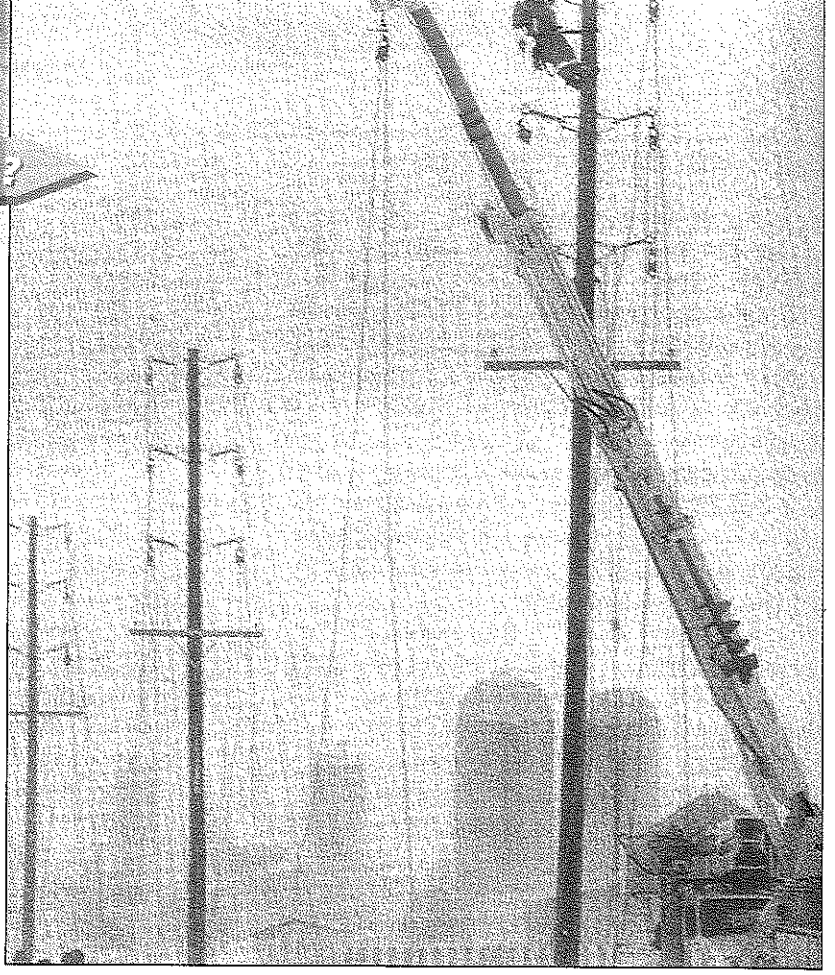


## \* SİZCE NEDEN?

Fotoğrafta, aşırı dondurucu fırtınadan dolayı Ocak 1998'de birkaç gün elektriksiz kalan İsadora eyaletinin Doğu Ontario Kasabasının elektrik nakil hattını tamir eden elektrik işçileri görülmektedir. Güç nakil hattına dokunmak çok tehlikelidir, çünkü, hattın elektriksel potansiyeli yere göre yüz binlerce volt olabilir. Eğer bu kadar tehlike- liyse, niçin güç naklinde böyle yüksek po- tansiyel farkı kullanılıyor ve niçin teller üzerine konan kuşlar elektriğe çarpılmaz- lar? (AP/Wide World Fotoğrafları/Fred Chartrand)



b ö l ü m

# 27

## Akım ve Direnç

### Bölüm İçeriği

- |  |                                |
|--|--------------------------------|
| 27.1 Elektrik Akımı                        | 27.4 Direnç ve Sıcaklık        |
| 27.2 Direnç ve Ohm Kanunu                  | 27.5 (Seçmeli) Süperiletkenler |
| 27.3 Elektriksel İletkenlik İçin bir Model | 27.6 Elektrik Enerjisi ve Güç  |

**E**lektriksel olaylarla ilgili buraya kadar yaptığımız tartışmalarımız, durgun yüklerle veya *elektrostatikle* sınırlı kalmıştır. Şimdi, elektrik yüklerinin hareket halinde olduğu durumları inceleyeceğiz. *Elektrik akımı* veya basitçe *akım*, uzayın herhangi bir bölgesine doğru yüklerin akış hızını belirlemek için kullanılmaktadır. Elektrikğin en pratik uygulamaları, elektrik akımlarıyla ilgili olanlardır. Örneğin, el fenerinin düğmesi açıldığında fenerin pili, ampulün fitilinden akım geçmesini sağlar. Ev aletlerinin çoğu alternatif akımla çalışır. Bu genel durumlarda, yük akışı bakır tel gibi bir iletken içinden olur. Bununla beraber, bir iletkenin dışında da akımın mevcut olması mümkündür. Örneğin bir TV resim tüpündeki elektron demeti de bir akım oluşturur.

Bu bölümde, ilk olarak sürekli akım kaynaklarından biri olan pili ele alacağız. Akımın mikroskobik tanım verilecek ve iletkenlerde yük akışını zorlaştıran bazı etmenler (direnç) tartışılacaktır. Metallerdeki elektriksel iletkenliği tanımlamak için klasik model kullanılacak ve bu modelin bazı sınırlamalarından söz edilecektir.

## 27.1 ELEKTRİK AKIMI

Suyun akışı ve akım arasında karşılaştırma yapmak öğreticidir. Pek çok yerde, su tasarrufu amacı ile, evlerde su akımını düşüren bataryalar konulmak suretiyle yavaş akan duş sistemi yapmak yaygın bir işlemdir. Bu ve benzeri sistemlerde verilen zaman aralığında akan su miktarını tayin ederek, suyun akışını ölçeriz ve bunu yaygın olarak dakikada litre olarak belirleriz. Büyük bir ölçek üzerinde, özel bir yeri geçen su akışlarının hızını tanımlayarak nehir akımını karakterize edebiliriz. Örneğin, Niagara şelalesinde kıyı üzerindeki su akış hızı  $1400 \text{ m}^3/\text{s}$  ile  $2800 \text{ m}^3/\text{s}$  arasında değişmektedir.

Şimdi hareket halindeki elektrik yüklerinin oluşturduğu bir sistemi ele alalım. Belirli bir bölgede net bir yük akışı olduğunda, **akımın** mevcut olduğu söylenir. Akımı daha iyi tanımlamak için, yüklerin Şekil 27.1 de gösterildiği gibi  $A$  alanlı bir yüzeye doğru dik olarak hareket ettiklerini farz edelim. (Örneğin bu alan, bir telin dik kesit alanı olabilir.) **Akım bu yüzeyden geçen yüklerin akış hızıdır.** Bir  $\Delta t$  zaman aralığında bu alandan geçen yük miktarı  $\Delta Q$  ise, **ortalama akım** ( $I_{\text{or}}$ ), yükün bu zaman aralığına oranına eşittir:

$$I_{\text{or}} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (27.1)$$

Yükün akış hızı zamanla değişirse, akım da zamanla değişir. Bu durumda yukarıdaki ifadenin diferansiyel limiti olan **ani akım** ( $I$ )

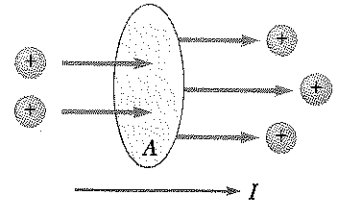
$$I \equiv \frac{dQ}{dt} \quad (27.2)$$

olarak tanımlanır. Akımın (SI) deki birimi **ampere** (A) dir. Ve

$$1 \text{ A} = \frac{1 \text{ C}}{1 \text{ s}} \quad (27.3)$$

dir. Yani, 1 A lik akım, yüzeyden 1 s de 1 C luk yük geçmesine özdeştir.

Şekil 27.1 deki yüzeyden akan yükler pozitif, negatif veya her ikisi de olabilir. **Pozitif yükün akış yönünü, alışlagelmiş olarak akım yönü olarak seçmek adettir.** Bakır gibi bir iletkende akım, negatif yüklü elektronların hareketiyle oluşur. Bu nedenle, sıradan **basit bir iletkendeki akımdan söz ederken, akım yönü, elektronların akış yönüne zıt olacaktır.** Öte yandan, bir hızlandırıcıdaki



**Şekil 27.1** Bir  $A$  alanından geçen yükler. Alandan çıkan yüklerin zamana göre değişimi,  $I$  akımı olarak tanımlanır. Akımın yönü artı yüklerin serbest olarak geçtiği yöndür.

Elektrik akımı

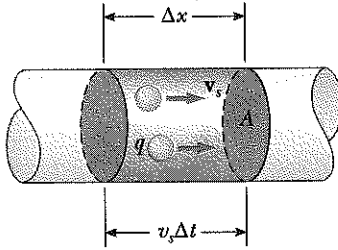
Akımın yönü

pozitif yüklü proton demeti söz konusu ise akım, protonların hareketi yönündedir. Gaz ve elektrolit içeren bazı durumlarda olduğu gibi akım, hem pozitif hem de negatif yük akışının bir sonucudur. Örneğin, yarıiletken ve elektrolitlerde böyledir.

Şayet bir iletken telin uçları bir ilmek (halka) şeklinde bağlanırsa, ilmek üzerindeki bütün noktalar aynı elektrik potansiyelindedirler ve böylece iletkenin yüzeyinde ve içinde elektrik alan sıfırdır. Elektrik alan sıfır olduğu için, tel içerisinde net bir yük iletimi yoktur, dolayısıyla akım da yoktur. İletken üzerinde fazlalık yük olsa bile iletkendeki akım sıfırdır. Bununla birlikte, şayet iletken telin uçları bir pile bağlanırsa, ilmek üzerindeki bütün noktalar aynı potansiyelde değildir. Pil, tel içinde elektrik alanı meydana getirerek ilmeğin uçları arasında potansiyel farkı oluşturur. Elektrik alan tel içindeki iletkenlik elektronları üzerine kuvvet uygulayarak onların ilmek etrafında hareket etmesine ve böylece akım oluşmasına sebep olur.

Hareket eden yükü (pozitif veya negatif) hareketli **yük taşıyıcısı** olarak ifade etmek yaygındır. Örneğin, metaldeki hareketli yük taşıyıcıları elektronlardır.

### Akımın Mikroskobik Modeli



**Şekil 27.2** Dik kesit alanı  $A$  olan bir düzgün iletken parçası. Yük taşıyıcıları  $v_s$  hızıyla hareket etmekte ve  $\Delta t$  süresinde aldıkları yol  $\Delta x = v_s \Delta t$  olmaktadır.  $\Delta x$  uzunlukta, hareketli yük taşıyıcıların sayısı  $nA v_s \Delta t$  ile verilir. Buradaki  $n$ , birim hacim başına düşen taşıyıcı sayısıdır.

Bir iletkende ortalama akım

Metal içinde iletkenlik için mikroskobik bir model tanımlayarak yük taşıyıcılarının hareketiyle akımın ilişkisini kurabiliriz. Bu ilişkiyi göstermek için kesit alanı  $A$  olan bir iletkeni (Şekil 27.2) ele alalım.  $\Delta x$  uzunluğundaki iletken elemanının hacmi (Şekil 27.2 deki koyu renkli kısım)  $A \Delta x$  dir. Şayet  $n$  birim hacim başına düşen hareketli yük taşıyıcılarının sayısını gösterirse, bu hacim elemanındaki hareketli yük taşıyıcılarının sayısı  $nA \Delta x$  ile verilir. Dolayısıyla, bu parçadaki  $\Delta Q$  yükü

$$\Delta Q = \text{Taşıyıcıların sayısı} \times \text{parçacık başına düşen yük} = (nA \Delta x) q$$

olarak verilir. Burada  $q$ , her bir parçacık üzerindeki yüküdür. Şayet, yük taşıyıcıları  $v_s$  hızıyla hareket ederlerse,  $\Delta t$  süresinde alacakları yol  $\Delta x = v_s \Delta t$  ile verilir. Dolayısıyla,  $\Delta Q$  yükü

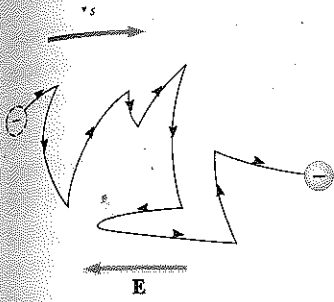
$$\Delta Q = (nA v_s \Delta t) q$$

şeklinde yazabiliriz. Bu eşitliğin her iki tarafını  $\Delta t$  ye bölersek iletkendeki akımın

$$I_{\text{or}} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = nq v_s A \quad (27.4)$$

ile verileceğini görürüz.

Yük taşıyıcılarının  $v_s$  hızı, gerçekte ortalama bir hızdır ve buna **sürüklenme hızı** denir. Sürüklenme hızının manasını anlamak için, içindeki yük taşıyıcıları elektronlar olan bir iletken düşünelim. Yalıtılmış bir iletkende bu elektronlar, gaz moleküllerinin yaptığı gibi, rasgele bir hareket yaparlar. Daha önce tartıştığımız gibi, iletkenin uçlarına bir potansiyel fark uygulandığında (diyalim bir batarya ile) iletkende bir elektrik alan oluşur. Bu alan, elektronlar üzerinde bir elektriksel kuvvet uygular ve dolayısıyla bir akım oluşur. Gerçekte elektronlar, iletken boyunca basitçe doğrusal olarak hareket etmezler. Bunun yerine, metal atomlarıyla peş peşe çarpışarak karmaşık zikzak hareketler yaparlar (Şekil 27.3). Elektronlardan metal atomlarına aktarılan enerji, atomların titreşim enerjilerinin artmasına ve dolayısıyla iletkenin sıcaklığının yükselmesine sebep olur. Fakat bu çarpışmalara rağmen, elektronlar, iletken boyunca ( $\mathbf{E}$  ye ters yönde), sürüklenme hızı  $v_s$  adı verilen bir ortalama hız ile yavaşca hareketine devam eder.

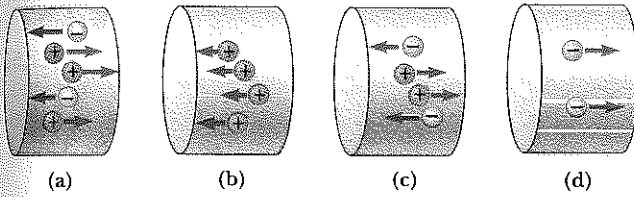


**Şekil 27.3** Bir iletken içinde elektronun zikzak hareketinin şematik bir gösterimi. Yöndeki değişimler, iletkendeki atomlarla olan çarpışmalar yüzündendir. Elektronların net hareketlerinin elektrik alanının tersi yönünde olduğuna dikkat ediniz. Zikzak yollar gerçekte parabolik kısımlardır.

İletken içinde atom-elektron çarpışmaları, etkin bir iç sürtünme (veya sürtünme kuvveti) olarak düşünülebilir. Bu durum, yün keçe ile doldurulan bir borunun içine doğru akan sıvı moleküllerinin maruz kaldığı kuvvete benzer. Çarpışma süresince, elektronlardan metal atomlarına aktarılan enerji, atomların titreşim enerjilerinin artmasına ve dolayısı ile iletkenin sıcaklığının artmasına sebep olur.

### Sınama Sorusu 27.1

Şekil 27.4 te gösterilen dört bölge içerisinde yatay olarak hareket eden pozitif ve negatif yükleri inceleyiniz. Bu dört bölgede akımı en düşükten yükseğe doğru sıralayınız.



**Şekil 27.4**

### ÖRNEK 27.1 Bakır Teldeki Sürüklenme Hızı

Binalarda kullanılan tipik bir 12 ayar bakır tel  $3,31 \times 10^{-6} \text{ m}^2$  kesit alanına sahiptir. Şayet bakır tel 10,0 A'lık akım taşırsa, elektronların sürüklenme hızı ne olur? Her bir bakır atomunun akıma bir serbest elektron ile katkıda bulunduğunu kabul ediniz. Bakırın yoğunluğu  $8,95 \text{ g/cm}^3$  tür.

**Çözüm** Ek C'deki periyodik tablodan bakırın molar kütesini  $63,5 \text{ g/mol}$  olarak buluruz. Herhangi bir maddenin 1 molü Avagadro sayısı ( $6,02 \times 10^{23}$ ) kadar atom ihtiva eder. Bakırın yoğunluğunu bildiğimizden bakırın  $63,5 \text{ g}$ 'ının kapladığı hacmi hesaplayabiliriz.

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

Her bir bakır atomu akıma bir serbest elektron ile katkıda bulunduğu için,

$$n = \frac{6,02 \times 10^{23} \text{ elektron}}{7,09 \text{ cm}^3} (1,00 \times 10^6 \text{ cm}^3/\text{m}^3) \\ = 8,49 \times 10^{28} \text{ elektron/m}^3$$

şeklinde elde ederiz. Eşitlik 27.47'den sürüklenme hızı

$$v_s = \frac{I}{nqA}$$

olarak buluruz. Burada  $q$  elektron başına yükün mutlak değeridir. Sonuç olarak

$$v_s = \frac{I}{nqA} \\ = \frac{10,0 \text{ C/s}}{(8,49 \times 10^{28} \text{ m}^{-3})(1,60 \times 10^{-19} \text{ C})(3,31 \times 10^{-6} \text{ m}^2)} \\ = 2,22 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

olur.

**Alıştırma** Şayet bakır tel 80,0 mA lik akım taşırsa, 10,0 dakikada bakır telin verilen kesit alanından ne kadar elektron akar?

**Cevap**  $3,0 \times 10^{20}$  elektron

Örnek 27.1, sürüklenme hızlarının oldukça küçük olduğunu gösteriyor. Mesela  $2,46 \times 10^{-4}$  m/s hızıyla hareket eden elektronlar 1 m yol almak için yaklaşık 68 dakika geçmesi gerekir. Hız bu kadar küçük olunca, düğmeye basılır basılmaz ışığın nasıl hemen yandığını merak ediyor olabilirsiniz. Bir iletkende, serbest elektronları sürükleyen elektrik alan, iletken boyunca ışık hızına yakın bir hızla hareket eder. Böylece, ışık düğmesine bastığınızda, tel içerisinde elektronların harekete başlaması için gerekli mesaj (elektrik alan)  $10^8$  m/s mertebesinde bir hızla ulaşır.

## 27.2 DİRENÇ VE OHM KANUNU

13.3 Bölüm 24'te, bir iletken içinde elektrik alan olamayacağını bulmuştuk. Bununla beraber, bu ifade *ancak* iletkenin statik dengede olması halinde doğrudur. Bu bölümün amacı, iletken içinde yüklerin hareket etmesine izin verilmesi halinde neler olacağını anlamaktır.

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  $J$  **akım yoğunluğu**, birim alan başına düşen akım olarak tanımlanır.  $I = nqv_s A$  olduğundan, akım yoğunluğu,

$$J \equiv \frac{I}{A} = nqv_s \quad (27.5)$$

ile verilir. Burada  $J$ , SI da  $A/m^2$  birimindedir. Bu ifade sadece, akım yoğunluğunun düzgün ve yüzeyin akım yönüne dik olması halinde geçerlidir. Genelde akım yoğunluğu *vektörel bir niceliktir*. Yani,

$$\mathbf{J} = nq\mathbf{v}_s \quad (27.6)$$

dir. Bu tanımdan bir daha anlıyoruz ki; akım yoğunluğu da, akım gibi pozitif yük taşıyıcılar söz konusu iken yüklerin hareketi yönünde, negatif yük taşıyıcılar söz konusu iken yüklerin hareketinin aksi yönündedir.

Bir iletkenin uçları arasına bir potansiyel farkı uygulanırsa, iletken içinde bir  $J$  akım yoğunluğu ve bir  $E$  elektrik alanı meydana gelir. Şayet potansiyel farkı sabitse, iletken içindeki akım da sabit olacaktır. Bazı maddelerde akım yoğunluğu, elektrik alanla doğru orantılıdır. Yani,

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (27.7)$$

şeklinde. Buradaki  $\sigma$  orantı katsayısına iletkenin **iletkenliği** adı verilir.<sup>1</sup> Eşitlik 27.7 ye uyan maddelere, Georg Simon Ohm (1787-1854) ismine izafeten **Ohm kanununa** uydukları söylenir. Daha özel olarak, ohm kanunu;

bir çok madde için (ki buna çoğu metaller dahildir) akım yoğunluğunun elektrik alana oranının sabit ( $\sigma$ ) olduğunu söyler. Bu sabit, akımı üreten elektrik alandan bağımsızdır.

Ohm kanununa uyan, dolayısıyla  $E$  ile  $J$  arasında lineer (doğrusal) bir ilişki gösteren maddelerin *omik* (*ohmic*) oldukları söylenir. Bütün maddelerin bu özelliğe sahip olmadığı deneysel olarak bulunabilir. Ohm kanununa uymayan

<sup>1</sup> İletkenlikle aynı sembolle gösterilen  $\sigma$  yüzey yük yoğunluğunu karıştırmayınız

Akım yoğunluğu

Ohm Kanunu

maddelere *omik olmayan* maddeler denir. Ohm kanunu doğanın temel bir kanunu *değildir*; fakat sadece belli maddeler için geçerli olan deneysel bir bağıntıdır.

### Sınama Sorusu 27.2

Telin bir ucundan diğer ucuna doğru derece, derece daha küçük olan bir kesit alanına sahip akım taşıyan omik bir metal tel düşününüz. Sürüklenme hızı, akım yoğunluğu ve elektrik alan tel boyunca nasıl değişir? Yükler her hangi bir noktada toplanmadığı için, akımın, telin her yerinde aynı değere sahip olması gerektiğini kabul ediniz.

Ohm kanununun pratik uygulamalarda daha kullanışlı bir biçimi, Şekil 27.5 te görüldüğü gibi,  $A$  kesitine ve  $\ell$  boyuna sahip doğrusal bir tel parçasının incelenmesinden elde edilebilir. Telin uçlarına, telde bir elektrik alan ve akım meydana getiren bir  $V_b - V_a$  potansiyel farkı uygulanır. Teldeki elektrik alanın düzgün olduğu kabul edilirse,  $\Delta V = V_b - V_a$  potansiyel farkı elektrik alanı ile<sup>2</sup>

$$\Delta V = E\ell$$

şeklinde bağlıdır. Bu yüzden akım yoğunluğunun büyüklüğü

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

şeklinde ifade edilebilir.  $J = I/A$  olduğundan, potansiyel farkı

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

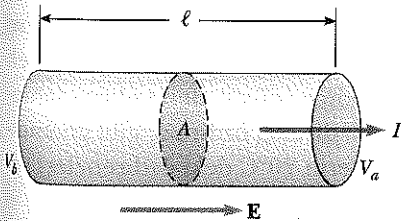
olarak yazılabilir. Burada  $\ell/\sigma A$  niceliğine iletkenin  **$R$  direnci** adı verilir:

$$R \equiv \frac{\ell}{\sigma A} \equiv \frac{\Delta V}{I} \quad (27.8)$$

Bir iletkenin direnci

Bu sonuçtan anlaşılacağı üzere, direnç SI de amper başına volt birimine sahiptir. Amper başına 1 volt, bir **ohm** ( $\Omega$ ) olarak tanımlanır:

$$1 \Omega \equiv \frac{1 \text{ V}}{1 \text{ A}} \quad (27.9)$$

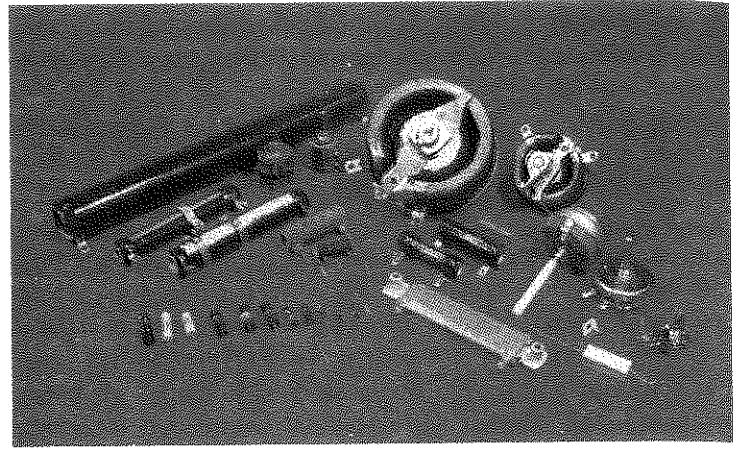


**Şekil 27.5** Kesit alanı  $A$  olan ve boyu  $\ell$  olan bir iletken. İletkenin uçları arasında uygulanan  $V_b - V_a$  potansiyel farkı, iletkende bir  $E$  elektrik alanı meydana getirir ve bu da bir akım oluşturur. Dolayısıyla teldeki akım, potansiyel farkı ile orantılıdır.

<sup>2</sup> Bu sonuç, potansiyel farkının

$$V_b - V_a = - \int_a^b \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = E \int_0^\ell dx = E\ell$$

sonucundan elde edilir.



Elektrik devrelerinde kullanılan direnç çeşitleri (Henry Leap ve Jim Lehman'ın izniyle)

Yani bir iletkenin uçları arasındaki bir voltluk bir potansiyel farkı, 1 A'lık bir akıma sebep olursa iletkenin direnci  $1 \Omega$  olur. Örneğin, 120 V'lık bir kaynağa bağlı elektrik aleti, 6 A'lık bir akım taşırsa, bu aletin direnci  $20 \Omega$  dur.

Eşitlik 27.8'in ( $\Delta V = \mathcal{E}/\sigma A$ ) potansiyel farkı için çözümü, bölüm başındaki resim kısmını açıklar; yüksek voltajlı tellere konan kuşlar neden yanmaz? Toprakla teller arasında yüzbinlerce volt potansiyel farkı olsa bile, kuşun ayakları arasında çok küçüktür (kuştan ne kadar akım geçeceği hesaplanabilir).

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

Özdirenç

$$\rho \equiv \frac{1}{\sigma} \quad (27.10)$$

Bu tanım ve (27.8) Eşitliğinden, düzgün bir blok halindeki maddenin direnci

Düzgün bir maddenin direnci

$$R = \rho \frac{\ell}{A} \quad (27.11)$$

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  $20^\circ\text{C}$  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.

Eşitlik 27.11'den anlaşılıyor ki, silindirik bir iletkenin direnci, boyuyla doğru orantılı, dik kesit alanı ile ters orantılıdır. Buna göre telin boyu ikiye katlanırsa, direnci ikiye katlanır. Hatta, kesit alanı ikiye katlanırsa, direnci ya-

<sup>3</sup> Aynı sembolle gösterilen özdirençle kütle yoğunluğunu veya yük yoğunluğunu karıştırmayın.



TABLO 27.1 Çeşitli Malzemelerin Özdirenci ve Özdirencin Sıcaklık Katsayıları

Malzeme	Özdirenc ( $\Omega \cdot m$ )	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)	$75 \times 10^{16}$	

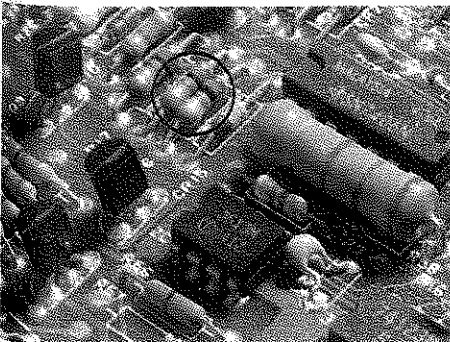
<sup>a</sup> Bütün değerler 20 °C dedir.

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

nya düşer. Bu durum, bir boru boyunca sıvının akışına benzer. Borunun uzunluğu arttığında, sıvı akışkana mukavemet artar. Borunun dik kesit alanı artırılırsa, sıvı daha hızlı nakledilir.

Bir çok elektrik devresinde, devrenin çeşitli kısımlarındaki akım seviyesini kontrol etmek için **rezistans** adı verilen aygıt kullanılır. Rezistansların iki yaygın tipi, karbon ihtiva eden "*kompozit*" rezistans (ki bu bir yarıiletkenlerdir), bobin şeklinde sarılan *tel sargılı rezistans*'dır. Dirençlerin ohm cinsinden değerleri, Şekil 27.6 de gösterildiği gibi, genelde renk kodlu olarak verilir. Renk kodlarını, belirli direnç değerlerine Tablo 27.2 yi kullanarak çevirebilirsiniz.

Bakır gibi omik maddeler, uygulanan geniş bir voltaj aralığında lineer bir akım-voltaj ilişkisine sahiptirler (Şekil 27.7a).  $I$ 'nın  $\Delta V$ 'ye göre çizilen eğrisinin doğrusal bölgedeki eğimi,  $1/R$  için bir değer verir. Omik olmayan maddeler doğrusal olmayan bir akım-voltaj ilişkisine sahiptir. Çok kullanılan yarıilet-

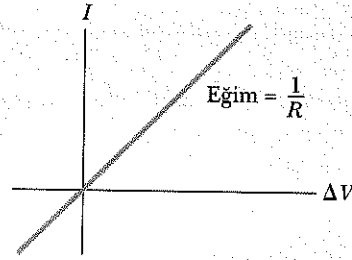


**Şekil 27.6** Bir direnç üzerindeki renkli bantlar, bu direncin değerinin belirlenmesinde kullanılan kodları gösterir. İlk iki renk, direnç değerindeki ilk iki rakamı verir. Üçüncü renk, direnç değerindeki çarpanı on'un üssü olarak temsil eder. Son renk ise direnç değerinin toleransıdır. Bir örnek olarak, 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.)

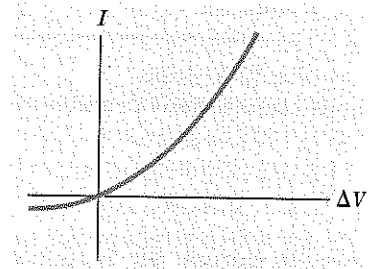


TABLO 27.2 Dirençler İçin Renk Kodu

Renk	Sayı	Çarpan	Tolerans
Siyah	0	1	
Kahverengi	1	$10^1$	
Kırmızı	2	$10^2$	
Turuncu	3	$10^3$	
San	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



(a)



(b)

**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.

ken bir aygıt olan *diyodda*,  $I$ 'nın  $\Delta V$ 'ye göre eğrisi (karakteristiği) doğrusal değildir (Şek. 27.8b). Bu aygıtın etkin direnci ( $I$ - $V$  eğrisinin eğimiyle ters orantılıdır), bir yöndeki akım (pozitif  $\Delta V$ ) için büyük ters yöndeki akım (negatif  $\Delta V$ ) için küçüktür. Aşında, transistör gibi en modern elektronik aygıtlar, lineer olmayan akım-voltaj ilişkileri ne sahiptirler. Bunlarda Ohm kanunu geçerli olmaz.

### Sınama Sorusu 27.3

Şekil 27.7b deki eğri çizginin eğimi neyi temsil eder?

### Sınama Sorusu 27.4

Patronunuz sizden düşük dirençli otomobil aküsü için ara kablo tasarlamasını istiyor. Eş. 27.11'e bakarak tasarımınızda hangi etmenleri göz önünde bulundurursunuz?

**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:

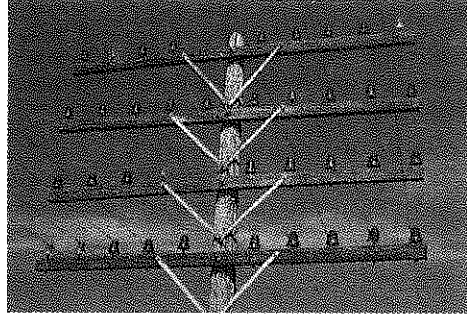
$$R = \rho \frac{\ell}{A} = (2,82 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}) \left( \frac{0,100 \text{ m}}{2,00 \times 10^{-4} \text{ m}^2} \right) = 1,41 \times 10^{-5} \Omega$$

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)

**ÖRNEK 27.3** Nikrom Telin Direnci

(a) Yarıçapı 0,321 mm olan 22 ayar bir nikrom telin birim uzunluğu başına düşen direncini hesaplayınız.

**Çözüm** Bu telin kesit alanı

$$A = \pi r^2 = \pi (0,321 \times 10^{-3} \text{ m})^2 = 3,24 \times 10^{-7} \text{ m}^2$$

Nikromun öz direnci  $1,5 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$  dir (Tablo 27.1). Böylece birim uzunluk başına düşen direnci bulmak için 27.11 Eşitliğini kullanabiliriz:

$$\frac{R}{\ell} = \frac{\rho}{A} = \frac{1,5 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}}{3,24 \times 10^{-7} \text{ m}^2} = 4,6 \Omega/\text{m}$$

(b) Bu nikrom telin 1 m'lik kısmına 10 V luk bir potansiyel farkı uygulanırsa telden geçen akım ne olur?

**Çözüm** Bu telin 1 m'si  $4,6 \Omega$  luk dirence sahip olduğundan, 27.8 Eşitliğinden

$$I = \frac{\Delta V}{R} = \frac{10 \text{ V}}{4,6 \Omega} = 2,2 \text{ A}$$

bulunur.

Nikrom telin direncinin bakır telinkinden hemen hemen 100 kere daha büyük olduğuna dikkat ediniz (Tablo 27.1). Dolayısıyla, aynı çaplı bir bakır tel, birim uzunluk başına sadece  $0,052 \Omega/\text{m}$  lik bir dirence sahip olacaktır. Aynı yarıçaplı bakır telin 1 m lik kısmı, sadece 0,11 V luk bir voltaj uygulanmasıyla, aynı akımı (2,2 A) taşıyacaktır.

Yüksek öz direncinden ve oksitlenmeye mukavemetinden dolayı nikrom, tost makinaları, ütüler ve elektrik satıcılarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

**Alıştırma** 6 m uzunluğundaki 22 ayar nikrom telin direnci ne kadardır? Bu, 120 V luk bir kaynağa bağlandığında ne kadar akım taşır?

**Cevap**  $28 \Omega$  ; 4,3 A

**Alıştırma** 2,2 A akım taşıdığını farz ederek telin içindeki elektrik alanını ve akım yoğunluğunu hesaplayınız.

**Cevap**  $6,8 \times 10^6 \text{ A/m}^2$  ;  $10 \text{ N/C}$

**ÖRNEK 27.4** Koaksiyel Kablonun Radyal Direnci

Koaksiyel kablolar, kablolu TV ve diğer elektronik araçlarda yaygın olarak kullanılır. Koaksiyel kablo, iki silindirik iletkenin ibarettir. İletkenlerin arasındaki boşluk, Şekil 27.8a da görüldüğü gibi, silisyumla tamamen doldurulmuştur ve silisyum içinde kaçak akım bulunması isten-

mez. (Akım, kablo boyunca geçecek şekilde tasarlanır). Tüpün iç yarıçapı  $a = 0,5 \text{ cm}$  dış yarıçapı  $b = 1,75 \text{ cm}$  ve boyu  $L = 15,0 \text{ cm}$  dir. İki iletken arasında ölçüm yapıldığında silisyumun direnci ne olur?

**Çözüm** Bu tip problemlerde, iletkeni küçük  $dr$  kalınlıklı elemanlara bölmeliyiz. O zaman, eşmerkezli,  $dr$  kalınlıklı elemanların direncini hesaplamak kolay olur (Şekil 27.8b). Eşitlik 27.11 in diferensiyel biçimi ile çözüme başlayabiliriz. Uzunluk değişkeni  $\ell$  değil de  $r$  olsun. O zaman:  $dR = \rho dr/A$  olur. Burada  $dR$ , alanı  $A$ , kalınlığı  $dr$  olan silisyum iletken parçasının direncidir. Bu örnekte Şekil 27.8'de görüldüğü gibi, eleman olarak  $dr$  et kalınlığında ve  $L$  boyunda bir oyuk silindir aldık. İç iletkenin dış iletkene geçen herhangi bir akım, böyle "elemanlardan da geçmelidir; bu geçişte söz konusu olan (geçilen) alan  $A = 2\pi rL$  dir. (Bu, alt ve üst alanlar ihmal edilmek suretiyle silindirin yüzey alanı olacaktır.) Böylece, silisyumlu oyuk silindirin direncini

$$dR = \frac{\rho}{2\pi rL} dr$$

şeklinde yazabiliriz. Silisyumun toplam direncini bilmek is-

tediğimizden, bu ifadenin  $r = a$  dan  $r = b$  ye kadar  $dr$  üzerinden integral almalıyız: Bu da

$$R = \int_a^b dR = \frac{\rho}{2\pi L} \int_a^b \frac{dr}{r} = \frac{\rho}{2\pi L} \ln\left(\frac{b}{a}\right)$$

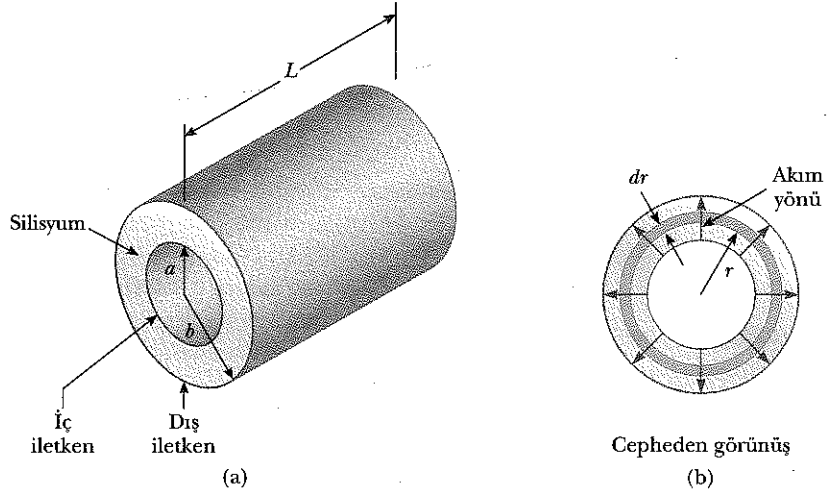
olur. Verilen değerleri yerine koyarak ve silisyum için  $\rho = 640 \Omega \cdot m$  kullanarak

$$R = \frac{640 \Omega \cdot m}{2\pi (0,150 \text{ m})} \ln\left(\frac{1,75 \text{ cm}}{0,500 \text{ cm}}\right) = 851 \Omega$$

elde edilir.

**Alıştırma** İç ve dış bakır tüpler arasına 12,0 V luk bir potansiyel farkı uygulandığında, bunlar arasından geçecek toplam akım ne olur?

**Cevap** 14,1 mA.



**Şekil 27.8** Bir koaksiyel kablo. (a) Silisyum iki iletken arasındaki boşluğu doldurur. (b) cepheden bakış, akım kaçığını göstermektedir.

## 27.3

## ELEKTRİKSEL İLETKENLİK İÇİN BİR MODEL

Bu kesimde, ilk defa Paul Drude tarafından 1900 yılında önerilen metalde elektriksel iletkenliğin klasik bir modelini tanımlıyoruz. Bu model bizi Ohm kanununa götürür ve öz direncin, metaldeki elektronların hareketleriyle ilişkili olabileceğini gösterir. Drude modelinin sınırlamaları olsa da, o hala çok ayrıntılı incelemeler için bile fikir verir.

Bir iletkenin, serbest elektronlar (bazen *iletkenlik* elektronları da denir) ve düzgün sıralanmış atomlar oluştuğunu düşünelim. İletkenlik elektronları, atomlar henüz katı oluşturmamışken kendi atomlarına bağlı oldukları halde, serbest atomlar katı oluşturduklarında, elektronlar bir mobilite (hareketlilik)

kazanırlar. Serbest elektronlar, elektrik alanı yokken iletken içinde  $10^6$  büyüklüğünde ortalama hızlarla rasgele yönlerde hareket ederler. Bu durum, bir kaba kapatılmış gaz moleküllerinin hareketine benzemektedir. Esasen, bazı bilim adamları metaldeki iletkenlik elektronlarına *elektron gazı* demektedirler. Elektriksel alan yokken, serbest elektronların sürüklenme hızı sıfır olduğundan, iletkende akım olamayacağına dikkat edilmelidir. Yani, ortalama olarak bir yönde ne kadar elektron hareket ediyorsa, aksi yönde de o kadar elektron hareket eder ve böylece net bir yük akışı olmaz.

Bir elektrik alan uygulandığında durum değişmektedir. Serbest elektronlar, burada anlatılan rastgele ısı (termal) harekete ilaveten, elektrik alanın zıt yönünde ortalama bir sürüklenme hızıyla ( $v_s$ ) yavaşça sürüklenirler. Bu sürüklenme hızı (tipik olarak  $10^{-4}$  m/s), çarpışmalar arasındaki ortalama hızdan (tipik olarak  $10^6$  m/s) çok küçüktür.

Şekil 27.9, bir iletkendeki serbest elektronların hareketinin kaba bir tanımını vermektedir. Elektrik alan yokken, bir çok çarpışma sonucunda net bir yer değiştirme olmaz (Şekil 27.9a).  $E$  elektrik alanı bu rasgele hareketi değiştirir ve elektronların  $E$  ye zıt yönde sürüklenmelerine sebep olur (Şekil 27.9b). Şekil 27.9b de görülen yollardaki hafif kavis, uygulanan elektrik alanın çarpışmalar arasında elektrona kazandırdığı ivmeden kaynaklanmaktadır.

Modelimizde, elektronun çarpışmadan sonraki hareketinin çarpışmadan önceki hareketine bağlı olmadığını kabul edeceğiz. Bunun yanında, elektrik alandaki elektronlar tarafından kazanılan fazla enerjinin çarpışmalarla iletken verildiğini de kabul edeceğiz. Çarpışmalarla atomlara verilen enerji, atomların titreşim enerjilerini artırır. Böylece ekmek kızartma aleti ve diğer benzerlerinde olduğu gibi iletkenin ısınmasına sebep olur.

Şimdi sürüklenme hızı için bir ifade elde edebilecek durumundayız. Yüklü  $q(-e)$ , kütlesi  $m_e$  olan hareketli bir elektron,  $E$  elektrik alanında bulunduğu bir  $F = qE$  kuvvetine maruz kalır.  $\Sigma F = m_e a$  olduğundan parçacığın ivmesi

$$a = \frac{qE}{m_e} \quad (27.12)$$

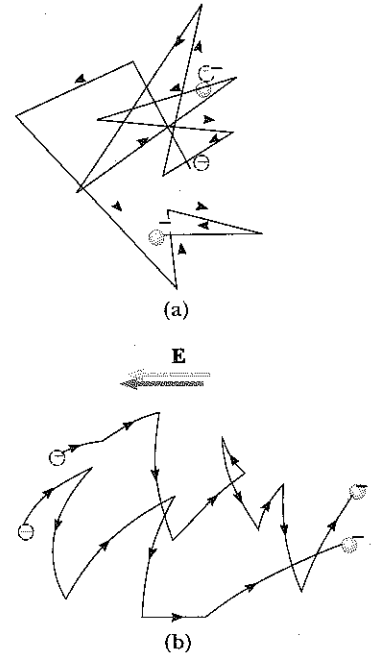
ile verilir. Bu ivme sadece çarpışmalar arasındaki çok kısa zaman için söz konusu olup, elektrona küçük bir sürüklenme hızı kazandırabilir. Şayet  $t$ , son çarpışmadan geçen zaman,  $v_i$  ilk hız ise,  $t$  zaman sonunda elektronun hızı

$$v = v_i + at = v_i + \frac{qE}{m_e} t \quad (27.13)$$

ile verilir. Şimdi, bütün mümkün zamanlar ( $t$ ) ve bütün mümkün  $v_i$  değerleri üzerinden  $v$  ortalama değerini alalım. Şayet ilk hızların uzayda rastgele olarak dağıldıklarını farz edersek,  $v_i$  ortalama değerinin sıfır olacağını görürüz.  $(qE/m_e)t$  terimi, atomlar arasındaki hareket sonunda alan tarafından kazandırılan ilave hızdır. Şayet elektron sıfır hızıyla başlarsa, 27.13 eşitliğinin ikinci teriminin ortalama değeri  $(qE/m_e)\tau$  olur; burada  $\tau$  *çarpışmalar arasındaki ortalama zamandır*.  $v_s$  nin ortalaması, sürüklenme hızına eşit olduğundan<sup>4</sup>

$$v = v_s = \frac{qE}{m_e} \tau \quad (27.14)$$

elde ederiz.



**Şekil 27.9** (a) Elektriksel alan yokken, bir iletkendeki yük taşıyıcının rastgele hareketlerinin şematik bir diyagramı. Sürüklenme hızı sıfırdır. (b) Elektriksel alan varken, bir iletkenindeki yük taşıyıcının hareketi. Rastgele hareketin, alan tarafından değiştirildiğine ve yük taşıyıcının bir sürüklenme hızına sahip olduğuna dikkat ediniz.

Sürüklenme hızı

<sup>4</sup> Çarpışma işlemi rastgele olduğundan, her bir çarpışma olayı daha önce olanlardan bağımsızdır. Bu bir zar atışı işleminin rastgeleliği ile kıyaslanabilir. Bir atışta belli bir sayının gelme ihtimali, daha önceki atışın sonucundan bağımsızdır. Herhangi bir keyfi zamandan başlamak suretiyle o sayının gelmesi, ortalama olarak, zarın altı kere atılmasını gerektirir.

Sürüklenme hızının bu ifadesini, iletken içindeki akım ile ilişkilendirebiliriz. 27.14 Eşitliğini 27.6 Eşitliğinde kullanarak, akım yoğunluğu büyüklüğünün

Akım yoğunluğu

$$J = nqv_s = \frac{nq^2 E}{m_e} \tau \quad (27.15)$$

ile verilebileceğini buluruz. Burada  $n$  birim hacimdeki yük taşıyıcıların sayısıdır. Bu ifade  $J = \sigma E$  ile verilen Ohm yasası ile kıyaslanırsa iletkenlik ve öz direnç için aşağıdaki bağıntıları elde ederiz:

İletkenlik

$$\sigma = \frac{nq^2 \tau}{m_e} \quad (27.16)$$

Özdirenç

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{m_e}{nq^2 \tau} \quad (27.17)$$

Bu klasik modele göre, iletkenlik ve öz direnç, elektrik alanına bağlı değildir. Bu özellik, Ohm yasasına uyan bir iletkenin ayırt edici özelliğidir.

Çarpışmalar arasındaki ortalama zaman  $\tau$ , çarpışmalar arası ortalama mesafesi  $\ell$  (ortalama serbest yol, bak. Bölüm 21.7) ve ortalama sürate ( $\bar{v}$ )

$$\tau = \frac{\ell}{\bar{v}} \quad (27.18)$$

ifadesi ile bağlıdır.

### ÖRNEK 27.5 Bir Telde Elektron Çarpışmaları

(a) Örnek 27.1 in veri ve sonuçları ile klasik elektron iletim modelini kullanarak, 20 °C deki bakırda elektronların çarpışmaları arasındaki ortalama zamanı bulunuz.

**Çözüm** 27.17 Eşitliğinden

$$\tau = \frac{m_e}{nq^2 \rho}$$

olduğunu görürüz. Burada bakır için  $\rho = 1,7 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$  ve 27.1 örneğinde verilen tel için taşıyıcı yoğunluğu  $n = 8,49 \times 10^{28}$  elektron/ $m^3$  tür. Bunlar yukarıdaki bağıntıda kullanılırsa

$$\tau = \frac{(9,11 \times 10^{-31} \text{ kg})}{(8,49 \times 10^{28} \text{ m}^{-3})(1,60 \times 10^{-19} \text{ C})^2 (1,7 \times 10^{-8} \Omega \cdot m^2)}$$

$$= 2,5 \times 10^{-14} \text{ s}$$

olarak bulunur.

(b) Bakırda serbest elektronlar için ortalama termal süratin  $1,6 \times 10^6$  m/s olduğunu kabul ederek ve (a)'da bulunan sonucu kullanarak, bakırdaki elektronlar için ortalama serbest yolu hesaplayınız.

**Çözüm**

$$\ell = \bar{v} \tau = (1,6 \times 10^6 \text{ m/s}) (2,5 \times 10^{-14} \text{ s}) = 4,0 \times 10^{-8} \text{ m}$$

ki bu 40 nm'ye denktir. (0,2 nm dolayındaki atomlar arası mesafeyle kıyaslayın). Sonuç olarak, çarpışmalar arasındaki zaman çok kısa olmasına rağmen, elektronlar bir atoma çarpışmadan önce, atomlar arası mesafenin hemen, hemen 200 katı kadar yol giderler.

İletkenliğin bu klasik modeli Ohm Yasası ile uyuşmasına rağmen, bazı önemli olayları açıklamakta yeterli değildir. Örneğin, ideal gaz modeli kullanarak  $\bar{v}$  için yapılan klasik hesaplamalar, doğru değerlerden (Bak Bölüm 21.6) 10 kere kadar daha düşük sonuçlar vermektedir. Ayrıca, 27.17 Eşitliğinde  $\tau$  yerine  $\ell / \bar{v}$  alarak payı yeniden düzenlersek paya  $\bar{v}$  geldiği görülür ki, öz direncin  $\bar{v}$  ile orantılı olduğunu görürüz. İdeal-gaz modeline göre  $\bar{v}$ ,  $\sqrt{T}$  ile orantılıdır, öyleyse  $\rho \propto \sqrt{T}$  doğru olmalıdır. Bu saf metaller için, öz direncin sıcaklıkla bağımlılığının lineer oluşu ile uyuşmamaktadır. Bu gözlemler sadece kuantum mekanik model kullanılarak hesaba katılabilir. Bu modeli özetle anlatacağız.

Kuantum mekaniğine göre, elektronlar dalga benzeri özelliklere sahiptirler. Sayet, atomların sırası düzgün aralıklı (yani, periyodik) ise, elektronların dalga benzeri karakteri onların iletken boyunca serbestçe hareket etmelerini ve bir atomla çarpışmasının söz konusu olmamasını mümkün kılar. İdealleştirilmiş bir iletkende çarpışma olmayacak, ortalama serbest yol sonsuz olacak ve direnç de sıfır olacaktır. Elektron dalgaları sadece atomik dizilişlerin düzensiz (periyodik olmaması) olması halinde yapısal kusurlar ve safsızlıkların varlığı sonucu saçılırlar. Düşük sıcaklıklarda, metallerin öz direncine elektronla safsızlıklar arasındaki çarpışmaların sebep olduğu saçılmaların katkısı baskın olur. Yüksek sıcaklıklardaki öz dirence, termal uyarma sonucu sürekli yer değiştiren iletken atomlar ile elektronlar arasındaki çarpışmaların sebep olduğu saçılmaların katkısı baskın olur. Atomların termal hareketleri (durgun olan atomik sıralamalara kıyasla) yapının düzensiz olmasına yol açar ve bunun sonucu olarak da elektronun ortalama serbest yolu kısalmır.

## 27.4 DİRENÇ VE SICAKLIK

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

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

$\rho$ 'nın sıcaklıkla değişimi

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

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

Öz direncin sıcaklık katsayısı

şeklinde de ifade edilebilir. Burada  $\Delta\rho = \rho - \rho_0$  ve  $\Delta T = T - T_0$  sıcaklık aralığındaki 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

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

olarak yazılabilir. Hassas sıcaklık ölçümleri için, aşağıdaki örnekte görüldüğü üzere, bu özelliği kullanmak uygun değildir.

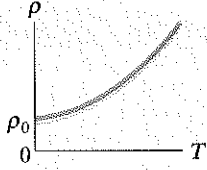
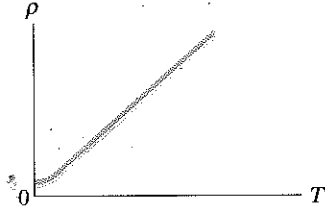
### ÖRNEK 27.6 Platin Dirençli Termometre

Platinden yapılmış bir direnç termometresi  $20^{\circ}\text{C}$  de  $50,0\ \Omega$  luk bir dirence sahiptir. Termometre, erimiş indiyum ihtiva eden bir kaba daldırıldığında, direnci  $76,8\ \Omega$ 'a çıkmaktadır. Bu bilgilerden indiyumun erime noktasını bulunuz. Platin için  $\alpha = 3,92 \times 10^{-3}\ (^{\circ}\text{C})^{-1}$ .

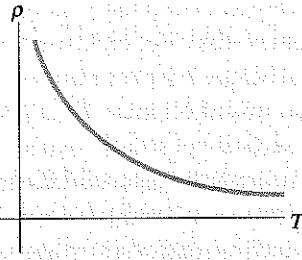
$$\Delta T = \frac{R - R_0}{\alpha R_0} = \frac{76,8\ \Omega - 50,0\ \Omega}{[3,92 \times 10^{-3}\ (^{\circ}\text{C})^{-1}](50,0\ \Omega)} = 137^{\circ}\text{C}$$

elde ederiz.  $\Delta T = T - T_0$  ve  $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$  olduğundan  $T = 157^{\circ}\text{C}$  buluruz.

**Çözüm** 27.21 Denklemini  $\Delta T$  için çözersek,



**Şekil 27.10** Bakır gibi bir metal için sıcaklığa karşı öz direnç. Eğri, sıcaklığın geniş bir aralığında doğrusaldır ve sıcaklık arttıkça  $\rho$  artmaktadır.  $T$  nin mutlak sıfıra ulaşmasıyla, öz direnç sonlu bir  $\rho_0$  değerine ulaşır.



**Şekil 27.11** Silisyum ve Germanyum gibi saf bir yarıiletken için öz direncin sıcaklıkla değişimi.

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 öz direnç mutlak sıfır yakınında genellikle, sonlu bir değere yaklaşır. Mutlak sıfır civarındaki bu artık öz direncin sebebi, elektronların metaldeki safsızlıklar ve kusurlarla olan çarpışmalarıdır. Halbuki, yüksek sıcaklık öz direncinde (lineer bölge) ise, esas olarak elektronların metal atomlarıyla çarpışmaları baskındır.

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

Bir yarıiletkenindeki yük taşıyıcılar genellikle safsızlık ortamlarına ait olduklarından, öz direnç bu tür safsızlıkların konsantrasyonu ve tipine çok duyarlıdır. Yarıiletkenlerin incelenmesine, kitabın ilerdeki kısımlarında (Bölüm 43 te) yeniden döneceğiz.

### Sinama Sorusu 27.5

Elektrik ampulü açıldıktan sonra, ne zaman daha fazla akım taşır? Filemanın kızarıklığının arttığı ilk anda mı yoksa kızarıklığın birkaç milisaniye sonra kararlı bir hale geldikten sonra mı?

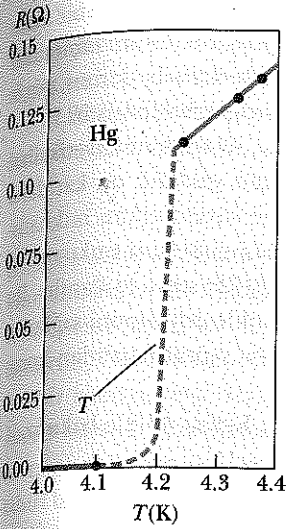
### Seçmeli Kesim

## 27.5 SÜPER-İLETKENLER

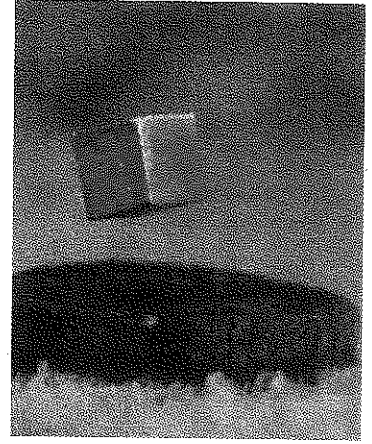
Bir takım metal ve bileşikler var ki, bunların dirençleri *kritik sıcaklık* denilen belli bir  $T_c$  sıcaklığının altında gerçekte *sıfıra* gider. Bu maddeler **süper iletkenler** olarak bilinirler. Bir süper iletkenin direnç-sıcaklık grafiği,  $T_c$  nin üzerindeki sıcaklıklarda normal bir metalinki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

Bugün binlerce süper iletken bilinmektedir. Tablo 27.3'de birkaç süper iletkenin kritik sıcaklıkları listelenmiştir. Son zamanlarda keşfedilen süperiletkenlerin kritik sıcaklıkları, başlangıçta mümkün olduğu düşünülenlerden daha yüksektir. İki çeşit süperiletken bulunmuştur. Kamerlingh-Onnes tarafından bulunan süperiletkenler metal olmalarına rağmen, çok yakın bir zaman





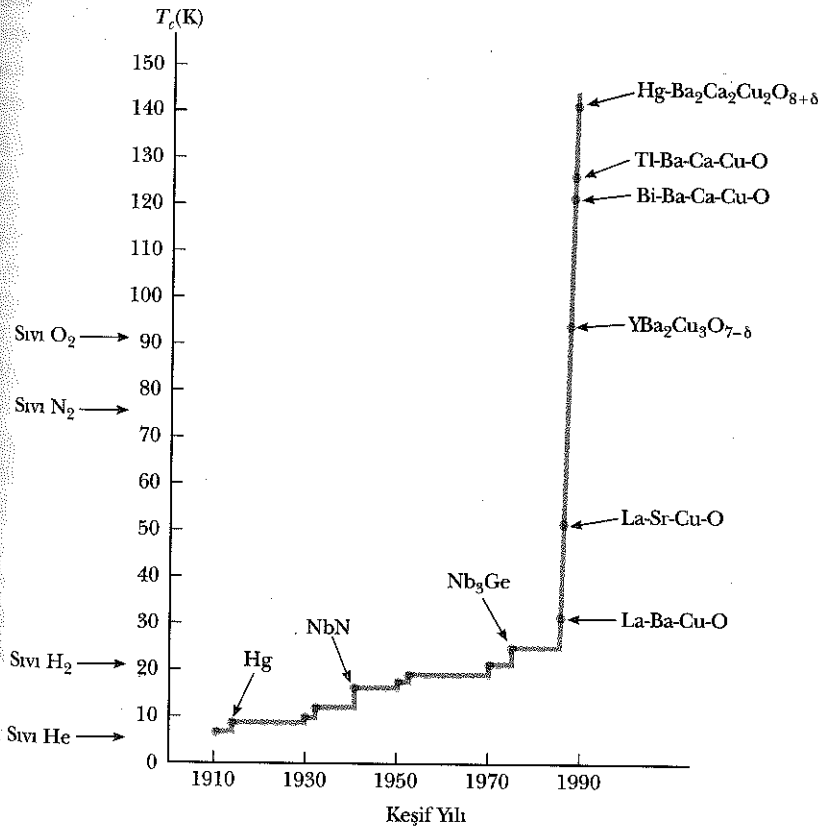
**Şekil 27.12** Cıvada, sıcaklığa göre direnç.  $T_c$  kritik sıcaklığının üzerinde eğri bir normal metalinki gibidir. Direnç kritik sıcaklıkta (cıva için 4,2 K dir) sıfıra düşer.



77 K de süper iletken  $YBa_2Cu_3O_7$  diski üzerinde duran küçük bir sürekli mıknatısın fotoğrafı (IBM Research Laboratuvarının izniyle)

da bulunan  $YBa_2Cu_3O_7$  seramik yapının yüksek kritik sıcaklığa sahip olduğu görülmüştür. Eğer oda sıcaklığında bir süperiletken bulunacak olursa, onun teknolojiye çok büyük katkısı olacaktır.

$T_c$  nin değeri, kimyasal bileşime, basınç ve moleküler yapıya duyarlıdır. Son derece iyi iletken olan bakır, gümüş ve altının süperiletkenlik göstermeleri ilginçtir.



**Şekil 27.13** Süperiletkenliğin keşfinden beri, kritik sıcaklığın yıllara göre gelişimi.

Süper iletkenlerin önemli özelliklerinden biri, bunlarda bir kere bir akım elde edildikten sonra, bu akımın artık *voltaj uygulanmaksızın* devam etmesidir. (Çünkü  $R = 0 \Omega$  dur). Gerçekten de, süper iletkenlerde kararlı akımın, görülebilir hiçbir azalmaya uğramadan birkaç yıl devam ettiği gözlenmiştir!

Süperiletkenliğin önemli ve yararlı bir uygulaması, içindeki manyetik alan şiddetinin, en iyi normal elektromıknatıslarınkinden yaklaşık on kat daha büyük süper iletken mıknatısların yapılmasıdır. Böyle süperiletken mıknatıslar enerji depolama aracı olarak düşünülmektedir. Süperiletken mıknatıslar, tıpta manyetik rezonans görüntüleme birimlerinde (MRI) sıkça kullanılır. Bu yöntem iç organların yüksek kalitede görüntülerinin elde edilmesini sağlar ve x-ışınları veya diğer tahrip edici radyasyonların hastayı yıpratmasından korumuş olur.

Süperiletkenlik konusuna daha ayrıntılı bilgi için Kesim 43.8'e bakınız.

## 27.6 ELEKTRİK ENERJİSİ VE GÜÇ

13.3

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.  $\text{---}| \text{---}| \text{---}$  sembolü bataryayı (veya herhangi bir doğru akım kaynağını) göstermek için kullanılır ve dirençler de  $\text{---}\text{---}\text{---}$  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 noktası olup topraklanmış (  $\text{---}\text{---}\text{---}$  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,

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

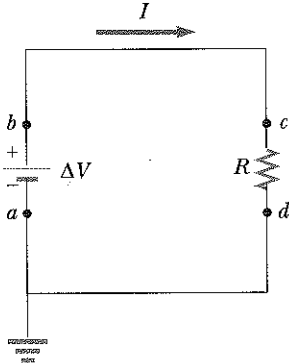
ile verilir. Burada  $I$ , devredeki akımdır. Tersine, yük bu enerjiyi bataryadan geçerken yeniden kazanır. Yükün enerji kaybetme hızı, dirençteki  $\mathcal{P}$  güç kaybına eşit (-ki bu içenerji olarak görülür-) olacağından

$$\mathcal{P} = I \Delta V$$

(27.22)

Güç

**Şekil 27.14** Potansiyel farkı  $\Delta V$  olan bir batarya ile  $R$  direncinden oluşan bir devre. Pozitif yük, bataryanın negatif ucundan pozitif ucuna doğru, saat yönünde akar.  $a$  ve  $d$  noktaları topraklanmıştır.



<sup>5</sup> Akım kararlı durum değerine ulaştığında, akımı meydana getiren yük taşıyıcısının kinetik enerjisinde zamanla değişme *olmadığına* dikkat ediniz.

olur. Bu durumda, güç dirence batarya tarafından verilmektedir. Bununla birlikte, uçları arasına  $V$  potansiyel farkı uygulanan ve  $I$  akımı taşıyan herhangi bir ağıta verilen gücü belirlemek için 27.22 Eşitliği kullanılabilir.

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

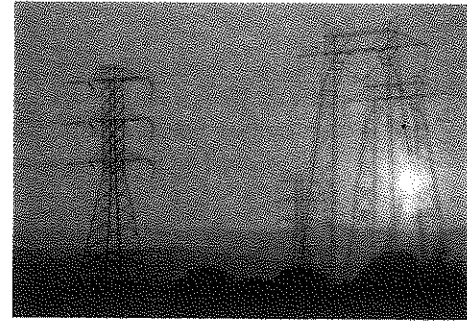
$$\mathcal{P} = I^2 R = \frac{(\Delta V)^2}{R} \quad (27.23)$$

Dirençte harcanan güç

şeklinde ifade edebiliriz. Bölüm 7'de tartıştığımız gibi  $I$  amper,  $\Delta V$  volt ve  $R$  ohm cinsinden alındığında, SI birimlerinde güç watt (w) biriminde olacaktır.  $R$  direncine sahip bir iletken ısı olarak kaybedilen güç *joule ısı*<sup>6</sup> olarak adlandırılır, fakat bundan daha ziyade  $I^2 R$  kaybı olarak söz edilir.

Bir batarya veya herhangi bir elektriksel enerji sağlayan ağıta *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 ( $I^2 R$  ye) eşittir.

Şekil 27.15 de görüldüğü gibi, güç hatları boyunca elektrik enerjisi iletilirken, kamu hizmeti veren şirketler hatlardaki iç enerjiye aktarılan güçü minimum etmenin ve tüketiciye verilen enerjiyi maksimum yapmanın yollarını ararlar. Çünkü  $\mathcal{P} = I\Delta V$  olduğundan, aynı miktar güç ya yüksek akımlar, düşük potansiyel farkları ya da düşük akımlar ve yüksek potansiyel farkları ile iletilir. Ekonomik olması açısından, bu şirketler elektrik enerjisini öncelikle düşük akımlar ve yüksek potansiyel farkları ile taşımayı tercih ederler. Bakır tel çok pahalıdır ve bu yüzden daha yüksek dirençli tel kullanmak daha ucuzdur (Yani, Eş. 27.11 de görüldüğü üzere, küçük tesir kesit alanına sahip bir tel). Böylece dirençte tüketilen güç için  $\mathcal{P} = I^2 R$  ifadesindeki telin direnci ekonomik düşüncelerden dolayı izafi olarak yüksek değerde sabit tutulur.  $I^2 R$  kaybı akımı mümkün olduğu kadar düşük tutularak azaltılabilir. Örneğin, güç 765 kV gibi büyük potansiyel farkıyla iletilir. Bir kere şehrinize ulaşan elektrik, *transformatör* denilen sistemler yardımıyla potansiyel farkı genellikle 4 kV a düşürülür. Elektrik evinize ulaşmadan önce, başka bir transformatör yardımıyla potansiyel farkı 240 V a düşürülür. Elbette ki her seferinde potansiyel farkı azalırken aynı değerde akım artar ve güç aynı kalır. Bölüm 33 te transformatörleri daha ayrıntılı olarak tartışacağız.



**Şekil 27.15** Elektrik enerjisi, yüksek potansiyel farkında iletilir (Comstock)

### Sinama Sorusu 27.6

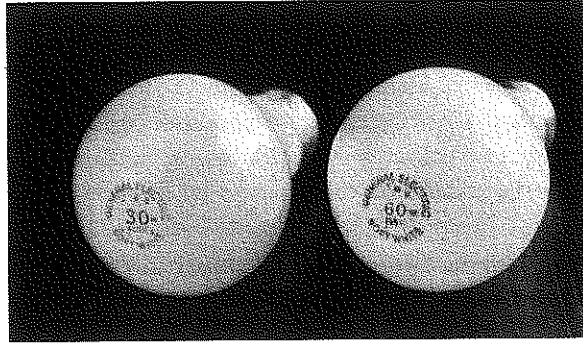
Şekil 27.16 da gösterildiği gibi iki elektrik ampulüne aynı potansiyel farkı uygulanmaktadır. Aşağıdaki durumlardan hangisi doğrudur?

- 30 W'lık ampul daha büyük dirence sahiptir ve daha büyük akım taşır.
- 30 W'lık ampul daha büyük akım taşır, fakat 60 W'lık ampul daha büyük dirence sahiptir.

### Ev Deneyi

Eğer ohmmetreniz varsa, Sinama Sorusu 27.6'nın cevabını yeteri kadar ampul üzerinde deneyerek verebilirsiniz.

<sup>6</sup> Boyutu, birim zaman başına düşen enerji olmasına rağmen, buna *Joule Isısı* denir ve bunların her iki de güç birimidir.



**Şekil 27.16** Bu ampuller sadece 120 V'luk kaynağa bağlandıkları zaman üzerlerinde yazılan kadar güç çekerler. (George Semple)

### Ev Deneyi

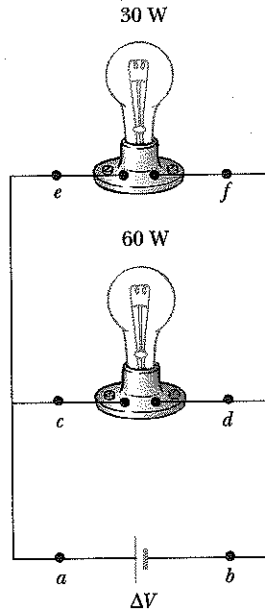
Saç kurutma makinası, televizyon ve teyp gibi ev aletlerinin üzerlerindeki yazılardan faydalanarak onların çalışmalarının maliyetini bulunuz.

c) 30 W'lık ampul daha büyük dirence sahiptir, fakat 60 W'lık ampul daha büyük akım taşır.

d) 60 W'lık ampul daha büyük dirence sahip ve daha büyük akım taşır.

### Sınama Sorusu 27.7

Şekil 27.17 de gösterilen iki ampul için f noktasından a noktasına doğru akım değerlerini en büyükten en küçüğe doğru sıralayınız.



**Şekil 27.17** İki ampul aynı potansiyel farkına sahip uçları arasında bağlanmıştır. Bu ampuller sadece 120 V'luk kaynağa bağlandıkları zaman üzerlerindeki kadar güç çekerler.

### ÖRNEK 27.7 Elektrik Isıtıcısındaki Güç

Bir elektrik ısıtıcısı, toplam direnci  $8 \Omega$  olan bir nikrom teli 120 V potansiyel farkı uygulayarak yapılmıştır. Tel vasıtasıyla taşınan akımı ve ısıtıcının harcadığı gücü bulunuz.

**Çözüm**  $\Delta V = IR$  olduğundan

$$I = \frac{\Delta V}{R} = \frac{120 \text{ V}}{8 \Omega} = 15,0 \text{ A}$$

elde edebiliriz.  $\mathcal{P} = I^2 R$  ifadesini kullanarak harcadığı gücü

$$\mathcal{P} = I^2 R = (15,0 \text{ A})^2 (8 \Omega) = 1,80 \text{ kW}$$

olarak bulabiliriz. Uygulanan potansiyel farkını iki katına çıkarırsak akım iki katına fakat güç dört katına çıkar. Çünkü  $\mathcal{P} = (\Delta V)^2 / R$  dir.

**ÖRNEK 27.8** Akşam yemeği yapmanın fiyatı

Sürekli olarak 20.0 A ve 240 V ta çalışan bir fırında 4 saatte pişirilen hindinin fiyatını tahmin ediniz.

**Çözüm** Fırın tarafından harcanan güç,

$$\mathcal{P} = I\Delta V = (20.0 \text{ A}) (240 \text{ V}) = 4800 \text{ W} = 4,80 \text{ kW tır.}$$

Tüketilen enerji, güç  $\times$  zaman olduğu için ödemeniz gereken enerjinin miktarı,

$$\text{Enerji} = \mathcal{P}t = (4,80 \text{ kW}) 4 \text{ sa} = 19.2 \text{ kWsa tır.}$$

Şayet kilowat saat başına ödenmesi gereken bedel tahmini olarak 8,00 ¢ ise

$$\text{Fiyat} = (19.2 \text{ kWsa}) (8,00 \text{ ¢}) = 1,54 \$$$

Bizim azalan enerji kaynaklarımıza talepler, elektrik cihaz-

larının cihazlarımızın enerji tüketiminin farkında olmamızı gerekli kılmıştır. Her elektrik aleti harcadığı gücün miktarını hesaplamak için ihtiyaç duyduğunuz bilgiyi ihtiva eden bir etiket taşır. Pek çok durumda, güç tüketimi tıpkı elektrik ampullerinde olduğu gibi watt biriminde doğru-  
dan belirtilir. Bunun dışındaki durumlarda, alet tarafından kullanılan akımın miktarı ve çalıştığı potansiyel farkı verilir. Bu bilgi ve Eş. 27.22 herhangi bir elektrik cihazının çalışma maliyetini hesaplamak için yeterlidir.

**Alıştırma** Şayet dağıtım şirketi elektriği 0,08 \$/kWsa olarak satıyorsa, 100 W lık bir ampulü 24 saat çalıştırmanın bedeli nedir?

**Cevap** 0,19\$.

**ÖRNEK 27.9** Elektron demetindeki akım

Bir parçacık hızlandırıcıda, elektronlar 40.0 MeV lik enerjiyle çıkıyor ( $1 \text{ MeV} = 1,60 \times 10^{-13} \text{ J}$ ). Elektronlar kararlı bir demet şeklinde çıkmazlar, fakat daha ziyade 250 atma/s lik hızlarda bir atma şeklindedirler. Bu Şekil 27.18 deki atmalar arasındaki zaman 4 ms'ye karşılık gelir. Her bir atma 200 ns durumunu muhafaza eder ve bu atmalardaki elektronlar 250 mA lik akım meydana getirir. Akım, atmalar arasında sıfırdır. (a) Atma (puls) başına hızlandırıcı tarafından ne kadar elektron çıkartılır?

**Çözüm**  $dQ = Idt$  biçimindeki 27.2 denklemini kullanarak atma (puls) başına yük miktarını bulmak için integral alırız. Atma mevcutken akım sabittir. O halde,

$$\begin{aligned} Q_{\text{atma}} &= I \int dt = I\Delta t = (250 \times 10^{-3} \text{ A}) (200 \times 10^{-9} \text{ s}) \\ &= 5,00 \times 10^{-8} \text{ C} \end{aligned}$$

elde edilir. Atma başına yük miktarını elektron yüküne bölerek atma başına elektron sayısını buluruz. Yani;

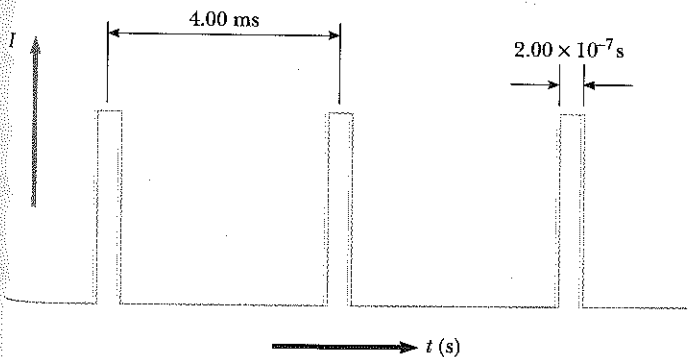
$$\begin{aligned} \text{Atma başına elektron sayısı} &= \frac{5,00 \times 10^{-8} \text{ C/atma}}{1,60 \times 10^{-19} \text{ C/elektron}} \\ &= 3,13 \times 10^{11} \text{ elektron/atma} \end{aligned}$$

(b) Hızlandırıcı tarafından oluşturulan atma başına ortalama akım nedir?

**Çözüm** Ortalama akım, Eş. 27.1'de  $I_{\text{or}} = \Delta Q / \Delta t$  şeklinde verilir. Atmalar arasındaki zaman aralığı 4,00 ms olduğuna ve (a) şikkundan atma başına yükü bildiğimize göre,

$$I = \frac{Q_{\text{atma}}}{\Delta t} = \frac{5,00 \times 10^{-8} \text{ C}}{4,00 \times 10^{-3} \text{ s}} = 12,5 \mu\text{A}$$

elde ederiz, ki bu da 250 mA dir ve sadece pik akımının %0,005'i kadardır.



**Şekil 27.18** Akımın elektron demetinin atma zamanına karşı grafiği.

(c) Elektron demeti tarafından sağlanan maksimum güç nedir?

**Çözüm** Tanıma göre güç, birim zaman başına harcanan enerjidir. Böylece maksimum güç atma ile harcanan enerjinin atma zamanına oranıdır:

$$\begin{aligned} \mathcal{P} &= \frac{E}{\Delta t} \\ &= \frac{(3,13 \times 10^{11} \text{ elektron /atma}) (40,0 \text{ MeV/elektron})}{2,00 \times 10^{-7} \text{ s/atma}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= (6,26 \times 10^{19} \text{ MeV/s}) (1,60 \times 10^{-13} \text{ J/MeV}) \\ &= 1,00 \times 10^7 \text{ W} = \boxed{10,0 \text{ MW}} \end{aligned}$$

sonucu bulunur. Bu gücü doğrudan hesaplayabilirdik. Kabul edelim ki her bir elektron hızlanmadan önce sıfır enerjiye sahipti. O halde tanımdan faydalanarak her bir elektron 40.0 MeV'lik son enerjiyi kazanmak için 40.0 MV'lık potansiyel farkı altında gitmeliydiler. Buna göre,

$$\mathcal{P} = \Delta V = (250 \times 10^{-3} \text{ A}) (40,0 \times 10^6 \text{ V}) = \boxed{10,0 \text{ MW}}$$

elde edilir.

## ÖZET

Bir iletkenindeki elektrik akımı

$$I \equiv \frac{dQ}{dt} \quad (27.2)$$

şeklinde tanımlanır. Burada  $dQ$  iletkenin kesit alanından  $dt$  süresinde geçen yükür. SI biriminde akım **amper** (A) cinsinden verilir ve  $1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$  dir.

Bir iletkenindeki ortalama akım, yük taşıyıcıların hareketine

$$I_{\text{or}} = nqv_s A \quad (27.4)$$

şeklinde bağlıdır. Burada  $n$  yük taşıyıcılarının yoğunluğu,  $q$  bunların yükü,  $v_s$  sürüklenme hızı,  $A$  ise kesit alanıdır.

**Akım yoğunluğu**  $J$ 'nin büyüklüğü, birim alan başına düşen akımdır:

$$J \equiv \frac{I}{A} = nqv_s \quad (27.5)$$

Bir iletkenindeki akım yoğunluğu, elektrik alanla

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (27.7)$$

şeklinde orantılıdır. Buradaki  $\sigma$  sabitine maddenin **iletkenliği** denir.  $\sigma$ 'nın tersine **öz direnç** denir ve  $\rho$  ile gösterilir. Yani  $\rho = 1/\sigma$  dir. 27.7 Eşitliği **Ohm kanunu** olarak bilinir ve iletkenliği, uygulanan alandan bağımsız olan maddenin ohm kanununa uyduğu söylenir.

Bir iletkenin **direnci**, ya iletkenin boyu ya da iletkenin uçları arasındaki potansiyel farkına bağlı olarak tanımlanır:

$$R \equiv \frac{\ell}{\sigma A} \equiv \frac{\Delta V}{I} \quad (27.8)$$

Burada  $\ell$  iletkenin boyu,  $\sigma$  malzemenin iletkenliği,  $A$  kesit alanı,  $\Delta V$  iletkenin uçları arasındaki potansiyel farkı ve  $I$  taşıyan akımdır.

SI birimlerde direncin birimi amper başına volt olup, bu 1 **ohm** ( $\Omega$ ) olarak tanımlanır. Yani,  $1\Omega = 1 \text{ V/A}$  dir. Direnç uygulanan potansiyelden bağımsız ise iletken Ohm Yasasına uyar.

Bir metaldeki elektrik iletkenliğinin klasik modelinde, elektronlar bir gazın molekülleri gibi düşünülür. Elektrik alanı yokken, elektronların ortalama hızı sıfırdır. Bir elektrik alan uygulandığında, elektronlar bir (ortalama)  **$v_s$  sürüklenme hızı** ile hareket ederler. Bu hızın yönü, elektrik alanın yönüne zıttır. Sürüklenme hızı,

$$v_s = \frac{qE}{m_e} \tau \quad (27.14)$$

ile verilir. Burada  $\tau$ , metalin atomları ile elektronların çarpışmaları arasındaki ortalama zaman,  $m_e$  elektron kütlesi ve  $q$  yüküdür. Bu modele göre madde- nin özdirenci

$$\rho = \frac{m_e}{nq^2 \tau} \quad (27.17)$$

ile verilir. Burada  $n$  birim hacim başına düşen serbest elektron sayısıdır.

Bir iletkenin özdirenci, sıcaklıkla yaklaşık, lineer bir şekilde

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

gibi değişir. Burada  $\alpha$  **özdirencin sıcaklık katsayısı**,  $\rho_0$  ise herhangi bir  $T_0$  referans sıcaklığındaki özdirençtir.

Bir rezistansın uçları arasına  $\Delta V$  potansiyel farkı uygulandığında, güç veya rezistansa enerji verilme hızı,

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

dir. Bir rezistansın uçları arasındaki potansiyel farkı  $\Delta V = IR$  ile verildiğinde, rezistans üzerinde harcanan güç,

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

şeklinde ifade edilebilir.

Bir rezistansa verilen elektriksel enerji, rezistansta iç enerji olarak ortaya çıkar.

## SORULAR

1. Gazete makaleleri sık sık "kurbanın vücudundan 10000 V luk elektrik akımı geçti" gibi deyimler ihtiva eder. Bu deyimde yanlış olan nedir?
2. Dirençle özdirenç arasındaki fark nedir?
3. Dairesel dik kesitli  $A$  ve  $B$  telleri aynı metalden yapılmış ve aynı boydadırlar; fakat  $A$  telinin direnci  $B$  nin kinden 3 kat daha büyüktür. Bunların dik kesitlerinin oranı nedir? Yarıçaplarını kıyaslayınız?
4. Bir iletkende kararlı bir akım geçirmek için ne gereklidir?
5. Tüm iletkenler Ohm kanununa uyar mı? Cevabınızı doğrulayan örnekler veriniz?
6. Belli bir iletkeneye uygulanan voltaj iki katına çıkarıldığında, akımın 3 katına çıktığı gözlenmektedir. İletken hakkında ne söylersiniz?

7. Elektrik devresini su şebekesiyle kıyasladığınızda, güç kaynağının, direncin, yükün ve potansiyel farkının karşılıkları nelerdir?
8. Neden, "iyi" bir elektrik iletkeni aynı zamanda "iyi" bir termal iletken olmalıdır?
9. Bir maddenin direnci arttıkça, sıcaklığının da artması gerektiğini açıklamak için maddenin atomik teorisini kullanınız.
10. Bakır ve silisyum için direnç, sıcaklıkla nasıl değişir? Bunlar neden farklıdır?
11. Bir süper iletken, uygulanan herhangi bir voltaj olmaksızın, akımın nasıl var olabildiğini açıklayınız.
12. Süper iletken aygıtın çalışmasını pahalı kulan bir gerekçe söyleyin. Prensipte bu kısıtlamanın üstesinden gelinebilir mi?



13. Bir tel içinde elektronlar dirençle karşılaşmadan serbestçe hareket edebilse idi, elektronların telin içindeki sürüklenme hızı ve teldeki akım ne olurdu?
14. Yüklere bir metalden yavaş akıyorsa neden bir düğmeyi açtığınızda ışığın size gelmesi birkaç saati gerektiriyor?
15. Bir iletkende, elektronları iletken boyunca süren elektrik alan, ışık hızına yakın bir hızla yayılmasına rağmen, elektronların sürüklenme hızı çok küçüktür. Bu ikisinin birden nasıl doğru olabileceğini açıklayın. Aynı elektron, iletkenin bir ucundan öteki ucuna hareket eder mi?
16. Aynı uzunluk ve yarıçapa sahip iki iletken, aynı potansiyel farkına bağlanmışlardır. Bunlardan biri, diğeri- nin iki katı dirence sahiptir. Hangi iletken daha çok güç çekecektir?

17. Araba aküleri genellikle Amper-saat şeklinde sınıflandırılırlar. Akım, güç, enerji veya aküden sürülen yükün miktarını bu terim tanımlar mı?
18. Nikrom kullanarak bir elektrik ısıtıcısı tasarlasaydınız, 1000 W gibi özel bir güç çekişi elde etmek için telin hangi parametresini değiştirirdiniz?
19. Tipik bir aylık elektrik kullanım ücreti şu şekilde tespit edilmiştir. İlk 16 kWh için 2 \$; daha sonraki 34 kWh için 8,00 cent/kWh; daha sonraki 50 kWh için 6,5 cent/kWh; daha sonraki 100 kWh için 5 cent/kWh; bundan sonraki 200 kWh için 4 cent/kWh; ve 400 kWh'i aşan tüketimde her kilowatt-saat için 3,5 cent/kWh tir. Bu ücretlendirmeye göre, 327 kWh in bedeli nedir?

### PROBLEMLER

1, 2, 3 = kolay, orta, zorca;  $\square$  = Bu problemin tam çözümü *Öğrenci Çözümlü El Kitabı ve Çalışma Kılavuzu*'nda bulunabilir

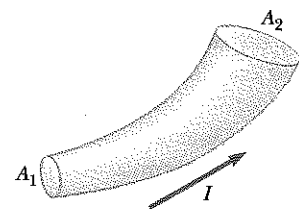
WEB = Çözüm <http://www.saunderscollege.com/physics/> de bulunabilir  $\square$  = Problemi çizmek için bilgisayar kullanmak faydalı olabilir  $\square$  = "Etkileşimli Fizik" paket programında bulunabilir  $\square$  = Sayısal/sembolik problem çifti

### Kesim 27.1 Elektrik Akımı

1. Bir özel katot ışıını "tüpünde, demetin ölçülen akımı 30,0  $\mu$ A dir. Her 40 s de tüp ekranına kaç elektron çarpar?
2. 700  $\text{cm}^2$  yüzey alanına sahip gümüş kaplı bir çay demliği, gümüş nitrat ( $\text{Ag}^+\text{NO}_3^-$ ) ihtiva eden elektrolit kabının negatif elektrotuna bağlanmıştır. Şayet 1,8  $\Omega$  dirence sahip olan kap 12 V luk bir bataryaya bağlanırsa, çay demliğini 0,133 mm kalınlıklı bir gümüş tabaka ile kaplamak için ne kadar beklemek gerekir? (Gümüşün yoğunluğu  $10,5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ .)
- WEB  $\square$  Farz edelim ki bir iletkenin geçen akım,  $I(t) = I_0 e^{-t/\tau}$  bağıntısına uygun şekilde zamanla exponansiyel olarak azalmaktadır. Burada  $I_0$  ( $t = 0$  daki) ilk akım,  $\tau$  ise zaman biriminde bir sabittir. İletken içinde sabit bir gözlem noktası ele alalım. (a)  $t = 0$  ile  $t = \tau$  aralığında bu noktadan ne kadar yük geçer? (b)  $t = 0$  ile  $t = 10\tau$  aralığında (c)  $t = 0$  ile  $t = \infty$  aralığında bu noktadan ne kadar yük geçer?
4. Hidrojen atomunun Bohr modelinde, en düşük enerji halindeki bir elektron protondan  $5,29 \times 10^{-11}$  m mesafede dairesel bir yol izler. (a) Elektronun hızının  $2,19 \times 10^6 \text{ m/s}$  olduğunu gösteriniz. (b) Yörüngedeki bu elektronun sağladığı etkin akım nedir?
5. 8 nC luk yük taşıyan küçük bir küre, yalıtkan bir çubuğun ucundaki bir çemberde dönmektedir. Dönme frekansı  $100\pi \text{ rad/s}$  dir. Bu dönen yük, ne kadarlık bir ortalama akımı temsil eder?

6. Küçük bir küre  $q$  yükü taşımaktadır ve dairesel yalıtkan bir ipin etrafında hızla döndürülmektedir. Dönmenin açısal frekansı  $\omega$  dir. Bu dönen yükün temsil ettiği ortalama akım nedir?

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?
9. Şekil P27.9, çapı düzgün olmayan dairesel bir iletkenin bir kısmını göstermektedir. İletken 5 A lik akım taşımaktadır.  $A_1$  dik kesitin yarıçapı 0,4 cm dir. (a)  $A_1$  deki akım yoğunluğunun büyüklüğü ne kadardır? (b)  $A_2$  deki akım yoğunluğu  $A_1$  dekinin dörtte biri ise, iletkenin  $A_2$  deki yarıçapı ne kadardır?



Şekil P27.9

10. Van de Graaff üretici 2,00-MeV'lik bir proton ve bir nötron ihtiva eden ağır hidrojen çekirdeği olan döteron demeti üretiyor. (a) Şayet demet akımı 10,0  $\mu\text{A}$  ise, döteronlar ne kadar uzaklaşır? (b) Döteron demetini kararlı yapan elektrostatik geri püskürtme faktörü müdür? Açıklayınız.

11. Belli bir yüksek enerjili hızlandırıcıdan çıkan elektron demeti 1,00 mm yarıçaplı dairesel kesit alanına sahiptir. (a) Eğer akım demeti 8,00  $\mu\text{A}$  ise, demetin düzgün olduğunu kabul ederek demetteki akım yoğunluğu nedir? (b) Elektronların hızı ışık hızına çok yakındır. Öyle ki onların hızını ihmal edilebilir bir hata ile  $c = 3,00 \times 10^8$  m/s alabiliriz. Demetteki elektron yoğunluğunu bulunuz. (c) Hızlandırıcıdan Avagadro sayısı kadar elektron çıkması ne kadar zaman alır?

12.  $4,00 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup> kesit alanına sahip bir alüminyum tel 5,00 A'lık akım taşımaktadır. Teldeki elektronların sürüklenme hızını bulunuz. Alüminyumun yoğunluğu 2,70 g/cm<sup>3</sup>'tür. (Her bir atomun bir elektron sağlandığını varsayın.)

### Kesim 27.2 Direnç ve Ohm Yasası

13. 240  $\Omega$  dirence sahip bir ışık ampulüne 120 V'lık bir potansiyel farkı uygulanırsa ampulden geçen akım nedir?

14. Bir direnç, düzgün kesit alanı 5,00 mm<sup>2</sup> olan bir karbon çubuktan yapılmıştır. Çubuğun uçlarına 15 V'lık bir potansiyel farkı uygulandığında çubuktan  $4 \times 10^{-3}$  A'lık bir akım geçmektedir. (a) Çubuğun direncini, (b) çubuğun uzunluğunu bulunuz.

- WEB 15. Dik kesit alanı 0,600 mm<sup>2</sup> ve boyu 1,5 m olan bir tungsten tele 0,900 V'lık bir potansiyel farkı uygulanıyor. Teldeki akım ne kadardır?

16. 1,2 cm yarıçaplı düzgün bir iletken, 120 V/m'lik bir elektrik alanı tarafından üretilen 3 A'lık bir akım taşımaktadır. Maddenin öz direnci ne kadardır?

17. 1 g bakırdan düzgün bir tel imal etmek istediğinizi varsayınız. Bakırın hepsini kullanmak şartıyla telin direncinin  $R = 0,5 \Omega$  olması için, (a) Telin boyu, (b) Telin çapı ne kadar olmalıdır?

18. (a) Lastik bir şeridin uçları arasındaki direncinin mertebesini tahmini olarak bulunuz. (b) Peninin (İngiliz bakır parası) her iki tarafında başı ve kuyrukları arasındaki direncin tahmini mertebesini bulunuz. Her bir durumda, onlar için tahmin ettiğiniz veya ölçtüğünüz değerler ve veri olarak aldığınız nicelikleri belirtiniz. (c) Şayet 120 V'lık bir güç kaynağına bağlanırsa her bir taşıyıcıdaki akımın mertebesi ne olacaktır? (DİKKAT! Bunu evde denemeyiniz!)

19. Bir parça kübik gümüşün (yoğunluğu = 10,5 g/cm<sup>3</sup>) kütlesi 90 g'dır. (a) Küpün zıt yüzleri arasındaki direnç ne kadardır? (b) Her bir gümüş atomu başına bir iletkenlik elektronu varsa, zıt yüzeyler arasında  $10^{-5}$  V'lık bir potansiyel farkı uygulandığında, elekt-

roların ortalama sürüklenme hızı ne olur? Gümüşün atom numarası 47 ve atomik kütlesi 107,8'dir.

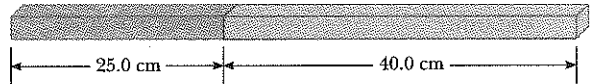
20. R dirençli bir metal tel üç eşit parçaya kesilmiş ve yeni bir biçimde yan yana bağlanmıştır. Boyu orijinal telin üçte birine eşit olan yeni telin direnci nedir?

21. R direncine sahip bir tel, küçük bir delikten çekilmek suretiyle ilk boyunun 1,25 katına uzatılmıştır. Uzatılmadan sonra telin direncini bulunuz.

22. Aynı uzunlukta alüminyum ve bakır tellerin, aynı dirence sahip oldukları bulunmuştur. Yarıçaplarının oranı ne kadardır?

23. Atmosferde, (yüksek ve hareketli bulutlardan dolayı) elektrik alanının 100 V/m olduğu bir yerde  $6 \times 10^{-13}$  N/m<sup>2</sup> lik akım yoğunluğu mevcuttur. Dünya atmosferinin böyle bir bölgesinde elektrik iletkenliğini hesaplayınız.

24. Şekil P27.24'teki çubuk (ölçekli çizilmemiştir) iki maddeden yapılmıştır. Her ikisi de bir kenarı 3,0 mm olan bir kare biçimine sahiptir. Birinci madde  $4,00 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$  dirence ve 25,0 cm uzunluğa sahipken, ikinci madde  $6,00 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$  dirence ve 40,0 cm uzunluğa sahiptir. Çubuğun uçları arasındaki direnç nedir?



Şekil P27.24

### Kesim 27.3 Elektriksel İletkenlik İçin Bir Model

- WEB 25. Bir bakır teldeki serbest elektronların sürüklenme hızı  $7,84 \times 10^{-4}$  m/s ise iletkendeki elektrik alanını hesaplayınız.

26. Bir iletkendeki akım iki katına çıkarılırsa (a) yük taşıyıcı yoğunluğu, (b) akım yoğunluğu (c) elektron sürüklenme hızı ve (d) çarpışmalar arasındaki ortalama zaman ne olur?

27. İletkenlik elektronlarının ortalama termal hızları  $8,6 \times 10^5$  m/s ise, Örnek 27.1'deki verileri kullanarak, bakırdaki elektronların çarpışmalar arası ortalama serbest yolunu hesaplayınız.

### Kesim 27.4 Direnç ve Sıcaklık

28. Death Valley'de sıcaklığın 58 °C olduğu bir günde fotoğraf çekerken, Bill Hiker bir bakır tele belli bir gerilim uygulandığında 1 amperlik akım elde edildiğini bulur. Daha sonra Bill Antartika'ya seyahat eder ve aynı tele aynı gerilimi uygular. Şayet sıcaklık -88 °C ise ne kadar akım kaydeder? Telin biçiminin ve boyunun değişmediğini kabul ediniz.

29. Belli bir tungsten filamanı ampul soğukken 19  $\Omega$  ve sıcakken 140  $\Omega$  dirence sahiptir. Burada Eş. 27.21'in büyük sıcaklık aralığında kullanılabilir olduğunu

- varsayın. Filamanın sıcak olduğu durumdaki sıcaklığını bulunuz. (İlk sıcaklığı  $20^{\circ}\text{C}$  alınız.)
30. Bir karbon ve bir nikrom tel seri olarak bağlanmıştır. Şayet  $0^{\circ}\text{C}$  de eşdeğer direnç  $10.0\text{ k}\Omega$  ise her bir telin direnci nedir? Eşdeğer direnç sıcaklıkla değişirmi? (Seri şekilde bağlı iki direncin eşdeğeri o dirençlerin toplamıdır.)
31.  $0.1\text{ mm}$  çapında bir alüminyum tel, uzunluğu boyunca yer alan  $0.2\text{ V/m}$  lik bir düzgün elektrik alanına sahiptir. Telin sıcaklığı  $50^{\circ}\text{C}$  dir, Atom başına bir serbest elektron olduğunu kabul ediniz. (a) Tablo 27.1 deki bilgileri kullanarak öz direnci bulunuz. (b) Teldeki akım yoğunluğu ne kadardır? (c) Teldeki toplam akım ne kadardır? (d) İletkenlik elektronlarının sürüklenme hızı ne kadardır? (e) Telin  $2\text{ m}$  lik kısmının uçları arasında ne kadarlık bir potansiyel farkı olmalı ki,  $0.2\text{ V/m}$  lik elektrik alanı şiddeti meydana getirebilsin?
32. **Tarama Problemi.** Bir alüminyum çubuk  $20^{\circ}\text{C}$  de  $1.234\text{ }\Omega$  luk dirence sahiptir. Çubuğun boyutlarında ve öz direncindeki değişimleri dikkate alarak çubuğun  $120^{\circ}\text{C}$  deki direncini hesaplayınız.
33. Sıcaklığı  $25^{\circ}\text{C}$  den  $50^{\circ}\text{C}$  ye çıkarılan bir demir fitilin direncinde meydana gelen kesirsel değişim ne kadardır?
34. Platin bir telin direnci düşük sıcaklık ölçümleri için kalibre edilmiştir.  $20^{\circ}\text{C}$  de direnci  $1\text{ }\Omega$  olan bir platin tel,  $77\text{ K}$  ( $-196^{\circ}\text{C}$ ) deki sıvı azot içine daldırılmıştır. Platin tel' in sıcaklıkla değişimi lineer ise  $-196^{\circ}\text{C}$  de platin telin beklenen direnci ne kadardır? ( $\alpha_{\text{platin}} = 3.92 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ )
35. Hangi sıcaklıkta tungsten, bakırdan dört kat fazla öz dirence sahip olur? (Bakırın  $20^{\circ}\text{C}$  de olduğunu kabul ediniz.)
36. Nikrom telin bir parçası başlangıçta  $20^{\circ}\text{C}$  dedir, Tablo 27.1 deki verileri kullanarak, direncini iki katına çıkaracak olan sıcaklığı hesaplayınız.

### Kesim 27.6 Elektriksel Enerji ve Güç

37. Bir tost makinası  $120\text{ V}$  luk bir güç kaynağına bağlandığında  $600\text{ W}$  ta çalışıyor. Tost makinasının direnci nedir ve taşıdığı akım ne kadardır?
38. Bir hidroelektrik santralde, türbin jeneratöre  $1500\text{ BG}$  sağlıyor ve bu mekanik enerjinin  $\% 80$  i elektrik enerjisine dönüştürülüyor. Bu şartlar altında  $2000\text{ V}$  luk bir potansiyel farkıyla jeneratörün sağlayacağı akım ne kadardır?
- WEB 39. **Tarama Problemi.**  $110\text{ V}$  ta çalışan bir daldırmalı su ısıtıcısının,  $1.5\text{ kg}$  suyu sıcaklığını  $10.0\text{ dk}$  içinde  $10^{\circ}\text{C}$  den  $50^{\circ}\text{C}$  ye çıkarması için direnci ne olmalıdır?

40. **Tarama Problemi.**  $\Delta V$  potansiyel farkında çalışan bir daldırmalı su ısıtıcısının,  $m$  kütleli suyu  $t$  zaman içinde  $T_1$  den  $T_2$  ye çıkarması için direnci ne olmalıdır?
41. Bir anlık  $140\text{ V}$  üreten bir kaynak düşününüz.  $120\text{ V}$  ve  $100\text{ W}$  luk bir ampulün çıkış gücü yüzde olarak ne kadar artar? (Ampulün direncinin değişmediğini kabul ediniz.)
42.  $110\text{ V}$  ta çalışması için tasarlanmış  $500\text{ W}$  lık bobin şeklindeki ısıtıcı  $0.500\text{ mm}$  çaplı nikrom telden yapılmıştır. (a) Nikromun öz direncinin  $20^{\circ}\text{C}$  deki değerinde sabit kaldığını kabul ederek kullanılan telin uzunluğunu bulunuz. (b) Şimdi sıcaklıkla öz direncin değiştiğini düşününüz. (a) şıkkındaki bobin  $1200^{\circ}\text{C}$  ye kadar ısıldığında çektiği güç ne kadardır?
43. Nikrom telden yapılmış bir bobin  $25.0\text{ m}$  uzunluğundadır. Tel,  $0.400\text{ mm}$  çapına sahiptir ve  $20^{\circ}\text{C}$  sıcaklığındadır. Şayet bobinden  $0.500\text{ A}$  lik akım geçerse, (a) teldeki elektrik alanın genliği, (b) çektiği güç, (c) şayet telin sıcaklığı  $340^{\circ}\text{C}$  ye çıkarılırsa ve uçlar arasındaki potansiyel farkı sabit kalırsa çektiği güç nedir?
44. Bir akü Amper-Saat (A.sa) olarak karakterize edilmiştir. Örneğin, batarya  $3.00\text{ sa}$  boyunca  $2.00\text{ A}$  lik akım ürettiğinde,  $6.00\text{ A.sa}$  şeklinde karakterize edilir. (a) Batarya  $12.0\text{ V}$  ve  $55.0\text{ A.sa}$  ta tutulurken kilowatt saat cinsinden sağlayacağı enerji nedir? (b) Kilowatt-saati  $6.00\text{ sent}$  ise batarya tarafından üretilen elektrik enerjisinin değeri nedir?
45.  $10.0\text{ V}$  luk bir batarya,  $120\text{ }\Omega$  luk bir dirence bağlanmıştır. Bataryanın iç direncini ihmal ederek, dirençteki güç kaybını hesaplayınız.
46. Birleşik Devletlerde herkesin bir elektrik saati olduğu ve her bir saatin  $2.50\text{ W}$  oranında enerji kullandığı tahmin edilmektedir. Bu enerji kaynağına ulaşmak için, ortalama  $\%25.0$  verimde bitkilerin kömür ateşinde yakılmasıyla elektrik enerjisi üreten bir sistemde yaklaşık olarak saat başına kaç ton kömür yakılır? (Kömürün yanma ısısı  $33.0\text{ MJ/kg}$  dir.)
47.  $110\text{ V}$  luk şebekeden  $1.70\text{ A}$  çeken bir lambanın masrafını, elektrik enerjisinin fiyatı  $6\text{ sent/kWsa}$  olması halinde hesaplayınız?
48. Kahve pişiren bir ısıtıcı,  $120\text{ V}$  ta çalışıyor ve  $2\text{ A}$  lik akım çekiyor. Üretilen ısıнын tamamının su tarafından alındığını varsayarak,  $0.5\text{ kg}$  lık suyu oda sıcaklığından ( $23^{\circ}\text{C}$ ) kaynama noktasına çıkarmak için gerekli süreyi bulunuz?
49. Belli bir tost makinası Nikrom direnç telinden yapılmış bir ısıtıcıya sahiptir. Bu ısıtıcı  $120\text{ V}$  luk bir kaynağa ilk takıldığında (tel  $20^{\circ}\text{C}$  dedir) ilk akım  $1.8\text{ A}$  'dir. Ancak, direnç elemanı ısındıkça akım düşmeye başlamaktadır. Tost makinası son çalışma sıcaklığına ulaştığı zaman, akım  $1.53\text{ A}$  'e düşmektedir. (a) Çalışma sıcaklığında iken tost makinasının çektiği güçü bulunuz. (b) Isıtıcı elemanın son sıcaklığı ne kadardır?

50. 80 ft yüksekliğindeki bir tavanı ısıtmak için, foot kare başına yaklaşık 10.0 W'lık güç gerekmektedir. Elektrik fiyatı 80 sent/kWh olmak şartıyla, 10.0ft x 15.0 ft büyüklüğündeki bir odayı ısıtmak için kullanılması gereken elektrikliğin bir günlük fiyatı nedir?
51. Bir kişinin rutin olarak kullandığı saç kurutucusunun bir yıllık maliyetini tahmin ediniz. Şayet kendiniz kurutucu kullanmıyorsanız, kullanan birisinin görüşünü alınız. Böylece onların değerlerini ve sizin tahminlerinizi belirtiniz.

### EK PROBLEMLER

52. Bir ışık ampulü "25 W 120 V" şeklinde, bir diğeri "100 W ve 120 V" şeklinde etiketlidir; bunun manası her bir ampul, sabit 120 V'ta çalıştırıldığında her biri ayrı, ayrı kendi gücünü dönüştürür. (a) Her bir ampulün direncini bulunuz. (b) Zayıf ışıklı bir ampul içinden 1 C'lük yükün geçmesi ne kadar sürer? Giriş zamanıyla çıkış zamanı kıyaslandığında bu yük farkı nasıldır? (c) Bu zayıf ışıklı ampulden 1 J'lük enerji geçmesi ne kadar sürer? Giriş zamanıyla çıkış zamanı kıyaslandığında bu enerji farkı nasıldır? (d) Şayet elektrik şirketi kWh'ini 70 sent'e satarsa, zayıf ampulün 30 gün sürekli olarak çalışmasının fiyatını bulunuz. Elektrik şirketi ne ürününü satar? Bu niceliğin SI birimlerinde fiyatı nedir?
53. 200 km uzunluğunda ve 2,00 cm çaplı bir yüksek gerilim nakil hattı 1000 A'lık sabit akım taşıyor. Şayet iletken  $8,00 \times 10^{28}$  elektron/m<sup>3</sup> serbest elektron ihtiva eden bakır tel ise, bir elektronun tüm kablo boyunca hareketi ne kadar sürer?
54. Bir yüksek gerilim nakil hattı 100 millik mesafede 700 kV'da 1000 A'lık akım taşıyor. Şayet telin direnci 0,500  $\Omega$ /mi ise, direnç kayıplarından dolayı ne kadar güç kaybı olur?

55. Öz direncin sıcaklık katsayısının daha genel tanımı

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}$$

dir. Burada  $\rho$ ,  $T$  sıcaklığındaki öz dirençtir. (a)  $\alpha$  yı sabit kabul ederek,

$$\rho = \rho_0 e^{\alpha(T - T_0)}$$

olduğunu gösteriniz. Burada  $\rho_0$ ,  $T_0$  sıcaklığındaki öz dirençtir. (b) ( $e^x \approx 1 + x$ ;  $x \ll 1$ ) seri açılımını kullanarak,  $\alpha(T - T_0) \ll 1$  için öz direncin yaklaşık olarak  $\rho = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$  ifadesiyle verilebileceğini gösteriniz.

56. Bir bakır kablo yalnızca 2,00 W/m'lik güç kaybıyla 300 A'lık akım taşıyacak şekilde tasarlanmıştır. Buna göre bakır kablonun çapı ne olmalıdır?

57. Farklı uzunluk ve dik kesitlere sahip nikrom tellerin elektriksel öz dirençlerinin ölçülmesi için bir deney hazırlanıyor. Ölçü takımı için, bir öğrenci  $7,3 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup> dik kesit alanlı #30 ayarlı tel kullanıyor. Telin uçları arasındaki voltaj ve teldeki akım bir voltmetre ve bir ampermetre ile ölçülüyor. Üç farklı uzunluktaki tellerle alınan ölçüler aşağıdaki tabloda verilmiştir. Tellerin dirençlerini ve karşılık gelen öz direnç değerlerini hesaplayınız? Öz direncin ortalama değeri ne kadardır? Bunu Tablo 27.1'de verilen değerlerle kıyaslayınız.

$L(m)$	$\Delta V(V)$	$I(A)$	$R(\Omega)$	$\rho(\Omega \cdot m)$
0,54	5,22	0,500		
1,028	5,82	0,276		
1,543	5,94	0,187		

58. Bir elektrik dağıtım firması evlere bir ana şebeke-den (120 V) iki bakır telle elektrik sağlamaktadır. Bu tellerin her biri 50 m boyunda ve 300 m başına 0,108  $\Omega$  luk bir dirence sahiptir. (a) 110 A'lık akım için evdeki voltajı bulunuz. Bu akım için (b) kullanıcının satın aldığı gücü bulunuz, (c) bakır tellerde harcanan gücü bulunuz.

59.  $x$  eksenı boyunca uzanan düzgün silindirik bir tel 0,500 m uzunluğunda ve 0,200 mm çapındadır. Bu,  $\rho = 4,00 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$  öz dirençli ohm kanuna uyan bir maddeden yapılmıştır.  $x = 0$  da potansiyel farkının 4,00 V ve  $x = 0,500$  m de  $V = 0$  olduğunu kabul ederek, (a) teldeki  $E$  elektrik alanını, (b) telin direncini, (c) teldeki akımı, (d) teldeki  $J$  akım yoğunluğunu bulunuz. (e)  $E = \rho J$  olduğunu gösteriniz.

60.  $x$  eksenı boyunca uzanan düzgün silindirik bir tel  $L$  uzunluğunda ve  $d$  çapındadır. Bu,  $\rho$  öz dirençli ohm kanuna uyan bir maddeden yapılmıştır.  $x = 0$  da potansiyel farkının  $V$  ve  $x = L$  de  $V = 0$  olduğunu kabul ederek,  $L$ ,  $d$ ,  $V$ ,  $\rho$  ve fiziksel sabitler terimleri cinsinden, (a) teldeki elektrik alanını, (b) telin direncini, (c) teldeki akımı, (d) teldeki akım yoğunluğu ifadelerini vektör notasyonunda türetiniz. (e)  $E = \rho J$  olduğunu gösteriniz.

61. Denge sıcaklığına ulaşıldığında, bir lambanın fitilinin uçları arasındaki potansiyel farkı sabit bir düzeyde kararlı kalır. Bu kararlı halde lambanın çektiği akım, lambanın ilk açıldığı andakinin sadece onda biri kadardır. Lambanın, 20 °C'de öz direncinin sıcaklık katsayısı  $0,0045 (^\circ C)^{-1}$  ise ve direnç sıcaklıkla lineer olarak artırıyorsa, fitilin son çalışma sıcaklığı ne kadardır?

62. Bir rezistansa uygulanan voltaj 12 V'tan 6 V'a düşüncce, rezistansdaki akım 3 A azalmaktadır. Rezistansın direncini bulunuz.

63. Bir elektrikli araba,  $2 \times 10^7$  J lük toplam enerjiyi 12 V luk bir batarya takımı ile sağlıyor. (a) Elektrik motoru, 8 kW güç çekiyorsa, motorun verdiği akım ne kadardır? (b) Araba, 20 m/s lik kararlı hızla giderken elektrik motoru 8 kW çekiyorsa, arabanın "pili bitmeden önce" gidebileceği uzaklık ne kadardır?

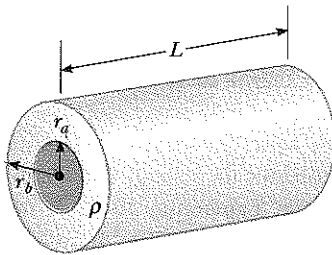
64. **Tarama Problemi.** Düzgün bir tel ısıtıldığı zaman, onun direnci Eş. 27.21 e göre  $R = R_0[1 + \alpha(T - T_0)]$  ifadesiyle verilmektedir. Burada  $\alpha$  öz direncin sıcaklık katsayısıdır. (a) Tel ısıtıldığı zaman, telin alanının ve uzunluğunun değişimini hesaba katarak direncin

$$R = \frac{R_0[1 + \alpha(T - T_0)][1 + \alpha'(T - T_0)]}{[1 + 2\alpha'(T - T_0)]}$$

şeklinde olacağını gösteriniz. Burada  $\alpha'$  lineer genleşme katsayısıdır (bölüm 19'a bakınız). (b) İlk sıcaklığı  $20.0^\circ\text{C}$  den  $100.0^\circ\text{C}$  ye ısıtıldığı zaman, 2,00 m uzunluklu ve 0,100 mm yarıçaplı bakır tel için iki ifadenin sonucunu karşılaştırınız.

65. Tablo 27.1 deki öz direnç sıcaklık katsayıları  $20^\circ\text{C}$  sıcaklık için tayin edilmiştir. Bu değerler  $0^\circ\text{C}$  de ne olacaktır? (İpucu:  $20^\circ\text{C}$  deki sıcaklık katsayısı  $\rho = \rho_0[1 + \alpha(T - T_0)]$  ifadesini sağlar. Burada  $\rho_0$  maddenin  $20^\circ\text{C}$  deki öz direncidir.  $0^\circ\text{C}$  deki  $\alpha'$  öz direncin sıcaklık katsayısı,  $\rho = \rho'_0[1 + \alpha'T]$  ifadesini sağlamalıdır. Burada  $\rho'_0$  maddenin  $0^\circ\text{C}$  deki sıcaklık katsayısıdır.)

66. Bir rezistans  $\rho$  öz dirençli bir maddeden içi boş silindir şeklinde yapılmıştır. Silindirin boyu  $L$ , iç ve dış yarıçapları  $r_a$  ve  $r_b$  dir (Şekil P27-66). Eksene paralel bir akım üretmek için, silindirin uçları arasında bir potansiyel farkı uygulanıyor. (a) Böyle bir aletin direnci için  $L$ ,  $\rho$ ,  $r_a$  ve  $r_b$  cinsinden genel bir ifade bulunuz. (b)  $L = 4$  cm,  $r_a = 0,5$  cm,  $r_b = 1,2$  cm ve öz direnç  $\rho = 3,5 \times 10^5 \Omega\cdot\text{m}$  için  $R$  nin nümerik değerini elde ediniz?



Şekil P27.66

67. Belli bir stereo sistemde, her bir hoplörün direnci  $4,00 \Omega$  dur. Her bir mikrofon devresi ve her bir kanalda 60W lık güç çeken sistem  $4,00$  A lik sigorta ihtiva etmektedir. Bu sistem yüklenmeye karşı karşılaştıkça korunur mu? Muhakemenizle açıklayınız.
68. Sıcaklık farkından kaynaklanan SI akışı ile (Kesim 20.7) potansiyel farkından kaynaklanan elektrik yükü akışı arasında yakın bir benzerlik vardır. Hem  $dQ$  termal enerji, hem de  $dq$  elektrik yükü iletken maddede içindeki serbest elektronlar tarafından taşınır. Bunun sonucu olarak elektrigi iyi iletkenler genellikle ısıyı da iyi iletirler.  $dx$  kalınlığında ince bir iletken dilimini dikkate alalım. Bunun alanı  $A$ , elektrik iletkenliği  $J$  ve zıt yükler arasında  $dV$  potansiyel farkı olsun.  $I = dq/dt$  akımının

Yük iletimi

Isı iletimindeki karşılığı  
(Eş. 20.15)

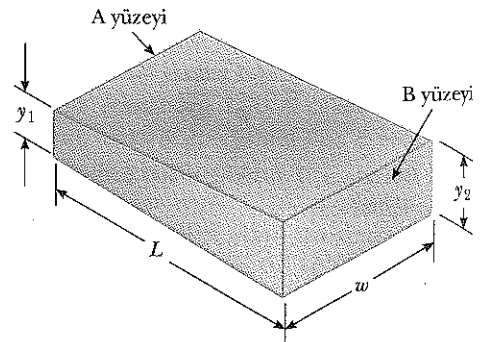
$$\frac{dq}{dt} = \sigma A \left| \frac{dV}{dx} \right| \quad \frac{dQ}{dt} = kA \left| \frac{dT}{dx} \right|$$

ile verildiğini gösteriniz. Isı iletiminde, termal iletkenliği  $k$  olan maddede ısı akış hızı  $dQ/dt$  (SI da saniye başına joule olarak),  $dT/dx$  sıcaklık gradienini yüzünden ortaya çıkar. Yük iletimi eşitliğindeki eksi işaret nereden kaynaklanmaktadır?

69.  $\rho$  düzgün öz dirençli bir madde, Şekil 27.69 da görüldüğü gibi bir kesik kama şeklinde biçimlendirilmiştir. Bu kamanın  $A$  ve  $B$  yüzleri arasındaki direncin

$$R = \rho \frac{L}{w(y_2 - y_1)} \ln \left( \frac{y_2}{y_1} \right)$$

ile verilebileceğini gösteriniz.



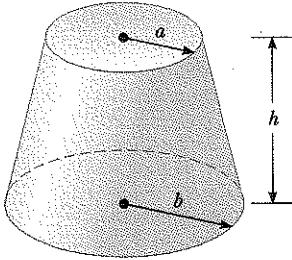
Şekil P27.69

70.  $\rho$  öz dirençli bir madde, Şekil 27.70 de görüldüğü gibi,  $h$  yüksekliğinde kesik bir koni şeklinde biçimlendirilmiştir. Koni kesitinin tabanının yarıçapı  $b$ , tava-

nınki ise  $a$  dır. Koninin herhangi bir dairesel kesiti boyunca akım yoğunluğunun düzgün olduğunu kabul ederek tabanla tavan arasındaki direncin

$$R = \frac{\rho}{\pi} \left( \frac{h}{ab} \right)$$

olduğunu gösteriniz.



Şekil P27.70

71. Sıcaklığın fonksiyonu olarak bir yarıiletken diyotun akım voltaj karakteristiği

$$I = I_0 (e^{e\Delta V/k_B T} - 1)$$

denklemleriyle verilir. Burada ilk sembol  $e$  logaritmanın tabanını temsil eder. İkinci  $e$  elektron yüküdür.  $k_B$  Boltzmann sabiti ve  $T$  mutlak sıcaklıktır.  $R = \Delta V/I$  ve  $I$  yı hesaplamak için,  $\Delta V$  yi 0,005 V luk aralıklarla  $\Delta V = 0,400$  V tan 0,600 V a kadar artırarak bir tablo yapınız.  $I_0 = 1,00$  nA olarak kabul ediniz ve  $R$  ye karşı  $\Delta V$  nin grafiğini  $T = 280$  K, 300 K ve 320 K için çizin.

## SINAMA SORULARININ CEVAPLARI

- 27.1 d, b = c, a. d'deki akım, iki pozitif yükün sola doğru hareketine özdeştir. b ve c'de, dört pozitif yükün aynı yönde hareketine özdeştir çünkü negatif yüklerin sol tarafa hareketi, pozitif yüklerin sağ tarafa hareketine karşılık gelir. (a)'daki akım ise, beş pozitif yükün sağa doğru hareketine özdeştir.
- 27.2 Tel sıkışsa da, her parçası aynı akımı taşır. Dik kesit alan azalırsa sabit akımı sağlamak için Denklem 27.4'e göre sürüklenme hızı artar. 27.5 ve 27.6 Denklemlerine göre akım yoğunluğu da artar. Elektrik alanının artması, Eş. 27.7'de görüldüğü gibi akım yoğunluğunun artmasına sebep olur. Bu açıklamaları takip ederek, küçük bölgelerde elektrik alan çizgilerinin sıklaştığını ve sonuçta elektrik alan büyüklüğünün arttığını görürsünüz.
- 27.3  $1/R$ . Çizginin eğriliği maddenin omik olmadığını (direncin potansiyel farkı ile değiştiği) gösterir. Direncin tanımı bu durumlar içinde geçerli olduğu için eğrinin farklı noktaları için farklı  $R$  değerleri ile 27.8 Denklemi hala uygulanabilir.
- 27.4 Kablo bir arabadan diğerine ulaşabilecek kadar en kısa  $\ell$  uzunluğunda, oldukça kalın (büyük  $A$ ) ve küçük  $\rho$  öz dirençli maddeden yapılmalı. Tablo 27.1'den görüleceği gibi, bakır veya alüminyumdu

şük öz dirençli olduklarından seçmelisiniz. Gümüş ve altın bu tür bir iş için oldukça pahalı olur.

- 27.5 Ampül açıldıktan hemen sonra. Filament oda sıcaklığında olduğunda direnci düşük ve dolayısı ile akım ( $I = \Delta V/R$ ) büyük olur. Filament ısındığında, direnç artar ve akım düşer. Eski lambalar genellikle ışık açıldıktan hemen sonra patlarlar, çünkü başlangıçta akım "pik" oluşturur ve sıcaklık çok hızla artar ve bu da filamentte bir gerilme oluşturur.
- 27.6 (c). İki ampüllerde potansiyel farkı aynı olduğundan ve iletkenlere güç aktarımı  $\mathcal{P} = I\Delta V$  ile verilir. 60-W'lık ampül, yüksek güce sahip olması ile daha çok akım çeker, 30-W'lık ampül büyük dirençli olması ile aynı potansiyelde daha az akım çeker.
- 27.7  $I_a = I_b > I_c = I_d > I_e = I_f$   $I_a$  bataryanın pozitif ucundan çıkan akımdır ve ikiye ayrılarak ampüllere dağılır, yani  $I_a = I_c + I_e$ . Sınama Sorusu 27.6'dan biliyoruz ki 60-W'lık ampülden geçen akım 30-W'lık ampülden geçenden daha büyüktür (bütün akımın "küçük dirençli yoldan" yani 60-W'lık ampülden akmayacağını not edelim.). Ampüllerde yeni yük oluşmadığından, giren akımlar çıkan akımlara eşittir, yani  $I_c = I_d$  ve  $I_e = I_f$ . Ampüllerden geçen akımlar toplanarak geri bataryaya gelirler,  $I_f + I_d = I_b$ .