

Türkiye Jeofizikçiler Derneği yayınları C. VI. S. 1.S ( 31-47 ) Nisan 1977  
 Publications of Geophysicists Association of Turkey V. VI. N.1. P (31-47) April 1977

**SÜLFÜRLÜ MİNERALLERDE ELEKTRİKSEL İLETİM GEÇİŞLERİ  
 VE  
 MADENLERİN OLUŞUM ŞARTLARIYLA İLGİSİ**

**Electrical Conduction Transitions For Sulphides  
 Their Relations and With Ore Formation**

Kurultay Öztürk \*

**ÖZET:**

Sıcaklığın, madenlerin meydana gelmesinde önemli bir etken olduğunu Jeolojik delillerden bilmekteyiz. Herhangi bir mineralin kristalleri, yüksek sıcaklıklarda daha mükemmel, düşük sıcaklıklarda daha az mükemmel kristaller olarak meydana gelirler.

Elektrik iletkenliğin kristal yapılarıyla yakından ilgisi vardır. Böyle bir ilişkiyi bulmak amacıyla bir grup laboratuvar ölçüleri yapılmıştır. Muhtelif sülfürlü mineral numunelerin  $-170^{\circ}\text{C}$  ile  $+200^{\circ}\text{C}$  sıcaklık aralığında iletkenlik değişimi incelenmiştir. P-tipi yarı iletken olan tek ve çok kristalli pirit, çok kristalli kalkopirit ve sfalerit numuneleri bütün sıcaklık aralığında klasik yarı iletken davranışı gösterdiler. Çok kristalli pirotin ve galenit numuneleri N-tipi idiler ve düşük sıcaklıklarda metalik, daha yüksek sıcaklıklarda arizi (impurity) ve hakiki (intrinsic) yarı iletkenlik göstermişlerdir.

Elde edilen bilgi, metalik iletkenlikten yarı iletkenliğe geçiş mekanizmasının, madenlerin oluşum sıcaklığının bir göstergesi olabileceğini ifade etmiştir. Fakat, yeterli sayıda elverişli numune olmaması nedeniyle kesin neticeye ulaşılamamıştır. Uygun bir deneysel formül elde etmek için, daha fazla tabii ve sentetik numunelerle, daha detaylı ölçüler yapılması gerekmektedir. İlerideki çalışmalarımız, konunun daha aydınlığa kavuşturulmasına yönelik olacaktır.

---

\* İ.Ü. Fen Fakültesi Tatbiki Jeofizik Kürsüsü

K. ÖZTÜRK

## ABSTRACT:

We know from geological evidences that temperature is an important factor in the formation of mineral deposits. Crystals of any one mineral species form more perfect crystals when deposited at a high temperature, less perfect crystals at a low temperature.

There exists a close relationship between the crystal structure and electrical conductivity. To determine such a relationship, we have conducted a series of laboratory measurements. The conductivity variation of sulphide group minerals has been observed over the temperature range from  $-170^{\circ}\text{C}$  to  $+200^{\circ}\text{C}$  on various specimens. Single and polycrystalline pyrite, polycrystalline chalcopyrite and sphalerite were all P-type and behaved as the classical semiconductors over the whole temperature range studied. Polycrystalline pyrrhotite and galena were N-type and showed metallic behavior at low temperatures and extrinsic and intrinsic semiconduction at higher temperatures.

The data obtained shows that a transition mechanism from metallic to semiconductor may be an indicator of the formation temperature of ore deposits. However, the data is surely not enough to verify this, since the specimens are insufficient. For a reasonable empirical formula, more detailed measurements will have to be made with more natural and synthetic mineral samples. The author intends to verify clearly this relationship in future studies.

## SÜLFÜRLÜ MİNERALLERDE ELEKTRİKSEL İLETİM GEÇİŞLERİ

### 1. GİRİŞ:

Jeolog ve mineraloglar aynı türden mineral karakteristiklerinin jeolojik çevreye göre büyük farklılıklar gösterdiğini çok iyi bilirler. Tabii oluşumlu minerallerin elektriksel özelliklerini incelemek suretiyle, bunların değişim karakterleriyle oluşum şartları arasında bir ilgi kurmak zor ve karışık bir iş olsada, bazı şartlar ve özellikler için mümkün olabilmektedir. Bu amaçla araştırılan elektriksel özellikler elektrik iletkenliği (veya resistivite), termoelektrik potansiyel, elektriksel direncin sıcaklık katsayısı gibi parametreler olmaktadır. Bu konuda ilk ve en önemli araştırmacı Smith olmuştur. Smith 1,2 (1942) ilk defa pirit kristallerinin formasyon sıcaklığı ile kristal kusurları arasındaki bir ilgiyi postule etmiştir. Düşük sıcaklıkta oluşmuş bir maden yatağından alınmış bir pirit numunesi daha çok kristal kusur ve bozukluklarına, çatlaklı ve yarılmalı yapıya sahibolurken, yüksek sıcaklıkta oluşanın daha mükemmel olduğu, çatlaklı ve yarılmalı yapının daha az olduğunu ileri sürmüştür. Bundan başka numunelerin rezistansının sıcaklık katsayısı ve termoelektrik potansiyeli ile onların oluşumları ve dolayısıyla yapıları arasında bir münasebet kurmaya çalışmıştır. Daha sonraları (Smith<sup>3</sup>, 1947), yukarıdaki araştırmaların ışığı altında, bir metale karşı piritin termoelektrik potansiyelini ölçen bir alet gerçekleştirmiş ve bu alet yardımıyla diğer pirit numunelerin formasyon sıcaklıklarını tayin edebilmiştir.

Konu ile ilgili diğer bir çalışmada Deniz Araştırma Laboratuvarları, Washington D.C. 'de yapılmış ve benzer münasebetler sentetik numunelerde araştırılmıştır (O.F. Tuttle and W.S. Twenhofel<sup>4</sup>, 1946). Bu çalışmada ek olarak, büyümekte olan kristale ilave olan birimlerin termal uyarımı arttıkça, kristal yapıyı meydana getiren atomların daha düzenli sıralandıkları ileri sürülmüştür.

Sunulan çalışmada, sülfürlü minerallerin elektrik iletkenliğinin sıcaklıkla ( - 170 °C ile + 200 °C) değişimini inceliyerek, değişik sıcaklık aralığında farklı elektriksel iletim karakterleriyle numunelerin oluşum şartları arasında bir ilgi olabileceği hususu ilk defa ortaya atılmıştır. Gayet az numune ile elde edilen neticenin şimdilik sadece bir ipucundan öteye gidemeyeceği gayet açıktır.

## 2. ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLER:

### 2.1. REZİSTANSIN SICAKLIK KATSAYISI :

$t$  °C de bir maddenin sıcaklık katsayısı, sıcaklıkla spesifik rezistansın değişim oranının 0 °C deki spesifik rezistansla bölünmesi şeklinde tarif edilir (Smith<sup>1</sup>,1942), yani,

$$\alpha_t = \frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{d\rho}{dt} \quad (1)$$

İyi bilindiği gibi, katsayı metalik maddeler için pozitif, yarımetalik maddeler için ise çok kere negatif olarak kaydedilmiştir.

### 2.2. TERMO–ELEKTRİK POTANSİYEL :

Bir elektrik devre iki farklı iletken ihtiva ettiği ve kontaklardan biri ısıtıldığı zaman, devre içinde bir akım meydana gelir. Meydana gelen potansiyel, sıcak ve soğuk birleşme yerlerindeki (Junctions) sıcaklık farkı ve iki iletkenin karakterine bağlıdır. Bu durumda termo-elektrik potansiyelin işaret kaidesi şöyledir: Neticede meydana gelen akım B'den sıcak birleşme yerindeki A'ya doğru ise bir A iletkeni pozitif termo–elektrik potansiyele sahibdir. Diğer bir tarifle, termal elektrik akım, numune içindeki termal akımla aynı doğrultuda akıyorsa termo–elektrik potansiyel pozitif olarak alınır.

### 2.3. ELEKTRİKSEL İLETİM :

Ohm kanunundan hareketle, bir materyalin elektriksel iletimi, uygulanan alan başına akım yoğunluğu olarak tarif edilir,

$$\sigma = \frac{J}{E} \quad (2)$$

$M^3$ 'deki elektron sayısı  $n$ , elektronların ortalama hızı  $\nu$  olarak alındığında akım yoğunluğu,

$$J = n e \nu \quad (3)$$

$e$  = Herbir elektron tarafından taşınan yük.

Neticede elektronlar vasıtasıyla olan elektrik iletkenliği

$$\sigma = n e \mu \quad (4)$$

şekindedir.

### SÜLFÜRLÜ MİNERALLERDE ELEKTRİKSEL İLETİM GEÇİŞLERİ

Burada  $\mu = -\frac{v}{E}$  uygulanan alan başına hız olarak gösterilen elektronların hareketliliğidir (mobility).

Valens bandedeki elektronların bıraktığı boşluklarla meydana gelen iletkenlik (4) denklemine özdedir. Bu sebepten ideal bir yarı iletken kristalin toplam iletkenliği elektronlar ve boşluklar (holes) tarafından meydana getirilen iletkenliklerin toplamıdır,

$$\sigma = n e \mu_e + P e \mu_h \quad (5)$$

Burada  $\mu_e$  ve  $\mu_h$  sırasıyla elektron ve boşluk hareketlilikleridir.

Bir yarı iletken kristalin elektrik iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi

$$\sigma = \sigma_0 e^{-E_g/2kT} \quad (6)$$

denklemleriyle ifade edilir. Burada,

$\sigma_0$  : Elektron ve boşlukların sayısı ve mobiliteleri ile ilgili bir sabit.

$E_g$  : Valens ve iletkenlik bandları arasındaki yasak enerji aralığı veya kirlilik (impurity or extrinsic) iletkenliği halinde, kirlilik bandlarının valens veya iletkenlik bandlarına olan enerji aralıkları.

$k$  : Boltzmann sabiti ( $8.62 \times 10^{-5}$  eV/deg K)

$T$  : Mutlak sıcaklık.

In  $\sigma$ : ile  $\frac{1}{T}$  ilişkisi  $-\frac{E_g}{2k}$  eğimli bir doğru denklemdir.

Yarı iletken materyaller nisbeten zayıf elektrik iletkenlerdir. 2 eV veya daha az bir enerji aralığı vasıtasıyla hemen hemen boş iletkenlik bandından ayrılmış dolu veya doluya çok yakın olan valens band ile karakterize edilirler. Termal enerji, elektronları, valens bandında "hole" denen boş yerler bırakarak iletkenlik bandına götürebilir.

İletken elektronlarla boşlukların her ikisinde yük taşıyıcı olarak hizmet görürler. Sadece valens ve iletkenlik seviyelerinin var olması halinde yarı iletkenin hakiki (intrinsic) yarıiletken olduğu söylenir. Materyal içindeki kirlilikler, kristal kusur ve eksiklikleri arızı (extrinsic) yarıiletkenliği meydana meydana getirir. Arızı yarıiletkenlik,

**K. ÖZTÜRK**

ya katı çözeltiler içindeki kirlilikler vasıtasıyla hasil olan ve yasak enerji aralığında yer alan ara enerji seviyelerinden, termal uyarıyla, işgal edilmemiş iletkenlik bandına geçen elektronlar (n-tipi yarıiletken) veya dolu valens bandından boş kirlilik bandarını işgal eden elektronların bıraktığı boşluklarla olur (p-tipi yarıiletken).

**3. DENEYSEL YÖNTEM :****3.1. KULLANILAN ALET GRUBU :**

Harrison 6200 B, DC Güç kaynağı,  
Hewlett Packard , 0-40 V , .75 A/0-20 V, 1.5 A,

Data Precision, Model 2540 A1.  
Dijital Voltmetre, 1  $\mu$ V Okuma hassasiyetli,

MPRY Thermac, Model 610 -6034 Sıcaklık kontrol edicisi.

Fırın,

Kromel- Alumel Termo -çifti,  
Devre şeması Şekil 1.'de gösterilmiştir.

**3.2. NUMUNELERİN HAZIRLANMASI VE ELEKTRODLAR :**

Pirit, kalkopirit, pirotin, galenit, sfalerit numuneleri çeşitli boyutlarda küp, dik-dörtgen prizma ve 1 inç çapı ve uzunluğundaki silindirler şeklinde kesildiler, temizlendiler ve parlatıldılar.

Akım elektrodları 1 inç çaplı disk şeklinde pirinç levhalar, potansiyel elektrodları ise çubuk şeklinde paslanmaz çelik ve tungsten nokta elektrodları idi.

**3.3. NUMUNE TUTUCUSU :**

Numune tutucusu asbest olup, akım elektrodları iki yay vasıtasıyla numuneye tutturulmuş, potansiyel elektrodları üst taraftan numuneye nokta olarak temas ettirilmiştir. Ayrıca, termoçifti uygun bir şekilde numune yakınına yerleştirilmiştir (Şekil 2.).

## SULFURLU MİNERALLERDE ELEKTRİKSEL İLETİM GEÇİŞLERİ

## 3.4. ÖLÇÜ YÖNTEMİ VE HESAPLAMALAR :

Numune, tutucusu ile birlikte fırın içine konmuş iletkenlik ölçü grubu aletleriyle ve sıcaklık kontrol edicisiyle bağlantı kurulmuştur (Şekil 3.).

Oda sıcaklığının altındaki sıcaklıklar için, numune fırın ile birlikte, gerekli izolasyon yapılarak, sıvı nitrojen içine konmuştur. Numune, önce, en düşük sıcaklıklara kadar soğutulmuş, sonra, fırın istenen sıcaklığa gelinceye kadar ısıtılarak, yaklaşık  $-170^{\circ}\text{C}$  ile  $+200^{\circ}\text{C}$  arasında bir grup iletkenlik ölçüsü yapılmıştır.

Numuneye doğru-akım güç kaynağı ile muhtelif akımlar vererek, potansiyel elektrodları arasındaki voltaj farkları okunmuştur. Akım voltaj münasebeti lineer olduğundan doğrunun eğimi, numunenin direncinin tersini verir. Numunenin kesit alanı  $S$ , potansiyel elektrodları arasındaki mesafe  $l$  bilindiğine göre, iletkenlik değeri,

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{V}{\Delta V} \times \frac{l}{S} = \frac{I}{\Delta V} \times \frac{l}{S} \\ &= \frac{1}{R_x} \times \frac{l}{S} \end{aligned}$$

formülü ile hesaplanır (Şekil 4. ). Burada,

$V$  – Sabit  $R$  direnci üzerinden okunan voltaj,

$R$  – Numune empedansına bağlı olarak devreye konmuş ve hassas akım okumasına yarayan sabit direnç,

$I$  – Numuneye uygulanan akım,

$l, S$  – Sırasıyla, potansiyel elektrodları aralığı ve numune kesit alanı,

$\Delta V$  – Potansiyel elektrodları arasındaki voltaj,

$R_x$  – Numune direnci.

Aktivasyon enerjisi hesaplamalarında (6) denkleminde istifade edilir. Denklemin iki tarafının logaritması alındığında,

$$\ln \sigma = \ln \sigma_0 - \frac{E_g}{2k} - \frac{1}{T} \quad \text{elde edilir.}$$

Düşey eksen  $\ln \sigma$ , yatay eksen  $\frac{1}{T}$  (Genellikle, değerlerin uygunluğu için  $\frac{10^3}{T}$  olarak alınır.) olmak üzere değerler noktalanır. Denklem bir doğru denkleminin olduğundan, değişim, değişik sıcaklık aralıklarında farklı eğimler gösteren doğrular şeklinde olacaktır. Bu eğim değerleri, yeterli büyüklükteki aktivasyon enerjileri için yasak enerji

## K. ÖZTÜRK

aralıklarına, nisbeten küçük değerler için kirlilik enerji bandlarının, valens veya iletkenlik banda olan enerji aralıklarına tekabül eder (Tablo 1).

## 3.5. NUMUNENİN YÜK TAŞIYICISININ SAPTANMASI:

Voltmetrenin uçları 1 cm kadar aralıkla numuneye temas ettirilir. Pozitif uca yakın bir noktaya lehim tabancası çok kısa bir zaman için değdirilir ve bu arada voltmetredeki voltaj değişimi izlenir. Isınmadan dolayı meydana gelen bir voltaj artması numunenin N-tipi, voltaj azalması P-tipi olduğunu gösterir.

## 4. LABORATUAR ÖLÇÜLERİ :

Şekil 5. tek ve çok kristalli iki P-tipi pirit numunesinin  $\ln\sigma$  ve  $-\frac{10^3}{T}$  olarak

iletkenlik-sıcaklık değişimini göstermektedir. Ölçülen sıcaklık aralığında tipik yarı iletkenlik davranışı görülmüş, herhangi bir iletkenlik geçişine rastlanmamıştır. Hesaplanan aktivasyon enerjileri her iki numunede de bolca kirlilik seviyelerinin olduğunu göstermektedir. Ölçülen sıcaklık aralığında hakiki iletkenlik değerine ulaşılmamıştır.

Maden sahası saptanamayan iki N-tipi galenit numunesinin iletkenlik-sıcaklık değişimi Şekil 6.'da görülmektedir. Biri 140 °C 'nin diğeride 180 °C'nin yukarisında metalik iletkenlikden yarı iletkenliğe geçiş yapmışlardır.

Şekil 7. düşük sıcaklıkta teşekkül etmiş bir maden sahasından alınmış N-tipi üç galenit numunesinin değişimini göstermektedir. Her üçüde düşük sıcaklıklarda karakteristik metalik iletkenlik, yani, iletkenlik sıcaklıkla düşme göstermiştir. Ayrıca, birbirine yakın sıcaklıklarda biren minimum yapmışlar ve sıcaklık arttıkça, önce kirlilik (impurity) iletkenliği sonrada hakiki (intrinsic) iletkenlik göstermişlerdir.

Kalkopirit ve sfalerit numuneleride ölçülen sıcaklık aralığında iletkenlik geçişi göstermemişler, bunlardan kalkopirit'de yüksek sıcaklıkda hakiki iletkenliğe rastlanmıştır (Şekil 8.).

Şekil 9.'da sülfürlü minerallerin en iletkeni ve magnetik özelliğide olan p rotin numunesinin iletkenlik-sıcaklık değişimi görülmektedir. Önce metalik iletkenlik sonra arızı (extrinsic) iletkenlik ve daha yüksek sıcaklıkdada 0.069 eV değerine sahip (Yasak enerji aralığı) hakiki iletkenlik davranışında bulunmuştur.

## SÜLFÜRLÜ MİNERALLERDE ELEKTRİKSEL İLETİM GEÇİŞLERİ

TABLO 1

## Sülfürlü Minerallerin Elektrik İletkenliği ve Aktivasyon Enerjileri

Numune	Kaynak	Oda Sıc.	Oda Sıc.	Aktivas .	Enerjisi .	
		İletkenlik ler mho/m	İletkenlik Tipi	yon .	1	2
				(e.V)	3	3
Pirit (Tek Kristal)	Pyrenees, İspanya	31	P	.023	.303	.190
Pirit (Çok Kristalli)	?	.40	P	.045	.592	---
Galenit (MMOA1)	Magmont Mine, GD Mo	154	N	.056	.200	---
Galenit (MMOB6)	Magmont Mine, GD Mo	4.4	N	.226	---	---
Galenit (SJC05)	St. Joe Minerals, GD Mo	97	N	.042	.28	---
Kalkopirit	Rouyn, que.	24	P	.121	.518	---
Sfalerit	Pine Point, N.W.T.	.8	P	.25	.32	---
Pirotin	Ontario	84,300	N	.069	---	---

### 5. İRDELEME VE SONUÇ :

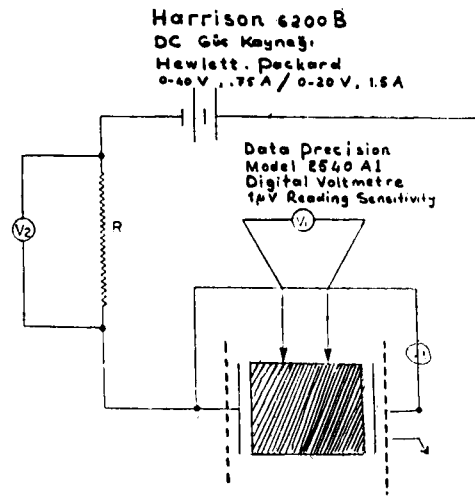
Kristal yapısı ile sıcaklık katsayısı, termoelektrik potansiyel, elektrik iletkenlik ve oluşum sıcaklığı arasında bir ilgi olduğu, birkaç araştırmacı tarafından ortaya konmuştur (Smith<sup>1,2,3</sup> 1942, 1947 ve Tuttle and Twenhofel, 1946). Yüksek sıcaklıkta teşekkül eden kristaller daha mükemmel, düşük sıcaklıkdakiler ise daha az mükemmel olmaktadır. Kristal yapısının elektrik özellikler üzerine olan etkisi kristal terkiibinden daha fazladır. Elektrik özellikler, lineaj yapısının gelişme derecesi ve formasyon sıcaklığı kendi aralarında yakın ilişki içersindedir. Kırıklı, çatlaklı yapı geliştikçe, kristaller daha yüksek rezistansa ve büyük negatif sıcaklık katsayısına sahibolurlar. Bundan başka, elektronik iletkenlik gösteren kristaller metale karşı daha negatif termoelektrik potansiyel gösterdiklerinden daha mükemmel, daha pozitif olduklarında daha az mükemmel olmaktadırlar. Kristal oluşumu sırasında kristale ilave olunun materyallerin termal sallanma miktarı, kristalin yapısı üzerinde önemli etkendir. Büyüme sıcaklığı yüksekse kristale katılan materyallerin sallanması daha fazla olacak ve bu suretle, oluşmakta olan küçük kristal bloklar, kristal yapı içindeki yerlerini hassas bir şekilde alabileceklerdir. Bu sebebden, yüksek sıcaklıkta büyüyen kristaller düşük sıcaklıkdakilere nazaran daha az yapısal kusurlara sahibdirler.

Yukarıda belirtilen neticeler her numune için geçerli değildir. Sadece deneysel istatistik olarak ulaşılmış sonuçlardır. Yaptığımız çalışmada ortaya atılan iletkenlik geçişi fikri konuya daha geniş boyutlar getirecek şekildedir. Bir kısım numuneler bütün ölçü aralığında tipik yarıiletkenlik özelliği gösterirken, bir kısımda metalik iletkenlikden yarıiletkenliğe geçişler göstermişlerdir. Bazı numuneler sadece arızı (extrinsic veya impurity) iletkenlik, bazıları ise metalikiletkenlikden hemen hakiki (intrinsic) yarıiletkenliğe geçiş özelliği göstermişlerdir. Bütün bunlar; orijini ve oluşumu iyi bilinen birçok seçilmiş numuneyi incelemek suretiyle, oluşum şartlarıyla elektrik iletkenliğin değişik karakterleri arasında deneysel bir bağıntı bulunabileceğini ifade eder. Örneğin, düşük sıcaklıkta teşekkül etmiş, birbirine yakın maden sahalarından alınmış üç ayrı galenit numunesi çok benzer değişim özellikleri göstermiştir. Bu konuda yapılacak titiz bir araştırma, cevherin oluşum şartlarını bildirmekle kalmayıp, aynı zamanda, muhtelif jenerasyonlar ihtiva eden bir maden yatağının genel kalitatif sıcaklık tarihinde yansıtabilir.

Yazar, oluşum şartları çok iyi bilinen maden sahalarından alınmış seçkin numuneler ve istenen sıcaklıkta ve bileşimde oluşturulmuş sentetik numuneler üzerinde yapacağı ölçülerle, konuyu daha aydınlığı kavuşturmayı düşünmektedir.

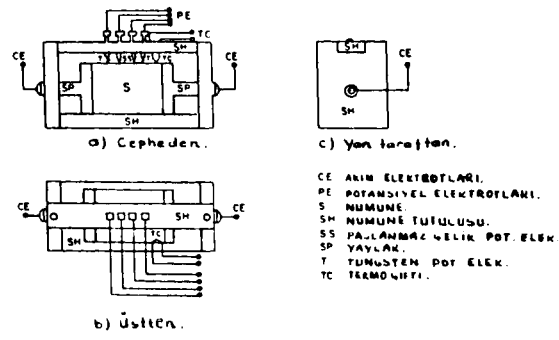
## YARARLANILAN KAYNAKLAR

1. Smith, F. Gordon, "Variation in the properties of pyrite" Am. Mineral., 27,1–19, 1942.
2. Smith F. Gordon, " Lineage structure and conditions of deposition of pyrite" Am Mineral. of pyrite, 27, 1–19, 1942.  
Econ. Geol., 37, 519–523, 1942.
3. Econ. Geol., "The pyrite geo–thermometer" Economic Geology, 42, 515–523,1947.
4. Tuttle, O.F., and Twenhofel, W.S., "Effect of temperature on lineage structure in some synthetic crystals" Am. Mineralogist, 31, 569–573, 1946.

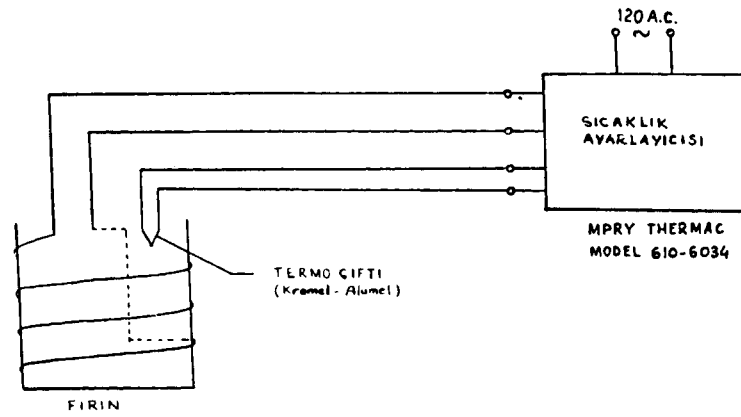


Şekil 1. Dört-Elektrot ölçü devresi.

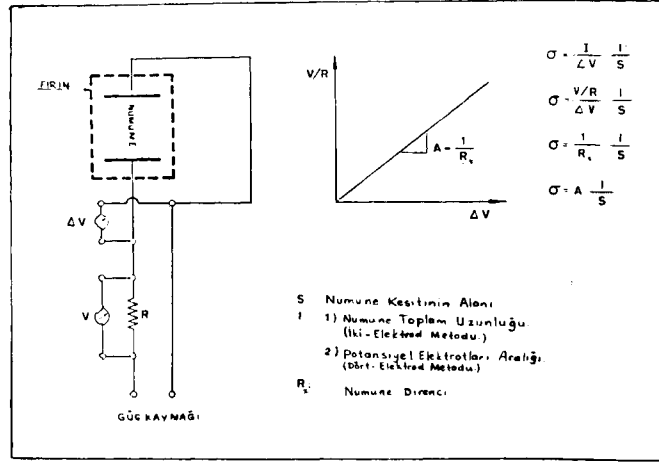
Figure 1. Circuit for measuring electrical conductivity by Four-Electrode Method



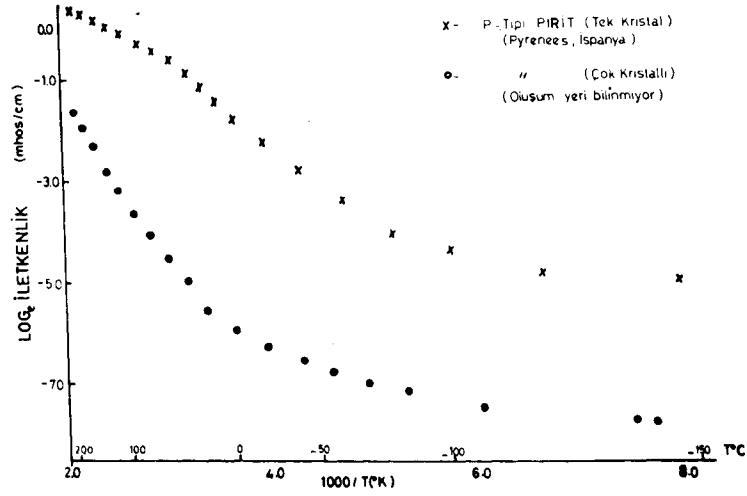
Şekil 2. Numune tutucusu.  
Figure 2. Sample holder.



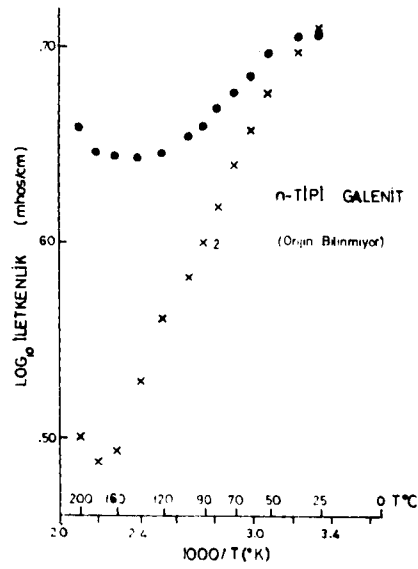
Şekil 3. Isıtma düzeni.  
Figure 3. Heating system.



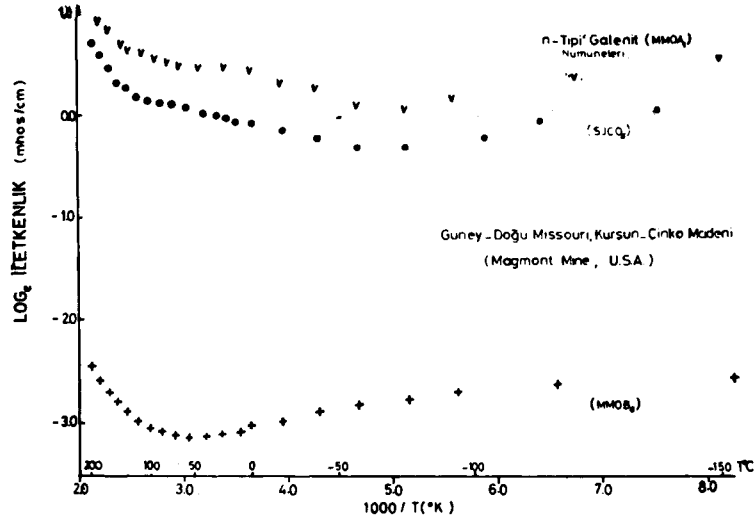
Şekil 4. İki-Elektrot ölçü devresi ve elektrik iletkenliğin hesaplanması.  
 Figure 4. Circuit for measuring electrical conductivity by Two-Electrode Method and procedure for calculating conductivity.



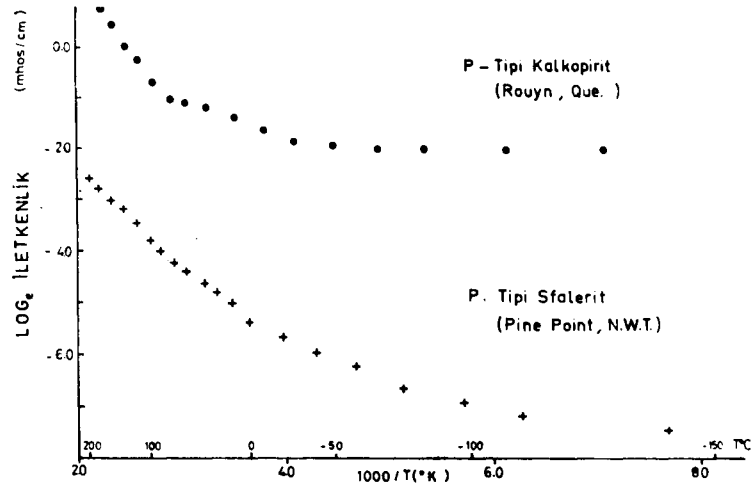
Şekil 5. Sıcaklıkla iletkenlik değişimi (P-tipi tek ve çok kristalli pirit numuneleri).  
 Figure 5. Conductivity variation with temperature (P-type single and polycrystalline samples of pyrite).



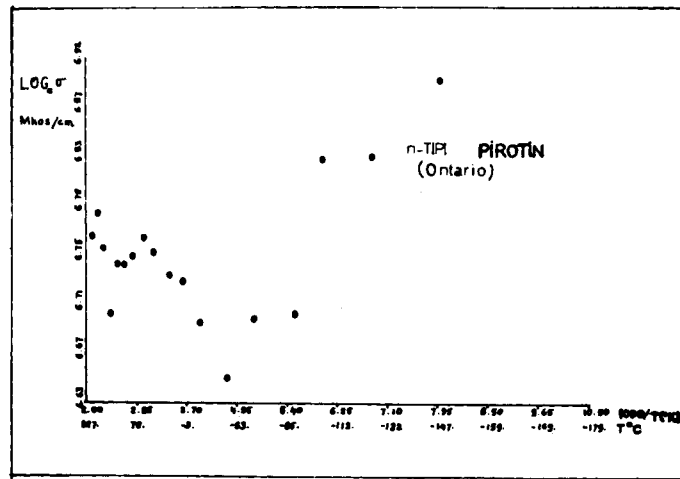
Şekil 6. Sıcaklıkla iletkenlik değişimi (iki N-tip çok kristalli galenit numunesi).  
Figure 6. Conductivity variation with temperature (Two N-type polycrystalline samples of galena).



Şekil 7. Sıcaklıkla iletkenlik değişimi (Üç N-tipi çok kristalli galenit numunesi).  
Figure 7. Conductivity variation with temperature (Three N-type polycrystalline samples of galena).



Şekil 8. Sıcaklıkla iletkenlik değişimi (P-tipi çok kristalli kalkopirit ve sfalerit numuneleri).  
Figure 8. Conductivity variation with temperature (a P-type polycrystalline chalcopyrite sample and a P-type polycrystalline sphalerite sample).



Şekil 9. Sıcaklıkla iletkenlik değişimi (N–tipi çok kristalli pirotin numunesi).  
 Figure 9. Conductivity variation with temperature (a N–type polycrystalline pyrrhotite sample).