

Etkisel Kutuplaştırma (IP) Yönteminde Akım - Frekans Etkileri

CURRENT AND FREQUENCY EFFECTS IN THE INDUCED POLARIZATION (IP) METHOD

Ali ERDOĞAN

İ.Ü. Mühendislik Fakültesi Jeofizik Bölümü

ÖZET : Çok frekanslı IP (karmaşık özdirenç) araştırmaları için, 10^{-2} ile 10^{+3} Hz frekans bandı aralığında kayaç özdirençinin gerçel ve sanal bileşenlerini ölçebilen, bir laboratuvar IP ölçeri geliştirilmiştir.

IP olayının çeşitlerini temsil edebilecek doğal koşullara uygun kayaç numuneleri ile daha duraylı fiziksel özelliklere sahip grafit ve metal levhalar hazırlanmıştır. Ayrıca, ölçü ortamlarında farklı konsantrasyonlu CuSO_4 , H_2SO_4 ve NaCl gibi elektrolitler kullanılmıştır.

DeneySEL çalışmalarında, 10^{-2} ile 10^{+3} Hz frekansları arasında gerçel ve sanal bileşenler ölçülerek, özdirenç ve faz açısı spektrumları çeşitli akım yoğunlukları için ayrı ayrı elde edilmiştir. Böylece, IP spektrumlarının doğrusal olmayan özellikleri de araştırılmıştır.

Yapılan bu çalışmalara göre, şu sonuçlar elde edilmiştir: (1) Faz spektrumunun maksimumunu gösteren kritik frekansın, ortamın elektrolit konsantrasyonuna göre alçak veya yüksek frekanslara doğru kayma gösterebileceği, (2) Faz spektrumunu gösteren kritik frekansların akım yoğunluğuna bağlı olmadığı, (3) Metalik olmayan mineral ortamların IP spektrumlarının farklı akım yoğunlukları için yaklaşık olarak doğrusal bir değişim gösterdiği, (4) Metalik mineral ortamların ise akım yoğunluğunun artması ile IP spektrumlarının daha şiddetli doğrusal olmayan davranışlar gösterdikleri saptanmıştır.

Elde edilen bu sonuçlar, kayaçların elektrik özelliklerini ayrıntılı bir şekilde yansıtacak niteliktedir. Böylece, yapılan bu çalışma, spektral IP ölçerlerinin yapım tekniğinin gelişmesine ve bir sülfürlü maden yatağının metalik olan ve olmayan bölgelerinin ayırım tekniklerine önemli katkıda bulunacaktır.

ABSTRACT : A laboratory equipment, having the frequency range 10^{-2} to 10^{+3} Hz and measuring directly the real and imaginary resistivity components of the rock samples, was developed for the investigation by multifrequency IP (or complex resistivity) method.

Various rock samples corresponding natural conditions, and artificial samples like metallic and non-metallic plates being more stable physical conditions, which could represent various IP phenomena, have been prepared. In the studies on experimental, the electrolytes of different concentration such as H_2SO_4 , NaCl and CuSO_4 were used.

After measuring real and imaginary components of response potential in the frequency range mentioned, resistivity and phase spectra are obtained separately by using various current densities. Thus, non-linear properties of IP phenomena are also determined at the same times.

The results show that; (1) The critical frequency which define the maximum of the phase spectrum is changeable according to electrolyte concentration of the medium, (2) The critical frequency does not depend on the current density, (3) If a medium contains only non-metallic minerals, IP spectra for various current densities linearly decreases, (4) If a medium containing only metallic minerals, IP spectra show non-linear behaviours with varying current densities.

The results obtained in this study give us a new opportunity to enter into the details of the electrical properties of rocks. Therefore, this investigation can be very usefull especially discriminating metallic and non-metallic mineral zones of a sulfide mines and for other special problems.

G İ R İ Ş

Etkisel kutuplaştırma (Induced Polarization) (IP) yöntemi, kayaçların fiziko-kimyasal özelliklerine bağlı olan iyon içeren bölgelerinin saptanmasında kullanılan bir jeofizik yöntemidir. IP yöntemi, bu bölgeleri, iyonların kayaç içerisinde arayüzey kutuplaştırmaları oluşturmamasından yararlanarak saptamaya çalışır.

Yer içerisine bir elektriksel akım gönderildiğinde, Etkisel Kutuplaştırma olayını meydana getiren önemli olaylar; metalik minerale bitişik olan iyonların difuzyonu, elektrolit ve elektron iletim organları arasındaki elektrokimyasal Oksidasyon-Redüksiyonlar ve gözenegi dolduran iyonların bir takım yerdeğiştirmeleridir. Kayaç içinde etki olarak yaratılan bu arayüzey kutuplanmalarını oluşturan iyonların, kutuplanma düzenleri ve onların tekrar bozunma olayları (polarizasyon ve depolarizasyon) kayaçların fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olup, genellikle, çok karmaşıktır. Etkisel kutuplaştırma ölçü teknikleri bakımından zaman ve frekans bölgeleri (domains) olmak üzere ikiye ayrılır. Zaman bölgesinde yüklenebilme (chargeability) parametresinin zamanla değişiminin incelenmesine karşın, frekans bölgesinde kayaç öz direncinin frekansla değişimi (frequency effect) incelenmektedir.

Jeofiziksel araştırmanın temel amaçlarından biri, kayaçların fiziksel özelliklerinin sistematik bir bilgisinin elde edilmesi olmaktadır. Jeoelektrik bilim dalında bir kayacın öz direnci doğrusal (lineer) Ohm Kanunu ile saptanır. Gerçekte, IP olayı doğrusal olmayan (Nonlineer) bir olaydır. Başka bir söyleyişle, bir kayaç ortamındaki elektriksel gerilim, bu gerilimi oluşturan elektrik akımının artışı ile doğrusal değildir. Doğrusal olmayan bu olayı ilk olarak, Scotte (1969) incelemiş olup zaman bölgesinde yaptığı ölçülerle yüklenebilme parametresinin (M_a) $0,01-0,1 \mu a/cm^2$ akım yoğunlukları arasında yaklaşıklıkla sabit olduğunu, $1-100 \mu a/cm^2$ akım yoğunlukları için azaldığını belirtmiş. Collet (1973) ve Kleine (1978) Lissagous şekilleriyle bu olayı incelemiş, doğrusal olan ve olmayan ortamlar için bozuk Lissagous şekillerini elde etmişlerdir.

Collet (1973) bu çalışmalarında birçok ölçü sistemleri kullanmıştır (Geophysics, 1973; Sayfa 80 bakınız). Sumner (1976), toplam öz direncin frekansla değişimlerini çeşitli akım yoğunluklarıyla incelemiştir. Görüldüğü gibi son zamanlarda birçok araştırmacılar, (Fraser (1964), Zonge ve Wynn (1975), Pelton ve diğerleri (1978), Wong (1979)) olayın frekans spektrumu ve yukarıda sözkonusu edilen doğrusal olmayan özelliklerinden yararlanarak jeolojik birimlerin ayırımına çalışmaktadırlar. Yani, yeraltının kalitatif değerlendirmeleri de yapılmaya çalışılmaktadır. Oysa, genelde jeofizik yöntemler yeraltının analitik değerlendirmeleri için kullanılır, IP yönteminin analitik yorumlarının yanında kalitatif yorumlar da verebilmesi nedeniyle, sülfürlü mineral yatağının aranmasında vazgeçilmez bir yöntem durumuna gelmiştir. Bunun yanında yeraltısuları ve mühendislik jeofiziği konularında IP uygulamalarının gün geçtikçe arttığı görülmektedir. Keza, Hidrokarbon (doğal gaz ve petrol) yataklarının aramasında özellikle sismik yöntemlerin uygulanamadığı alanlarda en etkin jeofizik yöntemlerden biri olduğu söylenmektedir (Snyder, 1980 ve Zonge, 1982).

IP yönteminin bu başarılarının yanında, IP olayının karmaşıklığı ve bu karmaşık olayların ölçü tekniklerinin gelişmekte oluşları nedeniyle zaman zaman başarısızlıklarıyla da karşılaşmaktadır. Örneğin, henüz IP olayında doğrusal olmayan yanıtların elektrolitik konsantrasyon gibi çeşitli faktörler altında frekansla değişimi açıklıkla geliştirilmemiş veya literatüre sunulmamıştır. Bu nedenle değerlendirme ve yorumlarda bazı yanlışlar ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada, jeolojik birimlerin daha sağlıklı bir şekilde saptanmasında kullanılabilecek veya en azından bir sülfürlü maden yatağının metalik mineral bölgesini sedimenter bölgesinden ayırtedilebilecek frekans ortamında IP parametrelerinin doğrusal olan ve olmayan davranışları ayrıntılı bir şekilde araştırılmaya çalışılmıştır. Bu amaçla, 10^{-2} ile 10^{+3} Hz frekansları aralığında kayaç öz direncinin gerçel ve sanal (real and imaginary) bileşenlerini aynı anda ölçebilen bir laboratuvar tipi ölçer geliştirilmiştir.

IP SPEKTRUMLARI VE ÖLÇÜ TEKNİKLERİ

Kayaçların IP olaylarının açıklanması ve yöntemin doğuşu zaman bölgesinde (time domain) olmuştur. Ancak, yöntemin ve uygulama alanlarının, daha sonraki yıllarda, gelişmesiyle diğer ölçü teknikleri de geliştirilerek IP ölçülerine yeni bir boyut kazandırılmıştır. Örneğin, benzer olayların frekans bölgesinde de oluşabileceği görülmüştür. Bu ölçü tekniğinde, kayaç öz direncinin frekansla değişimini yansıtacak olan parametre (frekans etkisi) zaman bölgesindeki yüklenebilirliğe (chargeability) paralel olarak tanımlanır (Hallov 1964). Yani, bir elektriksel akımla yapay olarak kutuplaştırılmış olan metalik mineral ve elektrolit arayüzey empedansının, zaman bölgesine karşın, frekansla değişimi incelenir. Jeolojik yapıların öz dirençleri o yapının cinsine bağlı olduğu kadar, onun dokusuna (texture), gözenekliliğine ve gözenek elektrolitine de bağlıdır. Bu nedenle, Jeolojik yapıların öz dirençleri çok geniş sınırlar içerisinde değişir. Keza, bu yapıların öz direnç değerleri arasındaki farklılıkları birbirine yakın olabilmektedir. Böyle jeolojik yapıların daha sağlıklı bir şekilde IP yöntemi ile ayırtedilebilmesine karşın bazen iki jeolojik yapının da öz direnç ve IP değerleri aynı büyüklükte olabilmektedir (Pelton, 1978). Bu durumlarda spektral ölçülerle ortamlar belirlenmeye çalışılır.

Bu bölümde, klasik anlamdaki öz direnç ve IP ölçü teknikleri ülkemizde yeterince tanınmakta olduğundan (Keçeli, 1971; Dizioğlu ve

Keçeli, 1981) bunların ayrıntılarına değinilmemiştir. Geliştirilmekte olan çok frekanslı IP (karmaşık öz direnç) uygulamalarında, Şekil (1)'de görüldüğü gibi, pratikte, akım kaynağı dalga şekli olarak kare dalga kullanılır. Frekans bölgesi IP ölçülerinde faz veya gerçel ve sanal öz direnç bileşenlerinin belirlenmeleri için gönderilen (akım) ve ölçülen (gerilim) dalga şeklinin sinüsoidal olması istenir. Bu nedenle de bir kare dalganın sinüs harmoniklerinin (veya sinüs dalgasının) kullanılmasında zorunluluk vardır (Şekil 1-b). Örneğin, laboratuvar ölçülerinde akım kaynağı dalga şekli olarak, Nelson (1971), Collet ve Katsube (1973), Klein (1978) sinüs dalgası kullanmışlardır.

Kutuplaştırılabilen kayaçların karmaşık öz direnci, $\rho(i\omega)$,

$$\rho(i\omega) = |\rho(\omega)| e^{-i\phi(\omega)} \quad (1)$$

olarak verilir. Burada $|\rho(\omega)|$ karmaşık öz direnç genlik spektrumu, $\omega=2\pi f$, $f=Hz$ ve $\phi(\omega)$ karmaşık öz direnç faz spektrumudur. Karmaşık öz direnç gerçel, ρ_G , ve sanal, ρ_S , bileşenleri cinsinden,

$$\rho(i\omega) = \rho_G(\omega) - i\rho_S(\omega) \quad (2)$$

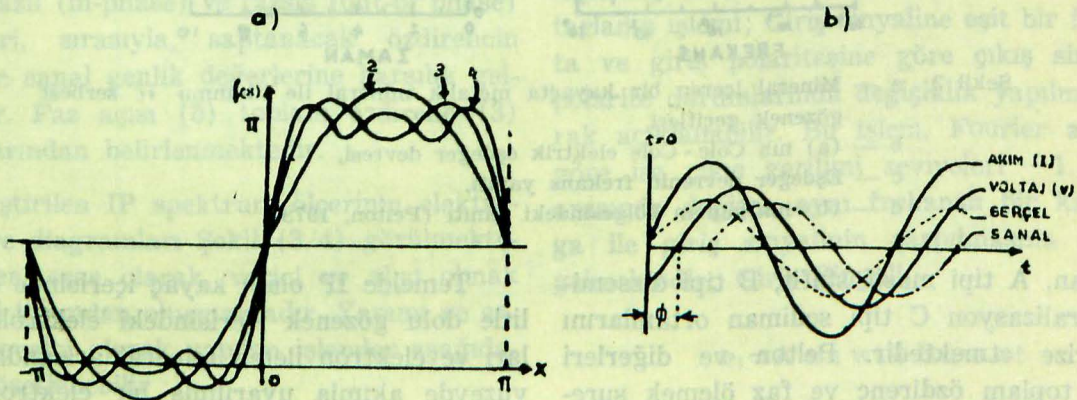
şeklinde ve toplam öz direnç (mutlak genlik),

$$|\rho(\omega)| = [(\rho_G)^2 + (\rho_S(\omega))^2]^{1/2} \quad (3)$$

olarak tanımlanır. Trigonometrik bağıntılar cinsinden öz direnç bileşenleri,

$$\rho_G(\omega) = |\rho(\omega)| \cos \phi \quad \text{ve} \quad \rho_S(\omega) = |\rho(\omega)| \sin \phi \quad (4)$$

ve faz açısı, $\phi(\omega)$, ise



Şekil 1. a) Bir kare dalganın sinüs harmoniklerinin grafiklenişi.

b) IP Faz açısı ve bileşenlerinin dalga şekillerinin görüntüleri.

$$\phi(\omega) = \tan^{-1}(\rho_s(\omega)/\rho_G(\omega)) \quad (5)$$

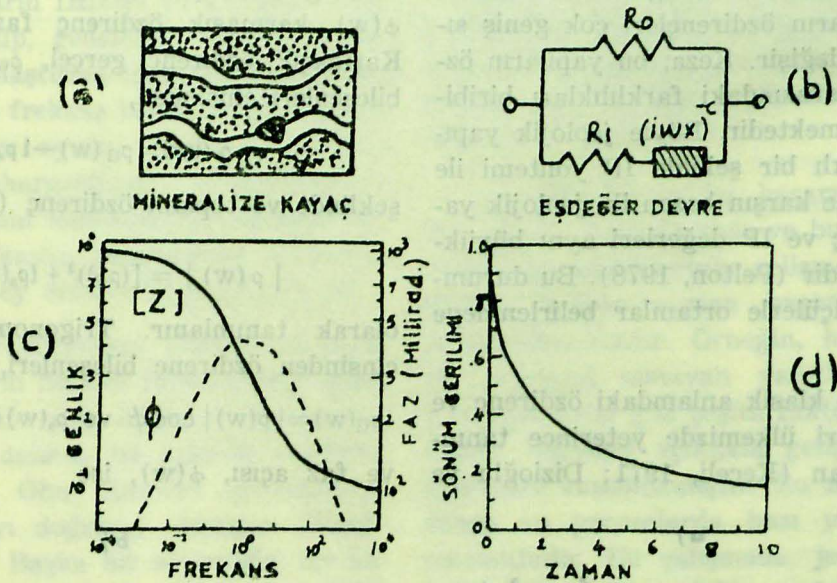
bağıntıları ile belirlenir.

IP spektrumları olarak bilinen faz açısı ve özdirenç spektrumları çeşitli ölçü teknikleri kullanılarak elde edilir. Bunlardan literatürde başvuru kaynağı olarak söz konusu edilen önemli çalışmalar aşağıda sunulmuştur. Fraser (1964), toplam dalga üzerinden ölçüler yaparak özdirenç spektrumlarını kayaç cinsine göre sürekli azalan, konveks ve konkav özelliklerde olduğunu göstermiştir. Zonge (1975), 10^{-2} ile 10^{+1} Hz frekansları arasında kare dalga gönderip bozulan dalga şekillerinin Fourier transformlarının oranından $[z(i\omega) = v(i\omega)/I(i\omega)]$ 10^{-2} ile 10^{+2} Hz arasındaki harmoniklerinin özdirençlerini saptamıştır. Zonge, gerçel ve sanal bileşenlerden elde ettiği argan diagramındaki değişim karakteristiklerini, A-B-C tipleri şeklinde, kayacın kutuplaştırma özelliğini yansıtabilecek nitelikte olduğunu belirtmiştir.

bileceğini, küçük elektrod açılımlarıyla yerinde ölçüler yaparak, gösterme çabası içerisinde bulunmuşlar ve Şekil 2 de görüldüğü gibi Cole-Cole modeli ile kayaçların elektriksel davranışının en iyi bir şekilde açıklanabileceğini belirtmişlerdir. Günümüzde en son ve yaygın olarak kullanılan bu elektriksel eşdeğer devre (Cole, K.S., ve Cole, K.H., 1941) elektrokimyasal tarafından geliştirilmiş olup IP olayını simgelemekle beraber tanımı bakımından yeterli olmaktadır. Eşdeğer devrenin empedans ifadesi aşağıdaki bağıntı ile verilir.

$$Z(i\omega) = R_0 \left[1 - m \left(1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right) \right] \quad (6)$$

Burada, m yüklenebilme parametresi, τ zaman sabiti ve c frekans bağımlılığıdır. $Z(i\omega)$ ve buna bağlı olarak $\phi(\omega)$ ifadelerinden kayaç modelinin elektriksel davranışına benzer IP spektrumları elde edilir.



Şekil 2. a — Mineral içeren bir kayaçta metalik mineral ile tıkanmış ϵ serbest gözenek geçitleri,
b — (a) nın Cole - Cole elektrik eşdeğer devresi,
c — Eşdeğer devrenin frekans yanıtı,
d — (b) nin zaman bölgesindeki yanıtı (Pelton, 1978).

Bunlardan, A tipi masif sülfid, B tipi dissemine mineralizasyon C tipi sediman ortamlarını karakterize etmektedir. Pelton ve diğerleri (1978), toplam özdirenç ve faz ölçmek suretiyle, IP spektrumlarından yararlanarak bazı mineralizasyon tiplerinin ayırımının yapılabil-

Temelde IP olayı kayaç içerisinde elektrolit dolu gözenek içerisindeki elektrolit iyonları ve elektron ileten mineral arasındaki arayüzeyde akımla uyarılmış bir elektron geçiş reaksiyonu olarak bilinir ve bir çok değişkenlere bağlıdır. Kayaç içerisindeki metalik mine-

ralin farklı yüzeyleri farklı özellik taşıyabilir olması halinde, akım geçişi sürecinde, oksidasyon ve redüksiyon reaksiyon hızlarında önemli bir dengesizlik olur (elektrokimyasal olarak, reaksiyonun reversible olabilmesindeki gecikme). Bu durumda arayüzeylerde iyon yığılmaları etkisel kutuplaştırma (IP) olayını şiddetli bir şekilde oluşturur. Keza, bir maden yatağının oluş tipi ile, yani birim hacmindeki arayüzey adedi ve onun geometrisi de ölçülecek olan IP parametrelerinin değerlerini etkileyecektir.

Son zamanlarda, arayüzey iyonlarının kutuplaşma şiddetini etkileyen akım yoğunluğu ve frekans değişimi ile ortam kontrol altına alınarak ayrıntılı bilgiler elde edilmeye ve ortam özelliklerine bağlı olarak parametre büyüklüklerinin yaklaşık değerleri verilmeye çalışılmıştır. Bu gelişmeler içerisinde, çok frekanslı IP yöntemiyle, jeolojik yapıların anorganik içerikleri bakımından kalitatif ayırım teknikleri hızlı bir artım göstermiştir.

GELİŞTİRİLEN IP SPEKTRUM ÖLÇERİ

Son yıllarda geniş frekans bandlı IP ölçü tekniklerinin gelişmekte olduğu yukarıda anlatılmaya çalışılmıştır. Gelişmekte olan spektral IP yöntemini iletirmek, yani, bu konuda bir deneysel araştırma yapabilmek için kesinlikle çok frekanslı IP spektrum ölçeri gereklidir.

Geliştirilen IP spektrum ölçeri karmaşık özdirencin toplam, gerçel ve sanal bileşenlerini ayrı ayrı olarak doğrudan ölçmektedir. Başka bir söyleyişle, bir kayaç ortamında ölçülen gerilimin fazlı (in-phase) ve fazsız (out-of phase) bileşenleri, sırasıyla, saptanacak özdirencin gerçel ve sanal genlik değerlerine karşılık gelmektedir. Faz açısı (5) toplam özdirenc (3) bağıntılarından belirlenmektedir.

Geliştirilen IP spektrum ölçerinin elektronik devre diagramları Şekil (3/4) görülmektedir. Ölçer, esas olarak, verici ve alıcı olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Yapımı ve çalışma prensibi olarak yapılan işlemler aşağıdaki gibi özetlenebilir :

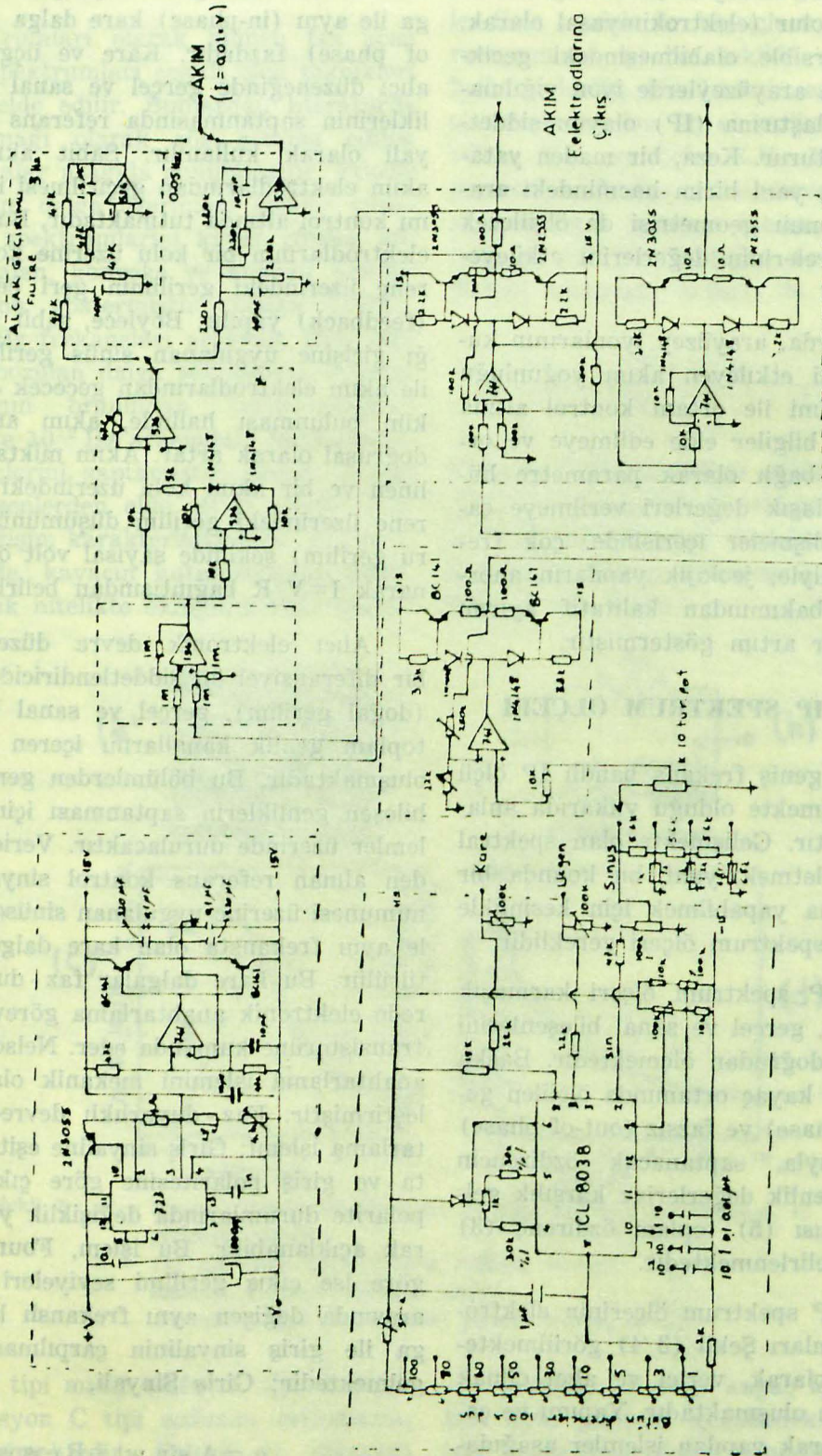
Verici 10^{-2} ile 10^{+3} Hz frekansları arasında sinüs, kare ve üçgen dalgaları aynı anda

üretebilen bir ana osilatör, sabit akım kaynağı ve miktarını belirleyici bölümlerden oluşturuldu. Sinüs dalgasının çıkış fazı, üçgen dalga ile aynı (in-phase) kare dalga ile dik (out-of phase) fazdadır. Kare ve üçgen dalgalar, alıcı düzeneğinde gerçel ve sanal bileşen genliklerinin saptanmasında referans kontrol sinyali olarak kullanılır. Sabit akım kaynağı, akım elektrodlarından geçirilmesi istenilen akımı kontrol altında tutmaktadır. Bu işlem, akım elektrodlarının bir kolu üzerine konan seri direnç üzerindeki gerilimin geri beslenmesi ile (feedback) yapılır. Böylece, sabit akım kaynağı girişine uygulanan sinüs gerilimin genliği ile akım elektrodlarından geçecek olan, bir yükün bulunması halinde, akım artış oranları doğrusal olarak artar. Akım miktarı değeri bilinen ve bir akım kolu üzerindeki bulunan direnç üzerindeki gerilim düşümünün DC (doğru gerilim) şeklinde sayısal volt ölçerden okunarak $I=V/R$ bağıntısından belirlenir.

Alıcı elektronik devre düzenlemelerinde bir diferansiyel ön şiddetlendiriciden sonra SP (doğal gerilim), gerçel ve sanal bileşenler ve toplam genlik kanallarını içeren bölümlerden oluşmaktadır. Bu bölümlerden gerçel ve sanal bileşen genliklerin saptanması için yapılan işlemler üzerinde durulacaktır. Verici düzeneğinden alınan referans kontrol sinyalleri, kayaç numunesi üzerine uygulanan sinüsoidal gerilimle aynı frekansta olan kare dalgalara dönüştürülür. Bu kare dalgalar faz-duyarlıklı devrede elektronik anahtarlama görevi yapan Fet transistörüne kumanda eder. Nelson (1971) bu anahtarlama işlemini mekanik olarak gerçekleştirmiştir. Faz-duyarlıklı devrede bu anahtarlama işlemi; Giriş sinyaline eşit bir frekansta ve giriş polaritesine göre çıkış sinyalinin polarite durumlarında değişiklik yapılması olarak açıklanabilir. Bu işlem, Fourier analizine göre ise çıkış gerilimi seviyeleri -1 ve $+1$ arasında değişen aynı frekanslı bir kare dalga ile giriş sinyalinin çarpılmasına karşılık gelmektedir; Giriş Sinyali,

$$e_i = A \sin wt + B \cos wt \quad (7)$$

A, B genlik ve $W=2\pi f$, $f=Hz$, zaman t olarak ifade edilirse, çıkış sinyalini



Şekil 3. Verici elektronik devre düzenleme diyagramı.

$$e_0 = (A \sin wt + B \cos wt) \sum_{n=0}^{\infty} C_n \sin (2n+1) wt \quad (8)$$

$$C_n = 4/(2n+1)\pi \quad n=0,1,2,3, \dots$$

şeklinde yazabiliriz.

Yukarıdaki (8) ifadesinden faz - duyarlılık devre çıkışı

$$A \frac{4}{\pi} \sin^2 wt \quad (9)$$

olur (Smith 1966). Faz - duyarlılık devre çıkışı olan DC gerilim üzerindeki AC (alternatif gerilim) gerilimleri bastırmak için çalışma bantlarına göre uzun zaman sabitli ($T=1/F$) alçak geçirimli aktif bir filtrenin kullanılması yeterlidir. Bu çalışmada merkez frekansları $F=3$, $F=0,05$ Hz ve 12 db/oktav eğime sahip olan Butter - worth alçak geçirimli filtreler kullanıldı. SP (doğal gerilim) dengeleme kanalı ölçü ortamında oluşan SP gerilimlerin dengelemesiyle sağlıklı bir ölçünün yapılmasını sağlar.

Geliştirilen IP spektrum ölçeri araştırma amaçlarının gereksinimine göre, bu çalışmada olduğu gibi sayısal DC gerilim ölçerle bileşen genliklerini veya bir x-y recorderle agra diagramlarını ölçme olanağını verir. Geliştirilen bu ölçerle yaklaşık olarak 150 adet ölçüm yapılmıştır. Yapılan bu ölçümlerin verileri literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılmış olup araştırmamızda kullanılabilceği sonucuna varılmıştır. Ölçer bilinen direnç ve kapasite devreleri üzerinde test edilerek aşağıdaki teknik özellikleri saptanmıştır.

VERİCİ

Frekans bandı	$10^{-2}-10^{+3}$ Hz
Frekans duraylılığı	% 0.1
Linearite	% 0.1
Sinüs distorsiyon	% 0.5
Akım regülasyonu	% 20
Çıkış gerilimi	0-40 v (tepeden tepeye)
Çıkış dalgaları	sinüs, kare ve üçgen
Puls süresi	% 2 - % 98

ALICI

Frekans bandı	$10^{-2}-10^{+3}$ Hz
Giriş empedansı	10 Mohm
Giriş gerilim seviyesi	100 μ v - 10 v (tepeden tepeye)
Gerilim okuma hassiyeti	% 0,4

Sayısal volt ölçerler : Simpson model 461-2R, Simpson model 464, Otalsan 0M1, Levell DC volt metre TM10.

Not : Yukarıda belirtilen sayısal gerilim ölçerler bu çalışmada kullanılmıştır.

DENEYSEL ÇALIŞMA

MODELLERİN HAZIRLANMASI VE MODEL TANK

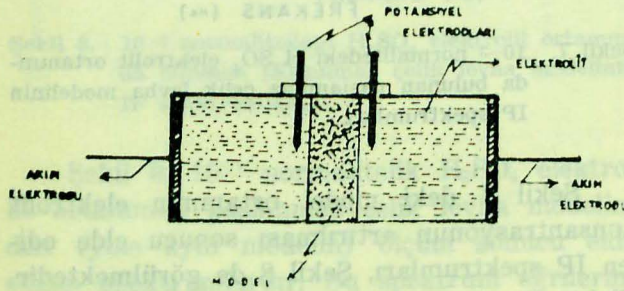
Pratikte, IP verilerinin değerlendirilmesinde çeşitli yanlılara neden olan ortamları temsil edecek şekilde, kayaçların elektrod ve zar kutuplaştırma çeşitleri (Madden, 1959) göz önüne alınarak, doğal ve yapay maddeler hazırlandı. Elektrod kutuplaştırma model çalışmaları olarak; Murgul, Espiye ve Küre gibi çeşitli sülfürlü maden yataklarından temin edilen pirit ve kalkopirit numuneleri $2 \times 2 \times 2$ cm boyutlarında kesilerek ölçüm için hazırlandı. Ancak, doğal modellerin özelliklerinin korunmasının tam olarak mümkün olamayacağı görüşünden hareketle Henkel (1957), Keçeli (1971) ve Nelson (1971) çalışmalarına paralel bir yol izlenerek daha duraylı fiziksel özelliklere sahip olan bakır ve paslanmaz çelik levha modelleri hazırlandı. Ölçümlerden önce levha yüzeyleri sırasıyla Hcl ve su ile temizlendi.

Zar kutuplaştırmaları olarak, kum - kil ve grafit levha model çalışmalarının hazırlanması aşağıdaki şekilde olmuştur. Kum tane çaplarına göre ölçekli bir elekten geçirilerek 0.5 ve 1.5 mm olmak üzere iki guruba ayrıldı ve temiz bir şekilde yıkandı. Ayrıca, Vacquier (1957)'in de belirttiği gibi, kutuplaştırmının daha etkili olmasını sağlamak amacıyla montmorillonit ve kaoline türünde kil çeşitleri % 5 oranında karıştırılmıştır. Bu kil çeşitleri, İstanbul üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Bölümünden temin edildi. Yapay model ola-

rak beş ölçek grafit tozu ile bir ölçek yalıtkan olan polyester maddesi birlikte ısıtılmak suretiyle homojen bir karışım sağlandı. Bu karışım dondurucu ve katalizör ilavesiyle kalıba dökülerek katılaşmaya bırakıldı. Katılan grafit levhanın yüzeylerindeki yalıtkan yağ tabakası zımparalanarak ölçüme hazır bir şekle getirildi.

Kayaçların elektrod ve zar kutuplaştırma bölgeleri birbirlerinden kesin sınırlamalarla ayrılmış olmayıp bir arada karışık olarak bulunabilmektedir. Bu model çalışması için özellikle bozunmuş (alterasyon) bölgeleri simgeleyen kil - pirit karışıklı modeller hazırlandı.

Ölçü düzeneği, jeofizikte kullanılan dört elektrodlu ölçü sistemlerine paralel olarak hazırlandı. Şekil (5)'de görülen model tank $17 \times 9 \times 8$ cm boyutlarında pleksiglas bir maddeden yapılmıştır. Akım hatlarının tank içerisinde doğrusal dağılımını sağlamak için akım elektrodları tankın iki tarafına simetrik olarak levha şeklinde yerleştirildi. Potansiyel ve akım elektrodları olarak bu çalışmada, paslanmaz çelik kullanıldı. Bu safhada, AgCl (gümüş klorür) ve bakır sülfat eriyikli bakır elektrodlar da kullanılarak ölçü değerlerinde önemli bir farklılık görülmemiştir.



Şekil 5. Laboratuvar çalışmalarında kullanılan model tank ve elektrod sistemi.

Bu çalışmalarda, 10^{-3} , 10^{-2} ve 10^{-1} normalitelik konsantrasyonlarda CuSO_4 , NaCl ve H_2SO_4 gibi elektrolitler kullanılmıştır.

DENEYSEL SONUÇLAR

Yukarıda açıklanmaya çalışılan IP spektrum ölçeriyle 10^{-2} ile 10^{+3} Hz frekansları arasında, ölçüm için hazırlanan kayaç numunelerinin gerçel ve sanal bileşen genlikleri $2 \mu\text{a}/$

cm^2 , $20 \mu\text{a}/\text{cm}^2$ ve $200 \mu\text{a}/\text{cm}^2$ akım yoğunlukları için ölçüldü. Bu ölçülerden de özdirenç ve faz spektrumları ayrı ayrı elde edildi. Ölçülen bu parametrelerin spektrum eğrilerindeki etkinliklerini izleyebilmek ve bir karşılaştırma olanağı yaratabilmek amacıyla bir arada çizildi.

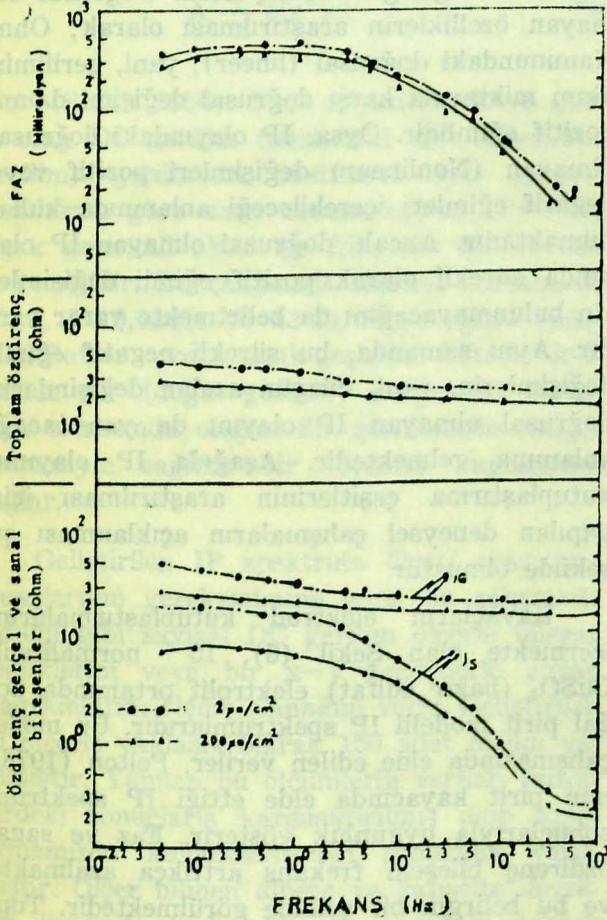
Spektral ölçüleriyle, kayaçların elektriksel davranışını içeren daha geniş kapsamlı bilgi alındığı ve değerlendirme olanağının çok daha sağlıklı olduğu gösterilmiş oldu. Doğrusal olmayan özelliklerin araştırılması olarak; Ohm Kanunundaki doğrusal (lineer), yani, gerilimin akım miktarına karşı doğrusal değişimi daima pozitif eğimlidir. Oysa, IP olayındaki doğrusal olmayan (Nonlinear) değişimleri pozitif veya negatif eğimleri içerebileceği anlamında kullanılmaktadır. Ancak, doğrusal olmayan IP olayında sürekli olarak pozitif eğimli değişimlerin bulunmayacağını da belirtmekte yarar vardır. Aynı zamanda, bu sürekli negatif eğimli değişimlerin, yani, düzgün azalan değişimlerin doğrusal olmayan IP olayını da yansıtacağı anlamına gelmektedir. Aşağıda IP olayının kutuplaştırma çeşitlerinin araştırılması için yapılan deneysel çalışmaların açıklanması şu şekilde olmuştur.

Kayaçların elektrod kutuplaştırmalarını içermekte olan Şekil (6), 10^{-3} normalitelik CuSO_4 (bakır sülfat) elektrolit ortamında doğal pirit modeli IP spektrumlarıdır. Bu model çalışmasında elde edilen veriler, Pelton (1978) nun pirit kayacında elde ettiği IP spektrum sonuçlarıyla uygunluk gösterir. Faz ve sanal özdirenç bileşeni frekans arttıkça azalmakta ve bu belirgin bir şekilde görülmektedir. Toplam özdirenç ve gerçel özdirenç bileşeni frekans arttıkça düzgün azalan bir eğri görünümündedir. Akım yoğunluğuna göre, sanal özdirenç bileşenlerindeki değişim daha belirgin, ancak, bu farklı akım yoğunluklarında spektrumların genel karakterinde bir değişimin olmadığı belirtilebilir. Toplam özdirençin 1 Hz te akım yoğunlukları için değişimleri; $2 \mu\text{a}/\text{cm}^2$ de 32 Ohm, $200 \mu\text{a}/\text{cm}^2$ de 21 Ohm olmaktadır.

Şekil (7-8-9) elektrod kutuplaştırmalarının daha sağlıklı araştırılması için, modellerin hazırlanması bölümünde de değinildiği gi-

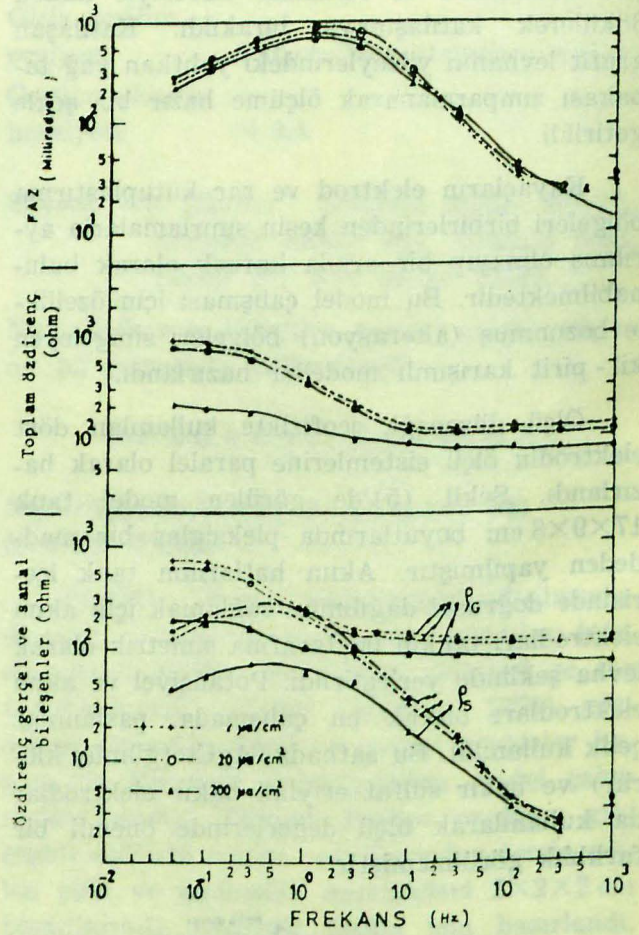
bi, sırasıyla 10^{-3} , 10^{-2} ve 10^{-1} normalitelerde H_2SO_4 elektrolit ortamına yerleştirilen paslanmaz çelik levha modelinden elde edilen IP spektrumlarıdır. Bunlardan Şekil 7, 10^{-3} normalitelik H_2SO_4 ortamında ölçülerden elde edilen faz spektrum eğrisi, 1 Hz civarında maksimum bir değer göstermektedir. Bu maksimum değer alt ve üst frekanslarda spektrum değerlerinin azalmakta olduğu belirlenmektedir. Farklı akım yoğunluklarına göre faz spekt-

recede küçülmeler olmaktadır. Örneğin, 1 Hz frekansında $2 \mu a/cm^2$ de 330 Ohm, $20 \mu a/cm^2$ de 297 Ohm ve $200 \mu a/cm^2$ de 112 Ohm.



Şekil 6. 10^{-3} normalitedeki $CuSO_4$ elektrolit ortamında bulunan pirit modelinin IP spektrumları.

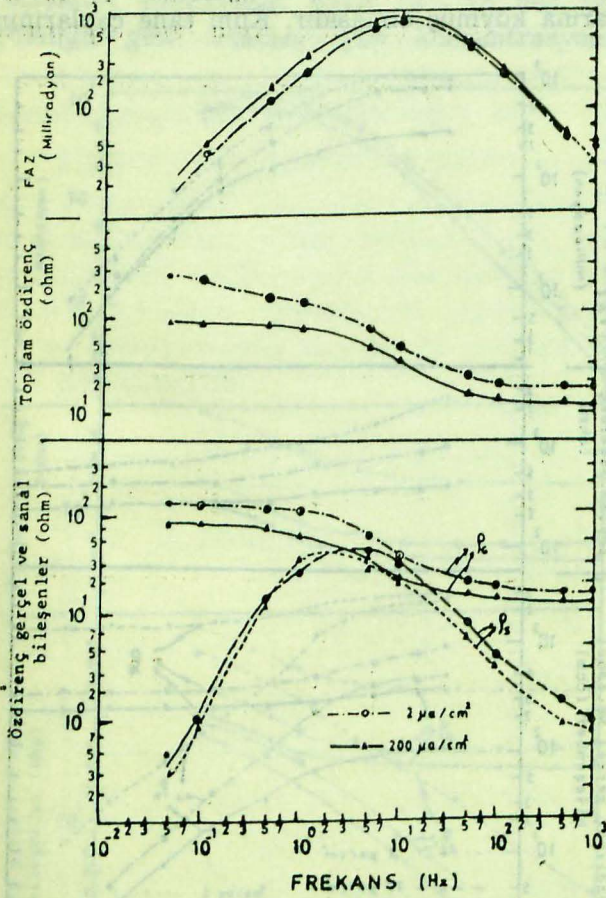
rum karakteristiklerinde önemli bir değişim görünmemekle beraber doğrusal olmayan davranışların bulunmakta olduğu müşahade edilmektedir. Toplam özdirenç spektrumları, farklı akım yoğunluklarına göre elde edilmiş olmasına karşın, artan frekansla düzgün azalan bir eğri görünümünde ve eğrinin dönüm noktası faz spektrumunun maksimum noktasına karşılık geldiği gözlenmektedir. Akım yoğunluğuna göre, toplam özdirenç değerlerinde önemli de-



Şekil 7. 10^{-3} normalitedeki H_2SO_4 elektrolit ortamında bulunan paslanmaz çelik levha modelinin IP spektrumları.

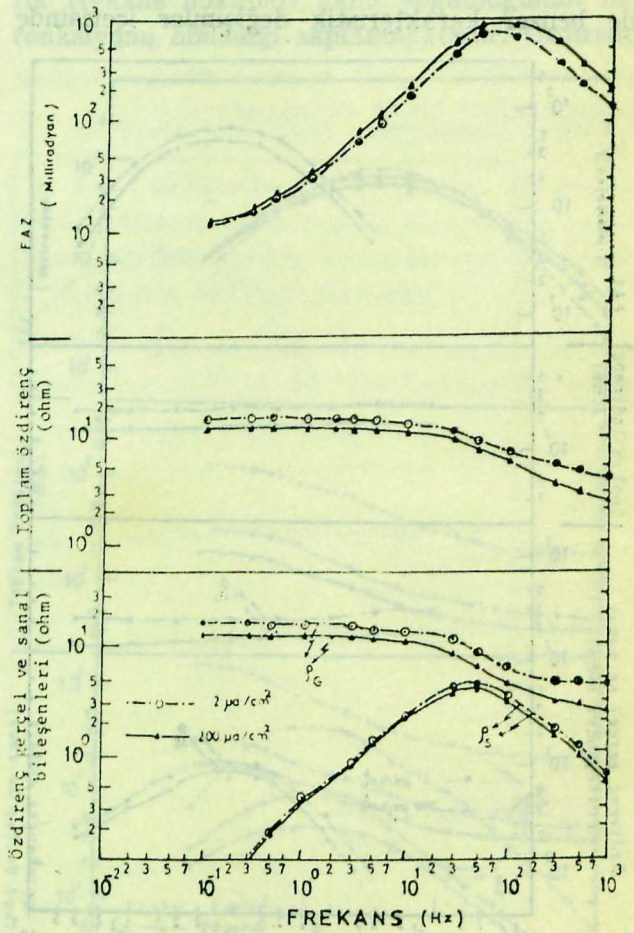
Şekil 7 deki model ortamının elektrolit konsantrasyonunun artırılması sonucu elde edilen IP spektrumları, Şekil 8 de görülmektedir. Elektrolit konsantrasyonu 10^{-2} normaliteliktedir. Bu elde edilen spektrum eğrileri bir önceki (Şekil 7) eğrilere göre farklılık gösterdikleri izlenmektedir. Faz açısı spektrum eğrilerinin tepe noktasının 10 Hz civarına kaymış olması önemli bir farklılıktır. Yani, daha yüksek konsantrasyonla faz açısının tepe noktası daha yüksek frekanslara doğru kaymaktadır. Benzer şekilde, toplam özdirenç eğrisinin dönüm noktası da 10 Hz civarına doğru kaymaktadır. Keza, gerçel ve sanal bileşenlerde de bu durum görülmektedir. Akım yoğunluğunun artırılmasıyla yine yukarıda sözkonusu edilen

değişimleri burada da görebilmekteyiz. Ancak, sanal bileşen eğrileri bir önceki spektrum eğrisine göre frekansla değişimlerinin farklı olduğunu da vurgulamak gerekir.



Şekil 8. 10^{-2} normalitedeki H_2SO_4 elektrolit ortamında bulunan paslanmaz çelik levha modelinin IP spektrumları.

Pelton (1978)'nin kullandığı Cole - Cole elektriksel modeli ve Wonge (1979) elektrokimyasal modelleme verileri ile yapılan bu deneysel çalışma uygunluk gösterir. Ancak, Wonge



Şekil 9. 10^{-1} normalitedeki H_2SO_4 elektrolit ortamında bulunan paslanmaz çelik levha modelinin IP spektrumları.

Şekil 9, 10^{-1} normaliteli H_2SO_4 elektrolit ortamında paslanmaz çelik levha modelinden (yine aynı modelin) ölçüm sonucu elde edilen spektrumlardır. Bu spektrum eğrilerinde de göze çarpan en önemli özellik faz spektrum eğrisinin maksimum tepe noktasının yüksek frekanslara (100 Hz civarı) doğru kaymış olmasıdır. Toplam özdirençteki 1 Hz frekansında akım yoğunluklarına göre değişimleri; $2 \mu A/cm^2$ de 13.3 Ohm, $200 \mu A/cm^2$ de 11.2 Ohm dur.

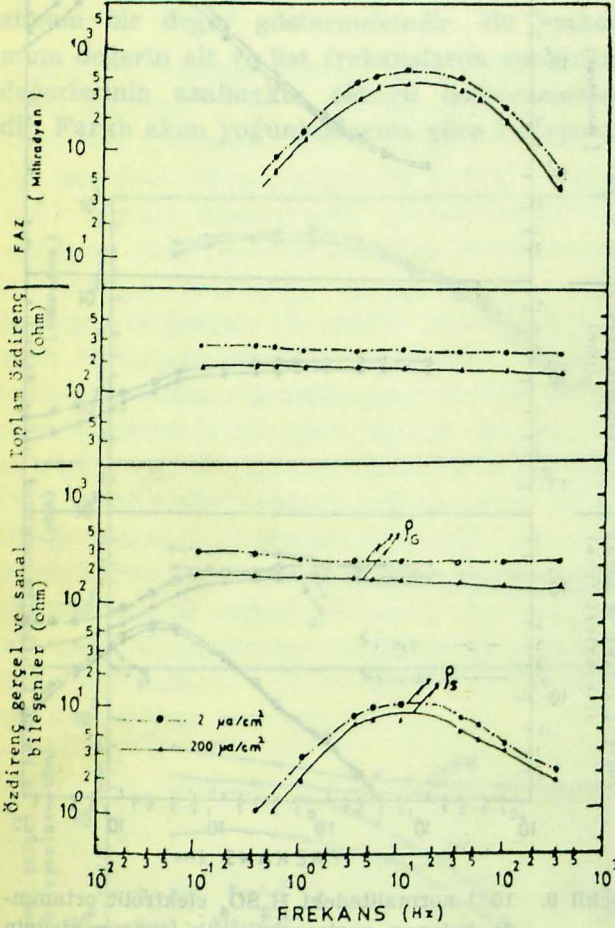
Yukarıdaki kayaçların elektrod kutuplaşmalarını içeren model çalışmalarından elde edilen bu verilere göre, bazı sonuçlara varmak olanaklıdır. Bir kayaç modelinin geniş bir frekans bandı aralığında elektriksel davranışı için,

(1979) spektral çalışmalarında kritik frekansın elektrolitin konsantrasyonuyla ne şekilde değiştiğini açıklamamaktadır. Bu çalışmada görüldüğü gibi kritik frekans değerleri elektrolit konsantrasyonuna önemli bir şekilde bağlıdır. Bununla beraber kritik frekanslar, bu verilere göre spektrumların genel görünümü içerisinde, akım yoğunluklarının bir fonksiyonu olmamaktadır. Ayrıca, özdirenç sanal bileşenindeki değişimlerin, faz spektrumlarının değişim karakteristiğini etkilemekte olduğu ve doğrusal olmayan davranışlar daha belirgindir.

IP olayının çeşitlerinden olan zar kutuplaşmaları için, Şekil 10'da 10^{-1} normalitedeki NaCl elektrolit ortamında kum - kil karışımı

modelin IP spektrumlarıdır. Kum tane çapları 1.5 mm dir. Yukarıdaki çalışmalarda olduğu gibi, özdirenç gerçel bileşenin toplam özdirenç spektrumu ve sanal bileşenin faz spektrumu ile benzer karakteristik değişimler içerisinde

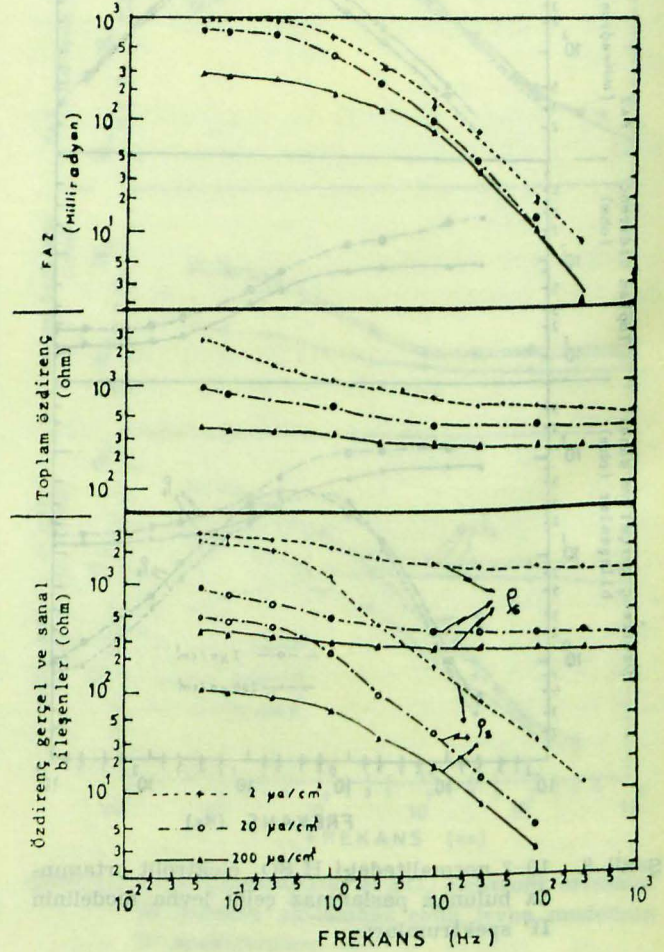
görülmektedir. Bu çalışmadan elde edilen veriler Şekil 10 dan farklı bir görünüm arz etmektedir. Bu farklılık faz spektrumunun maksimumunu gösteren tepe noktasının 10 Hz civarına koymuş olmasıdır. Kum tane çaplarının



Şekil 10. 10⁻¹ normalitedeki NaCl elektrolit ortamında kum-kil (kum tane çapı: 0.5 mm) karışımı modelin IP spektrumları.

olduğu izlenmektedir. Spektrumlar artan frekansla azalan eğriler görünümündedirler. Akım yoğunlukları artırıldıkça değerlerdeki küçülmeler, özellikle faz açısı maksimumlarında, belirgin bir şekilde görülmektedir. Metalik mineral ortamlarına göre bu azalma önemli bir faktör olarak ortaya çıkmaktadır. Örneğin, 1 Hz te faz açısı değerleri 2 µa/cm² de 578 mrad, 20 µa/cm² de 400 mrad ve 200 µa/cm² de 191 mrad. Toplam özdirenç ve faz açısı spektrum eğrileri akım yoğunluğu arttıkça daha düzgün değişim karakteristikleri göstermektedirler.

Kum tane çapları 0.5 mm olan kum-kil karışımı modelin IP spektrumları Şekil 11 de

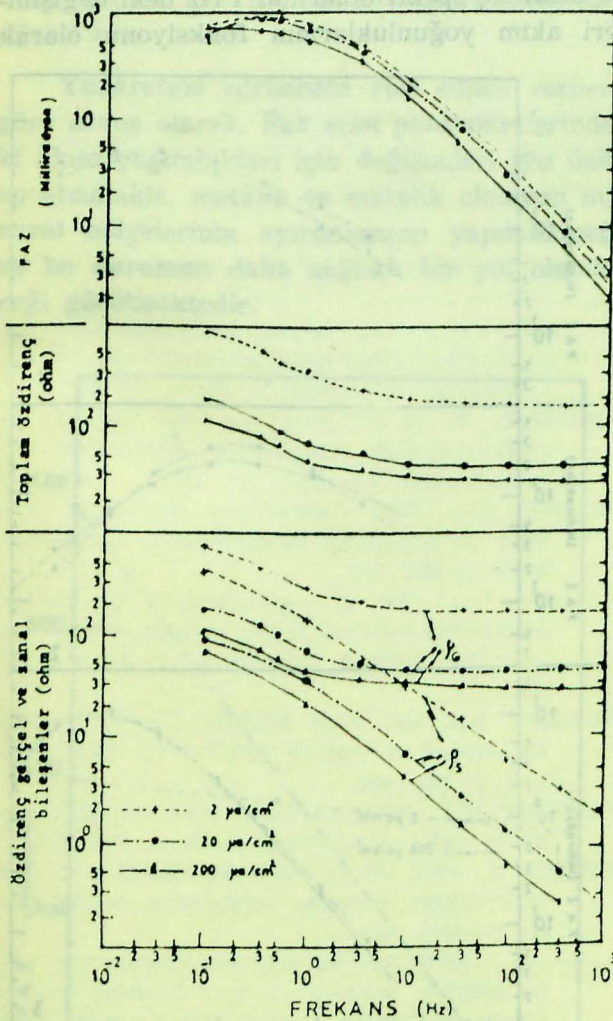


Şekil 11. 10⁻¹ normalitedeki NaCl elektrolit ortamında kum-kil (kum tane çapı: 1.5 mm) karışımı modelin IP spektrumları.

küçülmesiyle kritik frekans yüksek değerlere kaymıştır. Kum tane çaplarına göre elde edilen bu veriler Wonge (1979) ve Greasmean (1971) sonuçlarıyla uygunluk gösterir (Geophysics, 1979 bak sayfa 1256). Akım yoğunluklarının artırılmasıyla faz açısı değerlerindeki küçülmeler bir önceki model çalışmasına göre az olmakla beraber düzgün bir görünüm içerisindedir. Özdirenç eğrilerinde yukarıda sözkonusu olan benzer değişim özelliklerinin bulunmakta olduğu ve akım yoğunluklarının eğrilerin genel karakterlerinde bir etkinliği olmamaktadır.

Yapay karışımli bu doğal modelli IP zar kutuplaştırma çalışmaları yanında, yapay olarak hazırlanan grafit levha modellerinin 10^{-3} ve 10^{-2} normaliteli H_2SO_4 ortamında spektral ölçümleri yapılmıştır. Şekil 12 - 13 den görüldüğü gibi ortamın iyon konsantrasyonu

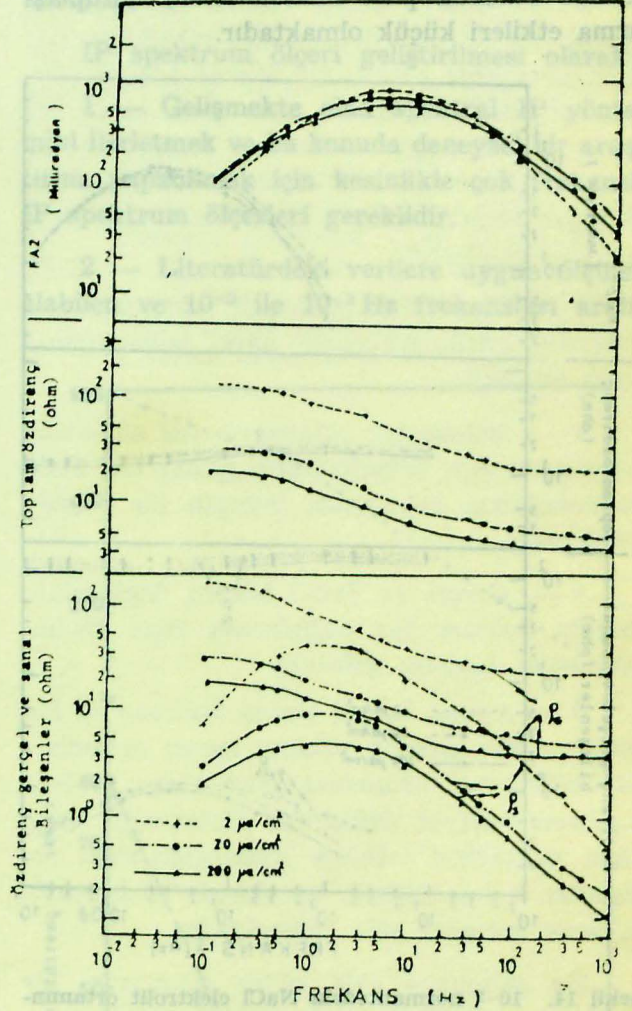
laştırılmaları yapılacak olursa aşağıdaki sonuçlar elde edilebilir: Akım yoğunluğunun etkisi ile spektrum değerlerinde düzgün bir şekilde önemli değişimler görülmekte, ancak, kritik frekans noktaları akım yoğunluğunun bir fonksiyonu olmadığı saptanmaktadır. Öz direnç



Şekil 12. 10^{-3} normalitedeki H_2SO_4 elektrolit ortamında bulunan grafit levha modelinin IP spektrumları.

arttıkça kritik frekanslar yüksek frekanslara doğru kaymaktadır. Söz konusu edilen yukarıdaki açıklamaların bu model spektrumları için de geçerli olduğu, ancak akım yoğunluğu artımlarında öz direnç ve faz spektrumlarında düzgün azalmaların bulunmakta olduğunu vurgulamak gerekir.

Sediman ortamları temsil eden bu model çalışmaları sonucu elde edilen verilerin karşı-



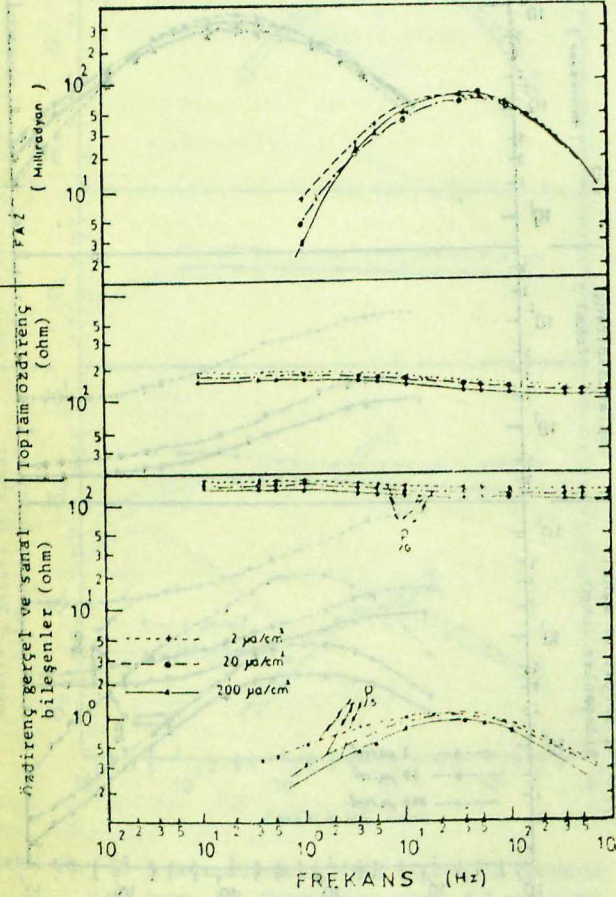
Şekil 13. 10^{-2} normalitedeki H_2SO_4 elektrolit ortamında bulunan grafit levha modelinin IP spektrumları.

değerleri, akım miktarının artırılmasıyla önemli derecede küçülmektedir. Ayrıca, akım arttıkça faz açısı değerlerindeki küçülmeler metalik mineral ortamlarına göre daha fazla olduğunu belirtmekle özetlenebilir.

Karışımli kutuplaştırma ortamları için kil-pirit ortamlarını içermekte olan spektrum ölçümleri Şekil 14'de görülmektedir. Bu çalışma, modellerinin hazırlanması bölümünde de değinildiği gibi, bir maden yatağının bozuşma (al-

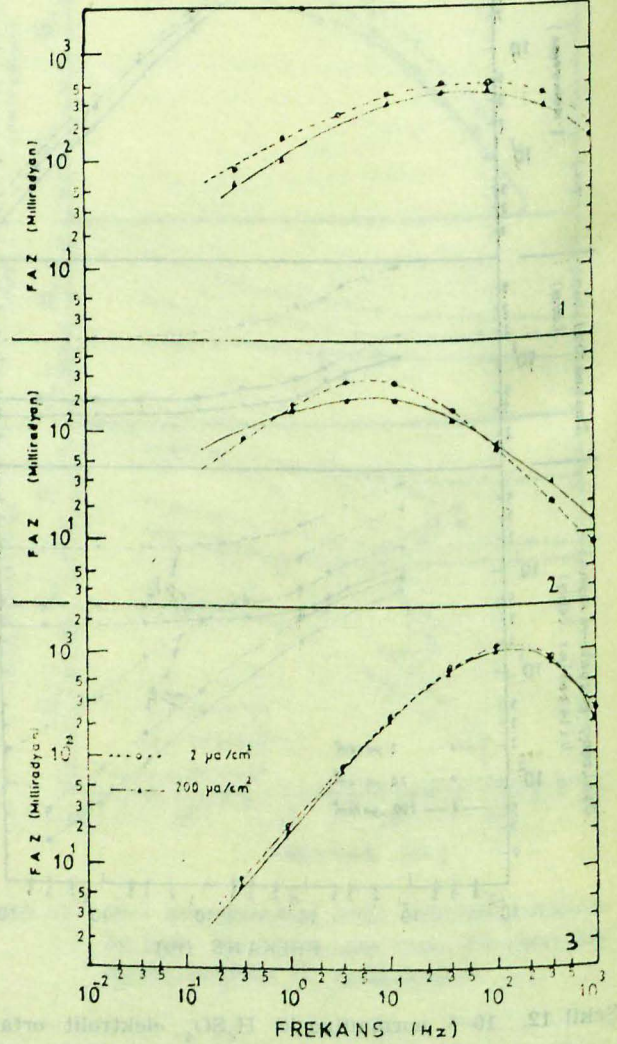
terasyon) zonlarını simgelemektedir. Faz açısı değerleri maksimum 100 mrad değerlerindedir. Elektrod kutuplaştırmalarına karşın oldukça küçük değerlerdedir. Akım miktarı arttırıldıkça spektrum değerleri küçülmektedir. Ancak, öz direnci düşük olan kil ortamında dağınık bir şekilde bulunan pirit minerallerinin kutuplaştırma etkileri küçük olmaktadır.

Metalik ve metalik olmayan mineral ortamların model çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre IP spektrumlarını ayrı ayrı inceledik. Akım yoğunluklarının bu kayaç modelleri üzerinde ölçülen fiziksel parametrelere olan etkilerini doğrudan izleyebilmek için faz ve öz direnç spektrumlarının 1 Hz deki değişimleri akım yoğunluklarının fonksiyonu olarak



Şekil 14. 10^{-2} normalitedeki NaCl elektrolit ortamında kil - pirit karışımı modelin IP spektrumları.

Farklı metalik ve metalik olmayan yapay levha modellerinin aynı elektrolit ortamında (10^{-1} NaCl) IP spektral davranışlarının araştırılması da yapıldı. Şekil 15 faz spektrumlarını göstermektedir. Bu model çalışması, aynı elektrolit ortamında farklı modellerin bulunmalarıyla elde edilen faz spektrumlarındaki yanıtların farklılığını açık bir şekilde ortaya koymaktadır. Böylece, aynı ortamda farklı minerallerin bulunması koşullarında elde edilecek IP spektrum yanıtlarının da farklı olacağı sonucuna varılmaktadır.

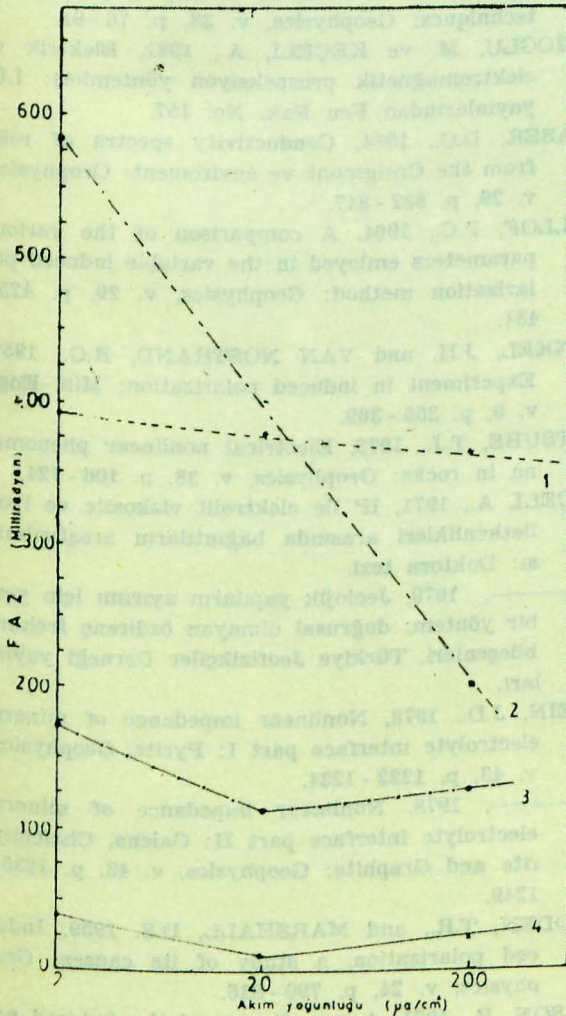


Şekil 15. 10^{-1} normalitede NaCl elektrolit ortamında bakır (1), grafit (2), paslanmaz çelik (3) levha modellerinin IP faz spektrumları.

çizildi. Şekil 16'dan görüldüğü üzere, metalik mineral içermiyen ortamların faz açısı değerleri akım yoğunluğu arttıkça, yaklaşık olarak, düzgün azalan bir eğri görünümünde oldukları, ancak, metalik mineral içeren ortamlarda bu değişimler farklılık göstermektedir. Yani, faz açısı değerleri metalik mineral ortamları için doğrusal olmayan değişimler içermektedir. Akım yoğunlukları için yanıtlardaki bu farklı-

lık gösterme özelliğinin bir maden yatağının mineralizasyon bölgelerinin saptanmasında kullanılabilir yararlı bir sonuç olacağı belirlenmektedir. Toplam öz direnç eğrilerinde de akım yoğunlukları için elde edilen değerler, bu bölümün ön kısmında belirtildiği üzere, doğrusal Ohm kanunu ile uygunluk göstermemektedir (Şekil 17).

Yukarıdaki eğrilerden elde edilen verilere göre sonuç olarak, Faz açısı parametrelerindeki akım yoğunlukları için değişimleri göz önüne alınarak, metalik ve matalik olmayan mineral bölgelerinin ayırımının yapılabileceği ve bu durumun daha sağlıklı bir yol olabileceği görülmektedir.



Şekil 16. Faz spektrumlarının akım yoğunluklarına göre değişimleri (1 - Grafit, 2 - Kum - kil karışımı 3 - Bakır, 4 - Paslanmaz çelik).

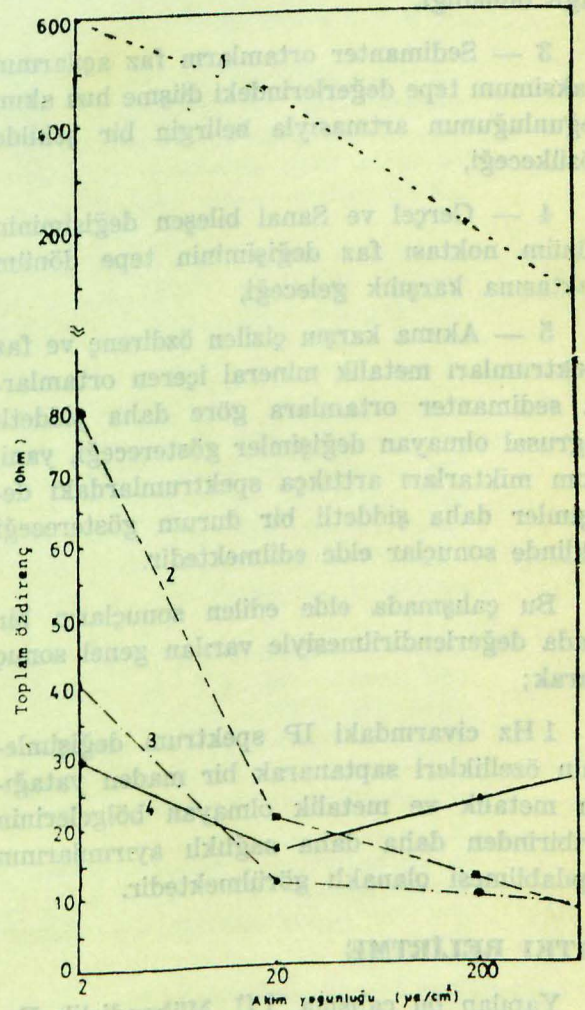
SONUÇLAR

Bu çalışmada, IP spektrum ölçeri geliştirilmesi ve ayrıca IP spektrumları araştırılması gibi iki yönlü olarak sonuç elde edilmiştir. Bu nedenle elde edilen sonuçlar iki grupta toplanabilir.

IP spektrum ölçeri geliştirilmesi olarak;

1 — Gelişmekte olan spektral IP yöntemini ilerletmek ve bu konuda deneysel bir araştırma yapabilmek için kesinlikle çok frekanslı IP spektrum ölçerleri gereklidir.

2 — Literatürdeki verilere uygun ölçüler alabilen ve 10^{-2} ile 10^{+3} Hz frekansları aralı-



Şekil 17. Öz dirençlerin akım yoğunluklarına göre değişimleri (1 - kum - kil, 2 - grafit, 3 - bakır, 4 - paslanmaz çelik).

ğında çalışabilen, kayaçların elektriksel özdirincinin gerçel ve sanal bileşenlerini ölçebilen bir laboratuvar tipi IP ölçeri ilk kez bu çalışmada gerçekleştirilmiştir.

IP spektrumları araştırmaları olarak;

1 — Şimdiye kadar bilinen faz spektrumunun 0,1 ile 1 Hz frekansları aralığında metalik süflitlerde artma, grafitlerde azalma göstermesi özelliği mineral ayırımında kesin bir sonuç olamayacağı, sözkonusu frekans aralığında ortamın elektrolit konsantrasyonuna göre alçak veya yüksek frekanslara doğru kayma gösterebileceği,

2 — Faz spektrumlarının maksimumunu gösteren kritik frekansın akım yoğunluğuna bağlı olmadığı,

3 — Sedimanter ortamların faz açılarının maksimum tepe değerlerindeki düşme hızı akım yoğunluğunun artmasıyla belirgin bir şekilde gözükeceği,

4 — Gerçel ve Sanal bileşen değişiminin dönüm noktası faz değişiminin tepe dönüm noktasına karşılık geleceği,

5 — Akıma karşın çizilen özdirinç ve faz spektrumları metalik mineral içeren ortamlarda sedimanter ortamlara göre daha şiddetli doğrusal olmayan değişimler göstereceği, yani, akım miktarları arttıkça spektrumlardaki değişimler daha şiddetli bir durum göstereceği şeklinde sonuçlar elde edilmektedir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçların bir arada değerlendirilmesiyle varılan genel sonuç olarak;

1 Hz civarındaki IP spektrum değişimlerinin özellikleri saptanarak bir maden yatağının metalik ve metalik olmayan bölgelerinin birbirinden daha daha sağlıklı ayırımlarının yapılabilmesi olanaklı görülmektedir.

KATKI BELİRTME

Yapılan bu çalışma, İ.Ü. Mühendislik Fakültesince kabul edilen doktora tezinin (Erdoğan, A., 1982), özetlenmiş olarak, bazı bölümlerini oluşturmaktadır. Yazar, bu çalışmanın gerçekleştirilmesi süreçlerinin her safhasında, çalışmalarını yönlendiren, yapıcı teşvik ve değer-

li önerileri ile doktora tezi yöneticisi Sayın Prof. Dr. Ali Keçeli'ye teşekkür eder; ayrıca, deneysel çalışmalar için jeofizik laboratuvarını ve IP spektrum ölçerinin yapımları için gerekli tüm olanakları sağlayan Jeofizik Mühendisliği Bölüm Başkanlığına, elektronik devre düzenlemeleri sırasında öneri ve katkıları ile İ.T.Ü. Ölçme Kürsüsünden Sayın Oruç Bilgiç'e ve Devreler Kürsüsünden Sayın M. Ali Tan'a, pratik yönden emeği geçen İ.Ü.M.F. Jeofizik Öğretim Üye ve yardımcılarına şükranlarını belirtir.

YARARLANILAN KAYNAKLAR

- COLLETT, L.S. and KATSUBE, T.J., 1973, Electrical parameters of rocks in developing geophysical techniques: Geophysics, v. 38, p. 76 - 91.
- DİZİOĞLU, M. ve KEÇELİ, A., 1981, Elektrik ve elektromagnetik prospeksiyon yöntemleri: İ.Ü. yayınlarından Fen Fak. No. 157.
- FRASER, D.C., 1964, Conductivity spectra of rocks from the Craigmont ve environment: Geophysics, v. 29, p. 832 - 847.
- HALLOF, P.C., 1964, A comparison of the various parameters employed in the variable induced polarization method: Geophysics, v. 29, p. 425 - 434.
- HENKEL, J.H. and VAN NOSTRAND, R.G., 1957, Experiment in induced polarization: Min. Eng., v. 9, p. 355 - 369.
- KATSUBE, T.J., 1973, Electrical nonlinear phenomena in rocks: Geophysics, v. 38, p. 106 - 124.
- KEÇELİ, A., 1971, IP ile elektrolit vizkosite ve iyon iletkenlikleri arasında bağıntıların araştırılması: Doktora tezi.
- , 1979, Jeolojik yapıların ayırımı için yeni bir yöntem: doğrusal olmayan özdirinç frekans bileşenleri. Türkiye Jeofizikçiler Derneği yayınları.
- KLEIN, J.D., 1978, Nonlinear impedance of mineral electrolyte interface part I: Pyrite, Geophysics, v. 43, p. 1222 - 1234.
- , 1978, Nonlinear impedance of mineral electrolyte interface part II: Galena, Chalcopyrite and Graphite: Geophysics, v. 43, p. 1235 - 1249.
- MADDEN, T.R., and MARSHALL, D.S. 1959, Induced polarization, a study of its causes: Geophysics, v. 24, p. 790 - 816.
- NILSON, B., 1971, A new theory of the induced polarization phenomenon: Geoexploration, v. 9, p. 35 - 54.
- PELTON, W.H. and et al, 1978, Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP: Geophysics, v. 43, p. 588 - 609.

SCOTT, J.H. and WEST, G.F., 1969, Induced polarization of synthetic, high-resistivity rocks containing disseminated sulfides: Geophysics, v. 34, p. 87-99.

SEIGEL, H.O., 1959, Mathematical formulation and type curves for induced polarization. Geophysics, v. 24, p. 547-565.

SMITH, D.E., 1971, Method for phase angle measurement in second harmonic alternating current polarography: Analytical chemistry, v. 43, p. 775-779.

———, 1966, AC polarography and related techniques; Theory and Practice: in «Electroanalytical Chemistry» (editor) A.J. Bard, p. 115.

SNYDER, D.D., 1980, Exploration data consultants, Inc., Denver, Colorado.

SUMNER, J.S., 1976, Principles of induced polarization for geophysical exploration: Elsevier scientific publishing company.

VACQUER, N., 1957, Prospecting for groundwater by induced electrical polarization: Geophysics, v. 22, p. 660-687.

WONG, J., 1979, An electrochemical model of the induced polarization phenomenon in disseminated sulfide ores: Geophysics, v. 44, p. 1245-1256.

WONG, J., 1981, Induced polarization in disseminated sulfide ores containing elongated mineralization: Geophysics, v. 46, p. 1258-1268.

ZONGE, K.L., 1972, Comparison of time, frequency, and phase measurements in induced polarization: Geophysical Prospecting, v. 20, p. 626-648.

ZONGE, K.L. and WYNN, J.C., 1975, Recent advances and application in complex resistivity measurements: Geophysics, v. 40, p. 851-864.

ZONGE, K.L., 1982, Hydrocarbon exploration using induced polarization, apparent resistivity and electromagnetic scattering: Presented at the 51st annual international SEG meeting.

