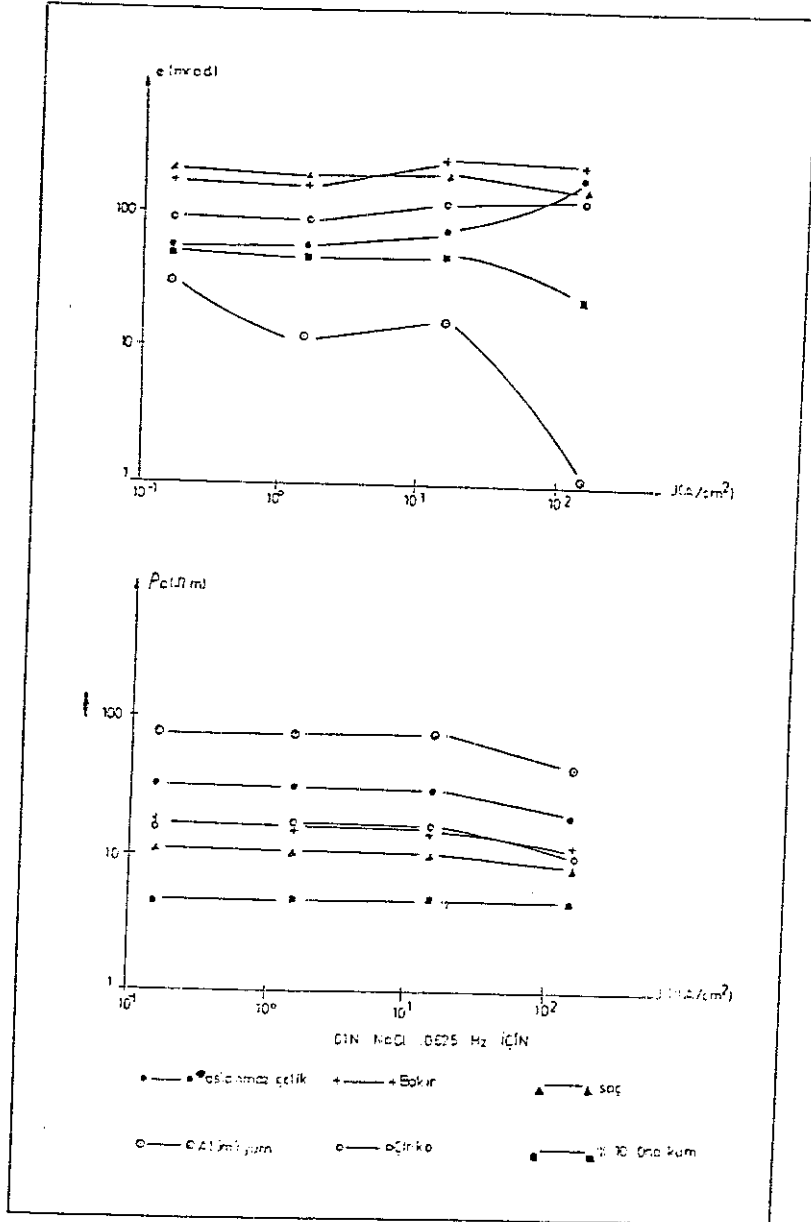
Şekil 6.19 %10 orta kum içeren kil-kum modelinin özdirenç ve faz spektrumları.

Şekil 6.20, %20 ince kum içeren kil-kum modelinin öz direnç ve faz spektrumlarını göstermektedir. Öz direnç spektrumu, frekans ve akım yoğunluğuyla değişmemekte olup $PCF = -1.2$ dir. Faz spektrumunda min. değer düşük frekanslara kaymıştır. %30 ince kum içeren kil-kum modelinde öz direnç spektrumu değişmemekte, faz spektrumunun min. noktası ise biraz daha yüksek frekanslara kaymaktadır.



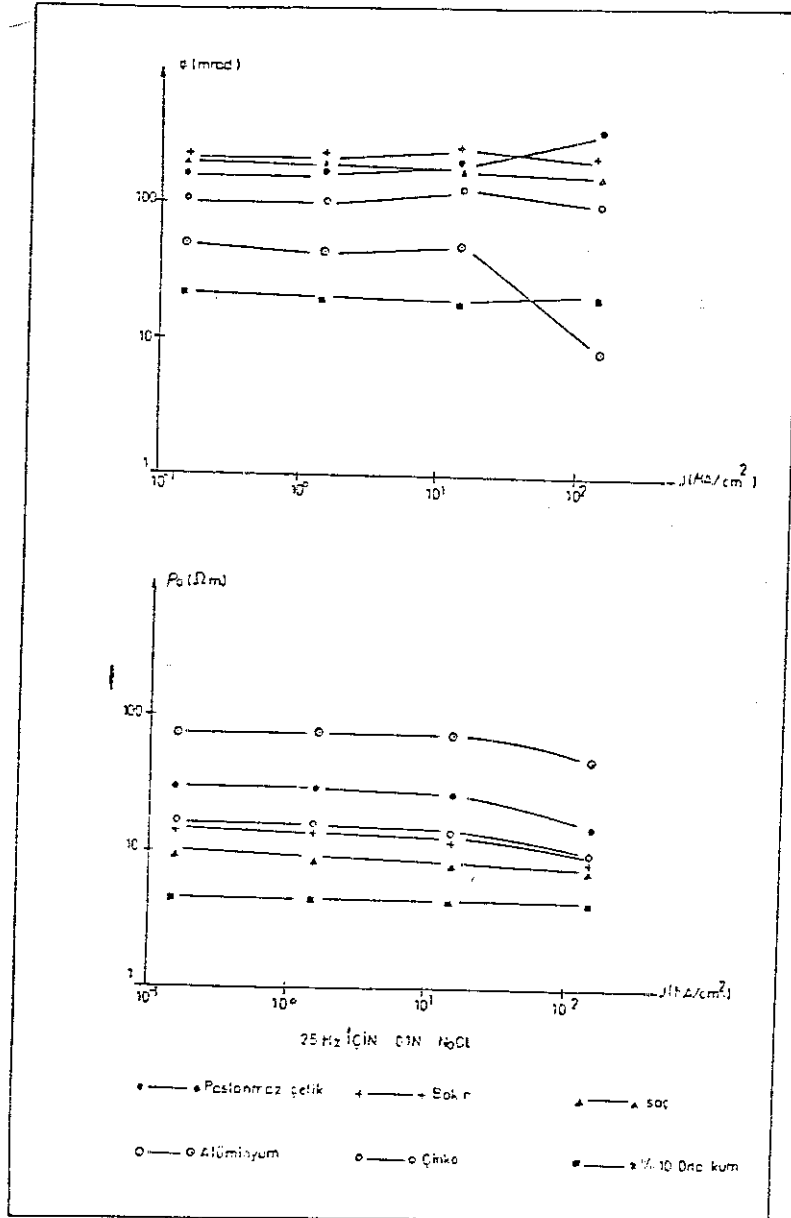
Şekil 6.20 %20 Ince kum içeren kil-kum modelinin öz direnç ve faz spektrumları.

Akım yoğunluğuna göre çizilen özdirenç ve faz değerleri incelenirse .0625 Hz. için; Akım yoğunluğu arttıkça kil-kum modelleri dışında kalan yapay modellerin özdirenç değerleri azalmaktadır. Faz değerleri ise bir kısım modellerde akım yoğunluğu ile azalırken bir kısım modellerde artmaktadır (şekil 6.21).



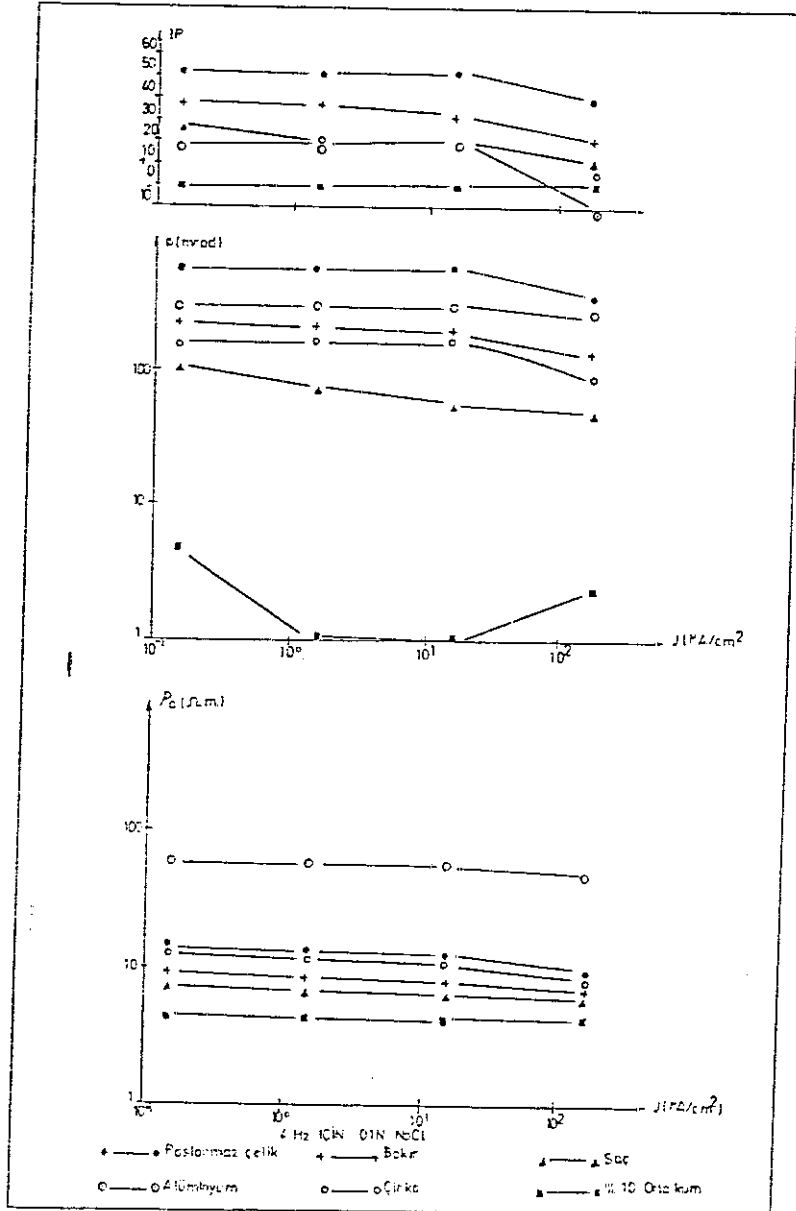
şekil 6.21 Akım yoğunluğuna karşı .0625 Hz. frekansında değişik modellerin özdirenç ve faz değerleri.

Şekil 6.22, bütün modellerin .25 Hz. frekansında akım yoğunluğuna karşı öz direnç ve faz değerleri göstermektedir. Akım yoğunluğu arttıkça kil-kum modeli dışında bütün modellerin öz direnç değerleri azalırken faz değerleri aynı şekilde davranış göstermektedir.



Şekil 6.22 Akım yoğunluğuna karşı .25 Hz frekansında değişik modellerin öz direnç ve faz değerleri.

4 Hz frekansı için akım yoğunluğu arttıkça özdi-
renç değerlerinde azalma görülür. Bu azalma, düşük fre-
kanslara göre daha yavaştır. Faz değerleri ise, tersine,
akım yoğunluğu arttıkça bütün modeller için azalmaktadır.
PFE değerlerinin ise akım yoğunluğu arttıkça azaldığı iz-
lenir (Şekil 6.23).



Şekil 6.23 Akım yoğunluğuna karşı 4 Hz frekansın-
da değişik modellerin özdi-
renç ve faz
değerleri ve IP yanıtları.

Laboratuvar çalışmaları sonunda, literatüre uygun olarak, doğrusal olmayan davranış izlenmiştir. Yanıltıcı olayların önüne geçmek için, özellikle oksitlenmenin, her ölçüme başlamadan önce örnekler iyice temizlenmiştir. Bir çok elektrolit ortamı için deney yapılmasına rağmen oksitlenmeden dolayı elde edilen sonuçlar tez'e konmamıştır. Laboratuvar koşullarının çok elverişli olduğu durumda, doğrusal olmayan davranışın bir çok elektrolit ortamı için sağlıklı olarak saptanabileceği düşünülmektedir.

Bir diğer konu, faz açısı ölçümlerinde, 64 Hz. ve 128 Hz. civarında faz açılarında oluşan gürültüdür. Şehir cereyanının 50 Hz. - 60 Hz. olduğu için bu gürültüler ölçümlere girmiştir. Aynı olay 64 Hz. frekansındaki özdi-renc ölçümleri için de geçerlidir.

Elde edilen veriler, elektrod kutuplaştırması model çalışmalarının, zar kutuplaştırması model çalışmalarına göre daha şiddetli doğrusal olmayan yanıt verdiğini göstermektedir. Ayrıca faz açısının maksimum değerleri çözeltinin cinsi ve örneğe göre düşük veya yüksek frekanslara doğru kaymaktadır. Zar kutuplaştırmasına sahip modellerde doğrusal olmayan davranış daha zayıftır. Bu davranışın kil-kum oranı ve kum tane yarıçapı ne olursa olsun faz açısında daha belirgin olduğu izlenmektedir.

Laboratuvar deneylerinin ortaya koyduğu bir diğer sonuç, doğrusal olmayan IP olayının DC'e yakın frekanslarda daha belirgin olmasıdır ki, Olhoeft (1977), Klein (1978) ve diğer araştırmacıların bulduğu sonuçlarla uyumludur.

7. ARAZI ÇALIŞMALARI

Elde edilen parametrenin arazi uygulamaları için jeolojik özellikleri bilinen sahalar seçilmiştir. Isparta ili civarında su taşıyan ortamlar, zar kutuplaştırması verebilecek ortamlar ve metalik mineral özelliklerine sahip Keçiborlu kükürt yatakları da elektrod kutuplaştırması verebilecek ortam olarak seçilmiştir.

Ortam elektrod veya zar kutuplaştırmasından hangisine sahip olursa olsun, çalışmalar, esas olarak, iki şekilde yürütülmüştür. Öncelikle literatüre uygun olarak, sabit bir elektrod açılımı için akım miktarı artırılarak öz direncin ve IP'nin akımla değişimi incelenmiştir. İkinci olarak, IP (PFE) uygulamalarında iki farklı frekansla çalışılması gibi, sabit ve fakat iki akımda DES. yapılmıştır. Bu çalışmalarda aynı zamanda IP(PFE) uygulamaları da yapılarak parametrelerin karşılaştırılması sağlanmıştır.

Tek aletle çalışma yerine günümüz teknolojisinin en iyilerinden olan farklı aletlerle çalışmanın daha yararlı olacağı düşünülerek bu aletlerle de ölçümler alınmıştır. Bu aletlerle yapılan çalışmalarda sistematik olmamakla birlikte akımın değişimi ile öz direncin de değiştiği izlenmiştir. Buna örnek 1989 da Maden'de MTA'ya ait GGT-25 (Generator and Geophysical Transmitter) verici ve GDP-16 alıcı aletleri ile yapılan çalışmalardır.

7.1. ARAZİDE KULLANILAN ALETLER

Arazi çalışmalarında daha önce tanıtılan GDP-12 alıcı sistemi (Receiver), GGT-6 (Generator and Geophysical Transmitter) verici sistemi, ZMG7.5 (Zonge Motor Generator) jeneratörü ile yardımcı araçlar kullanılmıştır.

Bu yardımcı araçlar, paslanmaz çelik akım ve potansiyel elektrodları, üç çelik-dört bakır telden oluşan kablo sistemi ile voltaj regülatörü ve osiloskoptur.

GGT-6 verici sistemi (Transmitter):

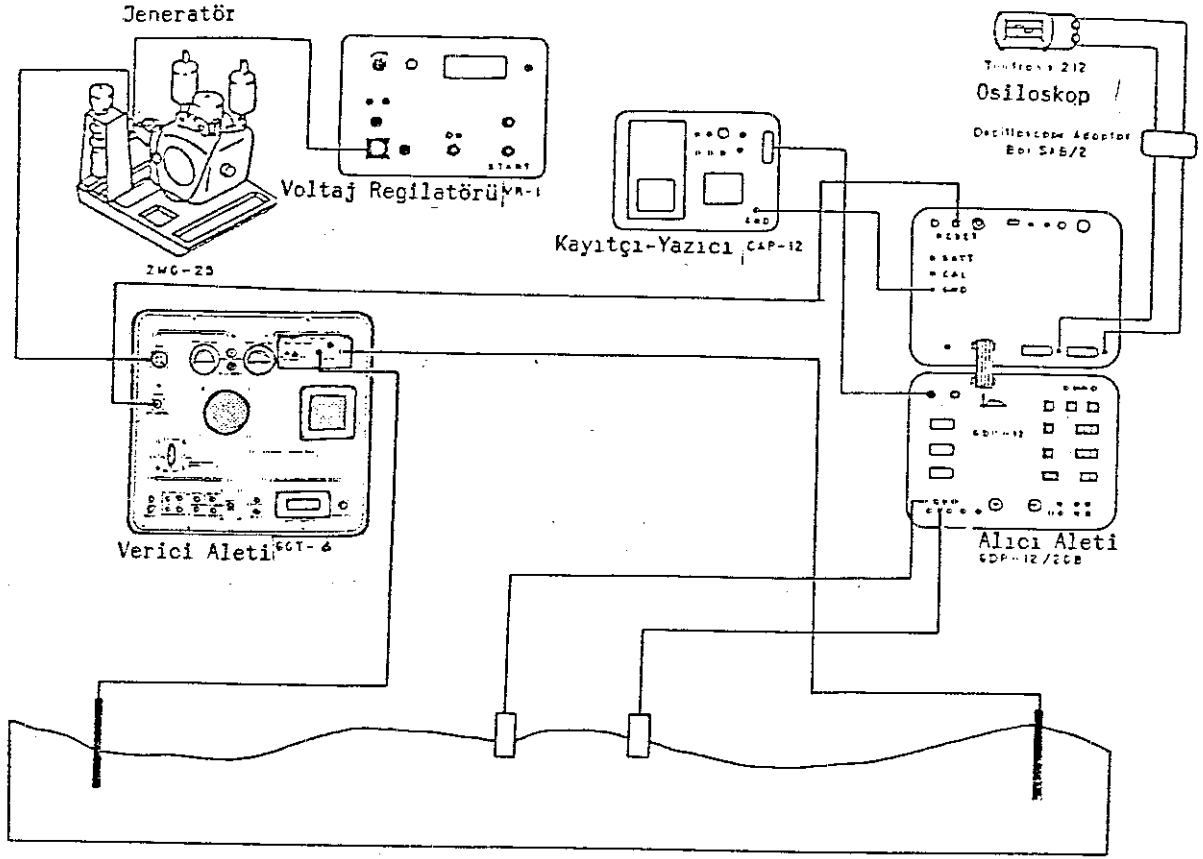
DC'den 10 KHz.'e kadar kare dalga üretebilen 6.25 KW. gücünde bir alettir. Dört kademede 1000 V. çıkış gerilimine sahip olup .2-20 A akım aralığına sahiptir. 400 Hz. - 120 V. girişi olup analog göstergelerden giriş ve çıkış voltajı okunabilmektedir. Akım çıkışı sayısal olup (Liquid Cristal Display, LCD) 3.2 dijittir. Bu nedenle + 10 mA.'lik bir sapma payı ile çıkış akımı okunabilir. Göstergenin bu özelliğinden dolayı, 9.99 A. kadar akım çıkışını okumak olanaklıdır. En önemli özelliklerinden birisi, akımın regüle olup olmadığını göstermesi bir diğeri ise her bir kademeden çalışmasını gösteren lambalarla kademelerde sorun olup olmadığını anlaşılmasıdır.

Yardımcı aletlerden voltaj regülatörü (VR), jeneratörden çıkan 400 Hz.- 120 V. alternatör çıkışının duraylı durumda tutar. Bu da vericinin akım çıkışında duraylılık sağlamaktadır.

ZMG7.5 Jeneratörü 400 Hz. - 120 V. çıkışa sahip ve 7.5 KW. gücündedir. Benzin motorlu olup alternatör dışardan soğutmalıdır (Şekil 7.1).

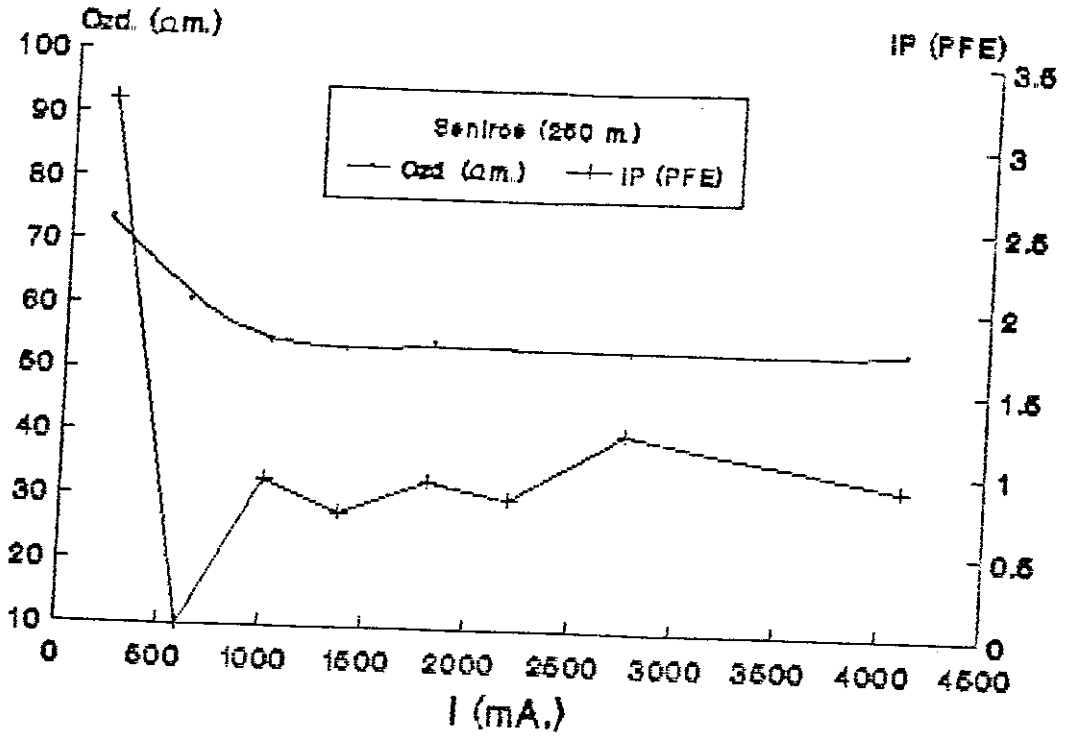
7.2. AKIM-ÖZDİRENÇ İLİŞKİSİ

Seçilen jeolojik ortamlarda öncelikle elektrod açılımı sabit tutularak akım miktarı artırılmıştır. Böylece akım ile öz direnç ve IP'nin sabit elektrod açılımında, davranışı incelenmiştir. (5.2.8) bağıntısı kullanılarak PCE değerleri hesaplanmıştır.



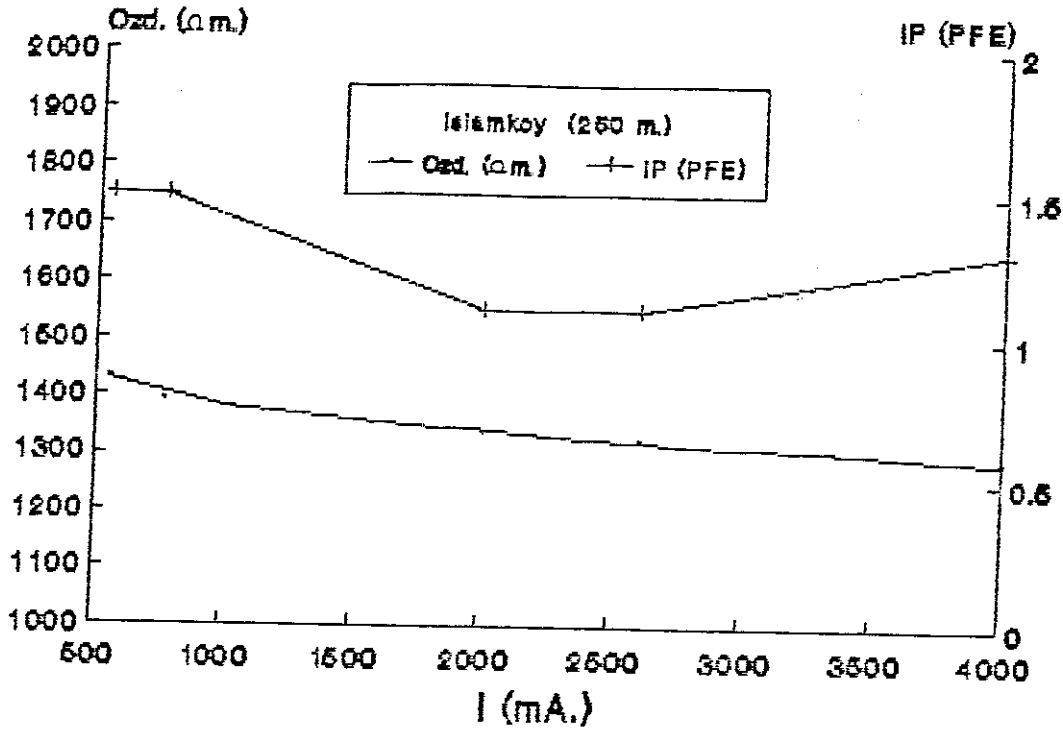
Şekil 7.1 Arazide kullanılan aletler ve ölçüm düzeneği.

İlk örnekler yeraltısuyu seviyesi 100 m. civarında derinliğe sahip yerortamları içindir. Senirce (Isparta) ovasında alüvyon kalınlığı 150 m. dir. Burada 250 m. elektrod açılımı için ölçümler alınmıştır (Şekil 7.2). Öz direncin, 1500 mA. akım değerine kadar azaldığı, bu değerlerden sonra ise, yaklaşık olarak, sabit kaldığı gözlenir. İP ise 200 mA. de max. değerini almakta, yüksek akımlarda ise 1 değeri civarında salınımlar yapmaktadır. Burada $I_1=200$ mA ve $I_2=4000$ mA akımları için elde edilen görünür öz dirençlerden $PCE=26.1$ olarak bulunmuştur.



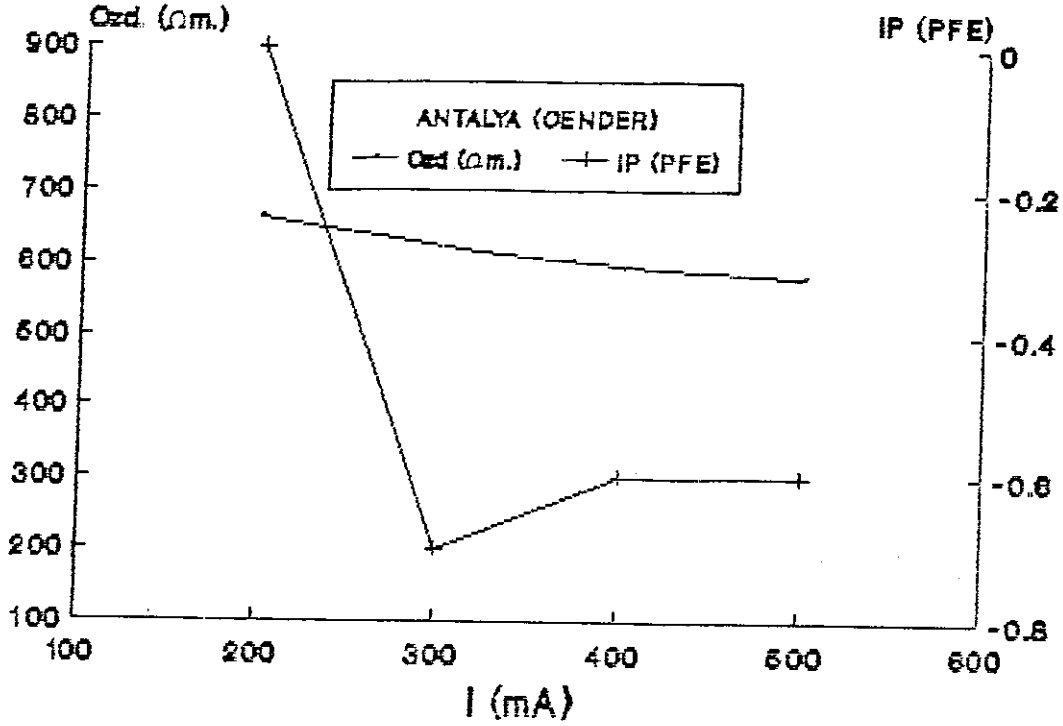
Şekil 7.2 Alüvyon ortamında $AB/2 = 250$ m. için akım-özdirenç ilişkisi (Senirce-Isparta).

Yeraltısuyu seviyesinin 100 m. derinliklerde olduğu bir diğer örnek aynı zamanda üst katmanları masif kireçtaşı temsil edebilecek olan İslanköy (Isparta) uygulamasıdır. 150 m. kalınlığa sahip kireçtaşının alt kısımları karstifiye olmuştur ve fliş seviyeleri ile devam etmektedir. Böyle bir ortamda karstifiye olmuş seviyeler ancak $AB/2 = 250$ m. elektrod açılımında özdirenç ölçüsünde görülebildiği için sabit açılım $AB/2 = 250$ m. olarak alınmıştır (Şekil 7.3). Düşük akım seviyesi 500 mA. civarında olmasına karşılık 4000 mA. kadar özdirenç azaldığı izlenir. IP maksimum değerini yine düşük akımlarda olmaktadır. $I_1=500$ mA ve $I_2=4000$ mA için elde edilen görünür özdirençlerden $PCE=9.7$ olarak bulunmuştur.



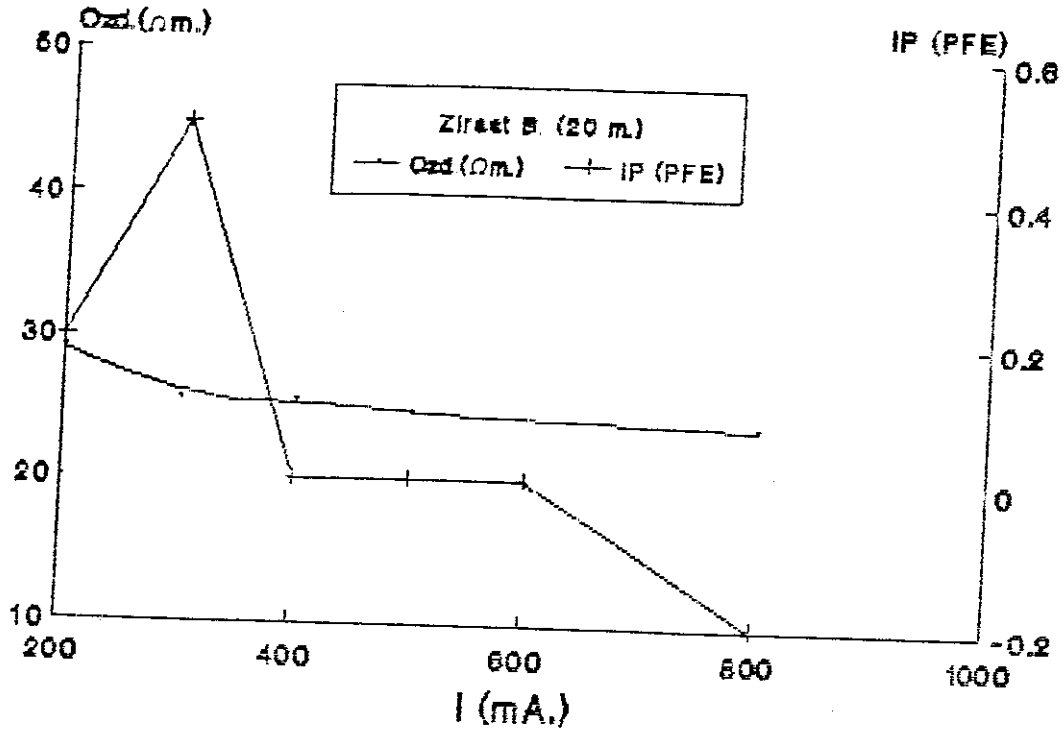
Şekil 7.3 Kireçtaşı ortamında $AB/2 = 250$ m.
için akım-özdirenç ilişkisi
(Islamköy-Isparta).

Dirençli yer ortamına bir diğer örnek Antalya travertenleridir (Şekil 7.4). Deniz suyu girişiminin 40 m. civarında olduğu bilinmektedir. $AB/2 = 6$ m. alınarak doğrudan travertenlerin etkisi incelenmiştir. Özdirenç akım ile azalırken, IP yanıtının olmadığı izlenir. Bu örneğin bir özelliği, IP yanıtı bulunmamasına karşılık, özdirencin akım ile değişmesidir. $I_1=200$ mA ve $I_2=500$ mA için elde edilen görünür özdirençlerden $PCE=12.7$ olarak bulunmuştur.



Şekil 7.4 Traverten ortamında $AB/2 = 6$ m. için akım-özdirenc ilişkisi (Antalya).

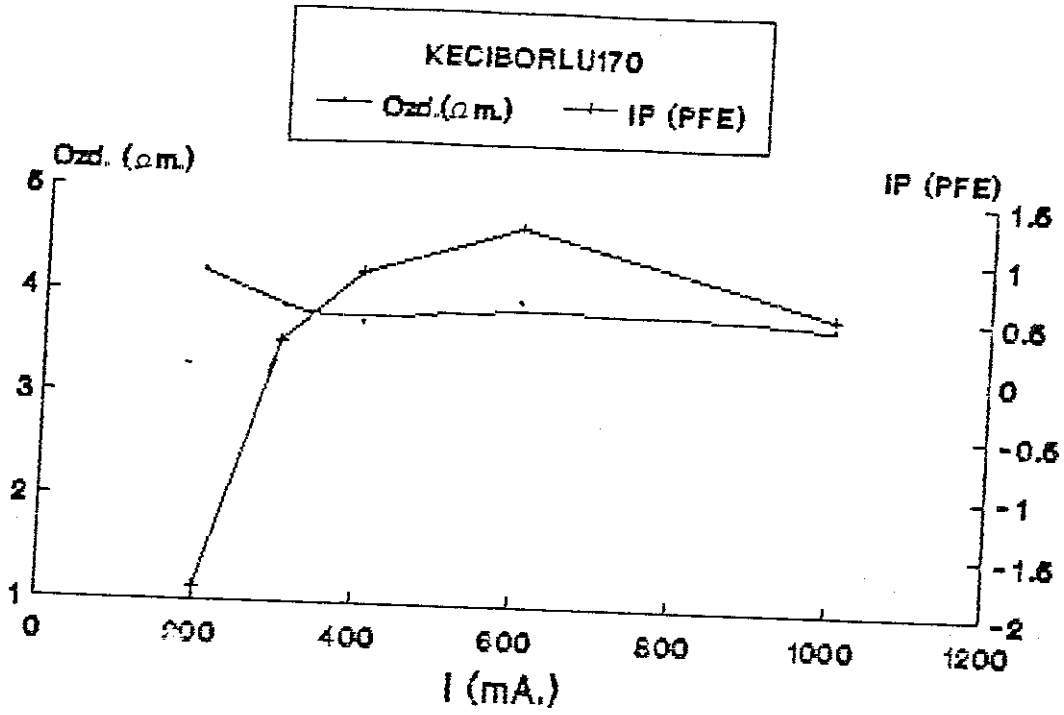
Kalın alüvyon ortamında yeraltısuyu seviyesinin sığ olması durumuna örnek Eğirdir (Isparta) civarındaki grabendir. Yeraltı suyu seviyesi 5-6 m. dir. Böyle bir ortamda $AB/2 = 20$ m. için akımın artması ile özdirenc ve IP'nin azaldığı izlenir (Şekil 7.5). Burada $I_1=200$ mA ve $I_2=800$ mA akım değerlerinden elde edilen $PCE=17.2$ dir.



Şekil 7.5 Alüvyon ortamında $AB/2 = 20$ m. için akım-özdirenç ilişkisi (Egirdir-Isparta).

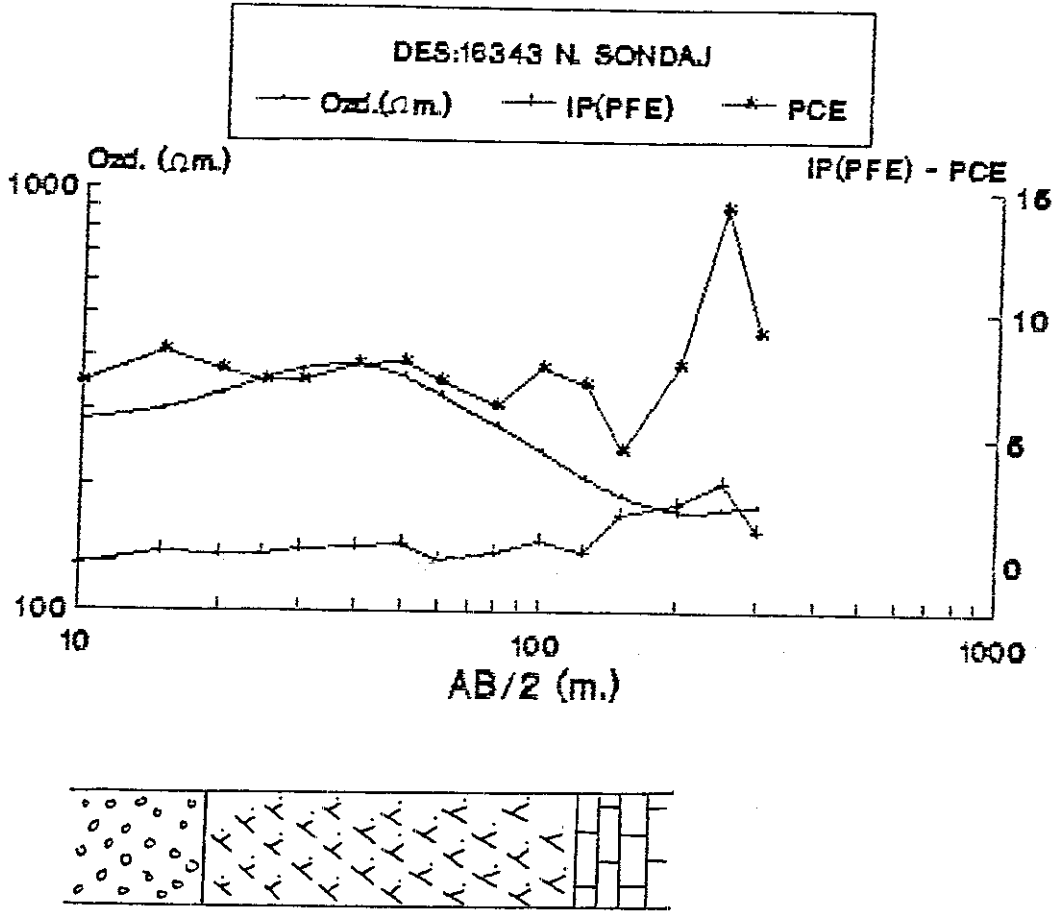
Metallik mineral yatağına örnek, Keçiborlu Kükürt yatakları üzerinde alınan ölçümdür. 170 No'lu mekanik sondajda 10 m. de cevher kesilmiştir. $AB/2 = 12.5$ m. için alınan ölçüm şekil 7.6 da gösterilmiştir. Akımın artması ile özdirençde azalma izlenirken IP düşük akımlarda negatif değer almakta yüksek akımlarda ise azalmaktadır. Burada $I_1=200$ mA ve $I_2=800$ mA akım değerleri kullanılarak elde edilen görünür özdirenç değerlerinden $PCE=10.5$ dir.

Düşey elektrik sondajı (DES) şeklinde yürütülen ikinci grup çalışmalar hem zar kutuplaştırmasına sahip ortamlarda hem de elektrod kutuplaştırması içeren ortamlarda ve sabit iki akım değerinde yürütülmüştür. GGT-6 vericisinin çıkışı .2-20 A olduğu için en düşük akım değerine yakın bir akım ve 1000 mA civarında bir diğer akım değeri sabit akımlar olarak seçilmiştir.



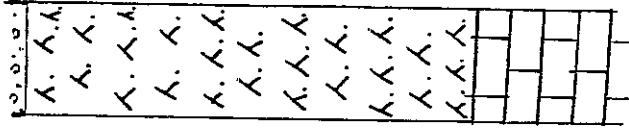
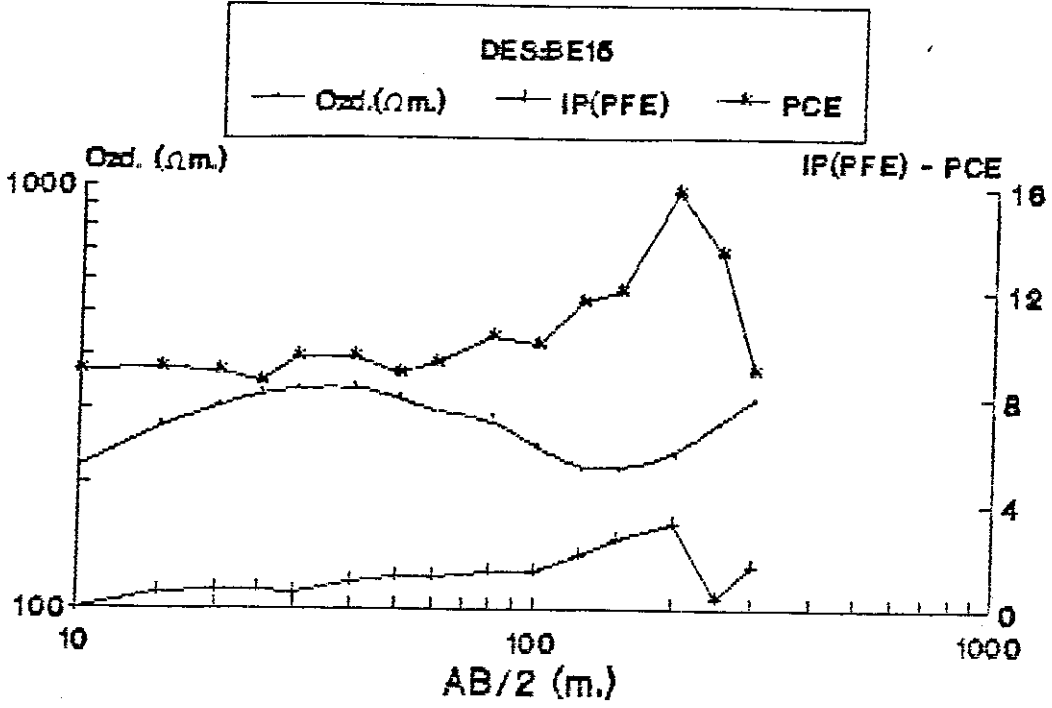
Şekil 7.6 Metalik mineral ortamında $AB/2=12.5$ m. için akım-özditenc ilişkisi (Keçiborlu, Isparta).

DSİ tarafından açılan 16343 No'lu sondaj kuyusu 55 m. civarında yeraltısuyu taşıyan tuf'ü kesmiş ve 165 m.'ye kadar devam etmiştir. Jeolojik olarak 20 m.'ye varan alüvyon, daha altta 140 m. derinliğe kadar tuf ve altta kireçtaşı bulunmaktadır. Böyle bir yerortamı üzerinde alınan DES ölçüsü şekil 7.7 da gösterilmiştir. IP (PFE) değerlerinin $AB/2=150$ m. açılımından sonra büyüdüğü ve 250 m. de 4 civarında değer aldığı izlenir. PCE parametresinin ise IP ile uyumlu olduğu $AB/2 = 250$ m. için max. değerini aldığı ve anomalinin daha belirgin olduğu görülür. Kullanılan akımlar $I_1=400$ mA. ve $I_2=1000$ mA dir. Yeraltısuyunun etkilemediği üst seviyelerde hem PFE hem de PCE yanıtlarının daha zayıf olduğu izlenir.



Şekil 7.7 16343 No'lu sondaj kuyusunda alınmış DES ölçümleri (Isparta).

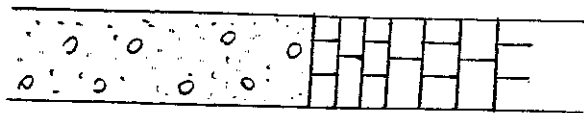
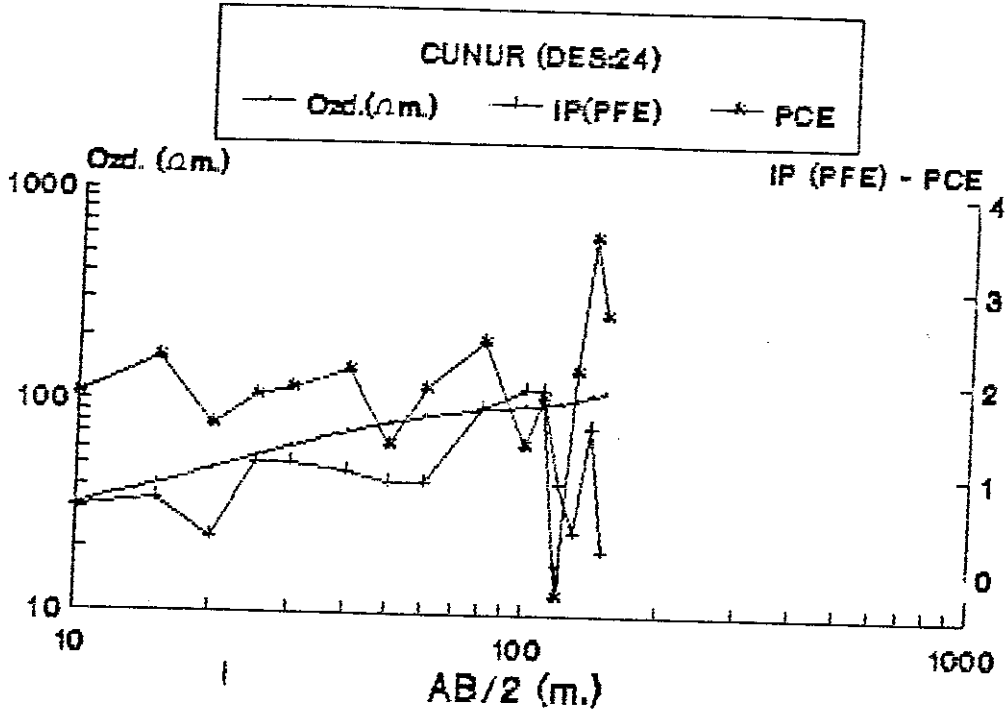
Benzer bir ölçüm 16343 No'lu sondaj kuyusundan 2 km. kadar batı'da alınmıştır. Jeolojik yapılanma, yaklaşık olarak, aynıdır. Fakat burada kireçtaşının daha sığ olduğu gözlenir. Hem IP hem de PCE parametreleri 200 m. de max. değerlerini almaktadırlar. Bu durum, öz direnç eğrisi ile de uyumludur (Şekil 7.8). Burada kullanılan akımlar $I_1=300$ mA. ve $I_2=900$ mA. dir.



Şekil 7.8 Sondaj kuyusu bulunmayan benzer karakterli bir ortamda alınmış DES. ölçümleri (Isparta).

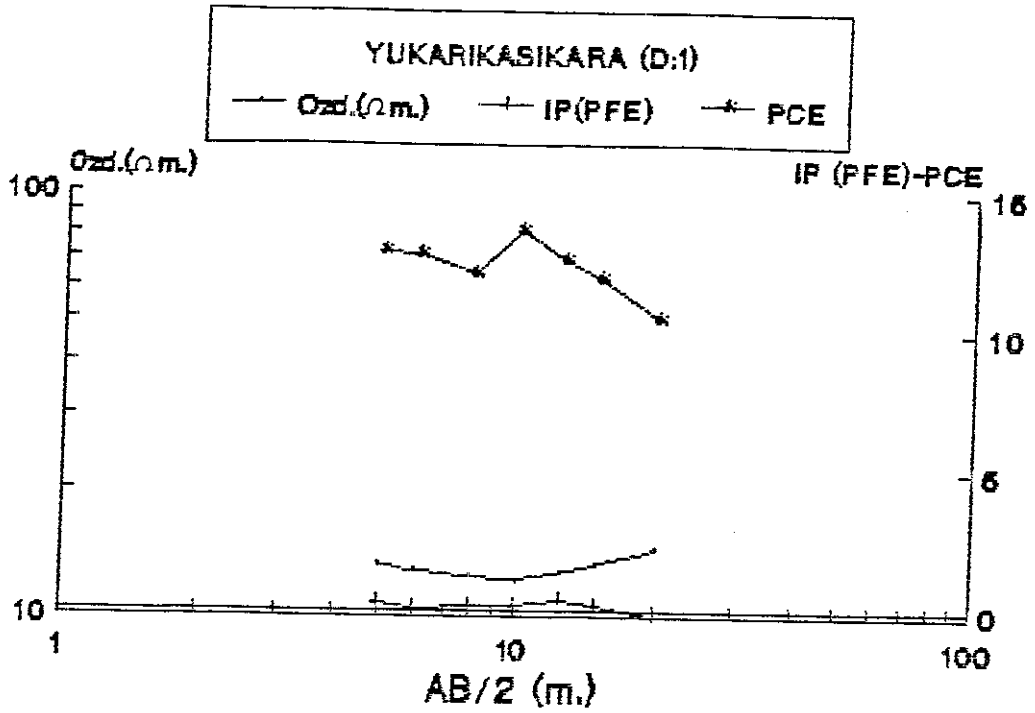
Yeraltısuyu taşımayan bir jeolojik ortamda alınan ölçümler şekil 7.9 da gösterilmiştir. Jeolojik olarak alüvyon, plaketli kireçtaşı ve kireçtaşı istifli şeklinde bir ortamdır. Yeraltısuyu için açılan sondaj kuyusunda kömür kırıntısı kesilmiştir. 100 m. ler civarında kesilen kömürün etkisi, $I_1=600$ mA. ve $I_2=800$ mA. olmasından dolayı düşük genlikli olmasına karşı oldukça belirgindir. Yaklaşık 180 m. derinliğe kadar devam eden mekanik sondajda su taşıyan birimlere rastlanmamıştır.

Kömür taşıyan yerortamına ait bir diğer DES ölçüm sonuçları şekil 7.10 da gösterilmiştir. Ölçüm alınan yer ortamında üstte 8 m. kadar kalınlığa sahip alüvyon ve onun altında kalınlığı yer yer 10 m. yi bulan kömür bulunmaktadır. İzlendiği gibi, IP yanıtı çok küçüktür. PCE yanıtı ise 10 m. de anomali bulunan bir grafik çizer. $I_1=200$ mA. ve $I_2=500$ mA. dir.



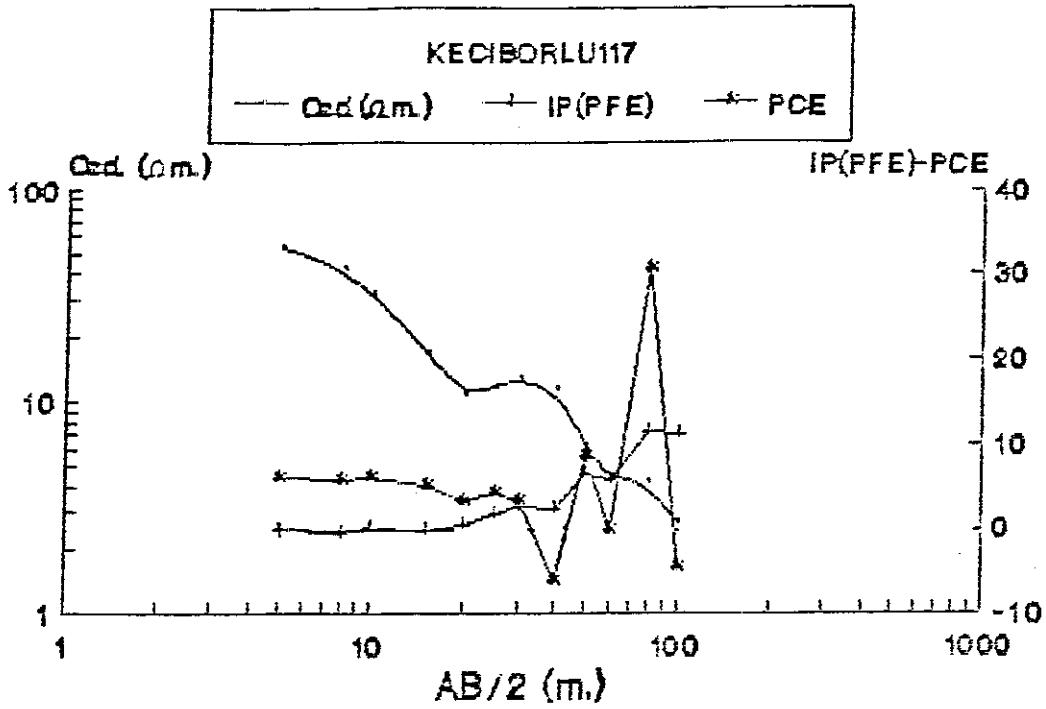
Şekil 7.9 Kömür taşıyan bir yerortamı üzerinde alınmış DES ölçümleri (Isparta).

Metalik mineral içeren ortam için çalışmalar Ke-çiborlu kükürt yatakları üzerinde yürütülmüştür. $I_1=400$ mA. ve $I_2=1000$ mA. dir. Yerortamı, 15 m. derinliğe kadar kireçtaşı parçaları da içeren alüvyon, 35 m. derinliğe kadar piritli-opalize zon, 35 m.- 50 m. arasında cevher ve daha sonra serpantin ve kireçtaşı şeklindedir. IP, ya-pıya uygun olarak, 10 civarında değer alırken PCE'nin de aynı metreler için anomali verdiği izlenir (Şekil 7.11).



Şekil 7.10 Kömür taşıyan bir yerortamı üzerinde alınmış DES ölçümleri (Isparta).

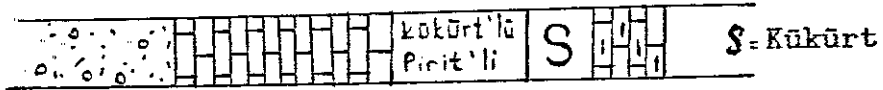
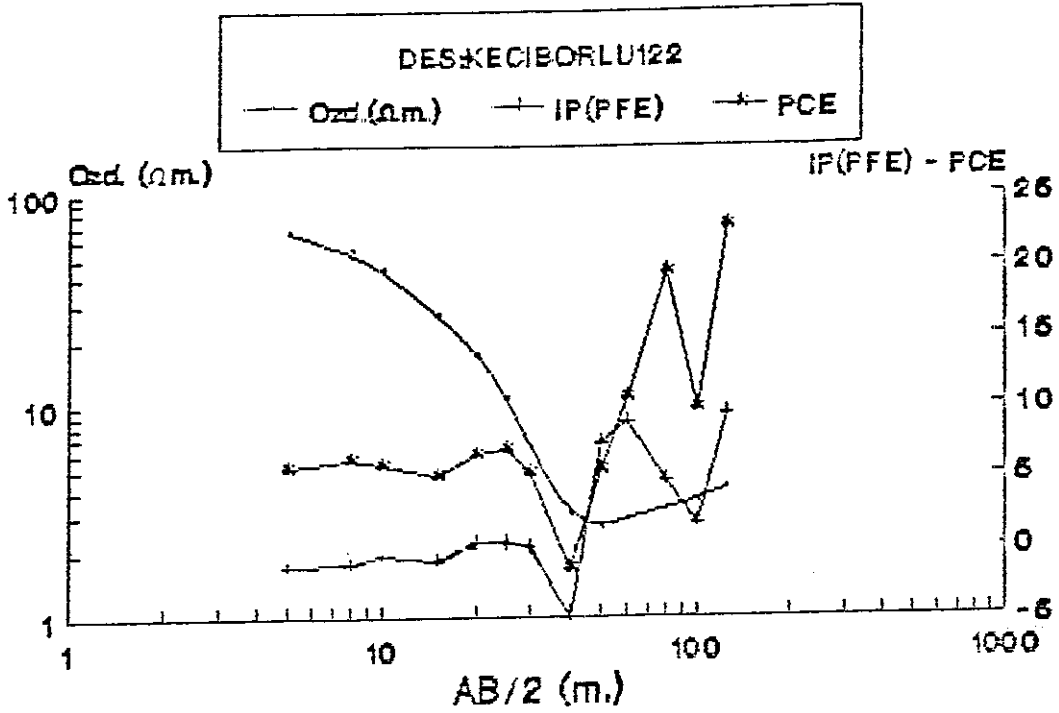
Aynı konuda bir diğer örnek şekil 7.12 de gösterilmiştir. Jeolojik yapı, 15 m. ye kadar kireçtaşı parçaları içeren alüvyon, 40 m. ye kadar kükürtlü-piritli opalize zon, 40-66 m. ler arası cevher ve daha sonra kireçtaşı şeklindedir. Burada da jeolojik yapıya uygun olarak IP, 10 civarında değer alırken PCE parametresinin de yüksek genlikli anomali verdiği izlenir.



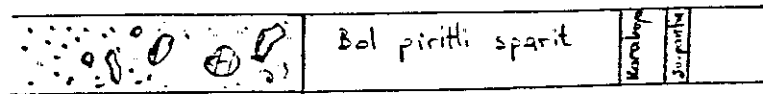
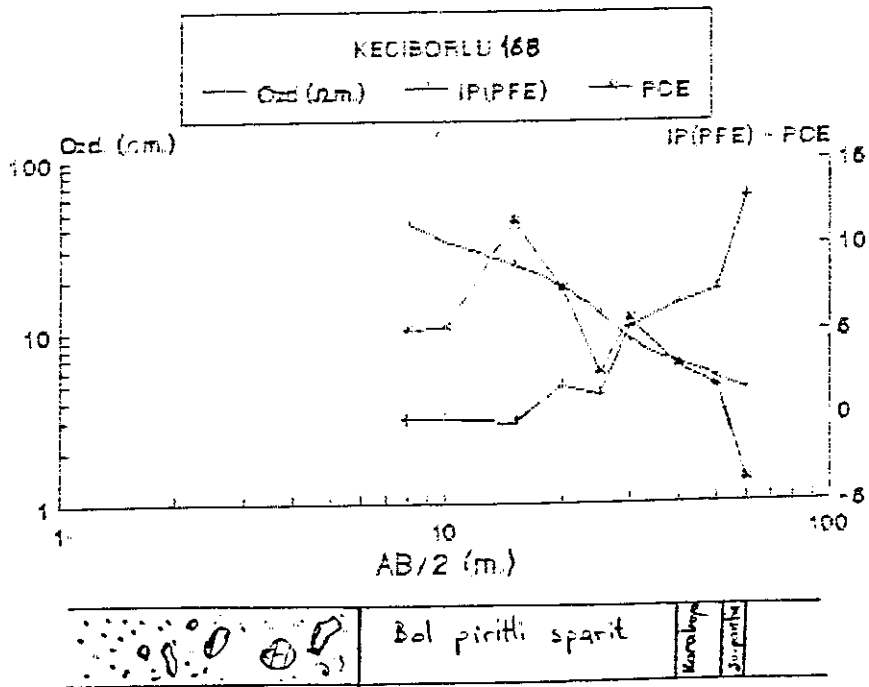
Şekil 7.11 Metalik mineral ortamı üzerinde DES ölçümleri (Keçiborlu-Isparta).

Aynı yerde cevher taşımayan bir başka mekanik sondaj üzerinde alınan ölçümler Şekil 7.13' de gösterilmiştir. Şekil 7.11 ve 7.12' de cevher anomalisi pozitif yönde büyürken cevher taşımayan ortamda PCE yanıtının negatif yönde arttığı izlenmektedir.

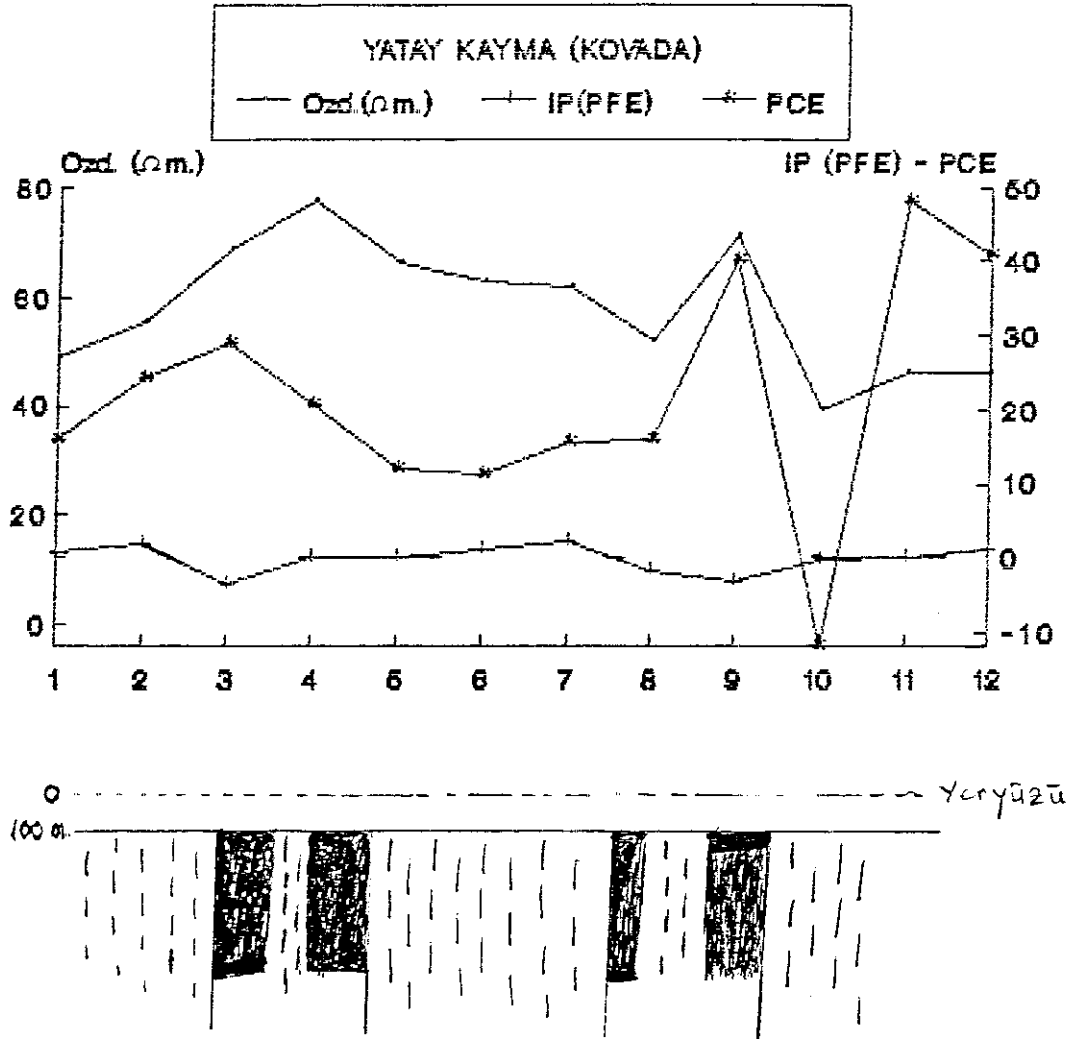
Yatay kayma çalışmalarında, yanıl süreksizliklerin PCE yanıtını izlemek amacıyla da uygulamalar yapılmıştır. Bu konuda bir örnek şekil 7.14 de gösterilmiştir. $AB/3=100$ m. ve $I_1=200$ mA. ve $I_2=500$ mA. dir. İzlendiği gibi, IP çok büyük değerlere sahip değildir. Öz direnç ve PCE değerlerinin uyumlu olduğu ve 9-10 no'lu ölçüm noktaları arasındaki yanıl değişimi PCE'nin daha belirgin verdiği izlenir.



Şekil 7.12 Metalik mineral ortamı üzerinde DES ölçümleri (Keçiborlu-Isparta).



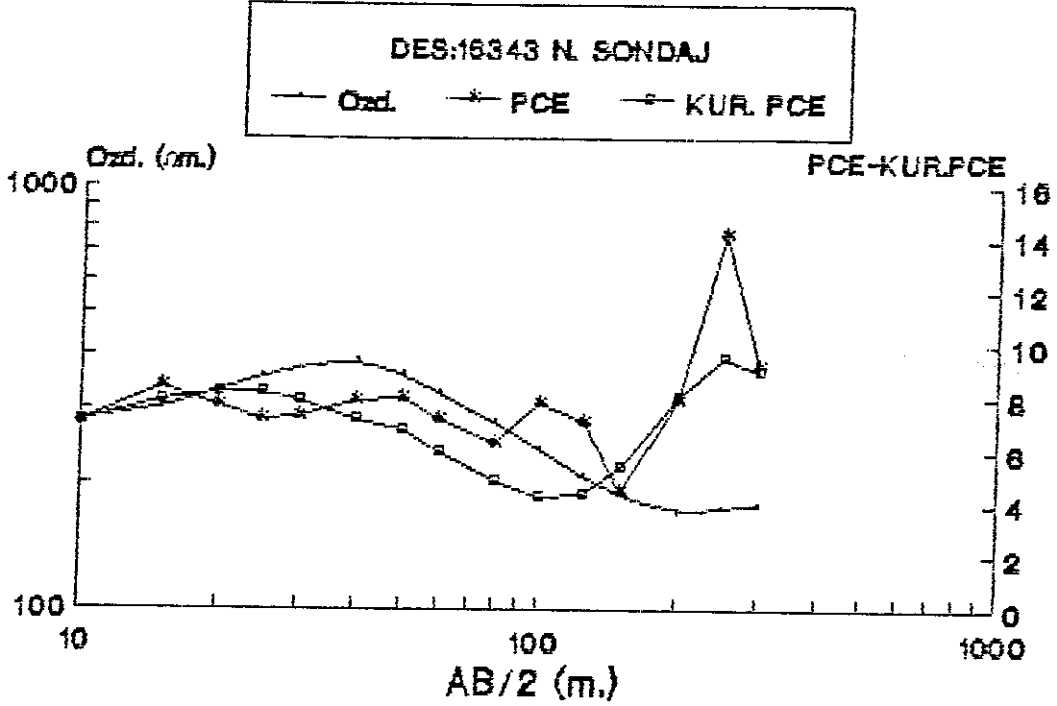
Şekil 7.13 Metalik mineral taşımayan bir ortam üzerinde DES ölçümleri (Keçiborlu).



Şekil 7.14 Yatay kayma çalışmalarında PCE parametresi (Isparta).

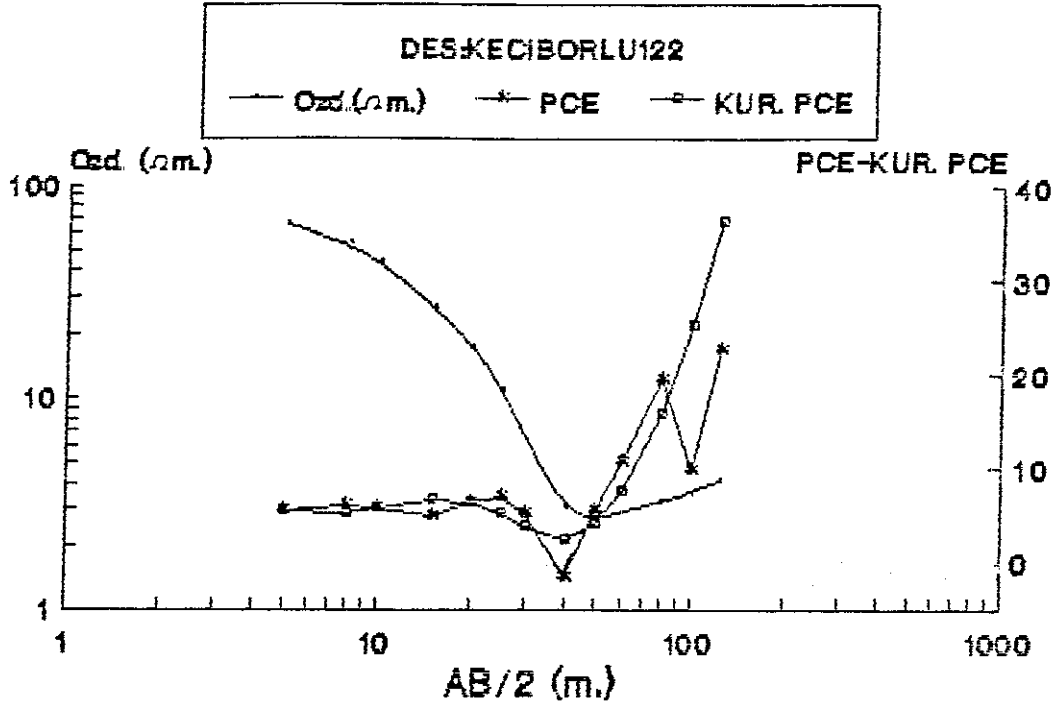
Yatay kayma çalışmalarına bir diğer örnek, kireçtaşı ile yanyana bulunan bir limonit yapısına aittir. Böyle bir ortamda önceden yapılan test çalışmalarında IP yanıtı elde edilememiştir. Sadece öz direnç ve PCE parametreleri ölçülmüştür (Şekil 7.15). $AB/3=10$ m. ve $I_1=200$ mA. ve $I_2=500$ mA. dir. Öz direncin, başlangıç noktalarındaki yükselme ve düşmeleri kireçtaşı ve çatlakları arasına dolan limonitlerden kaynaklanmaktadır. Yaklaşık 14-20 no'lu noktalar arası ise limonittir ve PCE maksimum değerlerini almaktadır.

Şekil 7.7 de verilen 16343 No'lu sondaj kuyusu örneği için kuramsal olarak hesaplanan PCE eğrisi şekil 7.16 da gösterilmiştir. Kuramsal olarak hesaplanan eğrinin, genel olarak, arazi verisi ile uyumlu olduğu izlenir.



Şekil 7.16 16343 No'lu sondaj kuyusu için hesaplanan kuramsal ve arazi PCE eğrileri.

Bir diğer örnek metalik mineral taşıyan ortamlardan seçilmiştir. Şekil 7.12 de verilen Keçiborlu 122 No'lu sondaj kuyusu için hesaplanan kuramsal PCE eğrisi Şekil 7.17 de gösterilmiştir. Arazi eğrisinde 100 m. de varolan düşmenin kuramsal egride bulunmadığı izlenir. Bu durum her iki akımda elde edilen görünür öz direnç eğrilerinin farklı olması nedeniyle katman parametrelerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 7.17 Metalik mineral yatağı üzerinde elde kuramsal ve arazi PCE eğrileri.

Arazi çalışmaları sonucu, değişik yerortamları üzerinde yürütülen çalışmalarda, ortama göre PCE yanıtları elde edilmektedir. Bu yanıt aynı zamanda seçilen akım miktarlarına da bağlıdır. Çalışmalarda görülmüştür ki, yere verilen yaklaşık 1500 mA. akım değerinden sonra, sabit elektrod açılımı için, öz direncin değişimi çok küçüktür. Sabit elektrod aralığı kaç metre olursa olsun, elde edilen sonuç yaklaşık olarak hep bu şekildedir. Varolan kablo sistemi ile yere verilebilen max. akım 5000 mA. olmuştur. Çok yüksek akım değerlerinde ise Scott ve West (1969) da belirtildiği gibi, non-lineer sınırın dışına çıkılabileceği için PCE yanıtı elde etmek güçtür. Benzer sonuçlara Erdoğan R. (1988) de ulaşmıştır ve bu olay McPhar ölçüm aletleri ile denenmiş ve yaklaşık 700 mA. den

sonra özdirencin çok az değiştiği gözlenmiştir (kişisel görüşme, 1989). Bu nedenle arazi uygulamaları için, çalışılacak arazinin büyüklüğüne göre akım testleri yapılmalı ve bilinen yerlerde yapılan testlere göre yüksek ve düşük akım sınırları belirlenmelidir.

Akımdan çok, akım yoğunluğunun sabit tutulması daha yararlı olabilir. Fakat Bölüm 5'de görüldüğü gibi, katmanların özdirenç ve kalınlıklarına bağlı olmakla birlikte, elektrod açılımı değeri artırıldığıça, sabit akım için, akım yoğunluğu değeri azalmaktadır. Akım yoğunluğu değerini sabit tutmak için, akımı sürekli artırmak gerekmektedir. Bu ise, yaklaşık 50 m. lik elektrod açılımı için, ortamın özdirenci ve kalınlığına göre, 20 A. ve üzerinde akımı gerektirir. Yukarıda belirtildiği gibi, gerekli teknoloji ile bu mümkün olabilir.

Çalışmaların ortaya koyduğu bir diğer gerçek, mümkün olduğu kadar, sabit veya birbirine yakın akımlarla çalışılması zorunluluğudur. Her açılım değeri için farklı akım kullanmak, farklı özdirenç değerlerinin ölçümünü verir ki, bu, yerortamının gerçek durumunu ortaya koymayı güçleştirir.

Arazi çalışmalarında, yüksek akımlarda IP'nin, genel olarak, azaldığı izlenmiştir. Bu durum ise literatüre uygundur. Ayrıca IP ve PCE'nin genlik farkı ile, genel olarak uyumlu olduğu izlenir. IP yanıtı vermeyen ortamlarda da, zaman zaman PCE yanıtı elde edilebilmektedir (Antalya travertenlerindeki gibi). Bu durum, IP vermeyeceği düşünölen yerortamlarında çok az nemliliğin dahi akımın geçmesini etkilemesinden kaynaklanabilir.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, literatür, laboratuvar ve arazi incelemelerine göre yapay olarak kutuplaştırılabilen jeolojik ortamların, kutuplaştırılabilme yeteneğine bağlı olarak az veya çok doğrusal olmayan IP yani belirli bir frekansa akımla öz direnç değişimi göstermekte oldukları sonucuna varılmıştır.

Akımla öz direncin değişim şeklinin öz direncin frekansla değişim şekline, yaklaşık olarak, benzediği görülmüştür. Bu yaklaşık benzerlikten yararlanarak değişken frekanslı IP de olduğu gibi iki farklı frekansta öz direnç ölçüsü olarak, bir frekans etkisi (PFE) parametresi tanımlanmasına eşdeğer olarak, doğrusal olmayan başka bir deyişle değişken akımlı IP olayında da, iki farklı akımda öz direnç ölçüsü olarak bir akım etkisi parametresi (PCE) tanımlamak mümkün olmuştur. Bu tanımlanan akım etkisi parametresi, kuramsal olarak katmanlı ortamların geometrik etkisi göz önüne alınarak incelenmiş ve kutuplaştırılabilen bir katmanın olması durumunda bir anomali verebileceği gösterilmiştir.

Laboratuvarda yapılan araştırmalar sonucu, metalik ortamları temsil edebilecek yapay örneklerin akım yoğunluğuna bağlı davranışı doğrusal değildir ve bu doğrusal olmayan özellik doğal örneklerle göre çok şiddetlidir. Ayrıca örneklerin faz açısının maksimum değeri, model ve model'in içerisinde bulunduğu elektrolit konsantrasyonuna göre yüksek veya alçak frekanslara doğru kaymaktadır. Ancak faz açısının sözkonusu maksimum değer aldığı frekans değeri uygulanan akım yoğunluğu ile değişmemektedir. Laboratuvar sonuçlarına göre doğrusal olmayan davranış DC'e yakın frekanslarda daha etkindir ki, bu sonuç literatüre uygundur.

Doğrusal olmayan davranış, mineral ayırımı için kullanılmakla birlikte, arazide yapılan çalışmalar sonucu, DES'da iki farklı akım kullanılarak mineral ayırımı yapılamayacağı, fakat yeraltısuyu, kömür ve metalik mineral taşıyan ortamların yapısal olarak ayırımlarının yapılabileceği gösterilmiştir. Ayrıca elde edilen PCE parametresinin yatay kayma çalışmalarında kullanılması ile yanıl değişimlerin saptanmasının olanaklı olduğu izlenmiştir. Bu çalışmalar, geliştirilen PCE parametresinin, çoğu kez, IP parametresi (PFE) ile uyumlu olduğu göstermiştir. Bu açıdan PFE-PCE parametrelerinin birlikte kullanılması daha sağlıklı çözüm gücüne sahip olmaktadır.

Arazi ile ilgili bir diğer sonuç, tekdüze çalışmalarda rastgele akım kullanılmaması gerektiğidir. Elektrod açılımı değiştiği zaman akımın değiştirilmesi varolan farklı değerlerin ölçülmesine neden olabilir. Bu nedenle arazi çalışmalarında birkaç noktada akım testleri yapılmalı ve gerek geliştirilen parametre gerekse tekdüze çalışmalar için en uygun akım değerleri saptanmalıdır.

Doğrusal olmayan IP olayının bir diğer üstünlüğü getirdiği ekonomik katkıdır. Bilindiği gibi, IP çalışmalarında kullanılan aletler istenen seviyede ve frekansa AC üretebilme yeteneğinden dolayı oldukça karmaşık ve pahalıdır. PCE parametresini ölçerken ise DC'e yakın veya sadece DC'de çalışmak yeterli olacağı için istenen seviyelerde akım üretebilen bir alet ile ölçüm almak olanaklıdır. Bu ise pahalı ve karmaşık ölçü aletleri yerine daha ekonomik ve basit aletlerle çalışmayı gerektirebilir.

Bilindiği gibi değişken frekanslı IP'de ve zaman ortamı IP çalışmaları sırasında doğal kaynaklı veya insan eliyle olan yapay kaynaklı gürültüler ölçümleri etkilemektedir. Çalışmalar, DC veya ona yakın tek frekansta iki akım uygulanarak değişken akımlı IP'deki akım etkisi parametresinin (PCE) anılan gürültülerden etkilenmeyeceği bu nedenle de daha sağlıklı veriler elde edilebileceğini ortaya koymaktadır.

Literatürde belirtilen; yeraltısuyu pH'ı, akımın dalga şekli, akımın doğrultusu, elektrod açılım türü ve akım yoğunluğu gibi, doğrusal olmayan olayı etkileyen etkenlerden, bu çalışmada, akımın dalga şekli, akım yoğunluğu ve elektrod açılım türü denetlenmiştir. Çalışma süresince kare dalga kullanılmıştır. Akım yoğunluğu literatüre uygun olarak alınmış ve yine literatüre uygun sonuçlara ulaşılmıştır. DES çalışmalarında Schlumberger açılımı kullanılırken yatay kayma çalışmalarında Wenner açılımı kullanılmıştır. Dipol-diol açılımı ile bir ölçüm alınmış fakat bunlar teze konmamıştır. Bu çalışmalardan, doğrusal olmayan davranışı saptamada elektrod açılım türünün incelenen problemle ilişkilendirilmesi gerektiği sonucuna varılabilir.

Özetle doğrusal olmayan IP özelliğinden yararlanarak tanımlanmış PCE parametresinin PFE parametresine uyumlu değiştiği ve bu iki parametrenin ortak kullanımı ile jeolojik yapıların yapısal ayırımlarının daha sağlıklı olarak yapılabileceği sonuçlarına varılmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu doktora tezimin hazırlanmasında ve gerçekleştirilmesinde, her aşamada, çalışmalarımı yönlendiren, yapıcı öneri ve eleştirileri ile sürekli destek veren, ayrıca fakülte ve bölümümüzün olanaklarını sağlayan, sürekli desteklerini benden esirgemeyen hocam sayın Prof. Dr. Ali Keçeli'ye en içten teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım.

Değerli eleştiri ve literatür katkılarından dolayı Sayın Prof. Dr. Kurultay Öztürk'e teşekkür ederim. Görüşmelerimde değerli bilgi ve deneyimlerini esirgemeyen, eleştirileri ile yardımcı olan Sayın Doç. Dr. A. Tuğrul Başokur'a, destekleyici tutumuyla beni sürekli teşvik eden Sayın Dr. A. Ergun Türker'e ve matematik işlemleri sırasındaki yardımlarından dolayı Sayın Doç. Dr. Serpil Pehlivanlı'ya teşekkür ederim.

Arazi çalışmaları sırasında, bana zaman ayırarak yardımcı olan MTA personelinden Sayın Jeofizik müh. Cemal Kaya ve Sayın Jeofizik müh. Remzi Erdoğan'a; gerek arazi gerek ise laboratuvar çalışmalarında yardımlarını gördüğüm Sevgili öğrencilerimiz Jeoloji Mühendisleri İrfan Kınalı ve Halil Ceylan'a; maden müh. Vedat Deniz'e; her türlü yardımları için jeoloji müh. Kürşad Çınar'a; bilgisayar programlarında kütük programlarının hazırlanmasında yardımcı olan Jeoloji Müh. Rıdvan Battal'a teşekkür ederim. Tezimin bir kısmının yazımında emeği geçen Sevgili eşim Hatice Kaya ile Sayın Selma Aksoy ve Sayın Fatma Curman'a teşekkür ederim.

Bilgisayar olanaklarından yararlanmama izin veren Fen Bilimleri Enst. sekreteri Mustafa Pekel ve enst. görevlileri Selma Karaca ve Ercan Küçükeşmen'e teşekkür ederim.

Sevgili kızım Beste Kaya' ya bu çalışmalara özveriyle katlandığı için sevgilerimi sunuyorum.

Doktora çalışmamın başlangıcından bitimine kadar maddi ve manevi desteğini esirgemeyen ama bitimini göremeyen babam, Halis Kaya'yı rahmetle anıyorum.

KAYNAKLAR

- 1- BAŞOKUR, A.T., 1984, Düşey Elektrik Sondajı, TPAO yayınları, Ankara.
- 2- BAŞOKUR, A.T., 1990, Microcomputer Program for the Direct Interpretation of Resistivity Sounding Data, Computer & Geosciences, V. 16, p. 587-601.
- 3- BAUDOIN, P., 1968, Etude au Laboratoire de la Methode de Polarisation Provoquee, Bureau de Rech. Geol. et Minieres.
- 4- BERKEM, A.R., 1965, Elektrolit Teorileri, İ.Ü. yayınları No: 1130, Kimya Fak. yayınları No:65, İstanbul.
- 5- BERKEM, A.R., 1978, Elektrokimya Laboratuvar Uygulaması, İ.Ü. Yayınları No:2496, Kimya Fak. yayınları No:37, İstanbul.
- 6- BERTIN, J. and LOEB, J., Experimental and Theoretical Aspect of Induced Polarization, Geoexploration Monograph, Series 1 No:7, Gebruder Borntraeger, Berlin.
- 7- BHATTACHARYA, P.K. and PATRA, H.P., 1968, Direct Current Geoelectrical Sounding, Elsevier, London.
- 8- BOWLES, E.J., 1982, Physical and Geotechnical Properties of Soils, International Student Edition, 2 nd Printing, Mc Graw Hill, Tokyo.
- 9- ÇAĞLAR, İ., 1986, İletkenliği Derinlikle Exponansiyel Olarak Değişen Yer Ortamı Üzerindeki Etkisel Kutuplaştırma Ölçülerinde EM Kuplaj Etkileri, Doktora Tezi, İ.Ü. Fen Bilimleri Enst., İstanbul.

- 10- ÇAĞLAR, İ., 1991, Jeofizikte Doğal Polarizasyon (SP) Yöntemi, İ.T.Ü., Sayı:1437, İstanbul.
- 11- DEY, A. and MORRISON, H.F., 1973, Electromagnetic Coupling in Frequency and Time Domain Induced Polarization Surveys over Multi-Layered Earth, Geophysics, V. 38, p. 380-405.
- 12- DIZIOĞLU, M.Y. ve KEÇELİ, D.A., 1981, Elektrik ve Elektromanyetik Prospeksiyon Yöntemleri, İ.Ü. Fen Fakültesi Yayınları, No:157.
- 13- ELLIOT, C.L. and LAURITSEN, E., 1977, Induced Polarization Response of A Horizontally Multy-Layered Earth with no-Resistivity Contrast, Gephysical Prospecting V. 25, P. 79-95.
- 14- ERDOĞAN, A., 1982, Etkisel Kutuplaştırma (IP) Yönteminde Akım-Frekans Etkileri, Doktora Tezi, İ.Ü. Müh. Fak., İstanbul.
- 15- ERDOĞAN, A.R., 1988, Siirt-Madenköy Bakır Yatağındaki Jeofizik Uygulamalar, 10. Türkiye Jeofizik Bilimsel ve Teknik Kurultayında Bildiri, Ankara.
- 16- ETİBANK Keçiborlu Kükürt İşletmeleri kuyu Lokasyonları, Keçiborlu.
- 17- FLATHE, H., 1955, A Practical Method of Calculating Geoelectrical Model Graphs for Horizontally Stratifed Media, Geophysical Prospecting, V. 13, p. 268-294.
- 18- HALL, S.H. and OLHOEFF, G.R., 1986, Nonlinear Complex Resistivity of Some Nickel Sulfides from Western Australia, Geophysical Prospecting, V. 34, p. 1255-1276.

- 19- HALLOF, P., 1964, A Comparison of the Various parameters Employed in the Variable-Frequency Induced Polarization method, Geophysics V.29, p. 425.
- 20- HALLOF, P., 1974, The IP Phase Measurement and Inductive Coupling, Geophysics, V. 29, p. 854-863.
- 21- HOHMANN, G.W., 1973, Electromagnetic Coupling between Grounded Wires at the Surface of Two Layer - Earth, Geophysics, V.38, p. 854-863.
- 22- KATSUBE, T.J., AHRENS, R.H. and COLLETT, L.S., 1973, Electrical Nonlinear Phenomena in Rocks, Geophysics, V. 38, p. 106-124.
- 23- KEÇELİ, A., 1979, Jeolojik Yapıların Ayrımı İçin Yeni Bir Yöntem: Doğrusal Olmayan Öz direnç Frekans Bileşenleri, Türkiye Jeofizikçiler Derneği Yayınları.
- 24- KEÇELİ, D.A., 1980, Induced Polarization Response on the Discontinuity Surfaces with no-Resistivity Contrast of A Polarizeable Medium, Presented at the 42 nd meeting of EAEG, Istanbul.
- 25- KLEIN, J.D. and SHUEY, R.T., 1978, Nonlinear Impedence of Mineral-Electrolyt Interfaces; Part 1. Pyrite, Geophysics, V. 43, p. 1222-1234.
- 26- KLEIN, J.D. and SHUEY, R.T., 1978, Nonlinear Impedence of Mineral-Electrolyt Interfaces; Part 2. Galena, Chalcopyrite and Graphite, Geophysics, V. 43, p. 1235-1249.
- 27- KLEIN, J.D. and SILL, W.R., 1982, Electrical Properties of Artificial Clay - Bearing Sandstone, Geophysics, V. 47, p. 1593-1605.

- 28- KLEIN, J.D., BIEGLER, T. and HORNE, M.D., 1984, Mineral Interfacial Processes in the Method of Induced Polarization, Geophysics, V. 49, p. 1105-1114.
- 29- KOEFOED, O., 1968, The Application on the Kernel Function in Interpreting Geoelectric Resistivity Measurement, Geoexploration Monographs Series 1, No:2, Gebruder Borntraeger, Berlin.
- 30- KOEFOED, O., 1970, A Fast Method for Determining the Layer Distribution from the Raised Kernel Function Geoelectrical Soundings, Geophysical Prospecting, V. 18, p. 564-570.
- 31- KOEFOED, O., 1979, Geosoundings Principles 1 "Resistivity Sounding Measurement", Elsevier, Amsterdam.
- 32- KORKMAZ, A., 1982, Isparta Ovasının Kuyu Lokasyonları ve Birleşik Logları, DSI 18. Bölge Müdürlüğü, Isparta.
- 33- KUNETZ, G., 1966, Principles of Direct Current Resistivity Prospecting, Geoexploration Monographs Series 1, No:1, Gebruder Borntraeger, Berlin.
- 34- NELSON, P.H., HANSEN, W.H. and SWEENEY, M.J., 1982, Induced Polarization Respons of Zeolitic Conglomerate and Carbonaceous Siltstone, Geophysics, V. 47, p. 71-88.
- 35- OLHOEFT, G.R., ELLIOT, C., FULLER, B.D., KELLER, G.V., SCOTT, W.J. and STRANGWAY, D.W., 1977, Proposed Standarts for tho Presentation of Electrical and Electromagnetic Data, Report of Mining Committee.
- 36- OLHOEFT, G.R., 1977, Nonlinear Complex Resistivity as a Technique to Study the State and Chemistry of Ground Water, Second Colloquium on Planetary Water and Polar Processes.

- 37- OLHOEFT, G.R., 1985, Low-Frequency Electrical Properties, *Geophysics*, V. 50, p. 2492-2503.
- 38- ÖZTÜRK, K., 1978, Kayaçların Elektrik Özellikleri II, I.Ü. Fen Fak., Tatbiki Jeofizik Kürsüsü, Ders notları, İstanbul.
- 39- ÖZTÜRK, K., 1985, Jeofizikte Elektrik Alanlarına Giriş, I.Ü. Müh. Fak., Jeofizik Müh. Bölümü, Ders Notları, İstanbul.
- 40- ÖZTÜRK, K., 1986, Karmaşık Özdirenç Spektral Analizi ve Mineral Ayırımı, *Jeofizik*, C.11, Sayı 1, S. 102-139.
- 41- PARASNIS, D.S., 1973, *Mining Geophysics*, Second Edition, Elsevier, Amsterdam.
- 42- PELTON, W.H., WARD, S.H., HALLOF, P.G., SILL, W.R. and NELSON, P.H., 1978, Mineral Discrimination and Removal of Inductive Coupling with Multifrequency IP, *Geophysics*, V. 43, p. 588-609.
- 43- ROY, A. and APPARAO, A., 1971, Depth of Investigation in Direct Current Methods, *Geophysics*, V. 36, N. 5, p. 943-959.
- 44- SCOTT, W.J. and WEST, G.F., 1969, Induced Polarization of Synthetic, High-Resistivity Rocks Containing Disseminated Sulfide, *Geophysics*, V. 34, p. 87-100.
- 45- SEIGEL, H., 1959, In WAIT, J.R., *Overvoltage Research and Geophysical Applications*, Pergamon Press.
- 46- SHAUB, Y.B., 1965, Use of the Nonlinear Conductivity Effect in Rocks for Electrical Prospecting, *Izvestia, Earth Physics*, No:6, p.76-81.

- 47- SHAUB, Y.B., 1969, on the Use Effects of the Nonlinear Electrical Conductivity in the Dedection of Disseminated Sulphide Ores, Izv., Earth Physics, No:1, p. 89-94.
- 48- SHAUB, Y.B. and IVANOV, V.A., 1971, Experimental Discrimination of Sulphide Ores and Graphites by the Use Nonlinear Electrical Conductivity, Izv., Earth Physics, No:3, p. 101-104.
- 49- SHAUB, Y.B., IVANOV, A.V. and ODINTSOV V.G., 1971, Model Studies of the Problem of Nonlinear Electrical Prospecting, Izv., Earth Physics, No:4, p. 94-97.
- 50- SHAUB, Y.B., IVANOV, A.V. and ODINTSOV, V.G., 1971, Observation of Effects of Nonlinear Electrical Conductivity in Bore Holes, Izv., Earth Physics, No:8, p. 92-94.
- 51- SHAUB, Y.B., 1973, The Parameters of the Electric Double Layers between Some Sulfides and Graphite, Izv., Earth Physics, No:2, p. 96-99.
- 52- SHAUB, Y.B., 1974, Observation on the Nonlinear Polarization of Sulfide Minerals by the Spiral Methods, Izv., Earth Physics, No:1, p. 116-119.
- 53- SHERIFF, R.E., 1982, Encyclopedic dictionary of Exploration Geophysics, SEG, 8 th printing, Tulsa, USA.
- 54- STEFENESCO, S.S., 1930, Sur la distribution electrique autor d'une prisee de terre ponctuelle dans un terrain a cauches horizontales et isotropes, Le Journal de Physique et Le radium, 7 serie, T.I.
- 55- SUMNER, J.S., 1976, Principles of Induced Polarization for Geophysical Exploration, Pergamon Press, Oxford.

- 56- TELFORD, W.M., GELDART, L.P., SHERIFF, R.E. and KEYS, D.A., 1981, Applied Geophysics, Cambridge Uni. Press., London.
- 57- VACQUIER, V., HOLMES, C.R., KINTZINGER, P.R. and LAVERGNE, M., 1957, Prospecting for Ground Water by Induced Electrical Polarization, Geophysics, V. 22, p. 660-687.
- 58- VAN DAM, J.C., 1965, A Simple Method for the Calculation of Standard Graphs to be Used in Geoelectrical Prospecting, Geophysical Prospecting, V. 13, p. 37-65.
- 59- VAN VOORHIS, G.D., NELSON, P.H. and DRAKE, T.T., 1973, Complex Resistivity Spectra of Porphyry Copper Mineralization, Geophysics V.38, P. 49-60.
- 60- WONG, J., 1979, An Electrochemical Model of the Induced Polarization Phenomena in Disseminated Sulfide Ores, Geophysics V.44, p.1245-1265.
- 61- WONG, J. and STRANGWAY, D.W., 1981, Induced Polarization in Disseminated Sulfide Ores Containing Elongated Mineralization, Geophysics V.46, p. 1258-1268.
- 62- ZONGE, K.L., and WYNN, J.C., 1975, Recent Advances and Applications in Complex Resistivity Measurements, Geophysics, V. 40, p. 851-864.

ÖZGEÇMİŞ

1960 yılında Konya (Taşkent) da doğdu. İlk ve Orta öğrenimini Taşkent'te tamamladı. 1977 yılında İst. Bahçelievler lisesini bitirdi. 1981 yılında İstanbul Üniversitesi Yer Bilimleri Fakültesi Jeofizik Müh. bölümünden Jeofizik Mühendisi ünvanı ile mezun olup aynı fakültede yüksek lisans öğrenimine başladı.

1982 yılında Ank. Üni. Fen Fak. Jeoloji Müh. bölümünde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başlamış ve 1984 yılında Sayın Doç. Dr. Turan Kayıran yönetiminde yüksek lisans tezini tamamlayarak yük. müh. ünvanını almıştır.

1984 yılında Ak. Üni. İsp. Müh. Fakültesine araştırma görevlisi olarak atanıp 1986 yılında doktora çalışmasına sayın Prof. Dr. Ali Keçeli yönetiminde başlamıştır.

1986 yılından beri bir çoğu Göller Yöresinde olmak üzere otuzdan fazla projede görev almış olup Hidrojeoloji, müh. jeolojisi ve kömür jeolojisi sorunlarının çözümüne yönelik bu projelerin onbeş'e yakını bildiri veya makale olarak değişik dergilerde yayınlanmış veya oturumlarda sunulmuştur.

Mesleki sorunlarını çözecek derecede İngilizce bilmektedir.

Askerlik görevini yapmış olup evli ve bir çocuk babasıdır.