

DEĞİŞKEN FREKANSLI İ.P. METODUNDA, AŞIRI GERİLİMİN REEL VE İMAJİNER BİLEŞENLERİNDEN İSTİFADE İLE YAN KAYAÇ ANOMALİLERİNİN SÜLFÜRLÜ MİNERAL YATAKLARININ ANOMALİLERİNDEN AYRILMASI*

AKIN GÖKİŞİK

SEL Mühendislik Limited Şirketi, Ankara

ÖZET. — Aşağıda sunulan çalışmada, jeofizik prospeksiyonda İ.P. metodları şeklinde istifade edilen aşırı gerilim olayı (overvoltage), sebepleri ile yeni bir görüş açısı altında deneysel ve teorik olarak incelenmiş, elde edilen neticelerin değişken frekanslı İ.P. metodunun saha tatbikatında ve tefsirinde karşılaşılmakta olan güçlüklerin çözümü yönünde kullanılması imkânları araştırılmıştır.

Konu, muhtelif sahalarda yapılan İ.P. etütleri sırasında alınan ölçülerde ortamın zahiri rezistivitesinin frekansa tabi değişiminin çoğu kere ekstramumlu bir eğri verişinin fark edilmesi ile ortaya çıkmıştır. Diğer taraftan, bu çalışmadan önce konu ile ilgili araştırmacıların neşriyatlarında bahsolunan değişimin, her zaman frekans büyürken zahiri rezistivitenin eksponansiyel karakterde eksilen bir eğri ile ifade edilebileceği ileri sürülmüştür.

Gerek sahadaki formasyonlar, gerek sahadan alınan kayaç numuneleri, gerekse hazırlanan modeller üzerinde yapılmış olduğumuz pek çok sayıdaki ölçmelerde bahsolunan değişimin karakterinin genel olarak beş grupta toplandığı görülmüştür. Bu karakterlerden dördünün ekstramumlu oluşu, aşırı gerilim olayının sebebinin bir rezonans olayını da ihtiva etmesi ihtimalini akla getirmiştir. Bu ihtimal üzerine kayaç içindeki solüsyonlardaki iyonların alternatif elektrik alanı tesirinde yaptıkları titreşimlere istinat ettirilen teorik hesaplar yapılmış ve düşünüş tarzı doğru olduğu takdirde, ortamın empedansını ifade etmesi gereken bir matematik ifade elde edilmiştir. Bahsolunan ifadenin diskriminantının ve köklerinin değerlerine göre altı tip değişim grafiği vermesi ve bunların ölçülerimizde elde etmiş olduğumuz karakterlerle aynı oluşu, düşünüş tarzımızın doğruluğunu ortaya koymuştur.

Bu durumda netice olarak, kayaçların çatlak ve porlarını dolduran eriyiklerin içinde bulunan iyonların alternatif elektrik alanı tesirinde yaptıkları zoruna titreşimin, aşırı gerilimi meydana getiren fazla enerji harcanmasının sebebi olduğu ortaya konmuştur.

Elde edilen empedans ifadesinden reel ve imajiner bileşenlere ait ifadeler ayrılmış ve bunların ölçülen $pa = F(f)$ eğrileri üzerinden okunabilecek (ekstramumlar ve pdc) gibi değerler cinsinden yazılmış formülleri hesaplanmıştır. Bu yeni ifadeler sayesinde sahada veya laboratuvarında ölçülerek elde edilmiş bir $pa = F(f)$ değişiminin reel ve imajiner bileşenlerinin frekansa göre değişim grafiklerinin de hesabı mümkün kılınmıştır.

Bu imkânlar kullana $\hat{I}.F. = \frac{\rho_{i_1} - \rho_{i_2}}{\rho_{r_1} - \rho_{r_2}}$ ile İyonik Faktör adı altında bir parametrisin tarif edilmiştir.

Gerek $\hat{I}.F.$ parametrisinin diğer kullanılmakta olan parametrelere karşı üstünlüğünün izahı, gerekse aynı parametrisinin yan kayaçların verdiği anomalileri bertaraf edebilme özelliğine sahip oluşunun ispatı, çalışmanın saha etütlerine tabiki olarak takdim edilmiştir.

B Ö L Ü M I

A. AŞIRI GERİLİMİN (OVERVOLTAGE) TARİFİ VE SEBEPLERİ

İçerisinden elektrik akımı geçen heterojen bir ortamdaki süreksizlik yüzeylerinde çeşitli sebeplerle, akım taşıyan partiküllerin hareketlerini güçleştiren olaylar meydana gelmektedir. Bu olaylar

* Akın Gökışık tarafından mart 1968 de İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Jeofizik Enstitüsüne verilen doktora tezidir.

sonucunda akım taşıyan partiküllerin süreksizlik yüzeylerini geçişleri sırasında omik dirençten doğan voltaj düşmesine ilâveten başka sebeplerden doğan bir voltaj düşmesi daha vaki olmaktadır ki, bu düşüme «aşırı gerilim (overvoltage)» denir. Olayın sebebi akım geçirilen ortamın özelliğine göre: kimyasal, elektrokimyasal, termik, elektrokinetik, elektroosmotik veya elektromanyetik olaylardan biri veya birkaçı neticesinde meydana gelen enerji depolanmalarıdır.

Çalışmamızın gayesi aşırı gerilimden jeofizik prospeksiyon metotlarında istifade olduğu için, hadiseyi inceleyeceğimiz ortamın arz kabuğuna uygun olması gerekir. Kayaçlardaki elektrik iletiminin genellikle iyonik iletim şeklinde olduğunu ve ancak çok özel hallerde elektronik iletimden kısmen bahsedilebileceğini belirttikten sonra, olayı inceleyeceğimiz ortamı gözenekleri iyonize sıvılarla dolu, yer yer yalıtkan yüzeylerle bölünmüş olarak tarif edelim.

Ortamdan geçirilen elektrik akımı, iyonik polarlanma neticesinde madde taşınmasına ve gözenekler içerisindeki hidrostatik basınç dengesinin bozulmasına sebep olur (Şek. 1a). Elektrik alanı içerisinde hareket eden iyonlar yalıtkan yüzeyler arkasında toplanarak gözenekğin iki yanındaki hidrostatik basıncın artmasına sebep olurlar. Bu bir enerji depolanması olup, elektrik alanının kesilmesi halinde ortam denge durumuna dönerken açığa çıkacaktır. Bu halde ortamın kaçacağı çok fazla olan bir elektrolitik kondansatör gibi davrandığı söylenebilir.

Hadiseyi sinüsoidal alternatif alan tesirinde inceleyelim: Alanın mutlak değerce artma gösterdiği $n \pi$ ve $\frac{2n+1}{2} \pi$ (n =sıfır veya pozitif bir tamsayı) aralıklarında ortamda yukarıda belirtildiği gibi enerji depolanmaları olacağından meydana gelecek voltaj düşümü de yalnızca omik dirence sahip bir ortamdakine nazaran büyük olacaktır. Akımın mutlak değerce azalma gösterdiği $\frac{2n+1}{2} \pi$ ve $(n+1) \pi$ aralıklarında ise ortamdaki enerji depolanmalarının deşarjı varit olduğundan, elektrik alanının harcadığı enerji ancak ortamın denge durumuna dönüşünü kontrol mahiyetinde olup daha küçüktür (Şek. 1b).

Buraya kadar yapılan düşüncüler doğru ise, tatbik edilen sinüsoidal elektrik akımının, ortamın herhangi iki noktası arasında izlenecek dalga şeklinin Şekil 1b de verilen şekille tatbik edilen sinüs dalgasının toplamı şeklinde olması gerekir (Şek. id).

Durum aşağıda izah edildiği gibi deney ile incelenmiş ve uygun neticeler alınmıştır.

Deneyde gözenekleri iyonize sıvılarla dolu ve yer yer yalıtkan yüzeylerle bölünmüş ortam, Şekil 2a da gösterilen modelle temsil edilmiştir. Model olarak 5 cm çapında ve 30 cm boyunda bir cam boru içerisine 2 cm kalınlığında, bakır sülfat eriyiği ile doyurulmuş silis kumu ve 0.7 cm kalınlığında naylon plaklar, şekilde görüldüğü gibi art arda yerleştirilmişlerdir. Kullanılan naylon plaklar ile cam boru arasında, bakır sülfat eriyiğini sızdırarak ortamda elektronik iletkenliği az da olsa sağlayabilecek derecede ince bir aralık bırakılmıştır. Cam borunun iki ucuna modelden akım geçirecek elektrotlar, modelin boyunu 1/3 oranında bölen iki noktaya ise model içerisindeki dalga şeklini osiloskopta incelemeyi sağlayacak elektrotlar yerleştirilmiştir. Hazırlanan model Şekil 2b deki devre yardımı ile incelenmiştir. Deney, 1-20 cps arasındaki frekanslarda sinüsoidal akım geçirilerek yapılmış ve dalga şeklinin, model içinde teorik olarak düşünüleneye uygun şekilde bozulduğu osiloskopta görülmüştür. Şekil 3 ve Şekil 4 durumu açıkça belirtmektedir. Deneyde osiloskop ekranından alınan dalga şekli, ortama tatbik edilmiş olan alanın şekli sinüsoidal değişimden çıkarıldığında ortamdaki depolanmalara sarf olan enerjinin değişim şekli elde edilir. Bu şekille tatbik edilen alan arasında, Şekil 4b de de görüldüğü gibi, bir faz farkı vardır. Çeşitli frekanslarda deneyin tekrarlanması sonucunda, faz farkının frekansa tabi değişimi de tespit edilmiş olup, Şekil 5 te gösterilmiştir. Bu hale göre, ortama tatbik edilen potansiyel ile ortamda meydana gelen polarlanma arasındaki faz farkının $n\pi$ radyandan farklı olduğu bütün hallerde, ortamdaki toplam elektrik polarizasyonunun aynı zamanda reel ve imajiner bileşenleri bulunacaktır.

Modelin araziye uygunluğunun bir delili olarak Şekil 6 verilmiştir. Şekilde modelin rezistivitesinin frekansa bağlı değişiminin sahada ölçülen değişimlerden farksız olduğu görülmektedir.

Buraya kadar yapılmış olan teorik düşünüş ve ispatlayıcı deneylerin sonuçlarını aşağıdaki netice şeklinde toplayabiliriz.

Netice

Çimentosuz sedimentler dışında kalan ve çatlakları ile porlarını iyonize sıvıların doldurduğu herhangi bir kayaktan alternatif elektrik akımı geçirildiğinde, endüklem polarlanma olayı şiddetli ve her zaman ölçülebilecek büyüklükte bir imajiner bileşene sahip olarak ortaya çıkmaktadır. Olayın en etkili sebebi por ve çatlakları dolduran eriyiklerdeki iyonların alan tesirinde yaptıkları zoruna titreşimlerdir.

B. AŞIRI GERİLİM OLAYININ TEORİK İZAHI VE ORTAMIN EMPEDANS İFADESİNİN HESABI

Buraya kadar deneysel tespitlerle varmış olduğumuz neticeler üzerinde matematik işlemlerle de ispat mümkün olmuş ve aşağıda sunulduğu şekilde ortama ait empedans ifadesi elde edilmiştir.

Zahiri rezistivitenin frekansa tabi değişiminin ekstramumlu oluşunu ve aynı zamanda imajiner bileşenin mevcudiyetini matematik yoldan ispatlamak için, ortamın yalıtkan yüzeylerle çevrilmiş ve içerisi iyonize sıvılarla dolu bir kompartımanındaki iyon hareketlerini incelemek kâfidir. Kompartıman içerisindeki (+) ve (–) iyonların, E elektrik alanı tesiri ile polarize oldukları zaman, üzerlerine tesir eden kuvvetler Şekil 7 yardımı ile incelenebilir.

Yapılacak hesaplarda kolaylık sağlaması ve kayaçlardaki çatlak durumuna daha uygun olması bakımından, bahsedilen kompartımanın derinlik ve boyunun genişliğine nazaran çok büyük olduğunu kabul edelim. Şekilde görüldüğü gibi, kompartımanın genişliği (L), birim hacim içindeki iyon sayısı (N), bir iyonun elektrik yükü (e) ve kütlesi (m) olsun.

\mathcal{E} elektrik alanı tesiri ile meydana gelen iyonik polarizasyonu, (+) ve (–) iyonların, a_1 ve a_2 düzlemleri arkasına toplanmaları şeklinde düşünelim. Bu durumda ρ ve a_2 düzlemleri ile kompartımanın iki yanını teşkil eden yalıtkan yüzeyler arasında kalan bölgede, birim hacimdeki elektrik yükü:

$$\rho = \frac{N \cdot e}{2} \cdot \frac{L}{L-2x} \quad (1)$$

a_1 ve a_2 düzlemleri üzerinde, birim yüzeydeki elektrik yükü, (ρ) nun bir sabit ile çarpımı olan:

$$\sigma = k\rho = \frac{k N L e}{L-2x} \quad (2)$$

(2) ifadesi ile belirtilebilir. Bu durumda a_1 ve a_2 yüzeyleri, elektrik yük yoğunluğu (σ) olan birer yüklü yüzey olarak düşünülebilir. Bu şartlar altında \hat{I}_1 iyonu üzerine aşağıdaki kuvvetler tesir ederler:

F_1 , elektrik alanının iyon üzerine tesir ettirdiği kuvvet.

F_2 , a_1 yüklü yüzeyinin tesiri.

F_3 , a_2 yüklü yüzeyinin tesiri.

$$F_1 = Ee; F_2 = -2\pi e\sigma, F_3 = -2\pi e\sigma \quad (3)$$

ifadeleri yazılabilir. İyon üzerine a_1 ve a_2 yüklü yüzeyleri tarafından tesir ettirilen toplam kuvvet, (2) ve (3) ifadelerinden:

$$F = F_2 + F_3 = -4\pi e\sigma = \frac{4\pi k e^2 N L}{L-2x} \quad (4)$$

$$4\pi ke^2 N = d \text{ sabitesi ikame edilerek, } F \text{ kuvveti için } F = \frac{L}{L-2x} \cdot d \quad (5)$$

ifadesi elde edilir. (5) ifadesi ile belirli F kuvvetinin, X e tabi değişimlerinin (L) ye nazaran (X) in küçük değerleri için, linier kabul edilmesi halinde, $F = -KX$ (6) elde edilir. Bu ifade ideal bir yayda uzunluk değişmesine karşı doğan kuvvet ifadesidir. Böylece Şekil 7 deki $I_1 (+)$ iyonu sıfır noktası denge durumu olmak üzere bir yayla bağlı gibi mütalaa edilebilir. Aynı düşüncüler $I_2 (-)$ iyonu için de varittir. Buraya kadar yapılan inceleme neticesinde, alternatif elektrik alan tesirinde I_1 ve I_2 iyonlarının yapacakları titreşim hareketlerini, Şekil 8a ve b de görülen titreşim devrelerindeki m_1 ve m_2 kitlelerinin yapacakları mekanik titreşim hareketleri gibi ele almanın mümkün olacağı görülmektedir.

Empedans hesabını mekanik devre üzerinden yapmak yerine, ortamın omik direncini ve rezonans frekanslarındaki davranışlarını da uygun eklerle ifade edebileceğimiz eşdeğer elektrik devre üzerinden yapmak daha uygun olur. Şekil 9 da, bahsolunan elektrik devre görülmektedir.

Ortama eşdeğer empedans davranışında olduğunu ileri sürdüğümüz devre üzerinde empedans önce QW noktaları arasında hesaplanır ve elde edilen ifade R_1 ile toplanırsa, hesaplanmak istenen GW arasındaki empedans elde edilir.

Şekildeki devre hesaplamaya uygun halde çizilir ve determinantla Z_{QW} empedansı hesaplanır. Burada L_1, L_2 eşdeğer devrede görülen selfler, C, C_1 kapasiteler ve (ω) da tatbik edilen alanın açılma hızı olmak üzere aşağıdaki:

$$\begin{aligned} \omega^2 &= \Omega, L_1 + L_2 = L, L_1 \cdot L_2 = M \\ A &= \left[-M\Omega^2 + L \left(\frac{1}{c} + \frac{1}{c_1} \right) \Omega - \frac{1}{c} - \frac{2}{cc_1} \right] \\ B &= \left(L \Omega - \frac{2}{c} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

ikameleri yapılarak

$$Z_{QW} = \frac{RA^2 - iRAB\Omega^{1/2}}{A^2 + B^2\Omega} \quad i = \sqrt{-1} \quad (8)$$

ifadesi elde edilir. Başka bir yazış tarzı ile:

$$Z_{QW} = \frac{\sqrt{A^2 R^2} \cdot \sqrt{A^2 + B^2 \Omega}}{A^2 + B^2 \Omega}$$

kısaltılarak:

$$Z_{QW} = \frac{\pm AR}{(A^2 + B^2 \Omega)^{1/2}} \quad (9)$$

Z_{QW} empedansının (Ω) ya bağlı değişimini inceleyelim. Bunun için önce yine (Ω) nın fonksiyonu olan A ve B ifadelerinin incelenmesi uygun olur. İkinci dereceden bir eşitlik olan A nın kökleri

$$\Omega_{1,2} = \frac{L \frac{c+c_1}{c \cdot c_1} \pm \left[\left(L \frac{c+c_1}{c \cdot c_1} \right)^2 - 4M \frac{c_1+2}{c \cdot c_1} \right]^{1/2}}{2M} \quad (10)$$

Köklerin durumu için diskriminant incelenirse,

$$\Delta = (L_1 + L_2)^2 \left(\frac{c+c_1}{c \cdot c_1} \right)^2 - 4L_1 L_2 \left(\frac{1}{c} + \frac{2}{c \cdot c_1} \right) \quad (11)$$

elde edilir. Δ nın mümkün üç hali için

$$\begin{aligned}\Delta > 0 & ; \frac{L_1+L_2}{4L_1L_2} > \frac{c c_1}{c+c_1} \cdot \frac{c_1+2}{c c_1} \\ \Delta = 0 & ; \frac{L_1+L_2}{4L_1L_2} = \frac{c c_1}{c+c_1} \cdot \frac{c_1+2}{c c_1} \\ \Delta < 0 & ; \frac{L_1+L_2}{4L_1L_2} < \frac{c c_1}{c+c_1} \cdot \frac{c_1+2}{c c_1}\end{aligned}\quad (12)$$

şartları ortaya çıkar.

Diskriminantın (12) şartları ile belirtilmiş olan üç halinden birincisinde, A ifadesinin Ω ya göre iki reel kökü, ikincisinde ise iki katlı bir tek reel kökü vardır. Üçüncü halde ise kökler imajinerdir. Köklerin reel oldukları hallerde işaretlerinin de artı olduğu (10) ifadesinin payında bulunan terimleri kıyaslamak suretiyle, kolayca görülebilir. Diğer taraftan B nin, değeri $\Omega = \frac{2}{Lc}$ olan, (+) işaretli bir

tek reel köke sahip olduğu açıkça belirlidir. Buraya kadar kökleri (Ω) ya göre incelemiş olduk. Aranılan (ω) köklerine $\omega = \pm \sqrt{\omega^2}$ yardımı ile kolayca geçmek kabildir. Yalnız açılmal hızın (-) işaretli olması fizik yönünden bir mana taşıyamayacağından, (ω) köklerinin artı olarak düşünülmesi gerekir.

Tekrar (9) bağıntısına dönelim, ifadenin payındaki $\pm AR$ teriminin işaretinin, A nın değişimi ne durumda olursa olsun, daima artı olması lâzımdır. Aksi halde eksi empedans fizikî yönden manasız olur. Bu durumda, bahsi edilen terimin, mutlak değer olarak mütalaa icap eder. Z_{QW} ifadesi elde edilirken bu terimin karekök içerisinde çıkarıldığı düşünülürse, mutlak değer olarak mütalaa edilmesinde bir mahzur olmadığı anlaşılır. Böylece (9) ifadesi

$$Z_{QW} = \frac{I A I R}{(A^2 + \Omega B^2)^{1/2}} \quad (13)$$

haline gelir.

B nin kökü olan $\omega = \sqrt{\frac{2}{LC}}$ değeri için $A=0$ olmadığından, (13) ifadesinin paydası, her

zaman sıfırdan farklı ve artı işaretlidir. A ifadesinin kökleri olan ω_1 ve ω_2 , açılmal hızlarına tekabül eden f_1 ve f_2 frekansları aynı zamanda Z_{QW} empedansının rezonans frekanslarıdır. Z_{QW} nin hesabından sonra, toplam empedans olan Z_{GW} yi teşkil edelim.

$$Z_{GW} = Z_{QW} + R_1$$

Gerekli hesap ve kısaltmalardan sonra

$$Z_{GW} = \frac{\left\{ (R + R_1)A^2 + R_1B^2\omega^2 + R^2A^2B^2\omega^2 \right\}^{1/2}}{A^2 + B^2\omega^2} \quad (14)$$

elde edilir.

Z_{GW} empedansının minimum olduğu frekanslar, Z_{QW}^2 nin rezonans frekansları olan f_1 ve f_2 dir. A nın diskriminantının 0 olması halinde iki kök çıkışarak bir tek rezonans frekansı olarak ortaya çıkarlar. Z_{QW} empedans ifadesi, kayaç yapısına eşdeğer olarak seçilen bir ortamdaki iyon hareketleri üzerine yapılan hesaplar neticesinde elde edilmiş olduğundan, $Z_{GW} = F(f)$ değişimlerinin arazi ve laboratuvarında ölçülen değişimlerle aynı karakterde olması gerekir.

Bu hale uygun olarak Z_{GW} empedansının frekansa bağlı değişimlerinin karakterleri de, A ifadesinin diskriminantının üç hali ve ω köklerinin kullanılan frekans bandına göre durumları ile belirlenmektedir. Kullanılan frekans bandı 0-f cps olsun, bu halde aşağıda verilen altı durum:

$\Delta > 0$;	$0 = \omega_1 < \omega_2 \leq f$	1
$\Delta > 0$;	$0 < \omega_1 \ll \omega_2 \leq f$	2
$\Delta > 0$;	$0 < \omega_1 < \omega_2 \leq f$	3
$\Delta > 0$;	$0 < \omega_1 < \omega_2 \leq f$	4
$\Delta = 0$;	$\omega_1 = \omega_2 < f$	5
$\Delta > 0$	ω_1, ω_2 <i>imajiner</i>	6

için Z_{GW} empedans ifadesinin frekansa göre değişim karakterleri ayrı ayrı olup, her biri sahada ve laboratuvarında ölçülmüş karakterleri teyit etmektedir. Şekil 10 dan Şekil 15 e kadar bahsolunan teorik değişimlerle çeşitli kayaçlar üzerinde ölçülmüş değişimler mukayeseli olarak gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 10 da bugüne kadarki yayınlarda tek karakter olarak ileri sürülmüş olan ekstramumsuz ve ekspansiyel bir eksiliş karakterindeki değişimin de tarafımızdan ölçülmüş ve elde etmiş olduğumuz empedans ifadesince de özel bir hal olarak teyit edilmiş oluşuna son derece dikkat çekmek uygundur.

Böylece magmatik, çimentolu sedimenter ve şistî yapı gösteren kayaçlarda, aşırı gerilim olayını doğuran en tesirli sebebin, kayaçlar içerisindeki çözeltilerdeki iyonların alternatif elektrik alanı tesirinde yaptıkları zoruna titreşim hareketleri olduğu anlaşılmış olur. Herhangi bir sistemin, zoruna titreşim yaptığı haldeki empedansı, sistemin öz yapısının ve titreşmeye mecbur edildiği frekansın kompleks bir fonksiyonu olduğuna göre, aşırı gerilim olayı reel ve imajiner bileşenlere sahip, kompleks bir polarizasyon olarak ortaya çıkar.

B Ö L Ü M II

A. KAYAÇ DOKUSUNUN REEL VE İMAJİNER BİLEŞENLERE TESİRİ

Bölüm I de, kayaç dokusunun matematik ve fizik olarak tarifi, çatlakları iyonize sıvılarıyla dolu ortamdaki L , N , e gibi büyüklüklerle ifade edilmiş ve ilgili formüller çıkarılmıştı. Ancak sahada veya laboratuvarında jeofizik ölçüleri ile elde edilebilecek done, yalnızca $\rho\alpha = F(f)$ (zâhiri rezistivitenin frekansa tabi değişimi) eğrisi olduğundan, elde edilen Z_{GW} (empedans), Z_r (empedansın reel bileşeni), Z_i (empedansın imajiner bileşeni) arazide ölçülebilen doneler şeklinde ifadelerinin de elde edilmesi gerekir.

Sahada ölçülen $\rho\alpha = F(f)$ eğrisinin üzerinden okunabilecek ρ_{dc} (doğru akımla okunan rezistivite), ρ_{min} (eğrinin minimum rezistivite değeri) ve ρ_f (istenilen herhangi bir frekansa ait rezistivite değeri) gibi büyüklükleri formülde sırası ile Z_{DC} , Z_{min} , Z_f olarak yerine koyar, aynı zamanda da $B\omega/A = Q$ ikamesini yaparsak, gerekli hesaplamalar sonunda:

$$\text{Empedans ifadesi için } Z = \left(\frac{Z_{min}^2 Q^2 + Z_{DC}^2}{I + Q^2} \right)^{1/2} \quad (15)$$

elde edilir, buradan Q çekilerek

$$Q = \left(\frac{Z_{DC}^2 - Z_f^2}{Z_f^2 - Z_{min}^2} \right)^{1/2} \quad (16)$$

elde edilir.

Buradan reel bileşen için,

$$Z_r = \frac{Z_{DC} - Z_{min} Q^2}{I + Q^2} \quad (17)$$

İmajiner bileşen için,

$$Z_i = \frac{(Z_{DC} - Z_{min}) Q}{I + Q^2} \quad (18)$$

Faz açısı için,

$$\tan \varphi = \frac{(Z_{DC} - Z_{min}) Q}{Z_{DC} - Z_{min} Q^2} \quad (19)$$

ifadeleri elde edilir.

Buraya kadarki çalışmalar sonunda, matematik ifadeleri ile elde edilmiş olan Z , Z_r , Z_i , $\tan \varphi$ büyüklüklerinin kayaç dokusu ile olan ilgilerinin ortaya konması, yan kayaç anomalilerinin sebep olduğu yanımları bertaraf edebilecek bir parametrenin tarif edilebilmesi için gereklidir.

(4) ve (6) ifadelerini dikkate alalım, (4) ten df/dx i teşkil edip $2X$ i L yanında ihmal ederek $8ke^2$ yerine V konduğunda:

$$F = -V \frac{N}{L} X \quad \text{elde edilir.} \quad (20)$$

(6) ve (20) ifadelerinden,

$$K = -V \cdot \frac{N}{L} \quad \text{bulunur.}$$

Bu neticeye göre kayacın birim hacmindeki iyon sayısının artması, iyon valansının büyümesi, çatlak veya gözeneklerin incelmesi, kayaca eşdeğerli mekanik titreşim sistemindeki yay sabitesinin büyümesi veya eşdeğerli elektrik devresindeki kapasite değerinin küçülmesi şeklinde tesir etmektedir.

Bu durumda, N , L ve iyonun elektrik yükü (valansı) ile Z_r , Z_i ve faz açısı arasındaki bağıntılar bunların C ile değişimlerinin incelenmesi ile ortaya konabilir. Z_r , Z_i ve faz açısının matematik ifadelerinde Q geçtiği için, önce Q ile C arasındaki ilginin incelenmesi uygundur. Hesap kolaylığı sağladığından $I/C = K$ yerine konulup dQ/dK teşkil edilerek, kökler dışındaki halin jeolojik duruma uyduğu da izah edilebildiğinden:

$$dQ/dK < 0 \quad \text{elde edilir.} \quad (21)$$

Buradan K daki artış veya C deki eksilişin Q da da eksilmeye sebep olduğu veya başka bir deyişle N ve V deki artım ile L deki eksilişlerin Q da eksilme yaratacağı neticesine varılır.

Q ile Z_r arasındaki bağıntının çıkarılması için, türev alınarak,

$$dZ_r/dQ = -2(Z_{min} + Z) Q/(1 + Q^2) \quad (22)$$

buradan da:

$$dZ_r/dV > 0, \quad dZ_r/dN > 0, \quad dZ_r/dL < 0 \quad \text{elde edilir.}$$

İmajiner bileşen için:

$$dZ_i/dQ = (Z - Z_{min}) (1 - Q^2)/(1 + Q^2) \quad \text{ve} \quad dZ_i/dQ < 0 \quad (23)$$

elde edilir. V, N, L için

$$dZ_i/dV > 0, \quad dZ_i/dN > 0, \quad dZ_i/dL < 0 \quad \text{bulunur.}$$

Aynı şekilde faz açısı için $Q > (Z_{dc}/Z_{min})^{1/2}$ geçerli şartında:

$$d(\tan \varphi)/dV > 0, \quad d(\tan \varphi)/dN > 0 \quad d(\tan \varphi)/dL < 0 \quad (24)$$

elde edilir.

Bu neticelerden, birim hacimdeki iyon sayısının ve iyon valansının artması ile kayaç dokusunun incelmesi tetkik edilen her üç büyüklüğün de artmasına sebep olacağı anlaşılmış olur.

Ayrıca $\tan \varphi$ nin de artış göstermesi imajiner bileşenin artım gradyanının reel bileşeninkine nazaran daha büyük olduğunu belirtir.

Yapmış olduğumuz teorik hesaplamaların deneysel olarak da teyidi için Küre ve Bolkardağı bölgelerinden alınan ve sayısı yüzü aşkın sülfürlü mineral ve yan kayaç numunesi üzerinde laboratuvar

çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışma da teorik olarak hesaplananları teyit eder mahiyetteki aşağıda takdim olunan neticeleri vermiştir:

1. Sülfürlü minerallerde genellikle faz açısı, yan kayaçlardakine nazaran daha büyük değerlere sahip görülmektedir.

2. 1.25-5 cps frekans aralığında imajiner bileşenin frekansa tabi değişimi, yan kayaçlarda görülenden farklı karakterde, daha ziyade linier ve daha büyük bir gradyana sahip olarak ortaya çıkmaktadır.

3. Tetkik edilen numunelerin mikrofotolar yardımı ile tespit edilmiş olan doku durumları ile elde edilen jeofizik neticelerin alâkalı oluşu, bilhassa pirit cevherleşmesi numunelerinde tane çapının büyümesi ile faz açısının ve imajiner bileşenin küçülmesi dikkati çekmiştir. Bu hal içinde sülfürlü mineraller bulunan kayaçların dokularının incelmesinin sülfürlü mineral yüzeyinin artmasına ve bunun da N iyon sayısının artmasına sebep teşkil ettiği şeklinde izah olunabilmektedir.

Bahsolunan lâboratuvar çalışmasına örnek olarak dört adet numuneye ait neticeler Şekil 16, 17, 18 ve 19 da görülmektedir.

B. İYONİK FAKTÖR

Buraya kadar elde edilmiş olan neticelerin tümünü göz önüne alarak, aşırı gerilim (over-voltage) olayından tatbiki jeofizikte faydalanma imkânlarını yeniden ele almak uygun olur.

Hakikatte, olayın iyon yoğunluğu ile olan ilgisinden faydalanılarak, yer altındaki iyon yoğunluğu fazla olan bölgelerin tespit edilebilmesi, aşırı gerilim polarizasyonunun sağlayabileceği imkânlardan en önemlisi olacaktır.

Tabiatta pirit, kalkopirit, çinkoblend, galen gibi sülfürlü minerallerin oksidasyon sonucu sülfat tuzlarına dönüştüğü ve bu tuzların ekserisinin de suda çözünürlüğünün büyük oluşu, aynı zamanda oksidasyon mahsulü olarak sülfürik asit meydana gelmesi, bu tip mineral yataklarının civarında bir iyon yığılmasına sebep olmaktadır.

Diğer taraftan bilhassa SO_4 iyonu ve Pb, Fe, Zn, Cu iyonları sülfatlar haricindeki tuzların çözülmesinden hâsıl olacak Cl, CO_3 gibi iyonlardan daha ağır oldukları için $pa=F(f)$ değişimi üzerinde görülen minimumların daha küçük frekanslarda doğmasına sebep olurlar. Tatbikatta aşırı gerilim etütleri genellikle 5 cps den küçük frekanslarda yapıldığına göre, klorür ve karbonat yataklarının yaratacakları iyon yığınlarının tesirleri bu frekanslarda $pa-F(f)$ eğrisi üzerinde zaten görülemezler. Bu durumda seçilen frekans aralığı, yer altından cevap beklenen iyonların cinslerini, bunların kitlesini iki değer arasında sınırlamak suretiyle tayin eder. Buradan farklı frekans aralıklarında, cevap alınabilecek ağırlıktaki iyonların ve dolayısıyla bunları meydana getiren minerallerin de farklı olacakları anlaşılır.

Kullanılacak frekansların, aranan minerale ve sahanın jeolojik durumuna uygun olarak seçilmiş olması halinde aşağıda tarif edilmiş olan «iyonik faktör» parametrisi istenilen niteliğe sahip olmaktadır.

İyonik faktör, ölçülen rezistivitenin belli iki frekansa ait imajiner bileşen değerleri arasındaki farkın, aynı frekanslardaki reel bileşen değerleri arasındaki farka oranı şeklinde tarif edilmiştir.

$$I. F. = \frac{\rho_{i1} - \rho_{i2}}{\rho_{r1} - \rho_{r2}} \quad \text{şeklinde ifade edilir} \quad (25)$$

Şekil 20 de $I.F.$ parametrisinin, tane büyüklüğü değişik pirit numuneleri üzerinde gösterdiği değişim, rezistivite, metal faktör, şarjibilite ve faz açısı değişimleri ile birlikte görülmektedir.

Şekilde L tane büyüklüğü grafiği, yatay eksen boyunca sıralanmış, numunelere ait parlatma mikrofotoları üzerinden ölçülerek hazırlanmıştır.

Yatay eksen üzerindeki numunelerin yerleri, $I.F.$ değişimi bir doğru ile temsil olacak şekilde seçilmiş ve eksen üzerine numunelere ait parlatma mikrofotoları dizilmiştir. Yatay eksen üzerinde bu şekilde belirtilen numune yerleri hizasına o numuneye ait çeşitli parametrislerin ve L tane büyüklüğünün değerleri konarak, bunlara ait değişim grafikleri elde edilmiştir. Şekilde görülen en ilgi çekici durum $I.F.$ ile L nin ters orantılı olarak değişmeleridir. Numunelere ait parlatma mikrofotolarından da görüldüğü gibi, tanelerin küçülmesi ile $I.F.$ değeri büyümektedir. Bu durum, tanelerin küçülmesi nispetinde pirit içinde oksidasyona maruz kalan yüzeyin artmasına ve bunun da N iyon yoğunluğunun artmasına sebep olması ile açıklanabilmektedir.

Aynı neticeler, 25 numaralı $I.F.$ ifadesi üzerinde yapılacak hesaplarla da elde edilebilmektedir.

$I.F.$ nin N , L ve V ile değişimini incelemek için, önce bunların fonksiyonu olan Q ile değişimini incelemek gerekir. (25) no. lı ifade Q ya göre yazılırsa,

$$I.F. = \frac{Q_1 Q_2 - I}{Q_1 + Q_2} \quad (26)$$

elde edilir. Bu ifade aynı zamanda sahada kullanılacak formül olup, yapısal olarak incelenirse boyut ifadesi olarak:

$$I.F. = \frac{Q^2 - I}{2Q} \text{ yazılabilir.}$$

Dikkat çekilmek istenen husus, $I.F.$ yi ifade eden kesrin payının Q nun ikinci dereceden bir fonksiyonu, paydasının ise Q nun birinci dereceden bir fonksiyonu olmasıdır.

$I.F.$ nin Q ya göre diferansiyeli:

$$d(I.F.) = \left(I - \frac{I}{Q^2} \right) dQ \quad (27)$$

elde edilir. $I.F.$ nin hesabında Q nun frekansa, dolayısıyla açısal hızı bağlı değişimi esas olduğundan,

bu değişimin de incelenmesi gerekir. $\frac{I}{c}$, $\frac{I}{c^2}$ yanında ihmal edilerek yazılan:

$$Q = \frac{\frac{2\omega}{C} - (L_1 + L_2)\omega^3}{\frac{2}{C^2} + L_1 L_2 \omega^4}$$

ifadesinden diferansiyel alınarak,

$$dQ = \frac{L_1 L_2 (L_1 + L_2)\omega^6 - 6 \frac{L_1 L_2}{C} \omega^4 - \frac{L_1 L_2}{C^2} \omega^2 + 4/C^3}{p^2} d\omega \quad (28)$$

elde edilir. $L_1 L_2$ ve C nin (—) olması fizik yönünden mümkün olmadığından, her zaman $dQ/d\omega > 0$ dır. Bu hale göre, ölçülerde frekansın artması Q da da artmaya sebep olur. Ortam, formasyona ait N , L ve V büyüklükleri, bahsolunan Q artımının o ortam için cari olan $Q = F(f)$ eğrisi üzerindeki hangi nokta civarında olduğunu tayin eder. Başka bir deyişle (27) no. lı diferansiyel ifadesindeki

Q^2 nin değerini tayin eder. (27) ifadesinde, $I.F.$ nin Q ya göre artım gradyanı pozitif olup, $\left(I + \frac{I}{Q^2} \right)$

ile belirlidir. N , L ve V büyüklükleri ile tarifli Q nun küçük değer taşıdığı ortamlarda bahsolunan gradyan büyük olacağından, dQ daki birim artıma karşılık $I.F.$ de büyük bir artım olacaktır.

dQ daki artımı, ölçü frekansının artmasının sağladığını yukarıda ispatlamış olduğumuza göre, durum aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

Q nun küçük değerler kazandığı ortamlarda birim frekans artımına karşı $\dot{I}.F.$ de görülecek artım Q nun büyük değerlere sahip olduğu ortamlara nazaran daha fazla olacaktır.

Bu neticeyi jeofizik prospeksiyonla ilgili tarzda ifade edersek, ortamda iyon konsantrasyonu ve valansının artması ile dokunun incelenmesi nispetinde iyonik faktör büyür. Bu ifade de, iyon konsantrasyonunun en fazla olduğu sülfürlü mineral yataklarında, masifleştiği nispette dokunun incelenmesinden dolayı $\dot{I}.F.$ anomalisinin şiddetleneceği demektir. Diğer taraftan yan kayalara ana yataktan sızarak gelmiş solüsyonlarca meydana getirilen iyon toplanmaları halinde, L çatlak ve por genişliğinin küçük olduğu takdirde fazla solüsyon ihtiva edemeyeceği, aksi halde ise L nin büyük oluşu sebebi ile $\dot{I}.F.$ değerleri küçük kalacaktır.

Netice olarak, $\dot{I}.F.$ nin sülfürlü mineral yatakları üzerinde, yan kayalarda iyon toplanmaları olsa dahi, çok daha şiddetli anomali vereceği teorik olarak da belirmiş olur.

Bu neticeye dayanarak, Şekil 21 de, yan kayalarda anomali verme bakımından, $\dot{I}.F.$ parametrisinin yalnızca şarjibilite parametrisi ile karşılaştırılması kâfi görülmüştür. Şekilde, yatay eksen boyunca, muhtelif bölgelerden alınmış yan kayaç ve pirit cevheri numuneleri yerleştirilerek bir jeolojik model hazırlanmıştır. Bu model üzerinde, numunelerin birer birer laboratuvarında ölçülmesi neticesinde elde edilen $\dot{I}.F.$ ve şarjibilite (n) değerleri konulup bu parametrelere ait değişimler çizilmiştir. Elde edilen anomaliler, bu jeolojik modelle aynı yapıya sahip bir sahada, elektrot açılımı, formasyonların yüzeydeki genişliğinden kâfi derecede küçük olması şartıyla, yapılacak ölçülerin neticesinde, elde edilecek anomaliler gibi incelenebilir. Jeolojik modelde, 107 numaralı kayaç kuvarsit, 24 ve 23 numaralı kayaçlar pirit cevheri, 106 ve 108 numaralı kayaçlar kalker 104 numaralı kayaç ise, Develi-Kaleköy Kurşun İşletme sahasında tarafımdan yapılmış olan $\dot{I}.P.$ etütlerinde anomali vererek hatalı tefsirlere yol açan poröz kalkerdir.

Şekildeki şarjibilite değişimi, altta görülen jeolojik durumla birlikte incelenirse, (n) parametrisinin 23 no. lu pirit cevherini 106 ve 108 no. lu kalkerlerden ayırt edemediği, 104 numaralı kalker üzerinde mezkûr kayaçlar üzerindikilerden daha büyük değer kazanarak bir yan kayaç anomalisi gösterdiği ve 24 no. lu pirit üzerinde ise beklenen normal davranışı gösterdiği anlaşılır.

Aynı şekilde $\dot{I}.F.$ anomalisi incelenirse, bu parametri ile şarjibilitenin belirlediği 23 no. lu pirit cevheri üzerinde, gayet bariz bir anomali elde edilmesi, şarjibilite parametrisinde yan kayaç anomalisi veren 104 numaralı kalker üzerinde, kayda değer bir yükselme görülmemesi ve 24 numaralı pirit cevheri üzerinde de şiddetli bir anomalinin bulunması, $\dot{I}.F.$ parametrisinin istenilen niteliğe sahip olduğunu ortaya koyar.

TEŞEKKÜR

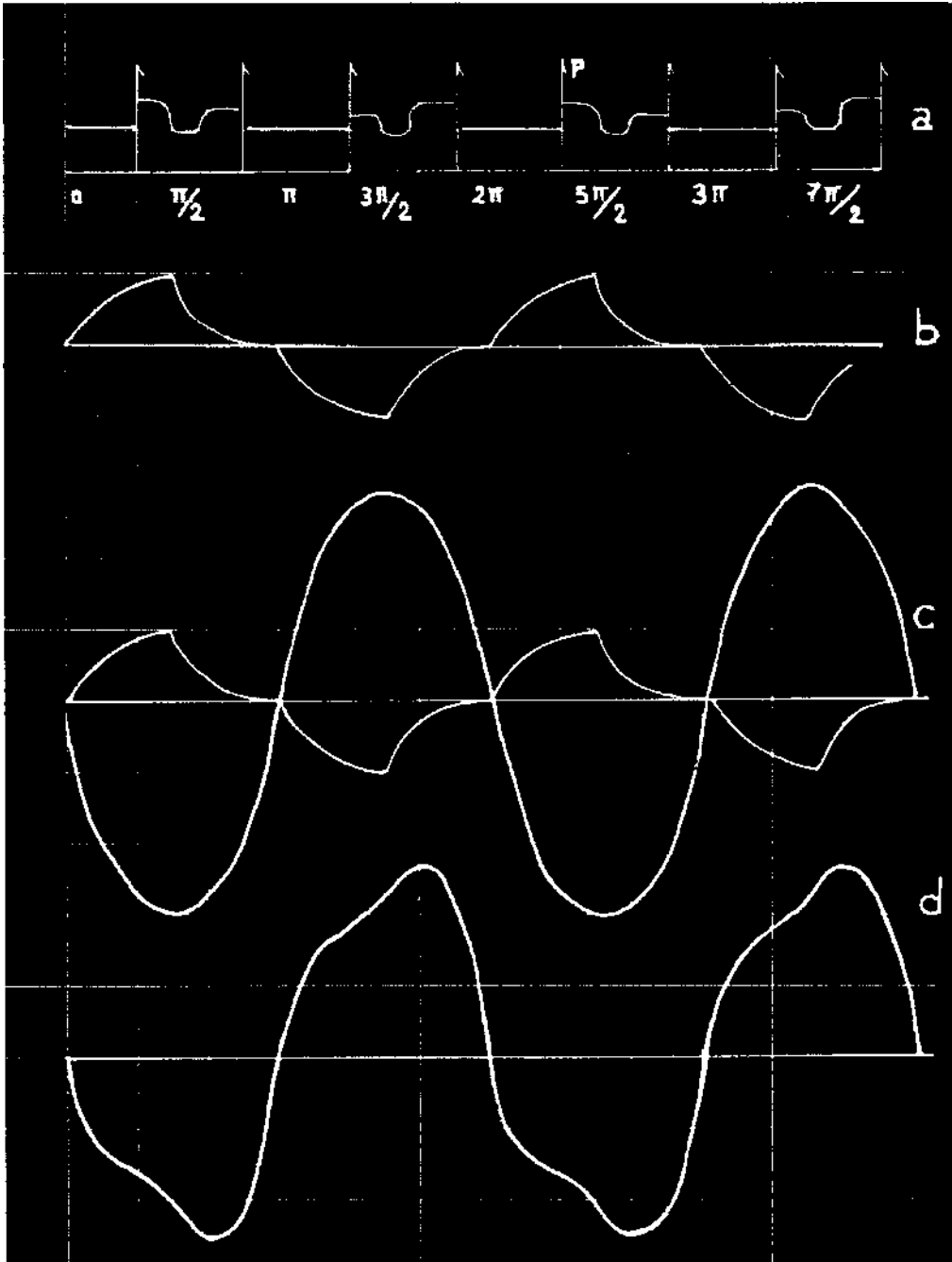
Yapmış olduğum bu çalışmada, beni yöneten ve çalışmamın neticeye varabilmesinde büyük amil olan, hocam Sayın Profesör Dr. İhsan Özdoğan'a minnet ve teşekkürlerimi belirtmekten zevk duyarım.

Ayrıca, M.T.A. Enstitüsünde çalıştığım müddetçe bu konudaki çalışmalarım imkân veren Genel Direktör Sayın Doç. Dr. Sadrettin Alpan'a, Sayın Prof. Dr. M. Dizioğlu'na ve Sayın Dr. Sırrı Kavlakoğlu'na en içten teşekkürlerimi sunarım.

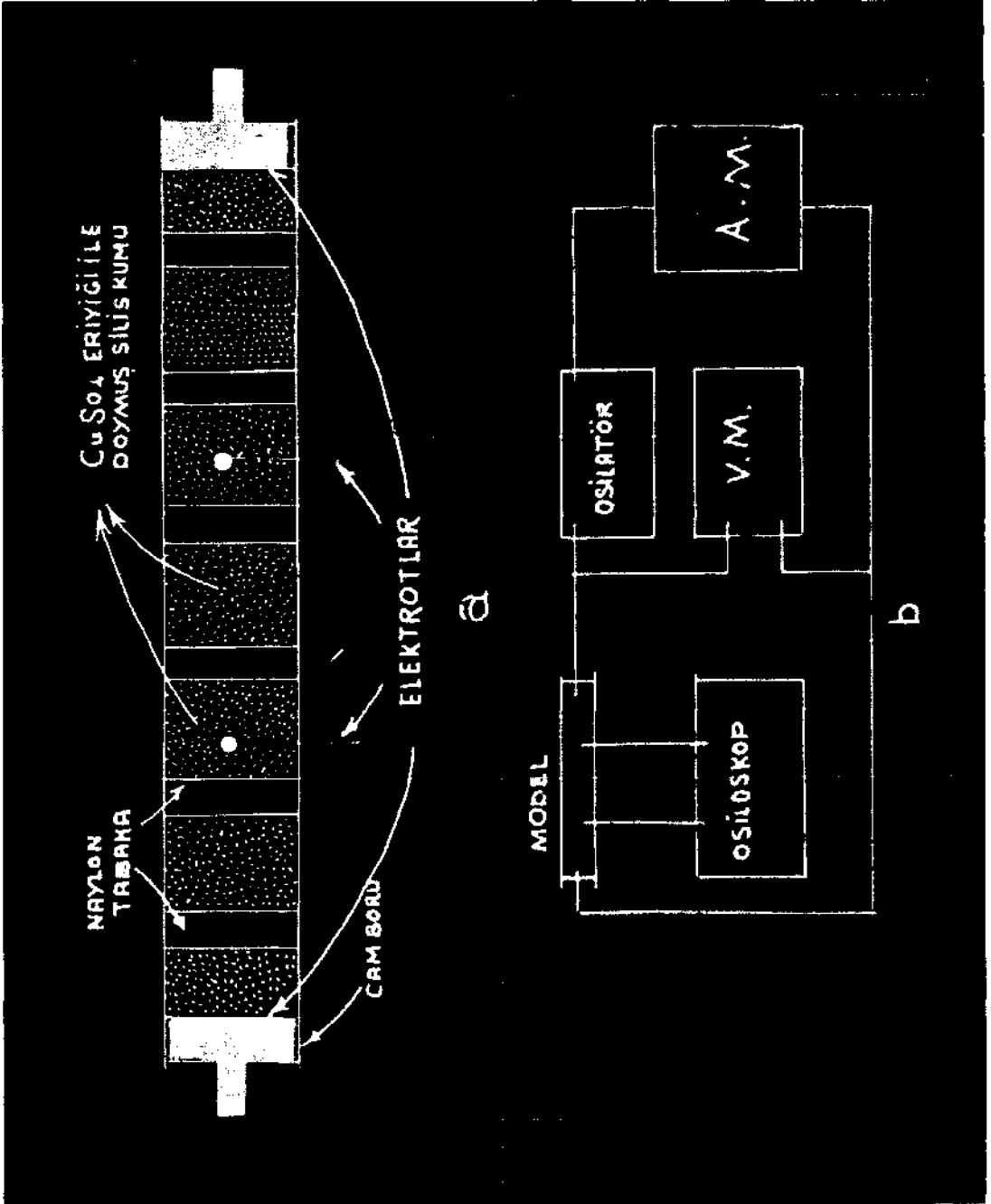
yayına verildiği tarih, mart 1969

REFERANSLAR

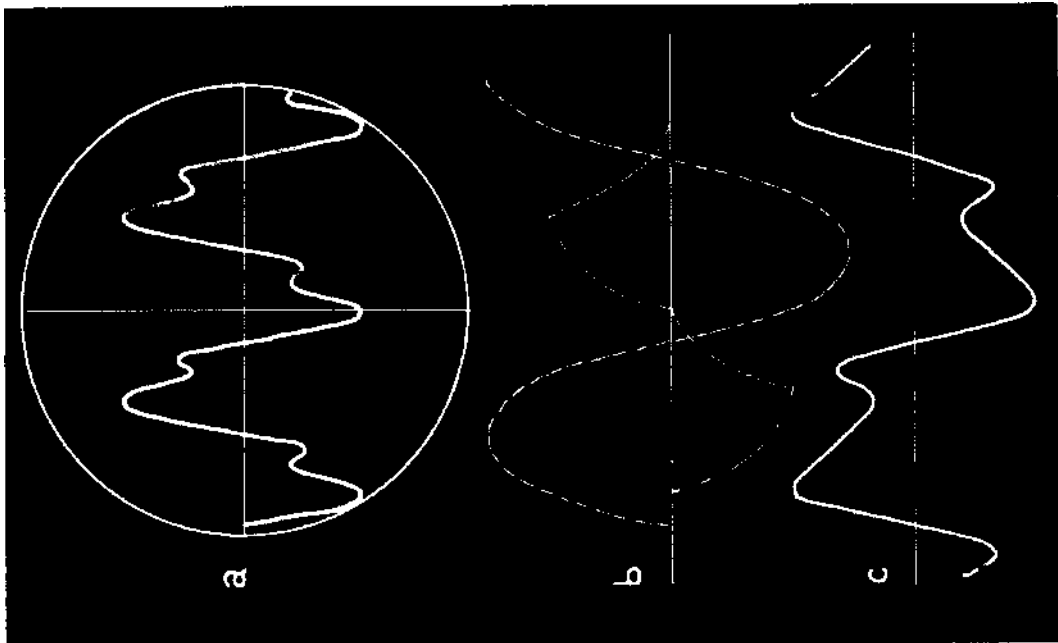
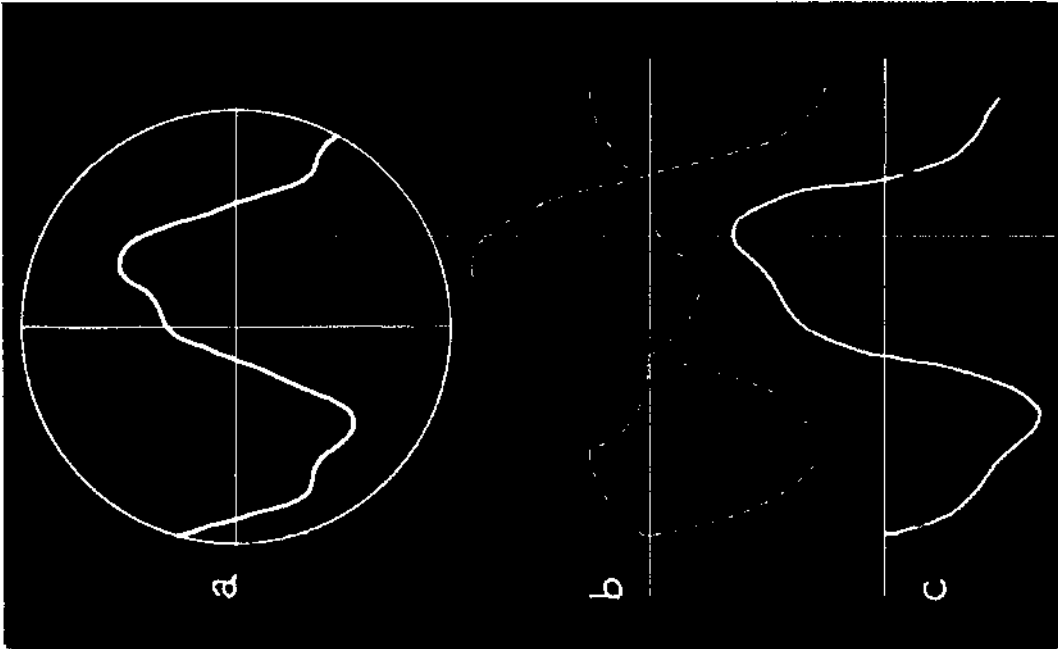
1. HANSEN, CHENEA (1952) : Mechanics of Vibration Wiley.
2. KELLER and FRISCHKNECKT (1966) : Electrical methods in geophysical prospecting, Pergamon Press.
3. SEIGEL: Ph. D. Thesis, University of Toronto.
4. WAIT, J.R. (1959) : Overvoltage research and geophysical applications. Pergamon Press.



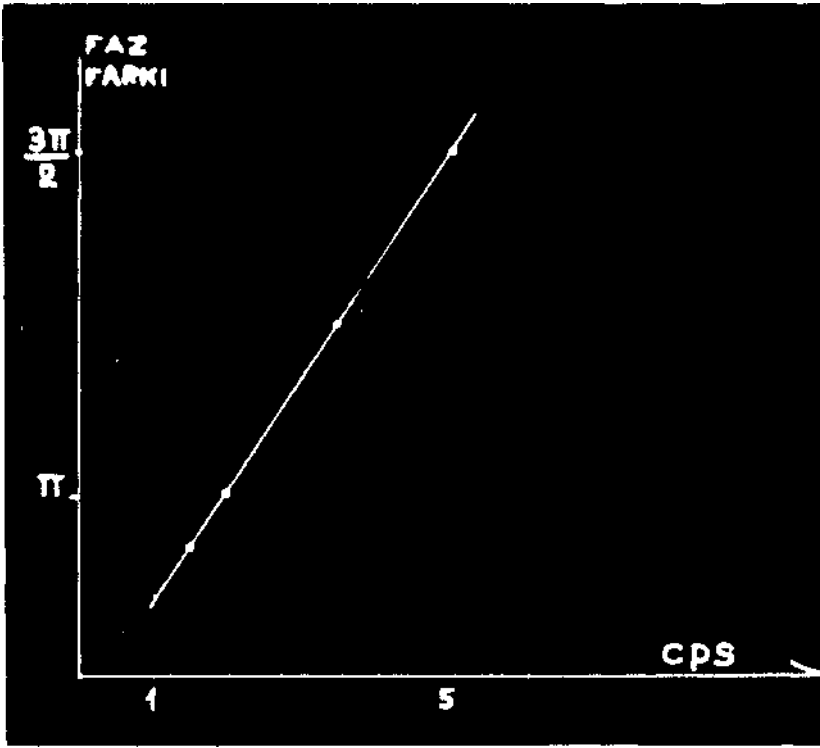
Şek. 1



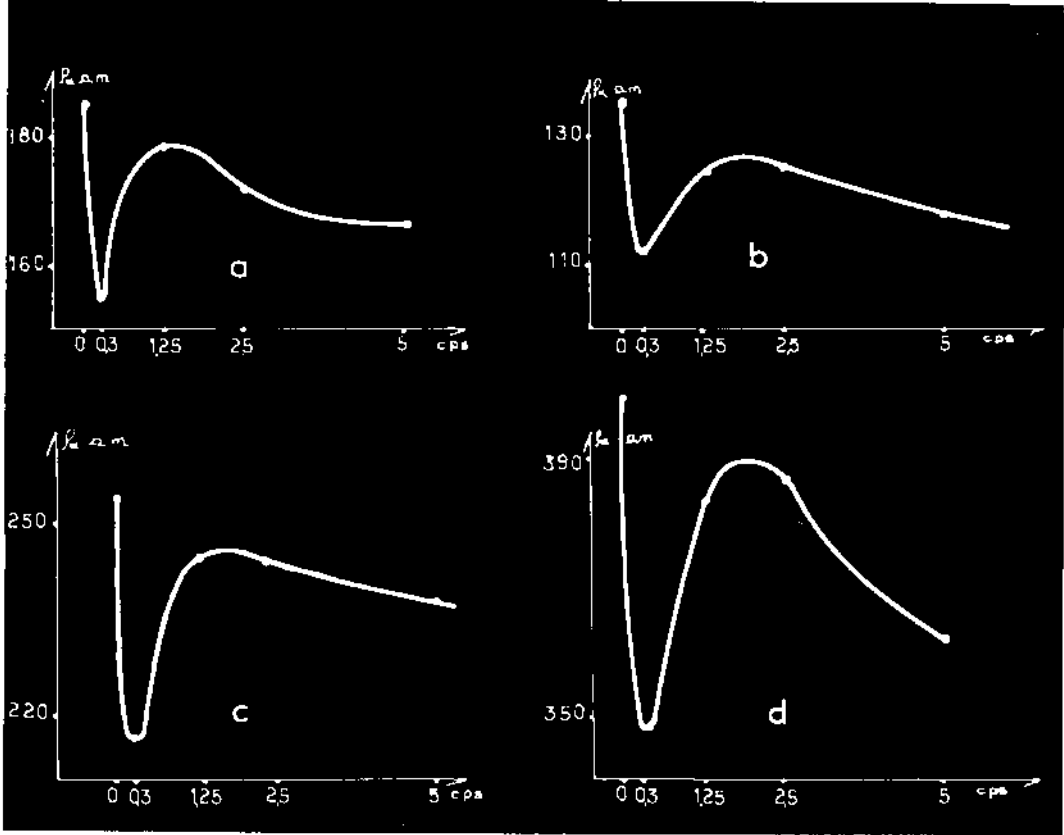
Şek. 2



Şekil 4

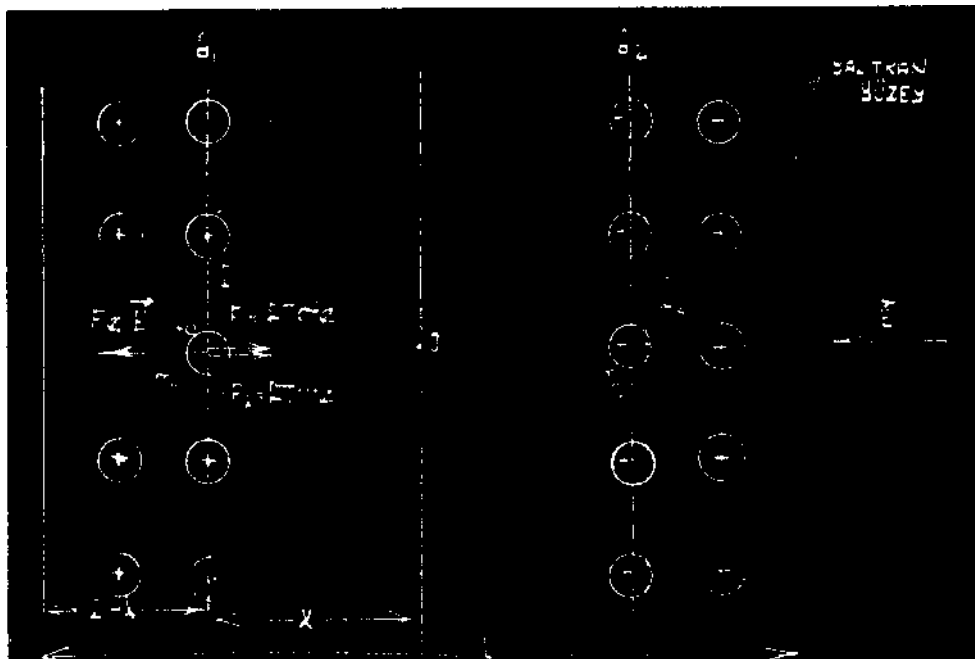


Şek. S

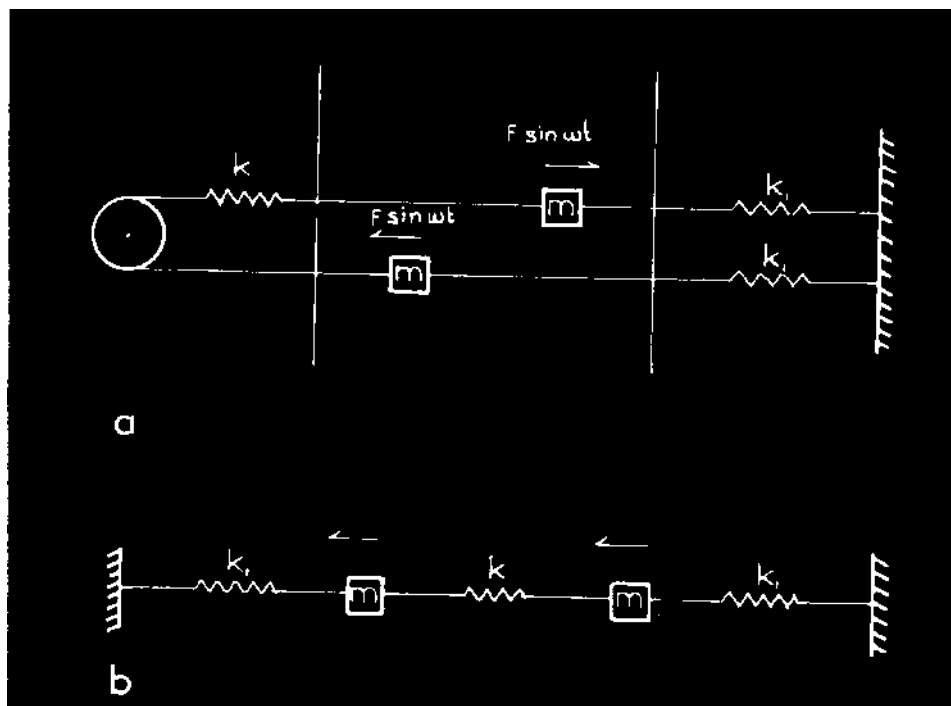


Şek. 6

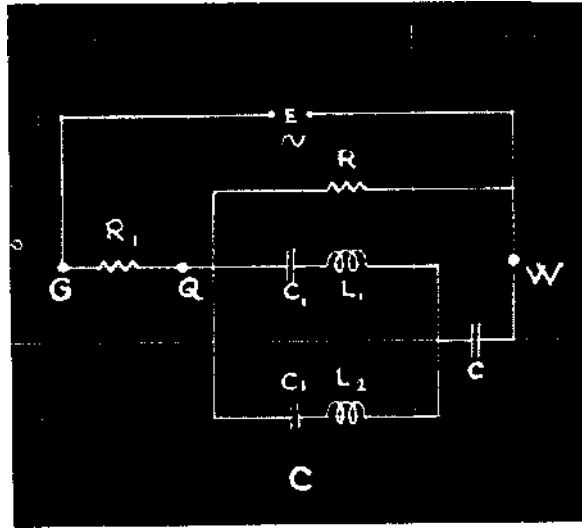
a. Denede kullanılan modele ait frekansa tabi rezistivite değişimi; b. Bâla kazası Kôpek tepe mevkiinde ince kuvarsit damarlı diyabaz üzerinde Wenner sistemi ve $a=30m$ açılımı ile ölçülen değişim; c. Develi kazası Kaleköy mevkiindeki çatlaklı siyah kalker üzerinde, aynı sistem ve açılım ile ölçülen değişim; d. Küre kazası Aşıköy mevkiinde siyah şist formasyonu üzerinde aynı sistem ve açılım ile ölçülen değişim.



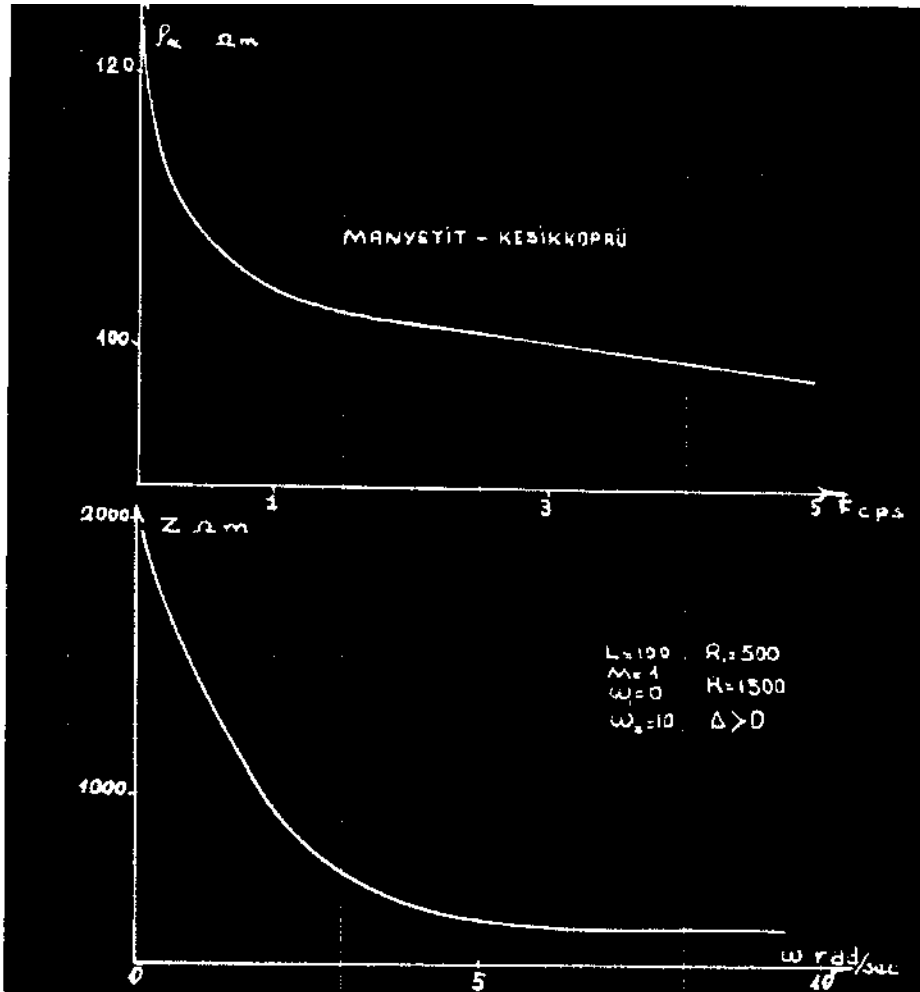
Şek. 7



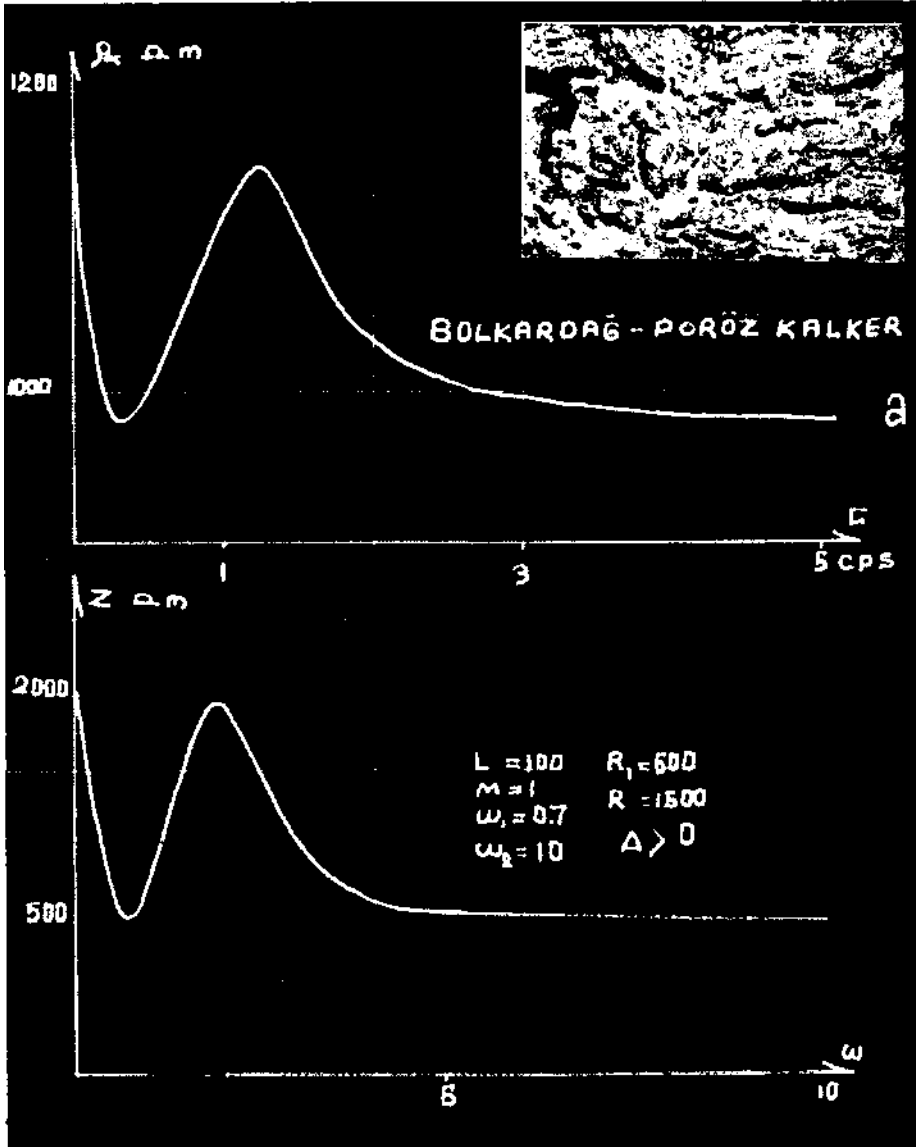
Şek. 8



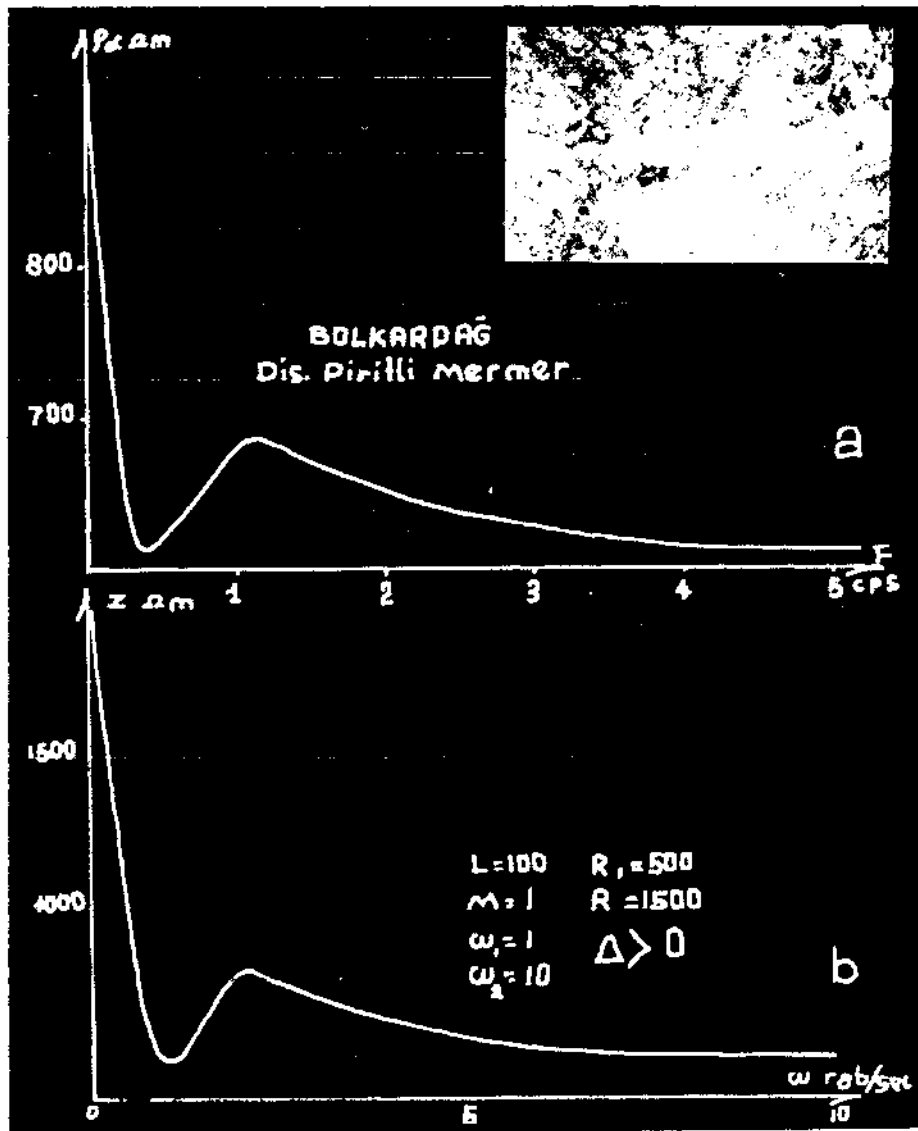
Şek. 9



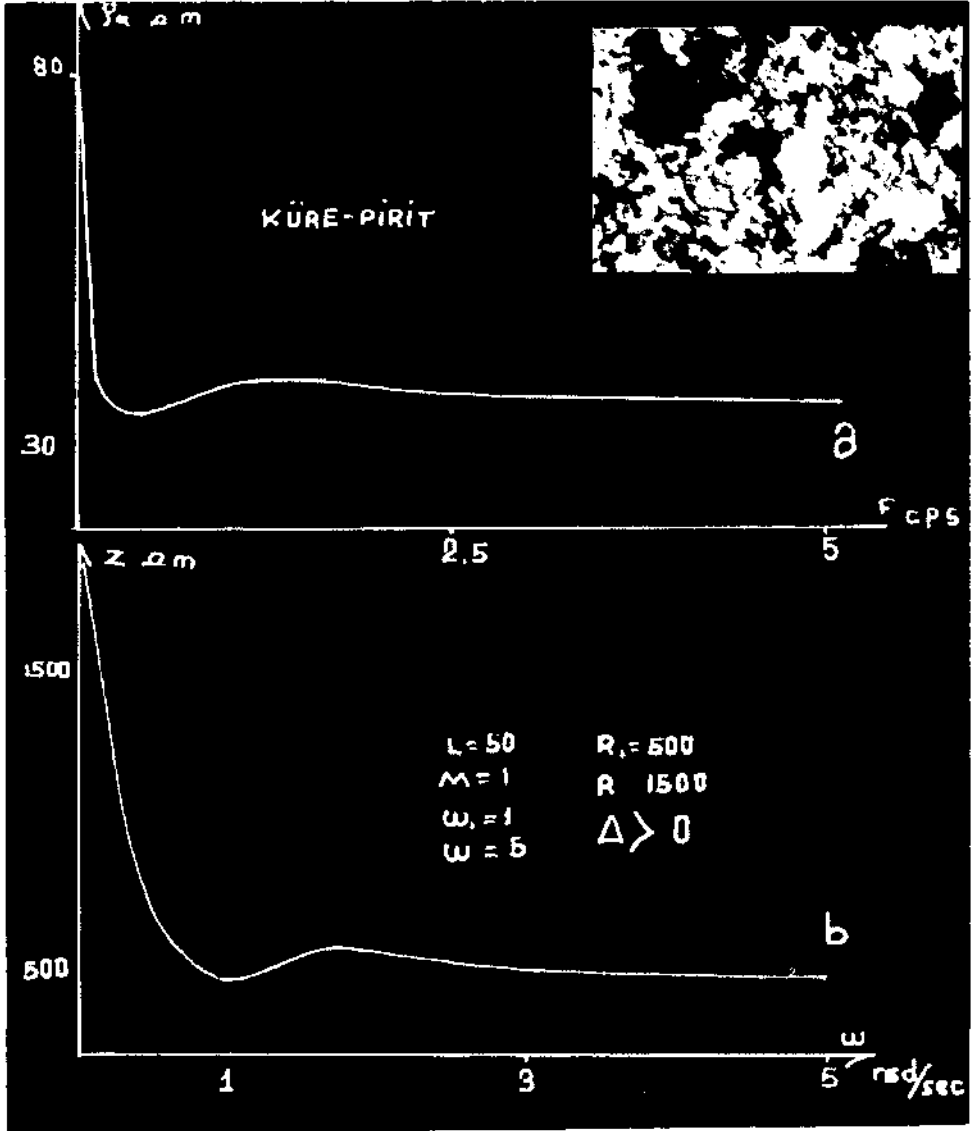
Şek. 10



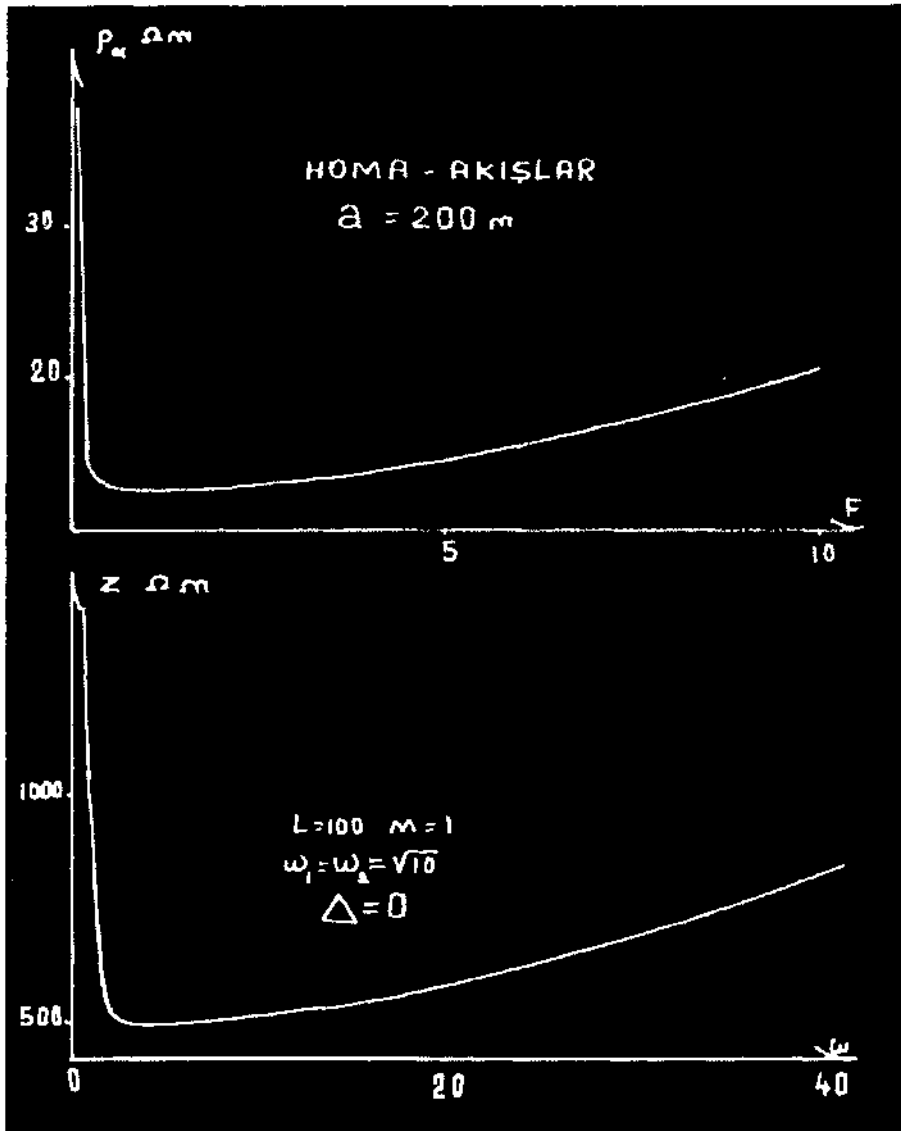
Şek. 11



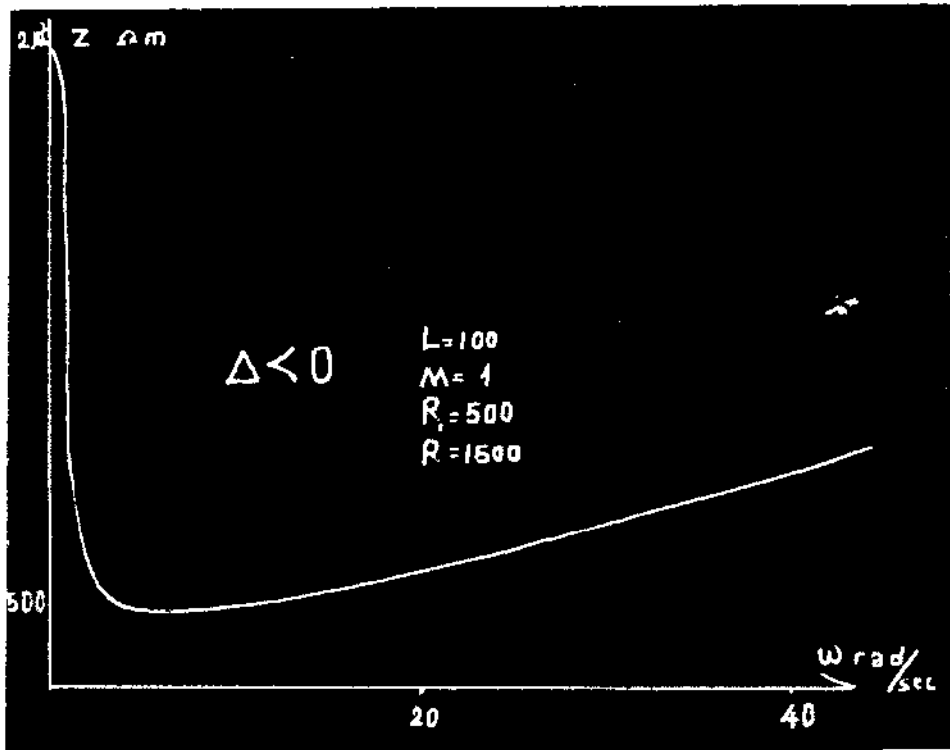
Sek. 12



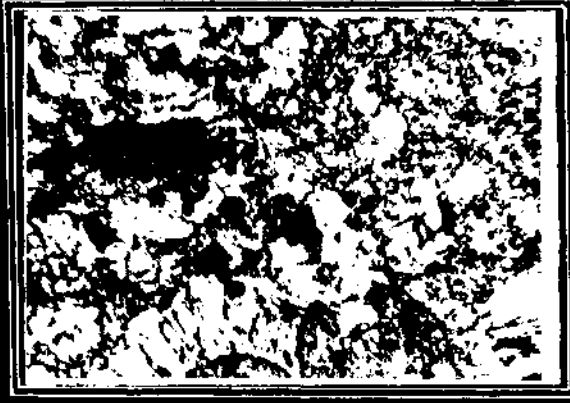
Şek. 13



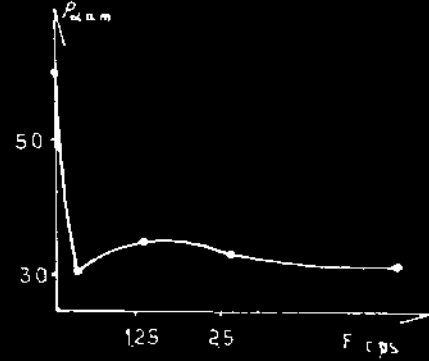
Şek. 14



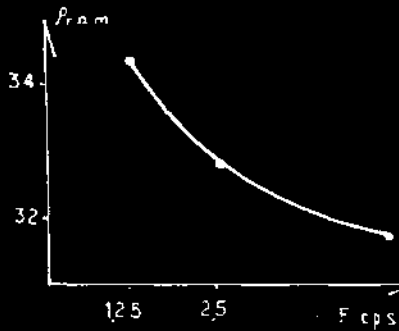
Sek. 15



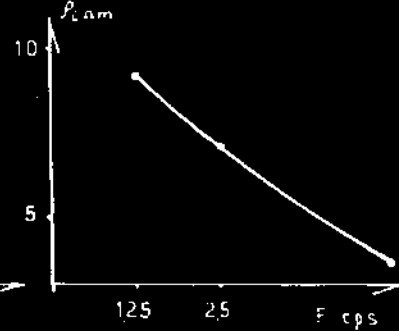
A



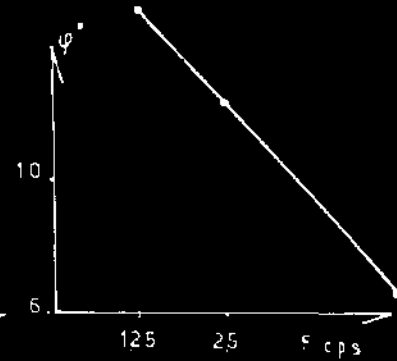
B



C



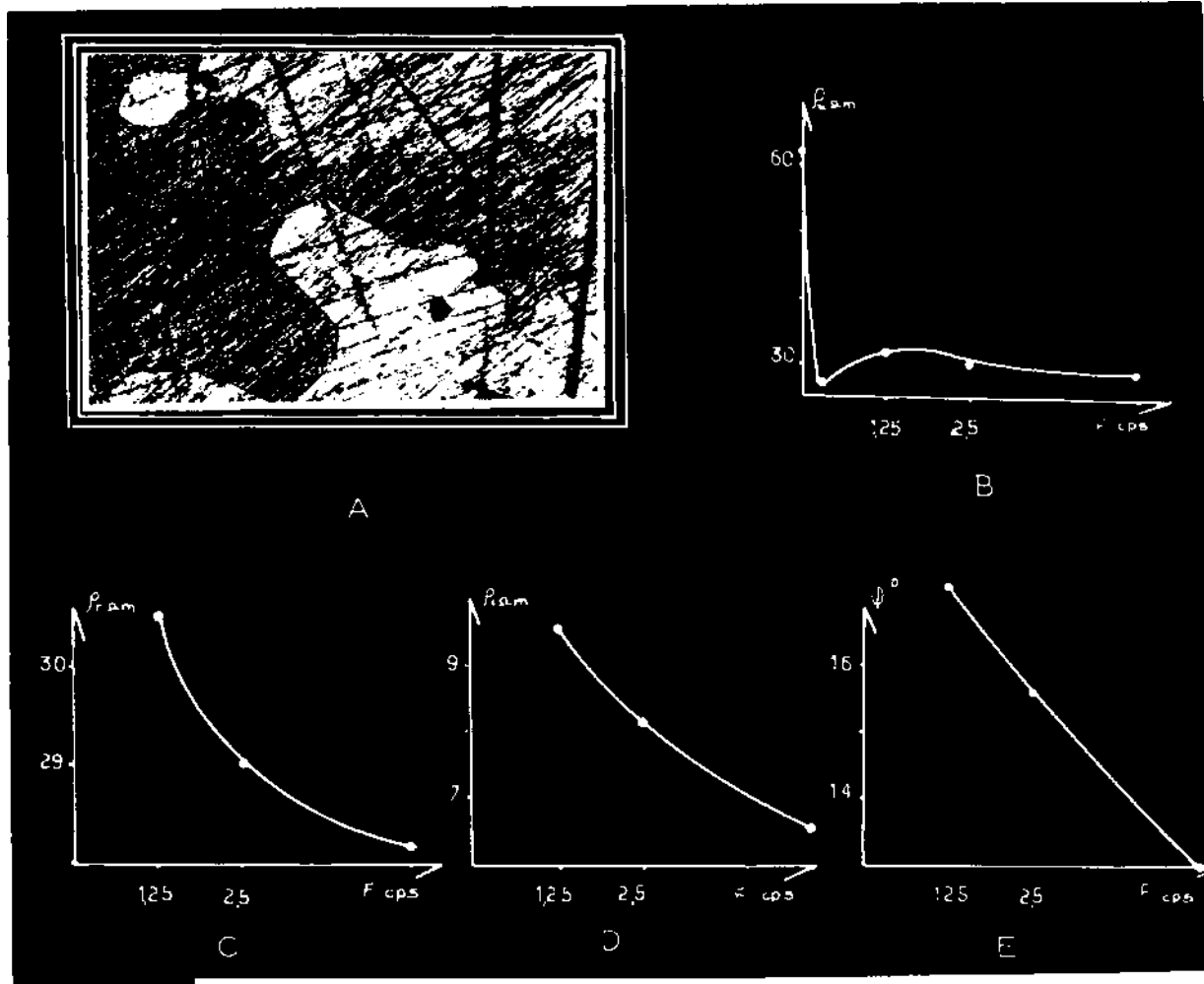
D



E

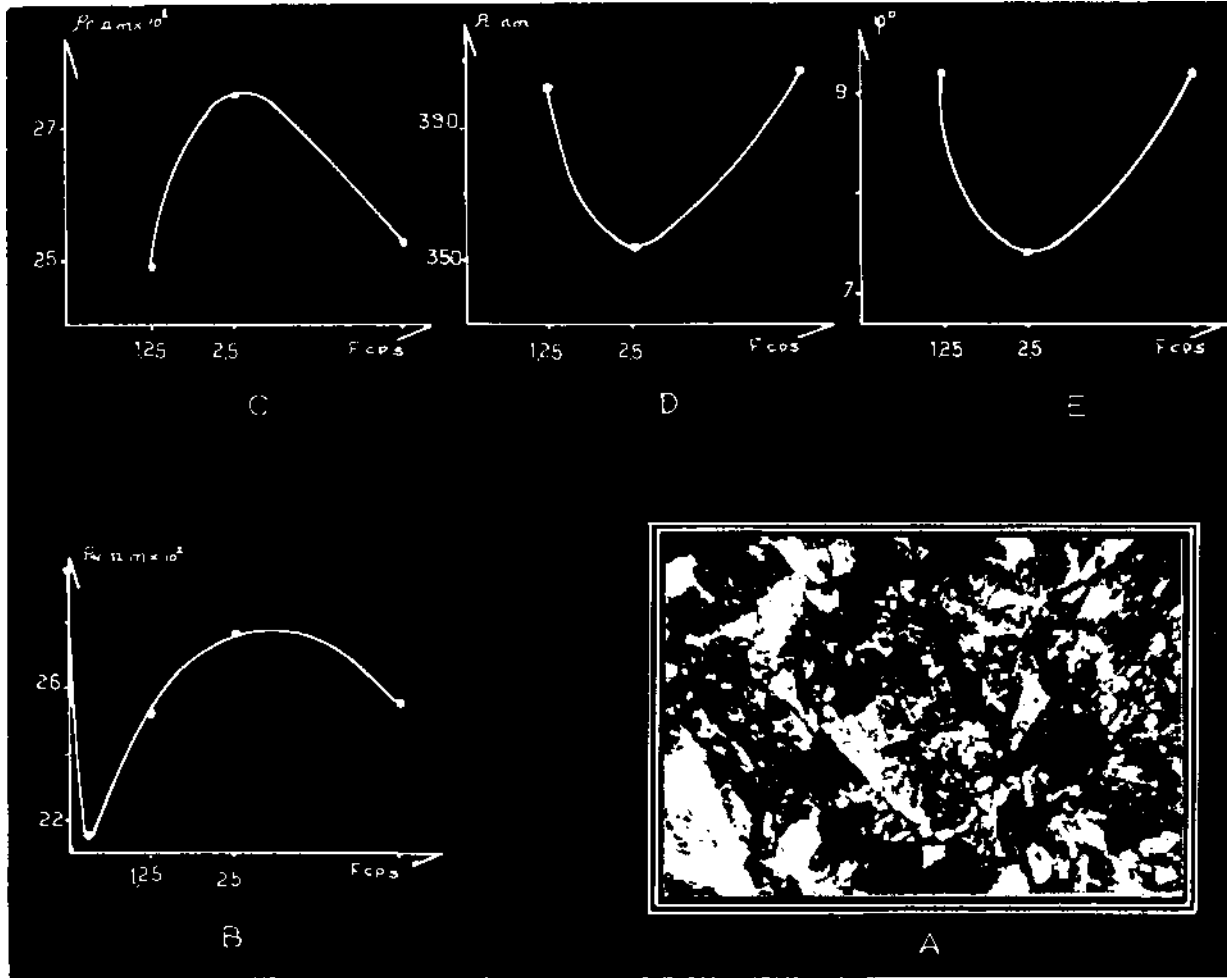
Şek. 16 - Küre piritleri Aşk y sahasından alınan pirit numunesi.

- A. Parlatma mikrofotusu: beyazlar kalkopirit tarafından  vrilmiř pirit (0.01 mm ile 0.1 mm lik mevcudiyetler halinde);
 B. Numuneden laboratuvarıda  l len $p_o = F(f)$ değişimi; C. 1.25-5 cps aralığındaki reel bileşen değişimi;
 D. Aynı aralıktaki imajiner bileşen değişimi; E. Aynı aralıktaki faz açısı değişimi.



Şek. 17 - Develi - Kaleköy Kurşun işletmesi sahasından alınan galen numunesi.

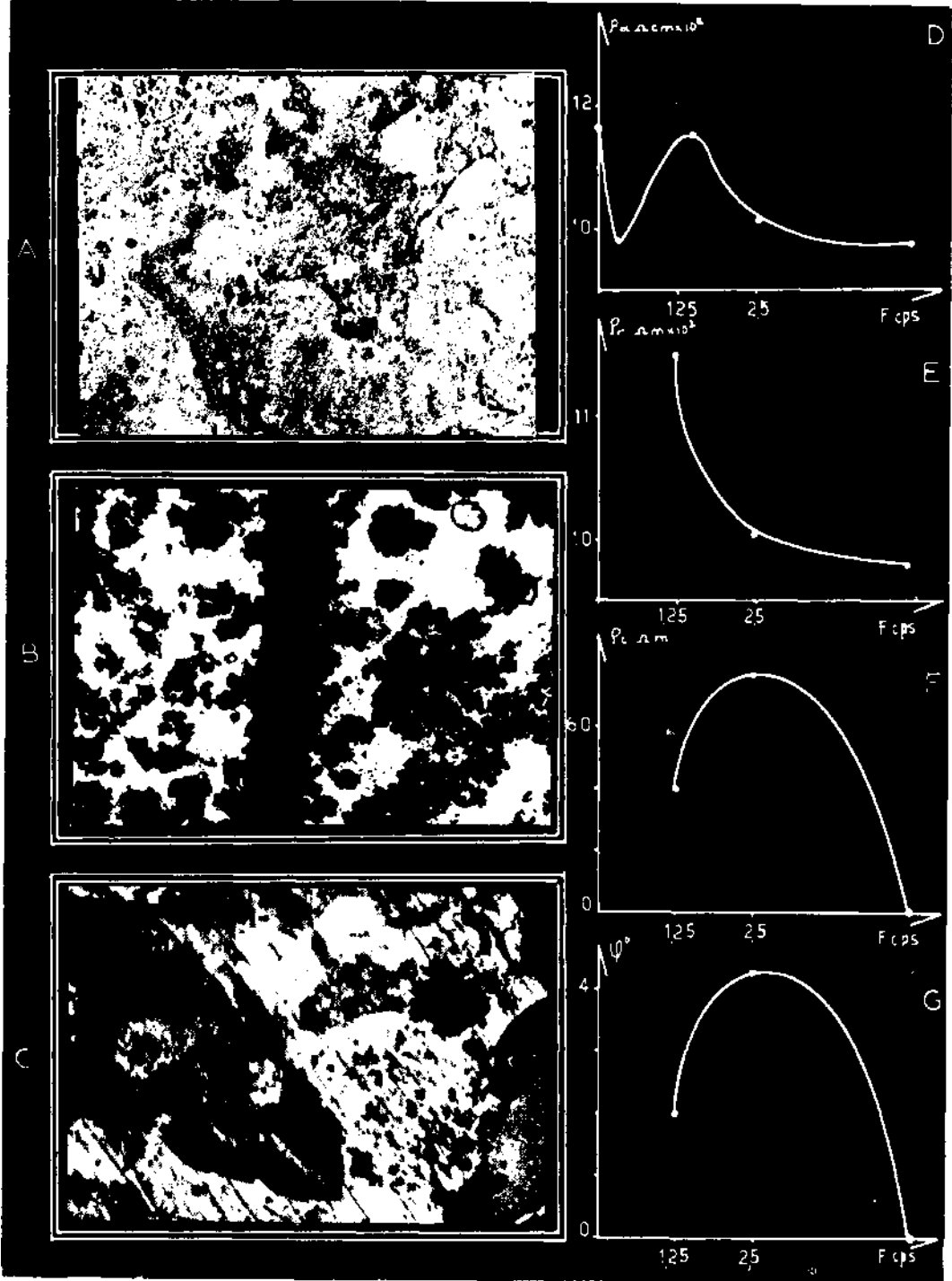
- A. Parlatma mikrofotosu: beyaz ve griler galenit, siyahlar kuvars; B. Numuneden laboratuvarında ölçülen $\rho_a - F(f)$ değişimi; C. 1.25-5 cps aralığındaki reel bileşen değişimi; D. Aynı aralıktaki imajiner bileşen değişimi; E. Aynı aralıktaki faz açısı değişimi.



Şek. 18 - Küre Pirit işletmesi sahasından alınan albitdiyabaz numunesi.

A

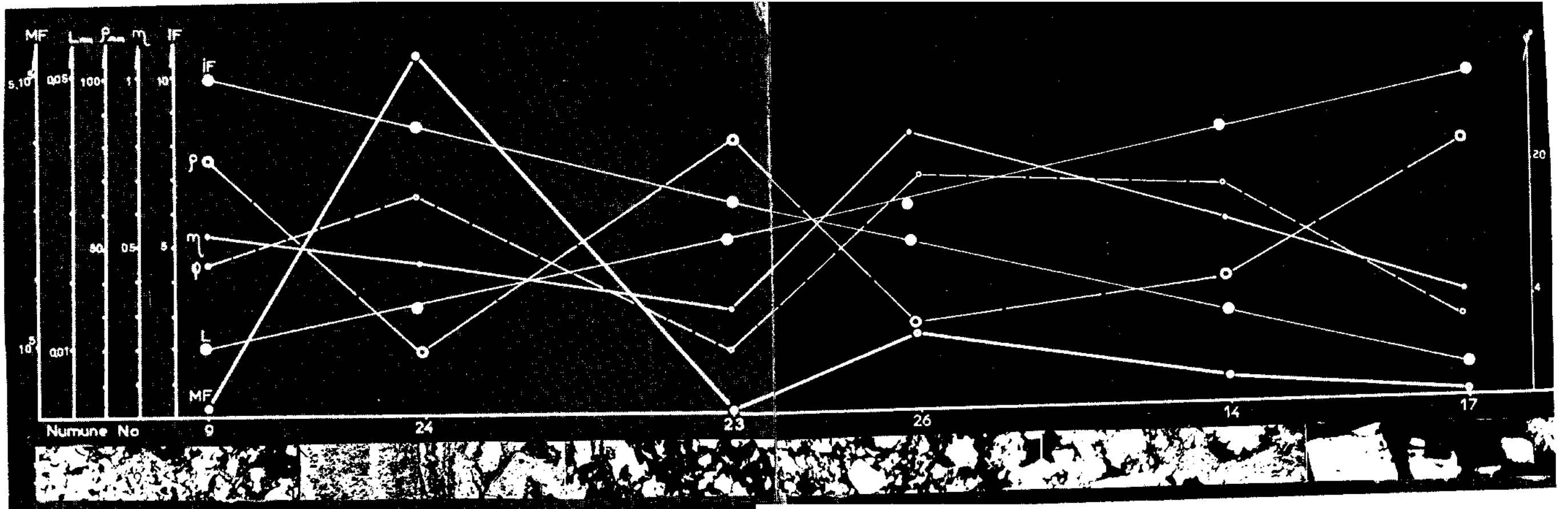
A., İnce kesit mikrofotosu: beyazlar albit, koyu renkliler ojit (kenarlarında kloritleşme görülmekte); B. Numuneden laboratuvarında ölçülen $P_a = F(f)$ değişimi; C. 1.25-5 cps aralığındaki reel bileşen değişimi; D. Aynı aralıktaki imajiner bileşen değişimi; E. Aynı aralıktaki faz açısı değişimi.



Şek. 19 - Bolkardağı kurşun sahasından alınan limonitize kalker numunesi.

A. Numunenin fotoğrafı. Boşluklar bariz olarak görülmekte; B. İnce kesit mikrofotosu: siyahlar limonit, beyazlar kalker; C. Parlatma mikrofotosu: griler kalker, koyu griler limonit; D. Numuneden laboratuvarında ölçülen $p_a = F(f)$ değişimi; E. 1.25-5 cps aralığındaki reel bileşen değişimi.

F. Aynı aralıktaki imajiner bileşen değişimi; G. Aynı aralıktaki faz açısı değişimi.



Şek. 20

