

# 5. Akım, Direnç ve Elektromotor Kuvvet

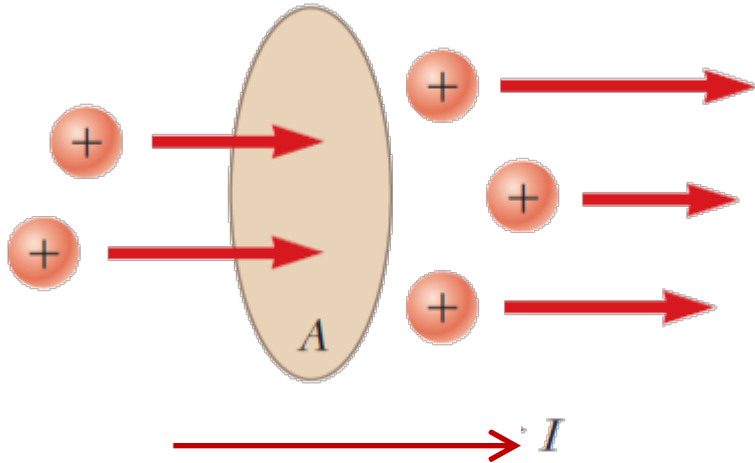
1. Elektrik Akımı
2. Direnç
3. Elektriksel İletkenlik
4. Direnç ve Sıcaklık
5. Elektrik Gücü

## 5.1 Elektrik Akımı

**Akım** bir taraftan bir diğer tarafa doğru olan yük hareketi olarak tanımlanır.

Bir elektrik yükü grubunun yüzey alanı  $A$ 'ya dik olarak hareket ettiğini düşünelim.

Bu yüzeyden geçen elektrik akımı, yüzeyden geçen elektrik yükleri ile orantılıdır.



Eğer  $\Delta t$  zaman aralığında  $\Delta Q$  yükü bu yüzeyden geçiyorsa, ortalama akım  $I_{\text{ort}}$  birim zamanda bu yüzeyden geçen yük miktarıdır:

$$I_{\text{ort}} = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

Eğer geçen yük miktarı zamanla değişiyorsa herhangi bir andaki akım (anlık akım):

$$I \equiv \frac{dQ}{dt}$$

**SI** birim sisteminde akımın birimi **Amper** olarak verilir ve **A** ile gösterilir.

1 Amper, 1 saniyede bir yüzeyden geçen 1 C'luk yükün oluşturduğu akım olarak tanımlanır.

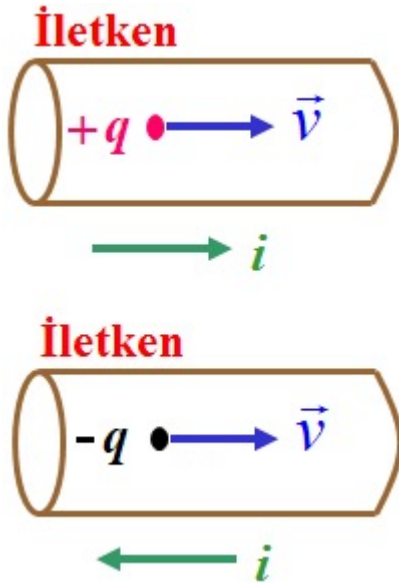
$$1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$$

# 5.1 Elektrik Akımı

## Akımın Yönü :

İletkenlerde akımın yönü okla (  $\rightarrow$  ) gösterilir ve akımı oluşturan yüklü parçacıkların işareti ile şu şekilde ilişkilidir:

1. Akım **positive** yüklerin hareketinden kaynaklanıyorsa, yönü yüklerin  $\vec{v}$  hızı ile aynı yöndedir.
2. Akım **negative** yüklerin hareketinden kaynaklanıyorsa, yönü yüklerin  $\vec{v}$  hızı ile ters yöndedir.

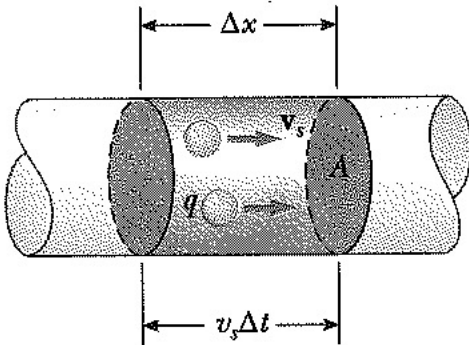


7.  $2 \text{ cm}^2$  lik bir yüzeyden geçen  $q$  (C cinsinden) yükünün miktarı zamanla  $q = 4t^3 + 5t + 6$  şeklinde değişmektedir. (Burada  $t$  saniye cinsindendir.) (a)  $t = 1,0$  s için yüzeyden geçen ani akım ne kadardır? (b) Akım yoğunluğunun değeri ne kadardır?

8. Bir elektrik akımı  $I(t) = 100\sin(120\pi t)$  dir. Burada  $I$  amper,  $t$  ise saniyedir.  $t = 0$  dan  $t = (1/240)$  s ye kadar akım vasıtasıyla taşınan toplam yük nedir?

# 5.1 Elektrik Akımı

Elektrik akımın mikroskobik modeli



**Elektrik akımı** yük taşıyıcılarının hareketidir. Bu taşıyıcılar, negatif (metaller) ya da pozitif (p-tipi yarıiletkenlerde deşikler) olabilir.

İletkenin içinde birim hacimde  $n$  tane yük taşıyıcısı bulunsun. Buna yük taşıyıcı yoğunluğu da denir. Tüm yük taşıyıcılar aynı hıza sahip olsun:  $\Delta x = v_s \Delta t$  zaman aralığında taşıyıcılar kadar yol alacaktır. Bu zaman içinde yük hareketleri  $\mathbf{A} \mathbf{V}_d \Delta t$  kadar bir hacim tarayacaktır. Buna göre bu hacim içindeki yük miktarı  $\Delta Q = (n A v_s \Delta t) q$

**Elektrik akımı:** 
$$I_{\text{or}} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = n q v_s A$$

# 5.1 Elektrik Akımı

## Örnek

Yüzey alanı  $3.31 \times 10^{-6} \text{ m}^2$  olan bir bakır telden  $10 \text{ A}$ 'lık bir akım geçiyor. Her bir bakır atomunun akıma bir elektron ile katkıda bulunduğunu düşünecek olursak elektronların sürüklenme hızını hesap ediniz. (Bakırın yoğunluğu  $8.92 \text{ g/cm}^3$  ve atom ağırlığı  $63.5 \text{ g/mol}$ .)

Taşıyıcı yük yoğunluğu verilmemiş.  $1 \text{ mol}$  bakır için taşıyıcı yük yoğunluğunu bulalım.  $1 \text{ mol}$  bakır  $63.5 \text{ g}$  ve yoğunluğunu biliyoruz. Böylece  $1 \text{ mol}$  bakırın kapladığı hacim:

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{63,5 \text{ g}}{8,95 \text{ g/cm}^3} = 7,09 \text{ cm}^3$$

Bir mol bakır  $N_A$  kadar bakır atomu içerdiğine göre birim hacimdeki bakır atomunun sayısı taşıyıcı yoğunluğuna eşit olacaktır:

$$\begin{aligned} n &= \frac{6,02 \times 10^{23} \text{ elektron}}{7,09 \text{ cm}^3} (1,00 \times 10^6 \text{ cm}^3/\text{m}^3) & v_s &= \frac{I}{nqA} \\ &= 8,49 \times 10^{28} \text{ elektron/m}^3 & &= \frac{10,0 \text{ C/s}}{(8,49 \times 10^{28} \text{ m}^{-3})(1,60 \times 10^{-19} \text{ C})(3,31 \times 10^{-6} \text{ m}^2)} \\ & & &= 2,22 \times 10^{-4} \text{ m/s} \end{aligned}$$

# 5.1 Elektrik Akımı

## **J** elektrik akım yoğunluğu

Bir iletken içinde akım üretmek üzere, yükler, iletken içindeki elektrik alanının etkisi ile hareket ederler. Bu durumda iletken içinde elektrik alan mevcuttur. Çünkü biz hareketli yüklerle, yani *elektrostatik olmayan* durumlarla ilgileniyoruz.

$A$  kesit alanlı ve  $I$  akım taşıyan bir iletkeni ele alalım. İletken içindeki **akım yoğunluğu**, birim alan başına düşen akım olarak tanımlanır.  $I = nqv_s A$  olduğundan, akım yoğunluğu,

**Elektrik akım yoğunluğu:**  $J \equiv \frac{I}{A} = nqv_s$  **Birim alandan geçen akım**  
**Birimi:** A/m<sup>2</sup>

**Akım yoğunluğu vektörü:**  $\mathbf{J} = nq\mathbf{v}_s$   $J = \sigma E$

Akım yoğunluğu  $\mathbf{J}$  ile iletken içindeki elektrik alan arasında bir ilişki vardır. Bu ilişki genellikle çok karmaşıktır. Ancak bazı malzemeler için,  $\mathbf{J}$  ile  $\mathbf{E}$  arasında doğrusal bir ilişki vardır. Matematiksel olarak aşağıdaki bağıntı **Ohm Yasası** olarak bilinir. Burada  $\sigma$  malzemenin iletkenliğidir.

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

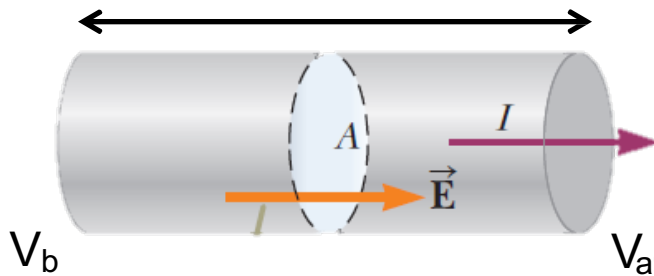
# 5.1 Elektrik Akımı

## Ohm Yasası

Ohm yasasına uyan malzemelere **omik** malzemeler denir. Deneylere göre ohm yasasına uymayan malzemeler de vardır. Bu malzemelere ise **nanomik** malzemeler denir.

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

Pratik uygulamalarda **Ohm yasasının** daha kullanışlı bir formu şeklindeki gibi bir iletkenin uzunluğuna ve **A** yüzey alanına sahip bir parçasının irdelenmesi ile elde edilebilir.



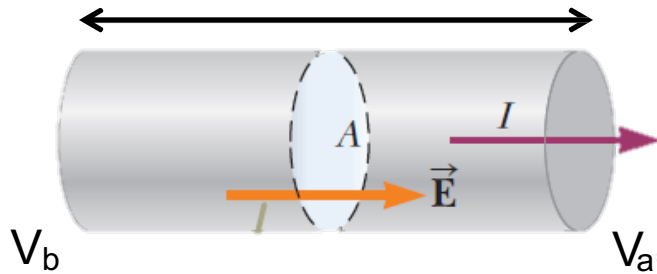
İletkenin iki ucu arasında potansiyel farkı:  $\Delta V = V_b - V_a$  olsun. Potansiyel farkı nedeniyle oluşan elektrik alanın düzgün olduğunu düşünecek olursak:

$$\Delta V = E \ell$$



# 5.1 Elektrik İletkenlik s

## Ohm Yasası



$$R = \ell / \sigma A$$

$$J = \sigma E = \sigma \frac{\Delta V}{\ell}$$

Burada akım yoğunluğunun tanımı  $J=I/A$  kullanılırsa

$$\Delta V = \frac{\ell}{\sigma} J = \left( \frac{\ell}{\sigma A} \right) I$$

Burada  $R = \frac{\ell}{\sigma A} = \rho \frac{\ell}{A}$  terimine iletkenin **direnci** denir. Buna göre bir iletkenin direnci, direnç boyunca potansiyel farkının, dirençten geçen akıma oranı olarak tanımlanır.

$$R = \frac{\ell}{\sigma A} = \frac{\Delta V}{I}$$

SI Birim Sisteminde  $1 \Omega \equiv 1 \text{ V/A}$

Bir maddenin iletkenliğinin tersine **özdirenç**<sup>3</sup> ( $\rho$ ) denir:

$$\rho \equiv \frac{1}{\sigma} \quad R = \rho \frac{\ell}{A}$$

olarak ifade edilebilir. Burada  $\rho$ , ohm-m ( $\Omega \cdot m$ ) birimindedir. Her omik malzeme özel bir özdirence sahiptir ve bu parametre malzemenin özelliklerine ve sıcaklığına bağlıdır. İyi elektrik iletkenler çok küçük özdirence (veya yüksek iletkenliğe), iyi yalıtkanlar ise çok büyük özdirence (düşük iletkenliğe) sahiptir. Ayrıca, Eş. 27.11'den de görülebileceği gibi, direnç, özdirenç gibi geometrisine de bağlıdır. Tablo 27.1 de çeşitli maddelerin 20°C'deki özdirençleri verilmiştir. Çok küçük değerleri olan gümüş ve bakır gibi iyi iletkenlerden, çok büyük değerleri olan cam ve plastik gibi çok iyi yalıtkanlarınkine kadar geniş bir aralıkta bulunur. İdeal iletken sıfır dirençli, ideal yalıtkan da sonsuz dirençli kabul edilir.

**TABLO 27.1** Çeşitli Malzemelerin Özdirenç ve Özdirençin Sıcaklık Katsayıları

Malzeme	Özdirenç ( $\Omega \cdot m$ )	Sıcaklık Katsayısı $\alpha[(^{\circ}C)^{-1}]$
Gümüş	$1,59 \times 10^{-8}$	$3,8 \times 10^{-3}$
Bakır	$1,7 \times 10^{-8}$	$3,9 \times 10^{-3}$
Altın	$2,44 \times 10^{-8}$	$3,4 \times 10^{-3}$
Alüminyum	$2,82 \times 10^{-8}$	$3,9 \times 10^{-3}$
Tungsten	$5,6 \times 10^{-8}$	$4,5 \times 10^{-3}$
Demir	$10 \times 10^{-8}$	$5,0 \times 10^{-3}$
Platin	$11 \times 10^{-8}$	$3,92 \times 10^{-3}$
Kurşun	$22 \times 10^{-8}$	$3,9 \times 10^{-3}$
Nikrom <sup>b</sup>	$1,50 \times 10^{-6}$	$0,4 \times 10^{-3}$
Karbon	$3,5 \times 10^{-5}$	$-0,5 \times 10^{-3}$
Germanyum	0,46	$-48 \times 10^{-3}$
Silisyum	640	$-75 \times 10^{-3}$
Cam	$10^{10}$ – $10^{14}$	
Sert plastik	$\sim 10^{13}$	
Kükürt	$10^{15}$	
Kuarts (erimiş)	$75 \times 10^{16}$	

<sup>a</sup> Bütün değerler 20 °C'dedir.

<sup>b</sup> Nikel-Krom alaşımı, ısıtma elemanlarında yaygın olarak kullanılır.



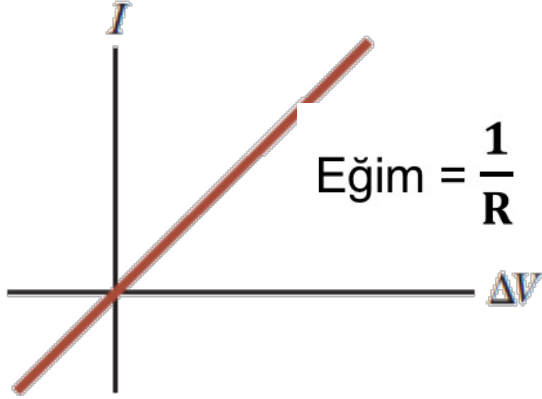
**Şekil 27.6** Bir direnç üzerindeki renkli bantlar, bu direncin değerinin belirlenmesinde kullanılan kodları gösterir. İlk iki renk, direnç değerindeki ilk iki rakamı verir. Üçüncü renk, direnç değerindeki çarpanı on'un üssü olarak temsil eder. Son renk ise direnç değerinin toleransıdır. Bir örnek olarak, şayet dört renk, kırmızı (= 2), siyah (= 0), turuncu (=  $10^3$ ) ve altın (= %5). Direncin değeri  $20 \times 10^3 \Omega = 20 \text{ k}\Omega$  olur ve %5'lik toleransı = 1 k $\Omega$ . (Renklerin değerleri Tablo 27.2'den alınmıştır.)

**TABLO 27.2 Dirençler İçin Renk Kodu**

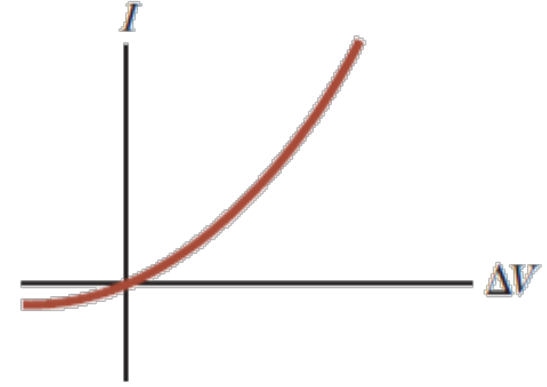
Renk	Sayı	Çarpan	Tolerans
Siyah	0	1	
Kahverengi	1	$10^1$	
Kırmızı	2	$10^2$	
Turuncu	3	$10^3$	
Sarı	4	$10^4$	
Yeşil	5	$10^5$	
Mavi	6	$10^6$	
Mor	7	$10^7$	
Gri	8	$10^8$	
Beyaz	9	$10^9$	
Altın		$10^{-1}$	%5
Gümüş		$10^{-2}$	%10
Renksiz			%20

## 5.2 Direnç

### Omik Malzeme



### Nanomik Malzeme



**Şekil 27.7** (a) Omik bir malzeme için akım voltaj eğrisi. Eğri, lineer (doğrusal) dir ve eğim, iletkenin direncini verir. (b) Yarı-iletken bir diyot için, doğrusal olmayan akım-voltaj eğrisi. Bu aygıt ohm kanununa uymaz.

## İletkenler, Yarıiletkenler ve Yalıtkanlar

Metaller gibi iyi elektriksel iletkenler genellikle iyi ısısal iletkenlerdir.

Yarıiletkenler metallerle yalıtkanlar arasında ara bir değerde özdirence sahiptir.

## ÖRNEK 27.2 Bir iletkenin Direnci

Boy 10 cm ve dik kesit-alanı  $2 \times 10^{-4} \text{ m}^2$  olan silindirik bir alüminyum parçasının direncini hesaplayınız. İşlemleri,  $3 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{m}$  lik öz dirence sahip bir cam için tekrarlayınız.

**Çözüm** Alüminyum çubuğun direncini Eş. 27.11 ve Tablo 27.1 den yararlanarak hesaplayabiliriz:

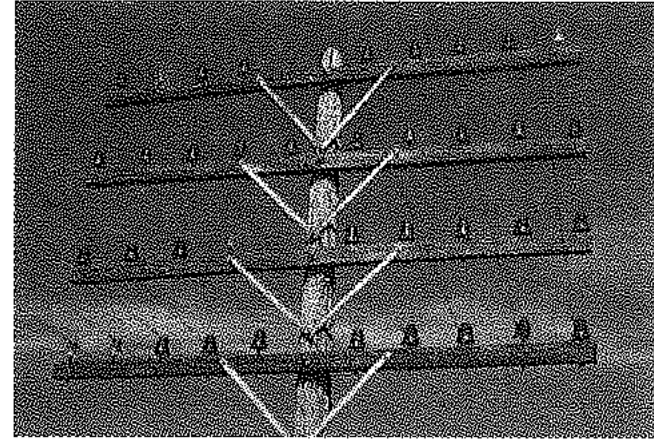
$$R = \rho \frac{\ell}{A} = (2,82 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}) \left( \frac{0,100 \text{ m}}{2,00 \times 10^{-4} \text{ m}^2} \right) \\ = 1,41 \times 10^{-5} \Omega$$

Benzer şekilde, cam için

$$R = \rho \frac{\ell}{A} = (3,0 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{m}) \left( \frac{0,100 \text{ m}}{2,00 \times 10^{-4} \text{ m}^2} \right) \\ = 1,5 \times 10^{13} \Omega$$

bulunur.

Beklendiği üzere alüminyum, camdan çok düşük bir dirence sahiptir. Cam silindirin direnci, alüminyumun direncinden 18 kat daha büyüktür.



Telefon direkleri üzerindeki elektriksel yalıtıcılar düşük elektrik iletkenliğinden dolayı camdan yapılır. (J. H. Robinson/Foto Araştırmaları izniyle)

## 5.3 Direnç ve Sıcaklık

Bir iletkenin öz direnci, belli bir sıcaklık aralığında yaklaşık olarak sıcaklıkla aşağıdaki gibi lineer (doğrusal) olarak değişir:

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (27.19)$$

Burada  $\rho$  herhangi bir ( $^{\circ}\text{C}$  cinsinden)  $T$  sıcaklığındaki öz direnç,  $\rho_0$  bir  $T_0$  referans sıcaklığındaki (bu sıcaklık genellikle  $20^{\circ}\text{C}$  olarak alınır) öz dirençtir;  $\alpha$  ise **öz direncin sıcaklık katsayısı** olarak bilinir. 27.19 Eşitliğinden görürüz ki öz direncin sıcaklık katsayısı

$$\alpha = \frac{1}{\rho_0} \frac{\Delta\rho}{\Delta T} \quad (27.20)$$

şeklinde de ifade edilebilir. Burada  $\Delta\rho = \rho - \rho_0$  ve  $\Delta T = T - T_0$  sıcaklık aralığında öz dirençteki değişimdir.

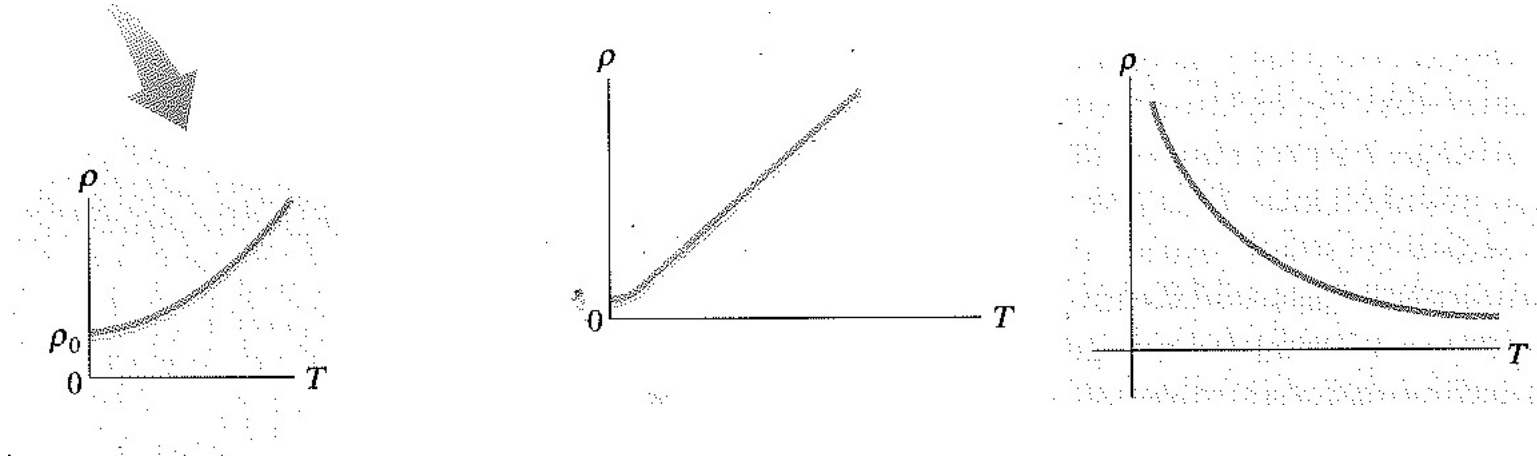
Çeşitli maddelerin öz direnç ve sıcaklık katsayıları Tablo 27.1 de verilmiştir.  $\alpha$ 'nın biriminin  $\text{Celcius}^{-1}$  [ $(^{\circ}\text{C})^{-1}$ ] olduğuna dikkat ediniz. İletkenin direnci, 27.11 Eşitliğine göre öz dirençle doğru orantılı olduğundan, direncin sıcaklıkla değişimi

$$R = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (27.21)$$



## 5.4 Direnç ve Sıcaklık

### Özdirenç ve sıcaklık

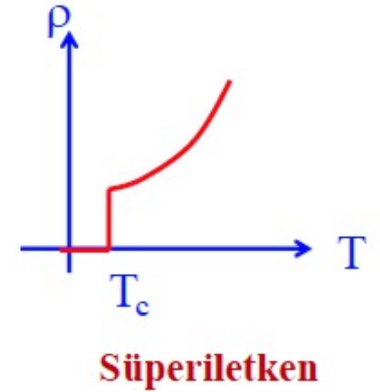


Bakır gibi birçok omik maddenin direnci, Şekil 27.10 da görüldüğü gibi sıcaklık arttıkça yaklaşık olarak lineer (doğrusal) artar. Bununla beraber, gerçekte düşük sıcaklıklarda daima lineer olmayan bir bölge vardır ve özdirenç mutlak sıfır yakınında genellikle, sonlu bir değere yaklaşır. Mutlak sıfır civarındaki bu artık özdirencin sebebi, elektronların metaldeki safsızlıklar ve kusurlarla olan çarpışmalarıdır. Halbuki, yüksek sıcaklık özdirencinde (lineer bölge) ise, esas olarak elektronların metal atomlarıyla çarpışmaları baskındır.

Tablo 27.1'den görüldüğü gibi, üç  $\alpha$  değeri negatiftir. Bu bize yarıiletkenlerin özdirencinin, sıcaklık arttıkça azaldığını söyler (Şekil 27.11). Bu durum, daha yüksek sıcaklıklarda yük taşıyıcıların yoğunluğunun artmasından kaynaklanır.

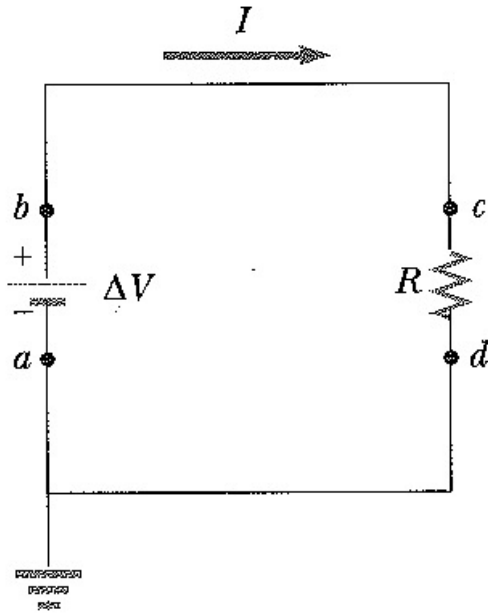
## 5.4 Süper-İletkenler

Bir takım metal ve bileşikler var ki, bunların dirençleri *kritik sıcaklık* denilen belli bir  $T_c$  sıcaklığının altında gerçekte *sıfıra* gider. Bu maddeler **süper iletkenler** olarak bilinirler. Bir süper iletkenin direnç-sıcaklık grafiği,  $T_c$  nin üzerindeki sıcaklıklarda normal bir metalinki gibidir (Şekil 27.12). Sıcaklık  $T_c$  ye eşit veya onun altında olduğunda, özdirenç birden bire sıfıra düşer. Bu gerçek 1911 de Alman fizikçi H. Kamerlingh-Onnes (1853-1926) tarafından civa ile çalışırken keşfedilmiştir. (Civa 4,2 K nin altında süper iletkendir). Son ölçümler göstermiştir ki  $T_c$  nin altında süper iletkenlerin özdirençleri  $4 \times 10^{-25} \Omega \cdot m$  den daha küçüktür. Bu değer, bakırın özdirencinden hemen hemen  $10^7$  kere daha küçük olup pratikte sıfır kabul edilmektedir.






## 5.5 Elektrik Enerjisi ve Guc



Bir iletkende elektrik akımı oluşturmak için bir batarya kullanılırsa, bataryada depolanan kimyasal enerji, yük taşıyıcıların kinetik enerjisine sürekli olarak dönüşür. Bu kinetik enerji, yük taşıyıcıları ile örgü iyonları arasındaki çarpışmalar sonucu süratle kaybedilir ve neticede iletkenin sıcaklığı artar. Böylece, bataryada depolanan kimyasal enerjinin sürekli olarak ısı (termal) enerjiye dönüştüğünü görürüz.

Şekil 27.14 te görüldüğü gibi, uçları  $R$  direncine bağlanmış bir bataryadan oluşan basit bir elektrik devresini ele alalım.  $\text{---}||\text{+}$  sembolü bataryayı (veya herhangi bir doğru akım kaynağını) göstermek için kullanılır ve dirençler de  $\text{---}\text{W}\text{---}$  ile gösterilir. Bataryanın pozitif ucu (uzun bacak) yüksek potansiyelde, negatif uç (kısa bacak) ise düşük potansiyeldedir. Şimdi  $\Delta Q$  miktarındaki pozitif yükün, devreyi  $a$  dan başlayıp bataryadan ve dirençten geçerek tekrar  $a$ 'ya gelmek suretiyle tamamlandığını düşünelim.  $a$  noktası referans

## 5.5 Elektrik Enerjisi ve Güç

rar  $a$ 'ya gelmek suretiyle tamamlandığını düşünelim.  $a$  noktası referans noktası olup topraklanmıştır (  toprak sembolüdür) ve potansiyeli sıfır olarak alınmıştır. Yük  $a$ 'dan  $b$ 'ye batarya üzerinden hareket ederken bataryadaki kimyasal enerji  $\Delta V \Delta Q$  kadar *azalırken*, yükün elektriksel potansiyel enerjisi aynı miktarda *artar* (Bölüm 25.9'dan hatırlayınız ki  $\Delta U = q\Delta V$  dir.) Bununla beraber yük, direnç üzerinden  $c$  den  $d$  ye giderken, dirençteki atomlarla yaptığı çarpışmalar sonucu elektriksel potansiyel enerjisini *kaybeder*. Dolayısıyla termal enerji oluşur. Şayet, bağlantı tellerinin direncini ihmal edersek,  $bc$  ve  $da$  yollarında enerji kaybı olmayacağına dikkat ediniz. Yük  $a$ 'ya döndüğünde başlangıçtaki (sıfır) enerjisine sahip olmalıdır.<sup>5</sup> Herhangi bir noktada yük artışı olmadığı için devrenin her yerinde akımın aynı olduğuna dikkat edilmelidir.

Direnç üzerinden giderken,  $\Delta Q$  yükünün potansiyel enerji kaybetme hızı,

$$\frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \Delta V = I \Delta V$$

ile verilir. Burada  $I$ , devredeki akımdır. Tersine, yük bu enerjiyi bataryadan geçerken yeniden kazanır. Yükün enerji kaybetme hızı, dirençteki  $\mathcal{P}$  güç kaybına eşit (-ki bu içenerji olarak görülür-) olacağından

$$\mathcal{P} = I \Delta V \quad (27.22)$$

27.22 Eşitliğini ve bir dirence ait  $V = IR$  gerçeğini kullanarak çeşitli şekillerde kaybedilen gücü

$$\mathcal{P} = I^2 R = \frac{(\Delta V)^2}{R} \quad (27.23)$$

Bir batarya veya herhangi bir elektriksel enerji sağlayan aygıta *elektromotor kuvvet kaynağı* veya daha genel bir ifadeyle *emk kaynağı* denilmektedir. Emk kavramı daha ayrıntılı olarak, Bölüm 28 de incelenecektir (*elektromotor kuvvet* tabiri bir kuvveti değil, fakat gerçekte, volt cinsinden bir potansiyel farkını gösterdiğinden şanssız bir deyimdir.). **Bataryanın iç direnci ihmal edilirse,  $a$  ve  $b$  noktaları arasındaki potansiyel farkı Şekil 27.14'teki bataryanın  $\mathcal{E}$  emk'sına eşittir.** Yani,  $\Delta V = V_b - V_a = \mathcal{E}$  olup devredeki akım  $I = \Delta V / R = \mathcal{E} / R$  dir.  $\Delta V = \mathcal{E}$  olduğundan, emk kaynağı tarafından verilen güç  $\mathcal{P} = I\mathcal{E}$  şeklinde ifade edilebilir; ki bu dirençteki güç kaybına ( $I^2R$  ye) eşittir.