5 التيار والمقاومة
Current and Resistance



الشكل 5.1 يضيئ تيار متدفق خلال سلك هذا المصباح الضوئي.

أصبحت الإضاءة الكهربائية مألوفة للغاية لدرجة أنَّك حتى لا تفكر فيها. حيث تسير في غرفة مظلمة وبضغطة واحدة على المفتاح لتضيء الغرفة كما لو كانت أثناء النهار تقريبًا (الشكل 5.1). ومع ذلك، فإنَّ ما يحدث عند الضغط على المفتاح يعتمد في النهاية على مبادئ الفيزياء والأجهزة الهندسية التي استغرقت عقودًا لتطويرها وتحسينها.

هذه الوحدة هي أول وحدة تركز على الشحنات الكهربائية المتحركة. حيث تتناول بعض المفاهيم الأساسية التي سنستخدمها في الوحدة 6 لتحليل الدوائر الكهربائية الأساسية التي تُستخدم في جميع التطبيقات الإلكترونية. تركز هاتان الوحدتان على التأثيرات الكهربائية للشحنات المتحركة، إلا أنَّه يجب تعي أنَّ الشحنات المتحركة تنشأ عنها تأثيرات أخرى تتعلق بالمغناطيسية سنتناولها في الوحدة 7.

ما سنتعلمه 116
5.1 التيار الكهربائي 116
مثال 5.1 الإرحال الأيوني 118
5.2 كثافة التيار 119
مسألة محلولة 5.1 سرعة انسياق الإلكترونات في اسلك نحاسي 120
5.3 المقاومة النوعية والمقاومة 121
الأبعاد المتفق عليها للأسلاك 123
مثال 5.2 مقاومة السلك النحاسي 123
رموز المقاوم 123
درجة الحرارة والموصلية الفائقة 124
الأساس المجهري للتوصيل في المواد الصلبة 125
5.4 القوة الدافعة الكهربائية وقانون أوم 125
مقاومة جسم الإنسان 127
5.5 توصيل المقاومات على التوالي 127
مثال 5.3 المقاومة الداخلية للبطارية 128
مقاوم ذو مقطع عرضي غير ثابت 129
مسألة محلولة 5.2 مجس كهربائية الدماغ 129
5.6 توصيل المقاومات على التوازي 130
مثال 5.4 المقاومة المكافئة في دائرة كهربائية تتكون من ستة مقاومات 131
مسألة محلولة 5.3 انخفاض الجهد عبر مقاوم في دائرة كهربائية 132
5.7 الطاقة والقدرة في الدوائر الكهربائية 134
مثل 5.5 التأثير الحراري لمقاومة المصباح الكهربائي 134
نقل الطاقة عبر التيار المستمر عالي الجهد 135
مسألة محلولة 5.4 أبعاد سلك نقل الطاقة 136
5.8 الثنائي أحادي الاتجاه في الدوائر الكهربائية 137
ما تعلمناه/دليل المذاكرة للاختبار 138
إرشادات حل المسائل 139
أسئلة الاختيار من متعدد 139
أسئلة مفاهيمية 141
تمارين 141
تمارين بمعطيات متعددة 144

Chapter Sourced From: 5. Current and Resistance, Chapter 25, from University Physics with Modern Physics, 2e by Bauer and Westfall ©2014

ما سنتعلمه

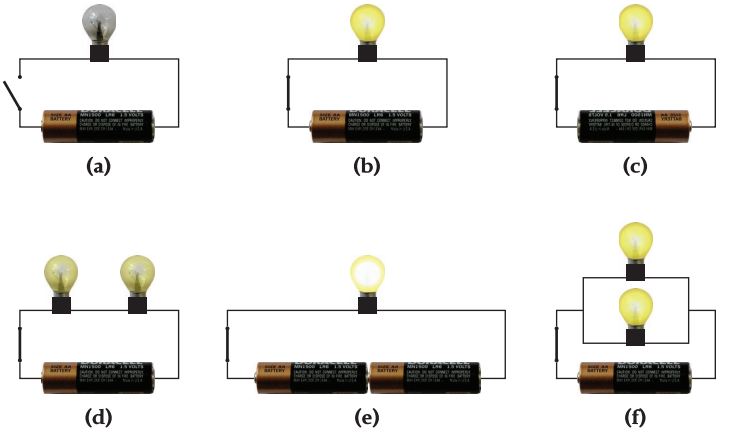
- يُقصد بالتيار الكهربائي عند نقطة معينة في دائرة كهربائية المعدل لتدفق شحنة كهربائية من هذه النقطة.
- يُعرف التيار المستمر بأنّه التيار المتدفق في اتجاه واحد لا يتغير بتغير الزمن. يُعرف اتجاه التيار بأنّه الاتجاه الذي تتحرك فيه الشُحنة الموجبة.
- كثافة التيار المار عبر نقطة معينة في الموصل هي مقدار التيار بالنسبة إلى مساحة مقطع الموصل.
- تصف موصلية المادة خصائصها من حيث قدرتها على توصيل التيار. وعكسها المقاوميّة.
- تعتمد مقاومة الجهاز على تصميمه الهندسي والمادة المصنوع منها.
- تزيد مقاوميّة الموصل بشكل خطي تقريبًا بزيادة درجة الحرارة.
- يُقصد بالقوة الدافعة الكهربائية (التي يُشار إليها بالرمز emf عادةً) فرق الجهد في الدائرة الكهربائية.
- ينص قانون أوم على أنّ فرق الجهد بين طرفي جهاز ما يساوي شدة التيار المتدفق عبر هذا الجهاز مضروبًا في مقاومة الجهاز.
- تتألف الدائرة البسيطة من مصدر قوة دافعة كهربائية ومقاوِمات مُتصلة على التوالي أو على التوازي.
- في الرسم التخطيطي للدائرة. يمكن أن تحل مقاومة مكافئة محل المقاوِمات المتصلة على التوالي أو على التوازي.
- تمثل القدرة في الدائرة ناتج ضرب التيار في فرق الجهد.
- يوصِّل الصمام الثنائي التيار في اتجاه واحد ولا يوصّله في الاتجاه المعاكس.

5.1 التيار الكهربائي Electric Current

فيما سبق، ركزت دراستنا للكهرباء على الكهرباء الساكنة التي تتناول خصائص الشحنات الكهربائية الثابتة ومجالاتها. تعرفنا على الدوائر الكهربائية أثناء مناقشة المكثفات في الوحدة 24، لكنها تناولت الحالات التي تتضمن مكثفات كاملة الشحن فقط؛ حيث تكون الشحنة في وضع السكون. لو كانت الكهرباء في شكل الكهرباء الساكنة فقط، لما كانت مهمّة بهذا الشكل بالنسبة إلى المجتمع الحديث. حيث يرجع تأثير الكهرباء المغيّر للعالم إلى خصائص الشحنات المتحركة أو التيار الكهربائي. تعتمد جميع الأجهزة الكهربائية في تشغيلها على أحد أنواع التيار.

لنستهل الدرس بتناول بعض التجارب البسيطة للغاية. حينما كنت صغيرًا، من المرجح جدًا أنّك كنت تمتلك بعض الألعاب التي تعمل بالبطاريات، ومن المحتمل كذلك أنّ بعضها كان يحتوي على مصابيح صغيرة. فكِّر في دائرة بسيطة جدًا تتكون من بطارية ومفتاح ومصباح (انظر الشكل 5.2). إذا كان المفتاح مفتوحًا، كما في الشكل 5.2a، فلن يضيء المصباح. إذا كان المفتاح مغلقًا، كما في الشكل 5.2b، فسيضيء المصباح. كلنا يعرف سبب حدوث هذا – وهو تدفق التيار عبر الدائرة المغلقة. في الوحدة 24، عرفنا أنّ البطارية توفر فرق الجهد للدائرة. وفي هذه الوحدة، سنتناول المقصود بتدفق التيار، والأساس الفيزيائي للتيار، ومدى ارتباطه بفرق الجهد الناتج عن البطارية. سنعرف أنّ المصباح يقوم بدور المقاوِم في الدائرة، وسنتعرف على كيفية عمل المقاوِمات.

لنبدأ بالتفكير في التجربة البسيطة التي تم إجراؤها في الشكل 5.2c، حيث يكون اتجاه البطارية عكس اتجاهها في الشكل 5.2b. يضيء المصباح بالشكل نفسه، على الرغم من انعكاس إشارة فرق الجهد الناتج عن البطارية. (يقع طرف البطارية الموجب عند الطرف ذي اللون النحاسي). في الشكل 5.2d، ثمة مصباحان في الدائرة، يقع أحدهما خلف الآخر. (سيركز القسم 5.5 على هذا الترتيب



الشكل 5.2 تجارب باستخدام البطاريات والمصابيح الضوئية.

للمقاومات الذي يمثل توصيلًا *على التوالي*). يضيء المصباحان بكثافة أقل بدرجة ملحوظة من إضاءة المصباح الواحد في الشكل 5.2c، لذا قد يكون التيار المتدفق في الدائرة أقل ممّا سبق. من ناحية أخرى، تؤدي البطاريتان المتصلتان على التوالي، كما في الشكل 5.2e، إلى مضاعفة فرق الجهد في الدائرة، ما يؤدي إلى إضاءة المصباح بشكل أكثر سطوعًا على نحو ملحوظ. في النهاية، إذا استُخدمت أسلاك منفصلة لتوصيل مصباحين ببطارية واحدة، كما في الشكل 5.2f، فسيضيء المصباحان بالشدة نفسها تقريبًا كما في الشكل 5.2b أو الشكل 5.2c. يُطلق على هذه الطريقة المستخدمة في توصيل المقاومات في الدائرة اسم *التوصيل على التوازي* وهذا ما سنتعرف عليه في القسم 5.6.

من الناحية الكمية، يمثل **التيار الكهربائي، *i***، الشحنة الكلية المارة عبر نقطة محددة في زمن محدد، مقسومة على هذا الزمن. ومن ثَمَّ لا تمثل حركة الإلكترونات العشوائية في الموصل تيّارًا، على الرغم من حقيقة أنَّ كميات كبيرة من الشحنة تتجاوز نقطة محددة، وذلك بسبب عدم وجود شحنة متدفقة. إذا تجاوز صافي الشحنة dq نقطة ما خلال زمن dt، فسيكون التيار عند هذه النقطة، بحسب التعريف،

$$i = \frac{dq}{dt} \tag{5.1}$$

مقدار الشحنة الكلية المارة عبر نقطة محددة خلال زمن t يساوي تكامل التيار بالنسبة إلى الزمن.

$$q = \int dq = \int_0^t i\,dt' \tag{5.2}$$

يتم حفظ الشحنة الكلية، ما يستلزم ضمنيًّا عدم فقدان الشحنة المتدفقة في الموصل مطلقًا. وبناءً عليه، يتساوى مقدار الشحنة المتدفق داخل أحد طرفي الموصل مع المقدار الخارج من الطرف الآخر.

يُطلق على وحدة التيار، عدد الكولوم في الثانية، اسم **أمبير** (ويختصر إلى A، أو amp في بعض الأحيان)، نسبة إلى عالم الفيزياء الفرنسي أندريه أمبير (1775 – 1836):

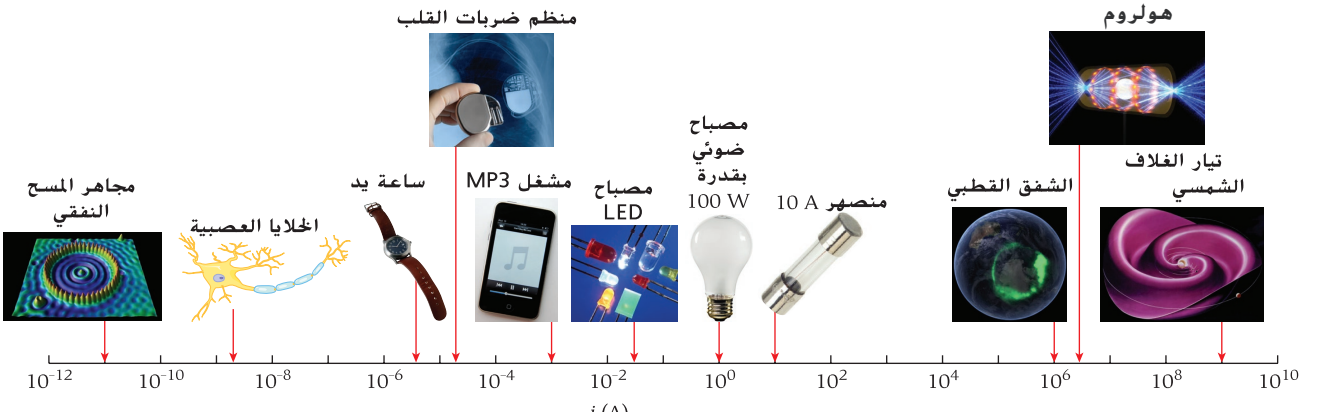
$$1\ \text{A} = \frac{1\ \text{C}}{1\ \text{s}}$$

تكون قيمة بعض التيارات النموذجية 1 A للمصباح، و200 A لبادئ التشغيل في السيارة، و$1\,\text{mA} = 1\text{x}10^{-3}\text{A}$ لتشغيل مشغل MP3، و1 nA للتيارات في توصيلات الخلايا العصبية والعقلية في الدماغ و$10{,}000\ \text{A} = 10^4\ \text{A}$ في صاعقة البرق (لمدة قصيرة). تتكون أصغر التيارات التي يمكن قياسها من الإلكترونات الفردية التي تسبح داخل مجاهر المسح النفقي وهي في حدود 10 pA. أما أكبر تيار في النظام الشمسي، فهو الرياح الشمسية التي تقع في مدى GA. يوضح الشكل 5.3 أمثلة أخرى من مجموعة كبيرة من التيارات.

يجب أن تتذكر قاعدة السلامة البسيطة هذه التي تتعلق برتبة مقادير التيارات: 100–10–1، ما يعني أنَّه يمكن الشعور بالتيار المتدفق داخل جسم الإنسان بمقدار 1 mA (عادة في صورة وخز).

هولروم

الهولروم هي اداة للاندماج النووي بواسطة الانضغاط الكتلي.



الشكل 5.3 أمثلة لتيارات كهربائية تتراوح بين 1 pA و10 GA.

وأنَّ التيار بمقدار 10 mA يؤدي إلى انقباض العضلات إلى درجة يعجز عندها الإنسان من إفلات السلك الحامل للتيار، وأنَّ التيار بمقدار 100 mA كافٍ لإيقاف القلب.

يُطلق على التيار المتدفق في اتجاه واحد ولا يتغير بتغير الزمن اسم **التيار المستمر**. (يُطلق على التيار الذي يتدفق في اتجاه واحد أولًا ثم يتدفق في الاتجاه المضاد بعد ذلك اسم *التيار المتردد* وهذا ما سنتناوله في الوحدة 30.) في هذه الوحدة، يُشار إلى اتجاه التيار المتدفق في الموصِّل بسهم.

في الفيزياء، تعرف حاملات الشحنة الموجودة في الموصِّل باسم الإلكترونات، وهي المشحونة بشحنة سالبة. ومع ذلك، يُعرف التيار الموجب، اصطلاحًا، بأنّه تيار متدفق من الطرف الموجب إلى الطرف السالب. يرجع السبب وراء هذا التعريف المخالف للتوقعات لاتجاه التيار إلى نشأة التعريف في النصف الثاني من القرن التاسع عشر، حيث لم يكن يُعرف أنَّ الإلكترونات هي حاملات الشحنة المسؤولة عن التيار في ذلك الوقت. ومن ثَمَّ تم تعريف اتجاه التيار بأنَّه الاتجاه الذي تسري فيه الشحنات الموجبة.

سؤال الاختبار الذاتي 5.1

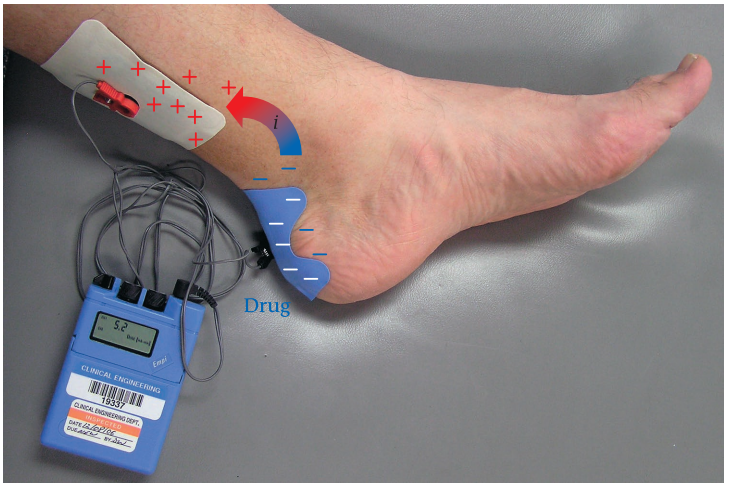
تم تصنيف البطارية المثالية AA القابلة للشحن بمقدار 700 mAh. ما المدة التي يمكن لهذه البطارية خلالها تزويد تيار بمقدار 100 µA؟

مثال 5.1 الإرحال الأيوني

ثمة ثلاثة طرق لتناول الدواء المضاد للالتهابات. الطريقة غير المؤلمة، وهي عن طريق الفم – مجرد ابتلاع الدواء. ومع ذلك، تؤدي هذه الطريقة إلى سريان كمية صغيرة من الدواء في النسيج المتضرر، حوالي 1 µg. الطريقة الثانية، هي حقن الدواء موضعيًّا باستخدام إبرة الحقن. هذا مؤلم، إلا أنَّه يوصل حوالي 10 mg من الدواء إلى داخل النسيج المتضرر – أكثر أربع مرات مما توصله طريقة تناول الدواء عن طريق الفم. ومع ذلك، منذ التسعينيات، تم اكتشاف طريقة ثالثة، تتميز بأنّها غير مؤلمة كذلك ويمكن أن توصل حوالي 100 µg من الدواء في الموضع المطلوب. تستخدم هذه الطريقة، والتي يُطلق عليها اسم *الإرحال الأيوني*، تيارات كهربائية (ضعيفة للغاية) يتم إرسالها عبر نسيج المريض (الشكل 5.4). يتكون جهاز الإرحال الأيوني من بطارية وقطبين (بالإضافة إلى دائرة إلكترونية أخرى تتيح للممرضة التحكم في شدة التيار المستخدم). يتم وضع الدواء المضاد للالتهاب، عادة الديكساميثازون، في الجزء السفلي من القطب المشحون بشحنة سالبة. يتدفق التيار عبر جلد المريض ويوصل الدواء إلى النسيج بمقدار عمق يصل إلى 1.7 cm.

المسألة

تريد إحدى الممرضات إعطاء 80 µg من الديكساميثازون في كعب لاعب كرة القدم المصاب. إذا استخدمت جهاز الإرحال الأيوني الذي يستخدم تيارًا بمقدار 0.14 mA، كما هو موضح في الشكل 5.4، فما المدة التي يستغرقها إعطاء جرعة واحدة؟ افترض أنَّ الأداة لها معدل حقن مقداره 650 µg/C وأنَّ التيار يتدفق بمعدل ثابت.



الشكل 5.4 يُطلق الإرحال الأيوني على إنفاذ الدواء تحت الجلد بمساعدة التيار الكهربائي.

الحل

إذا كان معدل حقن الدواء هو 650 µg/C، فإنَّ حقن 80 µg يتطلب شحنة كلية مقدارها

$$q = \frac{80\ \mu g}{650\ \mu g/C} = 0.123\ C$$

يتدفق التيار بمعدل ثابت، إذًا التكامل في المعادلة 5.2 يساوي

$$q = \int_0^t i\,dt' = it$$

بإيجاد قيمة t والتعويض بالقيم، حصلنا على الناتج

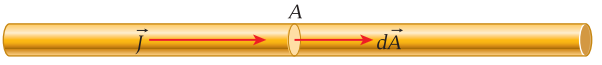
$$q = it \Rightarrow t = \frac{q}{i} = \frac{0.123\ \text{C}}{0.14 \times 10^{-3}\ \text{A}} = 880\ \text{s}$$

سوف يستغرق العلاج بالإرحال الأيوني للاعب الرياضي 15 دقيقة تقريبًا.

5.2 كثافة التيار Current Density

فكّر في تيار متدفق في موصِّل ما. بالنسبة إلى المستوى العمودي على الموصّل، يمثل التيار المتدفق لكل وحدة مساحة عبر الموصِّل عند هذه النقطة (مساحة المقطع العرضي A في الشكل 5.5) **كثافة التيار**، $\vec{J}$ يُعرف اتجاه $\vec{J}$ بأنّه اتجاه السرعة المتجهة للشحنات الموجبة (أو الاتجاه المضاد للشحنات السالبة) المارة عبر المستوى. التيار المتدفق عبر المستوى يساوي

$$i = \int \vec{J} \cdot d\vec{A} \tag{5.3}$$



الشكل 5.5 المقطع العرضي من موصل (سلك)، يقطعه المستوى العمودي ويكوّن مساحة المقطع عرضي A.

حيث يمثل $d\vec{A}$ عنصر المساحة التفاضلية للمستوى المتعامد، كما هو موضح في الشكل 5.5. بما أنَّ التيار منتظم وعمودي على المستوى، إذًا $i = JA$، ويمكن التعبير عن كثافة التيار كما يلي

$$J = \frac{i}{A} \tag{5.4}$$

في الموصِّل الذي لا يسري فيه تيار، تتحرك إلكترونات التوصيل بشكل عشوائي. حينما يتدفق التيار عبر الموصِّل، تواصل الإلكترونات حركتها العشوائية إلا أنَّها تتمتع أيضًا بما يسمى **سرعة الانْسياق**، $\vec{v}_d$ في الاتجاه المقابل لاتجاه المجال الكهربائي الدافع للتيار. يُقدَّر مقدار سرعة الحركة العشوائية بحوالي 10^6 m/s. في حين يُقدر مقدار سرعة الانْسياق بحوالي 10^{-4} m/s أو أقل. بسبب سرعة الانْسياق البطيئة هذه، قد تتساءل عن سبب إضاءة المصباح على الفور بمجرد تشغيل المفتاح. تتمثل الإجابة في أنَّ المفتاح ينشئ مجالًا كهربائيًّا في كل أجزاء الدائرة على الفور (بسرعة مقدارها 3×10^8 m/s تقريبًا)، ما يؤدي إلى حركة فورية للإلكترونات الحرة في الدائرة بأكملها (بما في ذلك داخل المصباح).

ترتبط كثافة التيار بسرعة انسياق الإلكترونات المتحركة. فكّر في موصِّل ذي مساحة مقطع عرضي A وتم تطبيق المجال الكهربائي $\vec{E}$ عليه. افترض أنَّ الموصِّل يحتوي على n من إلكترونات التوصيل لكل وحدة حجم، وأنَّ كل الإلكترونات لها سرعة انسياق متساوية، وأنَّ كثافة التيار منتظمة. ستنساق الإلكترونات المشحونة بشحنة سالبة في الاتجاه المضاد لاتجاه المجال الكهربائي. في الفترة الزمنية dt، يتحرك كل إلكترون مسافة صافية مقدارها $v_d\,dt$. ومن ثَمَّ، حجم الإلكترونات المارة عبر المقطع العرضي للموصل في الزمن dt يساوي $Av_d\,dt$، وعدد الإلكترونات في هذا الحجم يساوي $nAv_d\,dt$. كل إلكترون مشحون بشحنة $-e$، إذًا الشحنة dq المتدفقة عبر المساحة في الزمن dt تساوي

$$dq = -nev_dA\,dt \tag{5.5}$$

إذًا، التيار يساوي

$$i = \frac{dq}{dt} = -nev_dA \tag{5.6}$$

كثافة التيار الناتجة تساوي

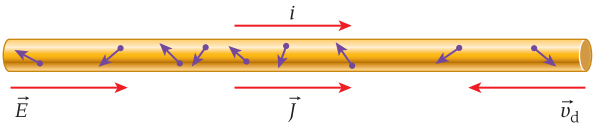
$$J = \frac{i}{A} = -nev_d \tag{5.7}$$

تم اشتقاق المعادلة 5.7 في بُعد مكاني واحد، حسبما يتناسب مع السلك. ومع ذلك، يمكن تعميمها بسهولة على الاتجاهات العشوائية في المساحة ثلاثية الأبعاد:

$$\vec{J} = -(ne)\vec{v}_d$$

يمكنك ملاحظة أنَّ متجه سرعة الانْسياق موازي لمتجه كثافة التيار ومضاد له في الاتجاه، كما وضحنا سابقًا.

يوضح الشكل 5.6 رسمًا تخطيطيًّا لأحد الأسلاك التي يسري فيها التيار. حاملات التيارات الفيزيائية عبارة عن إلكترونات مشحونة بشحنة سالبة. في الشكل 5.6، تتحرك هذه الإلكترونات ناحية اليسار بسرعة انْسياق $\vec{v}_d$ ومع ذلك، يتجه كل من المجال الكهربائي وكثافة التيار والتيار جميعًا ناحية اليمين وفقًا لمبدأ أنَّ هذه الكميات تشير إلى شحنات موجبة. قد تجد هذا المبدأ محيرًا بعض الشيء، لكن يتحتم عليك تذكره.



الشكل 5.6 تتحرك الإلكترونات في السلك من اليمين إلى اليسار، مسببة تيارًا في الاتجاه من اليسار إلى اليمين.

مسألة محلولة 5.1 سرعة انْسياق الإلكترونات في سلك نحاسي

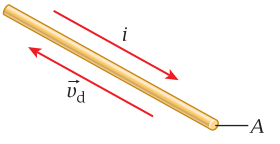
المسألة

تلعب الآن لعبة "مدمر المجرات" على وحدة تحكم ألعاب الفيديو. تعمل وحدة تحكم الألعاب بجهد 12 V وتتصل بالوحدة الرئيسة عبر سلك نحاسي معيار 18 وطوله 1.5 m. وحينما تحلق بسفينتك الفضائية في المعركة، فإنَّك توجّه ذراع التحكم إلى الوضع الأمامي لمدة 5.3 s، مرسلًا تيارًا بمقدار 0.78 mA إلى وحدة التحكم. ما مقدار المسافة التي تحركتها الإلكترونات في السلك خلال هذه الثواني القليلة، في الوقت الذي عبرت سفينتك الفضائية على الشاشة نصف النظام النجمي؟

الحل

فكّر لإيجاد مقدار المسافة التي تقطعها الإلكترونات في السلك خلال فترة زمنية محددة، نحتاج إلى حساب سرعة انسياقها. لتحديد سرعة انسياق الإلكترونات في السلك النحاسي الحامل للتيار، يجب إيجاد كثافة الإلكترونات الحاملة للشحنة في النحاس. بعد ذلك، يمكننا تطبيق تعريف كثافة الشحنة لحساب سرعة الانسياق.

ارسم يوضح الشكل 5.7 سلكًا نحاسيًا مساحة مقطعه A ويحمل التيار، i. ويوضح الشكل أيضًا أنَّه، وفقًا للمتفق عليه، تنساق الإلكترونات في الاتجاه المضاد لاتجاه التيار.



الشكل 5.7 سلك نحاسي مساحة مقطعه العرضي A ويحمل تيارًا، i.

ابحث حصلنا على المسافة x التي تقطعها الإلكترونات خلال الفترة الزمنية t من

$$x = v_d t$$

حيث تمثل v_d سرعة انْسياق الإلكترونات. ترتبط سرعة الانْسياق بكثافة التيار بالمعادلة 5.7:

$$\frac{i}{A} = -nev_d \quad \text{(i)}$$

حيث يمثل i التيار، و A مساحة المقطع العرضي ($0.823\ mm^2$ لسلك معيار 18)، ويمثل n كثافة الإلكترونات، ويمثل $-e$ شحنة الإلكترون. تُعرّف كثافة الإلكترونات بأنّها

$$\frac{\text{عدد إلكترونات التوصيل}}{\text{الحجم}} = n$$

يمكننا حساب كثافة الإلكترونات بافتراض وجود إلكترون توصيل واحد في كل ذرة نحاس. كثافة النحاس تساوي

$$\rho_{Cu} = 8.96\ g/cm^3 = 8960\ kg/m^3$$

كتلة المول الواحد من النحاس تساوي 63.5 g وتحتوي على 6.02×10^{23} ذرة. ومن ثَمَّ، فإنَّ كثافة الإلكترونات تساوي

$$n = \left(\frac{1\ \text{إلكترون}}{1\ \text{ذرة}}\right)\left[\frac{6.02\times10^{23}\ \text{ذرة}}{63.5\ g}\right]\left[\frac{8.96\ g}{1\ cm^3}\right]\left[\frac{10^6\ cm^3}{1\ m^3}\right] = 8.49\times10^{28}\ \frac{\text{إلكترون}}{m^3}$$

حوّل إلى أبسط صورة نوجد حل المعادلة (i) لإيجاد مقدار سرعة الانسياق:

$$v_d = \frac{i}{neA}$$

إذًا المسافة التي تقطعها الإلكترونات تساوي

$$x = v_d t = \frac{i}{neA} t$$

احسب بالتعويض بالقيم العددية، نحصل على

$$x = v_d t = \frac{it}{neA} = \frac{\left(0.78\times10^{-3}\ \text{A}\right)(5.3\ \text{s})}{\left(8.49\times10^{28}\ \text{m}^{-3}\right)\left(1.602\times10^{-19}\ \text{C}\right)\left(0.823\ \text{mm}^2\right)}$$
$$= \left(6.96826\times10^{-8}\ \text{m/s}\right)(5.3\ \text{s})$$
$$= 3.69318\times10^{-7}\ \text{m}$$

قرّب نقرّب النتائج التي حصلنا عليها إلى رقمين معنويين:

$$v_d = 7.0\times10^{-8}\ \text{m/s}$$

و

$$x = 3.7\times10^{-7}\ \text{m} = 0.37\ \mu\text{m}$$

تحقق ثانية تَبيَّن أنَّ النتيجة التي حصلنا عليها لمقدار سرعة الانْسياق تمثل عددًا صغيرًا بدرجة مذهلة. عرفنا سابقًا أنَّ سرعات الانسياق تكون حوالي 10^{-4} m/s أو أقل. بما أنَّ التيار متناسب مع سرعة الانْسياق، إذًا، يشير التيار ذو المقدار الصغير نسبيًّا إلى سرعة انسياق بطيئة نسبيًّا. يمكن أن يحمل سلك معيار 18 تيارًا تبلغ شدته عدة أمبيرات، لذا فإنَّ التيار المحدد في المسألة أقل من 1% من الحد الأقصى للتيار. ومن ثمَّ، فإنَّ حقيقة أنَّ سرعة الانسياق المحسوبة أقل من 1% من 10^{-4} m/s التي تمثل سرعة الانسياق العادية للتيارات العالية، إذًا فهي سرعة معقولة.

تعد المسافة المحسوبة لحركة الإلكترونات أقل من 0.001 من سُمك ظفر الإصبع، وهي مسافة قصيرة للغاية مقارنة بطول السلك. تقدم هذه النتيجة تذكيرًا قيّمًا وهو أنَّ المجال الكهرومغناطيسي يتحرك بمقدار سرعة الضوء (في الفراغ) نفسه تقريبًا داخل الموصِّل ويؤدي إلى انسياق كل إلكترونات التوصيل بشكل أساسي في الوقت ذاته. وبناءً عليه، تصل الإشارة المنبعثة من ذراع تحكم اللعبة إلى وحدة التحكم على الفور، على الرغم من البطء الشديد في سرعة الإلكترونات الفردية.



5.3 المقاومة النوعية والمقاومة Resistivity and Resistance

تتميز بعض المواد بتوصيلها الجيد للكهرباء عن غيرها. ينتج عن استخدام فرق جهد معين عبر موصّل جيد تيار كبير نسبيًّا؛ في حين ينتج عن استخدام فرق الجهد ذاته عبر عازل ما تيار ضئيل. **المقاومَة النوعية**، ρ، هي قياس مدى معاوقة المادة لتدفق التيار الكهربائي. و**المقاومة**، R، هي معاوقة الموصل لتدفق التيار الكهربائي.

في حال استخدام فرق جهد كهربائي معروف، ΔV، معروف عبر موصّل ما (جهاز أو مادة فيزيائية موصلة للتيار) وتم قياس التيار الناتج، i، يتم تحديد مقاومة هذا الموصل من خلال العلاقة

$$R = \frac{\Delta V}{i} \tag{5.8}$$

وحدات المقاومة هي الفولت لكل أمبير، وهي وحدة مشتقة أُطلق عليه اسم **أوم** ويُستخدم الرمز Ω (الحرف اليوناني الكبير أوميجا) تكريمًا لعالم الفيزياء اليوناني جورج سايمون أوم (1789 – 1854):

$$1\ \Omega = \frac{1\ \text{V}}{1\ \text{A}}$$

ينتج عن إعادة ترتيب المعادلة 5.8 ما يلي

$$i = \frac{\Delta V}{R} \tag{5.9}$$

وهذا ينص على أنَّه بالنسبة إلى فرق الجهد المحدد، ΔV، يتناسب التيار، i، تناسبًا عكسيًّا مع المقاومة، R. يُشار إلى هذه المعادلة عادة باسم **قانون أوم**. وكذلك يُشار في بعض الأحيان إلى إعادة ترتيب المعادلة 5.9، $\Delta V = iR$، باسم قانون أوم.

تُوصف الأجهزة أحيانًا من حيث **التوصيل**، G. ويعرف كما يلي

$$G = \frac{i}{\Delta V} = \frac{1}{R}$$

للتوصيل وحدة مشتقة في النظام الدولي وهي السيمنز (S)، نسبة إلى المخترع ورجل الصناعة الألماني إيرنست فيرنر فون سيمنز (1816 – 1892):

$$1\ \text{S} = \frac{1\ \text{A}}{1\ \text{V}} = \frac{1}{1\ \Omega}$$

في بعض الموصلات، تعتمد المقاومة النوعية على الاتجاه الذي يتدفق فيه التيار. تفترض هذه الوحدة أنَّ المقاومة النوعية لمادة منتظمة بالنسبة إلى جميع اتجاهات التيار.

تعتمد مقاومة الجهاز على المادة المصنوع منها وكذلك تصميمه الهندسي. وكما ذكرنا سابقًا، تُحدد المقاومة النوعية لمادة مدى معاوقتها لتدفق التيار. يتم تعريف المقاومة النوعية بدلالة مقدار المجال الكهربائي المستخدم، E، ومقدار كثافة التيار الناتج، J:

$$\rho = \frac{E}{J} \tag{5.10}$$

وحدات المقاومة النوعية هي

$$[\rho] = \frac{[E]}{[J]} = \frac{\text{V/m}}{\text{A/m}^2} = \frac{\text{V m}}{\text{A}} = \Omega\ \text{m}$$

يظهر الجدول 5.1 المقاومة النوعية لبعض الموصِّلات عند درجة حرارة 20°C. وكما ترى، تبلغ القيم النموذجية للمقاومة النوعية للموصِّلات الفلزية المستخدمة في الأسلاك حوالي $10^{-8}\ \Omega\ \text{m}$. على سبيل المثال، تبلغ المقاومة النوعية للنحاس $2 \times 10^{-8}\ \Omega\ \text{m}$ تقريبًا. تتميز العديد من السبائك الفلزية المدرجة في الجدول 5.1 بخصائصها المفيدة. على سبيل المثال، غالبًا ما يستخدم السلك المصنوع من النيكروم (80% من النيكل و20% من الكروم) كعنصر تسخين في الأجهزة الكهربائية مثل المحمصة الكهربائية. عند تحميص الخبز في المرة التالية، ألقِ نظرة داخل المحمصة. من المحتمل أن تكون العناصر المتوهجة هي أسلاك النيكروم. تبلغ المقاومة النوعية للنيكروم $(108 \times 10^{-8}\ \Omega\ \text{m})$ حوالي 50 ضعف المقاومة النوعية للنحاس. ومن ثَمَّ، حينما يسري التيار في أسلاك النيكروم في المحامص، تبدد الأسلاك القدرة وتزداد سخونتها إلى أن تتوهج بلون أحمر باهت، في حين تظل أسلاك النحاس داخل السلك الكهربائي الموصلة بين المحمصة والجدار باردة.

في بعض الأحيان، تصنف المواد بدلالة قدرتها على **التوصيل (الموصلية)**، σ، بدلًا من مقاومتها النوعية، ρ؛ تعرف الموصلية بأنَّها

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

وحدة المقاومة النوعية هي $(\Omega\ \text{m})^{-1}$.

يمكن إيجاد مقاومة الموصِّل من مقاومته النوعية وتصميمه الهندسي. بالنسبة إلى الموصِّل المتجانس الذي طوله L وله مساحة مقطع عرضي ثابت A، يمكن استخدام المعادلة $\Delta V = -\int \vec{E} \cdot d\vec{s}$ لربط المجال الكهربائي، E، بفرق الجهد الكهربائي، ΔV، عبر الموصِّل:

$$E = \frac{\Delta V}{L}$$

لاحظ أنَّه على النقيض من الكهرباء الساكنة، عندما يكون سطح أي موصِّل متساوي الجهد ولا يحتوي على مجال كهربائي بداخله ولا يتدفق عبره أي تيار، فإنَّ الموصِّل في هذه الحالة له $\Delta V \neq 0$ و$\vec{E} \neq 0$، ما ينتج عنه تدفق التيار. مقدار كثافة التيار يساوي التيار مقسومًا على مساحة المقطع العرضي.

$$J = \frac{i}{A}$$

من تعريف المقاومة النوعية (المعادلة 5.10) واستخدام $J = i/A$ وقانون أوم (المعادلة 5.8)، نحصل على

$$\rho = \frac{E}{J} = \frac{\Delta V/L}{i/A} = \frac{\Delta V}{i}\frac{A}{L} = \frac{iR}{i}\frac{A}{L} = R\frac{A}{L}$$

الجدول 5.1 المقاومة النوعية ومعامل درجة الحرارة للمقاومة النوعية لبعض الموصلات المختارة

المادة	المقاومة النوعية، ρ، عند 20 °C $(10^{-8}\ \Omega\ \text{m})$	معامل درجة الحرارة، α $(10^{-3}\ \text{K}^{-1})$
الفضة	1.62	3.8
النحاس	1.72	3.9
الذهب	2.44	3.4
الألمنيوم	2.82	3.9
النحاس الأصفر	3.9	2
التنجستن	5.51	4.5
النيكل	7	5.9
الحديد	9.7	5
الفولاذ	11	5
التنتالوم	13	3.1
الرصاص	22	4.3
الكونستانتان	49	0.01
الفولاذ المقاوم للصدأ	70	1
الزئبق	95.8	0.89
النيكروم	108	0.4

تعتمد قيم الفولاذ والفولاذ المقاوم للصدأ بدرجة كبيرة على نوع الفولاذ.

ينتج عن إعادة ترتيب الحدود تعبير لمقاومة الموصِّل بدلالة المقاومه النوعية للمادة المصنوع منها وطوله ومساحة المقطع العرضي.

$$R = \rho \frac{L}{A} \tag{5.11}$$

لاحظ أنَّه في النهاية $A \to \infty$، تشير المعادلة 5.11 إلى أنَّ $R \to 0$. ومن ثَمَّ فإنَّ المعادلة مجرد تقريب فقط، حيث ستظل إلكترونات التوصيل تتعرض لبعض المقاومة أثناء حركتها عبر طول المادة L التي كثافتها ρ. ومع ذلك، بالنسبة إلى جميع الأسلاك المستخدمة في الواقع، تمثل المعادلة 5.11 تقريبًا ممتازًا.

الأبعاد المتفق عليها للأسلاك

يحدد معيار أبعاد الأسلاك الأمريكي (American Wire Gauge (AWG) أقطار الأسلاك، ومن ثَمَّ مساحات مقطعها العرضي بمقياس لوغاريتمي. يوضح الجدول 5.2 معيار الأسلاك الأمريكي يرتبط معيار السلك بقطره: كلما زاد رقم المعيار، زادت قل سمك السلك. بالنسبة إلى الأسلاك ذات القطر الكبير، يتألف رقم المعيار من صفر أو أكثر، كما هو موضح في الجدول 5.2. السلك الذي معياره 00 يعادل المعيار 1−، والسلك الذي معياره 000 يعادل المعيار 2−، وهكذا. حسب التعريف، السلك الذي معياره 36 يبلغ قطره 0.005 in. والسلك الذي معياره 0000 يبلغ قطره 0.46 in. (تظهر هذه الأبعاد باللون الأحمر في الجدول 5.2). ثمة 39 قيمة معيارية من المعيار 0000 إلى المعيار 36. كما يعد رقم المعيار تمثيلًا لوغاريتميًّا لقطر السلك. ومن ثَمَّ، تتمثل معادلة تحويل معيار الأسلاك الأمريكي إلى قطر السلك، بالبوصة، في $d = (0.005)92^{(36-n)/39}$، حيث يمثل n رقم المعيار. تُستخدم الأسلاك في الأماكن السكنية من معيار 12 وحتى معيار 10 بشكل نموذجي. ثمة قاعدة عملية مهمة تفيد بأنَّ الاختزال بمقدار 3 معايير يضاعف مساحة المقطع العرضي للسلك. لنتفحص المعادلة 5.11. يمكنك ملاحظة أنَّه لتقليل مقاومة لها طول سلك محدد إلى النصف، يجب أن تختزل رقم المعيار بمقدار 3.

الجدول 5.2 تُحدد الأقطار ومساحات المقاطع العرضية حسب المتفق عليه في معيار الأسلاك الأمريكي

المعيار AWG	d (in)	d (mm)	A (mm²)
000000	0.5800	14.733	170.49
00000	0.5165	13.120	135.20
0000	0.46	11.684	107.22
000	0.4096	10.405	85.029
00	0.3648	9.2658	67.431
0	0.3249	8.2515	53.475
1	0.2893	7.3481	42.408
	...		
8	0.1285	3.2636	8.3656
9	0.1144	2.9064	6.6342
10	0.1019	2.5882	5.2612
11	0.0907	2.3048	4.1723
12	0.0808	2.0525	3.3088
13	0.0720	1.8278	2.6240
14	0.0641	1.6277	2.0809
15	0.0571	1.4495	1.6502
16	0.0508	1.2908	1.3087
17	0.0453	1.1495	1.0378
18	0.0403	1.0237	0.8230
	...		
35	0.0056	0.1426	0.0160
36	0.005	0.1270	0.0127
37	0.0045	0.1131	0.0100
	...		

مثال 5.2 مقاومة السلك النحاسي

تتميز الأسلاك القياسية التي يستخدمها فنيو الكهرباء في التوصيلات السكنية بمقاومة منخفضة جدًا

المسألة

ما مقدار مقاومة سلك نحاسي معيار 12 وطوله 100.0 m يُستخدم في توصيل المقابس الكهربائية في المنازل؟

الحل

قطر السلك النحاسي معيار 12 يبلغ 2.053 mm (انظر الجدول 5.2). إذًا مساحة المقطع العرضي تساوي

$$A = 3.31 \text{ mm}^2$$

باستخدام قيمة المقاومة النوعية للنحاس من الجدول 5.1 والمعادلة 5.11، نحصل على

$$R = \rho \frac{L}{A} = (1.72 \times 10^{-8} \ \Omega\text{m}) \frac{100.0 \text{ m}}{3.31 \times 10^{-6} \text{ m}^2} = 0.520 \ \Omega$$

مراجعة المفاهيم 5.1

إذا تضاعف قطر السلك في المثال 5.2، فإنَّ مقاومته

a) تزيد بمعامل 4.

b) تزيد بمعامل 2.

c) ستبقى كما هي.

d) ستقل بمعامل 2.

e) ستقل بمعامل 4.

رموز المقاوِم

في العديد من الاستعمالات، يستدعي تصميم الدائرة مجموعة من المقاومات في عدة أجزاء من الدائرة. تتميز المقاوِمات المتاحة لأغراض تجارية، مثل الموضحة في الشكل 5.8a بنطاق كبير من المقاومات. تصنع المقاوِمات بصفة عامة من الكربون المغلف بالبلاستيك مثل الكبسولات الطبية، والمزود بأسلاك بارزة من الطرفين من أجل التوصيل الكهربائي. تتضح قيمة المقاومة بثلاثة أو أربعة أشرطة من الألوان على الغلاف البلاستيكي. يشير الشريطان الأولان إلى عدد الأجزاء العشرية، ويمثل الثالث قوة العدد 10 في حين يمثل الرابع التحمل على مدار نطاق من القيم. بالنسبة إلى الجزء العشري وقوة العدد 10، فإنَّ الأعداد المرتبطة بالألوان هي الأسود = 0 والبني = 1 والأحمر = 2 والبرتقالي = 3 والأصفر = 4

والأخضر = 5 والأزرق = 6 والأرجواني = 7 والرمادي = 8 والأبيض = 9. بالنسبة إلى درجة التفاوت (نسبة الخطأ) ، اللون البني تساوي 1% والأحمر تساوي 2% والذهبي تساوي 5% والفضي تساوي 10% وعدم وجود شريط ملون على الإطلاق تساوي .20% على سبيل المثال، تتميز المقاومة الأحادية الموضحة في الشكل 5.8b بالألوان التالية (من اليسار إلى اليمين): البني والأخضر والبني والذهبي. يتبين من الرمز أنَّ مقاومة هذا المقاوم تساوي $150\ \Omega = 15 \times 10^{1}\ \Omega$ بنسبة تفاوت (خطأ) 5%.

درجة الحرارة والموصلية الفائقة

تختلف قيم المقاومة النوعية والمقاومة بحسب درجة الحرارة. بالنسبة إلى الفلزات، يكون هذا الاعتماد على درجة الحرارة خطيًّا في نطاق كبير من درجات الحرارة. العلاقة الأمبيرية لاعتماد المقاومة النوعية للفلزات على درجة الحرارة هي

$$\rho - \rho_0 = \rho_0 \alpha (T - T_0) \tag{5.12}$$

حيث يمثل ρ المقاومة النوعية في درجة الحرارة T، ويمثل ρ_0 المقاومة النوعية في درجة الحرارة T_0، ويمثل α **معامل درجة حرارة المقاومة النوعية الكهربائية** للموصل المحدد.

غالبًا ما يكون تأثير درجة الحرارة للمقاومة مهمًّا في الاستعمالات اليومية. تنص المعادلة 5.11 على أنَّ مقاومة الجهاز تعتمد على طوله ومساحة المقطع العرضي. وهكذا يمكن تقريب التأثير الحراري لمقاومة موصل ما كما يلي

$$R - R_0 = R_0 \alpha (T - T_0) \tag{5.13}$$

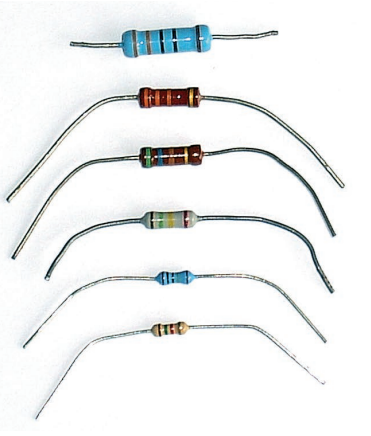
لاحظ أنَّ المعادلتين 5.12 و5.13 تتعاملان مع الفروق في درجات الحرارة، ومن ثَمَّ يمكن التعبير عن درجات الحرارة بالدرجات السيليزية أو بالكلفن (ولا يعبر عنها بدرجات فهرنهايت!). لاحظ أيضًا أنَّ T_0 لا يشترط بالضرورة أن تكون درجة حرارة الغرفة.

يوضح الجدول 5.1 قيم α لمجموعة من الموصِّلات. لاحظ أنَّ الموصِّلات الفلزية الشائعة مثل النحاس لها معامل درجة حرارة للمقاومة النوعية الكهربائية في حدود $4 \times 10^{-3}\ K^{-1}$. ومع ذلك، تتميز إحدى السبائك الفلزية، وتسمى كونستنتان (60% من النحاس و40% من النيكل)، بخصائص من نوع خاص تتمثل في أنَّ معامل درجة حرارة للمقاومة النوعية الكهربائية لها ضئيل للغاية: $\alpha = 1 \times 10^{-5}\ K^{-1}$. يُشتق اسم هذه السبيكة من اختصار العبارة "المقاومة الثابتة" باللغة الإنجليزية. إنَّ معامل درجة الحرارة لكونستنتان الضئيل مع مقاومة نوعية عالية نسبيًّا ومقدارها $4.9 \times 10^{-7}\ \Omega$ يجعلها مفيدة لمقاومات الضبط التي تتميز بمقاومة قليلة الاعتماد على درجة الحرارة. لاحظ أيضًا أنَّ النيكروم له معامل حرارة ضئيل نسبيًّا، $4 \times 10^{-4}\ K^{-1}$، ما يجعله مناسبًا لتصنيع عناصر التسخين، كما عرفنا سابقًا.

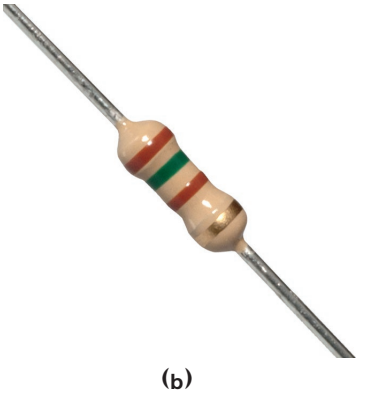
وفقًا للمعادلة 5.12، تتميز معظم المواد بمقاومة نوعية تختلف خطيًّا حسب درجة الحرارة في ظل الظروف العادية. ومع ذلك، لا تتبع بعض المواد هذه القاعدة في درجات الحرارة المنخفضة. في درجات الحرارة المنخفضة جدًا، تصل مقاوميَّة بعض المواد إلى صفر. يُطلق على هذه المواد اسم **الموصِّلات الفائقة**. تُستعمل الموصِّلات الفائقة في تصميم مغناطيسات الأجهزة مثل جهاز التصوير بالرنين المغناطيسي (MRI). تستخدم المغناطيسات المصنوعة من الموصِّلات الفائقة مقدارًا أقل من الطاقة وتنتج مجالات مغناطيسية أقوى من المغناطيسات المصممة من الموصِّلات ذات المقاومة التقليدية. ستتم مناقشة الموصليَّة الفائقة بمزيد من التفاصيل في الوحدة 8.

في الواقع، تنخفض مقاومة بعض المواد شبه الموصِّلة كلما زادت درجة الحرارة، ما يشير إلى أنَّ لها معامل درجة حرارة سالب للمقاوميَّة الكهربائية. غالبًا ما تستخدم هذه المواد في أجهزة الكشف عالية الدقة لإجراء القياسات البصرية أو في أجهزة الكشف عن الجسيمات. يجب الحفاظ على تبريد هذه الأجهزة للحفاظ على مقاومتها العالية، وهذا الأمر يمكن تحقيقه باستخدام المبردات أو النيتروجين السائل.

يعرف *الثيرموستور* بأنَّه جهاز شبه موصِّل تعتمد مقاومته بدرجة كبيرة على درجة الحرارة. تستخدم أجهزة الثيرموستور لقياس درجة الحرارة. يوضح الشكل 5.9a التأثير الحراري لمقاومة الثيرموستور النموذجي. يمكنك أن تلاحظ هنا أنَّ مقاومة الثيرموستور تنخفض كلما زادت درجة الحرارة. يأتي هذا الانخفاض في المقاومة على النقيض من زيادة مقاومة السلك النحاسي الذي يتعرض لمعدل درجة الحرارة نفسه، كما هو موضح في الشكل 5.9b.



(a)



(b)

الشكل 5.8 (a) مجموعة من المقاومات لها مقاوَمات مختلفة. (b) رموز لونية لمقاوم 150 Ω.

مراجعة المفاهيم 5.2

إذا زادت درجة حرارة سلك نحاسي مقاومته 100 Ω بمقدار 25 K، فإنَّ المقاومة

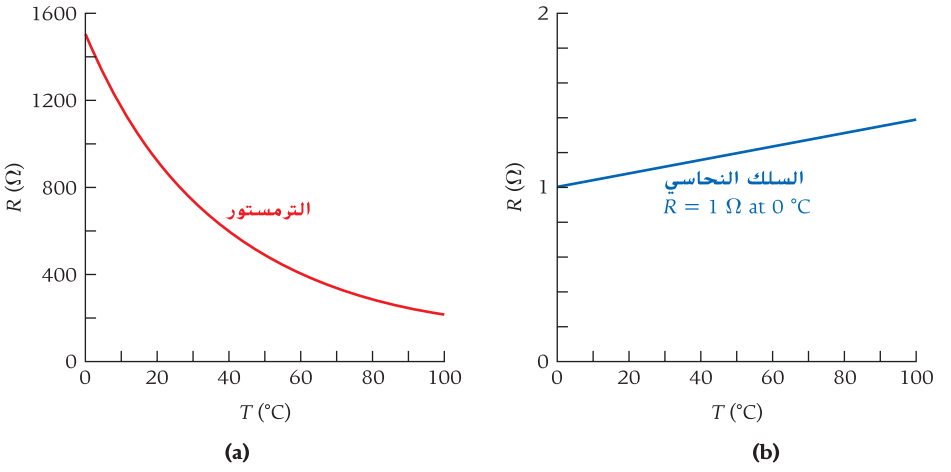
a) ستزيد بمقدار 10 Ω تقريبًا.

b) ستزيد بمقدار 4 m Ω تقريبًا.

c) ستقل بمقدار 4 m Ω تقريبًا.

d) ستقل بمقدار 10 Ω تقريبًا.

e) ستبقى كما هي.



الشكل 5.9 (a) التأثير الحراري لمقاومة ثيرموستور. (b) التأثير الحراري لمقاومة سلك نحاسي مقاومته 1 Ω عند $T = 0°C$.

الأساس المجهري للتوصيل في المواد الصلبة

ينتج توصيل التيار في المواد الصلبة عن حركة الإلكترونات. في الموصِّل الفلزي مثل النحاس، تكوِّن ذرات الفلز مصفوفة منتظمة يُطلق عليها *الشبكة البلورية*. حيث تتمتع الإلكترونات الخارجية في كل ذرة بحرية الحركة العشوائية في تلك الشبكة. في حال استعمال مجال كهربائي، تنساق الإلكترونات في الاتجاه المضاد لاتجاه المجال الكهربائي. تحدث المقاومة لهذا الانسياق عندما تتفاعل الإلكترونات مع ذرات الفلز في الشبكة. كلما زادت درجة حرارة الفلز، زادت حركة الذرات في الشبكة. في المقابل، ينتج عن هذا زيادة احتمالية تفاعل الإلكترونات مع الذرات، ما يؤدي إلى زيادة مقاومة الفلز على نحو فعال. لا يتضمن هذا الكتاب مناقشة تفصيلية عن التفاعل بين ذرات الشبكة الذرية وإلكترونات التوصيل. تفي العلاقات التقريبية المحددة في المعادلتين 5.12 و5.13 والناتجة عن هذا التفاعل بتحقيق الهدف المقصود.

تنتظم ذرات شبه الموصِّل في شبكة بلوري أيضًا. إلا أنَّ الإلكترونات الخارجية لذرات شبه الموصِّل ليست حرة الحركة داخل الشبكة. لكي تتحرك الإلكترونات، يجب أن تحصل على مقدار كافٍ من الطاقة لتصل إلى حالة الطاقة التي يمكنها فيها التحرك بحرية. ومن هنا، تكون لشبه الموصل العادي مقاومة أعلى من الموصل الفلزي لاحتوائه على عدد أقل من إلكترونات التوصيل. إضافة إلى هذا، عند تسخين شبه الموصل، تكتسب الكثير من الإلكترونات طاقة كافية للتحرك بحرية؛ ومن ثَمَّ، كلما زادت درجة حرارة شبه الموصل تقل مقاومته.



5.4 القوة الدافعة الكهربائية وقانون أوم
Electromotive Force and Ohm's Law

لانتقال التيار عبر المقاوم، يجب أن يوجد فرق جهد عبر المقاوم. ويُطلق على فرق الجهد الذي تزوده البطارية أو أي جهاز آخر اسم **القوة الدافعة الكهربائية**، ويُشار لها بالرمز **emf**. (القوة الدافعة الكهربائية ليست قوة على الإطلاق، ولكنها فرق في الجهد. ولا يزال هذا المصطلح مستخدمًا بشكل واسع الذي يرمز إليه بشكل أساسي بالرمز "emf"). يُطلق على الجهاز الذي يحافظ على فرق الجهد اسم *جهاز القوة الدافعة الكهربائية* ويبذل شغلًا على حاملات الشحنات. يُرمز لفرق الجهد الذي ينتج عن جهاز القوة الدافعة الكهربائية بالرمز V_{emf}. يفترض هذا النص أنَّ أجهزة القوة الدافعة الكهربائية لها طرفين يمكن للدائرة أن تتصل بهما. ويُفترض أنَّ جهاز القوة الدافعة الكهربائية يحافظ على فرق جهد ثابت، V_{emf} بين هذين الطرفين.

. تحوِّل الخلايا الشمسية الطاقة الضوئية المنبعثة من الشمس إلى طاقة كهربائية. إذا تفحصت بطارية ما، فستجد فرق الجهد الخاص بها مكتوبًا عليها (يُطلق عليه أحيانًا اسم "الفولتية"). هذه "الفولتية" هي فرق الجهد (القوة الدفعة الكهربائية) الذي يمكن أن توفره البطارية للدائرة.

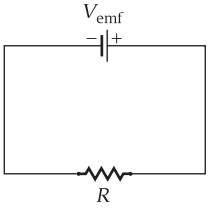
(لاحظْ أنَّ البطارية عبارة عن مصدر قوة دافعة كهربائية ثابتة، فهي لا توفر تيارًا ثابتًا للدائرة). تعرض البطاريات القابلة للشحن تصنيفًا بوحدة mAh (مللي أمبير ساعة) الذي يوفر معلومات عن الشحنة الكلية التي يمكن للبطارية توفيرها عندما تكون مشحونة بالكامل. وحدة mAh هي وحدة أخرى للشحنة:

$$1\ \text{mAh} = (10^{-3}\ \text{A})(3600\ \text{s}) = 3.6\ \text{As} = 3.6\ \text{C}$$

يمكن أن تكون المكونات الكهربائية في دائرة ما عبارة عن مصادر لإنتاج القوة الدافعة الكهربائية، أو المكثفات، أو المقاومات، أو أي جهاز كهربائي آخر. تتصل هذه المكونات عن طريق أسلاك موصَّلة. ويجب أن يكون مكون واحد منها على الأقل مصدرًا لإنتاج القوة الدافعة الكهربائية لأنَّ فرق الجهد الذي ينتجه جهاز القوة الدافعة الكهربائية هو ما يدفع التيار عبر الدائرة. يمكنك تخيل جهاز القوة الدافعة الكهربائية على أنَّه مضخة في خط أنابيب مياه؛ حيث إنَّه من دون المضخة، ستبقى المياه راكدة داخل الأنبوب ولن تتحرك. وبمجرد أن يتم تشغيل المضخة، تتحرك المياه عبر الأنبوب بتدفق مستمر.

تبدأ الدائرة الكهربائية وتنتهي عند جهاز القوة الدافعة الكهربائية. بما أنَّ جهاز القوة الدافعة الكهربائية يحافظ على فرق جهد ثابت، V_{emf}، بين طرفيه، ينتقل التيار الاصطلاحي الموجب من الجهاز من الجهد الأعلى لطرفه الموجب ويتجه إلى الجهد الأقل لطرفه السالب. يتم تعيين هذا الجهد الأقل عادةً إلى صفر.

فكِّر في دائرة بسيطة مثل الموضَّحة في الشكل 5.10، حيث يوفر مصدر القوة الدافعة الكهربائية فرق جهد، V_{emf}، عبر مقاوم له مقاومة R. لاحظْ مبدأ مهمًّا للرسوم التخطيطية للدائرة: دائمًا ما يُرمز إلى المقاوِم بخط متعرج، ويُفترض أنَّ كل المقاومة، R، مُركَّزة في هذا الموضع. يتم تمثيل الأسلاك التي تصل العناصر المختلفة للدائرة بخطوط مستقيمة، وهي تعني أنه ليست لها أي مقاومة. بالطبع، للأسلاك المادية بعض المقاومة، ولكن يُفترض أن يتم تجاهلها لغرض الرسم التخطيطي.

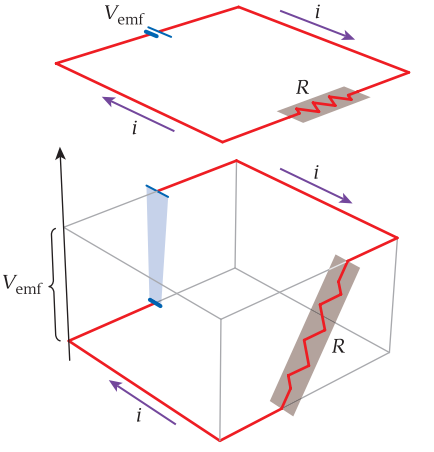


الشكل 5.10 دائرة بسيطة تحتوي على مصدر قوة دافعة كهربائية ومقاوم.

بالنسبة إلى دائرة ما مثل الموضَّحة في الشكل 5.10، يوفر جهاز القوة الدافعة الكهربائية فرق الجهد الذي يُكوِّن التيار المتدفق عبر المقاوم. ولذلك، في هذه الحالة، يمكن كتابة قانون أوم (المعادلة 5.9) بدلالة القوة الدافعة الكهربائية الخارجية بالصيغة

$$V_{\text{emf}} = iR \tag{5.14}$$

لاحظْ أنه، بخلاف قانون نيوتن للجاذبية أو قانون حفظ الطاقة، فإنَّ قانون أوم ليس قانونًا خاصًا بالطبيعة. حتى إنَّه لا ينطبق على كل المقاومات. بالنسبة إلى الكثير من المقاوِمات، وتسمى *المقاوِمات الأومية*، يتناسب التيار طرديًّا مع فرق الجهد عبر المقاوِم على مدى واسع من درجات الحرارة ومدى واسع من فروق الجهد المطبَّقة. بالنسبة إلى المقاوِمات الأخرى، وهي *المقاوِمات غير الأومية*، لا يتناسب التيار طرديًّا مع فرق الجهد على الإطلاق. تشتمل المقاوِمات غير الأومية على أنواع كثيرة من الترانزستورات، وهذا يعني أنَّ قانون أوم لا ينطبق على العديد من الأجهزة الكهربائية الحديثة. وسنتناول أحد هذه الأجهزة بنظرة عميقة، وهو الصمام الثنائي، في القسم 5.8. وعلى الرغم من ذلك، فإنَّ قانون أوم ينطبق على مجموعة كبيرة من المواد والأجهزة (مثل الأسلاك التقليدية)، ومن ثَمَّ فهو يستحق الانتباه إلى نتائجه. يتعامل ما تبقى من هذه الوحدة (باستثناء القسم 5.8) مع المقاوِمات بوصفها أجهزة أومية؛ أي الأجهزة التي ينطبق عليها قانون أوم.



الشكل 5.11 (a) تمثيل تقليدي لدائرة بسيطة بها مقاوم ومصدر قوة دافعة كهربائية. (b) تمثيل ثلاثي الأبعاد للدائرة نفسها، مبينًا الجهد عند كل نقطة في الدائرة. تم توضيح التيار في الدائرة في طريقتي العرض.

التيار، i، الذي يتدفق عبر المقاوِم في الشكل 5.10 يتدفق أيضًا عبر مصدر القوة الدافعة الكهربائية والأسلاك التي توصل المكونات. ولأنه من المفترض أن يكون للأسلاك مقاومة صفرية (كما هو مذكور أعلاه)، فإنَّه وفقًا لقانون أوم، يجب أن يحدث التغيير في جهد التيار في المقاوِم. ويشار إلى هذا التغيير باسم **انخفاض الجهد** عبر المقاوِم. ومن ثَمَّ، يمكن تمثيل الدائرة الموضَّحة في الشكل 5.10 بطريقة مختلفة توضِّح موضع انخفاض الجهد وتوضِّح جهد كل جزء من الدائرة. يوضِّح الشكل 5.11a الدائرة في الشكل 5.10. يوضِّح الشكل 5.11b الدائرة نفسها ولكن مع بُعد رأسي يمثل قيمة الجهد الكهربائي في نقاط مختلفة في الدائرة. يوفر مصدر القوة الدافعة الكهربائية فرق الجهد، ويحدث انخفاض الجهد بالكامل عبر مقاوِم واحد. (تذكَّر، أنَّ المتفق عليه هو أنَّ الخطوط التي تصل عناصر الدائرة في الرسم التخطيطي الدائرة تمثل الأسلاك من دون مقاومة. ومن ثَمَّ، فإنَّ أسلاك التوصيل ممثَّلة في الشكل 5.11b بخطوط أفقية، لتشير إلى أنَّ السلك بالكامل له قيمة الجهد ذاتها تمامًا). ينطبق قانون أوم على انخفاض الجهد عبر المقاوِم، ويمكن حساب التيار في الدائرة باستخدام المعادلة 5.9.

يوضِّح الشكل 5.11 نقطة مهمة عن الدوائر. تضيف مصادر القوة الدافعة الكهربائية فرق جهد إلى الدائرة، ويعمل انخفاض الجهد الذي يحدث عبر المقاومات على تقليل الجهد في الدائرة. على الرغم من ذلك، فإنَّ فرق الجهد الكلي في أي مسار مغلق في الدائرة الكاملة يجب أن يكون صفرًا. وهذه نتيجة مباشرة لقانون حفظ الطاقة. يمكن أن يساعد في هذا التشبيه بالجاذبية: يمكنك الحصول على طاقة الوضع وفقدانها عن طريق التحرك إلى أعلى وإلى أسفل في مجال جاذبية (على سبيل المثال، عن طريق صعود التلال ونزولها)، ولكن إذا وصلت إلى النقطة نفسها التي بدأت منها، فسيكون مجموع الطاقة المكتسبة أو المفقودة صفرًا. ينطبق الشيء نفسه على التيار المتدفق في دائرة ما: لا يهم عدد مرات انخفاض الجهد أو مصادر القوة الدافعة الكهربائية الموجودة في أي دائرة كهربائية مغلقة؛ حيث إنَّه دائمًا ما يكون للنقطة المحددة القيمة ذاتها من الجهد الكهربائي. يمكن أن يتدفق التيار عبر الدائرة الكهربائية في أي اتجاه بالنتيجة نفسها.

مقاومة جسم الإنسان

تأخذنا هذه المقدمة القصيرة عن المقاومة وقانون أوم إلى التحدث عن السلامة الكهربائية. ذكرنا سابقًا أنَّ التيارات التي تزيد على 100 mA يمكن أن تسبب الوفاة إذا مرت عبر عضلة القلب في الإنسان. ويوضِّح قانون أوم أنَّ مقاومة الجسم البشري هي التي تحدِّد ما إذا كان فرق الجهد المكتسب – من بطارية سيارة، على سبيل المثال – يمكن أن يكون خطيرًا. وبما أننا عادةً ما نمسك الأدوات بأيدينا، فإنَّ القياس الأكثر ملاءمة لمقاومة الجسم البشري، R_{body}، هي المقاومة على امتداد مسار يمتد من أطراف أصابع لإحدى اليدين إلى أصابع اليد الأخرى. (لاحظْ أنَّ القلب يقع في منتصف هذا المسار إلى حد كبير!) بالنسبة إلى الكثير من الناس تقع هذه المقاومة في مدى $500\ \text{K}\Omega < R_{body} < 2\ \text{M}\Omega$. تأتي معظم هذه المقاومة من الجلد، بصفة خاصة من طبقات الجلد الميت الخارجية. وبرغم ذلك، إذا كان الجلد مبتلًا، تزداد درجة القابلية للتوصيل بشكل كبير، ومن ثَمَّ تنخفض مقاومة الجسم بدرجة كبيرة. إذا كان فرق الجهد ثابتًا، فإنَّ قانون أوم يشير إلى أنَّ التيار سيزداد بدرجة كبيرة. ومن ثَمَّ فإنَّ مسك الأجهزة الكهربائية في بيئات رطبة أو لمس تلك الأجهزة بلسانك فكرة سيئة للغاية.

يمكن أن تتضمن الأسلاك في دائرة ما نقاطًا حادة في موضع قطعها. إذا اخترقت هذه النقاط الجلد عند أطراف الأصابع، فستنعدم مقاومة الجلد، وتنخفض المقاومة بين أطراف أصابع اليدين بدرجة كبيرة. وإذا اخترق سلك كهربائي وعاءً دمويًّا، فستنخفض مقاومة الجسم بدرجة أكبر من ذلك، لأنَّ الدم ذو ملوحة عالية، ومن ثَمَّ فإنَّه موصِّل جيد للكهرباء. في هذه الحالة، يمكن أن يكون لفروق الجهد الصغيرة نسبيًّا الصادرة من البطاريات تأثير مميت.

5.5 توصيل المقاومات على التوالي Resistors in Series

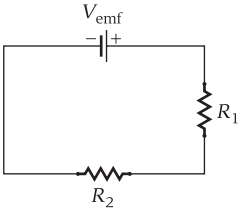
يمكن أن تشتمل الدائرة على أكثر من مقاوِم واحد و/أو أكثر من مصدر قوة دافعة كهربائية واحد. يتطلب تحليل الدوائر ذات المقاومات المتعددة أساليب مختلفة. لنتفحص أولًا المقاومات المتصلة على التوالي.

مقاومان، R_1 وR_2، متصلان على التوالي بمصدر قوة دافعة كهربائية واحد يبلغ فرق الجهد له V_{emf} في الدائرة الموضَّحة في الشكل 5.12. يُرمز إلى هبوط الجهد عبر المقاوِم R_1 بالرمز ΔV_1، وهبوط الجهد عبر المقاوِم R_2 بالرمز ΔV_2. يجب أن يكون مجموع هبوطي الجهد هو فرق الجهد الناتج عن مصدر القوة الدافعة الكهربائية:

$$V_{emf} = \Delta V_1 + \Delta V_2$$

علمًا أنَّ التيار نفسه يتدفق عبر جميع عناصر الدائرة. كيف عرفنا ذلك؟ تذكَّر، لقد عرفنا التيار في بداية هذه الوحدة بوصفه معدل التغير في الشحنة بمرور الزمن: $i = dq/dt$. يجب أن يكون التيار متساويًا في كل أجزاء السلك، وكذلك في المقاوِم، لأنَّ الشحنة محفوظة في كل مكان في الدائرة. لا يتم اكتساب أي شحنة أو فقدانها على امتداد السلك، وكذلك التيار يكون متساويًا في كل أجزاء الدائرة الكهربائية في الشكل 5.12.

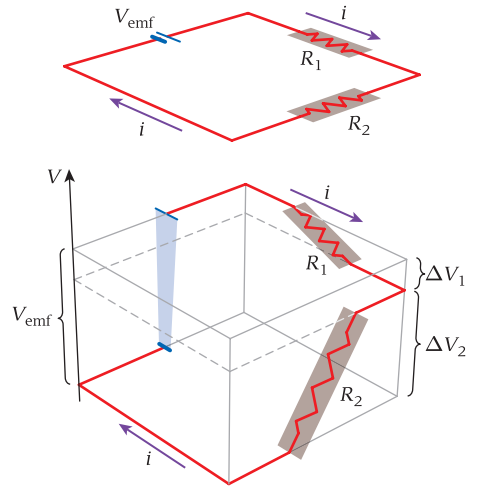
لتصحيح اعتقاد خاطئ، لاحظْ أنَّه *لا يوجد تيار "مستنفد" في مقاوم ما*. بغض النظر عن عدد المقاومات المتصلة على التوالي، يكون التيار المتدفق عبر المقاوم الأول هو التيار ذاته المتدفق عبر المقاوِم الأخير. يمكن أن يساعد في فهم هذا الأمر التشبيه بتدفق المياه في أنبوب: بغض النظر عن طول الأنبوب وعدد انحناءاته، كل الماء الذي يتدفق إلى أحد طرفيه يجب أن تخرج من الطرف الآخر.



الشكل 5.12 دائرة كهربائية بها مقاومان متصلان على التوالي بمصدر قوة دافعة كهربائية واحد.

سؤال الاختبار الذاتي 5.2

تم توصيل مقاوم مقاومته $R = 10.0\ \Omega$ بمصدر قوة دافعة كهربائية بفرق جهد $V_{emf} = 1.50\ \text{V}$. ما التيار المتدفق عبر الدائرة؟



الشكل 5.13 (a) تمثيل تخطيطي لدائرة بسيطة بها مقاومان متصلان على التوالي ومصدر قوة دافعة كهربائية. (b) تمثيل ثلاثي الأبعاد للدائرة نفسها، مبينًا الجهد عند كل نقطة في الدائرة. تم توضيح التيار في الدائرة في طريقتي العرض.

ومن ثَمَّ، فإنَّ التيار المتدفق عبر كل مقاوِم في الشكل 5.12 يكون متساويًا. يمكننا تطبيق قانون أوم لكل مقاوِم والحصول على

$$V_{emf} = iR_1 + iR_2$$

يمكن أن تحل مقاومة مكافئة، R_{eq}، محل المقاومتين الفرديتين:

$$V_{emf} = iR_1 + iR_2 = iR_{eq}$$

حيث

$$R_{eq} = R_1 + R_2$$

ومن ثَمَّ، يمكن استبدال مقاومين متصلين على التوالي لتحل محلهما مقاومة مكافئة تساوي مجموع مقاومتيهما. يوضِّح الشكل 5.13 هبوط الجهد في دائرة التوالي في الشكل 5.12، باستخدام نموذج ثلاثي الأبعاد.

يمكن أن يعمم تعبير المقاومة المكافئة لمقاومين متصلين على التوالي على دائرة تتضمن n من المقاومات المتصلة على التوالي:

$$R_{eq} = \sum_{i=1}^{n} R_i \quad \text{(للمقاوِمات المتصلة على التوالي)} \tag{5.15}$$

أي إنَّه إذا كانت المقاوِمات متصلة في مسار واحد بحيث يتدفق التيار ذاته عبر كلٍ منها، فستكون مقاوماتهم الكلية هي مجموع مقاوماتهم الفردية.

مراجعة المفاهيم 5.3

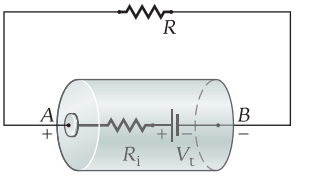
أي الآتية صحيح للمقاومتين في الشكل 5.13؟

a) $R_1 < R_2$

b) $R_1 = R_2$

c) $R_1 > R_2$

d) المعلومات المعطاة في الشكل غير كافية لمقارنة المقاومتين.



الشكل 5.14 بطارية (الأسطوانة الرمادية) لها مقاومة داخلية R_i متصلة بمقاوم خارجي، R.

مثال 5.3 المقاومة الداخلية للبطارية

عند عدم اتصال البطارية في دائرة ما، يكون فرق الجهد عبر طرفيها V_t. عند توصيل البطارية على التوالي مع مقاوِم له مقاومة R، يمر التيار i عبر الدائرة. عند تدفق التيار، تكون قيمة فرق الجهد، V_{emf}، عبر طرفي البطارية أقل من V_t. يحدث هذا الانخفاض لأنَّ البطارية لها مقاومة داخلية، R_i، والتي يمكن التفكير فيها كمقاومة متصلة على التوالي مع المقاوِم الخارجي (الشكل 5.14). أي أنَّ:

$$V_t = iR_{eq} = i(R + R_i)$$

تمثل الأسطوانة الرمادية البطارية في الشكل 5.14. وتمثل النقطتين A وB طرفي البطارية.

المسألة

افترض أنَّ بطارية لها $V_t = 12.0\ V$ عند عدم اتصالها بالدائرة. عند اتصال مقاوِم $10.0\text{-}\Omega$ بالبطارية، تنخفض قيمة فرق الجهد عبر طرفي البطارية إلى $10.9\ V$. ما قيمة المقاومة الداخلية للبطارية؟

الحل

يتم الحصول على التيار المتدفق عبر المقاوِم الداخلي عن طريق

$$i = \frac{\Delta V}{R} = \frac{10.9\ V}{10.0\ \Omega} = 1.09\ A$$

يجب أن يكون التيار المتدفق في الدائرة بالكامل، بما في ذلك البطارية، هو التيار ذاته الذي يتدفق في المقاوم الخارجي. ومن ثَمَّ، نحصل على

$$V_t = iR_{eq} = i(R + R_i)$$

$$(R + R_i) = \frac{V_t}{i}$$

$$R_i = \frac{V_t}{i} - R = \frac{12.0\ V}{1.09\ A} - 10.0\ \Omega = 1.00\ \Omega$$

المقاومة الداخلية للبطارية تساوي $1.00\ \Omega$. يُقال إنَّ البطاريات التي لها مقاومة داخلية هي بطاريات غير *مثالية*. من المفترض أن يكون للبطاريات في الدوائر مقاومة داخلية صفرية، ما لم يذكر غير ذلك. يُقال إنَّ هذه البطاريات بطاريات *مثالية*. تحافظ البطارية المثالية على فرق جهد ثابت بين طرفيها، بغض النظر عن التيار المتدفق.

لا يمكن تحديد ما إذا يمكن للبطارية أن توفر طاقة من خلال قياس قيمة فرق الجهد بين طرفيها ببساطة. بدلًا من ذلك، يجب توصيل مقاومة بالبطارية ثم قياس قيمة فرق الجهد. عندما تصل البطارية إلى حالة التوقف

عن العمل، يمكن أن تستمر في توفير فرق الجهد المقدر الخاص بها في حالة عدم اتصالها، ولكن قد تنخفض قيمة فرق الجهد إلى صفر عند اتصالها بمقاومة خارجية. تحتوي بعض الأنواع من البطاريات على أجهزة مدمجة لقياس قيمة فرق الجهد العامِل عن طريق الضغط على موضع معين في البطارية ببساطة وملاحظة المؤشر.

مقاوِم ذو مقطع عرضي غير ثابت

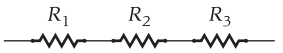
تفترض المناقشة حتى الآن أنَّ المقاوِم له مساحة المقطع العرضي نفسها، A، والمقاومة النوعية، ρ، نفسها في كل مكان على امتداد طوله (كان هذا الافتراض الضمني في الاستنباط الذي يؤدي إلى المعادلة 5.11). وهذا بالطبع، ليس الحال دائمًا. كيف يمكننا التعامل مع التحليل الخاص بمقاوِم مساحة مقطعه العرضي عبارة عن دالة للموقع x على امتداد المقاوِم، $A(x)$، و/أو يمكن أن تتغير مقاومته النوعية كدالة للموقع، $\rho(x)$؟ نقسِّم المقاوِم إلى العديد من القطع القصيرة جدًا Δx ونوجِد مجموعها، حيث تنص المعادلة 5.15 على أنَّ المقاومة الكلية هي مجموع كل المقاومات للقطع القصيرة الفردية؛ ثم نأخذ النهاية $\Delta x \to 0$. إذا كان هذا يبدو تكاملًا بالنسبة إليك، فأنت على حق. الصيغة العامة لحساب مقاومة مقاوم طوله L وله مقطع عرضي غير منتظم، $A(x)$، هي

$$R = \int_0^L \frac{\rho(x)}{A(x)}\,dx \tag{5.16}$$

سيساعد المثال التالي على توضيح هذه المعادلة.

مراجعة المفاهيم 5.4

تم توصيل ثلاث مقاوِمات متماثلة، R_1 و R_2 و R_3، معًا كما هو مبين في الشكل. تيار كهربائي يتدفق خلال ثلاث مقاوِمات. يساوي التيار المتدفق خلال R_2



a) التيار نفسه المتدفق خلال R_1 و R_3.

b) ثلث التيار المتدفق خلال R_1 و R_3.

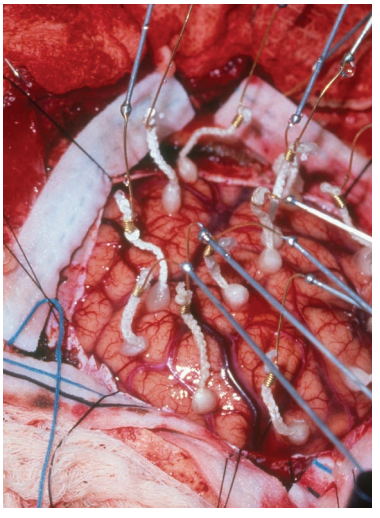
c) ضعف التيار المتدفق خلال R_1 و R_3.

d) ثلاثة أضعاف التيار المتدفق خلال R_1 و R_3.

e) لا يمكن تحديده.

مسألة محلولة 5.2 مِجس كهربائية الدماغ

تقنية تخطيط كهربائية قشرة الدماغ (ECoG) التي يستخدمها الباحثون في قياس المجال الكهربائي الناتج عن الخلايا العصبية في الدماغ. لا يمكن إجراء بعض هذه القياسات إلا عن طريق إدخال أسلاك دقيقة في المخ لجس الخلايا العصبية مباشرة. هذه الأسلاك معزولة كهربائيًا ولها طرف قصير للغاية مكشوف ومسحوب بشكل مخروطي دقيق للغاية. تستخدم تقنية تخطيط كهربائية قشرة الدماغ في علاج مرضى الصرع في الشكل 5.15.



الشكل 5.15 تم إجراء تخطيط كهربائية قشرة الدماغ لمريض الصرع باستخدام شبكات كهربائية على قشرة الدماغ.

المسألة

إذا كان السلك المستخدم لإجراء تخطيط كهربائية قشرة الدماغ مصنوعًا من التنجستن بقطر 0.74 mm ويبلغ طول الطرف 2.0 mm وتم سحب الطرف ليبلغ قطره 2.4 µm، فما مقاومة الطرف؟ (وردت مقاومة التنجستن في الجدول 5.1 بقيمة $5.51 \times 10^{-8}\ \Omega\ m$).

الحل

فكِّر أولًا، لماذا نرغب في معرفة قيمة المقاومة؟ لقياس المجالات الكهربائية أو فروق الجهد في الخلايا العصبية، حيث لا يمكن استخدام المِجسَّات التي لها مقاومة كبيرة، في حدود ألف أوم، على سبيل المثال، لأنَّه لا يمكننا من الكشف عن المجالات أو الفروق. وبرغم ذلك، بما أنَّ المقاومة تتناسب عكسيًّا مع مساحة المقطع العرضي، فإنَّ المساحة الصغيرة للغاية تعني وجود مقاومة كبيرة نسبيًّا. ورد في المسألة أنَّ للمِجس طرفًا دقيقًا جدًا، أكثر حدة من إبرة الحياكة. ومن هنا يتضح سبب الحاجة إلى معرفة مقاومة المِجس قبل إدخاله إلى الدماغ!

من الواضح أننا نتعامل مع حالة من مساحة المقطع العرضي غير الثابتة، ولذلك سنحتاج إلى حساب تكامل المعادلة 5.16. ومع ذلك، بما أنَّ الطرف مصنوع من التنجستن بالكامل، فإنَّ المقاومة ثابتة في أي جزء منه، وهذا سيبسِّط المهمة.

ارسم يوضِّح الشكل 5.16a نموذجًا ثلاثي الأبعاد للطرف، ويوضِّح الشكل 5.16b قطعًا عبر مستوى التماثل الخاص به ومسار التكامل.

ابحث إنَّ جزء البحث في هذه المسألة بسيط جدًا، لأننا نعرف بالفعل أي المعادلات نحتاج لاستخدامها. وبرغم ذلك، تحتاج المعادلة 5.16 إلى التعديل وذلك لتوضح حقيقة أنَّ المقاومة النوعية ثابتة خلال الطرف:

$$R = \rho \int_0^L \frac{1}{A(x)}\,dx \tag{i}$$

– يُتبع

حيث $A(x)$ مساحة الدائرة، $A(x) = \pi[r(x)]^2$. يقل نصف قطر الدائرة خطيًا من r_1 إلى r_2 (انظر الشكل 5.16b):

$$r(x) = r_1 + \frac{(r_2 - r_1)x}{L} \quad \text{(ii)}$$

بسِّط نعوِّض بتعبير نصف القطر من المعادلة (ii) في صيغة المساحة ثم نعوِّض بالتعبير الناتج عن $A(x)$ في المعادلة (i). توصلنا إلى

$$R = \rho \int_0^L \frac{1}{\pi(r_1 + (r_2 - r_1)x/L)^2}\, dx$$

قد يبدو هذا التكامل أمرًا شاقًا من النظرة الأولى، ولكن باستثناء x جميع الكميات الأخرى ثابتة. نقوم بمراجعة جدول التكامل أو برنامج تكامل ونحل

$$R = -\left.\frac{\rho L}{\pi(r_2 - r_1)(r_1 + (r_2 - r_1)x/L)}\right|_0^L = \frac{\rho L}{\pi r_1 r_2}$$

احسب بالتعويض بالقيم العددية، نحصل على

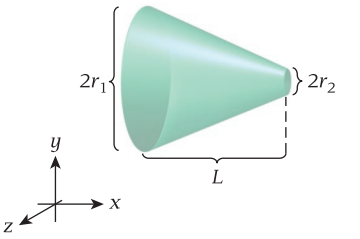
$$R = \frac{(5.51\times10^{-8}\ \Omega\text{m})(2.0\times10^{-3}\text{m})}{\pi(0.37\times10^{-3}\text{m})(1.2\times10^{-6}\text{m})} = 7.90039\times10^{-2}\ \Omega$$

قرِّب نقرِّب النتيجة إلى الرقمين المعنويين اللذين وردت بهما الخواص الهندسية للطرف في المعطيات:

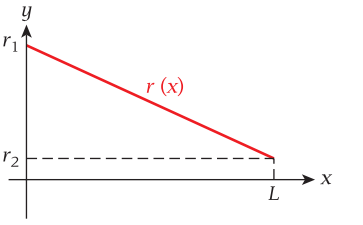
$$R = 7.9\times10^{-2}\ \Omega$$

تحقَّق ثانية تبدو قيمة 79 mΩ مقاومة صغيرة جدًا بالنسبة إلى تيار يجب أن يمر عبر طرف قطره 2.4 μm. من الناحية الأخرى، طول الطرف قصير جدًا، وهو ما يبرهن على صِغر المقاومة. ما يؤكد على صحة الحل أنَّ الوحدات الناتجة صحيحة.

وبرغم ذلك، توجد أيضًا بعض الاختبارات التي يمكن إجراؤها لإقناع أنفسنا أنَّ الحدود المتقاربة للحل $R = \rho L/(\pi r_1 r_2)$ منطقية. أولًا، عندما يكون الطول مقاربًا لصفر، تكون المقاومة أيضًا مقاربة للصفر، كما هو متوقع. ثانيًا، عندما يقترب نصف قطر نهايتي الطرف من الصفر، تتوقع الصيغة مقاومة لا نهائية، وهذا أيضًا متوقع.



(a)



(b)

الشكل 5.16 (a) شكل طرف الجِس. (b) نظام إحداثي من أجل التكامل.

5.6 توصيل المقاومات على التوازي Resistors in Parallel

بدلًا من توصيل المقاومات على التوالي، ما يؤدي إلى مرور كل التيار عبر كلا المقاومين، يمكن توصيل مقاومين على التوازي، ما يؤدي إلى تقسيم التيار بينهما، كما هو موضَّح في الشكل 5.17. مرة أخرى، لتوضيح هبوط الجهد بشكل أفضل، يوضِّح الشكل 5.18 الدائرة نفسها بنموذج ثلاثي الأبعاد.

في هذه الحالة، يساوي انخفاض الجهد عبر كل مقاوِم قيمة فرق الجهد الذي يوفره مصدر القوة الدافعة الكهربائية. باستخدام قانون أوم (المعادلة 5.14) للتيار i_1 في R_1 والتيار i_2 في R_2، نحصل على

$$i_1 = \frac{V_{\text{emf}}}{R_1}$$

و

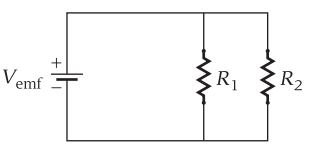
$$i_2 = \frac{V_{\text{emf}}}{R_2}$$

يجب أن يكون التيار الكلي الناتج عن مصدر القوة الدافعة الكهربائية، i، كما يلي

$$i = i_1 + i_2$$

بالتعويض عن التعبيرين i_1 وi_2، نحصل على

$$i = i_1 + i_2 = \frac{V_{\text{emf}}}{R_1} + \frac{V_{\text{emf}}}{R_2} = V_{\text{emf}}\left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right]$$



الشكل 5.17 دائرة كهربائية بها مقاومان متصلان على التوازي ومصدر قوة دافعة كهربائية واحد.

يمكن إعادة كتابة قانون أوم (المعادلة 5.14) بالصورة

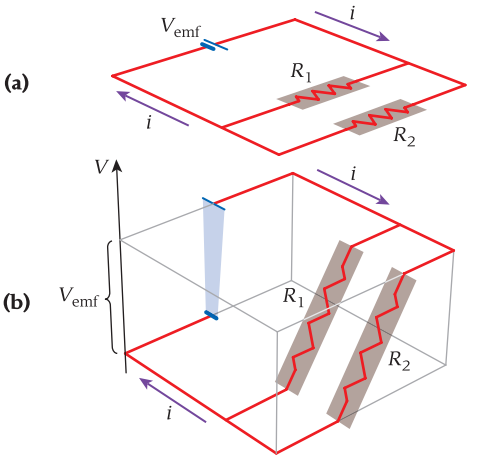
$$i = V_{\text{emf}}\left[\frac{1}{R_{\text{eq}}}\right]$$

ومن ثَمَّ، يمكن الحصول على المقاومة المكافئة التي تحل محل المقاومين المتصلين على التوازي من خلال

$$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

بوجه عام، يمكن الحصول على المقاومة المكافئة n لمقاومين متصلين على التوازي من خلال

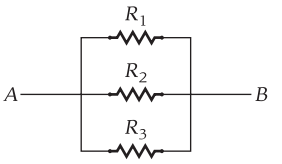
$$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_i} \quad \text{(المقاوِمات المتصلة على التوازي)} \tag{5.17}$$



الشكل 5.18 (a) تمثيل تخطيطي لدائرة بسيطة بها مقاومان متصلان على التوازي ومصدر قوة دافعة كهربائية. (b) تمثيل ثلاثي الأبعاد للدائرة نفسها، مبينًا الجهد عند كل نقطة في الدائرة.

مراجعة المفاهيم 5.5

تم توصيل ثلاث مقاومات متماثلة، R_1 و R_2 و R_3، معًا كما هو مبين في الشكل. ويتدفق تيار كهربائي من النقطة A إلى النقطة B. التيار المتدفق خلال R_2 يساوي



a) التيار نفسه المتدفق خلال R_1 و R_3.

b) ثلث التيار المتدفق خلال R_1 و R_3.

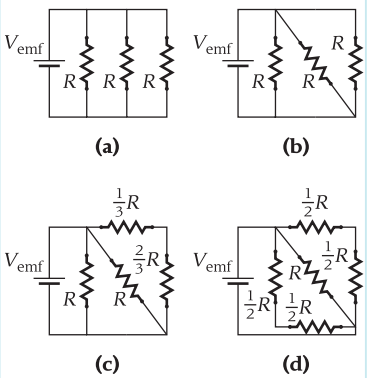
c) ضعف التيار المتدفق خلال R_1 و R_3.

d) ثلاثة أمثال التيار المتدفق خلال R_1 و R_3.

e) لا يمكن تحديده.

مراجعة المفاهيم 5.6

أي مجموعة من المقاوِمات لها المقاومة المكافئة الأعلى؟



a) المجموعة (a)

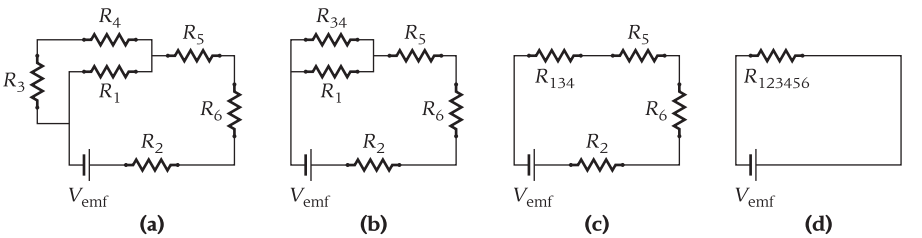
b) المجموعة (b)

c) المجموعة (c)

d) المجموعة (d)

e) المجموعات الأربع لها المقاومة المكافئة نفسها.

مثال 5.4 المقاومة المكافئة في دائرة كهربائية تتكون من ستة مقاوِمات



الشكل 5.19 (a) دائرة كهربائية بها ستة مقاوِمات. الخطوات من (b) إلى (d) لدمج هذه المقاوِمات لتحديد المقاومة المكافئة.

المسألة

يوضِّح الشكل 5.19a دائرة كهربائية بها ستة مقاوِمات، من R_1 إلى R_6. ما قيمة التيار المتدفق عبر المقاوِمين R_2 وR_3 بدلالة V_{emf} والمقاوِمات من R_1 إلى R_6؟

الحل

نبدأ بتحديد أجزاء الدائرة الكهربائية التي يتضح اتصالها على التوازي أو على التوالي التيار المتدفق عبر المقاوِم R_2 هو التيار ذاته المتدفق من مصدر القوة الدافعة الكهربائية. نلاحظ أنَّ المقاوِم R_3 والمقاوِم R_4 متصلان على التوالي. ومن ثَمَّ، يمكننا كتابة

(i)
$$R_{34} = R_3 + R_4$$

– يُتبع

تم إجراء هذا التعويض في الشكل 5.19b. يوضّح الشكل أنَّ المقاوِم R_{34} والمقاوِم R_1 متصلان على التوازي. ثم يمكننا كتابة

$$\frac{1}{R_{134}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_{34}}$$

أو

$$R_{134} = \frac{R_1 R_{34}}{R_1 + R_{34}} \quad \text{(ii)}$$

تم تمثيل هذا التعويض في الشكل 5.19c. من خلال هذا الشكل، يمكننا ملاحظة أنَّ المقاومات R_2، وR_5، وR_6، وR_{134} متصلة على التوالي. ومن ثَمَّ، يمكننا كتابة

$$R_{123456} = R_2 + R_5 + R_6 + R_{134} \quad \text{(iii)}$$

تم توضيح هذا التعويض في الشكل 5.19d. نُعوِّض عن المقاوِم R_{34} والمقاوِم R_{134} من المعادلتين (i) و(ii) في المعادلة (iii):

$$R_{123456} = R_2 + R_5 + R_6 + \frac{R_1 R_{34}}{R_1 + R_{34}} = R_2 + R_5 + R_6 + \frac{R_1(R_3 + R_4)}{R_1 + R_3 + R_4}$$

ومن ثَمَّ، يتم الحصول على التيار i_2 المتدفق عبر المقاوِم R_2 من خلال

$$i_2 = \frac{V_{\text{emf}}}{R_{123456}}$$

ننتقل إلى تحديد التيار المتدفق عبر المقاوِم R_3. يتدفق التيار i_2 أيضًا عبر المقاومة المكافئة R_{134} التي تتضمن المقاوِم R_3 (انظر الشكل 5.19c). ومن ثَمَّ، يمكننا كتابة

$$V_{134} = i_2 R_{134}$$

حيث إنَّ V_{134} هو هبوط الجهد عبر المقاومة المكافئة R_{134}. المقاوِم R_1 والمقاومة المكافئة R_{34} متصلان على التوازي. ومن ثَمَّ، يكون هبوط الجهد V_{34} عبر R_{34} مساويًا لهبوط الجهد عبر R_{134} وهو V_{134}. المقاومان R_3 وR_{49} متصلات على التوالي، ومن ثَمَّ يكون التيار i_3 المتدفق عبر R_3 مساويًا للتيار i_{34} المتدفق عبر R_{34}. ومن ثَمَّ يمكننا كتابة

$$V_{34} = V_{134} = i_{34} R_{34} = i_3 R_{34}$$

يمكننا أن نعبّر الآن عن i_3 من بدلالة V والمقاومات من R_1 إلى R_6:

$$i_3 = \frac{V_{134}}{R_{34}} = \frac{i_2 R_{134}}{R_{34}} = \frac{\left[\frac{V_{\text{emf}}}{R_{123456}}\right] R_{134}}{R_{34}} = \frac{V_{\text{emf}} R_{134}}{R_{34} R_{123456}} = \frac{V_{\text{emf}} \left[\frac{R_1 R_{34}}{R_1 + R_{34}}\right]}{R_{34} R_{123456}} = \frac{V_{\text{emf}} R_1}{R_{123456}(R_1 + R_{34})}$$

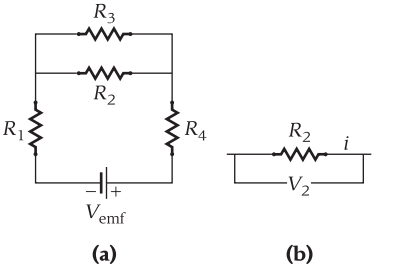
أو

$$i_3 = \frac{V_{\text{emf}} R_1}{\left[R_2 + R_5 + R_6 + \frac{R_1(R_3 + R_4)}{R_1 + R_3 + R_4}\right](R_1 + R_3 + R_4)} = \frac{V_{\text{emf}} R_1}{(R_2 + R_5 + R_6)(R_1 + R_3 + R_4) + R_1(R_3 + R_4)}$$

مسألة محلولة 5.3 انخفاض الجهد عبر مقاوِم في دائرة كهربائية

المسألة

تتضمن الدائرة الكهربائية الموضَّحة في الشكل 5.20a أربع مقاومات وبطارية لها $V_{\text{emf}} = 149\ \text{V}$ وقيم المقاومات الأربع هي $R_1 = 17.0\ \Omega$، و$R_2 = 51.0\ \Omega$، و$R_3 = 114.0\ \Omega$، و$R_4 = 55.0\ \Omega$. ما مقدار انخفاض الجهد عبر المقاوِم R_2؟



الشكل 5.20 (a) دائرة كهربائية بها أربعة مقاومات وبطارية. (b) انخفاض الجهد عبر المقاوِم R_2.

الحل

فكِّر المقاومان R_2 وR_3 متصلات على التوازي ويمكن أن تحل محلهما المقاومة المكافئة R_{23}. المقاومان R_1 وR_4 متصلان بالمقاومة R_{23} على التوالي. التيار المتدفق عبر R_1، وR_4، وR_{23} متساوٍ لأنها متصلة على التوالي. يمكننا الحصول على قيمة التيار في الدائرة الكهربائية عن طريق حساب قيمة المقاومة المكافئة لكل من R_1، وR_4، وR_{23} وباستخدام قانون أوم. انخفاض الجهد عبر R_{23} يساوي قيمة التيار المتدفق في الدائرة الكهربائية مضروبة في R_{23}. انخفاض الجهد عبر R_2 يساوي انخفاض الجهد عبر R_{23} لأنَّ R_2 وR_3 متصلان على التوازي.

ارسم يوضح الشكل 5.20b هبوط الجهد عبر المقاوِم R_2.

ابحث يمكن حساب المقاومة المكافئة للمقاومين R_2 و R_3 باستخدام المعادلة 5.17:

$$\frac{1}{R_{23}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad \text{(i)}$$

يمكن إيجاد المقاومة المكافئة للمقاومات الثلاثة المتصلة على التوالي باستخدام المعادلة 5.15:

$$R_{eq} = \sum_{i=1}^{n} R_i = R_1 + R_{23} + R_4$$

وأخيرًا، نحصل على قيمة التيار في الدائرة الكهربائية باستخدام قانون أوم:

$$V_{emf} = iR_{eq} = i(R_1 + R_{23} + R_4)$$

بسّط هبوط الجهد، V_2، عبر R_2 يساوي انخفاض الجهد، V_{23}، عبر المقاومة المكافئة R_{23}:

$$V_2 = V_{23} = iR_{23} = \frac{V_{emf}}{R_1 + R_{23} + R_4} R_{23} = \frac{R_{23} V_{emf}}{R_1 + R_{23} + R_4} \quad \text{(ii)}$$

يمكننا حل المعادلة (i) لإيجاد المقاومة R_{23} لنحصل على

$$R_{23} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}$$

بعد ذلك، يمكننا استخدام المعادلة (ii) لتحديد انخفاض الجهد V_2 كما يلي

$$V_2 = \frac{\left[\frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}\right] V_{emf}}{R_1 + \left[\frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}\right] + R_4} = \frac{R_2 R_3 V_{emf}}{R_1(R_2 + R_3) + R_2 R_3 + R_4(R_2 + R_3)}$$

ويمكننا إعادة كتابة ذلك كما يلي

$$V_2 = \frac{R_2 R_3 V_{emf}}{(R_1 + R_4)(R_2 + R_3) + R_2 R_3}$$

احسب بالتعويض بالقيم العددية، نحصل على

$$V_2 = \frac{R_2 R_3 V_{emf}}{(R_1 + R_4)(R_2 + R_3) + R_2 R_3}$$
$$= \frac{(51.0\ \Omega)(114.0\ \Omega)(149\ \text{V})}{(17.0\ \Omega + 55.0\ \Omega)(51.0\ \Omega + 114.0\ \Omega) + (51.0\ \Omega)(114.0\ \Omega)}$$
$$= 48.9593\ \text{V}$$

قرّب نقرّب النتيجة إلى ثلاثة أرقام معنوية:

$$V = 49.0\ \text{V}$$

تحقق ثانية قد تميل إلى عدم إكمال الحل التحليلي كما فعلنا هنا. بدلًا من ذلك، قد ترغب في التعويض بالأرقام مبكرًا في التعبير R_{23}، على سبيل المثال. لذا، للتحقق ثانية من النتيجة، لنحسب قيمة التيار في الدائرة الكهربائية بوضوح ثم نحسب قيمة انخفاض الجهد عبر R_{23} باستخدام هذا التيار. المقاومة المكافئة للمقاومين R_2 و R_3 المتصلين على التوازي تساوي

$$R_{23} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = \frac{(51.0\ \Omega)(114.0\ \Omega)}{51.0\ \Omega + 114.0\ \Omega} = 35.2\ \Omega$$

إذًا التيار في الدائرة الكهربائية يساوي

$$i = \frac{V_{emf}}{R_1 + R_{23} + R_4} = \frac{149.0\ \text{V}}{17.0\ \Omega + 35.2\ \Omega + 55.0\ \Omega} = 1.39\ \text{A}$$

إذًا انخفاض الجهد عبر R_2 يساوي

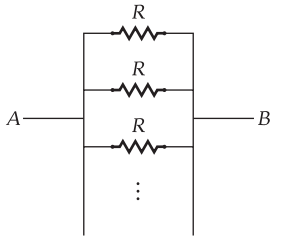
$$V_2 = iR_{23} = (1.39\ \text{A})(35.2\ \Omega) = 48.9\ \text{V}$$

وهذا يتفق مع النتيجة في نطاق خطأ التقريب. وهذا يؤكد أنَّ كلتا الطريقتين تؤديان إلى نفس النتيجة.

يمكننا التحقق من أنَّ مجموع قيم انخفاض الجهد عبر R_1، وR_{23}، وR_4 تساوي قيمة V_{emf}، كما هو محتم حيث إنَّ R_1، و R_{23}، و R_4 متصلة على التوالي. انخفاض الجهد عبر R_1 يساوي $V_1 = iR_1 = (1.39\ \text{A})(17.0\ \Omega) = 23.6\ \text{V}$. انخفاض الجهد عبر R_4 يساوي $V_4 = iR_4 = (1.39\ \text{A})(55.0\ \Omega) = 76.5\ \text{V}$. إذًا انخفاض الجهد الكلي يساوي $V_{total} = V_1 + V_{23} + V_4 (23.6\ \text{V}) + (48.9\ \text{V}) + (76.5\ \text{V}) = 149\ \text{V}$. وهذا يساوي V_{emf}. إذًا إجابتنا مطابقة.

مراجعة المفاهيم 5.7

كلما أضيف المزيد من المقاومات المتطابقة، R، إلى الدائرة المبينة في الشكل، فإنَّ المقاومة بين النقطتين A و B سوف



a) تزيد.

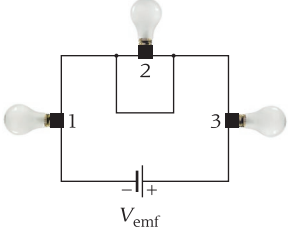
b) تظل كما هي.

c) تقل.

d) تتغير بشكل لا يمكن التنبؤ به.

مراجعة المفاهيم 5.8

تم توصيل ثلاثة مصابيح ضوئية على التوالي ببطارية تنتج فرق جهد ثابتًا، V_{emf}. عندما يتم توصيل سلك بالمصباح الكهربائي 2 كما هو مبين في الشكل، فإنَّ المصباحين الكهربائيين 1 و3 سوف



V_{emf}

a) يضيئان بالسطوع نفسه كما كانا قبل توصيل السلك.

b) يضيئان بسطوع أكبر من سطوعهما قبل توصيل السلك.

c) يضيئان بسطوع أقل من سطوعهما قبل توصيل السلك.

d) ينطفئان.

5.7 الطاقة والقدرة في الدوائر الكهربائية
Energy and Power in Electric Circuits

فكِّر في دائرة كهربائية بسيطة حيث يسبب مصدر قوة دافعة كهربائية له فرق جهد ΔV تدفقًا لتيار، i. الشغل اللازم الناتج عن جهاز القوة الدافعة الكهربائية لنقل كمية من الشحنة، dq، من الطرف السالب إلى الطرف الموجب (داخل جهاز القوة الدافعة الكهربائية) يساوي زيادة طاقة الوضع الكهربائية للشحنة، dU:

$$dU = dq\,\Delta V$$

تذكر أنَّه من تعريف التيار $i = dq/dt$، يمكننا إعادة كتابة طاقة الوضع الكهربائية هكذا

$$dU = i\,dt\,\Delta V$$

باستخدام تعريف القدرة، $P = dU/dt$، والتعويض بتعبير طاقة الوضع فيه، نحصل على

$$P = \frac{dU}{dt} = \frac{i\,dt\,\Delta V}{dt} = i\Delta V$$

ومن ثَمَّ، ناتج ضرب التيار في فرق الجهد يساوي القدرة التي يوفرها مصدر القوة الدافعة الكهربائية. وفقًا لقانون حفظ الطاقة، تكون هذه القدرة مساوية للقدرة المبدَّدة في دائرة كهربائية تحتوي على مقاوِم واحد. في دائرة كهربائية أكثر تعقيدًا، سيبدِّد كل مقاوِم القدرة بالمعدل الذي تحدده هذه المعادلة، حيث i وΔV تشيران إلى التيار وفرق الجهد عبر هذا المقاوِم. يؤدي قانون أوم (المعادلة 5.9) إلى صيغ مختلفة للقدرة:

$$P = i\Delta V = i^2R = \frac{(\Delta V)^2}{R} \tag{5.18}$$

وحدة القدرة هي الواط (W). يتم تصنيف الأجهزة الكهربائية، مثل المصابيح الضوئية، من حيث كمية الطاقة التي تستهلكها. تعتمد فاتورة الكهرباء الخاصة بك على كمية الطاقة الكهربائية التي تستهلكها أجهزتك، وتُقاس هذه الطاقة بوحدة الكيلوواط ساعة (kWh).

. من الناحية الكمية، يتحول الكثير من الطاقة المبدَّدة في المقاوِمات أو معظمها إلى حرارة. تحدث هذه الظاهرة في المصباح المتوهج، حيث يسبب تسخين الفتيل الفلزي إلى درجة حرارة مرتفعة انبعاث الضوء. وتمثل الحرارة المبدَّدة في الدوائر الكهربائية مشكلة كبيرة لأنظمة الكمبيوتر عالية القدرة ومزارع الخوادم التي تستضيف أكبر قواعد بيانات الإنترنت. تستخدم هذه الأنظمة آلاف المعالجات لتطبيقات الحوسبة التي يمكن توصيلها على التوازي. تنبعث من كل هذه المعالجات حرارة، ويجب توفير تبريد باهظ الثمن لتبديد تلك الحرارة. تبيَّن أنَّ تكلفة التبريد هي إحدى الشروط الحديَّة الصارمة التي تقلل من الحجم الأقصى لأجهزة الكمبيوتر الفائقة.

يمكن تحويل بعض القدرة المبدَّدة في الدوائر الكهربائية إلى طاقة ميكانيكية عن طريق المحركات. يتطلب عمل المحركات الكهربائية فهم المغناطيسية وسيتم شرحها لاحقًا.

مثال 5.5 التأثير الحراري لمقاومة المصباح الكهربائي

مصباح كهربائي قدرته 100 W متصل على التوالي بمصدر قوة دافعة كهربائية V_{emf} = 100 V. عند إضاءة المصباح الكهربائي، تبلغ درجة حرارة فتيل التنجستن 2520 °C.

المسألة

ما قيمة مقاومة فتيل التنجستن في المصباح في درجة حرارة الغرفة (20 °C)؟

الحل

يمكن الحصول على مقاومة الفتيل عند إضاءة المصباح الكهربائي باستخدام المعادلة 5.18:

$$P = \frac{V_{emf}^2}{R}$$

نعيد ترتيب هذه المعادلة ونعوِّض بالقيم العددية للحصول على مقاومة الفتيل:

$$R = \frac{V_{\text{emf}}^2}{P} = \frac{(100\ \text{V})^2}{100\ \text{W}} = 100\ \Omega$$

يمكن الحصول على التأثير الحراري لمقاومة الفتيل من المعادلة 5.13:

$$R - R_0 = R_0\alpha(T - T_0)$$

نحل المعادلة لإيجاد المقاومة في درجة حرارة الغرفة، R_0:

$$R = R_0 + R_0\alpha(T - T_0) = R_0\left[1 + \alpha(T - T_0)\right]$$

$$R_0 = \frac{R}{1 + \alpha(T - T_0)}$$

باستخدام معامل درجة الحرارة للمقاومة النوعية للتنجستجن من الجدول 5.1، نحصل على

$$R_0 = \frac{R}{1 + \alpha(T - T_0)} = \frac{100\ \Omega}{1 + \left(4.5\times10^{-3}\ ^\circ\text{C}^{-1}\right)(2520\ ^\circ\text{C} - 20\ ^\circ\text{C})} = 8.2\ \Omega$$

نقل الطاقة عبر التيار المستمر عالي الجهد

إنَّ نقل الطاقة الكهربائية من محطات توليد الطاقة الكهربائية إلى مستخدمي الطاقة الكهربائية له أهمية عملية كبيرة. عادةً ما تقع محطات توليد الطاقة الكهربائية في مناطق نائية، ومن ثَمَّ يجب نقل الطاقة لمسافات طويلة. وهذا صحيح، خاصة بالنسبة إلى مصادر الطاقة النظيفة، مثل السدود الكهرومائية ومحطات الطاقة الشمسية الكبيرة في الصحاري.

القدرة، P، التي يتم نقلها إلى المستخدمين هي ناتج ضرب التيار، i، في فرق الجهد، ΔV، عبر أسلاك نقل الطاقة: $P = i\Delta V$. ومن ثَمَّ، يكون التيار اللازم لقدرة معينة يساوي $i = P/\Delta V$، وفرق الجهد الأعلى يعني تيارًا أقل عبر خط الطاقة. تشير المعادلة 5.18 إلى أنَّ القدرة المبدَّدة في خط نقل الطاقة الكهربائية، P_{loss}، يمكن الحصول عليها من $P_{\text{loss}} = i^2R$. مقاومة خط الطاقة، R، ثابتة؛ ومن ثَمَّ، فإنَّ خفض القدرة المفقودة أثناء النقل يعني خفض التيار المنقول عبر خط النقل. ويتم هذا الخفض عن طريق نقل القدرة باستخدام فرق جهد عالٍ للغاية وتيار منخفض للغاية. بالنظر إلى المعادلة 5.18، يمكن أن تعتقد أنه يمكننا أيضًا كتابة $P_{\text{loss}} = (\Delta V)^2/R$ وأنَّ فرق الجهد العالي يعني قدرة مفقودة كبيرة بدلًا من قدرة مفقودة صغيرة. وبرغم ذلك، فإنَّ ΔV في هذه المعادلة يمثل انخفاض الجهد عبر خط الطاقة لا فرق الجهد الذي يتم نقل الطاقة الكهربائية به. انخفاض الجهد عبر خط الطاقة يساوي $V_{\text{drop}} = iR$، وهو أقل بكثير من فرق الجهد العالي المستخدم لنقل الطاقة الكهربائية. يمكن الجمع بين تعبيري القدرة المنقولة والقدرة المبدَّدة للحصول على $P_{\text{loss}} = (P/\Delta V)^2R = P^2R/(\Delta V)^2$، ما يعني أنه بالنسبة إلى قدرة معينة، تنخفض القدرة المبدَّدة بالتناسب مع مربع فرق الجهد المستخدم لنقل الطاقة.

في العادة، تَستخدم محطات توليد الطاقة الكهربائية ونقلها تيارات مترددة. كما سنرى لاحقًا، تتميز التيارات المترددة بسهولة زيادة فرق الجهد أو خفضه عبر المحوِّلات. وبرغم ذلك، يعيب التيارات المترددة الفقدان الكبير للطاقة. ولا توجد هذه المشكلة في خطوط التيار المستمر عالي الجهد الخاصة بنقل الطاقة ولكنها تعاني فقط من فقدان الطاقة بسبب مقاومة أسلاك نقل الطاقة. وبرغم ذلك، فإنَّ خطوط التيار المستمر عالي الجهد الخاصة بنقل الطاقة تستلزم تحويل التيار المتناوب إلى تيار مستمر من أجل عملية نقل الطاقة ويلزم أيضًا تحويل التيار المستمر إلى تيار متناوب عند الوجهة المقصودة.

جزء من الطاقة التي تنتجها محطة توليد الطاقة الكهرومائية الموضحة في الشكل 5.21 تنقل بواسطة أكبر خط تيار مستمر عالي الجهد لنقل الطاقة في العالم بمسافة قدرها 800 km تقريبًا من سد إيتايبو إلى ساو باولو، في البرازيل، وهي واحدة من أكبر عشرة تجمعات حضارية في العالم. تحمل أسلاك النقل 6300 MW من الطاقة الكهربائية باستخدام التيار المستمر الذي يبلغ فرق الجهد فيه ±600 kV يوضح الشكل 5.21 محطة الطاقة الكهربائية في سد إيتايبو التي تحوِّل التيار المتردد إلى تيار مستمر. ويوضح الشكل 5.21 محطة الطاقة الكهربائية في ساو باولو التي تحوِّل التيار المستمر المنقول مرة أخرى إلى تيار متردد.



الشكل 5.21 محطة تحويل التيار المتردد إلى تيار مستمر عند سد إيتايبو على نهر البارانا في البرازيل وباراجواي.

سؤال الاختبار الذاتي 5.3

تخيل بطارية لها مقاومة داخلية R_i. ما المقاوم الخارجي، R، الذي يصل إلى أقصى درجة حرارة عند توصيله بالبطارية؟

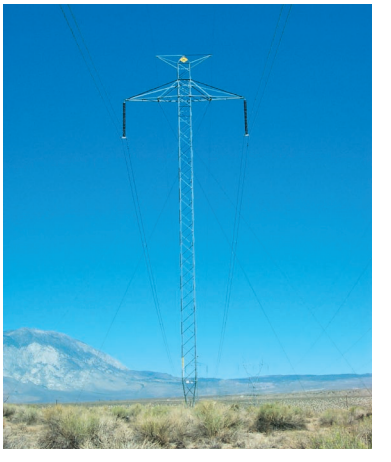
تشمل التطبيقات المستقبلية لنقل الطاقة عبر التيار المستمر عالي الجهد نقل الطاقة من محطات توليد الطاقة الشمسية الموجودة في المناطق النائية في جنوب غرب الولايات المتحدة إلى المناطق المكتظة بالسكان، مثل المدن الكبيرة في ولاية كاليفورنيا وتكساس. تركز بعض الأبحاث الواعدة حول نقل الطاقة على استخدام الأسلاك فائقة التوصيل لتحقيق هذا الهدف. وكما ذكرنا سابقًا، بمجرد أن تصبح مادة ما موصلة فائقة للكهرباء تقترب قيمة مقاومتها من الصفر. ومن ثَمَّ، يمكنها نقل الطاقة الكهربائية من دون فقدان كبير. تعد *الموصلات فائقة التوصيل عند درجات حرارة عالية* من أكثر المواد الواعدة من أجل أسلاك نقل الطاقة فائقة التوصيل، التي لم يتم اكتشافها إلا في عام 1986. يجب تبريد هذه الأسلاك بالنيتروجين السائل، ولكننا نقترب من الوقت الذي يمكن فيه أن يصبح استخدام تلك الأسلاك على نطاق واسع لنقل الطاقة في الأماكن البعيدة واقعيًّا.

مسألة محلولة 5.4 أبعاد سلك نقل الطاقة

المسألة

تخيَّل أنَّك تصمم خط نقل الطاقة عبر التيار المستمر عالي الجهد من سد إيتايبو على نهر البارانا في البرازيل وباراجواي إلى مدينة ساو باولو في البرازيل. يبلغ طول خط الطاقة 800 km وينقل طاقة 6300 MW بفرق جهد يبلغ 1.20 MV. (يوضِّح الشكل 5.22 خط تيار مستمر عالي الجهد).

تتطلب شركة الطاقة الكهربائية ألا يُفقد أكثر من 25% من الطاقة أثناء نقلها. إذا كان الخط يتكون من سلك واحد مصنوع من النحاس وله مقطع عرضي دائري، فما أصغر قطر للسلك؟

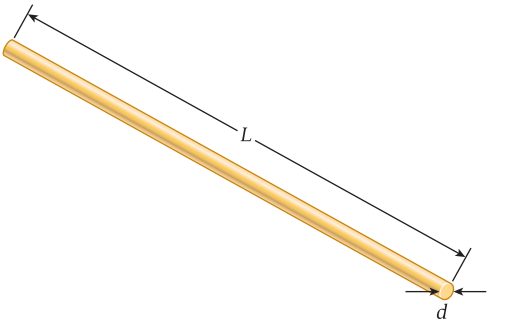


الشكل 5.22 خط نقل الطاقة عبر التيار المستمر عالي الجهد.

الحل

فكِّر بمعرفة القدرة المنقولة وفرق الجهد لنقلها، يمكننا حساب قيمة التيار المنقول عبر الخط. ثم يمكننا التعبير عن القدرة المفقودة بدلالة مقاومة خط النقل. بمعرفة قيمة التيار ومقاومة السلك، يمكننا كتابة تعبير للقدرة المفقودة أثناء النقل. مقاومة السلك عبارة عن دالة لقطر السلك، وطوله، والمقاومة النوعية للنحاس. بعد ذلك يمكننا التعويض عن قطر السلك الذي سيجعل كمية القدرة المفقودة ضمن حدود معينة.

ارسم ثمة رسم لسلك نحاسي بطول L وقطر d موضَّح في الشكل 5.23.



الشكل 5.23 سلك نقل الطاقة عبر التيار المستمر عالي الجهد يتكون من موصل من النحاس (دون التقيد بمقياس الرسم).

ابحث القدرة، P، المنقولة عبر الخط ترتبط بالتيار، i، وفرق الجهد، ΔV: $P = i\Delta V$. يمكن ربط القدرة المفقودة أثناء النقل، P_{lost}، (انظر المعادلة 5.18) بالتيار المار في السلك ومقاومة السلك، R:

$$P_{lost} = i^2R \quad \text{(i)}$$

يمكن الحصول على مقاومة السلك من المعادلة 5.11:

$$R = \rho_{Cu}\frac{L}{A} \quad \text{(ii)}$$

حيث يمثل ρ_{Cu} مقاوميَّة النحاس، وL طول السلك، وA مساحة المقطع العرضي للسلك. مساحة المقطع العرضي للسلك هي مساحة الدائرة:

$$A = \pi\left(\frac{d}{2}\right)^2 = \frac{\pi d^2}{4}$$

حيث يمثل d قطر السلك. ومن ثَمَّ، بالتعويض بمساحة الدائرة عن A، تصبح المعادلة (ii)

$$R = \rho_{Cu}\frac{L}{\pi d^2/4} \quad \text{(iii)}$$

بسِّط يمكننا حل المعادلة $P = i\Delta V$ لإيجاد التيار المار في السلك:

$$i = \frac{P}{\Delta V}$$

بالتعويض بالتعبير الذي يمثل التيار والتعبير الذي يمثل المقاومة من المعادلة (iii) في المعادلة (i) الخاصة بالقدرة المفقودة نحصل على

$$P_{\text{lost}} = \left(\frac{P}{\Delta V}\right)^2 \left[\rho_{\text{Cu}} \frac{L}{\pi d^2/4}\right] = \frac{4P^2\rho_{\text{Cu}}L}{\pi(\Delta V)^2 d^2}$$

الكسر الذي يمثل القدرة المفقودة بالنسبة إلى القدرة الكلية، **f**، يساوي

$$\frac{P_{\text{lost}}}{P} = \frac{\left[\dfrac{4P^2\rho_{\text{Cu}}L}{\pi(\Delta V)^2 d^2}\right]}{P} = \frac{4P\rho_{\text{Cu}}L}{\pi(\Delta V)^2 d^2} = f$$

بالتعويض بهذه المعادلة عن قطر السلك نحصل على

$$d = \sqrt{\frac{4P\rho_{\text{Cu}}L}{f\pi(\Delta V)^2}}$$

احسب بالتعويض باستخدام القيم العددية، نحصل على

$$d = \sqrt{\frac{4\left(6300\times10^6\ \text{W}\right)\left(1.72\times10^{-8}\ \Omega\ \text{m}\right)\left(800\times10^3\ \text{m}\right)}{(0.25)\pi\left(1.20\times10^6\ \text{V}\right)^2}} = 0.0175099\ \text{m}$$

قرّب بالتقريب إلى ثلاثة أرقام معنوية نحصل على أصغر قطر للسلك النحاسي:

$$d = 1.75\ \text{cm}$$

تحقق ثانية للتحقق ثانية من النتيجة، لنحسب قيمة مقاومة خط النقل. باستخدام القيم التي حسبناها للقطر، يمكننا معرفة مساحة المقطع العرضي، ثم، باستخدام المعادلة 5.11، نحصل على

$$R = \rho_{\text{Cu}} \frac{L}{\pi d^2/4} = \frac{4\rho_{\text{Cu}}L}{\pi d^2} = \frac{4\left(1.72\times10^{-8}\ \Omega\text{m}\right)\left(800\times10^3\ \text{m}\right)}{\pi\left(1.75\times10^{-2}\ \text{m}\right)^2} = 57.2\ \Omega.$$

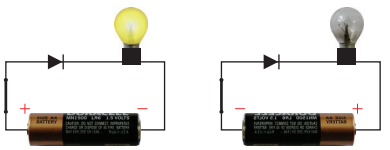
التيار المنقول يساوي

$$i = \frac{P}{V} = \frac{6300\times10^6\ \text{W}}{1.20\times10^6\ \text{V}} = 5250\ \text{A}$$

إذًا القدرة المفقودة تساوي

$$P = i^2R = (5250\ \text{A})^2(57.2\ \Omega) = 1580\ \text{MW}$$

وهذا قريب (في نطاق خطأ التقريب) من 25% من إجمالي القدرة التي تبلغ 6300 MW. ومن ثَمَّ، تبدو النتيجة التي توصلنا إليها منطقية.

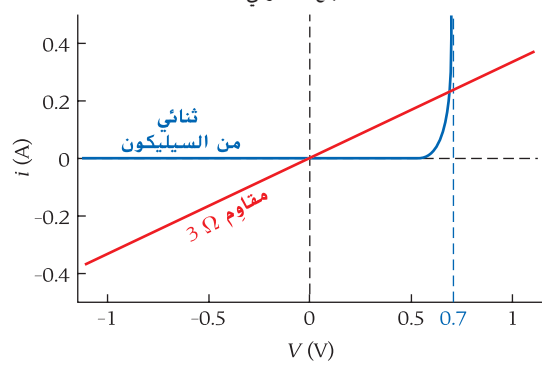


الشكل 5.24 (a) الدائرة في الشكل 5.2c، ولكنها تتضمن ثنائيًا. (b) يتسبب عكس اتجاه فرق الجهد من البطارية توقف تدفق التيار وتوقف إضاءة المصباح الضوئي.

5.8 الثنائي أحادي الاتجاه في الدوائر الكهربائية (ديود)
Diodes: One-Way Streets in Circuits

ورد في القسم 5.4 أنَّ العديد من المقاومات ينطبق عليها قانون أوم. برغم ذلك، لوحظ أنَّه يوجد أيضًا مقاومات غير أومية لا ينطبق عليها قانون أوم. يعد الثنائي من الأمثلة الشائعة والمفيدة جدًا على ذلك. *الثنائي* عبارة عن جهاز إلكتروني مصمم لتوصيل التيار في اتجاه واحد دون الاتجاه الآخر. تذكَّر أنَّ الشكل 5.2c يوضِّح أنَّ المصباح الكهربائي لا يزال مضاءً بالشدة ذاتها عندما انعكست البطارية التي كان متصلًا بها. إذا أضيف الثنائي (الذي يمثله الرمز ⟶|) إلى الدائرة الكهربائية ذاتها، يمنع الثنائي تدفق التيار عند انعكاس فرق الجهد الذي توفره البطارية، انظر الشكل 5.24. يعمل الثنائي كمسار أحادي الاتجاه للتيار.

يوضِّح الشكل 5.25 التيار مقابل فرق الجهد لمقاوِم أومي مقاومته 3 Ω و ثنائي من السيليكون. ينطبق قانون أوم على المقاوم، مع تدفق التيار في الاتجاه المعاكس عندما يكون فرق الجهد سالبًا. مخطط التيار مقابل فرق الجهد للمقاوِم عبارة عن خط مستقيم بميل مقداره $\frac{1}{3}$ Ω. ثنائي السيليكون متصل بحيث لا يوصل أي تيار عندما يكون فرق الجهد سالبًا. سيوصل ثنائي السيليكون هذا، مثل معظم الوصلات الثنائية،



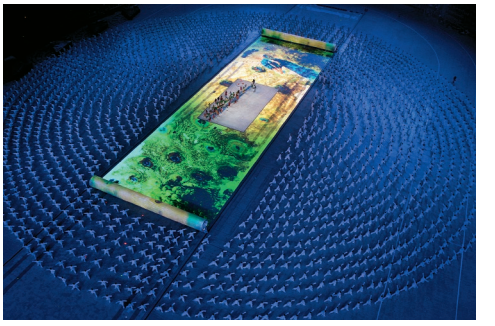
الشكل 5.25 التيار كدالة لفرق الجهد لمقاوم (باللون الأحمر) والثنائي (باللون الأزرق).

التيار إذا كان فرق الجهد أعلى من 0.7 V، بالنسبة إلى فروق الجهد الأعلى من هذا الحد، سيوصِّل الثنائي التيار، أمَّا إذا كانت أقل من ذلك، فلن يوصِّل أي تيار. يزيد تشغيل الثنائي أعلى من حد فرق الجهد زيادة أسيّة؛ حيث يمكن أن تكون هذه الزيادة فورية، كما هو موضَّح في الشكل 5.5.

إنَّ الوصلات الثنائية مفيدة للغاية في تحويل التيار المتردد إلى تيار مستمر، كما سنرى لاحقًا. تتطلب مبادئ الفيزياء الأساسية التي تشكل أساس عمل الوصلات الثنائية فهمًا لميكانيكا الكم.

أحد أنواع الوصلات الثنائية المفيدة بصفة خاصة هو الثنائي الباعث للضوء (LED)، الذي لا يقتصر على تنظيم التيار في الدائرة الكهربائية فحسب، بل يبعث أيضًا الضوء بطول موجي واحد بطريقة محكمة للغاية. وقد تمّ تصنيع مصابيح الثنائية الباعثة للضوء (المعروفة باسم LED) بأطوال موجية مختلفة، وتبعث تلك المصابيح الضوء بفعالية أكثر من المصابيح المتوهجة التقليدية. ويتم قياس شدة الضوء بوحدة اللومن (lm). يمكن المقارنة بين مصادر الضوء من حيث عدد وحدات اللومن التي تنتجها لكل واط للطاقة الكهربائية. خلال العقد الماضي، أدى بحث مكثف في مجال تكنولوجيا مصابيح LED إلى الزيادة الهائلة في كفاءة ناتج مصابيح LED، التي وصلت إلى قيم تتراوح بين 130 lm/W و170 lm/W وهذه القيم مميزة جدًا مقارنة بقيم المصابيح المتوهجة التقليدية (التي تتراوح بين 5 و20 lm/W)، ومصابيح الهالوجين (التي تتراوح بين 20 و30 lm/W)، ومصابيح الفلوريسنت عالية الكفاءة (التي تتراوح بين 30 و95 lm/W). ولا تزال أسعار مصابيح LED (وخصوصًا، مصابيح LED "البيضاء") عالية نسبيًّا ولكن من المتوقع أن تنخفض انخفاضًا كبيرًا. تستهلك الولايات المتحدة أكثر من 100 مليار kWh من الطاقة الكهربائية للإضاءة فقط كل عام، أي ما يعادل 10% تقريبًا من إجمالي استهلاك الطاقة في الولايات المتحدة. يمكن أن يوفر الاستخدام العام للإضاءة بمصابيح LED من 70% إلى 90% من ذلك المقدار البالغ 100 مليار kWh، وهذا يعادل ناتج الطاقة السنوي من 10 محطات توليد تعمل بالطاقة النووية تقريبًا (حوالي 1 GW لكل منها).

كما تُستخدم مصابيح LED في شاشات العرض الكبيرة، حيث يكون ناتج الإضاءة العالي أمرًا مرغوبًا. ربما كانت أكثر تلك الشاشات إثارة للإعجاب هي التي تم عرضها أثناء حفل افتتاح أولمبياد بكين في عام 2008 (الشكل 5.26). حيث استخدمت شاشة العرض 44,000 مصباحًا من مصابيح LED الفردية وكانت أبعادها مذهلة حيث بلغت 147 m و22 m.



الشكل 5.26 شاشة عملاقة من مصابيح LED استُخدمت أثناء حفل افتتاح الألعاب الأولمبية عام 2008 في بكين.

سؤال الاختبار الذاتي 5.4

افترض أنَّ البطارية في الشكل 5.24 لها فرق جهد 1.5 V بين طرفيها وأنَّ الثنائي مصنوع من السليكون كالمبين في الشكل 5.5. ما قيم انخفاض الجهد عبر الثنائي ومصباح الإضاءة في الجزأين (a) و(b) في الشكل 5.24؟

ما تعلمناه | دليل المذاكرة للاختبار

- يعرَّف التيار، i، على أنه المعدل الزمني لتدفق الشحنة، q، خلال نقطة معينة: $i = \frac{dq}{dt}$
- يمكن الحصول على مقدار متوسط كثافة التيار، J، في مساحة مقطع عرضي معينة، A، في موصِّل ما بالمعادلة $J = \frac{i}{A}$
- يرتبط مقدار كثافة التيار، J، بمقدار سرعة الانسياق، v_d، للتيار الحامل للشحنات، $e-$، بالمعادلة $J = \frac{i}{A} = -nev_d$ حيث n هو عدد حاملات الشحنة لكل وحدة حجم.
- تعرَّف المقاومة النوعية، ρ، لمادة ما بدلالة مقادير المجال الكهربائي المطبَّق عبر المادة، E، وكثافة التيار الناتجة، J: $\rho = \frac{E}{J}$
- المقاومة، R، لجهاز معين له مقاومة نوعية ρ، وطول L، ومساحة مقطع عرضي ثابتة A، هي $R = \rho\frac{L}{A}$
- يمكن الحصول على التأثير الحراري للمقاومة النوعية لمادة ما من العلاقة $\rho - \rho_0 = \rho_0\alpha(T - T_0)$، حيث يمثل ρ المقاومة النوعية النهائية، ويمثل ρ_0 لمقاومة النوعية الأولية، ويمثل α معامل درجة الحرارة للمقاومة النوعية الكهربائية، ويمثل T درجة الحرارة النهائية، ويمثل T_0 درجة الحرارة الأولية.
- القوة الدافعة الكهربائية، أو emf، هي فرق الجهد الناتج عن جهاز ما يدفع التيار عبر الدائرة الكهربائية.
- ينص قانون أوم على أنَّه عند ظهور فرق جهد، ΔV، عبر مقاوِم، R، فإنَّ التيار، i، المتدفق عبر المقاوِم يساوي $i = \frac{\Delta V}{R}$
- يمكن أن تحل المقاومة المكافئة، R_{eq}، محل المقاوِمات المتصلة على التوالي، وتُحدد قيمتها بجمع مقاوَمات المقاوِمات: $R_{eq} = \sum_{i=1}^{n} R_i$
- المقاوِمات المتصلة على التوازي يمكن أن يحل محلها مقاومة مكافئة، R_{eq}، وتُحدد بالعلاقة $\frac{1}{R_{eq}} = \sum_{i=1}^{n}\frac{1}{R_i}$
- القدرة، P، المبدَّدة بواسطة مقاوِم، R، يتدفق عبره تيار، i، يمكن الحصول عليها من خلال $P = i\Delta V = i^2R = \frac{(\Delta V)^2}{R}$ حيث ΔV هو انخفاض الجهد عبر المقاوِم.

إجابات أسئلة الاختبار الذاتي

5.1 $\frac{700\ \text{mAh}}{0.1\ \text{mA}} = 7000\ \text{h} \approx 292\ \text{days}$

5.2 $\Delta V = iR \Rightarrow i = \frac{\Delta V}{R} = \frac{1.50\ \text{V}}{10.0\ \Omega} = 0.150\ \text{A}$

5.3 يحدث أقصى تسخين للمقاومة الخارجية عندما تتساوى المقاومة الخارجية مع المقاومة الداخلية.

$$V_t = V_{emf} + iR_i = i(R + R_i)$$

$$P_{heat} = i^2R = \frac{V_t^2 R}{(R + R_i)^2}$$

بحد أقصى

$$\frac{dP_{heat}}{dR} = -\frac{2V_t^2 R}{(R + R_i)^3} + \frac{V_t^2}{(R + R_i)^2} = 0$$

نستنتج من ذلك أنها تتبع العلاقة $R = R_i$.

يمكنك التحقق من أنَّ القيمة القصوى هذه هي أقصى قيمة عن طريق حساب المشتقة الثانية في العلاقة $R = R_i$:

$$\left.\frac{d^2P_{heat}}{dR^2}\right|_{R=R_i} = V_t^2\left[\frac{6}{16R^3} - \frac{5}{8R^3}\right] = -\frac{V_t^2}{R^3}\left(\frac{1}{2}\right) < 0$$

5.4 يجب أن يكون مجموع انخفاضي الجهد، في الثنائي وفي المصباح الضوئي، بقيمة 1.5 V، وهو فرق الجهد الذي توفره البطارية. في الجزء (b)، يمنع الثنائي سريان أي تيار؛ لذلك فإنَّ انخفاض الجهد في الثنائي يساوي 1.5 V في حين يساوي صفرًا في المصباح الضوئي. في الجزء (a)، انخفاض الجهد في الثنائي يساوي 0.7 V (انظر الشكل 5.25). ومن ثَمَّ يساوي انخفاض الجهد في المصباح الضوئي 1.5 V − 0.7 V = 0.8 V.

إرشادات حل المسائل

1. إذا لم يتوفر مخطط الدائرة الكهربائية كجزء من المسألة، فارسم مخططًا بنفسك واكتب عليه كل القيم المعطاة والمركبات المجهولة. حدد اتجاه التيار، بداية من مصدر القوة الدافعة الكهربائية. (لا تقلق حيال تحديد اتجاه التيار بطريقة خاطئة في الرسم التخطيطي؛ إذا خمنته بطريقة خاطئة، فستكون إجابتك النهائية عن التيار رقمًا سالبًا).

2. يوفر مصدر القوة الدافعة الكهربائية جهدًا للدائرة، وتقلل المقاومات الجهد في الدائرة. وعلى الرغم من ذلك، احرص على التحقق من اتجاه جهد مصدر القوة الدافعة الكهربائية بالنسبة إلى اتجاه التيار؛ يأخذ التيار المتدفق في اتجاه عكس جهد القوة الدافعة الكهربائية فرق جهد سالبًا.

3. يساوي مجموع قيم انخفاض الجهد عبر المقاومات في دائرة ما المقدار الصافي للقوة الدافعة الكهربائية المتوفرة للدائرة الكهربائية. (هذه نتيجة لقانون حفظ الطاقة).

4. في أي جزء من السلك، يكون التيار الكهربائي متساويًا. (هذه نتيجة لقانون حفظ الشحنة).

أسئلة الاختيار من متعدد

5.1 إذا زاد مقدار التيار خلال المقاوم بمعامل 2، فإلى أي مدى سيؤثر ذلك على القدرة المبدَّدة؟

e) تقل بمعامل 4.
b) تزيد بمعامل 2.
c) تقل بمعامل 8.
d) تزيد بمعامل 4.

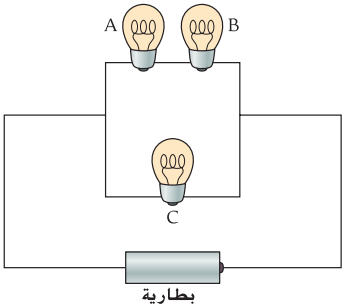
5.2 تقوم بتوصيل مقاومين على التوازي، المقاوم A له مقاومة كبيرة جدًا والمقاوم B له مقاومة صغيرة جدًا. ستكون المقاومة المكافئة لهذه المجموعة

a) أكبر بقليل من مقاومة المقاوم A.
b) أقل بقليل من مقاومة المقاوم A.
c) أكبر بقليل من مقاومة المقاوم B.
d) أقل بقليل من مقاومة المقاوم B.

5.3 سلكان أسطوانيان، 1 و2 مصنوعان من المادة نفسها، ولهما المقاومة نفسها. إذا كان طول السلك 2 ضعف طول السلك 1، فما نسبة مساحة المقطع العرضي لكل منهما، A_1 و A_2؟

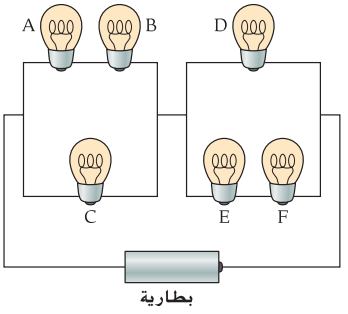
a) $A_1/A_2 = 2$
b) $A_1/A_2 = 4$
c) $A_1/A_2 = 0.5$
d) $A_1/A_2 = 0.25$

5.4 المصابيح الضوئية الثلاثة في الدائرة الكهربائية الموضحة في الشكل كلها متطابقة. أي المصابيح الثلاثة يضيء بشكل أكثر سطوعًا؟



a) A
b) B
c) C
d) A و B
e) يتساوى الثلاثة في السطوع.

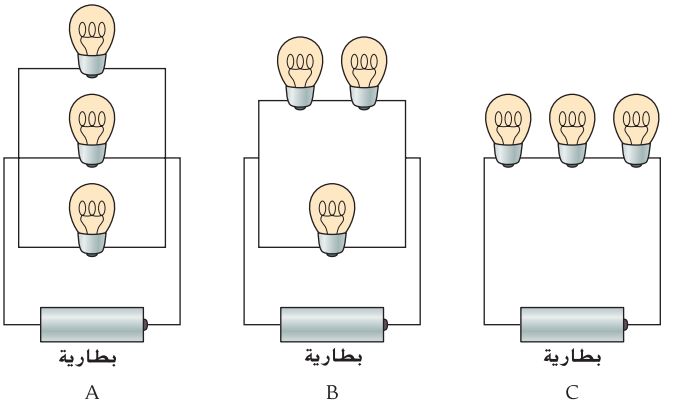
5.5 المصابيح الضوئية الستة في الدائرة الكهربائية الموضحة في الشكل كلها متطابقة. ما الترتيب الذي يعبر بشكل صحيح عن السطوع النسبي للمصابيح؟ (*ملاحظة:* كلما زاد التيار المتدفق خلال المصباح الضوئي، زاد سطوعه!)



a) A = B > C = D > E = F
b) A = B = E = F > C = D
c) C = D > A = B = E = F
d) A = B = C = D = E = F

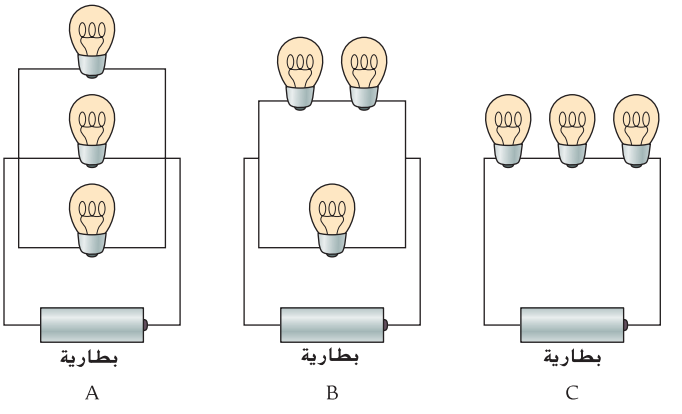
5.6 أي من ترتيبات المصابيح الضوئية الثلاثة المتطابقة الموضحة في الشكل يسحب مقدار التيار الأكبر من البطارية؟

a) A
b) B
c) C
d) يسحب الثلاثة تيارًا متساويًا.
e) يتعادل A و C في سحب أكبر تيار.

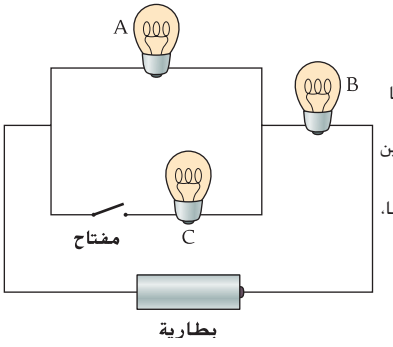


5.7 أي من ترتيبات المصابيح الضوئية الثلاثة المتطابقة الموضحة في الشكل له المقاومة الأعلى؟

a) A
b) B
c) C
d) الثلاثة لهم المقاومة نفسها.
e) يتعادل A و C في أنَّ لهما أعلى مقاومة.



5.8 ثلاثة مصابيح ضوئية متطابقة متصلة كما هو موضح في الشكل. في البداية يكون المفتاح مغلقًا. عندما يكون المفتاح مفتوحًا (كما هو مبين في الشكل)، ينطفئ المصباح C. ماذا يحدث للمصباحين A و B؟



a) يصبح المصباح A أكثر سطوعًا، ويصبح المصباح B أقل سطوعًا.
b) يصبح كلا المصباحين A و B أكثر سطوعًا.
c) يصبح كلا المصباحين A و B أقل سطوعًا.
d) يصبح المصباح A أقل سطوعًا، ويصبح المصباح B أكثر سطوعًا.

5.9 أي الأسلاك التالية يتدفق عبره تيار أكبر؟

a) سلك نحاسي طوله 1 m وقطره 1 mm متصل ببطارية 10 V
b) سلك نحاسي طوله 0.5 m وقطره 0.5 mm متصل ببطارية 5 V
c) سلك نحاسي طوله 2 m وقطره 2 mm متصل ببطارية 20 V
d) سلك نحاسي طوله 1 m وقطره 0.5 mm متصل ببطارية 5 V
e) يتدفق التيار نفسه عبر كل الأسلاك.

5.10 ينص قانون أوم على أنَّ فرق الجهد عبر جهاز ما يساوي

a) التيار المتدفق عبر الجهاز مضروبًا في مقاومة الجهاز.
b) التيار المتدفق عبر الجهاز مقسومًا على مقاومة الجهاز.
c) مقاومة الجهاز مقسومة على التيار المتدفق عبر الجهاز.
d) التيار المتدفق عبر الجهاز مضروبًا في مساحة المقطع العرضي للجهاز.
e) التيار المتدفق عبر الجهاز مضروبًا في طول الجهاز.

5.11 مجال كهربائي ثابت محفوظ داخل شبه موصل ما. كلما انخفضت درجة الحرارة، فإنَّ مقدار كثافة التيار داخل شبه الموصل

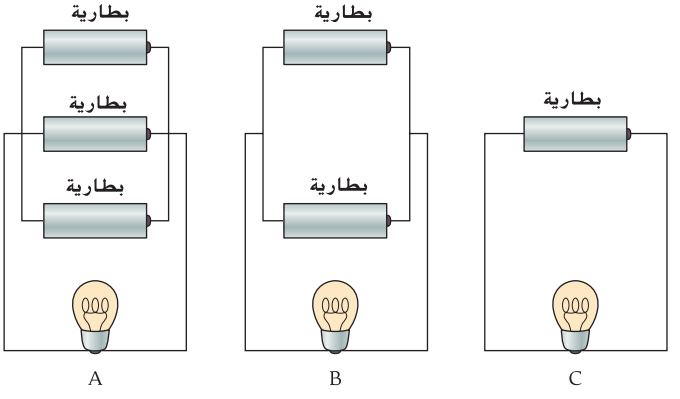
a) تزيد.
b) تظل كما هي.
c) تقل.
d) ربما تقل أو تزيد.

5.12 أي العبارات التالية غير صحيحة؟

a) يكون التيار المتدفق عبر أجهزة إلكترونية متصلة على التوالي متساويًا.
b) يكون التيار المتدفق عبر أجهزة إلكترونية متصلة على التوازي متساويًا.
c) يتدفق المزيد من التيار عبر المقاومة الأصغر عند توصيل مقاومان على التوازي.
d) يتدفق المزيد من التيار عبر المقاومة الأصغر عند توصيل مقاومان على التوالي.

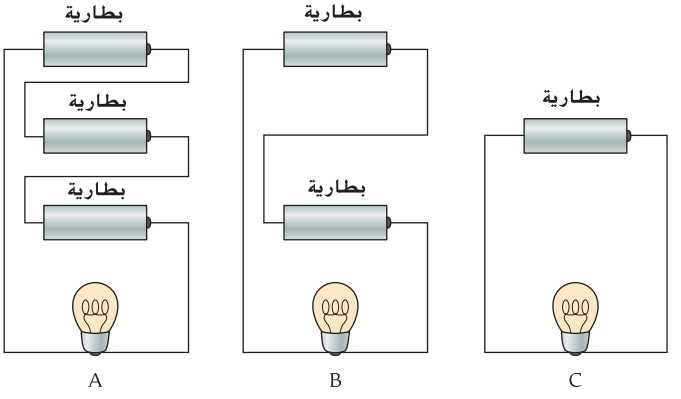
5.13 تم توصيل بطاريات متطابقة بالمصباح الضوئي نفسه بثلاثة ترتيبات مختلفة كما هو مبين في الشكل. افترض أنَّ البطاريات ليست لها مقاومة داخلية. بأي ترتيب سيكون المصباح الكهربائي أكثر سطوعًا؟

a) A
b) B
c) C
d) سيكون للمصباح السطوع نفسه في الترتيبات الثلاثة.
e) لن يضيئ المصباح في أي من الترتيبات.



5.14 تم توصيل بطاريات متطابقة بالمصباح الضوئي نفسه بثلاثة ترتيبات مختلفة كما هو مبين في الشكل. افترض أنَّ البطاريات ليست لها مقاومة داخلية. بأي ترتيب سيكون المصباح الكهربائي أكثر سطوعًا؟

a) A
b) B
c) C
d) سيكون للمصباح السطوع نفسه في الترتيبات الثلاثة.
e) لن يضيئ المصباح في أي من الترتيبات.



أسئلة مفاهيمية

5.15 ماذا يمكن أن يحدث لسرعة انسياق الإلكترونات في سلك ما إذا اختفت المقاومة بسبب الاصطدامات بين الإلكترونات والذرات في الشبكة البلورية للفلز؟

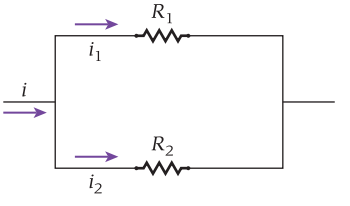
5.16 لماذا تحترق المصابيح الضوئية عادة بمجرد تشغيلها بدلًا من أن يحدث ذلك أثناء إضاءتها؟

5.17 تم توصيل مصباحين ضوئيين متطابقين ببطارية ما. هل ستكون إضاءة المصباحين أكثر سطوعًا إذا تم توصيلهما على التوالي أم على التوازي؟

5.18 تم توصيل مقاومين لهما مقاومتان R_1 و R_2 على التوازي. وضح أنه بصرف النظر عن القيم الفعلية لكل من R_1 و R_2، ستكون المقاومة المكافئة أقل من المقاومة الأصغر منهما دائمًا.

5.19 أثبت أنه في المقاومات المتصلة على التوالي، دائمًا ما تكون المقاومة الأكبر هي الأكثر تبديدًا للقدرة. في حين أنه في المقاومات المتصلة على التوازي، دائمًا ما تكون المقاومة الأصغر هي الأكثر تبديدًا للقدرة.

5.20 بالنسبة إلى التوصيلات المبينة في الشكل، حدد التيار i_1 بدلالة التيار الكلي، i، و R_1 و R_2.



5.21 تم توصيل عدد لا نهائي من المقاومات على التوازي. إذا كانت $R_1 = 10\ \Omega$ و $R_2 = 10^2\ \Omega$ و $R_3 = 10^3\ \Omega$، وهكذا، فأثبت أنَّ $R_{eq} = 9\ \Omega$.

5.22 معك بطاريتان متطابقتان وقطعتان من السلك. مقاومة السلك الأحمر أعلى من مقاومة السلك الأسود. وقمت بتوصيل السلك الأحمر بطرفي إحدى البطاريتين والسلك الأسود بطرفي البطارية الأخرى. أي السلكين يصبح أكثر سخونة؟

5.23 هل ينبغي اعتبار المصابيح الضوئية (المصابيح المتوهجة العادية المزودة بفتيل من التنجستن) من المقاومات الأومية؟ لمَ أو لمَ لا؟ كيف يمكن تحديد ذلك بالتجربة؟

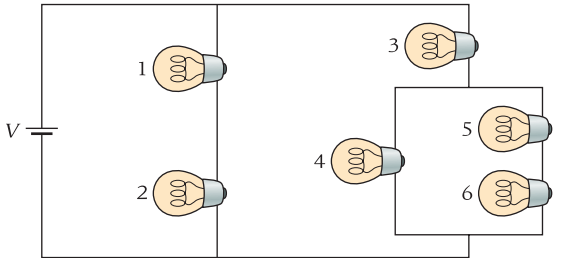
5.24 تُستخدم حزمة من الجسيمات المشحونة لحقن شحنة، Q_0، في منطقة صغيرة غير منتظمة الشكل (ليست تجويفًا، بل مجرد منطقة في كتلة صلبة) داخل كتلة من مادة أومية لها موصلية σ وسماحية ε في زمن $t = 0$. في النهاية، ستتحرك كل الشحنة المحقونة إلى السطح الخارجي للكتلة، ولكن بأي سرعة؟

a) استنبط معادلة تفاضلية للشحنة، $Q(t)$، في منطقة الحقن كدالة للزمن.

b) حل المعادلة من الجزء (a) لإيجاد $Q(t)$ لكل قيم $t \geq 0$.

5.25 أثبت أنَّ سرعة انسياق الإلكترونات الحرة في السلك لا تعتمد على مساحة المقطع العرضي للسلك.

5.26 رتب سطوع المصابيح الضوئية الستة المتطابقة في الدائرة الموضحة في الشكل. يمكن معاملة كل مصباح ضوئي كمقاوم متطابق له مقاومة R.



5.27 تم توصيل موصلين متساويين في الطول ونصف القطر بجهاز القوة الدافعة الكهربائية نفسه. إذا كانت مقاومة أحدهما ضعف مقاومة الآخر، فأي الموصلين سيتم تزويده بالطاقة أكثر من الآخر؟

تمارين

يشير رقم المسألة الأزرق إلى وجود حل للمسألة في دليل حلول الطالب. تشير النقطة الواحدة • والنقطتان •• إلى تصاعد مستوى صعوبة المسألة.

القسمان 5.1 و5.2

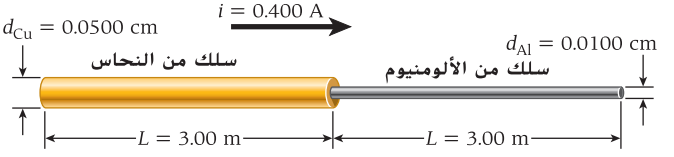
5.28 كم عدد البروتونات في الحزمة التي تتحرك بسرعة قريبة من سرعة الضوء في معجل تيفاترون في مختبر فيرميلاب وتحمل 11 mA من التيار حول محيط طوله 6.3 km لحلقة تيفاترون الرئيسة؟

5.29 ما كثافة التيار في سلك من الألمنيوم نصف قطره 1.00 mm ويحمل تيارًا شدته 1.00 mA؟ ما سرعة انسياق الإلكترونات التي تحمل هذا التيار؟ تبلغ كثافة الألومنيوم $2.70 \times 10^3\ kg/m^3$. ويحتوي المول الواحد من الألمنيوم على كتلة قدرها 26.98 g. يوجد إلكترون موصل واحد في كل ذرة ألمنيوم.

5.30 • سلك نحاسي قطره $d_{Cu} = 0.0500\ cm$، وطوله 3.00 m، وله كثافة حامل شحنة تبلغ $8.50 \cdot 10^{28}$ إلكترون لكل متر^3. كما هو مبين في الشكل، تم توصيل السلك النحاسي بسلك من الألمنيوم له الطول نفسه وقطره $d_{Al} = 0.0100\ cm$ وله كثافة حامل شحنة تبلغ 6.02×10^{28} إلكترون لكل متر^3. يتدفق تيار قدره 0.400 A في السلك النحاسي.

a) ما نسبة كثافتي التيارين في السلكين، J_{Cu}/J_{Al}؟

b) ما نسبة سرعتي الانسياق في السلكين، v_{d-Cu}/v_{d-Al}؟



5.31 • يتدفق تيار شدته 0.123 mA في سلك من الفضة تبلغ مساحة مقطعه العرضي $0.923\ mm^2$.

a) أوجد كثافة الإلكترونات داخل السلك، مفترضًا وجود إلكترون توصيل واحد في كل ذرة فضة.

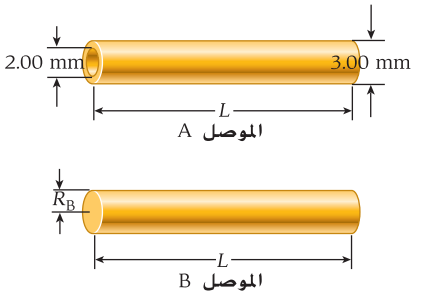
b) أوجد كثافة التيار في السلك، مفترضًا أنَّ التيار منتظم.

c) أوجد سرعة انسياق الإلكترونات.

القسم 5.3

5.32 ما مقاومة سلك نحاسي طوله $l = 10.9\ m$ وقطره $d = 1.30\ mm$؟ تبلغ المقاومة النوعية للنحاس $1.72 \cdot 10^{-8}\ \Omega\ m$.

5.33 موصلان مصنوعان من المادة نفسها ومتساويان في الطول L. الموصل A عبارة عن أنبوب مجوف قطره الداخلي 2.00 mm وقطره الخارجي 3.00 mm، الموصل B عبارة عن سلك مصمت نصف قطره R_B. ما قيمة R_B اللازم توافرها للموصلين لتكون لهم المقاومة نفسها المقيسة بين طرفيهما؟



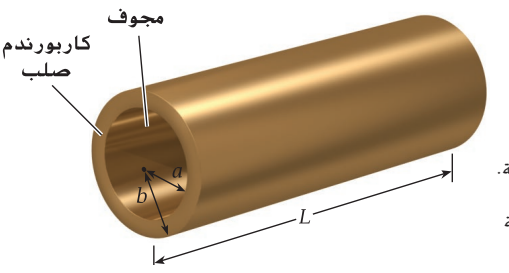
5.34 ملف نحاسي مقاومته 0.100 Ω عند درجة حرارة الغرفة (20.0 °C). ما مقاومته عند تبريد الغرفة إلى 100− °C؟

5.35 ما معيار سلك من الألمنيوم له مقاومة لكل وحدة طول مماثلة لسلك نحاسي معيار 12؟

5.36 رقاقة مستطيلة من السيليكون النقي، مقاومتها النوعية $\rho = 2300\ \Omega\ m$، وأبعادها 2.00 cm و3.00 cm و0.0100 cm. أوجد أقصى مقاومة لهذه الرقاقة المستطيلة بين أي وجهين.

5.37• سلك نحاسي طوله 1.00 m ونصف قطره 0.500 mm تم تمديده ليصبح طوله 2.00 m. ما التغير الحادث في المقاومة في صورة كسر، $\Delta R/R$، الناتج عن تمديد السلك؟ ما النسبة $\Delta R/R$ لسلك مصنوع من الألمنيوم له الأبعاد الأولية نفسها؟

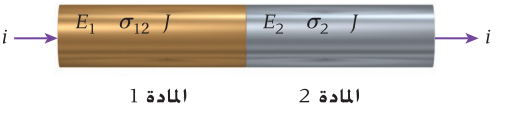
5.38• أكثر المواد المستخدمة بكثرة في ورق الصنفرة هي كربيد السيليكون، وتستخدم على نطاق واسع أيضًا في التطبيقات الكهربائية. المقاوم الأنبوبي هو أحد الأجهزة الشائعة المصنوعة من نوع خاص من كربيد السيليكون يسمى *الكاربورندم*. يتكون مقاوم معين من الكاربورندم (انظر الشكل) من هيكل أسطواني سميك الجدار (أنبوب) نصف قطره الداخلي $a = 1.50$ cm، ونصف قطره الخارجي $b = 2.50$ cm، وطوله $L = 60.0$ cm. تبلغ مقاومة هذا المقاوم المصنوع من الكاربورندم 1.00 Ω عند درجة حرارة 20.0 °C.



a) احسب المقاومة النوعية الكاربورندم في درجة حرارة الغرفة. قارن هذه المقاومة النوعية بالمقاومة النوعية للموصلات الأكثر شيوعًا (النحاس والألمنيوم والفضة).

b) للكاربورندم معامل حراري مرتفع للمقاوميّة: $\alpha = 2.14 \times 10^{-3}\ K^{-1}$. إذا تم تسخين مقاوم الكابورندم في جهاز معين إلى 300 C°، فما النسبة المئوية للتغير في المقاومة بين درجة حرارة الغرفة (20.0°C) ودرجة حرارة التشغيل هذه؟

5.39•• كما هو مبين في الشكل، يتدفق تيار، i، عبر نقطة اتصال بين مادتين لهما مساحة المقطع العرضي نفسها ولهما الموصليتان σ_1 وσ_2. أثبت أنَّ كمية الشحنة الكلية عند نقطة الاتصال هي $\varepsilon_0 i(1/\sigma_2 - 1/\sigma_1)$.



القسم 5.4

5.40 تم استخدام فرق جهد 12.0 V على سلك مساحة مقطعه العرضي $4.50\ mm^2$ وطوله 1000 km. يبلغ التيار المتدفق عبر السلك 3.20×10^{-3} A.

a) ما مقاومة السلك؟

b) ما نوع هذا السلك؟

5.41 يتم الترويج لنوع من بطاريات السيارة 12.0 V على أنها توفر "600 amps في الأجواء الباردة". بافتراض أنَّ هذا التيار هو الذي توفره البطارية عندما تكون أطرافها قصيرة، أي متصلة بمقاومة لا تذكر، حدد المقاومة الداخلية للبطارية. (*مهم:* ✋ تجرب مثل هذا التوصيل لأنه قد يكون قاتلًا!)

5.42 سلك نحاسي نصف قطره $r = 0.0250$ cm، وطوله 3.00 m، ومقاوميّته $\rho = 1.72 \times 10^{-8}\ \Omega\ m$، ويحمل تيارًا شدته 0.400 A. تبلغ كثافة حامل الشحنة للسلك 8.50×10^{28} إلكترون لكل متر^3.

a) ما المقاومة، R، للسلك؟

b) ما فرق الجهد الكهربائي، ΔV، عبر السلك؟

a) ما المجال الكهربائي، E، داخل السلك؟

5.43• سلك نحاسي معيار 34 ($A = 0.0201\ mm^2$)، تم استخدام فرق جهد ثابت قدره 0.100 V على طوله الذي يبلغ 1.00 m في درجة حرارة الغرفة (20.0°C)، ثُم تم تبريده إلى درجة حرارة النيتروجين السائل (77 K = −196 °C).

a) حدد النسبة المئوية للتغير في مقاومة السلك أثناء انخفاض درجة الحرارة.

b) حدد النسبة المئوية للتغير في التيار المتدفق في السلك.

c) قارن بين سرعتي انسياق الإلكترونات عند درجتي الحرارة.

القسم 5.5

5.44 تم توصيل مقاوم مجهول المقاومة ومقاوم تبلغ مقاومته 35.0 Ω بجهاز قوة دافعة كهربائية 120 V بطريقة تسمح بتدفق تيار شدته 11.0 A. ما قيمة المقاومة المجهولة؟

5.45 بطارية لها فرق جهد قدره 14.50 V في حالة عدم توصيلها بدائرة كهربائية. عندما تم توصيل مقاوم مقاومته 17.91 Ω بطرفي البطارية، هبط فرق الجهد إلى 12.68 V. ما قيمة المقاومة الداخلية للبطارية؟

5.46 عندما يتم توصيل بطارية بمقاوم مقاومته 100 Ω، تكون شدة التيار 4.00 A. عندما يتم توصيل البطارية نفسها بمقاوم مقاومته 400 Ω، تكون شدة التيار 1.01 A. أوجد القوة الدافعة الكهربائية التي وفرتها البطارية والمقاومة الداخلية للبطارية.

5.47• تم توصيل مصباح ضوئي بمصدر قوة دافعة كهربائية. يوجد انخفاض جهد بمقدار 6.20 V عبر المصباح الضوئي ويتدفق تيار شدته 4.10 A خلال المصباح الضوئي.

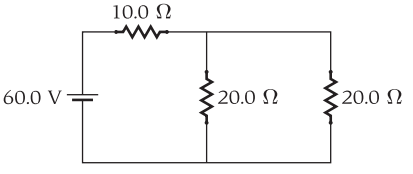
a) ما مقاومة المصباح الضوئي؟

b) تم توصيل مصباح ضوئي ثانٍ مطابق للأول على التوالي بالمصباح الأول. أصبح انخفاض الجهد عبر المصباحين 6.29 V، وشدة التيار المتدفق خلال المصباحين 2.90 A. احسب مقاومة كل مصباح.

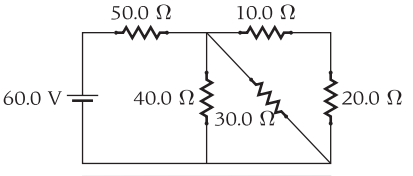
c) لماذا تختلف إجابتا الجزأين (a) و(b)؟

القسم 5.6

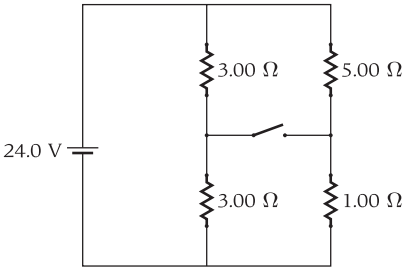
5.48 ما التيار المتدفق في المقاوم الذي تبلغ مقاومته 10.0 Ω في الدائرة الكهربائية الموضحة في الشكل؟



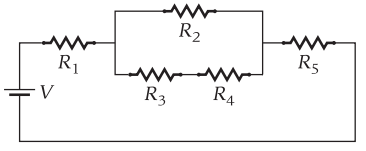
5.49 ما قيمة المقاومة المكافئة للمقاومات الخمس في الدائرة الكهربائية الموضحة في الشكل؟



5.50• ما التيار في الدائرة الموضحة في الشكل عندما يكون المفتاح (a) مفتوحًا والمفتاح (b) مغلقًا؟



5.51 بالنسبة إلى الدائرة الموضحة في الشكل، $R_1 = 6.00\ \Omega$، و$R_2 = 6.00\ \Omega$، و$R_3 = 2.00\ \Omega$، و$R_4 = 4.00\ \Omega$، و$R_5 = 3.00\ \Omega$، وفرق الجهد يبلغ 12.0 V.

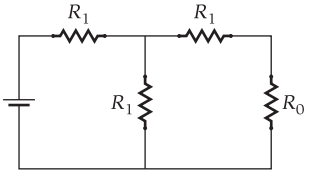


a) ما المقاومة المكافئة للدائرة؟

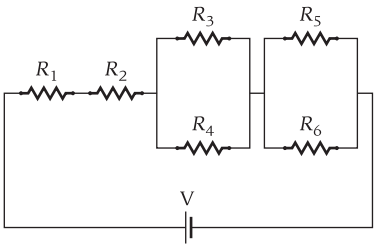
b) ما التيار المتدفق خلال R_5؟

c) ما انخفاض الجهد عبر R_3؟

5.52 تم توصيل أربع مقاومات كما هو مبين في الشكل. ما قيمة R_1، في صورة مضاعفات R_0، التي ستجعل المقاومة المكافئة للدائرة تساوي R_0؟



5.53• تتكون دائرة كهربائية من مصدر قوة دافعة كهربائية يبلغ جهده $V = 20.0$ V وست مقاومات، كما هو مبين في الشكل. تم توصيل المقاومين $R_1 = 5.00\ \Omega$ و$R_2 = 10.00\ \Omega$ على التوالي. وتوصيل المقاومين $R_3 = 5.00\ \Omega$



$R_4 = 5.00\ \Omega$ وعلى التوازي معًا R_1 وعلى التوالي مع R_2. وتوصيل المقاومين $R_5 = 2.00\ \Omega$ و$R_6 = 2.00\ \Omega$ على التوازي معًا وأيضًا على التوالي مع R_1 وR_2.

c) ما انخفاض الجهد عبر كل مقاوم؟

b) ما التيار المتدفق خلال كل مقاوم؟

5.54 • عندما يوضع جهاز ذو قوة دافعة كهربائية 40.0 V بين طرفي مقاومين متصلين على التوالي، يتدفق تيار قدره 10.0 A خلال كل مقاوم. عندما يوضع جهاز القوة الدافعة الكهربائية نفسه بين طرفي المقاومين نفسهما على التوازي، يبلغ التيار المتدفق خلال جهاز القوة الدافعة الكهربائية 50.0 A. ما مقدار المقاومة الأكبر منهما؟

القسم 5.7

5.55 تتسبب نبضة فولتية في ارتفاع الجهد الحطي في منزل ما سريعًا من 110 V إلى 150 V. ما النسبة المئوية للزيادة في خرج القدرة لمصباح متوهج يعمل بفتيل التنغستين وتبلغ قدرته 100 W أثناء تلك النبضة، مع افتراض أنَّ مقاومة المصباح تظل ثابتة؟

5.56 أنتجت سحابة رعدية مشابهة للسحابة الموضحة في المثال 24.3 صاعقة برق ضربت برج لاسلكي. إذا نقلت صاعقة البرق شحنة قدرها 5.00 C في غضون 0.100 ms وبقي الجهد ثابتًا عند 70.0 MV. أوجد (a) متوسط التيار (b) ومتوسط القدرة (c) وإجمالي الطاقة (d)ومقاومة الهواء الفعالة أثناء ضرب البرق للبرج.

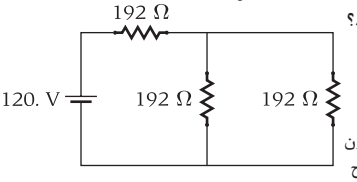
5.57 يستهلك مجفف شعر 1600 W من القدرة ويعمل بجهد 110 V. (افترض أنَّ التيار مستمر، في الواقع، تمثل هذه القيم جذر متوسط المربع لكميات التيار المتردد، ولكن الحساب لن يتأثر.

a) هل سيقوم مجفف الشعر بفصل قاطع التيار المصمم لقطع الدائرة في حال تجاوز التيار 15.0 A؟

b) ما مقاومة مجفف الشعر أثناء تشغيله؟

5.58 كم من المال يلزم صاحب بيت سداده لشركة الكهرباء إذا قام بتشغيل مصباح ضوئي متوهج بقدرة 100.00 W وتركه مُضاءً لمدة عام كامل؟ (افترض أنَّ تكلفة الكهرباء تساوي 0.12000 AED/kWh وأنَّ المصباح قد ظل مضاءً هذه المدة). يمكن أن ينتج مصباح فلوري صغير بقدرة 26.000 W كمية الضوء نفسها. كم ستكون التكلفة على صاحب المنزل إذا ترك مصباحًا كهذا مُضاءً لمدة عام؟

5.59 تم توصيل ثلاث مقاومات ببطارية كما هو مبين في الشكل.

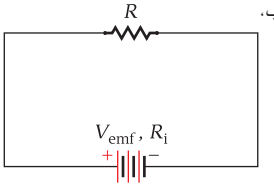


a) ما القدرة المبدَّدة في المقاومات الثلاثة؟

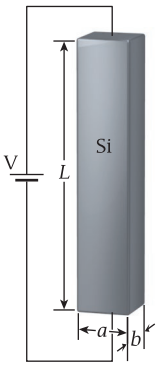
b) حدد انخفاض الجهد عبر كل مقاوم.

5.60 افترض أنَّ بطارية AAA قادرة على تزويد 625 mAh قبل هبوط جهدها عن 1.50 V. ما المدة التي ستكون البطارية قادرة خلالها على تزويد مصباح بقدرة 5.00 W بالطاقة قبل انخفاض جهدها عن 1.50 V؟

5.61 • أثبت أنَّ القدرة المزودة إلى الدائرة المبينة في الشكل بواسطة بطارية مقاومتها الداخلية R_i تبلغ أقصى قيمة لها عندما تكون مقاومة المقاوم، R، في الدائرة متساوية مع R_i. حدد القدرة المزودة إلى R. للتدريب، احسب الطاقة المبدَّدة بواسطة بطارية 12.0 V مقاومتها الداخلية 2.00 Ω عندما تكون $R =$ 1.00 Ω و$R = 2.00\ \Omega$ و$R = 3.00\ \Omega$.



5.62 • يمكن لسخان ماء يحتوي على ملف متصل بأطراف مصدر قدرة 15.0 V تسخين 250 mL من الماء من درجة حرارة الغرفة إلى درجة الغليان في غضون 45.0 s. ما مقاومة الملف؟



5.63 • تم تزويد فرق الجهد $V = 0.500$ V عبر كتلة من السليكون مقاومتها النوعية $8.70 \cdot 10^{-4}\ \Omega$ m.كما هو مبين بالشكل، أبعاد كتلة السليكون هي: العرض $a = 2.00$ mm والطول $L = 15.0$ cm. ومقاومة كتلة السيليكون تساوي 50.0 Ω. وكثافة حاملات الشحنة تبلغ $1.23 \times 10^{23}\ m^3$. افترض أنَّ كثافة التيار منتظمة داخل الكتلة وأنَّ التيار يتدفق داخل السيليكون طبقًا لقانون أوم. يبلغ الطول الإجمالي لسلك نحاسي موجود في الدائرة 75.0 cm وقطره 0.500 mm وتبلغ المقاومة النوعية النحاس $1.69 \times 10^{-8}\ \Omega$ m.

a) ما مقاومة، R_w، للسلك النحاسي؟

b) ما اتجاه التيار الكهربائي، i، ومقداره داخل الكتلة؟

c) ما سُمك الكتلة، b؟

d) في المتوسط، كم يستغرق مرور إلكترون من أحد طرفي الكتلة إلى الطرف الآخر؟

e) ما مقدار القدرة، P، المبدَّدة بواسطة الكتلة؟

f) في أي صورة من صور الطاقة تظهر هذه القدرة المبدَّدة؟

تمارين إضافية

5.64 في حالة طارئة، تحتاج إلى تشغيل جهاز لاسلكي يستهلك 30.0 W من القدرة عندما يكون متصلًا بمصدر قدرة 10.0 V. يوفر مصدر القدرة الوحيد الذي تمتلكه 5.0 kV. ولكنك تمتلك عددًا كبيرًا من المقاومات بمقاومة 5.0 Ω لكل منها. إذا أردت أن تكون القدرة الموجهة للراديو قريبة قدر الإمكان من 30.0 W، فكم عدد المقاومات التي يجب أن تستخدمها، وكيف يجب توصيلها (على التوالي أم على التوازي)؟

5.65 يستخدم نوع معين من أجهزة طهي النقانق فرق جهد قدره 120 V بين طرفي النقانق لطهيها باستخدام الحرارة الناتجة. إذا كانت كل واحدة من النقانق تحتاج إلى 48.0 kJ لطهيها، فما مقدار التيار المطلوب لطهي ثلاثة أصابع من النقانق معًا خلال 2.00 min؟ افترض أنَّ التوصيل على التوازي.

5.66 تحتوي دائرة على سلك نحاسي طوله 10.0 m ونصف قطره 1.00 mm متصل ببطارية جهدها 10.0 V. تم توصيل سلك من الألومنيوم طوله 5.00 m بالبطارية نفسها ويبدد مقدار القدرة نفسه. ما نصف قطر سلك الألمنيوم؟

5.67 تبلغ مقاومية موصل ما $\rho = 1.00 \cdot 10^{-5}\ \Omega$ m. إذا تم صنع سلك أسطواني من هذا الموصل، وكانت مساحة مقطعه العرضي $1.00 \cdot 10^{-6}\ m^2$. فما طول السلك الذي يحقق مقاومة قدرها 10.0 ΩΩ؟

5.68 سلكان أسطوانيان لهما الطول نفسه ومصنوعان من النحاس والألومنيوم. إذا تدفق بهما التيار نفسه واستُخدم فرق الجهد نفسه عبر طوليهما، فما نسبة نصفي قطريهما؟

5.69 تم توصيل مقومين مقاومتيهما 200 Ω و400 Ω ببطارية 9.00 V مثالية (a) على التوالي (b) وعلى التوازي. قارن القدرة المزودة إلى المقاوم 200 Ω.

5.70 ما (a) الموصلية الكهربائية (b) ونصف قطر عنصر التسخين الحديدي الذي يبلغ طوله 3.50 m في سخان جهده 110 V وقدرته 1500 W؟

5.71 تم استخدام مصباح ضوئي أوروبي بقدرة 100 W وجهد 240 V في منزل إماراتي حيث يتم تزويد المنازل بالكهرباء بجهد 120 V. ما مقدار الطاقة التي سيستهلكها؟

5.72 تم توصيل منزل حديث بجهد 115 V والتيار محدد بقواطع دائرة بقيمة أقصاها 200 A. (في هذه المسألة، تعامل مع هذه الكميات على أنها كميات تيار مستمر).

a) احسب الحد الأدنى للمقاومة الكلية لمجموعة الدوائر في المنزل في أي وقت.

b) احسب الحد الأقصى للقدرة الكهربائية التي يمكن للمنزل استهلاكها.

5.73 • تم توصيل بطارية 12.0 V مقاومتها الداخلية $R_i = 4.00\ \Omega$ بمقاوم خارجي مقاومته R. أوجد أقصى قدرة يمكن تزويدها إلى المقاوم.

5.74 • سلك متعدد الطبقات يتكون من قلب من الخارصين نصف قطره 1.00 mm محاط بغمد نحاسي سمكه 1.00 mm. تبلغ المقاومة النوعية للخارصين $\rho = 5.964 \times 10^{-8}\ \Omega$ m. ما مقاومة جديلة من هذا السلك طولها 10.0 m؟

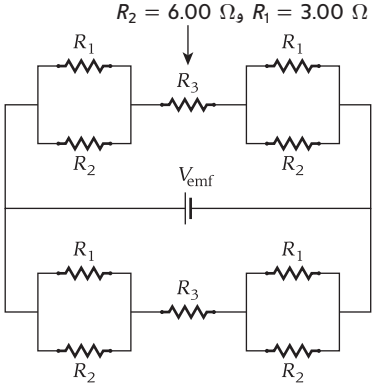
5.75• يسارع معجل ستانفورد الخطي حزمة تتكون من 2.0×10^{14} إلكترون في الثانية من خلال فرق جهد قدره 2.0×10^{10} V.

a) احسب التيار داخل الحزمة.

b) احسب قدرة الحزمة.

c) احسب المقاومة الأومية الفعالة للمعجل.

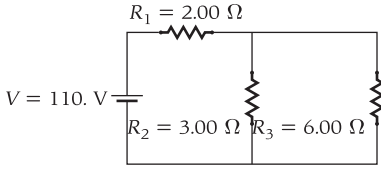
5.76• في الدائرة المبينة في الشكل، $R_1 = 3.00\ \Omega$ و$R_2 = 6.00\ \Omega$ و$R_3 = 20.0\ \Omega$ و$V_{emf} = 12.0$ V.



a) حدد قيمة المقاومة المكافئة.

b) احسب مقدار التيار المتدفق عبر R_3 على أعلى فرع للدائرة (ميز بسهم رأسي).

5.77• تم توصيل ثلاث مقاومات بمصدر قدرة جهده $V = 110$ V كما هو مبين في الشكل.

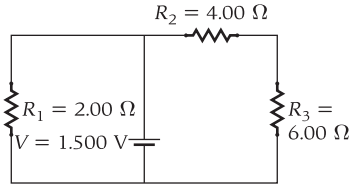


c) أوجد انخفاض الجهد عبر R_3.

b) أوجد التيار في R_1.

c)أوجد معدل تبديد الطاقة الحرارية من R_2.

5.78• تم توصيل بطارية جهدها $V = 1.500$ V بثلاث مقاومات كما هو مبين في الشكل.

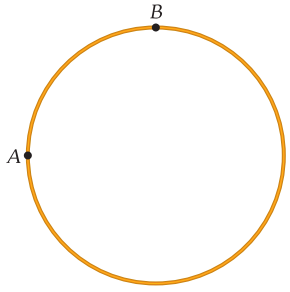


a) أوجد انخفاض الجهد في كل مقاوم.

b) أوجد التيار في كل مقاوم.

5.79• تم توصيل سلك نحاسي طوله 2.50 m بطرفي بطارية سيارة 12.0 V. افترض أنها معزولة تمامًا عن البيئة المحيطة. كم سيستغرق السلك النحاسي من الزمن بعد التوصيل ليبدأ في الانصهار؟ (معلومة مفيدة: الكثافة الكتلية للنحاس تساوي $8960\ kg/m^3$ ودرجة انصهاره 1359 K وحرارته النوعية 386 J/kg/K).

5.80• تم استخدام قطعة من سلك نحاسي لصنع حلقة دائرية نصف قطرها 10.0 cm. ومساحة المقطع العرضي للسلك $10.0\ mm^2$. تبعد النقطتان A وB بزاوية 90.0° عن بعضهما، كما هو مبين في الشكل. أوجد المقاومة بين النقطتين A وB.



5.81• سلكا توصيل متساويان في الطول $L_1 = L_2 = L = 10.0$ km ومتساويان في المقطع العرضي الدائري بنصف قطر قدره $r_1 = r_2 = r = 1.00$ mm. صُنع أحدهما من الفولاذ (مقاومته النوعية $\rho_{steel} = 40.0 \times 10^{-8}\ \Omega$ m)؛ وصُنع الآخر من النحاس (مقومته النوعية $\rho_{copper} = 1.68 \cdot 10^{-8}\ \Omega$ m).

a) احسب نسبة الطاقة التي يبددها السلكان، P_{copper}/P_{steel}، عندما يتصلان على التوازي ويُستخدم فرق جهد $V = 100.$V عليهما.

b) استنادًا إلى هذه النتيجة، كيف يمكنك شرح حقيقة أنَّ الموصلات المستخدمة في نقل الطاقة تُصنع من النحاس لا من الفولاذ؟

5.82• قبل تطوير فتيل التنجستن القابل للانحناء، استخدم توماس إديسون فتيل الكربون في المصابيح الضوئية. وعلى الرغم من أنَّ للكربون درجة انصهار عالية جدًا (3599°C)، تكون نسبة تساميه عالية في درجات الحرارة العالية. لذلك كانت مصابيح فتيل الكربون تحفظ عند درجات حرارة أقل، ونتيجة لذلك كانت إضاءتها أخفت من المصابيح المعتمدة على التنجستن التي جاءت بعدها. يتطلب مصباح فتيل الكربون النموذجي قدرة متوسطة قدرها 40 W، وعند استخدام 110 فولت عبره، وتبلغ درجة حرارة فتيله 1800°C، فإنَّ معامل درجة حرارة المقومة النوعية للكربون يكون سالبًا على عكس النحاس: $\alpha = -0.00050\ °C^{-1}$. احسب المقاومة في درجة حرارة الغرفة (20°C) لفتيل الكربون هذا.

5.83•• يُقال أنَّ المادة تكون *أومية* إذا أحدث مجال كهربائي، $\vec{E}$، في المادة ارتفاعًا لكثافة التيار $\vec{J} = \sigma\vec{E}$ وكانت الموصلية، σ، ثابتة ولا تعتمد على $\vec{E}$ أو $\vec{J}$ (هذه الصيغة المختصرة لقانون أوم). افترض أنَّ مجالًا كهربائيًا $\vec{E}$ ينتج كثافة تيار $\vec{J}$ في مادة ما وليس من الضروري أن تكون مرتبطة بقانون أوم؛ وهذا يعني أنه ربما تكون أومية أو لا تكون كذلك.

a) احسب معدل تبديد الطاقة (يُسمى أحيانًا *التسخين الأومي* أو *تسخين جول*) لكل وحدة حجم من هذه المادة بدلالة $\vec{E}$ و$\vec{J}$.

b) عبر عن نتيجة الجزء (a) بدلالة $\vec{E}$ وحده و$\vec{J}$ وحده، حيث $\vec{E}$ و$\vec{J}$ مرتبطان بقانون أوم، أي أنَّه في مادة أومية لها موصلية σ أو مقاومة نوعية ρ.

تمارين بمعطيات متعددة

5.84 يحمل خط نقل الطاقة عبر التيار المستمر عالي الجهد (HVDC) قدرة كهربائية لمسافة 643.1 km. وينقل الخط 7935 MW من القدرة وبفرق جهد 1.177 MV. إذا كان خط نقل الطاقة عبر التيار المستمر عالي الجهد يتكون من سلك نحاسي واحد قطره 2.353 cm. فما الكسر الذي يعبر عن الطاقة المفقودة في النقل؟

5.85 يحمل خط نقل الطاقة عبر التيار المستمر عالي الجهد قدرة كهربائية قدرها 5319 MW لمسافة 411.7 km. ويتكون خط نقل الطاقة عبر التيار المستمر عالي الجهد من سلك نحاسي واحد قطره 2.125 cm. وكان الكسر الذي يعبر عن الطاقة المفقودة في النقل يساوي 7.538×10^{-2}. ما فرق الجهد في الخط؟

5.86 يحمل خط نقل الطاقة عبر التيار المستمر عالي الجهد قدرة كهربائية قدرها 5703 MW بفرق جهد قدره 1.197 MV. يتكون خط نقل الطاقة عبر التيار المستمر عالي الجهد من سلك نحاسي واحد قطره 1.895 cm. والكسر الذي يعبر عن الطاقة المفقودة في النقل يساوي $1.166 \cdot 10^{-1}$. ما طول الخط؟

5.87 تُعرف السعة الاحتياطية (RC) لبطارية سيارة بأنها عدد الدقائق التي يمكن للبطارية أن تنتج فيها تيارًا شدته 5.0 A بفرق جهد 10.5 V. ومن ثَمَّ، توضح RC المدة التي يمكن للبطارية خلالها تزويد القدرة لسيارة توقف نظام شحنها عن العمل. ما مقدار الطاقة المخزنة في بطارية سيارة ذات RC قدرها 110.0؟

5.88 تُعرف السعة الاحتياطية (RC) لبطارية سيارة بأنها عدد الدقائق التي يمكن للبطارية أن تنتج فيها تيارًا شدته 5.0 A بفرق جهد 10.5 V. ومن ثَمَّ، توضح RC المدة التي يمكن للبطارية خلالها تزويد القدرة لسيارة توقف نظام شحنها عن العمل. إذا كانت بطارية السيارة تخزن 1.843×10^6 J من الطاقة، فما RC لها؟

5.89 يسحب مصباح ضوئي يعمل بفتيل التنجستن 374.3 mA من التيار عندما يُستخدم فرق جهد قدره 3.907 V. عندما يكون المصباح في درجة حرارة الغرفة (20.00°C) وغير مضاء، تكون مقاومته 1.347 Ω. ما درجة حرارة فتيل التنجستن عندما يكون المصباح مضاءً؟

5.90 يسحب مصباح ضوئي يعمل بفتيل التنجستن 420.1 mA من التيار عندما يُستخدم فرق جهد قدره 3.949 V. تكون درجة حرارة فتيل التنجستن عند إضاءة المصباح 1291°C، ما قيمة مقاومة المصباح عندما يكون في درجة حرارة الغرفة (20.00°C) وغير مضاء؟

5.91 عندما يكون مصباح ضوئي يعمل بفتيل التنجستجن مضاءً، يكون فرق الجهد المستخدم 3.991 V وتكون درجة حرارة فتيل التنجستن 1.110×10^3°C. تكون مقاومة المصباح عندما يكون في درجة حرارة الغرفة (20.00 °C) وغير مضاء 1.451 Ω. ما التيار الذي يسحبه المصباح عندما يكون مضاءً؟

هذا الملف مقدم بواسطة



مكتبة الفكر

مكتبة شاملة لكل ما يحتاجه الطالب من ملفات وكتب في دراسته ومطالعته.

متابعة