5 التيار والمقاومة
Current and Resistance

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
مثال 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



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.

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

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

ما سنتعلمه

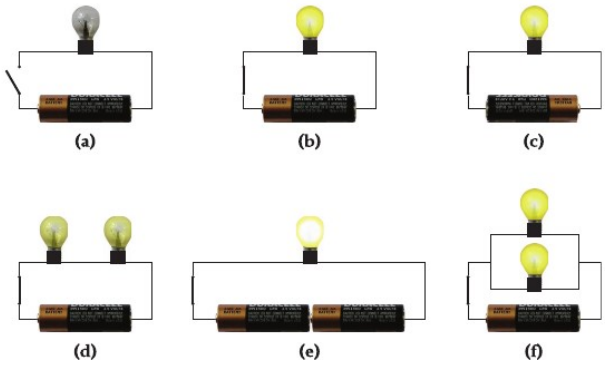
- يُقصد بالتيار الكهربائي عند نقطة معينة في دائرة كهربائية المعدل لتدفق شحنة كهربائية من هذه النقطة.
- يُعرف التيار المستمر بأنّه التيار المتدفق في اتجاه واحد لا يتغير بتغير الزمن. يُعرف اتجاه التيار بأنّه الاتجاه الذي تتحرك فيه الشُحنة الموجبة.
- كثافة التيار المار عبر نقطة معينة في الموصل هي مقدار 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 أنَّ 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 ومقاومات مُتصلة على التوالي أو على التوازي.
- في الرسم التخطيطي للدائرة. يمكن أن تحل مقاومة مكافئة محل المقاومات المتصلة على التوالي أو على التوازي.
- تمثل القدرة في الدائرة ناتج ضرب التيار في فرق الجهد.
- يوصّل الصمام الثنائي التيار في اتجاه واحد ولا يوصّله في الاتجاه المعاكس.

5.1 التيار الكهربائي Electric Current

حتى هذه النقطة، 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 أنَّك كنت تمتلك بعض الألعاب التي تعمل بالبطاريات، ومن المحتمل كذلك أنَّ 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 أنَّ البطارية توفر فرق الجهد للدائرة. وفي هذه الوحدة، سنتناول المقصود بتدفق التيار، والأساس الفيزيائي للتيار، ومدى ارتباطه بفرق الجهد الناتج عن البطارية. سنعرف أنَّ المصباح يقوم بدور المقاوِم في الدائرة، وسنتعرف على كيفية عمل المقاومات.

لنبدأ بالتفكير في التجربة البسيطة التي تمّ 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.

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

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،

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

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

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

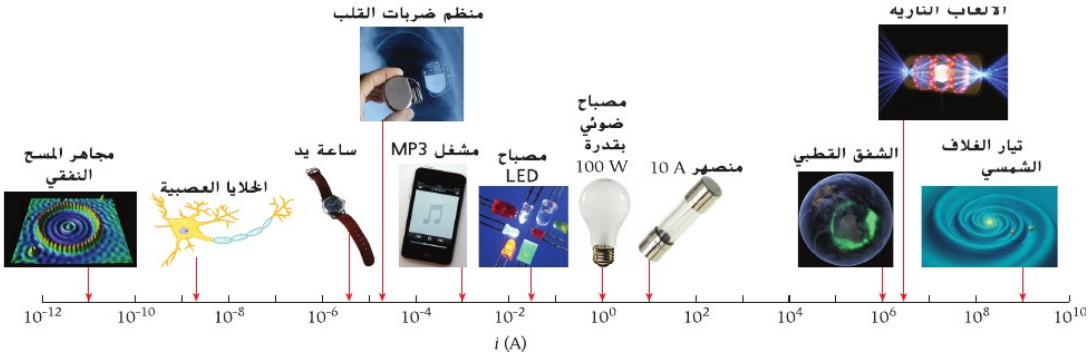
يتم حفظ الشحنة الكلية، ما يستلزم ضمنيًّا عدم فقدان الشحنة المتدفقة في الموصل مطلقًا. وبناءً عليه، يتساوى مقدار الشحنة المتدفق داخل أحد طرفي الموصل مع المقدار الخارج من الطرف الآخر.

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$1\ \text{mA} = 1\times 10^{-3}\text{A}$ 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).



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

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

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 هذه الوحدة. يُشار إلى اتجاه التيار المتدفق في الموصّل بسهم.

في الفيزياء، تعرف حاملات الشحنة الموجودة في الموصّل 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

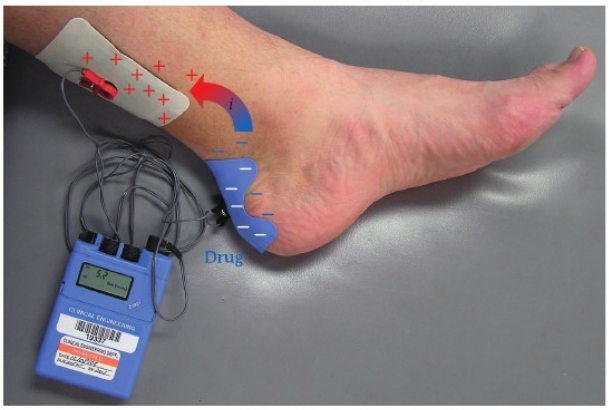
تم تصنيف البطارية المثالية AA القابلة للشحن بمقدار 700 mAh. ما المدة التي يمكن لهذه البطارية خلالها تزويد تيار بمقدار 100 μA؟

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

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

McGraw-Hill Education حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة

يتدفق التيار بمعدل ثابت، إذًا التكامل في المعادلة 5.2 يساوي

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

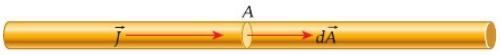
بإيجاد قيمة t والتعويض بالقيم، حصلنا على الناتج

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

سوف يستغرق العلاج بالإرحال الأيوني للاعب الرياضي 15 دقيقة تقريبًا.

5.2 كثافة التيار Current Density

فكّر في تيار متدفق في موصّل ما. بالنسبة إلى المستوى العمودي على الموصّل، يمثل التيار المتدفق لكل وحدة مساحة عبر الموصّل 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



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

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

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 الموصّل الذي لا يسري فيه تيار، تتحرك إلكترونات التوصيل بشكل عشوائي. حينما يتدفق التيار عبر الموصّل، تواصل الإلكترونات حركتها العشوائية إلا أنّها تتمتع أيضًا بما يسمى **سرعة الانْسياق**، $\vec{v}_d$ في الاتجاه المقابل لاتجاه المجال الكهربائي الدافع للتيار. يُقدّر مقدار سرعة الحركة العشوائية بحوالي 10^6 m/s، في حين يُقدر مقدار سرعة الانسياق بحوالي 10^{-4} m/s أو أقل. بسبب سرعة الانسياق البطيئة هذه، قد تتساءل عن سبب إضاءة المصباح على الفور بمجرد تشغيل المفتاح. تتمثل الإجابة في أنَّ المفتاح ينشئ مجالًا كهربائيًا 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 موصّل ذي مساحة مقطع عرضي A وتم تطبيق المجال الكهربائي $\vec{E}$ عليه. افترض أنَّ الموصّل 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

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

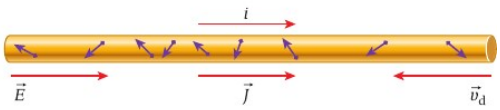
حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

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 الانسياق 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 انسياق $\vec{v}_d$ 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 انسياق الإلكترونات في سلك نحاسي

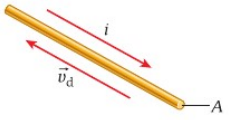
المسألة

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 انسياق الإلكترونات. ترتبط سرعة الانسياق بكثافة التيار بالمعادلة 5.7:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

McGraw-Hill Education حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة

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 نُبيّن أنّ النتيجة التي حصلنا عليها لمقدار سرعة الانسياق تمثل عددًا صغيرًا بدرجة مذهلة. عرفنا سابقًا أنّ سرعات الانسياق تكون حوالي 10^{-4} m/s أو أقل. بما أنّ التيار متناسب مع سرعة الانسياق، إذًا، يشير التيار ذو المقدار الصغير نسبيًا إلى سرعة انسياق بطيئة نسبيًا. يمكن أن يحمل سلك معيار 18 تيارًا تبلغ شدته عدة أمبيرات، لذا فإنّ التيار المحدد في المسألة أقل من 1% من الحد الأقصى للتيار. ومن ثمّ، فإنّ حقيقة أنّ 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 أنّ المجال الكهرومغناطيسي يتحرك بمقدار سرعة الضوء (في الفراغ) نفسه تقريبًا داخل الموصّل 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 نسبيًا؛ 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) وتمّ 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 أنّه بالنسبة إلى فرق الجهد المحدد، ΔV، يتناسب التيار، i، تناسبًا عكسيًا 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.

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

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):

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

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

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

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 $10^{-8}\ \Omega\ \mathrm{m}$. على سبيل المثال، تبلغ المقاومة النوعية للنحاس $2 \times 10^{-8}\ \Omega\ \mathrm{m}$ 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 $(108 \times 10^{-8}\ \Omega\ \mathrm{m})$ 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، بدلاً من مقاومتها النوعية، ρ؛ تعرف الموصلية بأنَّها

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

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

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 حرارة للمقاومة النوعية لبعض الموصلات المختارة

المادة	المقاومة النوعية، ρ، عند 20 °C ($10^{-8}\ \Omega\ \mathrm{m}$)	معامل درجة الحرارة، α ($10^{-3}\ \mathrm{K^{-1}}$)
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.

McGraw-Hill Education محفوظة لصالح مؤسسة © حقوق الطبع والتأليف

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

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

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.

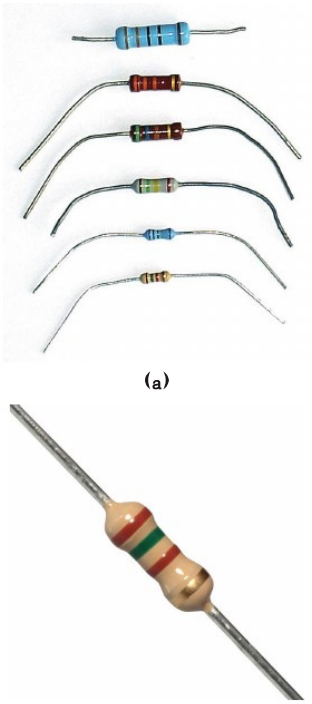
يوضح الجدول 5.1 قيم α لمجموعة من الموصِّلات. لاحظ أنَّ الموصِّلات الفلزية الشائعة مثل النحاس لها معامل درجة حرارة للمقاومة النوعية الكهربائية في حدود $4 \times 10^{-3}\ K^{-1}$. ومع ذلك، تتميز إحدى السبائك الفلزية، وتسمى كونستنتان (60% من النحاس و40% من النيكل)، بخصائص

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 هذه 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 مقاومات مختلفة. (b) رموز لونية لمقاوم $150\ \Omega$.

مراجعة المفاهيم 5.2

إذا زادت درجة حرارة سلك نحاسي مقاومته $100\ \Omega$ بمقدار 25 K، فإنَّ المقاومة

a) ستزيد بمقدار $10\ \Omega$ تقريبًا.

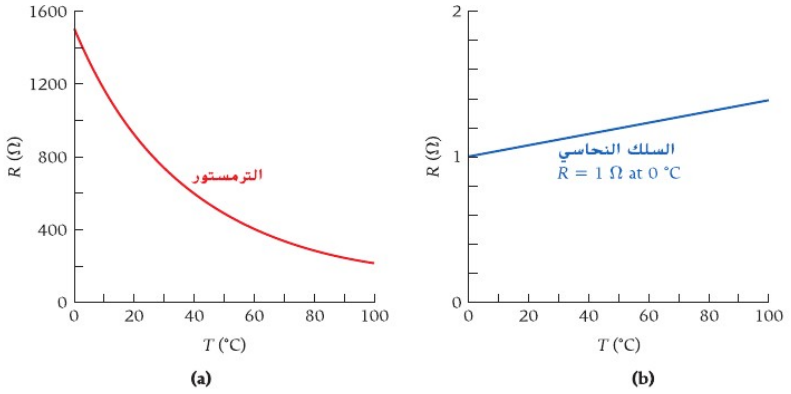
b) ستزيد بمقدار $4\ m\Omega$ تقريبًا.

c) ستقل بمقدار $4\ m\Omega$ تقريبًا.

d) ستقل بمقدار $10\ \Omega$ تقريبًا.

e) ستبقى كما هي.

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education



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 الموصّل الفلزي مثل النحاس، تكوّن 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 الموصّل في شبكة بلوري أيضًا. إلا أنَّ الإلكترونات الخارجية لذرات شبه الموصّل 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.

. تحوّل 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.

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

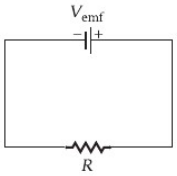
(لاحظْ أنَّ البطارية عبارة عن مصدر قوة دافعة كهربائية ثابتة، فهي لا توفر تيارًا ثابتًا للدائرة). تعرض البطاريات القابلة للشحن تصنيفًا بوحدة mAh (مللي أمبير ساعة) الذي يوفر معلومات عن الشحنة الكلية التي يمكن للبطارية توفيرها عندما تكون مشحونة بالكامل. وحدة mAh هي وحدة أخرى للشحنة:

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

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 موصِّلة. 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 المقاوم 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.

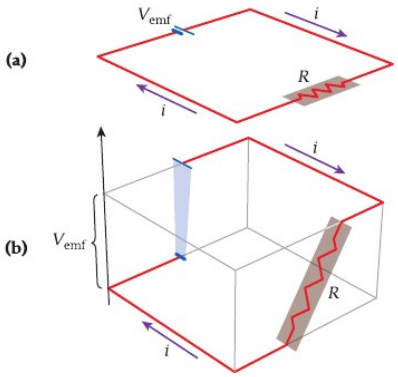


الشكل 5.10 دائرة بسيطة تحتوي على مصدر قوة دافعة كهربائية ومقاوم.

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 المقاومات، وتسمى *المقاومات الأومية*، يتناسب التيار طرديًّا مع فرق الجهد عبر المقاوم على مدى واسع من درجات الحرارة ومدى واسع من فروق الجهد المطبَّقة. بالنسبة إلى المقاومات الأخرى، وهي *المقاومات غير الأومية*، لا يتناسب التيار طرديًّا مع فرق الجهد على الإطلاق. تشتمل المقاومات 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 المقاومات 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 المقاوم 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 المقاوم. ويشار إلى هذا التغيير باسم **انخفاض الجهد** عبر المقاوم. 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 مقاوم 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 المقاوم. ويمكن حساب التيار في الدائرة باستخدام المعادلة 5.9.

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

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 بلساتك 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

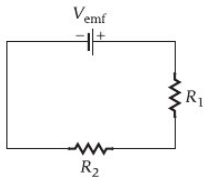
يمكن أن تشتمل الدائرة على أكثر من مقاوم واحد و/أو أكثر من مصدر قوة دافعة كهربائية واحد. يتطلب تحليل الدوائر ذات المقاومات المتعددة أساليب مختلفة. لنتفحص أولًا المقاومات المتصلة على التوالي.

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 المقاوم R_1 بالرمز ΔV_1، وهبوط الجهد عبر المقاوم R_2 بالرمز ΔV_2. يجب أن يكون مجموع هبوطي الجهد هو فرق الجهد الناتج عن مصدر القوة الدافعة الكهربائية:

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

علمنا 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 المقاوم، 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 المقاوم 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.

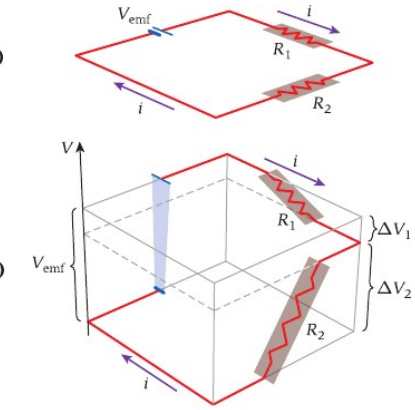


الشكل 5.12 دائرة كهربائية بها مقاومان متصلان على التوالي بمصدر قوة دافعة كهربائية واحد.

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؟

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education



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. تمّ توضيح التيار في الدائرة في طريقتي العرض.

ومن ثمَّ، فإنَّ التيار المتدفق عبر كل مقاوم في الشكل 5.12 يكون متساويًا. يمكننا تطبيق قانون أوم لكل مقاوم 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 ثمَّ، يمكن استبدال مقاومين متصلين على التوالي لتحل محلهما مقاومة مكافئة تساوي مجموع مقاومتيهما. يوضّح 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:

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

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

مراجعة المفاهيم 5.3

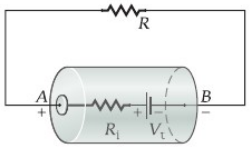
أي الآتية صحيح للمقاومتين في الشكل 5.13؟

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 مقاوم 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 المقاوم 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 مقاوم $10.0\text{-}\Omega$ بالبطارية، تنخفض قيمة فرق الجهد عبر طرفي البطارية إلى $10.9\ V$. ما قيمة المقاومة الداخلية للبطارية؟

الحل

يتم الحصول على التيار المتدفق عبر المقاوم 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 ثمَّ، 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

McGraw-Hill Education حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة

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 العامل عن طريق الضغط على موضع معين في البطارية ببساطة وملاحظة المؤشر.

مقاوِم ذو مقطع عرضي غير ثابت

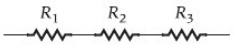
تفترض المناقشة حتى الآن أنَّ المقاوم له مساحة المقطع العرضي نفسها، A، والمقاومة النوعية، ρ، نفسها في كل مكان على امتداد طوله (كان هذا الافتراض الضمني في الاستنباط الذي يؤدي إلى المعادلة 5.11). وهذا بالطبع، ليس الحال دائمًا. كيف يمكننا التعامل مع التحليل الخاص بمقاوم مساحة مقطعه العرضي عبارة عن دالة للموقع x على امتداد المقاوم، $A(x)$، و/أو يمكن أن تتغير مقاومته النوعية كدالة للموقع، $\rho(x)$؟ نقسِّم المقاوم 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 مقاومات متماثلة، R_1 و R_2 و R_3، معًا كما هو مبين في الشكل. تيار كهربائي يتدفق خلال ثلاث مقاومات. 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.

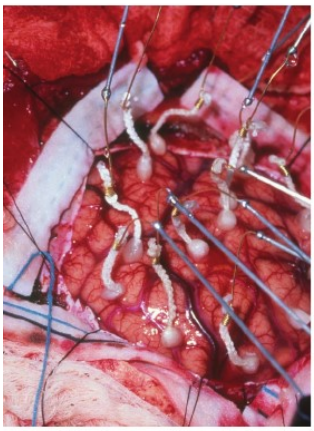
c) ضعف التيار المتدفق خلال R_1 و R_3.

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 المجسَّات 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 للمجس طرفًا دقيقًا جدًا. أكثر حدة من إبرة الحياكة. ومن هنا يتضح سبب الحاجة إلى معرفة مقاومة المجس 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

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

حيث $A(x)$ مساحة الدائرة، $A(x) = \pi[r(x)]^2$. يقل نصف قطر الدائرة خطيًّا 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 شاقًّا من النظرة الأولى، ولكن باستثناء x جميع الكميات الأخرى ثابتة. نقوم بمراجعة جدول التكامل أو برنامج تكامل ونحل

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

احسب بالتعويض بالقيم العددية، نحصل على

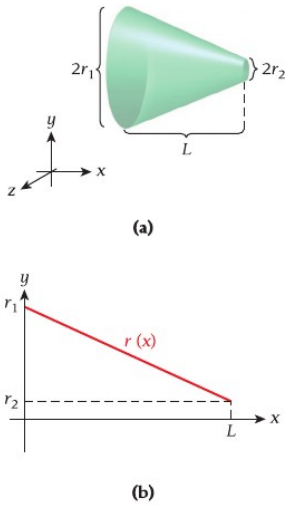
$$R = \frac{(5.51\times10^{-8}\ \Omega\text{m})(2.0\times10^{-3}\text{m})}{\pi(0.37\times10^{-3}\text{m})(1.2\times10^{-6}\text{m})} = 7.90039\times10^{-2}\ \Omega$$

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.



الشكل 5.16 (a) شكل طرف المِبس. (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 مقاوم 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

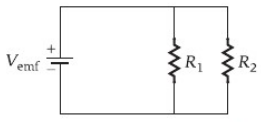
$$i_2 = \frac{V_{\text{emf}}}{R_2}$$

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.

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

يمكن إعادة كتابة قانون أوم (المعادلة 5.14) بالصورة

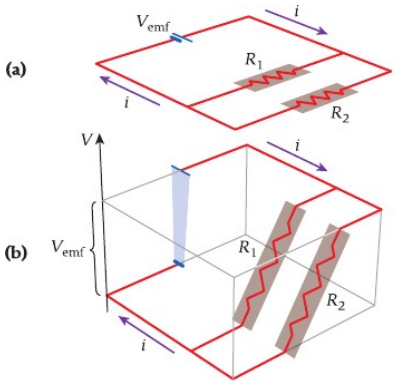
$$i = V_{\text{emf}}\left[\frac{1}{R_{\text{eq}}}\right]$$

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

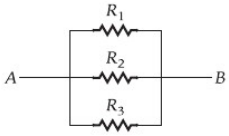
$$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_i} \quad \text{(المقاومات المتصلة على التوازي)} \tag{5.17}$$



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.

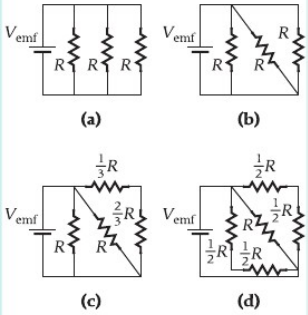
c) ضعف التيار المتدفق خلال R_1 و R_3.

d) ثلاثة أمثال التيار المتدفق خلال R_1 و R_3.

e) لا يمكن تحديده.

مراجعة المفاهيم 5.6

أي مجموعة من المقاومات لها المقاومة المكافئة الأعلى؟



a) المجموعة (a)

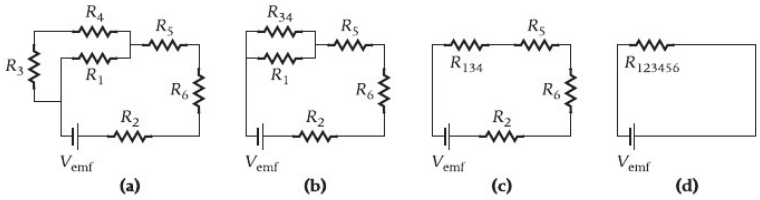
b) المجموعة (b)

c) المجموعة (c)

d) المجموعة (d)

e) المجموعات الأربع لها المقاومة المكافئة نفسها.

مثال 5.4 المقاومة المكافئة في دائرة كهربائية تتكون من ستة مقاومات



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

المسألة

يوضّح الشكل 5.19a دائرة كهربائية بها ستة مقاومات، من R_1 إلى R_6. ما قيمة التيار المتدفق عبر المقاومين R_2 وR_3 بدلالة V_{emf} والمقاومات من R_1 إلى R_6؟

الحل

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

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

-يُتبع

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

تم إجراء هذا التعويض في الشكل 5.19b. يوضّح الشكل أنَّ المقاوم R_{34} والمقاوم 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. نُعوّض عن المقاوم R_{34} والمقاوم 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 المقاوم R_2 من خلال

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

ننتقل إلى تحديد التيار المتدفق عبر المقاوم R_3. يتدفق التيار i_2 أيضًا عبر المقاومة المكافئة R_{134} التي تتضمن المقاوم 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}. المقاوم 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_{34} 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:

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

أو

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

مسألة محلولة 5.3 انخفاض الجهد عبر مقاوم في دائرة كهربائية

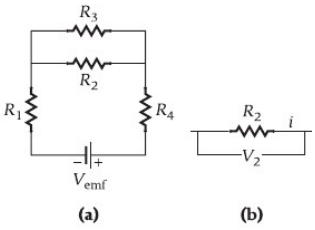
المسألة

تتضمن الدائرة الكهربائية الموضّحة في الشكل 5.20a أربع مقاومات وبطارية لها $V_{emf} = 149\ V$ 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 المقاوم R_2؟

الحل

فكّر 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 المقاوم R_2.



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

McGraw-Hill Education حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة

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

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

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

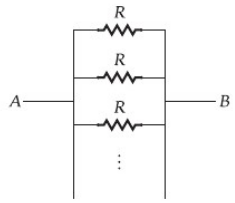
$$V_2 = iR_{23} = (1.39\ \text{A})(35.2\ \Omega) = 48.9\ \text{V}$$

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

يمكننا التحقق من أنّ مجموع قيم انخفاض الجهد عبر R_1، وR_{23}، وR_4 تساوي قيمة V_{emf}. كما هو محتم حيث إنّ 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، فإنّ المقاومة بين النقطتين A و B سوف



a) تزيد.

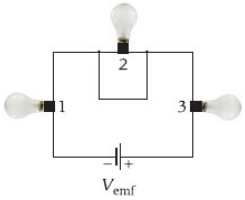
b) تظل كما هي.

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، فإنّ المصباحين الكهربائيين 1 و3 سوف



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.

McGraw-Hill Education حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة

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

فكّر 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 أنّه 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 ثَمّ، 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. تبيّن أنّ تكلفة التبريد هي إحدى الشروط الحديّة 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:

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

McGraw-Hill Education حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة

نعيد ترتيب هذه المعادلة ونعوّض 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 للتنجستن 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.

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

سؤال الاختبار الذاتي 5.3

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

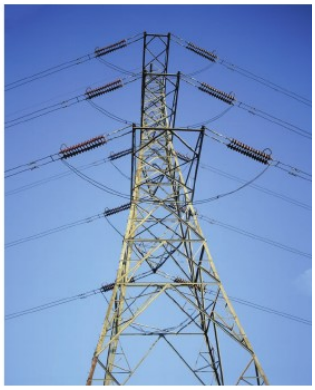
تشمل التطبيقات المستقبلية لنقل الطاقة عبر التيار المستمر عالي الجهد نقل الطاقة من محطات توليد الطاقة الشمسية الموجودة في المناطق النائية في جنوب غرب الولايات المتحدة إلى المناطق المكتظة بالسكان، مثل المدن الكبيرة في ولاية كاليفورنيا وتكساس. تركز بعض الأبحاث الواعدة حول نقل الطاقة على استخدام الأسلاك 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؟

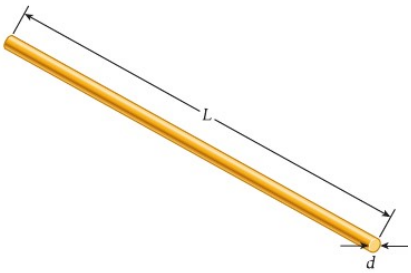


الشكل 5.22 خط نقل الطاقة عبر التيار المستمر عالي الجهد.

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:

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

يمكن الحصول على مقاومة السلك من المعادلة 5.11:

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

حيث يمثل ρ_{Cu} مقاوميّة 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)

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

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

McGraw-Hill Education حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة

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

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

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

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

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

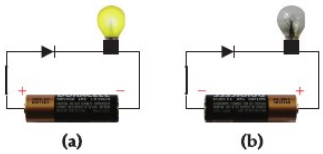
التيار المنقول يساوي

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

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 ثَمّ تبدو النتيجة التي توصلنا إليها منطقية.

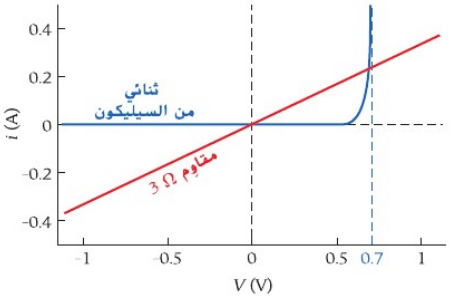


الشكل 5.24 (a) الدائرة في الشكل 5.2c. ولكنها تتضمن ثنائيًا. (b) يتسبب عكس اتجاه فرق الجهد من البطارية توقف تدفق التيار وتوقف إضاءة المصباح الضوئي.

5.8 الثنائي أحادي الاتجاه في الدوائر الكهربائية
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 لمقاوم 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 للمقاوم 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).

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

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 موصّل 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 مقاوم، R، فإنَّ التيار، i، المتدفق عبر المقاوم يساوي $i = \frac{\Delta V}{R}$
- يمكن أن تحل المقاومة المكافئة، R_{eq}، محل المقاومات المتصلة على التوالي، وتُحدد قيمتها بجمع مقاومات المقاومات: $R_{eq} = \sum_{i=1}^{n} R_i$
- المقاومات 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 مقاوم، 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 المقاوم.

McGraw-Hill Education محفوظة لصالح مؤسسة © حقوق الطبع والتأليف

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 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.

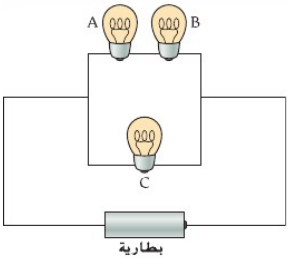
5.2 تقوم بتوصيل مقاومين على التوازي. المقاوم A له مقاومة كبيرة جدًا والمقاوم B له مقاومة صغيرة جدًا. ستكون المقاومة المكافئة لهذه المجموعة

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؟

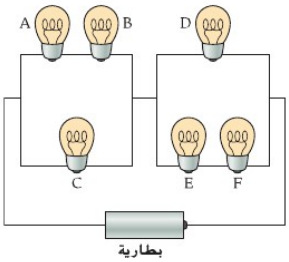
a) $A_1/A_2 = 2$
b) $A_1/A_2 = 4$
c) $A_1/A_2 = 0.5$
d) $A_1/A_2 = 0.25$

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!)

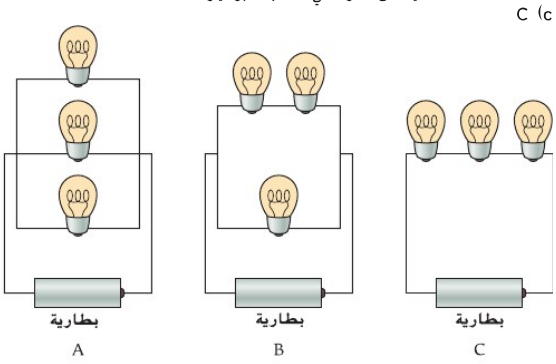


a) A = B > C = D > E = F
b) A = B = E = F > C = D
c) C = D > A = B = E = F
d) A = B = C = D = E = F

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

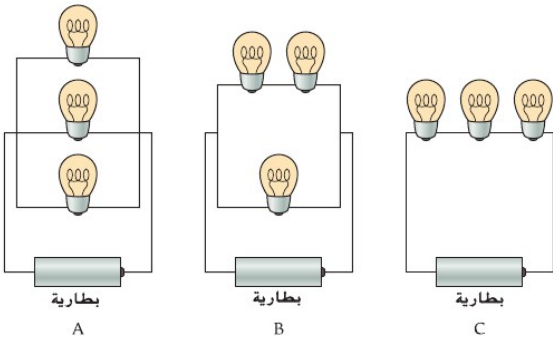
5.6 أي من ترتيبات المصابيح الضوئية الثلاثة المتطابقة الموضحة في الشكل يسحب مقدار التيار الأكبر من البطارية؟

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

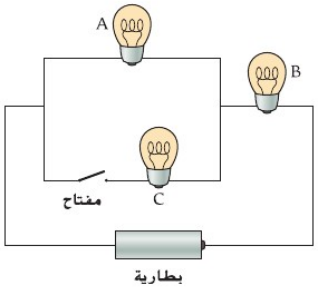


5.7 أي من ترتيبات المصابيح الضوئية الثلاثة المتطابقة الموضحة في الشكل له المقاومة الأعلى؟

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

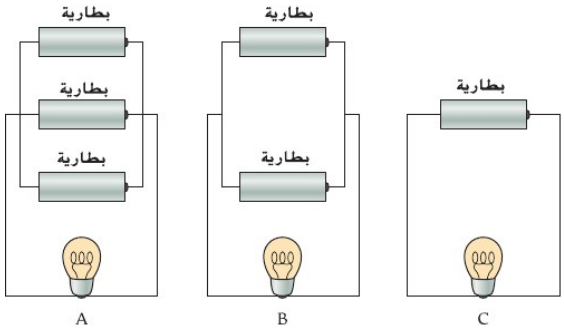
a) تزيد.
b) تظل كما هي.
c) تقل.
d) ربما تقل أو تزيد.

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.

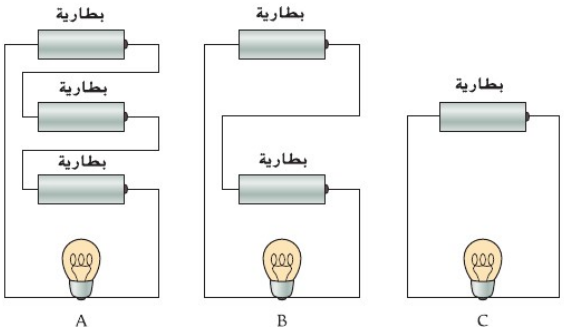
5.13 تم توصيل بطاريات متطابقة بالمصباح الضوئي نفسه بثلاثة ترتيبات مختلفة كما هو مبين في الشكل. افترض أنَّ البطاريات ليست لها مقاومة داخلية. بأي ترتيب سيكون المصباح الكهربائي أكثر سطوعًا؟

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.



McGraw-Hill Education محفوظة لصالح مؤسسة © حقوق الطبع والتأليف

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؟

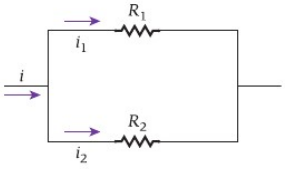
5.16 لماذا تحترق المصابيح الضوئية عادة بمجرد تشغيلها بدلاً من أن يحدث ذلك أثناء إضاءتها؟

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؟

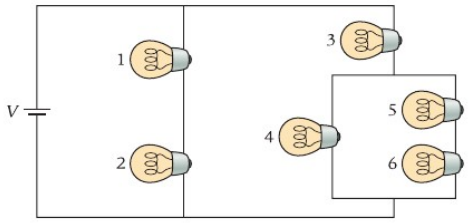
5.24 تُستخدم حزمة من الجسيمات المشحونة لحقن شحنة، Q_0، في منطقة صغيرة غير منتظمة الشكل (ليست كُرويًا، بل مجرد منطقة في كتلة صلبة) داخل كتلة من مادة أومية لها موصلية σ وسماحية ε في زمن $t = 0$. في النهاية، ستتحرك كل الشحنة المحقونة إلى السطح الخارجي للكتلة، ولكن بأي سرعة؟

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

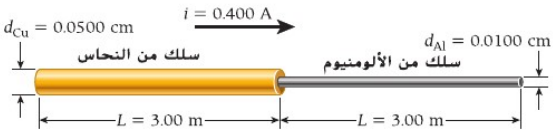
5.28 كم عدد البروتونات في الحزمة التي تتحرك بسرعة قريبة من سرعة الضوء في معجل تيفاترون في مختبر فيرميلاب وتحمل 11 mA من التيار حول محيط طوله 6.3 km لحلقة تيفاترون الرئيسة؟

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 $2.70 \times 10^3\ \text{kg/m}^3$. ويحتوي المول الواحد من الألمنيوم على كتلة قدرها 26.98 g. يوجد إلكترون موصل واحد في كل ذرة ألمنيوم.

5.30 • سلك نحاسي قطره $d_{Cu} = 0.0500\ \text{cm}$. 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 $d_{Al} = 0.0100\ \text{cm}$ 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 $0.923\ \text{mm}^2$.

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

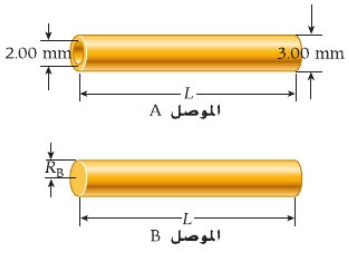
b) أوجد كثافة التيار في السلك، مفترضًا أنَّ التيار منتظم.

c) أوجد سرعة انسياق الإلكترونات.

القسم 5.3

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

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؟



حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

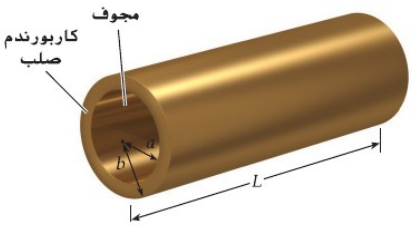
5.34 ملف نحاسي مقاومته 0.100 Ω عند درجة حرارة الغرفة (20.0 °C). ما مقاومته عند تبريد الغرفة إلى 100– °C؟

5.35 ما معيار سلك من الألمنيوم له مقاومة لكل وحدة طول تماثل 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؟

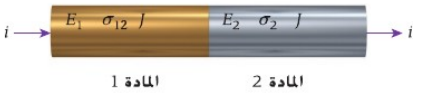
5.38 • أكثر المواد المستخدمة بكثرة في ورق الصنفرة هي كربيد السيليكون، وتستخدم على نطاق واسع أيضًا في التطبيقات الكهربائية. المقاوم الأنبوبي هو أحد الأجهزة الشائعة المصنوعة من نوع خاص من كربيد السيليكون يسمى *الكاربورندم*. يتكون مقاوم معين من الكاربورندم (انظر الشكل) من هيكل أسطواني سميك الجدار (أنبوب) 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 للمقاومية: $\alpha = 2.14 \times 10^{-3}\ K^{-1}$. 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 أنّ 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 أنّ هذا التيار هو الذي توفره البطارية عندما تكون أطرافها قصيرة. أي متصلة بمقاومة لا تذكر، حدد المقاومة الداخلية للبطارية. (مهم: **لا** تجرب مثل هذا التوصيل لأنه قد يكون قاتلاً)!

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.

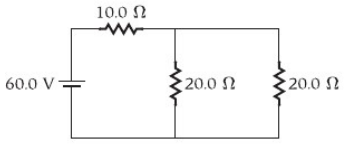
a) ما مقاومة المصباح الضوئي؟

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.

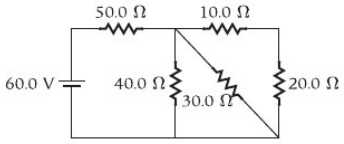
c) لماذا تختلف إجابتا الجزأين (a) و(b)؟

القسم 5.6

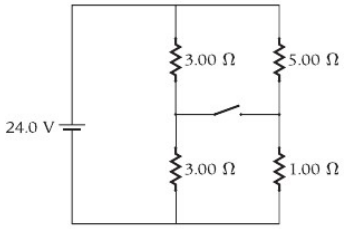
5.48 ما التيار المتدفق في المقاوم الذي تبلغ مقاومته 10.0 Ω في الدائرة الكهربائية الموضحة في الشكل؟



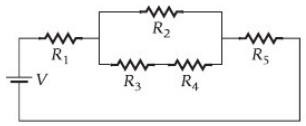
5.49 ما قيمة المقاومة المكافئة للمقاومات الخمس في الدائرة الكهربائية الموضحة في الشكل؟



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.

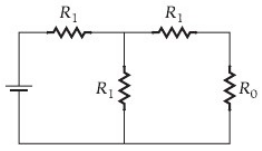


a) ما المقاومة المكافئة للدائرة؟

b) ما التيار المتدفق خلال R_5؟

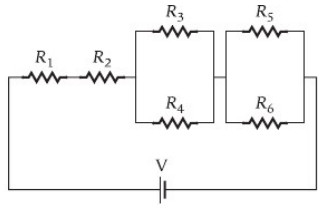
c) ما انخفاض الجهد عبر R_3؟

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 $R_3 = 5.00\ \Omega$

McGraw-Hill Education محفوظة لصالح مؤسسة © حقوق الطبع والتأليف



$R_4 = 5.00\ \Omega$ و على التوازي معًا R_3 وR_5. وعلى التوالي مع R_1 وR_2. وتوصيل المقاومين $R_6 = 2.00\ \Omega$ و على التوازي معًا R_5 وR_6. 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 المحلي 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.

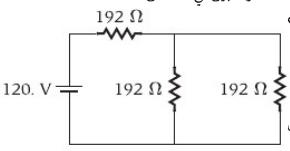
5.57 يستهلك مجفف شعر 1600 W من القدرة ويعمل بجهد 110 V. (افترض أنَّ التيار مستمر، في الواقع، تمثل هذه القيم جذر متوسط المربع لكميات التيار المتردد، ولكن الحساب لن يتأثر.

a) هل سيقوم مجفف الشعر بفصل قاطع التيار المصَمم 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.

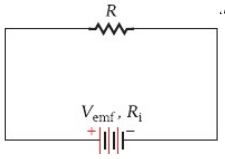


a) ما القدرة المبدَّدة في المقاومات الثلاثة؟

b) حدد انخفاض الجهد عبر كل مقاوم.

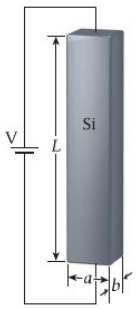
5.60 افترض أنَّ بطارية AAA قادرة على تزويد 625 mAh قبل هبوط جهدها عن 1.50 V. ما المدة التي ستكون البطارية قادرة خلالها على تزويد مصباح بقدرة 5.00 W بالطاقة قبل انخفاض جهدها عن 1.50 V؟

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 $1.23 \times 10^{23}\ \text{m}^3$. 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 وبيدد 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 $1.00 \cdot 10^{-6}\ \text{m}^2$. فما طول السلك الذي يحقق مقاومة قدرها 10.0 Ω؟

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؟

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

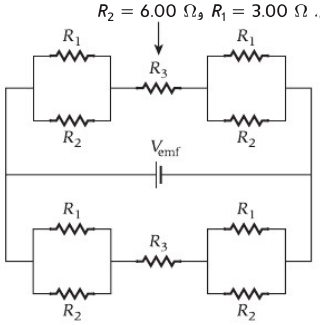
• **5.75** يسارع معجل ستانفورد الخطي حزمة تتكون من 2.0×10^{14} إلكترون في الثانية من خلال فرق جهد قدره 2.0×10^{10} V.

a) احسب التيار داخل الحزمة.

b) احسب قدرة الحزمة.

c) احسب المقاومة الأومية الفعالة للمعجل.

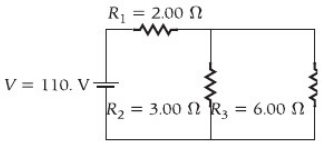
• **5.76** في الدائرة المبينة في الشكل، $R_1 = 3.00\ \Omega$ و$R_2 = 6.00\ \Omega$ و$R_3 = 20.0\ \Omega$ و$V_{emf} = 12.0$ V.



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.

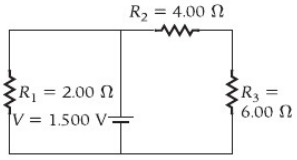


c) أوجد انخفاض الجهد عبر R_3.

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.

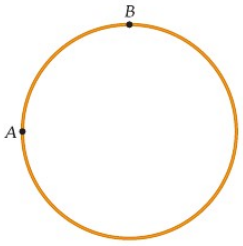


a) أوجد انخفاض الجهد في كل مقاوم.

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 (مقاومته 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 أنّ 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 أنّ للكربون درجة انصهار عالية جدًا (3599°C)، تكون نسبة تسامحه 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. فإنّ 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 أنّ 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 أنّ مجالاً 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 أنّه 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 ثَمّ، 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 ثَمّ، 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؟

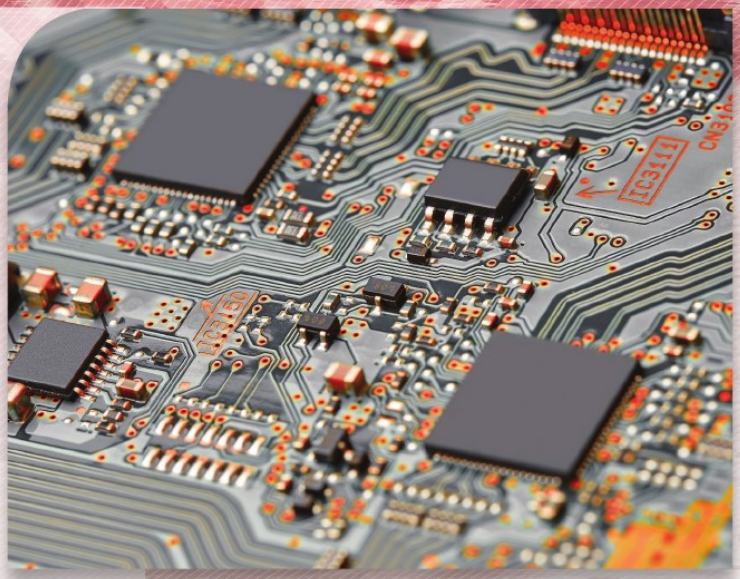
5.91 عندما يكون مصباح ضوئي يعمل بفتيل التنجستن مضاءً، يكون فرق الجهد المستخدم 3.991 V وتكون درجة حرارة فتيل التنجستن 1.110×10^3°C. تكون مقاومة المصباح عندما يكون في درجة حرارة الغرفة (20.00 °C) وغير مضاء 1.451 Ω. ما التيار الذي يسحبه المصباح عندما يكون مضاءً؟

McGraw-Hill Education حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة

6 دوائر التيار المستمر
Direct Current Circuits

146 ما سنتعلمه
146 6.1 قانونا كيرشوف
146 قانون كيرشوف للتيار
147 قانون كيرشوف للجهد
148 6.2 دوائر كهربائية أحادية الحلقة
مسألة محلولة 6.1 شحن بطارية
149
150 6.3 دوائر متعددة الحلقات
150 مثال 6.1 دائرة متعددة الحلقات
مسألة محلولة 6.2 قنطرة ويتستون
151
ملاحظات عامة على شبكات الدوائر الكهربائية
152
153 6.4 أجهزة الأميتر والفولتميتر
153 مثال 6.2 فولتميتر في دائرة بسيطة
مسألة محلولة 6.3 زيادة نطاق قياس جهاز أميتر
154
155 6.5 دوائر كهربائية تحوي مقاومًا ومكثفًا (RC)
155 شحن مكثف
157 تفريغ شحنة مكثف
157 مثال 6.3 الزمن اللازم لشحن مكثف
158 منظم ضربات القلب
مثال 6.4 عناصر دائرة منظم ضربات القلب
159
160 الخلية العصبية
مسألة محلولة 6.4 معدل تخزين الطاقة في مكثف
161

ما تعلمناه/ دليل المذاكرة للاختبار 162
162 إرشادات حل المسائل
163 أسئلة الاختيار من متعدد
164 أسئلة مفاهيمية
164 تمارين
168 تمارين بمعطيات متعددة



الشكل 6.1 لوحة دائرة تحتوي على مئات من مكونات الدائرة الموصلة بمسارات توصيل فلزية.

غيرت الدائرة الكهربائية، كالدائرة المبينة في الشكل 6.1، العالم بلا شك. تواصل الإلكترونيات الحديثة تغيير المجتمع البشري بوتيرة أسرع وأسرع. لقد استغرق الأمر 38 عامًا حتى وصل الراديو إلى 50 مليون مستخدم في الولايات المتحدة. لكن، لم يستغرق الأمر سوى 13 عامًا حتى وصل التلفاز إلى هذا العدد من المستخدمين، و 10 أعوام حتى وصل التلفاز الكابلي، و 5 أعوام حتى وصل الإنترنت، و 3 أعوام حتى وصلت الهواتف الخلوية.

سندرس في هذه الوحدة الطرائق المستخدمة لتحليل الدوائر التي لا يمكن تقسيمها إلى توصيلات بسيطة على التوالي وعلى التوازي. يعتمد تصميم الإلكترونيات الحديثة على ملايين الدوائر المختلفة، ولكل منها غرضه الخاص وتكوينه. لكن، بغض النظر عن مدى تعقيد دائرة معينة، فإن القواعد الأساسية لتحليل هذه الدائرة هي القواعد المقدمة في هذه الوحدة.

تحتوي بعض الدوائر التي تم تحليلها في هذه الوحدة ليس فقط على مقاومات وأجهزة قوة دافعة كهربائية (emf) لكن أيضًا على مكثفات. في هذه الدوائر، لا يكون التيار ثابتًا، لكنه يتغير مع الزمن. ستُناقش التيارات المتغيرة مع الزمن بصورة أدق في الوحدات اللاحقة التي تقدم مكونات إضافية للدائرة.

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

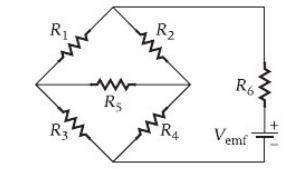
Chapter Sourced From: 6. Direct Current Circuits, Chapter 26, from University Physics with Modern Physics, 2e by Bauer and Westfall ©2014

ما سنتعلمه

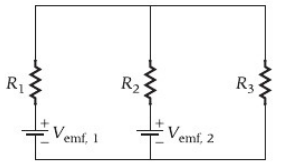
- لا يمكن اختزال بعض الدوائر إلى دوائر أحادية الحلقة؛ حيث يمكن تحليل الدوائر المركبة باستخدام قانونَي كيرشوف.
- ينص قانون كيرشوف للتيار (قاعدة الوصلة) على أن المجموع الجبري للتيارات عند وصلة في دائرة يجب أن يساوي صفرًا.
- ينص قانون كيرشوف للجهد (قاعدة الحلقة) على أن المجموع الجبري لتغيرات الجهد حول حلقة مغلقة في دائرة يجب أن يساوي صفرًا.
- يمكن تحليل الدوائر أحادية الحلقة باستخدام قانون كيرشوف للجهد.
- يجب تحليل الدوائر متعددة الحلقات باستخدام كل من قانون كيرشوف للتيار وقانون كيرشوف للجهد.
- يتغير التيار المار في دائرة تحتوي على مقاوم ومكثِّف أسيًّا مع الزمن؛ حيث يوجد ثابت زمني مميز يحدده ناتج ضرب المقاومة والسعة.

6.1 قانونَا كيرشوف Kirchhoff's Rules

درست عدة أنواع من دوائر التيار المستمر (DC) التي يحتوي كل منها على جهاز واحد للقوة الدافعة الكهربائية إلى جانب مقاومات متصلة على التوالي أو على التوازي. تحتوي بعض الدوائر التي تبدو معقدة على عدة مقاومات متصلة على التوالي أو على التوازي، ويمكن استبدالها بمقاومة مكافئة. لكن، لم ندرس الدوائر التي تحتوي على مصادر متعددة للقوة الدافعة الكهربائية. بالإضافة إلى ذلك، توجد دوائر أحادية الحلقة ومتعددة الحلقات، بها أجهزة قوة دافعة كهربائية ومقاومات، لا يمكن اختزالها إلى دوائر بسيطة تحتوي على توصيلات على التوازي أو على التوالي. يوضح الشكل 6.2 مثالَين على هذه الدوائر. تقدم هذه الوحدة شرحًا لكيفية تحليل هذه الأنواع من الدوائر باستخدام **قانونَي كيرشوف**.



(a)



(b)

الشكل 6.2 مثالان على دوائر لا يمكن اختزالها إلى مجموعات بسيطة من المقاومات الموصلة على التوازي وعلى التوالي.

قانون كيرشوف للتيار

الوصلة هي مكان في دائرة حيث يوصل ثلاثة أسلاك أو أكثر بعضها ببعض. يُطلق على كل توصيلة بين وصلتَين في دائرة **فرع**. يمكن أن يحتوي الفرع على عدد من عناصر الدوائر المختلفة والأسلاك التي بينها. يمكن أن يكون لكل فرع تيار متدفق، ويكون هذا التيار هو نفسه في جميع أجزاء الفرع. تقودنا هذه الحقيقة إلى **قانون كيرشوف للتيار:**

> مجموع التيارات الداخلة إلى وصلة معينة يجب أن يساوي مجموع التيارات الخارجة من الوصلة نفسها.

باستخدام إشارة موجب محدّدة (افتراضيًّا) للتيارات الداخلة إلى الوصلة، وإشارة سالب محدّدة للتيارات الخارجة من الوصلة نفسها، يُعبَّر عن قانون كيرشوف للتيار رياضيًّا كما يلي

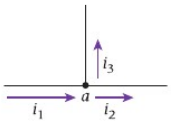
$$\text{الوصلة: } \sum_{k=1}^{n} i_k = 0 \tag{6.1}$$

كيف تعرف التيارات الداخلة إلى وصلة والخارجة من الوصلة نفسها عندما تنشئ رسمًا كالموضح في الشكل 6.3؟ لا يمكنك أن تعرف؛ ببساطة اتجاهًا لكل تيار يسري على طول سلك معين. إذا تبين أن أحد الاتجاهات المعيَّنة خطأ، فستحصل على قيمة سالبة لهذا التيار المحدد في الحل النهائي لديك.

قانون كيرشوف للتيار هو نتيجة مباشرة لمبدأ حفظ الشحنة الكهربائية. وليس للوصلات القدرة على تخزين الشحنة. ومن ثَمَّ، يتطلب حفظ الشحنة خروج جميع الشحنات المتدفقة إلى وصلة ما من هذه الوصلة، وهذا بالضبط ما ينص عليه قانون كيرشوف للتيار.

وفقًا لقانون كيرشوف للتيار، عند كل وصلة في دائرة متعددة الحلقات، يجب أن يتساوى التيار المتدفق إلى الوصلة مع التيار المتدفق خارج الوصلة نفسها. على سبيل المثال، يوضح الشكل 6.3 وصلة مفردة، a، مع دخول تيار، i_1، إلى الوصلة، وخروج تيارين، i_2 و i_3، من الوصلة نفسها. وفقًا لقانون كيرشوف للتيار، يُعبَّر عن هذه الحالة كما يلي:

$$\sum_{k=1}^{3} i_k = i_1 - i_2 - i_3 = 0 \Rightarrow i_1 = i_2 + i_3$$



الشكل 6.3 وصلة مفردة من دائرة متعددة الحلقات.

McGraw-Hill Education حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة

قانون كيرشوف للجهد

الحلقة في دائرة هي مجموعة من العناصر الكهربائية والأسلاك الموصولة، والتي تشكل مسارًا مغلقًا. إذا اتبعت حلقة، فستصل في النهاية إلى النقطة نفسها التي بدأت منها. على سبيل المثال، في الرسم التخطيطي الموضح في الشكل 6.2b، يمكن تحديد ثلاث حلقات محتملة. تُوضَّح هذه الحلقات الثلاث بألوان مختلفة (أحمر وأخضر وأزرق) في الشكل 6.4. تشمل الحلقة الزرقاء المقاومَين 1 و2، ومصدرَي القوة الدافعة الكهربائية 1 و 2، وأسلاك التوصيل الخاصة بهم. وتشمل الحلقة الحمراء المقاومَين 2 و 3، ومصدر القوة الدافعة الكهربائية 2، وأسلاك التوصيل الخاصة بهم. وأخيرًا، تشمل الحلقة الخضراء المقاومَين 1 و 3، ومصدر القوة الدافعة الكهربائية 1، وأسلاك التوصيل الخاصة بهم. لاحظ أن أي سلك محدد أو عنصر دائرة يمكن أن يكون جزءًا من أكثر من حلقة واحدة، وعادة ما يكون ذلك.

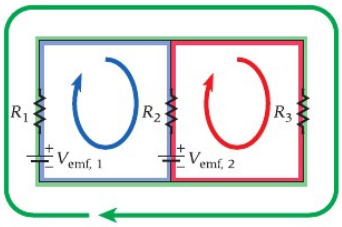
يمكنك التنقل عبر أي حلقة في دائرة في اتجاه عقارب الساعة أو في عكس اتجاه عقارب الساعة. يوضح الشكل 6.4 مسارًا عبر كل حلقة من الحلقات في اتجاه عقارب الساعة، كما هو موضح بالأسهم. ولكن الاتجاه الذي يأخذه المسار حول الحلقة بعيد الصلة، طالما أنه يتم اتباع اختيارك بصورة متسقة في جميع أجزاء الحلقة.

بجمع فروق الجهد الناجمة عن جميع عناصر الدائرة التي نصادفها على طول حلقة معينة، ينتج إجمالي فرق جهد المسار الكامل على طول الحلقة. إذًا، ينص **قانون كيرشوف للجهد** على أنه:

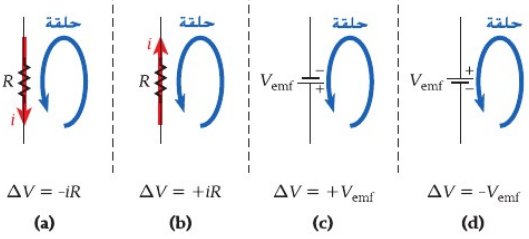
> يجب أن يكون المجموع الجبري لفرق الجهد في حلقة (دائرة كهربائية مغلقة) يساوي صفرًا .

قانون كيرشوف للجهد هو نتيجة مباشرة للحقيقة التي تنص على أن الجهد الكهربائي أحادي القيمة. ويعني هذا أن طاقة الوضع الكهربائية لإلكترون عند نقطة معينة في الدائرة لها قيمة محددة واحدة. افترض أن هذا القانون كان غير صحيح. فمن ثَمَّ يمكننا تحليل تغيرات طاقة الوضع الكهربائية للإلكترون أثناء دورانه حول حلقة، والعثور على هذا الإلكترون الذي يصبح لديه طاقة وضع كهربائية مختلفة عند عودته إلى نقطة البداية. ستتغير طاقة الوضع الكهربائية لهذا الإلكترون عند نقطة ما في الدائرة، ويتعارض هذا تعارضًا واضحًا مع قانون حفظ الطاقة. بمعنى آخر، يُعد قانون كيرشوف للجهد بساطة نتيجة لقانون حفظ الطاقة.

يتطلب تطبيق قانون كيرشوف للجهد افتراضات لتحديد انخفاض الجهد عبر كل عنصر في الدائرة. يتوقف هذا على الاتجاه المفترض للتيار واتجاه التحليل. بالنسبة إلى مصادر القوة الدافعة الكهربائية، تُعد الافتراضات واضحة؛ حيث تشير إشارات السالب والموجب (بالإضافة إلى الخطوط القصيرة والطويلة) إلى جانب مصدر القوة الدافعة الكهربائية الأعلى جهدًا. ويكون انخفاض جهد مصدر القوة الدافعة الكهربائية في الاتجاه الذي يبدأ من السالب إلى الموجب أو من خط قصير إلى خط طويل. كما ذكرنا سابقًا، يتم تعيين اتجاهات التيار واختيار مسار حول حلقة معينة في اتجاه عقارب الساعة أو في عكس اتجاه عقارب الساعة عشوائيًا. سيعطي أي اتجاه المعلومات نفسها، طالما يتم اتباعه بصورة متسقة حول الحلقة. تُلخص الافتراضات المستخدمة لتحليل عناصر الدائرة في حلقة معينة في الجدول 6.1 والشكل 6.5، حيث يكون مقدار التيار عبر عنصر الدائرة هو i. (تتطابق التسميات الواردة في العمود الموجود أقصى يسار الجدول 6.1 مع أجزاء من الشكل 6.5).



الشكل 6.4 الحلقات الثلاث المحتملة (الموضحة بالأحمر، والأخضر، والأزرق) في الرسم التخطيطي للدائرة الموضح في الشكل 6.2b.



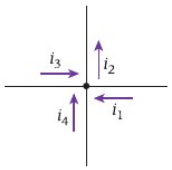
الشكل 6.5 افتراضات الإشارات الخاصة بتغيرات الجهد أثناء تحليل الحلقات.

الجدول 6.1 الافتراضات المستخدمة لتحديد إشارات تغيرات الجهد حول دائرة أحادية الحلقة تحتوي على العديد من المقاومات ومصادر القوة الدافعة الكهربائية

	العنصر	الاتجاه	تغير الجهد
(a)	R	اتجاه التيار نفسه	$-iR$
(b)	R	عكس اتجاه التيار	$+iR$
(c)	V_{emf}	اتجاه القوة الدافعة الكهربائية نفسها	$+V_{emf}$
(d)	V_{emf}	عكس اتجاه القوة الدافعة الكهربائية	$-V_{emf}$

مراجعة المفاهيم 6.1

في الوصلة الموضحة في الشكل، ما المعادلة التي تعبر بشكل صحيح عن مجموع قيم التيارات؟



a) $i_1 + i_2 + i_3 + i_4 = 0$

b) $i_1 - i_2 + i_3 + i_4 = 0$

c) $-i_1 + i_2 + i_3 - i_4 = 0$

d) $i_1 - i_2 - i_3 - i_4 = 0$

e) $i_1 + i_2 - i_3 - i_4 = 0$

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

إذا تحركنا حول حلقة في دائرة في اتجاه التيار نفسه، فإن تغيرات الجهد عبر المقاومات ستكون سالبة. إذا تحركنا حول حلقة في عكس اتجاه التيار، فإن تغيرات الجهد عبر المقاومات ستكون موجبة. إذا تحركنا حول حلقة بالطريقة التي مررنا بها بمصدر قوة دافعة كهربائية من الطرف السالب إلى الطرف الموجب، فسيُسهم هذا المكون في وجود فرق جهد موجب. إذا مررنا بمصدر قوة دافعة كهربائية من الطرف الموجب إلى الطرف السالب، فسيُسهم هذا المكون في وجود فرق جهد سالب.

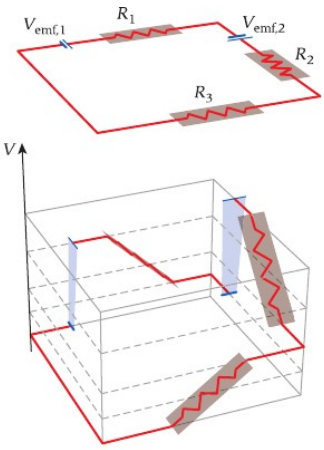
باستخدام هذه الافتراضات، يُكتب قانون كيرشوف للجهد بالصيغة التالية

الحلقة المغلقة:

$$\sum_{j=1}^{m} V_{\text{emf},j} - \sum_{k=1}^{n} i_k R_k = 0 \qquad (6.2)$$

لتوضيح قانون كيرشوف للجهد، يوضح الشكل 6.6 حلقة بمصدرين للقوة الدافعة الكهربائية وثلاثة مقاومات، مع استخدام العرض ثلاثي الأبعاد حيث تُمثَّل قيمة الجهد الكهربائي، V، في البعد الرأسي. تتمثل النقطة الأكثر أهمية التي يصورها الشكل 6.6 في أن الدورة الواحدة الكاملة حول الحلقة تنتهي دائمًا بقيمة الجهد نفسها الموجودة عند نقطة البداية. وهذا بالضبط ما ينص عليه قانون كيرشوف للجهد (المعادلة 6.2).

يوضح الشكل 6.7a الدائرة الموضحة في الشكل6.6 بوصفها حلقة أحادية معزولة. وحيث لا تحتوي هذه الحلقة على وصلات، ولها فرع واحد فقط (وهي حلقة كاملة)، يتدفق التيار i نفسه في جميع أجزاء الحلقة. في الشكل 6.7b، توصَّل هذه الحلقة بأجزاء أخرى من دائرة أكثر اتساعًا عند أربع وصلات (مسماة كما يلي: a و b و c و d). تحتوي هذه الحلقة الآن على أربعة فروع. يمكن أن يكون لكل منها تيار مختلف يتدفق خلالها، كما هو موضح بواسطة الأسهم المختلفة الألوان في الشكل. يوضح هذا الأمر أنه: في كلا جزأي الشكل، ينطبق قانون كيرشوف للجهد على الحلقة الموضحة. تُعد القيم النسبية للجهد الكهربائي بين أي عنصرين للدائرة في الشكل 6.7b هي نفسها القيم الموضحة في الشكل 6.6، بغض النظر عن التيارات التي تدفعها بقية أجزاء الدائرة عبر الفروع المختلفة للحلقة.

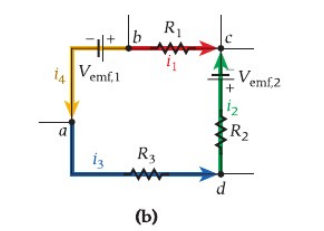


الشكل 6.6 حلقة تحتوي على عدة مصادر للقوة الدافعة الكهربائية والعديد من المقاومات.

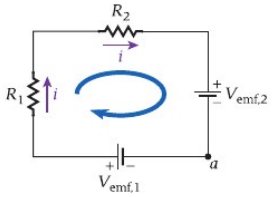
6.2 دوائر كهربائية أحادية الحلقة Single-Loop Circuits

لنبدأ بتحليل الدوائر العامة من خلال دراسة دائرة تحتوي على مصدرين للقوة الدافعة الكهربائية، $V_{\text{emf},1}$ و $V_{\text{emf},2}$، ومقاومَين، R_1 و R_2، موصلَين على التوالي في حلقة واحدة، كما هو موضح في الشكل 6.8. لاحظ أن مصدرَي القوة الدافعة الكهربائية، $V_{\text{emf},1}$ و $V_{\text{emf},2}$، لهما أقطاب متقابلة. في هذه الدائرة الأحادية الحلقة، لا توجد وصلات، لذا تتكون الدائرة بأكملها من فرع واحد. ويكون التيار هو نفسه في جميع أجزاء الحلقة. لتوضيح تغيرات الجهد عبر مكونات هذه الدائرة، يوضح الشكل 6.9 منظورًا ثلاثي الأبعاد.

على الرغم من إمكانية اختيار أي نقطة في الدائرة الموضحة في الشكل 6.8 عشوائيًّا وتعيين قيمة 0 V لها (أو أي قيمة أخرى للجهد؛ لأنه يمكننا دائمًا إضافة ثابت إضافي عام إلى جميع قيم الجهد دون تغيير النتيجة الفعلية)، نبدأ من النقطة a حيث $V = 0$ V. ونتابع حول الدائرة في اتجاه عقارب الساعة (يشار إلى ذلك بالسهم البيضاوي الأزرق في الشكل). نظرًا لتوصيل مكونات الدائرة على التوالي، فإن التيار، i، هو نفسه في كل مكون، مع افتراض أن التيار يتدفق في اتجاه عقارب الساعة (الأسهم الأرجوانية في الشكل). ويكون مكون الدائرة الأول على طول مسار الحلقة في اتجاه عقارب الساعة بدءًا من النقطة a هو مصدر القوة الدافعة الكهربائية، $V_{\text{emf},1}$، الذي يولد مقدارًا من ارتفاع الجهد الموجب قيمته $V_{\text{emf},1}$. يليه المقاوم R_1 الذي يولد انخفاضًا في الجهد يُوضَّح بواسطة $\Delta V_1 = iR_1$.



الشكل 6.7 حلقة الدائرة نفسها الموجودة في الشكل 6.6: (a) كحلقة مفردة معزولة. (b) كحلقة موصلة بأفرع أخرى في الدائرة.



الشكل 6.8 دائرة أحادية الحلقة تحتوي على مقاومَين ومصدرَين للقوة الدافعة الكهربائية موصلين على التوالي.

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

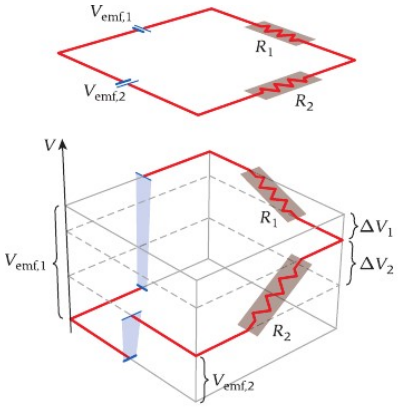
من خلال المتابعة حول الحلقة، نجد أن المكون التالي هو المقاوم R_2 الذي يولد انخفاضًا في الجهد يكون $\Delta V_2 = iR_2$. ثم نصادف مصدرًا ثانيًا للقوة الدافعة الكهربائية هو $V_{emf,2}$. يوصَّل مصدر القوة الدافعة الكهربائية هذا بالدائرة ذات الأقطاب المتقابلة مع أقطاب مصدر القوة $V_{emf,1}$. ومن ثَمّ، يولد هذا المكون انخفاضًا في الجهد مقداره $V_{emf,2}$، بدلًا من *ارتفاع* مقدار من الجهد. لقد أكملنا الحلقة الآن وسنعود إلى $V = 0$ V. باستخدام المعادلة 6.2، نجمع تغيرات الجهد في هذه الحلقة على النحو التالي:

$$V_{emf,1} - \Delta V_1 - \Delta V_2 - V_{emf,2} = V_{emf,1} - iR_1 - iR_2 - V_{emf,2} = 0$$

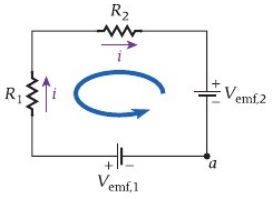
لإثبات أن الاتجاه الذي نتحرك فيه عبر حلقة، في اتجاه عقارب الساعة أو في عكس اتجاه عقارب الساعة، أمر عشوائيّ، لنحلل الدائرة نفسها في عكس اتجاه عقارب الساعة، بدءًا من النقطة a (انظر الشكل 6.10). عنصر الدائرة الأول هو $V_{emf,2}$، ويولد كسب جهد موجبًا. العنصر التالي هو R_2. لأننا افترضنا أن التيار في اتجاه عقارب الساعة ونحن نحلل الحلقة في عكس اتجاه عقارب الساعة، فإنّ تغير جهد المقاوم R_2 هو $+iR_2$. وفقًا للافتراضات المذكورة في الجدول 6.1، من خلال المتابعة إلى العنصر التالي في الحلقة، R_1، نستخدم برهانًا مشابهًا لتعيين تغير جهد هذا المقاوم بصيغة $+R_1$. العنصر الأخير في الدائرة هو $V_{emf,1}$. ويكون بمحاذاة اتجاه مقابل لاتجاه تحليلنا، لذا تغير الجهد عبر هذا العنصر يساوي $-V_{emf,1}$. إذًا، يوضح لنا قانون كيرشوف للجهد أنّ

$$+V_{emf,2} + iR_2 + iR_1 - V_{emf,1} = 0$$

يمكنك أن ترى أن مسار الحلقة في اتجاه عقارب الساعة وفي عكس اتجاه عقارب الساعة يعطي النتائج نفسها، مما يعني أن الاتجاه الذي تختاره لتحليل الدائرة غير مهم.



الشكل 6.9 تمثيل ثلاثي الأبعاد للدائرة أحادية الحلقة في الشكل 6.8؛ حيث تحتوي الدائرة على مقاومَين ومصدرَين للقوة الدافعة الكهربائية موصلَين على التوالي.



الشكل 6.10 الحلقة نفسها الموجودة في الشكل 6.8، ولكن تم تحليلها في عكس اتجاه عقارب الساعة.

مسألة محلولة 6.1 شحن بطارية

شُحنت بطارية جهدها 12.0 V وذات مقاومة داخلية مقدارها $R_i = 0.200\ \Omega$ بشاحن بطارية قادر على توصيل تيار مقداره $i = 6.00$ A.

المسألة

ما أقل قوة دافعة كهربائية يجب على شاحن البطارية توفيرها ليتمكن من شحن البطارية؟

الحل

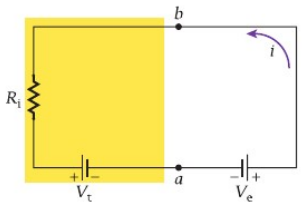
فكّر يجب أن يكون لشاحن البطارية، الذي يُعد مصدرًا خارجيًّا للقوة الدافعة الكهربائية، فرق جهد كافٍ للتغلب على فرق جهد البطارية وانخفاض الجهد عبر مقاومة البطارية الداخلية. يجب توصيل شاحن البطارية بحيث يوَّصل طرفه الموجب بالطرف الموجب للبطارية المراد شحنها. يمكننا التفكير في مقاومة البطارية الداخلية بوصفها مقاومًا في دائرة أحادية الحلقة وتحتوي أيضًا على مصدرين للقوة الدافعة الكهربائية ذوي أقطاب متقابلة.

ارسم الشكل 6.11 يوضح رسمًا تخطيطيًا للدائرة التي تتكون من بطارية ذات فرق جهد مقداره V_t ومقاومة داخلية مقدارها R_i ومتصلة بمصدر خارجي للقوة الدافعة الكهربائية، V_e. تمثل المنطقة المظللة بالأصفر الأبعاد المادية للبطارية. لاحظ أن الطرف الموجب لشاحن البطارية متصل بالطرف الموجب للبطارية.

ابحث يمكننا تطبيق قانون كيرشوف للجهد على هذه الدائرة. نفترض تدفق تيار عكس اتجاه عقارب الساعة حول الدائرة، كما هو موضح في الشكل 6.11. يجب أن يساوي مجموع تغيرات الجهد حول الدائرة صفرًا. نجمع تغيرات الجهد بداية من النقطة b ونتحرك في عكس اتجاه عقارب الساعة:

$$-iR_i - V_t + V_e = 0$$

-يُتبع



الشكل 6.11 دائرة تتكون من بطارية لها مقاومة داخلية وموصلة بمصدر خارجي للقوة الدافعة الكهربائية.

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

حوّل إلى أبسط صورة يمكننا حل هذه المعادلة لإيجاد فرق الجهد المطلوب للشاحن:

$$V_e = iR_i + V_t$$

حيث i هو التيار الذي يمده الشاحن.

احسب بالتعويض بالقيم العددية، نحصل على

$$V_e = iR_i + V_t = (6.00\ \text{A})(0.200\ \Omega) + 12.0\ \text{V} = 13.20\ \text{V}$$

قرّب نقرّب النتيجة التي توصلنا إليها إلى ثلاثة أرقام معنوية:

$$V_e = 13.2\ \text{V}$$

تحقَّق ثانية تشير النتيجة التي توصلنا إليها إلى أن شاحن البطارية يجب أن يكون فرق جهده أعلى من فرق الجهد المحدد للبطارية، وهي نتيجة منطقية. فرق جهد الشاحن العادي لبطارية جهدها 12 V يساوي حوالي 14 V.

6.3 دوائر كهربائية متعددة الحلقات Multiloop Circuits

يتطلب تحليل الدوائر متعددة الحلقات كلا قانونَي كيرشوف للجهد وكيرشوف للتيار. الإجراء المتبع لتحليل دائرة متعددة الحلقات هو تحديد الحلقات الكاملة ونقاط الوصلات في الدائرة وتطبيق قانونَي كيرشوف على هذه الأجزاء من الدائرة بشكل منفصل. ينتج عن تحليل الحلقات الأحادية في دائرة متعددة الحلقات باستخدام قانون كيرشوف للجهد، وتحليل الوصلات باستخدام قانون كيرشوف للتيار نظامًا من المعادلات المزدوجة بمتغيرات مجهولة متعددة. يمكن حل هذه المعادلات لإيجاد الكميات المطلوبة باستخدام طرائق متنوعة، بما في ذلك التعويض المباشر. مثال 6.1 يوضح تحليل دائرة متعددة الحلقات.

مثال 6.1 دائرة متعددة الحلقات

فكّر في الدائرة الموضحة في الشكل 6.12. تحتوي هذه الدائرة على ثلاثة مقاومات، R_1، و R_2، و R_3، ومصدرين للقوة الدافعة الكهربائية، $V_{emf,1}$ و $V_{emf,2}$. توضح الأسهم الحمراء اتجاه انخفاض الجهد عبر مصادر القوة الدافعة الكهربائية. لا يمكن تحليل هذه الدائرة إلى توصيلات بسيطة على التوالي أو على التوازي. لتحليل هذه الدائرة، علينا أن نعيّن اتجاهات للتيارات المتدفقة عبر المقاومات. يمكننا اختيار هذه الاتجاهات عشوائيًا (مع العلم بأننا إذا اخترنا الاتجاه الخاطئ، فستكون قيمة التيار الناتجة سالبة). الشكل 6.13 يوضح الدائرة مع توضيح الاتجاهات المعيَّنة للتيارات بالأسهم الأرجوانية.

لنفكر في الوصلة b أولاً. التيار الداخل إلى الوصلة يجب أن يساوي التيار الخارج منها. لذا يمكننا أن نكتب

$$i_2 = i_1 + i_3 \quad \text{(i)}$$

بالنظر إلى الوصلة a، نعادل مرة أخرى التيار الداخل مع التيار الخارج لنحصل على

$$i_1 + i_3 = i_2$$

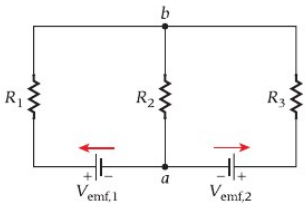
التي تعطي النتائج نفسها التي حصلنا عليها للوصلة b. لاحظ أن هذه نتيجة نموذجية: إذا كانت دائرة تحتوي على n من الوصلات، فمن الممكن الحصول على $n - 1$ على الأكثر من المعادلات المستقلة نتيجة لتطبيق قانون كيرشوف للتيار. (في هذه الحالة، $n = 2$، لذا يمكننا الحصول على معادلة مستقلة واحدة فقط).

لا يمكننا عند هذه النقطة تحديد التيارات في الدائرة لأن لدينا ثلاث قيم مجهولة ومعادلة واحدة فقط. لذا، نحتاج إلى معادلتين مستقلتين إضافيتين. للحصول على هاتين المعادلتين، نطبق قانون كيرشوف للجهد. يمكننا تحديد ثلاث حلقات في الدائرة الموضحة في الشكل 6.13:

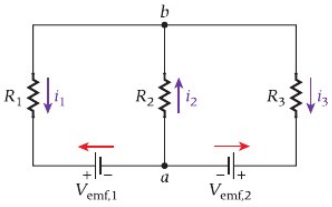
1. النصف الأيسر من الدائرة يحتوي على العناصر R_1، و R_2، و $V_{emf,1}$؛
2. النصف الأيمن من الدائرة يحتوي على العناصر R_2، و R_3، و $V_{emf,2}$؛
3. الحلقة الخارجية تحتوي على العناصر R_1، و R_3، و $V_{emf,1}$، و $V_{emf,2}$.

بتطبيق قانون كيرشوف للجهد على النصف الأيسر من الدائرة، وباستخدام الاتجاهات المفترضة للتيارات وبتحليل الحلقة في عكس اتجاه عقارب الساعة بداية من الوصلة b، نحصل على

$$-i_1R_1 - V_{emf,1} - i_2R_2 = 0$$



الشكل 6.12 دائرة متعددة الحلقات تحتوي على ثلاثة مقاومات ومصدرَين للقوة الدافعة الكهربائية.



الشكل 6.13 دائرة متعددة الحلقات موضح فيها الاتجاه المفترض للتيار المتدفق في المقاومات.

McGraw-Hill Education محفوظة لصالح مؤسسة © حقوق الطبع والتأليف

أو

$$i_1R_1 + V_{emf,1} + i_2R_2 = 0 \quad \text{(ii)}$$

بتطبيق قانون الجهد على النصف الأيمن من الدائرة، وبالبدء مرة أخرى من الوصلة b وبتحليل الحلقة في اتجاه عقارب الساعة، نحصل على

$$-i_3R_3 - V_{emf,2} - i_2R_2 = 0$$

أو

$$i_3R_3 + V_{emf,2} + i_2R_2 = 0 \quad \text{(iii)}$$

بتطبيق قانون الجهد على الحلقة الخارجية، وبالبدء من الوصلة b وبالعمل في اتجاه عقارب الساعة، نحصل على

$$-i_3R_3 - V_{emf,2} + V_{emf,1} + i_1R_1 = 0$$

لا تقدم هذه المعادلة معلومات جديدة لأننا نستطيع الحصول على هذه المعلومات أيضًا بطرح المعادلة (iii) من المعادلة (ii). بالنسبة إلى الحلقات الثلاث كلها، نحصل على معلومات متكافئة إذا حللناها في عكس اتجاه عقارب الساعة، أو في اتجاه عقارب الساعة، أو إذا بدأنا من أي نقطة أخرى وتحركنا حول الحلقات انطلاقًا من تلك النقطة.

باستخدام المعادلات الثلاث: (i)، و(ii)، و(iii)، والقيم الثلاث المجهولة: i_1، و i_2، و i_3، يمكننا إيجاد قيم التيارات المجهولة بطرائق متعددة. على سبيل المثال، يمكننا وضع المعادلات الثلاث في صيغة مصفوفة ثم حلها باستخدام طريقة كرامر والتأكد من الحل باستخدام آلة حاسبة. هذه طريقة موصى بها للدوائر المركبة التي بها العديد من المعادلات والعديد من القيم المجهولة. ولكن، في هذا المثال، يمكننا المتابعة بالتعويض من المعادلة (i) في المعادلتين الأخريين، ومن ثَمَّ نحذف i_2. ثم نحل إحدى المعادلتين الناتجتين لإيجاد i_1 ونعوض من هذه المعادلة في المعادلة الأخرى لنحصل على تعبير لقيمة i_3. بالتعويض مرة أخرى، نحصل على حلولًا لكل من i_2 وi_1:

$$i_1 = -\frac{(R_2 + R_3)V_{emf,1} - R_2V_{emf,2}}{R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3}$$

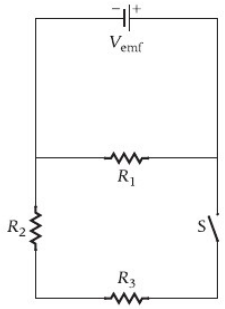
$$i_2 = -\frac{R_3V_{emf,1} + R_1V_{emf,2}}{R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3}$$

$$i_3 = -\frac{-R_2V_{emf,1} + (R_1 + R_2)V_{emf,2}}{R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3}$$

ملاحظة: لن تحتاج إلى تذكر هذا الحل بالتحديد أو الجبر الخطي المستخدم في الوصول إليه. ولكن، الطريقة العامة لتطبيق قانونَي كيرشوف للجهد والتيار، وتعيين تيارات في اتجاهات عشوائية هي الفكرة المحورية لتحليل الدائرة.

مراجعة المفاهيم 6.2

في الدائرة الموضحة في الشكل، توجد ثلاثة مقاومات متماثلة. يُفتح المفتاح S في البداية. عند غلق المفتاح، ماذا يحدث للتيار المتدفق في المقاوم R_1؟



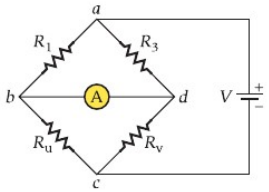
a) تقل قيمة التيار المتدفق في المقاوم R_1.

b) تزداد قيمة التيار المتدفق في المقاوم R_1.

c) تظل قيمة التيار المتدفق في المقاوم R_1 كما هي.

مسألة محلولة 6.2 قنطرة ويتستون

قنطرة ويتستون هي دائرة خاصة تستخدم لقياس المقاومات المجهولة. الرسم التخطيطي لدائرة قنطرة ويتستون موضح في الشكل 6.14. تتكون الدائرة من ثلاث مقاومات معلومة، R_1، و R_3، ومقاوم متغير، R_v. بالإضافة إلى مقاومة مجهولة R_u. يوصل مصدر للقوة الدافعة الكهربائية، V، عبر الوصلتَين a و c. يوصل أميتر حساس (جهاز يستخدم لقياس التيار، ستتم مناقشته في القسم 6.4) بين الوصلتَين b و d. تُستخدم قنطرة ويتستون لتحديد R_u عن طريق تغير قيمة R_v حتى لا يظهر على الأميتر الموصل بين b و d تيار متدفق. عندما تكون قراءة الأميتر صفرًا، يُقال أن القنطرة متوازنة.



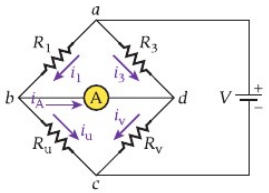
الشكل 6.14 رسم تخطيطي لدائرة قنطرة ويتستون.

المسألة

حدد المقاومة المجهولة، R_u، في قنطرة ويتستون الموضحة في الشكل 6.14. المقاومات المعلومة هي $R_1 = 100.0\ \Omega$، و $R_3 = 110.0\ \Omega$، و $R_v = 15.63\ \Omega$ عندما يكون التيار المتدفق عبر الأميتر يساوي صفرًا. الأمر الذي يشير إلى أن القنطرة متوازنة.

الحل

فكّر تحتوي الدائرة على أربعة مقاومات وأميتر، ويمكن أن يحتوي كل مكوّن على تيار متدفق عبره. لكن، في هذه الحالة، حيث $R_v = 15.63\ \Omega$، لا يوجد تيار متدفق عبر الأميتر. إن مساواة هذا التيار بالصفر يترك أربعة تيارات مجهولة عبر المقاومات الأربعة، ولهذا نحتاج إلى أربع معادلات. يمكننا استخدام قانونَي كيرشوف لتحليل الحلقتَين، adb و cbd، والوصلتَين، b و d.



الشكل 6.15 قنطرة ويتستون مع توضيح الاتجاهات المفترضة للتيارات.

ارسم الشكل 6.15 يوضح قنطرة ويتستون بالاتجاهات المفترضة للتيارات i_1، و i_3، و i_u، و i_v، و i_A.

-يُتبع

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

ابحث نطبق أولًا قانون كيرشوف للجهد على الحلقة *adb*، بداية من *a* ونتحرك في اتجاه عقارب الساعة لنحصل على

$$-i_3R_3 + i_AR_A + i_1R_1 = 0 \quad \text{(i)}$$

حيث R_A هي مقاومة الأميتر. نطبق قانون كيرشوف للجهد مرة أخرى على الحلقة *cbd*، بداية من *c* ونتحرك في اتجاه عقارب الساعة لنحصل على

$$+i_uR_u - i_AR_A - i_vR_v = 0 \quad \text{(ii)}$$

يمكننا الآن استخدام قانون كيرشوف للتيار عند الوصلة *b* لنحصل على

$$i_1 = i_A + i_u \quad \text{(iii)}$$

بتطبيق قانون كيرشوف للتيار مرة أخرى عند الوصلة *d*، نحصل على

$$i_3 + i_A = i_v \quad \text{(iv)}$$

حوّل إلى أبسط صورة عندما يكون التيار المتدفق عبر الأميتر يساوي صفرًا ($i_A = 0$)، يمكننا إعادة كتابة المعادلات من (i) إلى (iv) كما يلي:

$$i_1R_1 = i_3R_3 \quad \text{(v)}$$

$$i_uR_u = i_vR_v \quad \text{(vi)}$$

$$i_1 = i_u \quad \text{(vii)}$$

و

$$i_3 = i_v \quad \text{(viii)}$$

بقسمة المعادلة (vi) على المعادلة (v)، نحصل على

$$\frac{i_uR_u}{i_1R_1} = \frac{i_vR_v}{i_3R_3}$$

التي يمكننا إعادة كتابتها باستخدام المعادلتين (vii) و(viii):

$$R_u = \frac{R_1}{R_3}R_v$$

احسب بالتعويض بالقيم العددية، نحصل على

$$R_u = \frac{R_1}{R_3}R_v = \frac{100.0\ \Omega}{110.0\ \Omega}15.63\ \Omega = 14.20901\ \Omega$$

قرّب نقرّب النتيجة التي توصلنا إليها إلى أربعة أرقام معنوية:

$$R_u = 14.21\ \Omega$$

تحقَّق ثانية النتيجة التي توصلنا إليها لمقاومة المقاوم المجهول تماثل قيمة المقاوم المتغير. لذا، تبدو إجابتنا معقولة، لأن المقاومَين الآخرَين في الدائرة لهما أيضًا مقاومتان متساويتان تقريبًا.

سؤال الاختبار الذاتي 6.1

أثبت أنه عندما تساوي قيمة التيار المتدفق في الأميتر صفرًا، تُوضح المقاومة المكافئة للمقاومات الموجودة في قنطرة ويتستون المبينة في الشكل 6.14 بواسطة

$$R_{eq} = \frac{(R_1 + R_u)(R_3 + R_v)}{R_1 + R_u + R_3 + R_v}$$

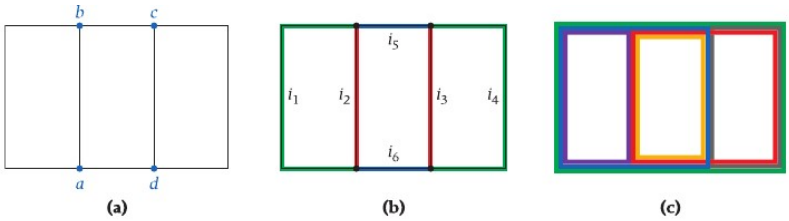
ملاحظات عامة على شبكات الدوائر الكهربائية

ملاحظة مهمة حول حل مسائل الدائرة هي أن التحليل الكامل لدائرة يتطلب بوجه عام معرفة التيار المتدفق في كل فرع من أفرع الدائرة. نستخدم قانون كيرشوف للتيار وقانون كيرشوف للجهد لتكوين معادلات تربط بين التيارات، ونحن بحاجة إلى معادلات مستقلة خطيًا بعدد الأفرع لنضمن أنه بإمكاننا الحصول على حل لهذا النظام.

لنفكر في المثال المجرد الموضح في الشكل 6.16، حيث تمت إزالة كل مكونات الدائرة ما عدا الأسلاك. تحتوي هذه الدائرة على أربع وصلات، موضحة بالأزرق في الشكل 6.16a. تصل ستة أفرع بين هذه الوصلات، ويتم توضيحها في الشكل 6.16b. لهذا نحتاج إلى ست معادلات مستقلة خطيًا تربط بين التيارات في هذه الأفرع. كما ذكرنا سابقًا، ليست جميع المعادلات الناجمة عن تطبيق قانونَي كيرشوف على دائرة مستقلةً خطيًا. هذه الحقيقة جديرة بأن نكررها: إذا كانت دائرة تحتوي على *n* من الوصلات، فمن الممكن الحصول على $n - 1$ على الأكثر من المعادلات المستقلة نتيجة لتطبيق قانون التيار. (في الدائرة الموضحة في الشكل 6.16، $n = 4$، إذًا نستطيع الحصول على ثلاث معادلات مستقلة فقط).

لا يُعد قانون التيار وحده كافيًا للتحليل الكامل لأي دائرة. من الأفضل بشكل عام كتابة أكبر عدد ممكن من المعادلات للوصلات، ثم زيادة هذه المعادلات بالمعادلات التي تم الحصول عليها من الحلقات. يوضح الشكل 6.16c وجود ست حلقات محتملة في هذه الشبكة ومحددة بألوان مختلفة.

McGraw-Hill Education حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة



الشكل 6.16 شبكة دائرة كهربائية تتكون من (a) أربع وصلات، و(b) ستة أفرع، و(c) ست حلقات محتملة.

كما هو واضح، توجد حلقات أكثر مما نحتاج إلى تحليله لنحصل على ثلاث معادلات. وهذه أيضًا ملاحظة عامة: يُعد نظام المعادلات الذي يمكن وضعه عن طريق التفكير في جميع الحلقات المحتملة زائدَ التحديد. لذا، ستتمتع دائمًا بحرية اختيار حلقات محددة لزيادة المعادلات التي يتم الحصول عليها من تحليل الوصلات. كقاعدة عامة مستمدة من تجربة عملية، من الأفضل اختيار حلقات بها عناصر أقل في الدائرة، الأمر الذي يجعل الجبر الخطي اللاحق أسهل إلى حد كبير. بالتحديد، إذا كُلّفت بإيجاد التيار في فرع معين من شبكة، فقد يتيح لك اختيار الحلقة المناسبة تجنب إعداد مجموعة من المعادلات المطولة ويسمح لك بحل المسألة بمعادلة واحدة فقط. إذًا، فمن المجدي إيلاء بعض الاهتمام عند اختيار الحلقات! لا تكتب معادلات أكثر مما تحتاج إليه لإيجاد القيم المجهولة في مسألة محددة. لن ينجم عن هذا إلا تعقيد الجبر. ولكن، بمجرد حصولك على الحل، يمكنك استخدام حلقة أو أكثر من الحلقات غير المستخدمة لتتحقق من القيم التي توصلت إليها.

6.4 أجهزة الأميتر والفولتميتر Ammeters and Voltmeters

يُسمى الجهاز المستخدم لقياس التيار **الأميتر**. يُسمى الجهاز المستخدم لقياس فرق الجهد **الفولتميتر**. لقياس التيار، يجب توصيل أميتر في دائرة على *التوالي*. يوضح الشكل 6.17 أميتر موصّل في دائرة بطريقة تسمح له بقياس التيار i. لقياس فرق الجهد، يجب توصيل فولتميتر على *التوازي* بالمكوّن الذي يجب قياس فرق الجهد بين طرفيه. يوضح الشكل 6.17 فولتميتر موضوع في الدائرة لقياس انخفاض الجهد بين طرفَي المقاوم R_1.

من المهم معرفة أن هذه الأجهزة يجب أن تكون قادرة على القياس عند مرور التيار في الدائرة بأقل قدر ممكن. ومن ثَمّ، تُصمم أجهزة الأميتر بمقاومة أقل ما يمكن، وعادةً ما تكون في حدود 1 Ω. لذا ليس لها تأثير ملحوظ في التيارات التي تقيسها. تُصمم أجهزة الفولتميتر بمقاومة أكبر ما يمكن، وعادةً ما تكون في حدود 10^7 Ω (10 MΩ). لذا لها تأثير طفيف في فروق الجهد التي تقيسها.

عمليًا، تتم قياسات التيار وفرق الجهد باستخدام ملتيمتر رقمي يمكنه التبديل بين عمله كأميتر وعمله كفولتميتر. إنه يعرض النتائج على شاشة رقمية تحتوي على إشارة فرق الجهد أو التيار. تستطيع معظم أجهزة الملتيمتر الرقمية أيضًا قياس مقاومة أي عنصر في الدائرة الكهربائية؛ بمعنى، أنها يمكنها العمل كجهاز **أوميتر**. يؤدي الملتيمتر الرقمي هذه المهمة بتطبيق فرق جهد معلوم وقياس التيار الناتج. هذا الاختبار مفيد في تحديد مدى استمرارية الدائرة وحالة المنصهرات، بالإضافة إلى قياس مقاومة المقاومات.

مثال 6.2 فولتميتر في دائرة بسيطة

فكر في دائرة بسيطة تتكون من مصدر للقوة الدافعة الكهربائية جهده $V_{emf} = 150.\text{V}$ ومقاوم $R = 100.\ \text{k}\Omega$ (الشكل 6.18). يُوصَّل فولتميتر مقاومته $R_V = 10.0\ \text{M}\Omega$ بين طرفَي المقاوم.

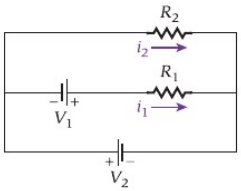
المسألة 1

ما قيمة التيار في الدائرة قبل توصيل الفولتميتر؟

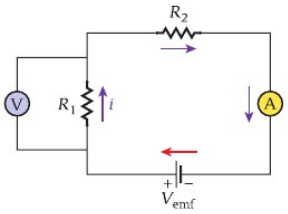
– يُتبع

مراجعة المفاهيم 6.3

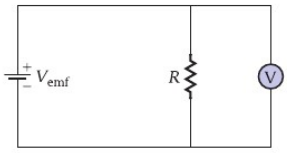
في الدائرة متعددة الحلقات الموضحة في الشكل، $V_1 = 6.00\ \text{V}$، و$V_2 = 12.0\ \text{V}$، و$R_1 = 10.0\ \Omega$، و$R_2 = 12.0\ \text{V}$. ما مقدار التيار i_2؟



a) 0.500 A
b) 0.750 A
c) 1.00 A
d) 1.25 A
e) 1.50 A



الشكل 6.17 وضع أميتر وفولتميتر في دائرة بسيطة.



الشكل 6.18 دائرة بسيطة تحتوي على فولتميتر موصل على التوازي بين طرفَي مقاوم.

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

الحل 1

ينص قانون أوم على أن $V = iR$. إذًا يمكننا إيجاد التيار في الدائرة:

$$i = \frac{V_{emf}}{R} = \frac{150.\ V}{100.\times10^{3}\ \Omega} = 1.50\times10^{-3}\ A = 1.50\ mA$$

المسألة 2

ما قيمة التيار في الدائرة عند توصيل الفولتميتر بين طرفَي المقاوم؟

الحل 2

تُوضَّح المقاومة المكافئة للمقاوم والفولتميتر الموصل على التوازي بواسطة

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R_V}$$

بإيجاد المقاومة المكافئة وبالتعويض بالقيم العددية، نحصل على

$$R_{eq} = \frac{RR_V}{R + R_V} = \frac{\left(100.\times10^{3}\ \Omega\right)\left(10.0\times10^{6}\ \Omega\right)}{100.\times10^{3}\ \Omega + 10.0\times10^{6}\ \Omega} = 9.90\times10^{4}\ \Omega = 99.0\ k\Omega$$

إذًا، التيار يساوي

$$i = \frac{V_{emf}}{R_{eq}} = \frac{150.\ V}{9.90\times10^{4}\ \Omega} = 1.52\times10^{-3}\ A = 1.52\ mA$$

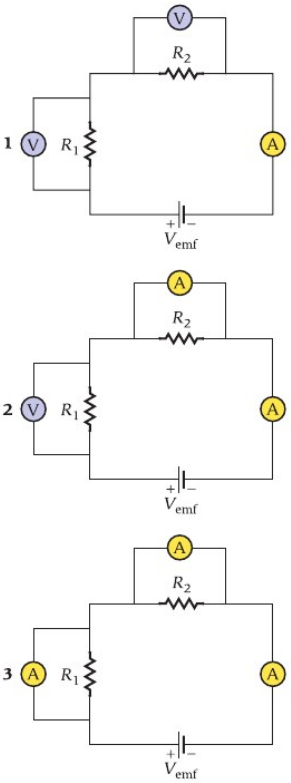
يزيد التيار في الدائرة بمقدار 0.02 mA عند توصيل الفولتميتر؛ لأن مقاومة المقاوم والفولتميتر الموصل على التوازي أقل من مقاومة المقاوم وحده. ولكن، التأثير بسيط، حتى مع هذه المقاومة الكبيرة نسبيًا ($R = 100.\ k\Omega$).

سؤال الاختبار الذاتي 6.2

عند تعشيق بادئ تشغيل سيارة أثناء تشغيل المصابيح الأمامية، تخفت الإضاءة. اشرح.

مراجعة المفاهيم 6.4

أي من الدوائر الموضحة في الشكل لن تعمل بشكل صحيح؟



a) 1 d) 1 و 2
b) 2 e) 2 و 3
c) 3

مسألة محلولة 6.3 زيادة نطاق قياس جهاز أميتر

المسألة

يمكن استخدام الأميتر لقياس مجموعة مختلفة لقيم التيار عن طريق إضافة مجزئ تيار على هيئة مقاوم مجزئ للتيار موصّل على التوازي بالأميتر. *المقاوم المجزئ للتيار* هو ببساطة مقاوم ذو مقاومة صغيرة جدًا. يُستمد اسمه من واقع أنه عند توصيله على التوازي بالأميتر، الذي مقاومته أكبر، يُحوّل معظم التيار من خلاله، متجاوزًا الأميتر. تقل حساسية الأميتر لهذا السبب، مما يتيح له قياس تيارات أكبر. افترض أن أميتر يعطي قراءة التدريجات بالكامل عندما يمر تيار مقداره $i_{int} = 5.10\ mA$ خلاله. وتبلغ المقاومة الداخلية للأميتر $R_i = 16.8\ \Omega$. لاستخدام هذا الأميتر لقياس أقصى تيار مقداره $i_{max} = 20.2\ A$، ما مقدار المقاومة اللازمة للمقاوم المجزئ للتيار، R_s، الموصل على التوازي بالأميتر؟

الحل

فكّر يجب أن تكون مقاومة المقاوم المجزئ للتيار الموصل على التوازي بالأميتر أقل بشكل ملحوظ من المقاومة الداخلية للأميتر. وسيتدفق عندئذٍ معظم التيار خلال المقاوم المجزئ للتيار بدلًا من الأميتر.

ارسم الشكل 6.19 يوضح مقاومًا مجزئًا للتيار، R_s، موصلًا على التوازي بأميتر.

ابحث المقاومان متصلان على التوازي، إذًا فرق الجهد متساوٍ بين طرفَي كل مقاوم. فرق الجهد الذي يعطي قراءة التدريجات بالكامل على الأميتر هو

(i) $$\Delta V_{fs} = i_{int}R_i$$

نعرف أن المقاومة المكافئة للمقاومَين الموصلَين على التوازي تُوضَّح بواسطة

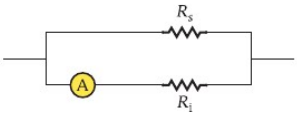
(ii) $$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_s}$$

انخفاض الجهد بين طرفَي المقاومة المكافئة يجب أن يساوي انخفاض الجهد بين طرفَي الأميتر الذي يعطي قراءة التدريجات بالكامل عندما يتدفق تيار i_{max} عبر الدائرة. لذا، يمكننا أن نكتب

(iii) $$\Delta V_{fs} = i_{max}R_{eq}$$

حوّل إلى أبسط صورة من خلال دمج المعادلتين (i) و(iii) لإيجاد فرق الجهد، نحصل على

(iv) $$\Delta V_{fs} = i_{int}R_i = i_{max}R_{eq}$$



الشكل 6.19 أميتر موصل بين طرفيه مقاوم مجزئ التيار على التوازي.

McGraw-Hill Education حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة

يمكننا إعادة ترتيب المعادلة (iv) والتعويض عن R_{eq} في المعادلة (ii):

$$\frac{i_{max}}{i_{int}R_i} = \frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_s} \quad (v)$$

من خلال حل المعادلة (v) لإيجاد المقاوم المجزئ للتيار، نحصل على

$$\frac{1}{R_s} = \frac{i_{max}}{i_{int}R_i} - \frac{1}{R_i} = \frac{1}{R_i}\left[\frac{i_{max}}{i_{int}} - 1\right] = \frac{1}{R_i}\left[\frac{i_{max} - i_{int}}{i_{int}}\right]$$

أو

$$R_s = R_i \frac{i_{int}}{i_{max} - i_{int}}$$

احسب بالتعويض بالقيم العددية، نحصل على

$$R_s = R_i \frac{i_{int}}{i_{max} - i_{int}} = (16.8\ \Omega)\frac{5.10\times10^{-3}\ A}{20.2\ A - 5.10\times10^{-3}\ A}$$
$$= 0.00424266\ \Omega.$$

قرّب نقرّب النتيجة التي توصلنا إليها إلى ثلاثة أرقام معنوية:

$$R_s = 0.00424\ \Omega$$

تحقَّق ثانية نُوضّح المقاومة المكافئة للأميتر والمقاوم المجزئ للتيار الموصلَين على التوازي بواسطة المعادلة (ii). بحل تلك المعادلة لإيجاد المقاومة المكافئة وبالتعويض بالأعداد، نحصل على

$$R_{eq} = \frac{R_iR_s}{R_i + R_s} = \frac{(16.8\ \Omega)(0.00424\ \Omega)}{16.8\ \Omega + 0.00424\ \Omega} = 0.00424\ \Omega$$

إذًا، فالمقاومة المكافئة للأميتر والمقاوم المجزئ للتيار الموصلَين على التوازي تساوي تقريبًا مقاومة المقاوم المجزئ للتيار. هذه المقاومة المكافئة المنخفضة ضرورية في جهاز قياس التيار الذي يجب توصيله على التوالي في دائرة. إذا كانت مقاومة جهاز قياس التيار عالية، فسيؤدي ذلك إلى اضطراب في قياس التيار.

6.5 دوائر كهربائية تحتوي مقاومًا ومكثفًا RC Circuits

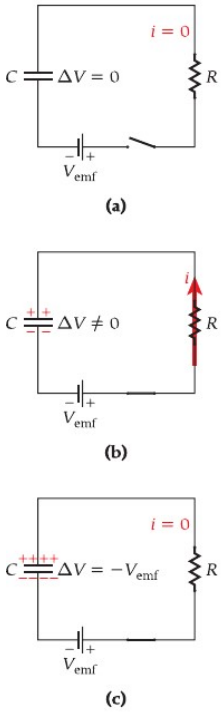
ناقشنا في هذه الوحدة حتى الآن الدوائر التي تحتوي على مصادر للقوة الدافعة الكهربائية ومقاومات. ولا تتغير التيارات في هذه الدوائر مع الزمن. ندرس الآن الدوائر التي تحتوي على مكثفات، بالإضافة إلى مصادر للقوة الدافعة الكهربائية ومقاومات. يطلق على هذه الدوائر **دوائر RC**، وتحتوي على تيارات تتغير مع الزمن. أبسط عمليات الدائرة التي تتضمن تيارات تتغير مع الزمن هي شحن مكثف وتفريغ شحنه. يتضمن فهم هذه العمليات المرتبطة بالزمن حل بعض المعادلات التفاضلية البسيطة. سنناقش التيارات المرتبطة بالزمن لاحقًا والتي ستستند إلى الطرائق المُقدمة هنا.

شحن مكثف

فكر في دائرة بها مصدر للقوة الدافعة الكهربائية، V_{emf}، ومقاوم، R، ومكثف، C (الشكل 6.20). في البداية، يُفتح المفتاح ويكون المكثف غير مشحون، كما هو موضح في الشكل 6.20a. عندما يُغلق المفتاح (الشكل 6.20b)، يبدأ التيار في التدفق في الدائرة، مراكمًا شحنات متقابلة على لوحَي المكثف، وبهذا يتولد فرق جهد، ΔV، بين طرفَي المكثف. يتدفق التيار بسبب مصدر القوة الدافعة الكهربائية الذي يحافظ على جهد ثابت. عندما يُشحن المكثف بالكامل (الشكل 6.20c)، لا يتدفق بعد ذلك تيار في الدائرة. يتساوى عند ذلك فرق الجهد عبر اللوحَين مع الجهد الذي يوفره مصدر القوة الدافعة الكهربائية، ويكون مقدار الشحنة الكلية، q_{tot}، على كل من لوحَي المكثف هو $q_{tot} = CV_{emf}$.

بينما يُشحن المكثف، يمكننا تحليل التيار i. المتدفق في الدائرة (المُفترض تدفقه من الطرف السالب إلى الطرف الموجب داخل مصدر الجهد) عن طريق تطبيق قانون كيرشوف للجهد على الحلقة في الشكل 6.20b في عكس اتجاه عقارب الساعة:

$$V_{emf} - V_R - V_C = V_{emf} - i(t)R - q(t)/C = 0$$



الشكل 6.20 دائرة RC أساسية تحتوي على مصدر للقوة الدافعة الكهربائية، ومقاوم، ومكثف: (a) عند فتح المفتاح؛ (b) بعد غلق المفتاح بفترة زمنية قصيرة؛ (c) بعد غلق المفتاح بفترة زمنية طويلة.

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

حيث V_C هو انخفاض الجهد بين طرفَي المكثِف و $q(t)$ هو شحنة المكثِف في زمن معين t. تغير الشحنة على لوحَي المكثِف نتيجة التيار هو $i(t) = dq(t)/dt$. ويمكننا إعادة كتابة المعادلة السابقة بصيغة

$$R\frac{dq(t)}{dt} + \frac{q(t)}{C} = V_{emf}$$

أو

$$\frac{dq(t)}{dt} + \frac{q(t)}{RC} = \frac{V_{emf}}{R} \quad (6.3)$$

تربط هذه المعادلة التفاضلية بين الشحنة والزمن. يبدو من الملائم استخدام صيغة أسية لحل المعادلة 6.3؛ لأن الدالة الأسية هي النوع الوحيد الذي لديه خاصية امتلاك مشتقة مطابقة لذاتها. بما أنّ المعادلة 6.3 تحتوي أيضًا على حد ثابت، يتطلب الحل وجودَ حدٍ ثابتٍ. لهذا نجرب حلًا ذا ثابت وصيغة أسية، حيث $q(0) = 0$:

$$q(t) = q_{max}\left(1 - e^{-t/\tau}\right)$$

ويجب تحديد الثابتَين q_{max} وτ. بالتعويض مرة أخرى في المعادلة 6.3، نحصل على

$$q_{max}\frac{1}{\tau}e^{-t/\tau} + \frac{1}{RC}q_{max}\left(1 - e^{-t/\tau}\right) = \frac{V_{emf}}{R}$$

نجمع الآن الحدود التابعة للزمن على الطرف الأيسر للمعادلة والحدود المستقلة عن الزمن على الطرف الأيمن للمعادلة:

$$q_{max}e^{-t/\tau}\left(\frac{1}{\tau} - \frac{1}{RC}\right) = \frac{V_{emf}}{R} - \frac{1}{RC}q_{max}$$

يمكن أن تكون هذه المعادلة صحيحة دائمًا فقط إذا كان كلا الطرفين يساوي صفرًا. من الطرف الأيسر للمعادلة، نوجد

$$\tau = RC \quad (6.4)$$

إذًا، الثابت τ (المسمى **بالثابت الزمني**) هو ببساطة ناتج ضرب السعة والمقاومة. من الطرف الأيمن للمعادلة، نوجد تعبيرًا للثابت q_{max}:

$$q_{max} = CV_{emf}$$

إذًا، حل المعادلة التفاضلية لشحن المكثِف (المعادلة 6.3) هو

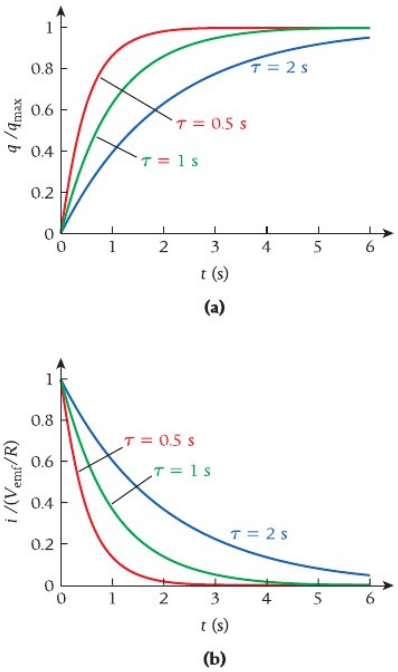
$$q(t) = CV_{emf}\left(1 - e^{-t/RC}\right) \quad (6.5)$$

لاحظ أنه عندما يكون $t = 0$، يكون $q = 0$. وهذه هي الحالة الابتدائية قبل توصيل مكوّنات الدائرة. عندما يكون $t = \infty$، يكون $q = q_{max} = CV_{emf}$. وهذه هي حالة الوضع الثابت التي يكون فيها المكثِف مشحونًا بالكامل. وتغيرات الشحنة والزمن يوضحها الشكل 6.21a لثلاث قيم مختلفة للثابت الزمني τ.

يتم الحصول على التيار المتدفق في الدائرة عن طريق إجراء تفاضل للمعادلة 6.5 بالنسبة إلى الزمن:

$$i = \frac{dq}{dt} = \left[\frac{V_{emf}}{R}\right]e^{-t/RC} \quad (6.6)$$

من المعادلة 6.6، عندما يكون $t = 0$، نجد أن التيار في الدائرة هو V_{emf}/R، وعندما يكون $t = \infty$، يساوي التيار صفرًا، كما هو موضح في الشكل 6.21b.



الشكل 6.21 شحن مكثِف: (a) شحنة المكثِف بوصفها دالة للزمن؛ (b) التيار المتدفق في المقاوم بوصفه دالة للزمن.

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

تفريغ شحنة مكثِف

لنفكر الآن في دائرة تحتوي فقط على مقاوم، R، ومكثف مشحون بالكامل، C. تم الحصول عليه بتحريك المفتاح الموضح في الشكل 6.22 من الوضع 1 إلى الوضع 2. شحنة المكثف قبل تحريك المفتاح هي q_{max}. في هذه الحالة، سيتدفق تيار في الدائرة حتى تفرغ شحنة المكثف تمامًا. بينما تفرغ شحنة المكثف، يمكننا تطبيق قانون كيرشوف للجهد على الحلقة في اتجاه عقارب الساعة ونحصل على

$$-i(t)R - V_C = -i(t)R - \frac{q(t)}{C} = 0$$

يمكننا إعادة كتابة هذه المعادلة باستخدام تعريف التيار:

$$\frac{R\,dq(t)}{dt} + \frac{q(t)}{C} = 0 \tag{6.7}$$

يتم الحصول على حل المعادلة 6.7 باستخدام الطريقة نفسها المتبعة في المعادلة 6.3. باستثناء أنّ المعادلة 6.7 لا تحتوي على حد ثابت و $q(0) > 0$. لذا، نجرب حلًا بالصيغة $q(t) = q_{max}e^{-t/\tau}$ التي تؤدي إلى

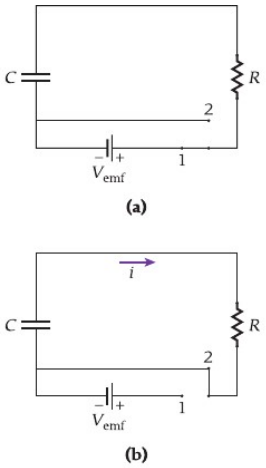
$$q(t) = q_{max}e^{-t/RC} \tag{6.8}$$

عندما يكون $t = 0$، تكون شحنة المكثف q_{max}. عندما يكون $t = \infty$، تصبح شحنة المكثف صفرًا. يمكننا الحصول على التيار عن طريق إجراء تفاضل للمعادلة 6.8 كدالة للزمن:

$$i(t) = \frac{dq}{dt} = -\left[\frac{q_{max}}{RC}\right]e^{-t/RC} \tag{6.9}$$

عندما يكون $t = 0$، يكون التيار في الدائرة هو $-q_{max}/RC$. عندما يكون $t = \infty$، يساوي التيار في الدائرة صفرًا. الرسوم البيانية لتغيرات شحنة المكثف والزمن لمرور التيار عبر المقاوم لعملية تفريغ الشحنة سيؤدي إلى منحنيات متناقصة بشكل أسي ومشابهة للمنحنيات الواردة في الشكل 6.21b.

جميع المعادلات التي توضح تغيرات الشحنة مع الزمن لمكثف أثناء عملية شحنه وعملية تفريغه العامل الأسي $e^{-t/RC}$. مرة أخرى، يعرّف ناتج ضرب المقاومة والسعة بأنه الثابت الزمني لدائرة RC: $\tau = RC$. وفقًا للمعادلة 6.5، بعد مقدار من الزمن مساوٍ للثابت الزمني، سيكون شحن المكثف قد وصل إلى 63% من أقصى قيمة شحن له. لذا، يمكن وصف خصائص دائرة RC بتحديد الثابت الزمني. يعني الثابت الزمني الكبير أن المكثف يستغرق وقتًا طويلًا للشحن، ويعني الثابت الزمني الصغير أن المكثف يستغرق وقتًا قصيرًا للشحن.



الشكل 6.22 دائرة RC تحتوي على مصدر للقوة الدافعة الكهربائية، ومقاوم، ومكثِف، ومفتاح. المكثِف (a) يُشحن عندما يكون المفتاح في الوضع 1. و(b) يفرغ من الشحن عندما يكون المفتاح في الوضع 2.

مراجعة المفاهيم 6.5

ما قيم المقاومة والسعة اللازمتين لتفريغ شحن مكثف في دائرة RC بسرعة كبيرة؟

a) يجب أن تكون كلتاهما أكبر ما يمكن.

b) يجب أن تكون المقاومة أكبر ما يمكن، والسعة أقل ما يمكن.

c يجب أن تكون المقاومة أقل ما يمكن، والسعة أكبر ما يمكن.

d) يجب أن تكون كلتاهما أقل ما يمكن.

مثال 6.3 الزمن اللازم لشحن مكثِف

فكر في دائرة تتكون من بطارية جهدها 12.0 V، ومقاوم 50.0 Ω، ومكثف سعته 100.0 μF موصلين على التوالي. المكثف غير مشحون تمامًا في البداية.

المسألة

كم من الزمن سيستغرق شحن المكثف حتى يصل إلى 90% من أقصى شحنة له بعد غلق الدائرة؟

الحل

شحنة المكثف بوصفه كدالة للزمن وفق المعادلة

$$q(t) = q_{max}\left(1 - e^{-t/RC}\right)$$

حيث q_{max} هي أقصى شحنة للمكثف. نريد أن نعرف الزمن حتى $q(t)/q_{max} = 0.90$، ويمكن الحصول عليه من

$$\left(1 - e^{-t/RC}\right) = \frac{q(t)}{q_{max}} = 0.90$$

أو

$$0.10 = e^{-t/RC} \tag{i}$$

يُتبع

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

بأخذ اللوغاريتم الطبيعي لكلا طرفَي المعادلة (i)، نحصل على

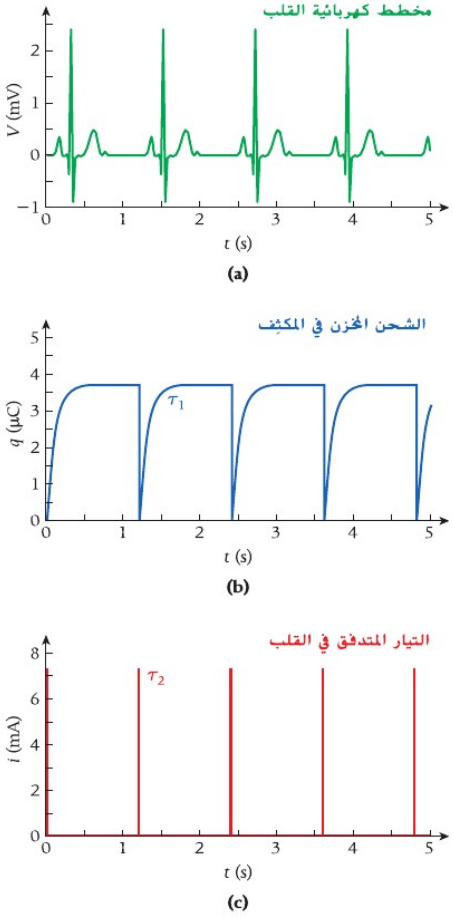
$$\ln 0.10 = -\frac{t}{RC}$$

أو

$$t = -RC\ln 0.10 = -(50.0\ \Omega)\left(100\times10^{-6}\ \text{F}\right)(-2.30) = 0.0115\ \text{s} = 11.5\ \text{ms}$$

سؤال الاختبار الذاتي 6.3

مكثف مشحون بالكامل سعته 1.00 mF. وموصل بين طرفيه مقاوم يبلغ 100.0 Ω. كم من الزمن سيستغرق تفريغ 99.0% من الشحن المخزن في المكثف؟



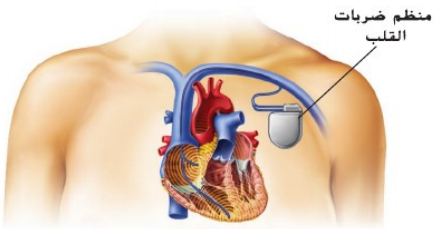
الشكل 6.23 (a) مخطط كهربائية قلب يوضح أربع ضربات قلب منتظمة. (b) الشحن المخزن في مكثف منظم ضربات القلب بوصفه دالة للزمن. (c) التيار المتدفق في القلب نتيجة تفريغ شحنة مكثف المنظم.

منظم ضربات القلب

ينبض قلب الإنسان الطبيعي على فترات منتظمة، مرسلًا الدم إلى الجسم. ينظم معدل ضربات القلب عن طريق إشاراته الكهربائية. يمكن قياس هذه الإشارات الكهربائية عبر الجلد باستخدام جهاز تخطيط القلب الكهربائي. يُنتج هذا الجهاز رسمًا بيانيًا لفرق الجهد مقابل الزمن، وهو ما يسمى *بمخطط كهربائية القلب* أو *ECG* (يُسمى أحيانًا *EKG* المأخوذة من الكلمة الألمانية *Elektrokardiograph*).

يوضح الشكل 6.23a كيف سيمثل مخطط كهربائية القلب أربع ضربات قلب منتظمة تحدث بمعدل 72 ضربة في الدقيقة. يمكن للأطباء والعاملين في المجال الطبي استخدام مخطط كهربائية القلب لتشخيص صحة القلب.

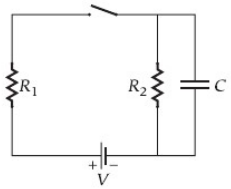
في بعض الأحيان لا ينبض القلب بانتظام ويحتاج إلى مساعدة للحفاظ على الانتظام المناسب. يمكن للمنظم أن يقدم هذه المساعدة، وهو عبارة عن دائرة كهربائية تُرسل نبضات كهربائية إلى القلب على فترات منتظمة، لتحل محل الإشارات الكهربائية المعتادة للقلب وتحفز القلب على النبض على فترات محددة. يُزرع المنظم في المريض ويُوصل مباشرة بالقلب، كما هو موضح في الشكل 6.24.



الشكل 6.24 منظم ضربات قلب حديث مزروع في مريض. يرسل المنظم نبضات كهربائية في حجرتين من حجرات القلب للمساعدة على الحفاظ على ضربات القلب منتظمة.

مراجعة المفاهيم 6.6

في الدائرة الموضحة في الشكل، المكثف، C، غير مشحون في البداية. لحظة غلق المفتاح،



a) يساوي التيار المتدفق عبر المقاوم R_1 صفرًا.

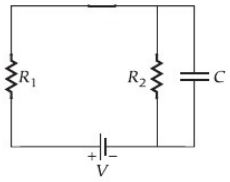
b) يكون التيار المتدفق عبر المقاوم R_1 أكبر من المتدفق عبر المقاوم R_2.

c) يكون التيار المتدفق عبر المقاوم R_2 أكبر من المتدفق عبر المقاوم R_1.

d) يكون التيار المتدفق عبر المقاوم R_1 مساويًا للتيار المتدفق عبر المقاوم R_2.

مراجعة المفاهيم 6.7

في الدائرة الموضحة في الشكل، المفتاح مغلق. بعد فترة زمنية طويلة،



a) يساوي التيار المتدفق عبر المقاوم R_1 صفرًا.

b) يكون التيار المتدفق عبر المقاوم R_1 أكبر من المتدفق عبر المقاوم R_2.

c) يكون التيار المتدفق عبر المقاوم R_2 أكبر من المتدفق عبر المقاوم R_1.

d) يكون التيار المتدفق عبر المقاوم R_1 مساويًا للتيار المتدفق عبر المقاوم R_2.

McGraw-Hill Education محفوظة لصالح مؤسسة © حقوق الطبع والتأليف

مثال 6.4 عناصر دائرة منظم ضربات القلب

دعنا نحلل الدائرة الموضحة في الشكل 6.25، والتي تحاكي وظيفة منظم ضربات القلب. تعمل دائرة المنظم عن طريق شحن مكثف، C، وأحيانًا عن طريق استخدام بطارية جهدها V_{emf} ومقاوم يبلغ R_1، كما هو موضح في الشكل 6.25a، حيث يتم فتح المفتاح. ويؤدي غلق المفتاح كما في الشكل 6.25b إلى حدوث قصر في المكثف عبر القلب، ويتم تفريغ شحن المكثف عبر القلب في وقت قصير لتحفيز القلب لينبض. لذا، تعمل هذه الدائرة كمنظم عن طريق فتح المفتاح طوال فترة ما بين ضربات القلب، ثم غلقه لوقت قصير لتحفيز ضربات القلب، ثم فتحه ثانية.

المسألة

ما قيمة كل من السعة، C، والمقاومة، R_1، التي يجب استخدامهما في منظم ضربات القلب؟

الحل

نفترض أن القلب يعمل كمقاوم $R_2 = 500\ \Omega$ وأن مصدر القوة الدافعة الكهربائية هو بطارية ليثيوم أيون. تتميز هذه البطارية بكثافة طاقة عالية جدًا وبجهد مقداره 3.7 V. ويتراوح معدل ضربات القلب الطبيعي بين 60 و100 ضربة في الدقيقة. ولكن، قد يحتاج منظم ضربات القلب إلى تحفيز القلب لينبض بشكل أسرع. لذا يجب أن تكون لديه القدرة على النبض 180 ضربة في الدقيقة، مما يعني أنه قد يتم شحن المكثف 180 مرة في الدقيقة. ومن ثَمَّ فإن الحد الأدنى للوقت بين عمليات تفريغ الشحنة، t_{min}، هو

$$t_{min} = \frac{1}{180\ \text{beats/min}} = \left(\frac{1\ \text{min}}{180}\right)\left(\frac{60\ \text{s}}{1\ \text{min}}\right) = 0.333\ \text{s}$$

توضح المعادلة 6.5 الشحنة، q، بوصفها دالة للزمن، t. لبيان الحد الأقصى للشحنة، q_{max}، في ثابت زمني محدد، $\tau_1 = R_1C$:

$$q = q_{max}\left(1 - e^{-t/\tau_1}\right)$$

بإعادة ترتيب هذه المعادلة، نحصل على

$$\frac{q}{q_{max}} = f = 1 - e^{-t/\tau_1}$$

حيث f هي جزء من سعة شحن المكثف. لنفترض أنه يجب شحن المكثف بنسبة 95% من الحد الأقصى للشحنة في الثابت الزمني t_{min}. بإيجاد قيمة الثابت الزمني، نحصل على

$$\tau_1 = R_1C = -\frac{t_{min}}{\ln(1-f)} = -\frac{0.333\ \text{s}}{\ln(1-0.95)} = 0.111\ \text{s}$$

لذا، يجب أن يكون الثابت الزمني للشحن $\tau_1 = R_1C = 100$ ms. يجب أن يكون الثابت الزمني لتفريغ الشحن، τ_2، صغيرًا لتوليد نبضات قصيرة ذات تيار عالٍ لتحفيز القلب. بافتراض أن $\tau_2 = 0.500$ ms، وهي قيمة تقريبية للنبضات الكهربائية القصيرة في مخطط كهربائية القلب، نحصل على

$$\tau_2 = R_2C = 0.500\ \text{ms}$$

يمكننا إيجاد قيمة السعة المطلوبة والتعويض بالقيمة R_2 عن $500\ \Omega$:

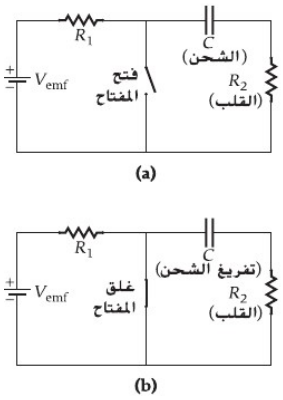
$$C = \frac{0.000500\ \text{s}}{500\ \Omega} = 1.00\ \mu\text{F}$$

يمكن الآن الربط بين المقاومة المطلوبة لشحن دائرة والثابت الزمني للشحن وقيمة السعة التي حسبناها للتو:

$$\tau_1 = R_1C = 0.100\ \text{s} = R_1(1.00\ \mu\text{F}),$$

ويعطينا هذا

$$R_1 = \frac{0.100\ \text{s}}{1.00 \times 10^{-6}\ \text{F}} = 100\ \text{k}\Omega$$



الشكل 6.25 (a) دائرة منظم ضربات القلب مبسطة في وضع الشحن. (b) دائرة المنظم في وضع تفريغ الشحن.

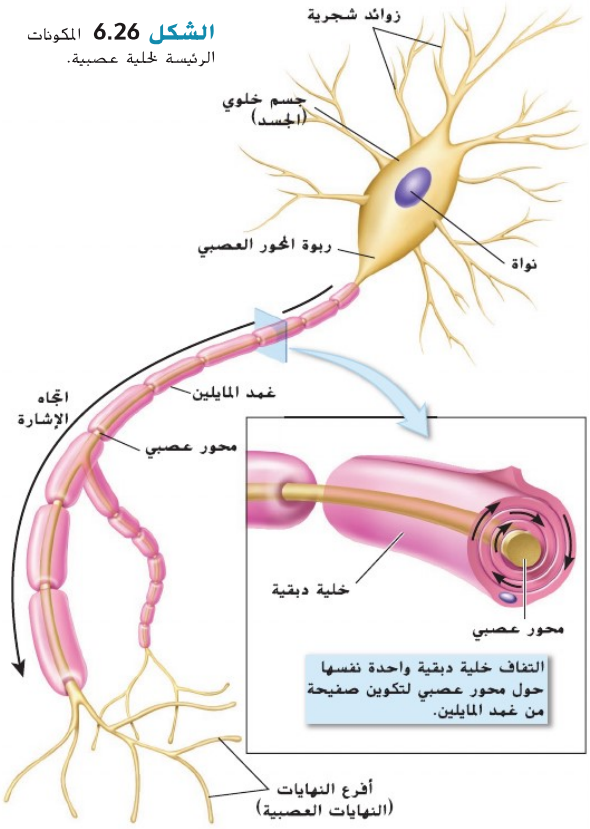
يوضح الشكل 6.23b الشحن في مكثف منظم ضربات القلب الذي يحاكي معدل ضربات قلب ينبض 72 ضربة في الدقيقة، بوصفه دالة للزمن. يمكنك أن تلاحظ أن المكثف يشحن بسعته الكاملة تقريبًا قبل تفريغ شحنه. يوضح الشكل 6.23c التيار الذي يتدفق عبر القلب عند تفريغ شحن المكثف. نبض التيار يكون قصيرًا، ويدوم لفترة أقل من ملّي ثانية. يحفز هذا النبض القلب على العمل، كما يوضحه مخطط كهربائية القلب في الشكل 6.23a. إن معدل فتح مفتاح منظم ضربات القلب وغلقه يتحكم في معدل نبض ضربات القلب، ويُتحكم في مفتاح المنظم بواسطة معالج دقيق.

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

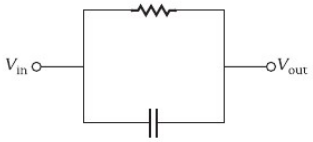
الخلية العصبية

نوع من الخلايا المسؤول عن إرسال إشارات ومعالجتها في الجهاز العصبي والدماغ في الإنسان والحيوانات الأخرى يظهر (الشكل 6.26)تركيب الخلية العصبية. توصل الخلية العصبية التيارات اللازمة بوسائل كهروكيميائية، عن طريق حركة الأيونات (بشكل أساسي Na^+ وK^+ وCl^-). تستقبل الخلايا العصبية إشارات من خلايا عصبية أخرى عبر زوائد شجرية وترسل إشارات إلى خلايا عصبية أخرى عبر محور عصبي. يمكن أن يكون المحور العصبي طويلاً إلى حد ما (على سبيل المثال، في الحبل الشوكي) ومغطى بطبقة عازلة كهربائيًا هي غمد المايلين. تُستقبل الإشارات من خلايا عصبية أخرى أو خلايا في أعضاء الحواس والأنسجة الأخرى وتُرسل إليها. يمكن معرفة كل هذا، وأكثر من ذلك بكثير، في مقرر تمهيدي عن علم الأحياء أو علم وظائف الأعضاء. سنلقي نظرة هنا على خلية عصبية بوصفها دائرة أساسية تعالج الإشارات.

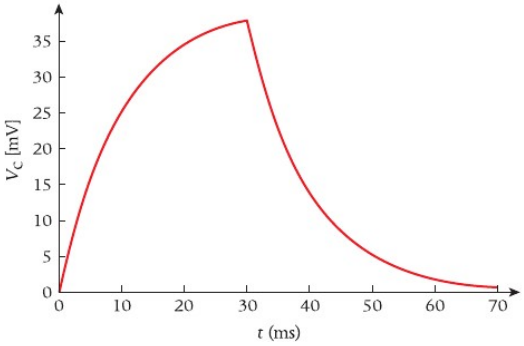
يجب أن تكون الاستثارة الكهربائية للخلية قوية بما يكفي لاستجابة الخلية العصبية، بمعنى أن تُرسل إشارة من الزوائد الشجرية إلى أسفل المحور العصبي. إنه تقريب بسيط لكنه معقول لتمثيل الجسم الخلوي الرئيس لخلية عصبية، ، بوصفها دائرة RC أساسية تعالج هذه الإشارات. يوضح الشكل 6.27 رسمًا تخطيطيًا لدائرة RC هذه. يُوصل مكثف ومقاوم على التوازي بجهد دخل وجهد خرج. تكون قيم الجهد النموذجية للخلايا العصبية هي ± 50 mV تقريبًا بالنسبة إلى خلفية النسيج المحيط. إذا كان $\Delta V = V_{in} - V_{out} \neq 0$، فإن تيارًا يتدفق عبر الدائرة. يتدفق جزء من التيار هذا عبر المقاوم، ويشحن جزء منه المكثف في الوقت نفسه حتى يصل إلى فرق الجهد بين جهدَي الدخل والخرج. يزيد فرق الجهد بين لوحَي المكثف أسيًّا، وفقًا للمعادلة $V_C(t) = (V_{in} - V_{out})(1 - e^{-t/RC})$، تمامًا كعملية شحن مكثف في دائرة RC. (الثابت الزمني، $\tau = RC$. يساوي 10 ms تقريبًا. بافتراض أن السعة تساوي 1 nF والمقاومة تساوي 10 MΩ). إذا تمت إزالة المصدر الخارجي لفرق الجهد من الدائرة، فسيتفرغ المكثف وفقًا للثابت الزمني نفسه، ويتبدد الجهد عبر المكثف أسيًّا، وفقًا للمعادلة $V_C(t) = V_0 e^{-t/RC}$. كدالة بدلالة الزمن. تُلتقط الاستجابة الأساسية لخلية عصبية. يوضح الشكل 6.28 فرق الجهد عبر المكثف لنموذج الخلية العصبية هذه، في حين يُشحن المكثف لمدة 30 ms ثم يُفرغ شحنه.



الشكل 6.26 المكونات الرئيسة لخلية عصبية.



الشكل 6.27 نموذج مبسط لخلية عصبية في صورة دائرة RC.

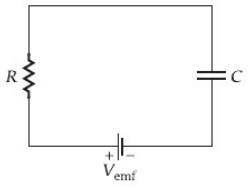


الشكل 6.28 فرق الجهد بين طرفي المكثف في نموذج خلية عصبية.

McGraw-Hill Education حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة

مسألة محلولة 6.4 معدل تخزين الطاقة في مكثِف

مقاوم $R = 2.50\ \text{M}\Omega$ ومكثِف $C = 1.25\ \mu\text{F}$ موصلان على التوالي ببطارية قوتها الدافعة الكهربائية $V_{\text{emf}} = 12.0\ \text{V}$. عند $t = 2.50\ \text{s}$ بعد إغلاق الدائرة، ما معدل تخزين الطاقة في المكثِف؟



الشكل 6.29 دائرة توالي تحتوي على بطارية، ومقاوم، ومكثِف.

فكِّر عندما تُغلق الدائرة، يبدأ المكثِف في الشحن. يُحدَّد معدل تخزين الطاقة في المكثِف كمشتقة بدلالة كمية الطاقة المخزنة في المكثِف، وهذه هي وظيفة الشحن في المكثِف.

ارسم الشكل 6.29 يوضح رسمًا تخطيطيًّا لدائرة موصلة على التوالي تحتوي على بطارية ومقاوم ومكثِف.

ابحث ة الشحنة على المكثِف، بوصفها دالة للزمن بواسطة المعادلة 6.5:

$$q(t) = CV_{\text{emf}}\left(1 - e^{-t/RC}\right)$$

تُوضح الطاقة المخزنة في مكثِف شحنته q

$$U = \frac{1}{2}\frac{q^2}{C} \quad \text{(i)}$$

إذًا مشتقة الطاقة المخزنة في مكثِف هي

$$\frac{dU}{dt} = \frac{d}{dt}\left[\frac{1}{2}\frac{q^2(t)}{C}\right] = \frac{q(t)}{C}\frac{dq(t)}{dt} \quad \text{(ii)}$$

الزمن المشتق من الشحن هو التيار، i. لذا، يمكننا أن نستبدل dq/dt بالتعبير الذي توضحه المعادلة 6.6:

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} = \left[\frac{V_{\text{emf}}}{R}\right]e^{-t/RC} \quad \text{(iii)}$$

حوّل إلى أبسط صورة يمكننا التعبير عن معدل تغير الطاقة المخزنة في المكثِف عن طريق جمع المعادلات من (i) إلى (iii):

$$\frac{dU}{dt} = \frac{q(t)}{C}i(t) = \frac{CV_{\text{emf}}\left(1 - e^{-t/RC}\right)}{C}\left[\frac{V_{\text{emf}}}{R}\right]e^{-t/RC} = \frac{V_{\text{emf}}^2}{R}e^{-t/RC}\left(1 - e^{-t/RC}\right)$$

احسب نحسب أولًا قيمة الثابت الزمني، $\tau = RC$:

$$RC = \left(2.50\times10^{6}\,\Omega\right)\left(1.25\times10^{-6}\ \text{F}\right) = 3.125\ \text{s}$$

يمكننا بعد ذلك حساب معدل تغير الطاقة المخزنة في المكثِف:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{(12.0\ \text{V})^2}{2.50\times10^{6}\,\Omega}e^{-(2.50\ \text{s})/(3.125\ \text{s})}\left(1 - e^{-(2.50\ \text{s})/(3.125\ \text{s})}\right) = 1.42521\times10^{-5}\ \text{W}$$

قرِّب نقرّب النتيجة التي توصلنا إليها إلى ثلاثة أرقام معنوية:

$$\frac{dU}{dt} = 1.43\times10^{-5}\ \text{W}$$

تحقَّق ثانية التيار عندما يكون $t = 2.50\ \text{s}$ هو

$$i(2.50\ \text{s}) = \left(\frac{12.0\ \text{V}}{2.50\ \text{M}\Omega}\right)e^{-(2.50\ \text{s})/(3.125\ \text{s})} = 2.16\times10^{-6}\ \text{A}.$$

معدل تبدد الطاقة في المقاوم في هذا الزمن هو

$$P = \frac{dU}{dt} = i^2R = \left(2.16\times10^{-6}\ \text{A}\right)^2\left(2.50\times10^{6}\,\Omega\right) = 1.16\times10^{-5}\ \text{W}$$

يُوضح المعدل الذي تنقل به البطارية الطاقة إلى الدائرة في هذا الزمن بواسطة

$$P = \frac{dU}{dt} = iV_{\text{emf}} = \left(2.16\times10^{-6}\ \text{A}\right)(12.0\ \text{V}) = 2.59\times10^{-5}\ \text{W}$$

ينص قانون حفظ الطاقة على أنه في أي زمن توفر البطارية الطاقة في الدائرة، تتبدد هذه الطاقة في صورة حرارة في المقاوم أو تُخزن في المكثِف. في هذه الحالة، تساوي الطاقة التي توفرها البطارية، $2.59\times10^{-5}\ \text{W}$، الطاقة المتبددة في صورة حرارة في المقاوم، $1.16\times10^{-5}\ \text{W}$، زائد معدل تخزين الطاقة في المكثِف، $1.43\times10^{-5}\ \text{W}$. لذا تُعد إجابتنا متسقة.

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

ما تعلمناه | دليل المذاكرة للاختبار

- فيما يلي قانونا كيرشوف لتحليل الدوائر الكهربائية:
  - قانون كيرشوف للتيار: يجب أن يكون مجموع التيارات الداخلة إلى وصلة مساويًا لمجموع التيارات الخارجة من الوصلة نفسها.
  - قانون كيرشوف للجهد: يجب أن يساوي مجموع فرق الجهد حول حلقة كاملة صفرًا.
- عند تطبيق قانون كيرشوف للجهد، تُحدَّد إشارة تغير الجهد لكل عنصر من عناصر الدائرة عن طريق اتجاه التيار واتجاه التحليل. والفروض هي
  - ينتج عن مصادر القوة الدافعة الكهربائية التي تكون في اتجاه التحليل نفسه كسبٌ في الجهد، في حين ينتج عن المصادر التي تكون في عكس اتجاه التحليل انخفاض في الجهد.
  - بالنسبة إلى المقاومات، يكون مقدار تغير الجهد هو $|iR|$. حيث i هو التيار المفترض وR هو المقاومة. وتعتمد إشارة تغير الجهد على الاتجاه (المعروف أو المفترض) للتيار فضلًا عن اتجاه التحليل. إذا كانت هذه الاتجاهات هي نفسها، فإن المقاوم ينتج انخفاضًا في الجهد. إذا كانت هذه الاتجاهات متعاكسة، فإن المقاوم ينتج ارتفاعًا في الجهد.
- تحتوي دائرة RC على مقاوم مقاومته R ومكثف سعته C. ويُحدَّد الثابت الزمني، τ، عن طريق $\tau = RC$.
- في دائرة RC، تكون الشحنة، q، كدالة للزمن لشحن مكثف سعته C بواسطة المعادلة $q(t) = CV_{emf}\,(1 - e^{-t/RC})$، حيث V_{emf} هي الجهد الذي يمده مصدر القوة الدافعة الكهربائية وR هو مقاومة المقاوم.
- في دائرة RC، تكون، q، كدالة للزمن خلال عملية تفريغ شحن مكثف سعته C بواسطة المعادلة $q(t) = q_{max}e^{-t/RC}$، حيث q_{max} هو مقدار الشحنة على أي من لوحَي المكثف عندما يكون $t = 0$ ، وR هو مقاومة المقاوم.

إجابات أسئلة الاختبار الذاتي

6.1 يُوصَّل المقاومان R_1 وR_u على التوالي ولديهما مقاومة مكافئة مقدارها $R_{1u} = R_1 + R_u$. يُوصَّل المقاومان R_3 وR_v على التوالي ولديهما مقاومة مكافئة مقدارها $R_{3v} = R_3 + R_v$. يُوصَّل المقاومان المكافئان R_{1u} وR_{3v} على التوازي. لذا يمكننا كتابة الصيغة التالية

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_{1u}} + \frac{1}{R_{3v}}$$

أو

$$R_{eq} = \frac{R_{1u}R_{3v}}{R_{1u} + R_{3v}} = \frac{(R_1 + R_u)(R_3 + R_v)}{R_1 + R_u + R_3 + R_v}$$

6.2 عندما تكون المصابيح الأمامية مضيئة، تمد البطارية المصابيح بكمية صغيرة جدًا من التيار، ويكون انخفاض الجهد عبر المقاومة الداخلية للبطارية صغيرًا. يُوصل محرك بادئ التشغيل بالمصابيح على التوازي. عند تعشيق محرك بادئ التشغيل، فإنه يسحب تيارًا كبيرًا، مما ينتج انخفاضًا ملحوظًا في الجهد عبر المقاومة الداخلية للبطارية، ويتسبب في تدفق تيار أقل إلى المصابيح الأمامية.

6.3

$$q = q_{max}e^{-t/RC}$$

$$\frac{q}{q_{max}} = 0.01 = e^{-t/RC} \Rightarrow \ln 0.01 = -\frac{t}{RC}$$

$$t = -RC \ln 0.01 = -(100\ \Omega)\left(1.00\times10^{-3}\ \text{F}\right)(\ln 0.01) = 0.461\ \text{s}$$

إرشادات حل المسائل

1. من المفيد دائمًا تسمية كل شيء في رسم تخطيطي لدائرة، بما في ذلك كل المعلومات المعطاة وكل القيم المجهولة، فضلًا عن التيارات، والفروع، والوصلات ذات الصلة. أعد إنشاء الرسم التخطيطي على مقياس رسم أكبر إذا كنت بحاجة إلى مساحة أكبر للوضوح.

2. تذكر أن الاتجاهات التي تختارها للدوائر وللمسار حول حلقة دائرة تكون عشوائية. إذا أصبح اختيارك خطأ، فستنتج عن ذلك قيمة سالبة للتيار.

3. راجع إشارات تغيرات الجهد المحددة في الجدول 6.1. إن التحرك في حلقة دائرة في الاتجاه نفسه الذي يسري فيه التيار المفترض يعني أن جهاز مصدر القوة الدافعة الكهربائية يُنتج تغير جهد إيجابي في الاتجاه الذي يبدأ من الطرف السالب إلى الموجب داخل الجهاز. ويعني أن قيمة تغير الجهد عبر طرفَي مقاوم تكون سالبة. تُعد أخطاء الإشارات شائعة، ومن المهم التقيد بالفروض لتجنب هذه الأخطاء.

4. يمكن لمصادر القوة الدافعة الكهربائية أو المقاومات أن تكون أجزاء من حلقتين منفصلتين. يمكنك النظر إلى كل عنصر دائرة بوصفه جزءًا من كل حلقة يوجد فيها. وذلك وفقًا لاصطلاحات الإشارات التي اعتمدتها لهذه الحلقة. يمكن لمقاوم أن يولد انخفاض جهد في حلقة وكسب جهد في حلقة أخرى.

5. من الممكن دائمًا استخدام قانونَي كيرشوف لكتابة معادلات أكثر مما تحتاج إليه لإيجاد قيمة التيارات المجهولة في أفرع دائرة. اكتب أكبر عدد ممكن من المعادلات للوصلات، ثم قم بزيادتها باستخدام المعادلات التي تمثل الحلقات. لكن ليست كل الحلقات التي تم تكوينها متساوية، لذا يجب أن تحددها بعناية. كقاعدة عامة، اختر الحلقات التي بها عناصر أقل في الدائرة.

McGraw-Hill Education حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة

أسئلة الاختيار من متعدد

6.1 مقاوم ومكثف موصلان على التوالي. إذا وُصل مكثف ثانٍ مماثل على التوالي في الدائرة نفسها، فإن الثابت الزمني للدائرة

a) سيقل. b) سيزيد. c) سيظل كما هو.

6.2 مقاوم ومكثف موصلان على التوالي. إذا وُصل مقاوم ثانٍ مماثل على التوالي في الدّارة نفسها، فإن الثابت الزمني للدائرة

a) سيقل. b) سيزيد. c) سيظل كما هو.

6.3 دائرة تتكون من مصدر للقوة الدافعة الكهربائية، ومقاوم، ومكثف، وجميعها موصل على التوالي. المكثف مشحون بالكامل. ما مقدار التيار المتدفق عبره؟

a) $i = V/R$ b) صفر c) لا (a) ولا (b)

6.4 أي مما يلي سيقلل الثابت الزمني في دائرة RC؟

a) زيادة ثابت العزل الكهربائي للمكثف

b) إضافة سلك إضافي طوله 20 m بين المكثف والمقاوم

c) زيادة جهد البطارية

d) إضافة مقاوم إضافي موصل على التوازي مع المقاوم الأول

e) لا شيء مما سبق

6.5 ينص قانون كيرشوف للتيار على أن

a) المجموع الجبري للتيارات عند أي وصلة في دائرة يجب أن يساوي صفرًا.

b) المجموع الجبري لتغيرات الجهد حول أي حلقة مغلقة في دائرة يجب أن يساوي صفرًا.

c) التيار في دائرة مزودة بمقاوم ومكثف يتغير أسيًّا مع الزمن.

d) التيار عند وصلة معينة يُحدَّد عن طريق ناتج ضرب المقاومة والسعة.

e) الزمن الخاص بزيادة التيار عند وصلة معينة يُحدَّد عن طريق ناتج ضرب المقاومة والسعة.

6.6 ما الفترة الزمنية التي يستغرقها المكثف في دائرة RC، كمضاعف للثابت الزمني، τ، ليصل إلى نسبة شحن قدرها 98%؟

a) 9τ c) 90τ e) 0.98τ

b) 0.9τ d) 4τ

6.7 مكثف C غير مشحون في البداية. عندما يكون $t = 0$، يكون المكثف متصلًا بالبطارية من خلال مقاوم R. تزداد الطاقة المخزّنة في المكثف، لتصل في النهاية إلى قيمة U، حيث $t \to \infty$. بعد وقت مساوٍ للثابت الزمني $\tau = RC$، تُحدَّد الطاقة المخزّنة في المكثف عن طريق

a) U/e. c) $U(1 - 1/e)^2$.

b) U/e^2. d) $U(1 - 1/e)$.

6.8 أي مما يلي يحتوي على وحدة القوة الدافعة الكهربائية نفسها؟

a) التيار

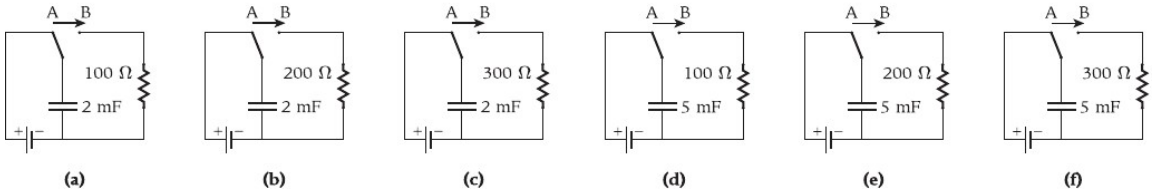
b) الجهد الكهربائي

c) المجال الكهربائي

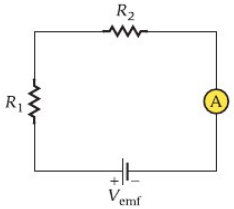
d) الطاقة الكهربائية

e) لا شيء مما سبق

6.9 يُشحن المكثف الموجود في كل دائرة في الشكل أولًا ببطارية جهدها 10 V من دون مقاومة داخلية. ثم يُدار المفتاح من الوضع A إلى الوضع B، ويُفرغ شحن المكثف عن طريق مقاومات متنوعة. ما الدائرة التي يبدد المقاوم إجمالي طاقتها بشكل أكبر؟

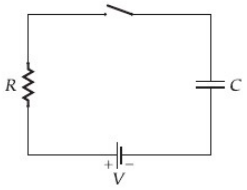


6.10 مقاومان، $R_1 = 3.00\ \Omega$ و$R_2 = 5.00\ \Omega$، موصلان على التوالي ببطارية وأميتر، كما هو موضح في الشكل. توفر البطارية $V_{emf} = 8.00$ V. وتبلغ مقاومة الأميتر $R_A = 1.00\ \Omega$. ما قيمة التيار الذي يقيسه الأميتر؟



a) 0.500 A
b) 0.750 A
c) 0.889 A
d) 1.00 A
e) 1.50 A

6.11 مكثف غير مشحون سعته ($C = 14.9\ \mu F$). ومقاوم يبلغ ($R = 24.3\ k\Omega$). وبطارية جهدها ($V = 25.7$ V) متصلين معًا على التوالي كما هو موضح في الشكل. ما مقدار شحن المكثف عندما يكون $t = 0.3621$ s بعد غلق المفتاح؟



a) 5.48×10^{-5} C
b) 7.94×10^{-5} C
c) 1.15×10^{-5} C
d) 1.66×10^{-4} C
e) 2.42×10^{-4} C

6.12 ينص قانون كيرشوف للجهد على أن

a) المجموع الجبري للتيارات حول حلقة دائرة كاملة يجب أن يساوي صفرًا.

b) مجموع المقاومات حول حلقة دائرة كاملة يجب أن يساوي صفرًا.

c) مجموع مصادر القوة الدافعة الكهربائية حول حلقة دائرة كاملة يجب أن يساوي صفرًا.

d) مجموع فروق الجهد حول حلقة دائرة كاملة يجب أن يكون أكبر من صفر.

e) مجموع فروق الجهد حول حلقة دائرة كاملة يجب أن يساوي صفرًا.

6.13 أي من العبارات التالية صحيحة؟

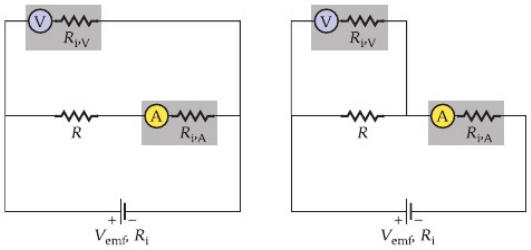
1. يجب أن تكون مقاومة الأميتر المثالي لانهائية.
2. يجب أن تكون مقاومة الأميتر المثالي صفرًا.
3. يجب أن تكون مقاومة الفولتميتر المثالي لانهائية.
4. يجب أن تكون مقاومة الفولتميتر المثالي صفرًا.

a) 1 و3
b) 2 و4
c) 2 و3
d) 1 و4

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

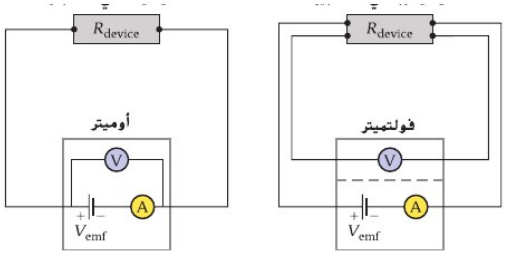
أسئلة مفاهيمية

6.14 تريد قياس فرق الجهد بين طرفَي مقاوم والتيار المار به في آن واحد، R. كما يوضح الرسمان التخطيطيان للدائرة. ثمة طريقتان لتوصيل الجهازين — الأميتر والفولتميتر — في الدائرة. علِّق على نتيجة القياس باستخدام كل تكوين.



6.15 إذا استُبدل المكثف في دائرة RC بمكثِّفَين مماثلَين موصلَين على التوالي، فماذا سيحدث للثابت الزمني للدائرة؟

6.16 تريد أن تقيس بدقة مقاومة، R_{device}، جهاز جديد. يوضح الشكل طريقتين للقيام بهذا الأمر. على اليسار، يولد أوميتر تيارًا يمر في الجهاز ويقيس ذلك التيار، i، ويقيس فرق الجهد، ΔV، عبر الجهاز. يضم فرق الجهد هذا انخفاض الجهد عبر الأسلاك الموصلة من الجهاز وإليه، وعبر نقاط التوصيل التي توصل الأسلاك بالجهاز. لا يمكن إهمال هذه المقاومات الإضافية دائمًا، خاصة إذا كانت مقاومة الجهاز منخفضة. تُسمى هذه الطريقة *قياس ثنائي المسبار*؛ حيث تكون أسلاك المسبارين متصلة بالجهاز. يُقاس التيار الناتج، i، بأميتر. يُحدَّد إجمالي المقاومة حينئذٍ عن طريق قسمة ΔV على i. وفقًا لهذا التكوين، ما المقاومة التي يقيسها الأوميتر؟ في التكوين البديل، الموضح على اليمين، يُستخدم مصدر تيار مماثل لتوليد التيار المار في الجهاز وقياسه. ولكن يقاس فرق الجهد، ΔV، مباشرة عبر الجهاز بجهاز فولتميتر مثالي تقريبًا وذي مقاومة داخلية كبيرة للغاية. تُسمى هذه الطريقة *قياس رباعي المسابير*؛ حيث تكون أسلاك المسابير الأربعة متصلة بالجهاز. ما المقاومة التي تُقاس في هذا التكوين رباعي المسابير؟ هل هذه المقاومة مختلفة عن المقاومة التي يقيسها القياس ثنائي المسبار؟ لِمَ أو لِمَ لا؟



تلميح: يستخدم العلماء والمهندسون قياسات رباعية المسابير على نطاق واسع، وهي مفيدة بصفة خاصة لإجراء قياسات دقيقة لمقاومة المواد أو الأجهزة ذات المقاومة المنخفضة).

6.17 اشرح سبب زيادة الثابت الزمني لدائرة RC بها مقاوم R وبها مكثِّف C. (الإجابة "هذا ما ينص عليه القانون" ليست كافية).

6.18 وُصِلت بطارية، ومقاوم، ومكثِّف على التوالي في دائرة RC. ماذا يحدث للتيار المتدفق عبر مقاوم بعد فترة زمنية طويلة؟ اشرح مستخدمًا قانوني كيرشوف.

6.19 كيف يمكنك إضاءة مصباح قدرته 1.0 W وفرق الجهد بين طرفيه 1.5 V باستخدام بطارية سيارتك التي جهدها 12.0 V؟

6.20 دائرة متعددة الحلقات تحتوي على عدد من المقاومات والبطاريات. إذا تضاعفت قيمة القوة الدافعة الكهربائية لكل البطاريات، فماذا سيحدث للتيارات في كل مكونات الدائرة؟

6.21 أُغلقت دائرة متعددة الحلقات تحتوي على مقاومات، ومكثِّفات، وبطاريات عندما يكون $t = 0$، وكانت جميع المكثِّفات غير مشحونة في ذلك الوقت. يمكن تحليل التوزيع الابتدائي للتيارات وفروق الجهد في الدائرة بمعاملة المكثِّفات كما لو كانت أسلاكًا موصلة أو مفاتيح مغلقة. يمكن تحليل التوزيع النهائي للتيارات وفروق الجهد، والذي يحدث بعد مرور فترة زمنية طويلة، بمعاملة المكثِّفات كما لو كانت مقاطع مفتوحة أو مفاتيح مفتوحة. اشرح لماذا تنجح هذه الحيل.

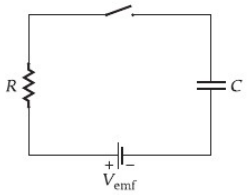
6.22 توصل أجهزة الفولتميتر دائمًا على التوازي بمكونات الدائرة، وتوصل أجهزة الأميتر على التوالي. اشرح لِمَ.

6.23 تريد قياس كل من مقدار التيار المار عبر بعض مكونات دائرة وفرق الجهد بين طرفَي هذه المكونات. ولا يمكن قياسهما في وقت واحد وبدقة باستخدام أجهزة الفولتميتر والأميتر العادية. اشرح لِمَ لا.

6.24 مصباحان ضوئيان يعملان بفرق جهد 110 V وقدرة 60 W و100 W على التوالي. أي منهما يحتوي على فتيلة مقاومتها أقل؟

6.25 شُحن مكثِّفان موصلان على التوالي عبر مقاوم. وشُحن مكثِّفان مماثلان لهما موصلان على التوالي عبر المقاوم نفسه. ما وجه المقارنة بين عدد المرات اللازمة لإتمام شحن مجموعتَي المكثِّفات؟

6.26 يوضح الشكل دائرة تتكون من بطارية موصلة بمقاوم ومكثِّف، فارغ تمامًا من الشحن في البداية، على التوالي وبها مفتاح.



a) ما قيمة التيار المار في الدائرة في أي زمن t؟

b) احسب إجمالي الطاقة التي تنتجها البطارية بدءًا من $t = 0$ وصولًا إلى $t = \infty$.

c) احسب إجمالي الطاقة التي يبددها المقاوم في الفترة الزمنية نفسها.

d) هل الطاقة محفوظة في هذه الدائرة؟

تمارين

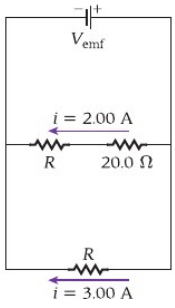
يشير رقم المسألة الأزرق إلى توفر حل في دليل حلول الطالب. وتشير علامة النقطة الواحدة • والنقطتين •• إلى زيادة مستوى صعوبة المسألة.

الأقسام من 6.1 إلى 6.3

6.27 مقاومان R_1 وR_2 موصلان على التوالي عبر فرق جهد ΔV_0. عبِّر عن انخفاض الجهد عبر كل مقاوم على حدة، بدلالة هذه الكميات. ما أهمية هذا الترتيب؟

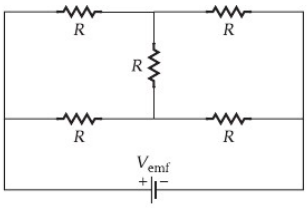
6.28 بطارية قوتها الدافعة الكهربائية $V_{\text{emf}} = 12.0\ \text{V}$ ومقاومتها الداخلية تساوي $r = 1.00\ \Omega$. ما المقاومة، R، اللازم تطبيقها بين طرفَي البطارية لتوليد قدرة مقدارها 10.0 W؟

6.29 ثلاثة مقاومات موصلة عبر طرفَي بطارية كما هو موضح في الشكل. ما قيمتا R وV_{emf} اللتان ستولدان التيارات المشار إليها؟



McGraw-Hill Education حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة

6.30 أوجد المقاومة المكافئة للدائرة الموضحة في الشكل.

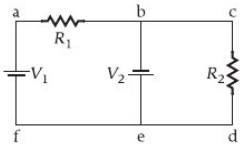


6.31 تولد البطارية الفارغة لسيارتك فرق جهد مقداره 9.950 V وتبلغ مقاومتها الداخلية 1.100 Ω. قمت بشحنها عن طريق توصيلها ببطارية سيارة أخرى مشحونة باستخدام كابلات تشغيل من مصدر خارجي. تولد البطارية المشحونة فرق جهد مقداره 12.00 V وتبلغ مقاومتها الداخلية 0.01000 Ω وتبلغ مقاومة بادئ التشغيل 0.07000 Ω.

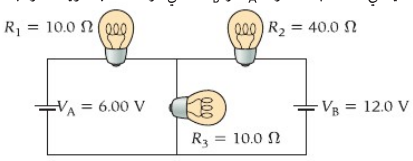
a) ارسم رسمًا تخطيطيًا للدائرة الموصلة بها بطاريتان.

b) حدد مقدار التيار في البطارية المشحونة والبطارية الفارغة وبادئ التشغيل بعد غلق الدائرة مباشرة.

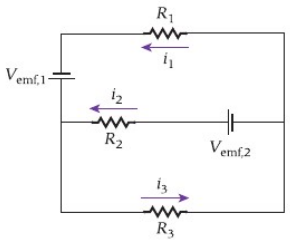
6.32 في الدائرة الموضحة في الشكل، $V_1 = 1.50$ V، و$V_2 = 2.50$ V، و$R_1 = 4.00$ Ω، و$R_2 = 5.00$ Ω. ما مقدار التيار، i_1، المتدفق عبر المقاوم R_1؟



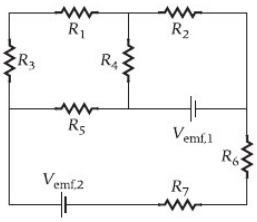
6.33 الدائرة الموضحة في الشكل تتكون من بطاريتين جهدهما V_A، وV_B، وثلاثة مصابيح ضوئية مقاومتها R_1، وR_2، وR_3. احسب مقدار التيارات i_1، وi_2، وi_3 المتدفقة عبر المصابيح الثلاثة. حدد الاتجاهات الصحيحة لتدفق التيار عبر الدائرة الموضحة في الرسم التخطيطي. احسب القدرة، P_A و P_B، التي تولدها البطارية A والبطارية B.



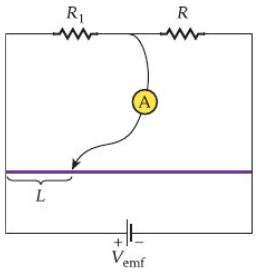
6.34 في الدائرة الموضحة في الشكل، $R_1 = 5.00\ \Omega$، و$R_2 = 10.0\ \Omega$، و$R_3 = 15.0\ \Omega$، و$V_{emf,1} = 10.0$ V، و$V_{emf,2} = 15.0$ V. باستخدام قانون كيرشوف للتيار وقانون كيرشوف للجهد، حدد مقدار التيارات i_1 وi_2 وi_3 المتدفقة عبر R_1 وR_2 وR_3 على التوالي في الاتجاه المشار إليه في الشكل.



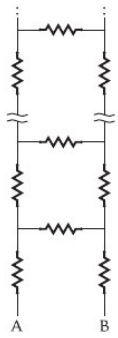
6.35 في الدائرة الموضحة في الشكل، أوجد مقدار التيار المتدفق عبر كل مقاوم واتجاهه، والقدرة التي تولدها كل بطارية، باستخدام القيم التالية:
$R_1 = 4.00\ \Omega$، و$R_2 = 6.00\ \Omega$، و$R_3 = 8.00\ \Omega$، و$R_4 = 6.00\ \Omega$، و$R_5 = 5.00\ \Omega$، و$R_6 = 10.0\ \Omega$، و$R_7 = 3.00\ \Omega$، و$V_{emf,1} = 6.00$ V، و$V_{emf,2} = 12.0$ V.



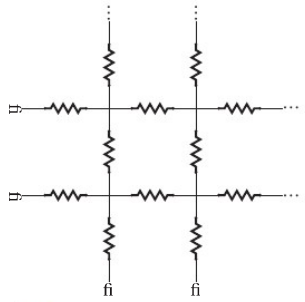
6.36 أُنشأت قنطرة ويتستون باستخدام سلك نيكروم طوله 1.00 m (الخط الأرجواني في الشكل) به نقطة توصيل يمكنها الانزلاق على طول السلك. وُضع مقاوم، $R_1 = 100.\ \Omega$، على أحد جانبي القنطرة، ومقاوم آخر، R، مجهول المقاومة على الجانب الآخر. حُركت نقطة التوصيل على طول سلك النيكروم، وكانت قراءة الأميتر صفرًا، حيث $L = 25.0$ cm. إذا عرفت أن السلك له قطاع عرضي منتظم على امتداد طوله، فحدد المقاومة المجهولة.



6.37 أُنشئ "سلم ذو مقاومة نوعية" باستخدام مقاومات متماثلة R تمثل أرجل السلم ودرجاته. كما هو موضح في الشكل. وكان طول السلم "لانهائي"، بمعنى أنه يمتد لمسافة طويلة جدًا في اتجاه واحد. أوجد المقاومة المكافئة للسلم، المقدّرة بين "قدميه" (النقطتان A وB) بدلالة R.

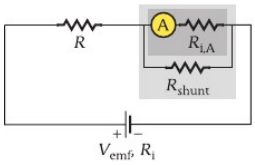


6.38 فكّر في شبكة مربعة ثنائية الأبعاد "لانهائية"، بمعنى أنها كبيرة جدًا، وتتكون من مقاومات متماثلة، R. كما هو موضح في الشكل. أوجد المقاومة المكافئة للشبكة، المقدّرة عبر أي مقاوم مفرد. (*تلميح:* التماثل والتراكب مفيدان جدًا في حل هذه المسألة).

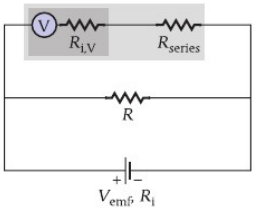


القسم 6.4

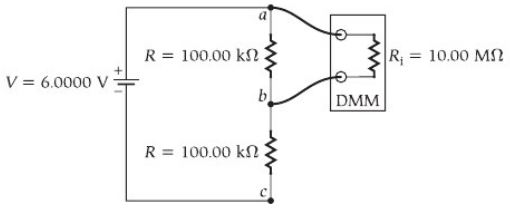
6.39 لتوسيع مدى عمل أميتر، وُصِّل مقاوم مجزئ التيار، R_{shunt}، على التوازي بالأميتر، كما هو موضح في الشكل. إذا كانت المقاومة الداخلية للأميتر هي $R_{i,A}$، فحدد مقاومة مقاوم مجزئ التيار اللازمة لتوسيع مدى عمل الأميتر بعامل مقداره N. ثم احسب مقاومة مقاوم مجزئ التيار اللازمة للسماح لأميتر مقاومته الداخلية 1.00 Ω وأقصى مدى يمكنه قياسه هو 1.00 A بقياس تيارات تصل إلى 100.A. ما الكسر الذي يمثل إجمالي التيار 100.A المتدفق عبر الأميتر، وما الكسر الذي يمثل التيار المتدفق عبر مقاوم مجزئ التيار؟



6.40 لتوسيع مدى عمل فولتميتر، وُصِّل مقاوم إضافي، R_{series}، على التوالي بالفولتميتر كما هو موضح في الشكل. إذا كانت المقاومة الداخلية للفولتميتر هي $R_{i,V}$، فحدد مقاومة المقاوم المضاف على التوالي اللازمة لتوسيع مدى عمل الفولتميتر بعامل مقداره N. ثم احسب مقاومة المقاوم المضاف على التوالي اللازمة للسماح لفولتميتر مقاومته الداخلية (10^6 Ω) 1.00 MΩ وأقصى مدى يمكنه قياسه هو 1.00 V بقياس فروق جهد تصل إلى 100. V. ما الكسر الذي يمثل إجمالي انخفاض الجهد 100.V بين طرفي الفولتميتر، وما الكسر الذي يمثل انخفاض الجهد بين طرفي المقاوم المضاف على التوالي؟



6.41 كما هو موضح في الشكل، بطارية جهدها 6.0000 V تستخدم لتوليد تيار عبر مقاومَين متماثلَين، R، تبلغ مقاومة كل منهما 100.00 kΩ. يُستخدم ملتيميتر رقمي (DMM) لقياس فرق الجهد بين طرفي المقاوم الأول. عادة ما يكون مقدار المقاومة الداخلية للملتيميتر الرقمي هو 10.00 MΩ. حدد فرق الجهد V_{ab}



حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

(فرق الجهد بين النقطتين a وb هو فرق الجهد الذي يقيسه الملتيميتر الرقمي) V_{bc} (فرق الجهد بين النقطتين b وc هو فرق الجهد بين طرفَي المقاوم الثاني). اسميًّا، يُعد $V_{ab} = V_{bc}$. ولكن قد لا يكون هذا صحيحًا في هذه الحالة. كيف يمكن تقليل خطأ القياس هذا؟

6.42 تريد أن تصنع أوميتر لقياس مقاومة المقاومات المجهولة. ولديك بطارية جهدها $V_{emf} = 9.00\ V$، ومقاوم متغير، R، وأميتر يقيس التيار على مقياس خطي من 0 إلى 10.0 mA.

a) ما مقدار المقاومة اللازمة للمقاوم المتغير بحيث يعطي الأميتر قراءة التدريجات بالكامل (أعلى قراءة) عند حدوث قصر في الأوميتر؟

b) باستخدام المقاومة الموضحة في الجزء (a)، ما مقدار المقاومة المجهولة إذا قرأ الأميتر $\frac{1}{4}$ تدريجاته؟

6.43 دائرة كهربائية تتكون من مقاومَين، تبلغ مقاومة كل منهما 1.00 kΩ. موصلَين على التوالي ببطارية مثالية جهدها 12.0 V.

a) احسب قيمة التيار المتدفق عبر كل مقاوم.

b) طالب يحاول قياس قيمة التيار المتدفق عبر أحد المقاومات، وقام بتوصيل أميتر من دون قصد بهذا المقاوم على التوازي بدلًا من توصيله به على التوالي. ما مقدار التيار الذي سيتدفق عبر الأميتر، بافتراض أن مقاومته الداخلية هي 1.00 Ω؟

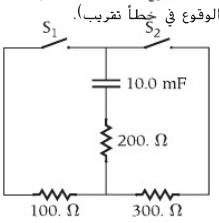
6.44 دائرة كهربائية تتكون من مقاومَين، مقاومة كل منهما تساوي 100. kΩ، موصلَين على التوالي ببطارية مثالية جهدها 12.0 V.

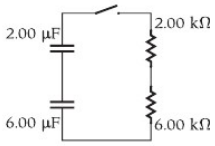
a) احسب انخفاض الجهد عبر طرفَي أحد المقاومين.

b) فولتميتر مقاومته الداخلية هي 10.0 MΩ موصل على التوازي بأحد المقاومَين لقياس انخفاض الجهد عبر طرفَي هذا المقاوم. ما النسبة المئوية التي ستحيد قراءة الفولتميتر عنها مقارنة بالقيمة التي حددتها في الجزء (a)؟ (*تلميح:* الاختلاف صغير نوعًا ما لذا من المفيد حل المسألة جبريًا أولًا لتجنب الوقوع في خطأ تقريب).

القسم 6.5

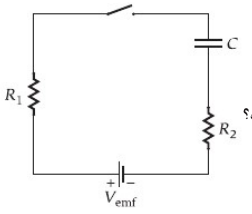
6.45 في البداية، يُفتح المفتاحان S_1 وS_2 في الدائرة الموضحة في الشكل، ويكون معدل شحن المكثف هو 100. mC. ما المدة الزمنية التقريبية التي سيستغرقها شحن المكثف ليهبط إلى 5.00 mC بعد غلق المفتاح S_1؟





6.46 ما الثابت الزمني الذي سيستغرقه تفريغ شحن المكثف الموجود في الدائرة الموضحة في الشكل؟ إذا كان فرق الجهد بين لوحَي مكثف سعته 2.00 μF يساوي 10.0 V، فكم سيتبقى من شحنه بعد غلق المفتاح لمدة زمنية تعادل نصف الثابت الزمني؟

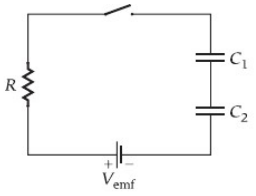
6.47 الدائرة الموضحة في الشكل بها مفتاح S ومقاومان $R_1 = 1.00\ \Omega$ و$R_2 = 2.00\ \Omega$، وبطارية جهدها 12.0 V ومكثف سعته $C = 20.0\ \mu F$. بعد غلق المفتاح، كم سيبلغ أقصى معدل لشحن المكثف؟ ما المدة الزمنية التي يحتاج إليها المكثف بعد غلق المفتاح ليتبقى 50.0% من أقصى معدل شحن له؟



6.48 في فيلم *العودة إلى المستقبل*، كان السفر عبر الزمن ممكنًا عن طريق مكثف تدفق بولد قدرة قيمتها 1.21 GW. بافتراض أنه يمكن شحن مكثف سعته 1.00 F إلى أقصى سعة له باستخدام بطارية سيارة جهدها 12.0 V، ويمكن تفريغ شحنه باستخدام مقاوم، ما مقدار المقاومة اللازمة لتبديد أعلى خرج لقدرة تبلغ 1.21 GW في المقاوم؟ ما المدة الزمنية التي تستغرقها بطارية سيارة جهدها 12.0 V لشحن المكثف بنسبة 90.0% من سعته القصوى باستخدام هذا المقاوم؟

6.49 أثناء عرض توضيحي خاص بالفيزياء، فُرغ مكثف كامل الشحن سعته 90.0 μF باستخدام مقاوم 60.0 Ω. ما المدة الزمنية التي سيستغرقها المكثف ليفقد 80.0% من طاقته الابتدائية؟

6.50 مكثفان ذوا ألواح متوازية، C_1 وC_2، وموصلان على التوالي ببطارية جهدها 60.0 V ومقاوم 300.kΩ. كما هو موضح في الشكل. تبلغ مساحة الألواح في كلا المكثفين 2.00 cm^2 والمسافة الفاصلة بين كل لوح والآخر هي 0.100 mm. يشغل الهواء المسافة الفاصلة بين لوحَي المكثف C_1، بينما تشغل الفجوة بين لوحَي المكثف C_2 قطعة من البورسلين (ثابت عزل كهربائي مقداره 7.00، وشدة عزل كهربائي مقدارها 5.70 kV/mm). أغلق المفتاح ومرت فترة زمنية طويلة.



a) ما معدل شحن المكثف C_1؟

b) ما معدل شحن المكثف C_2؟

c) ما إجمالي كمية الطاقة المخزنة في كلا المكثفين؟

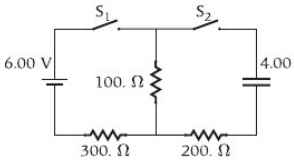
d) ما قيمة المجال الكهربائي الموجود داخل المكثف C_2؟

6.51 المسافة الفاصلة بين لوحين متوازيين لمكثف سعته $C = 0.0500\ \mu F$ تساوي $d = 50.0\ \mu m$. وثابت العزل الكهربائي الذي يشغل المسافة بين اللوحين يساوي $\kappa = 2.50$ ومقاومته النوعية هي $r = 4.00 \times 10^{12}\ \Omega\ m$. ما الثابت الزمني لهذا المكثف؟ (*تلميح:* احسب أولًا مساحة اللوحين بمعلومية قيم C وκ، ثم حدد مقاومة العزل الكهربائي بين اللوحين).

6.52 بطارية جهدها 12.0 V موصلة بمكثف سعته 2.00 mF ومقاوم يبلغ 100. Ω. عند اكتمال شحن المكثف، كم ستكون كمية الطاقة المخزنة داخله؟ كم تبلغ كمية الطاقة التي يبددها المقاوم في صورة حرارة أثناء شحن المكثف؟

6.53 مجموعة مكثفات مصممة لتفريغ 5.00 J من طاقة شحنها من خلال مصفوفة مقاومات 10.0 kΩ في أقل من 2.00 ms. ما مقدار فرق الجهد الذي يجب أن تُشحن مجموعة المكثفات به، وما مقدار السعة التي يجب أن تتوافر لهذه المجموعة؟

6.54 الدائرة الموضحة في الشكل تحتوي على مكثف موصل ببطارية ومفتاحين وثلاثة مقاومات. في البداية، يكون المكثف غير مشحون ويُفتح كلا المفتاحين.



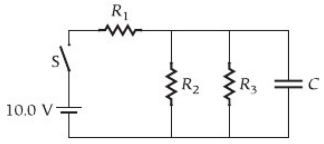
a) أغلق المفتاح S_1. ما قيمة التيار الذي يتدفق خارجًا من البطارية فور غلق المفتاح S_1؟

b) بعد حوالي 10.0 min. أُغلق المفتاح S_2. ما قيمة التيار الذي يتدفق خارجًا من البطارية فور غلق المفتاح S_2؟

c) ما قيمة التيار الذي يتدفق خارجًا من البطارية بعد غلق المفتاح S_2 بحوالي 10.0 min؟

d) بعد مرور 10.0 min أخرى، فُتح المفتاح S_1. كم من الزمن سيستغرق وصول التيار المتدفق في مقاوم 200. Ω إلى أقل من 1.00 mA؟

6.55 في الدائرة الموضحة في الشكل، $R_1 = 10.0\ \Omega$، $R_2 = 4.00\ \Omega$، و$R_3 = 10.0\ \Omega$. وسعة المكثف هي $C = 2.00\ \mu F$.

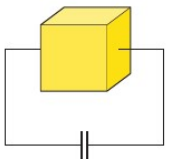


a) حدد فرق الجهد، ΔV_C، بين طرفَي المكثف بعد غلق المفتاح S بفترة زمنية طويلة.

b) حدد الطاقة المخزنة داخل المكثف عند غلق المفتاح S لفترة زمنية طويلة.

c) بعد فتح المفتاح S، كم مقدار الطاقة التي يبددها المقاوم R_3؟

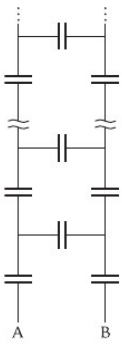
6.56 مكعب ذهبي طول ضلعه 2.50 mm موصل بطرفَي مكثف سعته 15.0 μF وفرق الجهد بين لوحيه يساوي 100.0 V في البداية.



a) ما الوقت اللازم لتفريغ شحن المكثف بالكامل؟

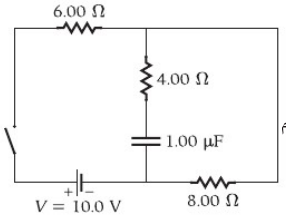
b) عند تفريغ شحن المكثف بالكامل، كم ستكون درجة حرارة المكعب الذهبي؟

McGraw-Hill Education حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة



6.57•• "سلم مواسعي" أُنشئ باستخدام مكثِّفات متماثلة، C. تمثل أرجل السلم ودرجاته، كما هو موضح في الشكل. وكان طول السلم "لانهائي"، بمعنى أنه يمتد لمسافة طويلة جدًا في اتجاه واحد. احسب السعة المكافئة للسلم، المقدّرة بين "قدميه" (النقطتان A وB) بدلالة C.

تمارين إضافية



6.58 في الدائرة الموضحة في الشكل، تُعد المكثِّفات فارغة تمامًا من الشحن. أُغلق المفتاح ومرت فترة زمنية طويلة.

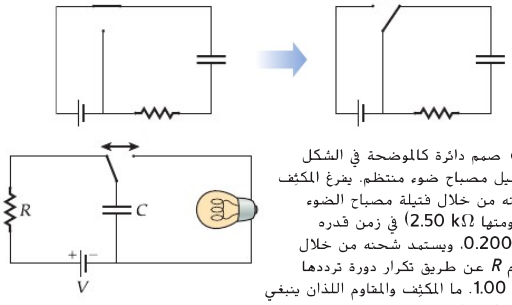
a) احسب مقدار التيار المتدفق عبر المقاوم 4.00 Ω.

b) أوجد فرق الجهد المتكون عبر المقاومات 4.00 Ω، 6.00 Ω، و8.00 Ω.

c) أوجد فرق الجهد بين طرفَي المكثِّف الذي سعته 1.00 μF.

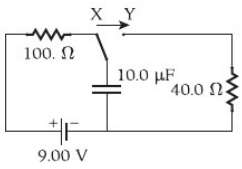
6.59 المقاومة الداخلية للأميتر الذي يستخدمه معلم الفيزياء في العروض التوضيحية في صفّه هي $R_i = 75.0\ \Omega$ وأقصى قيمة للتيار يمكنه قياسها هي 1.50 mA. يمكن أن يقيس الأميتر نفسه تيارات مقدارها أكبر بكثير عن طريق توصيل مقاوم مجزئ للتيار ذي مقاومة صغيرة نسبيًا R_{shunt}، على التوازي بالأميتر. (a) ارسم الرسم التخطيطي للدائرة، واشرح لماذا يسمح مقاوم مجزئ التيار الموصل على التوازي بالأميتر بقياس مقادير أكبر من التيار. (b) احسب المقاومة التي تلزم مقاوم مجزئ التيار للسماح للأميتر بقياس أقصى قيمة للتيار مقدارها 15.0 A.

6.60 يمكن أن يكون العديد من الأجهزة الإلكترونية خطرة حتى بعد إغلاقها. فكِّر في دائرة RC تحتوي على مكثِّف سعته 150 μF. ومقاوم يبلغ 1.00 MΩ موصلين بمصدر طاقة جهده 200 V لفترة زمنية طويلة، ثم قُطع التوصيل وحدث قصر للدائرة كما هو موضح في الشكل. كم من الزمن سيستغرق انخفاض فرق الجهد بين طرفَي المكثِّف إلى أقل من 50.0 V؟



6.61 صمم دائرة كالموضحة في الشكل لتشغيل مصباح ضوء منتظم. يفرغ المكثِّف طاقته من خلال فتيلة مصباح الضوء (مقاومتها 2.50 kΩ) في زمن قدره 0.200 ms. ويستمد شحنه من خلال مقاوم R عن طريق تكرار دورة ترددها 1.00 kHz. ما المكثِّف والمقاوم اللذان ينبغي استخدامهما؟

6.62 أميتر مقاومته الداخلية 53.0 Ω يقيس تيارًا قيمته 5.25 mA في دائرة تحتوي على بطارية ومقاومتها الكلية هي 1130 Ω. إن إدخال الأميتر في أحد فروع الدائرة، يغير من مقاومتها، ولذلك لا يعطي القياس القيمة الفعلية للتيار المتدفق في الدائرة دون استخدام الأميتر. حدد القيمة الفعلية للتيار.



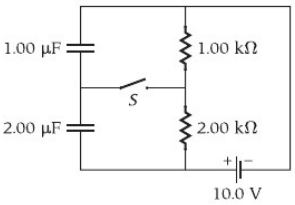
6.63• في الدائرة الموضحة في الشكل، تشحن بطارية جهدها 9.00 V مكثِّفًا سعته 10.0 μF أثناء وجود المفتاح ثنائي الاتجاه في الوضع X لفترة زمنية طويلة. ثم يُغير وضع المفتاح فجأة إلى الوضع Y. ما قيمة التيار المتدفق عبر مقاوم يبلغ 40.0 Ω

a) فور تحريك المفتاح إلى الوضع Y؟

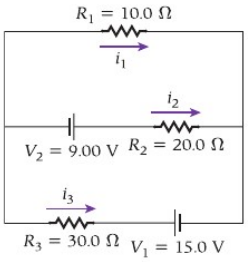
b) بعد مرور 1.00 ms على تحريك المفتاح إلى الوضع Y؟

6.64• كم من الزمن سيستغرق انخفاض قيمة التيار المتدفق في دائرة من قيمته الابتدائية إلى 1.50 mA. إذا كانت الدائرة تحتوي على مكثِّفَين سعتهما 3.80 μF وفارغين من الشحن في البداية، ومقاومَين يبلغان 2.20 kΩ. وبطارية جهدها 12.0 V. كلها موصلة على التوالي؟

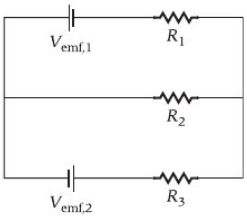
6.65 دائرة RC لها ثابت زمني مقداره 3.10 s. وعندما يكون $t = 0$، تبدأ عملية شحن المكثِّف. في أي وقت ستبلغ كمية الطاقة المخزنة في المكثِّف نصف قيمتها القصوى؟



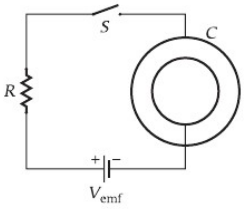
6.66• في الدائرة الموضحة في الشكل، حدد معدل شحن كل مكثِّف عندما (a) يُغلق المفتاح S لفترة زمنية طويلة و(b) يُفتح المفتاح S لفترة زمنية طويلة.



6.67• ثلاثة مقاومات، $R_1 = 10.0\ \Omega$، و$R_2 = 20.0\ \Omega$ و$R_3 = 30.0\ \Omega$، متصلة في دائرة متعددة الحلقات، كما هو موضح في الشكل. حدد كمية الطاقة المتبددة في المقاومات الثلاثة.



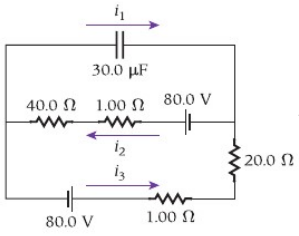
6.68• يوضح الشكل دائرة تحتوي على بطاريتين وثلاثة مقاومات. تولد كلتا البطاريتين قوة مقدارها $V_{emf,1} = 12.0$ V و$V_{emf,2} = 16.0$ V، وليست لهما مقاومة داخلية. تبلغ مقاومة هذه المقاومات $R_1 = 30.0\ \Omega$، و$R_2 = 40.0\ \Omega$، و$R_3 = 20.0\ \Omega$. أوجد مقدار انخفاض الجهد بين طرفَي المقاوم R_2.



6.69 يوضح الشكل مكثِّفًا كرويًّا. نصف قطر الكرة الداخلية $a = 1.00$ cm. ونصف قطر الكرة الخارجية $b = 1.10$ cm. تولد البطارية جهدًا مقداره $V_{emf} = 10.0$ V. وتبلغ قيمة المقاوم $R = 10.0\ M\Omega$.

a) حدد الثابت الزمني للدائرة RC.

b) حدد كمية الشحن المتراكم في المكثِّف بعد مرور 0.1 ms على غلق المفتاح S.



6.70• اكتب مجموعة المعادلات التي تحدد قيمة التيارات الثلاثة المتدفقة في الدائرة الموضحة في الشكل. (افترض أن المكثِّف فارغ الشحن منذ البداية).

6.71• فكر في دائرة RC موصلة على التوالي بها مقاوم يبلغ $R = 10.0\ \Omega$، ومكثِّف سعته $C = 10.0\ \mu F$، وبطارية جهدها $V = 10.0$ V.

a) ما مقدار الزمن، معبرًا عنه بضعف الثابت الزمني، الذي يستغرقه المكثِّف ليُشحن إلى نصف قيمته القصوى؟

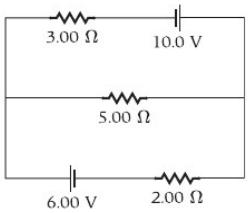
b) في هذا الزمن، كم ستكون نسبة الطاقة المخزنة في المكثِّف إلى قيمة الشحن القصوى الممكنة؟

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

c) الآن افترض أن المكثف مشحون بالكامل. عندما يكون $t = 0$، تكون الدائرة الأصلية مفتوحة ويُسمح للمكثف بتفريغ شحنه من خلال مقاوم آخر، $R' = 1.00\ \Omega$. موصل بين طرفي المكثف. ما الثابت الزمني لتفريغ شحن المكثف؟

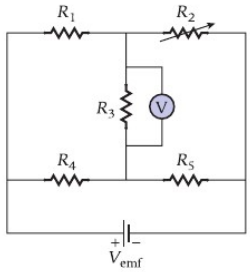
d) كم ثانية يستغرقها المكثف لتفريغ نصف القيمة القصوى لشحنه الخزن، Q؟

6.72• a) ما قيمة التيار المتدفق في المقاوم $5.00\ \Omega$ في الدائرة الموضحة في الشكل؟

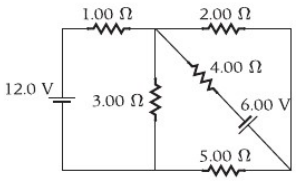


b) ما كمية الطاقة المتبددة في المقاوم $5.00\ \Omega$؟

6.73• في قنطرة ويتستون الموضحة في الشكل، المقاومات المعلومة هي $R_1 = 8.00\ \Omega$، و$R_4 = 2.00\ \Omega$. و$R_5 = 6.00\ \Omega$. وتولد البطارية جهدًا مقداره $V_{emf} = 15.0\ V$. وتُضبط المقاومة المتغيرة R_2 بحيث يساوي فرق الجهد بين طرفي المقاوم R_3 صفرًا ($V = 0$). أوجد i_2 (التيار المتدفق في المقاوم R_2) في هذا الوقت.



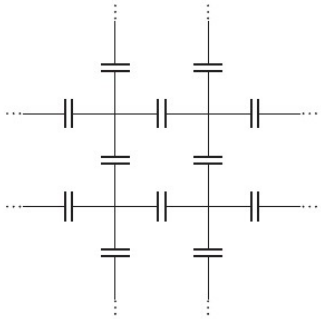
6.74•• فكّر في الدائرة التي تحتوي على خمسة مقاومات وبطاريتين (ليس لهما مقاومة داخلية) والموضحة في الشكل.



a) اكتب مجموعة معادلات ستسمح لك بإيجاد قيمة التيار المتدفق في كل مقاوم.

b) حُل المعادلات الموجودة في الجزء (a) لإيجاد قيمة التيار المتدفق في المقاوم $4.00\ \Omega$.

6.75•• فكّر في شبكة مربعة ثنائية الأبعاد "لانهائية". بمعنى أنها كبيرة جدًا، وتتكون من مكثفات متماثلة، C، كما هو موضح في الشكل. أوجد السعة الفعالة لشبكة المكثفات. المقدّرة بين طرفي أي مكثف مفرد.



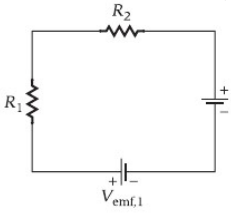
تمارين بمعطيات

6.76 بطارية جهدها 11.45 V ومقاومتها الداخلية $R_i = 0.1373\ \Omega$ من المفترض أن تشحن باستخدام شاحن بطارية قادر على أن ينقل تيار $i = 9.759\ A$. ما أدنى قيمة للقوة الدافعة الكهربائية يجب أن يوفرها الشاحن لشحن البطارية؟

6.77 بطارية مقاومتها الداخلية $R_i = 0.1415\ \Omega$ تُشحن باستخدام شاحن بطارية ينقل تيار قيمته $i = 5.399\ A$. ويولد الشاحن قوة دافعة كهربائية قيمتها 14.51 V. ما قيمة فرق الجهد بين طرفي البطارية؟

6.78 بطارية جهدها 16.05 V. ومقاومتها الداخلية R_i تُشحن باستخدام شاحن بطارية قادر على أن ينقل تيار قيمته $i = 6.041\ A$. ويولد الشاحن قوة دافعة كهربائية قيمتها 16.93 V. ما قيمة المقاومة الداخلية، R_i، للبطارية؟

6.79 للدائرة أحادية الحلقة الموضحة في الشكل قوة كهربائية مقدارها $V_{emf,1} = 21.01\ V$ و$V_{emf,2} = 10.75\ V$. ومقاوم يبلغ $R_1 = 23.37\ \Omega$. ومقاوم يبلغ $R_2 = 11.61\ \Omega$. ما مقدار التيار المتدفق في الدائرة؟



6.80 للدائرة أحادية الحلقة الموضحة في الشكل قوة كهربائية مقدارها $V_{emf,1} = 16.37\ V$ و$V_{emf,2} = 10.81\ V$ ومقاوم يبلغ $R_1 = 24.65\ \Omega$. مقدار التيار المتدفق في الدائرة هو 0.1600 A. ما مقدار المقاومة R_2؟

تمارين بمعطيات متعددة

6.81 للدائرة أحادية الحلقة الموضحة في الشكل قوة كهربائية مقدارها $V_{emf,1} = 17.75\ V$. ومقاوم يبلغ $R_1 = 25.95\ \Omega$ ومقاوم يبلغ $R_2 = 13.59\ \Omega$. مقدار التيار المتدفق في الدائرة هو 0.1740 A. ما قيمة القوة الدافعة الكهربائية $V_{emf,2}$؟

6.82 مكثف سعته 15.19 mF مشحون بالكامل بواسطة بطارية تولد قوة دافعة كهربائية مقدارها $V_{emf} = 131.1\ V$. فُصلت البطارية، ووُصل مقاوم يبلغ $616.5\ \Omega$ بين طرفَي المكثف. ما قيمة التيار الذي سيسري خلال المقاوم بعد مرور 3.871 s؟

6.83 مكثف مشحون بالكامل بواسطة بطارية تولد قوة كهربائية مقدارها $V_{emf} = 133.1\ V$. فُصلت البطارية، ووُصل مقاوم يبلغ $655.1\ \Omega$ بين طرفَي المكثف. قيمة التيار المتدفق عبر المقاوم بعد مرور 1.743 s يساوي 0.1745 A. ما سعة المكثف؟

6.84 مكثف سعته 19.79 mF مشحون بالكامل بواسطة بطارية. فصلت البطارية، ووُصل مقاوم يبلغ $693.5\ \Omega$ بين طرفَي المكثف. قيمة التيار المتدفق عبر المقاوم بعد مرور 6.615 s يساوي 0.1203 A. ما قيمة القوة الدافعة الكهربائية التي تولدها البطارية؟

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

7 المغناطيسية
Magnetism

ما سنتعلمه 170
7.1 مغناطيس دائم 170
خطوط المجال المغناطيسي 170
المجال المغناطيسي للأرض 171
تراكب المجالات المغناطيسية 173
7.2 القوة المغناطيسية 173
القوة المغناطيسية والشغل 173
وحدات قياس شدة المجال المغناطيسي 174
مسألة محلولة 7.1 أنبوب أشعة الكاثود 174
7.3 حركة الجسيمات المشحونة في مجال مغناطيسي 175
مسارات حركة الجسيمات المشحونة في مجال مغناطيسي منتظم 176
حجرة الإسقاط الزمني 177
مثال 7.1 كمية الحركة المستعرضة للجسيم في حجرة الإسقاط الزمني 177
مثال 7.2 الرياح الشمسية والمجال المغناطيسي للأرض 178
تردد المسرِّع الدوراني 178
مثال 7.3 طاقة المسرع الدوراني 179
مطياف الكتلة 180
مسألة محلولة 7.2 منتقي السرعات 180
الرفع المغناطيسي 182
7.4 القوة المغناطيسية المؤثرة في سلك يمر فيه تيار كهربائي مستمر 182
مثال 7.4 القوة المؤثرة في ملف مكبّر الصوت 183
7.5 العزم المؤثر في حلقة يمر فيها تيار 184
7.6 عزم ثنائي القطب المغناطيسي 185
مسألة محلولة 7.3 العزم المؤثر في حلقة مستطيلة يسري فيها تيار مستمر 185
7.7 تأثير هول 187
مثال 7.5 تأثير هول 188
ما تعلمناه/ دليل المذاكرة للاختبار 188
إرشادات حل المسائل 189
أسئلة الاختيار من متعدد 189
أسئلة مفاهيمية 190
تمارين 191
تمارين بمعطيات متعددة 194



الشكل 7.1 قطار شانغهاي المغناطيسي المعلق في محطة مطار بودونغ الدولي. توضح الصورة الصغيرة شاشةً داخل القطار تعرض السرعة القصوى 430 km/h (267 mph) التي يصل إليها القطار أثناء الرحلة التي استغرقت 7 دقائق و20 ثانيةً من المطار إلى وسط مدينة شنغهاي.

على الرغم من أن معظم ما نعرفه عن المغناطيسية يرجع اكتشافه إلى قرنين، وبعضه يرجع اكتشافه إلى عصور قديمة، فإن التطبيقات التقنية الجديدة والمدهشة لهذه الظاهرة تشهد تطورًا مستمرًا في عصرنا الحالي. فكثير من الأجهزة التي نستخدمها في حياتنا اليومية يعتمد على المغناطيسية. من أمثلة ذلك السيارات، وأجهزة الكمبيوتر، والمحركات الكهربائية، وأي شيء تقريبًا يعمل بمحرك كهربائي أو أيّ تقنية لتخزين المعلومات. لكن الأكثر إدهاشًا من بين هذه الأمثلة هو قطار شانغهاي المغناطيسي المعلق، الشكل 7.1، الذي يتحرك فوق مجالات كهربائية صناعية ليصل إلى سرعات عالية جدًا. لكن لكي نعرف قيمة هذه الابتكارات، نحتاج أولًا إلى معرفة المعلومات الأساسية عن المغناطيسية.

تُعد هذه الوحدة هي أول وحدة تتناول المغناطيسية، وتشمل المجالات المغناطيسية والقوى المغناطيسية وتأثيراتها في الجسيمات المشحونة والتيارات الكهربائية. وسنواصل دراسة المغناطيسية في الوحدات القليلة التالية التي توضح أسباب نشأة المجالات المغناطيسية وارتباطها بالمجالات الكهربائية. ستجد أن الكهرباء والمغناطيسية هما في الحقيقة جزءان من القوة الكونية نفسها التي تُسمى *القوة الكهرومغناطيسية*؛ وأن الارتباط بينهما هو أحد أكبر النجاحات على مستوى الفيزياء النظرية.

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

Chapter Sourced From: 7. Magnetism, Chapter 27, from University Physics with Modern Physics, 2e by Bauer and Westfall ©2014

ما سنتعلمه

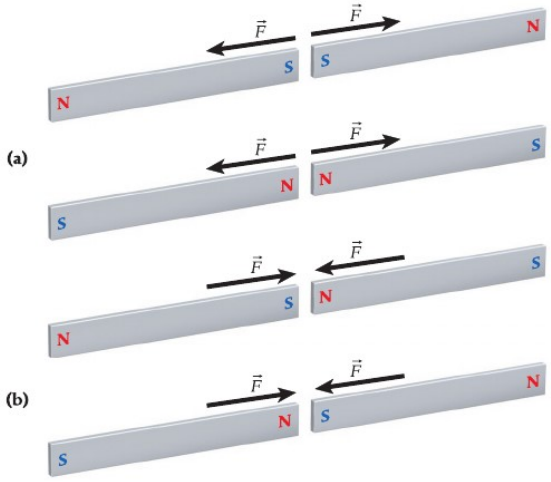
- توجد المغناطيسات الدائمة في الطبيعة. ودائمًا ما يكون للمغناطيس قطب شمالي وآخر جنوبي. كما أنه من المستحيل عزل قطب مغناطيسي شمالي عن قطب مغناطيسي جنوبي أو العكس — فالأقطاب المغناطيسية تكون مقترنة في شكل أزواج دائمًا.
- الأقطاب المغناطيسية المختلفة تتجاذب، والأقطاب المتماثلة تتنافر.
- عند كسر مغناطيس إلى نصفين، ينتج مغناطيسان جديدان لكل منهما قطب شمالي وآخر جنوبي.
- يبذل المجال المغناطيسي قوة على الجسيمات المشحونة المتحركة فيه.
- تكون القوة المغناطيسية المبذولة على جسيم مشحون يتحرك في مجال مغناطيسي عموديةً على المجال المغناطيسي والسرعة المتجهة للجسيم.
- يمكن التعبير عن العزم المؤثر في حلقة يسري فيها تيار بدلالة الضرب الاتجاهي لعزم ثنائي القطب المغناطيسي للحلقة وشدة المجال المغناطيسي.
- يمكن استخدام تأثير هول لقياس المجالات الكهربائية.

7.1 مغناطيس دائم Permanent Magnets

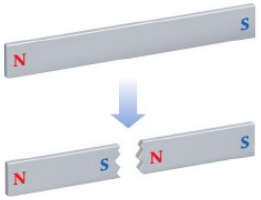
في منطقة مغنيسيا (وسط اليونان)، اكتشف الإغريق القدماء أنواعًا كثيرة من المعادن الطبيعية التي تتجاذب وتتنافر وتجذب أنواعًا معينة من الفلزات، مثل الحديد. كما تنتظم هذه المعادن، إذا كانت معلقة بشكل حر، مع اتجاه القطبين الشمالي والجنوبي للأرض. هذه المعادن هي أشكال مختلفة من أكسيد الحديد، وتُسمى **المغناطيسات الدائمة**. ومن الأمثلة الأخرى على المغناطيسات الدائمة مغناطيسات الثلاجات ومزالج الأبواب المغناطيسية المصنوعة من الحديد، والنيكل، والكوبالت. إذا لامستَ سافًا حديديًا بقطعة من حجر المغناطيس المعدني (الماجنتيت المغناطيسي)، فسيصبح الساق الحديدي ممغنطًا. ثم إذا وضعتَ هذا الساق الحديدي في الماء بحيث يكون معلقًا بشكل حر، فسينتظم مع اتجاه القطبَين المغناطيسيين للأرض. يُسمى طرف المغناطيس الذي يتجه نحو الشمال **القطب المغناطيسي الشمالي**، ويُسمى الطرف الآخر **القطب المغناطيسي الجنوبي**.

إذا قرّب مغناطيسان دائمان إلى بعضهما بحيث يتلامس القطبان الشماليان أو القطبان الجنوبيان، فسيتنافر المغناطيسان (الشكل 7.2a). أما إذا قرّب قطب شمالي إلى قطب جنوبي، فسيتجاذب المغناطيسان (الشكل 7.2b). وما نسميه بالقطب الشمالي للأرض هو في الحقيقة قطب مغناطيسي جنوبي، ولذا فهو يجذب الأقطاب الشمالية للمغناطيسات الدائمة.

عند كسر مغناطيس دائم إلى نصفين، لا ينتج قطب شمالي منفرد وقطب جنوبي منفرد. بل ينتج مغناطيسان جديدان، لكل منهما قطب شمالي وآخر جنوبي (الشكل 7.3). وعلى عكس الشحنة الكهربائية التي توجد في شكل شحنة موجبة (بروتون) وشحنة سالبة (إلكترون) منفصلتين، فلا توجد أقطاب مغناطيسية أحادية منفردة (أقطاب شمالية وجنوبية منفصلة). فقد أجرى العلماء أبحاثًا مكثفة للحصول على أقطاب مغناطيسية أحادية، لكن لم ينجح أحد في ذلك. وستساعدك دراسة مصدر المغناطيسية في هذه الوحدة على فهم سبب عدم وجود أقطاب مغناطيسية أحادية.



الشكل 7.2 (a) الأقطاب المغناطيسية المتماثلة تتنافر، (b) الأقطاب المغناطيسية المختلفة تتجاذب.



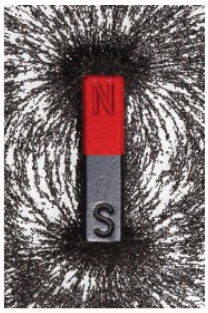
الشكل 7.3 عند كسر مغناطيس إلى نصفين، ينتج مغناطيسان لكل منهما قطب شمالي وآخر جنوبي.

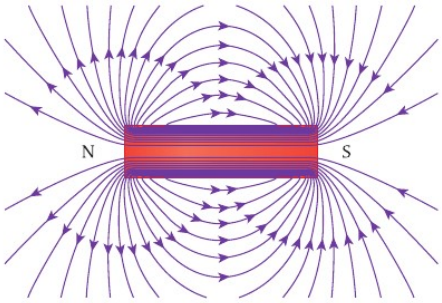
خطوط المجال المغناطيسي

تتفاعل المغناطيسات الدائمة بعضها مع بعض على بُعد مسافة معينة من دون أن تتلامس. وقياسًا على مجال الجاذبية والمجال الكهربائي، يُستخدم مفهوم **المجال المغناطيسي** لوصف القوة المغناطيسية. ويرمز المتجه $\vec{B}(\vec{r})$ إلى متجه المجال المغناطيسي عند أي نقطة معينة في الفراغ.

كما هو الحال مع المجال الكهربائي، يُمثَّل المجال المغناطيسي بخطوط المجال. ويكون متجه المجال المغناطيسي مماسيًا دائمًا **لخطوط المجال المغناطيسي**. يوضح الشكل 7.4a خطوط المجال المغناطيسي الناتجة عن مغناطيس دائم. وكما هو الحال مع خطوط المجال الكهربائي، كلما قلت المسافة بين الخطوط، زادت شدة المجال. وفي المجال الكهربائي، يكون اتجاه القوة المؤثرة في شحنة اختبار موجبة في اتجاه متجه المجال الكهربائي نفسه. لكن لعدم وجود أقطاب مغناطيسية أحادية، فلا يمكن وصف القوة المغناطيسية بطريقة مشابهة.

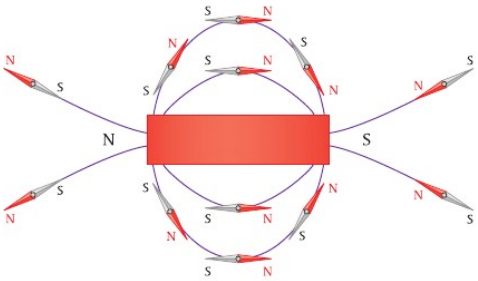
حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education





(a) (b)

الشكل 7.4 (a) خطوط مجال مغناطيسي (معدة باستخدام الكمبيوتر) ناتجة عن مغناطيس دائم. (b) برادة حديد توضح خطوط المجال المغناطيسي.



الشكل 7.5 استخدام إبرة بوصلة لتحديد اتجاه المجال المغناطيسي من ساق مغناطيس.

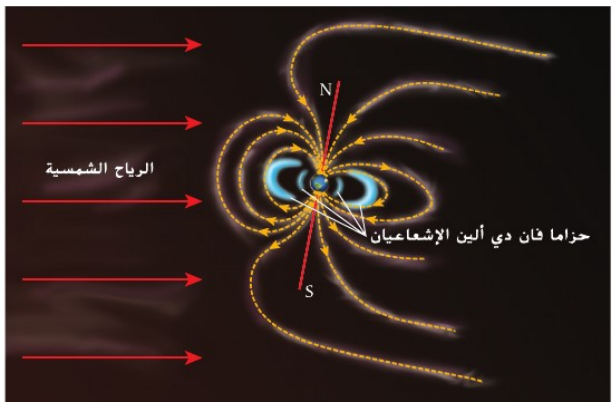
يُعرف اتجاه المجال المغناطيسي بدلالة الاتجاه الذي تشير إليه إبرة البوصلة. فإبرة البوصلة ذات القطب الشمالي والقطب الجنوبي ستنتظم مع اتجاه المجال المغناطيسي بحيث يشير قطبها الشمالي إلى اتجاه المجال المغناطيسي. لذا يمكننا معرفة اتجاه المجال عند أي نقطة بملاحظة الاتجاه الذي تشير إليه إبرة البوصلة الموضوعة عند هذه النقطة، كما يوضح الشكل 7.5 للساق المغناطيسي.

خارج المغناطيس، تبدو خطوط المجال المغناطيسي أنها تنشأ من القطب الشمالي وتنتهي في القطب الجنوبي، لكنها في الحقيقة تُشكِّل حلقات مغلقة تخترق جسم المغناطيس نفسه لتُكمل دورتها. وتشكِّل الحلقات المقفلة هذا فرقًا جوهريًا بين خطوط المجال الكهربائي وخطوط المجال المغناطيسي (بالنسبة إلى المجالات المنتظمة، لا ينطبق ذلك على المجالات المتغيرة مع الزمن كما سنرى في الوحدات اللاحقة). تذكَّر أن خطوط المجال الكهربائي تبدأ من الشحنات الموجبة وتنتهي في الشحنات السالبة. أما خطوط المجال المغناطيسي، فهي لا تبدأ أو تنتهي عند نقاط معينة لعدم وجود أقطاب مغناطيسية أحادية. بل تُشكِّل هذه الخطوط حلقات مغلقة لا تبدأ أو تنتهي عند أي نقطة. وسنعرف لاحقًا أهمية هذا الفرق في توضيح التفاعل بين خطوط المجال الكهربائي وخطوط المجال المغناطيسي. وإذا رأيت نمط مجال ولم تستطع أن تحدِّد في البداية ما إذا كان هذا المجال كهربائيًا أم مغناطيسيًا، فانظر هل توجد حلقات مغلقة أم لا. فإذا وجدتَ بعضها، فالمجال مغناطيسي، وإذا كانت خطوط المجال لا تشكل حلقات، فالمجال كهربائي.

المجال المغناطيسي للأرض

الأرض في حد ذاتها مغناطيس، ولها مجال مغناطيسي مماثل للمجال المغناطيسي لساق المغناطيس (الشكل 7.4). وهذا المجال المغناطيسي مهم لأنه يحمينا من الإشعاعات عالية الطاقة المنبعثة من الفضاء، التي تُسمى *الأشعة الكونية*. حيث تتكون هذه الأشعة الكونية في معظمها من جسيمات مشحونة، لكنها تنحرف بعيدًا عن سطح الأرض بسبب المجال المغناطيسي للأرض. ولا يتزامن قطبا المجال المغناطيسي للأرض مع قطبيها الجغرافيين المحدَّدين بنقطتَي تقاطع محور دوران الأرض مع سطحها.

يوضح الشكل 7.6 مقطعًا عرضيًا لخطوط المجال المغناطيسي للأرض. كما تكون خطوط المجال قريبة بعضها من بعض مكوِّنة سطحًا مغناطيسيًا دائريًا يحيط بالأرض. لكن يتشوه شكل المجال المغناطيسي للأرض بسبب الرياح الشمسية التي هي عبارة عن تدفق من الجسيمات المتأينة. وهذه الجسيمات هي في الأساس بروتونات تنبعث من الشمس وتبتعد عنها بسرعة 400 km/s. وتحيط بالأرض حزمتان من الجسيمات المشحونة التي تخرج من الرياح الشمسية. تُسمى هاتان الحزمتان **حزامَي فان ألين الإشعاعيَّين** (الشكل 7.6)، نسبة إلى عالم الفضاء جيمس ألفرد فان ألين (1914–2006).

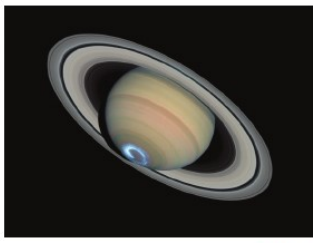


الشكل 7.6 مقطع عرضي لخطوط المجال المغناطيسي للأرض. تمثل الخطوط المتقطعة خطوط المجال المغناطيسي. والمحور المُحَدَّد بالقطبين المغناطيسيين الشمالي والجنوبي (الخط الأحمر) يصنع حاليًا زاوية قياسها 11° تقريبًا مع محور الدوران.

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education



الشكل 7.7 ظاهرة الشفق القطبي الشمالي فوق دولة فنلندا، كما التقطتها محطة الفضاء الدولية.



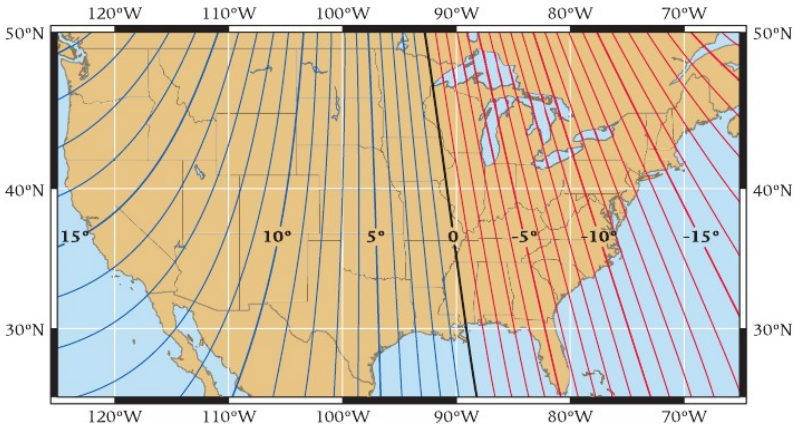
الشكل 7.8 ظاهرة الشفق على كوكب زُحل، كما تَمّ التقاطها باستخدام تلسكوب هابل الفضائي.

الذي اكتشفهما في بداية عهد الرحلات الفضائية، وكان ذلك بوضع أجهزة قياس الإشعاع على الأقمار الصناعية. ويكون حزاما فان ألين الإشعاعيان أقرب ما يكونان إلى الأرض بالقرب من القطبين المغناطيسيين الشمالي والجنوبي، حيث غالبًا ما تتصادم الجسيمات المشحونة المحصورة داخل الحزامين مع الذرات الموجودة في الغلاف الجوي، مما يؤدي إلى استثارة الذرات. فتنبعث من هذه الذرات المستثارة أضواء مختلفة الألوان عند اصطدامها وفقدها للطاقة؛ وتنتج عن ذلك ظاهرتان خلابتان هما **الشفق القطبي الشمالي** (الأضواء الشمالية) في المناطق الواقعة عند خطوط العرض الشمالية (انظر الشكل 7.7) و**الشفق القطبي الجنوبي** (الأضواء الجنوبية) في المناطق الواقعة عند خطوط العرض الجنوبية. كما أن كوكب الأرض لا يختص بظاهرتَي الشفق؛ فقد شوهدت على كواكب أخرى ذات مجالات مغناطيسية قوية، مثل المشترى وزُحل (انظر الشكل 7.8).

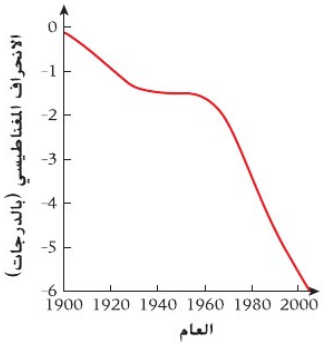
يتحرك قطبا الأرض المغناطيسيان في الوقت الحالي بمعدل سرعة يصل إلى 40 km في السنة الواحدة. ويقع القطب المغناطيسي الشمالي الآن على بُعد 2800 km تقريبًا من القطب الجغرافي الجنوبي، أي عند حافة القارة القطبية الجنوبية، ويتحرك نحو قارة أستراليا. أما القطب المغناطيسي الجنوبي فيقع في المنطقة القطبية الشمالية الكندية، وإذا استمرت حركته بالمعدل الحالي، فسيصل إلى سيبيريا في عام 2050. وقد زاد المجال المغناطيسي للأرض بمعدل ثابت يصل إلى 7% لكل قرن منذ أول قياس دقيق له عام 1840 تقريبًا. وسيختفي المجال المغناطيسي للأرض بهذا المعدل خلال بضعة آلاف من السنوات. لكن تشير بعض الأدلة الجيولوجية إلى أن المجال المغناطيسي للأرض قد انعكس (انقلب) 170 مرة تقريبًا خلال المئة مليون سنة الماضية. وكان آخر انقلاب له منذ 770000 سنة ماضية. لذا فقد ينعكس اتجاه المجال المغناطيسي للأرض بدلًا من اختفائه. ما سبب نشأة المجال المغناطيسي للأرض؟ العجيب أنه لم يتم التوصل إلى إجابة دقيقة عن هذا السؤال، وجُرى حاليًا أبحاث مكثفة لمعرفة السبب. لكن الأرجح أنه ينشأ بسبب التيارات الكهربائية القوية داخل الأرض. وهي تنشأ بسبب دوران لُب الأرض السائل المكوَّن من الحديد والنيكل. يُشار إلى هذا الدوران عادة باسم *تأثير الدينامو*. (وسنعرف كيف تُنتج التيارات الكهربائية مجالات مغناطيسية في الوحدة 8).

نظرًا لأن القطب الجغرافي الشمالي والقطب المغناطيسي الشمالي لا يقعان في الموقع نفسه، فإن إبرة البوصلة لا تشير عادة إلى القطب الجغرافي الشمالي بشكل دقيق. يُسمى هذا الفرق **الانحراف المغناطيسي**. ويكون الانحراف المغناطيسي موجبًا عندما يكون الشمال المغناطيسي شرق الشمال الحقيقي، بينما يكون سالبًا عندما يكون الشمال المغناطيسي غرب الشمال الحقيقي. يقع القطب المغناطيسي الشمالي حاليًا على خط يمر بجنوب شرق ولاية ميسوري، وغرب ولاية إلينوي، وشرق ولاية آيوا، وغرب ولاية ويسكونسن. وعلى امتداد هذا الخط، يساوي الانحراف المغناطيسي صفرًا. ويكون الانحراف المغناطيسي غرب هذا الخط موجبًا، ويصل إلى 18 درجة في ولاية سياتل. أما شرق هذا الخط، فيكون الانحراف سالبًا، ويصل إلى 18− درجة في ولاية مين. يبين الشكل 7.9 خريطة توضح الانحراف المغناطيسي في الولايات المتحدة ابتداءً من عام 2004.

نظرًا لأن موقعَي قطبَي الأرض المغناطيسيين يتغيران بمرور الزمن، فإن الانحرافات المغناطيسية لكل المواقع على سطح الأرض تتغير أيضًا بمرور الزمن. على سبيل المثال، يوضح الشكل 7.10 تقدير الانحراف المغناطيسي لمدينة لانسنغ، عاصمة ولاية ميشيغان، في الفترة بين عامي 1900 و2004. ويمكن رسم تمثيل بياني مماثل لأي موقع على سطح الأرض.



الشكل 7.9 الانحرافات المغناطيسية في الولايات المتحدة في عام 2004. تمثل الخطوط الحمراء الانحرافات المغناطيسية السالبة، بينما توضح الخطوط الزرقاء الانحرافات المغناطيسية الموجبة. تفصل بين خطوط الانحراف المغناطيسي درجة واحدة.



الشكل 7.10 الانحراف المغناطيسي في مدينة لانسنغ، عاصمة ولاية ميشيغان، منذ عام 1900 إلى عام 2004.

McGraw-Hill Education حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة

تراكب المجالات المغناطيسية

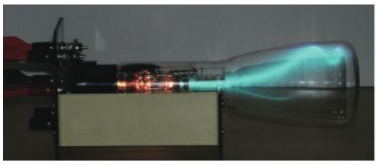
إذا تواجدت عدة مصادر للمجال المغناطيسي بالقرب من بعضها، كعدة مغناطيسات دائمة، فإننا نحصل على المجال المغناطيسي عند أي نقطة معينة في الفراغ من خلال تراكب المجالات المغناطيسية الناشئة عن كل هذه المصادر. وهذا التراكب ينشأ مباشرة من تراكب القوى. نعبّر عن مبدأ التراكب للمجال المغناطيسي الكلي، $\vec{B}_{\text{total}}(\vec{r})$، الناتج عن n من مصادر المجال المغناطيسي بالمعادلة التالية

$$\vec{B}_{\text{total}}(\vec{r}) = \vec{B}_1(\vec{r}) + \vec{B}_2(\vec{r}) + \cdots + \vec{B}_n(\vec{r}) \tag{7.1}$$

إن مبدأ تراكب المجالات المغناطيسية هذا يشبه تمامًا مبدأ تراكب المجالات الكهربائية.

7.2 القوة المغناطيسية Magnetic Force

أشارت مناقشتنا النوعية للمجال المغناطيسي في القسم السابق إلى أن للمجال المغناطيسي اتجاهًا مماسيًا لخطوط المجال. يمكننا إيجاد مقدار المجال المغناطيسي بدراسة تأثيره في جسيم مشحون متحرك. وسنبدأ بدراسة تأثير المجال المغناطيسي المنتظم في شحنة واحدة. كتذكير، يمكن إيجاد القوة التي يبذلها المجال الكهربائي على الشحنة من خلال المعادلة $\vec{F}_E = q\vec{E}$ توضح التجربة في الشكل 7.11 أن المجال المغناطيسي لا يبذل قوة على شحنة ساكنة، بل على شحنة متحركة فقط.

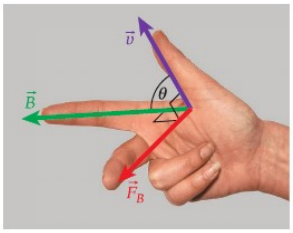


الشكل 7.11 حزمة من الإلكترونات (تظهر باللون الأخضر المائل إلى الزرقة)، توضحها كمية صغيرة من الغاز في أنبوب مفرَّغ. ويتغير اتجاهها لتأثرها بمغناطيس (عند الحافة اليمنى للصورة).

يمكن تعريف المجال المغناطيسي بدلالة القوة التي يبذلها المجال على جسيم مشحون متحرك. ويمكن إيجاد القوة المغناطيسية التي يبذلها المجال المغناطيسي على جسيم مشحون متحرك شحنته q وسرعته المتجهة $\vec{v}$ من خلال المعادلة

$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B} \tag{7.2}$$

يتعامد اتجاه القوة على كل من السرعة المتجهة للجسيم المشحون المتحرك والمجال المغناطيسي (الشكل 7.12). وهذا ما يعرف بالقاعدة الأولى لليد اليمنى. توضح قاعدة اليد اليمنى اتجاه القوة المبذولة على شحنة موجبة بمعرفة اتجاهَي السرعة المتجهة والمجال. أما بالنسبة إلى الشحنة السالبة، فستكون القوة في الاتجاه المعاكس.



الشكل 7.12 القاعدة الأولى لليد اليمنى للقوة التي يبذلها مجال مغناطيسي، $\vec{B}$، على جسيم شحنته q يتحرك بسرعة متجهة $\vec{v}$. لتحديد اتجاه القوة المغناطيسية، وجِّه إبهامك في اتجاه السرعة المتجهة للجسيم المشحون المتحرك، وإصبعَ السبابة في اتجاه المجال المغناطيسي. وعندها سيشير الإصبع الأوسط في اتجاه القوة المغناطيسية.

مقدار القوة المغناطيسية المبذولة على جسيم مشحون متحرك هو

$$F_B = |q| v B \sin\theta \tag{7.3}$$

حيث θ الزاوية بين السرعة المتجهة للجسيم المشحون والمجال المغناطيسي. (تكون قيمة الزاوية θ بين 0° و180°. لذا فإن $\sin\theta \geq 0$). نستنتج من ذلك أنه لا توجد قوة مغناطيسية تؤثر في جسيم مشحون يتحرك بشكل موازٍ للمجال المغناطيسي، لأن $\theta = 0°$ في هذه الحالة. أما إذا تحرك جسيم مشحون عموديًا على المجال المغناطيسي، فإن $\theta = 90°$، ومع (ثبات قيمتَي v وB)، فسيكون مقدار القوة المغناطيسية أعلى ما يكون من خلال المعادلة

$$F_B = |q| v B \quad \left(\text{عندما } \vec{v} \perp \vec{B}\right) \tag{7.4}$$

القوة المغناطيسية والشغل

أوضحت المعادلة 7.2 أن القوة المغناطيسية هي حاصل الضرب الاتجاهي لمتجه السرعة المتجهة ومتجه المجال المغناطيسي، ومن ثمّ فهي عمودية على كلا المتجهين. وهذا معناه أن $\vec{F}_B \cdot \vec{v} = 0$. وبما أن القوة هي حاصل ضرب الكتلة في العجلة، فإن $\vec{a} \cdot \vec{v} = 0$. وفي الحركة الدائرية، رأينا أن هذه الحالة تعني أنه يمكن أن يتغير اتجاه متجه السرعة المتجهة مع بقاء قيمة متجه السرعة المتجهة (أو السرعة) ثابتة. ومن ثم فإن الطاقة الحركية، $\frac{1}{2}mv^2$، تظل ثابتة للجسيم الذي يتعرض لقوة مغناطيسية، وأن القوة المغناطيسية *لا تبذل شغلًا على* الجسيم المتحرك.

مما سبق نستنتج ما يلي: لا يمكن استخدام المجال المغناطيسي المنتظم لبذل شغل على الجسيمات، وأن الطاقة الحركية لجسيم يتحرك في مجال مغناطيسي منتظم تبقى ثابتة، حتى لو تغير اتجاه متجه السرعة المتجهة كدالة للزمن أثناء تحرك الجسيم في المجال المغناطيسي. وعلى الجانب الآخر، يمكن استخدام المجال الكهربائي بسهولة لبذل شغل على الجسيم المشحون.

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

وحدات قياس شدة المجال المغناطيسي

لمناقشة حركة الشحنات في المجالات المغناطيسية، نحتاج إلى معرفة الوحدات التي تُستخدم لقياس شدة المجال المغناطيسي. فبحل المعادلة 7.4 لإيجاد شدة المجال وبالتعويض بوحدات الكميات الأخرى، نجد أن

$$[F_B] = [q][v][B] \Rightarrow [B] = \frac{[F_B]}{[q][v]} = \frac{\text{N s}}{\text{C m}}$$

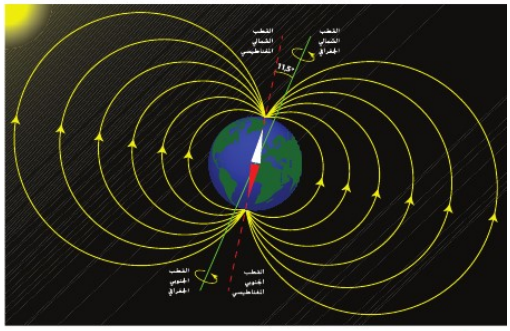
بما أن الأمبير (A) يساوي 1 C/s، فإن (N s)/(C m) = N/(A m). وقد سُميت وحدة قياس شدة المجال المغناطيسي وحدة **تسلا** (T)، نسبة إلى الفيزيائي والمخترع الأمريكي والكرواتي الأصل نيكولا تسلا (1856–1943):

$$1\ \text{T} = 1\ \frac{\text{N s}}{\text{C m}} = 1\ \frac{\text{N}}{\text{A m}}$$

تمثل وحدة التسلا مقدارًا كبيرًا من شدة المجال المغناطيسي. وتُقاس شدة المجال المغناطيسي أحيانًا بوحدة الجاوس (G)، وهي ليست من وحدات النظام الدولي:

$$1\ \text{G} = 10^{-4}\ \text{T}$$

على سبيل المثال، تبلغ شدة المجال المغناطيسي للأرض عند سطح الأرض $(5 \times 10^{-5}\ \text{T})$ 0.5 G. تختلف هذه القيمة باختلاف الموقع لتتراوح بين 0.2 G و0.6 G، كما هو موضح في الشكل 7.13.

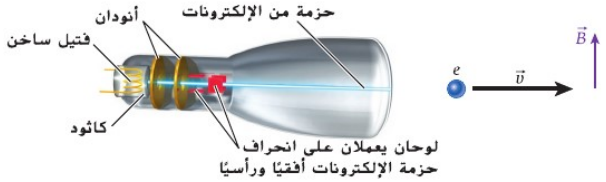


الشكل 7.13 خريطة للعالَم توضح شدة المجال المغناطيسي للأرض.

مسألة محلولة 7.1 أنبوب أشعة الكاثود

المسألة

افترض أنبوب أشعة كاثود نمائلًا للموضح في الشكل 7.11. في هذا الأنبوب، يعمل فرق الجهد $\Delta V = 111\ \text{V}$ على إكساب الإلكترونات عجلة أفقية (بدءًا من وضع السكون) في مدفع إلكترونات، كما هو موضح في الشكل 7.14a. يحتوي مدفع الإلكترونات على فتيل مطلي بمادة خاصة تنبعث منه الإلكترونات عند تسخينه. ويتحكم الكاثود سالب الشحنة في عدد الإلكترونات المنبعثة. ثم يقوم الأنودان موجبا الشحنة بتركيز الإلكترونات وإكسابها عجلة لتتحرك في شكل حزمة من الإلكترونات. فتتحرك هذه الحزمة من الأنودين في اتجاه لوحين يعملان على انحراف حزمة الإلكترونات أفقيًا ورأسيًا. إذا كان أمام مدفع الإلكترونات مجالٌ مغناطيسي منتظم شدته $B = 3.40 \cdot 10^{-4}\ \text{T}$ يتجه إلى أعلى عموديًا على السرعة المتجهة الابتدائية للإلكترونات، فما مقدار العجلة التي تكتسبها الإلكترونات بسبب تأثير المجال المغناطيسي؟ (كتلة الإلكترون تساوي $9.11 \times 10^{-31}\ \text{kg}$).



الشكل 7.14 (a) أنبوب أشعة الكاثود. (b) إلكترونات متحركة بسرعة متجهة $\vec{v}$ تدخل مجالًا مغناطيسيًا ثابتًا.

الحل

فكّر تكتسب الإلكترونات طاقة حركية في مدفع إلكترونات أنبوب أشعة الكاثود. مقدار الطاقة الحركية المكتسبة لكل إلكترون يساوي حاصل ضرب شحنة الإلكترون في فرق الجهد. ويمكن إيجاد سرعة الإلكترونات من تعريف الطاقة الحركية. كما يمكن إيجاد مقدار القوة المغناطيسية المؤثرة في الإلكترون من خلال معرفة شحنة الإلكترون، وسرعته المتجهة، وشدة المجال المغناطيسي، وهي تساوي حاصل ضرب كتلة الإلكترون في العجلة التي يتحرك بها.

ارسم يوضح الشكل 7.14b إلكترونًا يتحرك بسرعة متجهة $\vec{v}$ ويدخل مجالًا مغناطيسيًا ثابتًا عموديًا على مسار الإلكترون.

ابحث ناتج جمع التغير في الطاقة الحركية للإلكترونات ΔK والتغير في طاقة وضع الإلكترونات يساوي صفرًا:

$$\Delta K + \Delta U = \tfrac{1}{2}mv^2 + q\Delta V = 0$$

وبما أن $q = -e$ في هذه الحالة، نجد أن

$$e\Delta V = \tfrac{1}{2}mv^2 \quad \text{(i)}$$

McGraw-Hill Education محفوظة لصالح مؤسسة © حقوق الطبع والتأليف

حيث ΔV مقدار فرق الجهد الذي تسارعت الإلكترونات عبره، وm_e كتلة الإلكترون. ويمكننا حل المعادلة (i) لإيجاد سرعة الإلكترونات:

$$v = \sqrt{\frac{2e\Delta V}{m}} \quad \text{(ii)}$$

يمكن إيجاد مقدار القوة التي يبذلها المجال المغناطيسي على الإلكترونات من خلال المعادلة 7.3:

$$F_B = evB\sin 90^\circ = evB$$

حيث $-e$ شحنة الإلكترون، وB مقدار المجال المغناطيسي. وفقًا للقانون الثاني لنيوتن، $F_{net} = ma$. وبما أن القوة الوحيدة الموجودة هي القوة المغناطيسية، فإن

$$F_B = ma = evB \quad \text{(iii)}$$

حيث a مقدار عجلة الإلكترونات.

بسّط يمكننا إعادة ترتيب المعادلة (iii) والتعويض بتعبير سرعة الإلكترونات من المعادلة (ii) لإيجاد عجلة الإلكترونات:

$$a = \frac{evB}{m} = \frac{eB\sqrt{\frac{2e\Delta V}{m}}}{m} = B\sqrt{2\Delta V\frac{e^3}{m^3}}$$

احسب بالتعويض باستخدام القيم العددية، نحصل على

$$a = \left(3.40\times10^{-4}\ \text{T}\right)\sqrt{2(111\ \text{V})\frac{\left(1.602\times10^{-19}\ \text{C}\right)^3}{\left(9.11\times10^{-31}\ \text{kg}\right)^3}} = 3.7357\times10^{14}\ \text{m/s}^2$$

قرّب سنقرب النتيجة التي توصلنا إليها إلى ثلاثة أرقام معنوية:

$$a = 3.74\times10^{14}\ \text{m/s}^2$$

تحقّق ثانية قيمة العجلة المحسوبة كبيرة جدًا. تكاد تساوي 40 تريليون ضعف عجلة الجاذبية الأرضية. لذا نحتاج بالطبع إلى التحقق ثانية. أولًا، نحسب سرعة الإلكترونات:

$$v = \sqrt{\frac{2e\Delta V}{m}} = \sqrt{\frac{2\left(1.602\times10^{-19}\ \text{C}\right)(111\ \text{V})}{9.11\times10^{-31}\ \text{kg}}} = 6.25\times10^6\ \text{m/s}$$

قد تبدو قيمة السرعة 6250 km/s كبيرة. إلا أنها منطقية بالنسبة إلى الإلكترونات لأنها لا تعادل إلا 2% فقط من سرعة الضوء. ومن ثم فإن القوة المغناطيسية المؤثرة في كل إلكترون هي

$$F_B = evB = \left(1.602\times10^{-19}\ \text{C}\right)\left(6.25\times10^6\ \text{m/s}\right)\left(3.40\times10^{-4}\ \text{T}\right) = 3.40\times10^{-16}\ \text{N}$$

مقدار العجلة كبير جدًا لأن كتلة الإلكترون صغيرة جدًا.

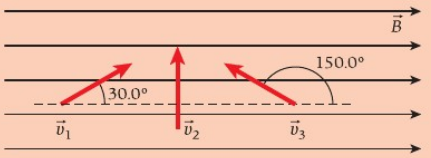
مراجعة المفاهيم 7.1

في أي اتجاه سينحرف الإلكترون الموضَّح في الشكل 7.14b عند دخوله مجالًا مغناطيسيًا ثابتًا؟

a) إلى داخل الصفحة
b) إلى خارج الصفحة
c) إلى أعلى
d) إلى أسفل
e) لن ينحرف الإلكترون

سؤال الاختبار الذاتي 7.1

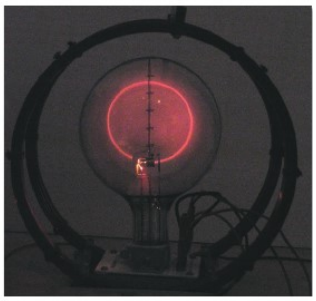
ثلاثة جسيمات لكلٍ منها شحنة $q = 6.15\ \mu\text{C}$ وسرعة $v = 465\ \text{m/s}$. دخلت مجالًا مغناطيسيًا مقداره $B = 0.165\ \text{T}$ (انظر الشكل). ما مقدار القوة المغناطيسية المؤثرة في كل جسيم؟



7.3 حركة الجسيمات المشحونة في مجال مغناطيسي
Motion of Charged Particles in a Magnetic Field

إن تعامد قوة المجال المغناطيسي التي تؤثر في جسيم مشحون متحرك على كل من المجال المغناطيسي والسرعة المتجهة للجسيم يميز هذه القوة عن غيرها من القوى التي تناولناها حتى الآن. لكننا نستخدم في تحليلها القوانين نفسها المستخدمة مع باقي القوى، وهي قوانين نيوتن، وقوانين حفظ الطاقة، وكمية الحركة، وكمية الحركة الزاوية.

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education



الشكل 7.15 حزمة من الإلكترونات انحرفت لتتحرك في مسارٍ دائري بفعل المجال المغناطيسي الناتج عن ملفين.

مسارات حركة الجسيمات المشحونة في مجال مغناطيسي منتظم

افترض أنك تقود سيارتك بسرعة ثابتة في مسار دائري. ينتج عن الاحتكاك بين إطارات السيارة والطريق قوة الجذب المركزي التي تحافظ على تحرك السيارة في المسار الدائري. حيث يكون اتجاه تأثير هذه القوة نحو مركز الدائرة دائمًا، مما يؤدي إلى تحرك السيارة بعجلة مركزية. تنطبق هذه الحالة الفيزيائية نفسها عندما يتحرك جسيم شحنته q وكتلته m بسرعة متجهة $\vec{v}$ عموديًا على مجال مغناطيسي منتظم، $\vec{B}$. كما هو موضح في الشكل 7.15.

في هذه الحالة، تجد أن الجسيم يتحرك في مسار دائري بسرعة ثابتة v، وينتج عن القوة المغناطيسية $F_B = |q|vB$ قوة الجذب المركزي التي تحافظ على تحرك الجسيم في مسار دائري. والجسيمات المختلفة في الشحنة والمتماثلة في الكتلة ستدور في اتجاهين متعاكسين في نصف القطر المداري نفسه. على سبيل المثال، الإلكترونات والبوزيترونات هي جسيمات أولية متماثلة في الكتلة؛ إلا أن الإلكترون سالب الشحنة والبوزيترون موجب الشحنة. الشكل 7.16 عبارة عن صورة لغرفة فقاقيع تُظهر زوجين من الإلكترونات والبوزيترونات. وغرفة الفقاقيع جهاز يمكنه تتبع حركة الجسيمات المشحونة في مجال مغناطيسي منتظم. (نتج زوجا الإلكترونات والبوزيترونات نتيجة التفاعلات بين الجسيمات الأولية، وسيتم تناول ذلك بالتفصيل لاحقًا). في الزوج 1 إلكترونٌ وبوزيترون لهما السرعة المنخفضة النسبية نفسها. تتحرك الجسيمات في البداية في مسار دائري. إلا أن سرعتها تقل أثناء تحركها في غرفة الفقاقيع. (هذا التباطؤ ليس بسبب القوة المغناطيسية، لكنه بسبب تصادم الجسيمات مع جزيئات الغاز في غرفة الفقاقيع). ونتيجة لذلك، يقل نصف قطر المسار الدائري تدريجيًا، مما يشكل مسارًا حلزونيًا. أما سرعة الإلكترون والبوزيترون في الزوج 2 فهي أكبر بكثير مقارنة بالزوج 1. حيث يتحركان في مسارَين منحنيين لا يشكلان دائرة كاملة قبل خروج الجسيمات من غرفة الفقاقيع.

إذا كانت السرعة المتجهة للجسيم المشحون متوازية (باتجاه أو عكس اتجاه) مع المجال المغناطيسي، فلن يتأثر الجسيم بأي قوة مغناطيسية وستستمر حركته في خط مستقيم.

أما إذا كانت الحركة عمودية على المجال المغناطيسي، كما في الشكل 7.15، فإن الحفاظ على حركة الجسيم بالسرعة v في مسار دائري نصف قطره r يتطلب قوة الجذب المركزي:

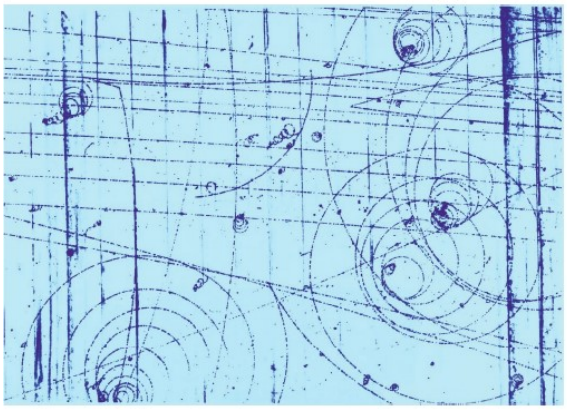
$$F = \frac{mv^2}{r}$$

بمساواة قوة الجذب المركزي مع القوة المغناطيسية، نحصل على

$$vB|q| = \frac{mv^2}{r}$$

وبإعادة الترتيب، نحصل على المعادلة لإيجاد نصف قطر المسار الدائري الذي يتحرك فيه الجسيم:

$$r = \frac{mv}{|q|B} \quad (7.5)$$



الشكل 7.16 صورة لغرفة فقاقيع تُظهر زوجين من الإلكترونات والبوزيترونات. توجد غرفة الفقاقيع في مجال مغناطيسي منتظم يتجه مباشرةً إلى خارج الصفحة.

McGraw-Hill Education حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة

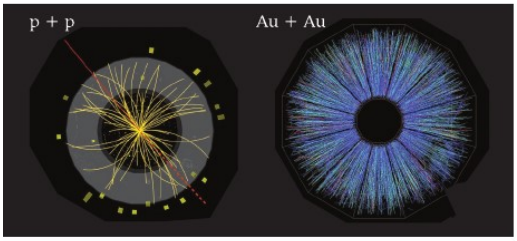
وتكون المعادلة بدلالة مقدار كمية حركة الجسيم:

$$Br = \frac{p}{|q|} \tag{7.6}$$

إذا لم تكن السرعة المتجهة $\vec{v}$ عمودية على المجال المغناطيسي $\vec{B}$، فإن مركَّبة السرعة المتجهة العمودية على $\vec{B}$ تتسبب في تحرك الجسيم بشكل دائري، بينما لا تتأثر مركَّبة السرعة المتجهة الموازية بالمجال المغناطيسي $\vec{B}$. ومن ثمَّ تحوِّل هذا المدار إلى شكل حلزوني.

حجرة الإسقاط الزمني

يحصل علماء فيزياء الجسيمات على جسيمات أولية جديدة عن طريق تصادم جسيمات كبيرة عند أعلى مستويات للطاقة. ينتج عن هذه التصادمات جسيمات كثيرة تتدفق بعيدًا عن نقطة التصادم بسرعات كبيرة. ولا تكون أجهزة الكشف البسيطة عن الجسيمات كافية لتحديد هذه الجسيمات. لذا يستخدم الفيزيائيون حجرة الإسقاط الزمني لمساعدتهم على دراسة هذه التصادمات. وقد سبق وصف مُصادم STAR TPC في مثال 2.4.



الشكل 7.17 مساران منحنيان يمثلان حركة الجسيمات المشحونة الناتجة عن تصادمات بين (a) بروتونين لكلٍ منهما طاقة حركية مقدارها 100 GeV، و(b) نواتَي ذهب لكلٍ منهما طاقة حركية مقدارها 100 GeV.

يوضح الشكل 7.17 تصادم بروتونَين وتصادم نواتَي ذرتي ذهب. ينتج عن تصادم البروتونَين عشرات الجسيمات؛ وينتج عن تصادم نواتَي الذهب آلاف الجسيمات. ويترك كل جسيم مشحون مسارًا في الحجرة. يمثل اللون الذي يعينه الكمبيوتر إلى المسار كثافة تأين المسار أثناء مرور الجسيمات عبر غاز الحجرة. أثناء مرور هذه الجسيمات المشحونة عبر الغاز، فإنها تؤيِّن ذرات الغاز وتنتجُ إلكترونات حرة. ويسمح الغاز بانسياق الإلكترونات الحرة من دون الاتحاد ثانية مع الأيونات الموجبة، بتطبيق مجالات كهربائية بين مركز الحجرة والغطاءين الطرفيين للأسطوانة. تُبذل قوة كهربائية على الإلكترونات الحرة تجعلها تنساق نحو الغطاءين الطرفيين، حيث يتم تسجيلها إلكترونيًا. باستخدام زمن الانسياق ومواقع التسجيل، تعيد برامج الكمبيوتر إنشاء المسارات التي سلكتها الجسيمات عبر الحجرة. ويكون للجسيمات الناتجة أثناء التصادمات مركَّبة سرعة متجهة عمودية على المجال المغناطيسي للحجرة، ومن ثمَّ تسلك هذه الجسيمات مسارات دائرية.

مثال 7.1 كمية الحركة المستعرضة للجسيم المشحون كما تم رصدها بجهاز الكشف (أطلس)

يوضح الشكل 7.18 مسار حركة أحد الجسيمات المشحونة من الشكل 7.17a. نصف قطر المسار الدائري الذي يسلكه هذا الجسيم هو $r = 2.300\ \text{m}$. وشدة المجال المغناطيسي في حجرة الإسقاط الزمني هي $B = 0.5000\ \text{T}$. وسنفترض أن شحنة الجسيم $|q| = 1.602177 \times 10^{-19}\ \text{C}$.

المسألة

ما مركَّبة كمية حركة الجسيم العمودية على المجال المغناطيسي؟

الحل

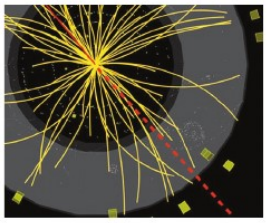
سنسمي هذه المركَّبة كميةَ الحركة المستعرضة للجسيم، p_t، وسنستخدم المعادلة 7.6، مع استبدال p بـ p_t، لأن القوة المغناطيسية تعتمد على p_t فقط، لا على مركَّبة كمية الحركة الموازية للمجال المغناطيسي $\vec{B}$.

$$Br = \frac{p_t}{|q|}$$

يمكننا التعبير عن مقدار كمية الحركة المستعرضة للجسيم بدلالة مقدار المجال المغناطيسي لحجرة الإسقاط الزمني والقيمة المطلقة لشحنة الجسيم:

$$p_t = |q|Br = (1.602177 \times 10^{-19}\ \text{C})(0.5000\ \text{T})(2.300\ \text{m}) = 1.843 \times 10^{-19}\ \text{kg m/s}$$

يُتبع



الشكل 7.18 دائرة تطابق مسار أحد الجسيمات المشحونة الناتجة عن تصادم بروتونين معًا داخل جهاز الكشف أطلس في مختبر الأبحاث النووية (سيرن) الموضح في الشكل 7.17a.

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

بدلاً من استخدام وحدات النظام الدولي هذه لإيجاد كمية الحركة، غالبًا ما يستخدم علماء فيزياء الجسيمات الوحدة MeV/c (راجع مثال 7.5). وبما أن 1 MeV $=1.602\times10^{-13}$ J، فإن التحويل بين kg m/s وMeV/c سيكون كما يلي:

$$1\ \text{MeV}/c=\frac{1.60218\times10^{-13}\text{J}}{2.99792\times10^{8}\text{m/s}}=5.3443\times10^{-22}\text{kg m/s}\Leftrightarrow 1\ \text{kg m/s}=1.87115\times10^{21}\text{MeV}/c$$

إذًا، قيمة كمية الحركة المستعرضة هي

$$p_t = 344.8\ \text{MeV}/c$$

إن تحليل كمية الحركة المستعرضة للجسيم الذي أجريناه هنا يمكن تنفيذه باستخدام خوارزميات حاسوبية مؤتمتة على ما يصل إلى 5000 جسيم من الجسيمات المشحونة الناتجة عن تصادم واحد بين نواتَي ذهب. ويستغرق إكمال هذه العملية المعقدة حوالي 30 ثانية على جهاز كمبيوتر (بمعالج 3 GHz). في المقابل، يمكن أن تسجّل حجرة الإسقاط الزمني ما يصل إلى 1000 حدث في الثانية، أي ما يقابل 1 مللي ثانية لكل حدث.

مثال 7.2 الرياح الشمسية والمجال المغناطيسي للأرض

ناقشنا في القسم 7.1 حزامَي فان ألين الإشعاعيين اللذين يحصران الجسيمات المنبعثة من الشمس. تُطلق الشمس ما يقرب من مليون طن من المادة إلى الفضاء كل ثانية. وتتكوَّن هذه المادة في معظمها من بروتونات تتحرك بسرعة 400 km/s تقريبًا.

المسألة

إذا كانت البروتونات المنبعثة من الشمس تسقط عموديًا على المجال المغناطيسي للأرض (الذي يبلغ مقداره 50.0 μT عند خط الاستواء). فما نصف قطر مدار البروتونات؟ كتلة البروتون تساوي 1.67×10^{-27} kg.

الحل

تربط المعادلة 7.5 بين مقدار المجال المغناطيسي، B، ونصف قطر المدار الدائري، r، والسرعة، v، لجسيم كتلته m وشحنته q يتحرك عموديًا على المجال المغناطيسي:

$$r=\frac{mv}{|q|B}$$

بالتعويض بالقيم العددية، نحصل على

$$r=\frac{\left(1.67\times10^{-27}\ \text{kg}\right)\left(400.\times10^{3}\ \text{m/s}\right)}{\left(1.602\times10^{-19}\ \text{C}\right)\left(50.0\times10^{-6}\ \text{T}\right)}=83.5\ \text{m}$$

وهكذا، فإن بروتونات الرياح الشمسية تدور حول خطوط المجال المغناطيسي للأرض عند خط الاستواء في دوائر نصف قطرها 83.5 m. أما البروتونات التي تسقط على المجال المغناطيسي للأرض بعيدًا عن خط الاستواء فلا تتحرك عموديًا على المجال المغناطيسي، لذا يكون نصف قطرها المداري أكبر. إلا أن خطوط المجال المغناطيسي تكون أقرب إلى بعضها، مما يعني زيادة شدة المجال تجاه القطبين. لذا تتحرك البروتونات بشكل حلزوني على امتداد خطوط المجال عند اقترابها من القطبين. فيُجبر شكل المجال المغناطيسي للأرض هذه البروتونات المتحركة نحو القطبين على عكس اتجاهها والعودة نحو خط الاستواء، فتُحصر البروتونات في حزامَي فان ألين الإشعاعيَّين. وهكذا، فإن المجال المغناطيسي للأرض يمنع الرياح الشمسية تمامًا من الوصول إلى سطح الأرض. ولهذا أهمية بالغة، إذ سيكون من المستحيل أن تعيش الكائنات الحية العليا على الأرض إذا وصل هذا الإشعاع الكوني إليها، حيث سيؤدي هذا الإشعاع إلى تأين الذرات (إزالة الإلكترونات منها) وتدمير الجزيئات الكبيرة، مثل جزيء DNA.

تردد المسرِّع الدوراني

إذا أكمل الجسم دورة كاملة في مسار دائري داخل مجال مغناطيسي منتظم، كحركة الإلكترونات في الشعاع الموضح في الشكل 7.15، فإن الزمن الدوري، T، للجسيم تساوي ناتج قسمة محيط الدائرة على السرعة:

$$T=\frac{2\pi r}{v}=\frac{2\pi m}{|q|B} \tag{7.7}$$

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

التردد f لحركة الجسيم المشحون يساوي معكوس الزمن الدوري:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{|q|B}{2\pi m} \tag{7.8}$$

السرعة الزاوية، ω، للحركة هي

$$\omega = 2\pi f = \frac{|q|B}{m} \tag{7.9}$$

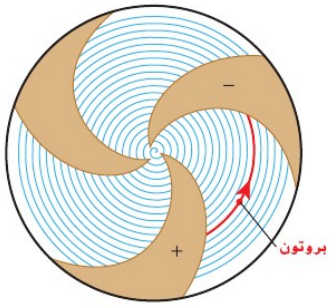
إذًا، التردد والسرعة الزاوية لحركة الجسيم لا يرتبطان بسرعة الجسيم ومن ثمَّ لا يرتبطان بالطاقة الحركية للجسيم. يُستفاد من هذه الحقيقة في المسرّعات الدورانية، ولذا يُشار إلى ω المعطاة في المعادلة 7.9 بـ **تردد المسرِّع الدوراني**. ففي المسرّع الدوراني، تكتسب الجسيمات عجلة تزيد من طاقتها الحركية تدريجيًا، كما أن حقيقة عدم ارتباط تردد المسرّع الدوراني بالطاقة الحركية تُسهِّل تصميم المسرّع الدوراني.

مثال 7.3 طاقة المسرع الدوراني

المسرع الدوراني هو مسرع للجسيمات (الشكل 7.19). تُطبق جهد كهربائي متردد على قطع ذهبية مثل الموضحة في الشكل (والتي تشبه *زعانف المروحة*). لذا يتحرك الجسيم موجب الشحنة دائمًا من أسفل زعنفة موجبة الشحنة إلى أخرى سالبة الشحنة. فيؤدي المجال الكهربائي الناتج إلى تسريع حركة الجسيم. ونظرًا لتعرض المسرع الدوراني لمجال مغناطيسي قوي، فإن الجسم يتحرك في مسار منحنٍ. يتناسب نصف قطر المسار طرديًا مع مقدار كمية حركة الجسيم، وفقًا للمعادلة 7.6. لذا يتحرك الجسيم المتسارع في مسار لولبي نحو الخارج حتى يصل إلى حافة المجال المغناطيسي (حيث يصبح مساره غير منحنٍ بفعل المجال المغناطيسي) ثم يُسحب إلى الخارج. وفقًا للمعادلة 7.9، يكون التردد الزاوي مستقلاً عن كمية حركة الجسيم أو طاقته. لذا لا يلزم ضبط تردد تغير قطبية الزعانف أثناء تسارع الجسيم. (يظل ذلك صحيحًا طالما لم تقترب سرعة الجسيمات المتسارعة إلى حد كبير من سرعة الضوء. للتعويض عن التأثيرات النسبية، يزداد المجال المغناطيسي للمسرع الدوراني مع نصف القطر المسار الدائري للجسيمات المتسارعة).



(a)



(b)

الشكل 7.19 (a) رسم معد باستخدام الكمبيوتر يوضح الجزء المركزي للمسرع الدوراني فائق التوصيل K500 في المختبر الوطني للمسرع الدوراني فائق التوصيل في جامعة ميشيغان، مع إضافة المسار الحلزوني لجسيم مُسرَّع. تم تمييز إحدى زعانف المسرع الدوراني باللون الأخضر. (b) منظر علوي للمسرع الدوراني K500، يعرض بروتونًا أثناء تسريعه بين زعنفتين.

المسألة

ما الطاقة الحركية، بوحدة الميجا إلكترون فولت (MeV)، لبروتون يخرج من مسرع دوراني نصف قطره $r = 1.81$ m، إذا كان المجال المغناطيسي للمسرع الدوراني مجالاً منتظمًا مقداره $B = 0.851$ T؟ كتلة البروتون تساوي 1.67×10^{-27} kg.

الحل

يمكننا حل المعادلة 7.5 لإيجاد سرعة البروتون، v:

$$v = \frac{r|q|B}{m}$$

-يُتبع

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

ثم نعوّض بالسرعة v في معادلة الطاقة الحركية:

$$K = \tfrac{1}{2}mv^2 = \tfrac{1}{2}m\left[\frac{r|q|B}{m}\right]^2 = \frac{r^2q^2B^2}{2m}$$

وبالتعويض باستخدام القيم المعطاة، نحصل على الطاقة الحركية بوحدة الجول (J):

$$K = \frac{(1.81\ \text{m})^2\left(1.602\times10^{-19}\ \text{C}\right)^2(0.851\ \text{T})^2}{2\left(1.67\times10^{-27}\ \text{kg}\right)} = 1.82\times10^{-11}\ \text{J}$$

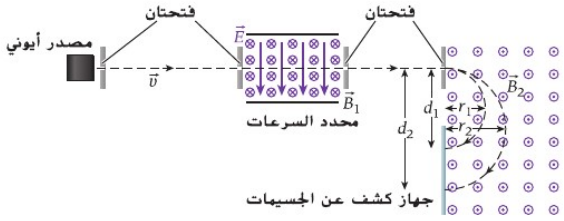
بما أن $1\ \text{MeV} = 10^6\ \text{eV}$ و $1\ \text{eV} = 1.602\times10^{-19}\ \text{J}$، فإن

$$K = 1.82\times10^{-11}\ \text{J}\left[\frac{1\ \text{eV}}{1.602\times10^{-19}\ \text{J}}\right]\left[\frac{1\ \text{MeV}}{10^6\ \text{eV}}\right] = 114\ \text{MeV}$$

مطياف الكتلة

أحد تطبيقات حركة الجسيمات المشحونة في المجال المغناطيسي هو **مطياف الكتلة**، الذي يسمح بتحديد الكتل الذرية والجزيئية بشكل دقيق ويمكن أن يكون مفيدًا في عملية التأريخ بالكربون وتحليل المركبات الكيميائية غير المعروفة. يعمل مطياف الكتلة عن طريق تأيين الذرات أو الجزيئات لدراستها وتسريع حركتها عبر جهد كهربائي. ثم يتم تمرير الأيونات من خلال محدد سرعات (موضح بالتفصيل في المسألة المحلولة 7.2)، يسمح بمرور أيونات ذات سرعة محددة فقط ويمنع مرور باقي الأيونات. تدخل الأيونات بعد ذلك إلى منطقة مجال مغناطيسي منتظم. في المجال المغناطيسي، يتم إيجاد نصف قطر انحناء مدار كل أيون من خلال المعادلة 7.5: $r = mv/|q|B$ إذا افترضنا أن كل الذرات أو الجزيئات أحادية التأين (+1 أو -1). فإن نصف قطر الانحناء سيتناسب طرديًا مع كتلة الأيون. يوضّح الشكل 7.20 رسمًا تخطيطيًا لمطياف كتلة.

سيكون للأيونات ذات الكتل المختلفة مدارات ذات أنصاف أقطار مختلفة في المجال المغناطيسي المنتظم. على سبيل المثال، في الشكل 7.20، تكون كتلة الأيونات التي نصف قطر مدارها r_1 أصغر من كتلة الأيونات التي نصف قطر مدارها r_2. ويقيس جهاز الكشف عن الجسيمات المسافات من نقطة المدخل، d_1 وd_2، التي يمكن أن تكون مرتبطة بأنصاف الأقطار المدارية ومن ثمَّ بكتلة الأيونات.



الشكل 7.20 رسم تخطيطي لمطياف كتلة يعرض مصدرًا أيونيًا، ومحدّد سرعات يتكون من مجال كهربائي ومجال مغناطيسي متقاطعين (انظر مسألة محلولة 7.2)، ومنطقةً فيها مجال مغناطيسي منتظم، وجهازًا للكشف عن الجسيمات.

مسألة محلولة 7.2 منتقي السرعات

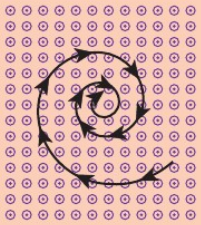
تتسارع البروتونات بدءًا من وضع السكون عبر فرق جهد كهربائي مقداره $\Delta V = 14.0\ \text{kV}$. وتدخل البروتونات منتقي سرعات يتكوّن من مكثف ذي لوحين متوازيين معرَّض لمجال مغناطيسي منتظم موجَّه عموديًا على مستوى الصفحة، كما في الشكل 7.21a. مقدار المجال الكهربائي بين لوحَي المكثف المتوازيين هو $\vec{E} = 4.30\times10^5\ \text{V/m}$، وهو باتجاه مستوى الصفحة وإلى الأسفل، كما في الشكل 7.21a. يشار إلى ترتيب المجالين الكهربائي والمغناطيسي المتعامدين هذا باسم *المجالات المتقاطعة*.

المسألة

ما المجال المغناطيسي اللازم لمرور البروتونات عبر منتقي السرعات من دون أن تنحرف؟

سؤال الاختبار الذاتي 7.2

مجال مغناطيسي منتظم موجَّه إلى خارج الصفحة (الترميز القياسي لأي نقطة داخل دائرة يمثل طرف رأس السهم لخط المجال). ويتحرك جسيم مشحون في مستوى الصفحة، كما توضح الأسهم في الشكل.



a) هل شحنة الجسيم موجبة أم سالبة؟

b) هل تقل سرعة الجسيم، أم تزيد، أم تظل ثابتة؟

c) هل يبذل المجال المغناطيسي شغلًا على الجسيم؟

مراجعة المفاهيم 7.2

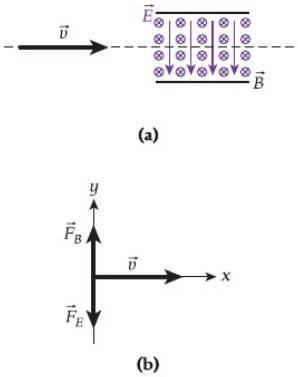
لو لم يعمل المجال المغناطيسي للأرض على انحراف الأشعة الكونية، لغمرت سطح الأرض باستمرار. بالنظر إلى الأرض على أنها ثنائي قطب مغناطيسي تقريبًا (انظر الشكل 7.6)، تكون شدة الأشعة الكونية الساقطة على سطحها أكبر ما تكون عند:

a) القطبين الشمالي والجنوبي.

b) خط الاستواء.

c) خطوط العرض المتوسطة.

McGraw-Hill Education حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة



الشكل 7.21 (a) بروتون يدخل منتقي سرعات يتكون من مجال كهربائي ومجال مغناطيسي متقاطعين. (b) قوتان إحداهما كهربائية والأخرى مغناطيسية تؤثران في بروتون يمر عبر المجالين معًا.

الحل

فكِّر لكي يتحرك البروتون في مسار مستقيم من دون انحراف، يُشترط أن تكون محصلة القوى المؤثرة فيه صفرًا. بما أن البروتون له سرعة متجهة معينة والقوة المغناطيسية تعتمد على السرعة المتجهة، فمن المنطقي عدم إمكانية تحقق هذا الشرط (أن تساوي محصلة القوى صفرًا) للسرعات العشوائية للبروتون – ومن هنا جاءت تسمية *منتقي السرعات*.

ارسم يوضح الشكل 7.21b القوتين الكهربائية والمغناطيسية المؤثرتين في البروتونات أثناء مرورها عبر منتقي السرعات. لاحظ أن القوتين تؤثران في اتجاهين متعاكسين.

ابحث ناتج جمع التغير في الطاقة الحركية للبروتونات والتغير في طاقة الوضع الكهربائية يساوي صفرًا. وهو ما يمكن التعبير عنه كما يلي

$$\Delta K = -\Delta U = \tfrac{1}{2}mv^2 = e\Delta V$$

حيث m كتلة البروتون، وv سرعته بعد التسارع، وe شحنة البروتون، وΔV فرق الجهد الكهربائي الذي تسارعت عبره البروتونات. سرعة البروتونات بعد التسارع هي

$$v = \sqrt{\frac{2e\Delta V}{m}} \quad \text{(i)}$$

عند دخول البروتونات إلى منتقي السرعات، يكون اتجاه القوة الكهربائية في اتجاه المجال الكهربائي، أي إلى أسفل (اتجاه yالسالب). ونحصل على مقدار القوة الكهربائية من خلال المعادلة

$$F_E = eE \quad \text{(ii)}$$

حيث E مقدار المجال الكهربائي في منتقي السرعات. ونحصل على اتجاه القوة المغناطيسية من خلال القاعدة الأولى لليد اليمنى: عندما يكون إصبع الإبهام في اتجاه السرعة المتجهة للبروتونات (اتجاه x الموجب) والسبابة في اتجاه المجال المغناطيسي (إلى داخل الصفحة)، يكون الإصبع الأوسط متجهًا إلى أعلى (اتجاهy الموجب). ومن ثمَّ يكون اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة في البروتونات إلى أعلى. ونحصل على مقدار القوة المغناطيسية من خلال المعادلة

$$F_B = evB \quad \text{(iii)}$$

حيث B مقدار المجال المغناطيسي في منتقي السرعات.

بسِّط الشرط الذي يسمح بمرور البروتونات عبر منتقي السرعات من دون أن تنحرف هو توازن القوة الكهربائية مع القوة المغناطيسية، أو $F_E = F_B$.باستخدام المعادلتين (ii) و(iii)، يمكننا التعبير عن هذا الشرط كما يلي

$$eE = evB$$

وبالحل لإيجاد مقدار المجال المغناطيسي، B ، والتعويض عن v من المعادلة (i)، نحصل على

$$B = \frac{E}{\sqrt{\frac{2e\Delta V}{m}}} = E\sqrt{\frac{m}{2e\Delta V}}$$

احسب بالتعويض باستخدام القيم العددية، نحصل على

$$B = \left(4.30\times10^{5}\ \text{V/m}\right)\sqrt{\frac{1.67\times10^{-27}\ \text{kg}}{2\left(1.602\times10^{-19}\ \text{C}\right)\left(14.0\times10^{3}\ \text{V}\right)}} = 0.262371\ \text{T}$$

قرِّب سنقرب النتيجة التي توصلنا إليها إلى ثلاثة أرقام معنوية:

$$B = 0.262\ \text{T}$$

تحقَّق ثانية يجب التحقق من تساوي القوة الكهربائية مع القوة المغناطيسية. مقدار القوة الكهربائية هو

$$F_E = eE = \left(1.602\times10^{-19}\ \text{C}\right)\left(4.30\times10^{5}\ \text{V/m}\right) = 6.89\times10^{-14}\ \text{N}$$

لحساب مقدار القوة المغناطيسية، نحتاج إلى إيجاد سرعة البروتونات:

$$v = \sqrt{\frac{2e\Delta V}{m}} = \sqrt{\frac{2\left(1.602\times10^{-19}\ \text{C}\right)\left(14.0\times10^{3}\ \text{V}\right)}{1.67\times10^{-27}\ \text{kg}}} = 1.64\times10^{6}\ \text{m/s}$$

– يُتبع

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

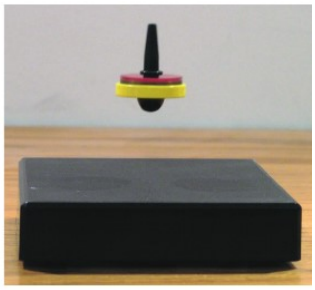
تعادل هذه السرعة 0.55% من سرعة الضوء، وهي نسبة معقولة إلى حد ما. إذًا مقدار القوة المغناطيسية هو

$$F_B = evB = \left(1.602\times10^{-19}\ \text{C}\right)\left(1.64\times10^{6}\ \text{m/s}\right)\left(0.262\ \text{T}\right) = 6.88\times10^{-14}\ \text{N}$$

وهو يتوافق مع مقدار القوة الكهربائية في حدود أخطاء التقريب. لذا، تبدو النتيجة التي توصلنا إليها منطقية.

الرفع المغناطيسي

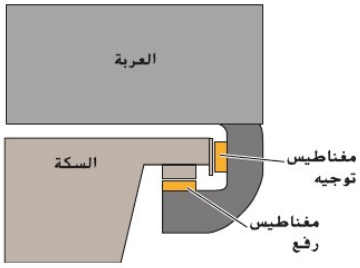
أحد التطبيقات المدهشة للقوة المغناطيسية هو **الرفع المغناطيسي**، وفيه يحدث توازن بين القوة المغناطيسية المؤثرة في جسم إلى أعلى وقوة الجاذبية المؤثرة إلى أسفل لتحقيق اتزان سكوني دون الحاجة إلى ملامسة الأسطح لبعضها بشكل مباشر. إلا أنك إذا حاولت موازنة مغناطيس فوق مغناطيس آخر عن طريق توجيه القطبين الشماليين (أو القطبين الجنوبيين) تجاه بعضهما، فسترى على الفور أن هذا غير ممكن. بل سينقلب أحد المغناطيسين، ثم سيتجه القطبان المختلفان نحو بعضهما، وستؤدي قوة الجذب بينهما إلى التصاقهما معًا. يتطلب الاتزان المستقر مقدارًا صغيرًا من طاقة الوضع، وهو ما لا يوجد في التفاعل التنافري التام بين القطبين المغناطيسيين المتشابهين.



الشكل 7.22 جهاز التحليق المغناطيسي (الليفيترون)، هو لعبة توضح الرفع المغناطيسي لمغناطيس يدور فوق قاعدة مغناطيسية.

يبين الشكل 7.22 لعبة توضح مبدأ عمل الرفع المغناطيسي تُسمى الليفترون (أو جهاز التحليق المغناطيسي). حيث يتم تدوير الجزء العلوي المغناطيسي على لوح ثم يُرفع إلى الارتفاع المناسب ويُحرَّر. ويمكن أن يظل الجزء العلوي معلّقًا لعدة دقائق. كيف تعمل هذه اللعبة، مع الأخذ في الاعتبار شرط الاتزان المستقر الذي تم ذكره. تتمثل آلية عمل اللعبة في الدوران السريع للجزء العلوي الذي تنتج عنه كمية حركة زاوية كبيرة كافية، فينشأ عنه حاجز من طاقة الوضع يمنع انقلاب المغناطيس.

توجد بالطبع طرق أخرى لإنشاء أنظمة رفع مغناطيسي مستقرة، إلا أنها تنطوي جميعها على مغناطيسات متعددة متصلة ببعضها بقوة. أحد تطبيقات الحياة اليومية للرفع المغناطيسي هو القطارات المغناطيسية المعلقة. تتفوق هذه القطارات على القطارات التي تسير على السكك الحديدية العادية بعدة مزايا: حيث لا توجد أجزاء متحركة تتعرض للتآكل، بالإضافة إلى قلة الاهتزاز والاحتكاك، ما يعني إمكانية السير بسرعات عالية. تُستخدم العديد من القطارات المغناطيسية المعلقة بالفعل حول العالم ويجري التخطيط لإنشاء العديد منها. أحد أمثلة هذه القطارات هو قطار شانغهاي المغناطيسي المعلق (الشكل 7.1) الذي يعمل بين مطار شانغهاي بودنغ الدولي ووسط مدينة شنغهاي، وتصل سرعته إلى 430 km/h (267 mph).



الشكل 7.23 مقطع عرضي لجانب واحد من عربة قطار شانغهاي المغناطيسي المعلق. ترفع مغناطيسات الرفع العربات مسافة 15 cm فوق السكة. أما مغناطيسات التوجيه فهي تحافظ على اتزان العربات فوق السكة. وكل هذه المغناطيسات مثبتة في القطار المتحرك.

يعمل قطار شنغهاي المغناطيسي المعلق باستخدام مغناطيسات مثبتة في العربات (الشكل 7.23). وهذه المغناطيسات عبارة عن ملفات مغناطيسية عادية غير فائقة التوصيل مزودة بتغذية إلكترونية لرفع القطار وتوجيهه على نحو متزن. ترتفع عربات القطار 15 cm فوق السكة لتجنب أي جسم قد يكون عليها. كما تبعد مغناطيسات الرفع والتوجيه مسافة 10 mm عن السكة المصنوعة من مادة مغناطيسية أيضًا. وتعمل المجالات المغناطيسية المدمجة داخل السكة على دفع القطار. يشبه نظام دفع القطار في عمله محركًا كهربائيًا (انظر القسم 7.5) سحبت حلقاته الدائرية لتأخذ شكلاً خطيًا.

تم اختبار القطارات المغناطيسية المعلقة التي تستخدم مغناطيسات فائقة التوصيل، فظهرت بعض المشكلات الفنية التي لم يتم حلها بعد، منها صيانة الملفات فائقة التوصيل وتعرض الركاب لمجالات مغناطيسية عالية.

7.4 القوة المغناطيسية المؤثرة في سلك يمر فيه تيار كهربائي مستمر
Magnetic Force on a Current-Carrying Wire

افترض أن سلكًا يسري فيه تيار، i، وُضع في مجال مغناطيسي منتظم، $\vec{B}$ (الشكل 7.24a). يبذل المجال المغناطيسي قوة على الشحنات المتحركة في السلك. والشحنة، q، المتدفقة عبر نقطة في السلك في زمن معين، t، هي $q = ti$. خلال هذا الزمن، تحتل الشحنة طولًا معينًا من السلك، L. نحصل عليه من خلال المعادلة $L = v_d t$، حيث v_d سرعة الانسياق لناقلات الشحنة في السلك (مقدار سرعة انسياقها). إذًا، سنحصل على

$$q = ti = \frac{L}{v_d} i \tag{7.10}$$

McGraw-Hill Education حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة

إذًا مقدار القوة المغناطيسية هو

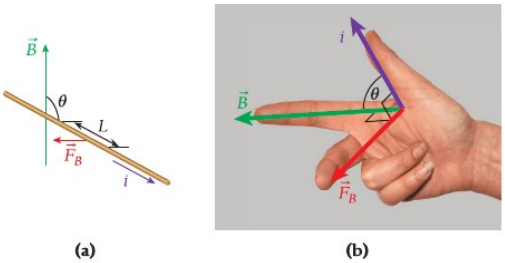
$$F_B = qv_d B\sin\theta = \left[\frac{L}{v_d}i\right]v_d B\sin\theta = iLB\sin\theta \quad (7.11)$$

حيث θ الزاوية بين اتجاه تدفق التيار واتجاه المجال المغناطيسي. يكون اتجاه القوة عموديًا على كل من اتجاه التيار واتجاه المجال المغناطيسي، ويمكن إيجاده من خلال تطبيق القاعدة الأولى لليد اليمنى. يكون اتجاه التيار في اتجاه السرعة المتجهة للجسيم المشحون، كما هو موضح في الشكل 7.24b. في القاعدة الأولى لليد اليمنى يمكن معاملة التيار على أنه شحنات متحركة.

يمكن التعبير عن المعادلة 7.11 في صورة ضرب اتجاهي:

$$\vec{F}_B = i\vec{L}\times\vec{B} \quad (7.12)$$

حيث يمثل الرمز $i\vec{L}$ التيار المار في جزء من السلك. المعادلة 7.12 هي مجرد إعادة صياغة للمعادلة 7.2 لتمثيل الحالة التي تشكل فيها الشحنات المتحركة تيارًا يتدفق في سلك. ونظرًا لأن الحالات الفيزيائية التي تتضمن التيارات تكون أكثر شيوعًا من تلك التي تتضمن حركة جسيم مشحون معزول، فإن المعادلة 7.12 هي الصياغة الأكثر فائدة لتحديد القوة المغناطيسية في التطبيقات العملية.

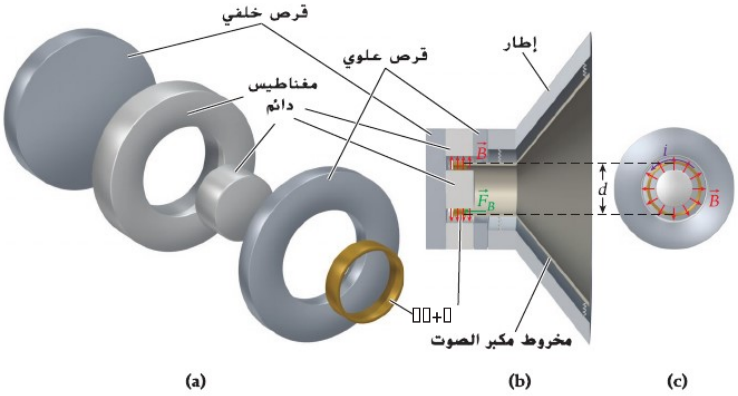


(a) (b)

الشكل 7.24 (a) القوة المغناطيسية المؤثرة في سلك يسري فيه تيار. (b) أحد تمثيلات القاعدة الأولى لليد اليمنى يحدد اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة في سلك يسري فيه تيار. لتحديد اتجاه القوة المؤثرة في سلك يسري فيه تيار باستخدام يدك اليمنى، وجّه إبهامك في اتجاه التيار، وإصبع السبابة في اتجاه المجال المغناطيسي، وعندئذٍ سيشير الإصبع الأوسط في اتجاه القوة.

مثال 7.4 القوة المؤثرة في ملف مكبِّر الصوت

ينتج مكبّر الصوت صوتًا عن طريق بذل قوة مغناطيسية على ملفٍ صوت في مجال مغناطيسي، كما هو موضح في الشكل 7.25. يتصل الملف المتحرك بمخروط مكبّر الصوت المسؤول عن إنتاج الأصوات. ويتم إنتاج المجال المغناطيسي من خلال المغناطيسين الدائمين كما هو موضح. مقدار المجال المغناطيسي هو $B = 1.50\ \text{T}$. ويتكون الملف من $n = 100$ لفة من السلك يسري فيه تيار، $i = 1.00\ \text{mA}$. وقطر الملف هو $d = 2.50\ \text{cm}$.



الشكل 7.25 رسم تخطيطي لمكبّر صوت. (a) منظر مكبّر ثلاثي الأبعاد لطرف مكبّر الصوت. (b) منظر جانبي للمقطع العرضي لمكبّر الصوت. (c) منظر أمامي لطرف مكبّر الصوت.

المسألة

ما مقدار القوة المغناطيسية التي يبذلها المجال المغناطيسي على الملف في مكبّر الصوت؟

الحل

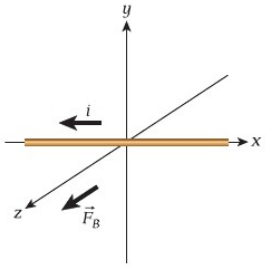
يمكن إيجاد مقدار القوة المغناطيسية المبذولة على الملف من خلال المعادلة 7.11:

$$F = iLB\sin\theta$$

-يُتبع

مراجعة المفاهيم 7.3

يوضح الشكل سلكًا يقع على امتداد المحور x يسري فيه تيار كهربائي، i. متدفقًا في اتجاه x السالب. ويقع السلك في مجال مغناطيسي منتظم. وتؤثر القوة المغناطيسية، $\vec{F}_B$، في السلك في اتجاه z الموجب. إذا تم توجيه المجال المغناطيسي لتصبح القوة أكبر ما يمكن، فما اتجاه هذا المجال؟



a) اتجاه y الموجب
b) اتجاه x السالب
c) اتجاه y السالب
d) اتجاه z الموجب
e) اتجاه z السالب

McGraw-Hill Education حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة

حيث L طول السلك الذي يسري فيه التيار i في مجال مغناطيسي مقداره B. يصنع السلك زاوية θ مع المجال المغناطيسي. وفي هذه الحالة، يكون السلك عموديًا دائمًا على المجال المغناطيسي. ومن ثم فإن $\theta = 90°$. يمكن إيجاد طول السلك في ملف مكبر الصوت من خلال ضرب عدد اللفات، n، في المحيط، πd لكل لفة.

$$L = n\pi d$$

ومن ثم، فإن مقدار القوة المبذولة على ملف مكبر الصوت هو

$$F = i(n\pi d)B(\sin 90°) = n\pi idB$$

بالتعويض بالقيم العددية، نحصل على

$$F = n\pi idB = (100)(\pi)\left(1.00\times10^{-3}\ \text{A}\right)\left(2.50\times10^{-2}\ \text{m}\right)(1.50\ \text{T}) = 0.0118\ \text{N}$$

من خلال القاعدة الأولى لليد اليمنى الموضحة في الشكل 7.24b، يكون اتجاه القوة التي يبذلها المجال المغناطيسي على ملف مكبر الصوت إلى اليسار في الشكل 7.25b وعموديًا إلى داخل الصفحة في الشكل 7.25c.

إذا تم عكس التيار في ملف الصوت، فستكون القوة في الاتجاه المعاكس. وإذا كان التيار متناسبًا طرديًا مع سعة الموجة الصوتية، فيمكن إعادة إنتاج الموجات الصوتية في مخروط مكبّر الصوت. تُستخدم هذه الفكرة الأساسية في معظم مكبرات الصوت وسماعات الرأس.

7.5 العزم المؤثر في حلقة يمر بها تيار مستمر
Torque on a Current-Carrying Loop

تعتمد المحركات الكهربائية في عملها على القوة المغناطيسية المبذولة على سلك يسري فيه تيار. وتُستخدم هذه القوة لإنشاء عزم يعمل على تدوير العمود. لنفترض أن محركًا كهربائيًا بسيطًا يتكون من حلقة مربعة واحدة يسري فيها تيار، i، موضوعة في مجال مغناطيسي منتظم، $\vec{B}$. والحلقة موجَّهة بحيث يكون الضلعان الأفقيان متوازيين مع المجال المغناطيسي ويكون الضلعان الرأسيان عموديين على المجال المغناطيسي، كما هو موضح في الشكل 7.26. نحصل على مقدار القوة المغناطيسية المبذولة على الضلعين الرأسيين للحلقة من خلال المعادلة 7.11، حيث $\theta = 90°$:

$$F = iLB$$

يمكننا إيجاد اتجاه القوة المغناطيسية بواسطة تطبيق القاعدة الأولى لليد اليمنى الموضح في الشكل 7.24b. القوتان المغناطيسيتان $\vec{F}_B$ و $-\vec{F}_B$ الموضحتان في الشكل 7.26 متساويتان في المقدار ومتعاكستان في الاتجاه. تُنتج هاتان القوتان عزمًا يميل إلى تدوير الحلقة حول محور دوران رأسي. وناتج جمع هاتين القوتين يساوي صفرًا. فلا يتأثر الضلعان الأفقيان للحلقة بأي قوة مغناطيسية لأنهما موازيان للمجال المغناطيسي. ومن ثَمَّ لا تؤثر أي محصلة قوى في الملف، على الرغم من العزم الناتج.

سنتناول الآن الحالة التي تدور فيها الحلقة حول مركزها. أثناء دوران الحلقة في المجال المغناطيسي، لا تتغير القوتان المبذولتان على الضلعين الرأسيين للحلقة والعموديين على اتجاه المجال. يوضح الشكل 7.27 منظرًا سفليًا للملف، ويوضح القوتين المبذولتين على الحلقة المربعة التي يبلغ طول ضلعها a. في الشكل 7.27، تمثل θ الزاوية بين متجه الوحدة، $\hat{n}$، العمودي على مستوى الملف والمجال المغناطيسي، $\vec{B}$. يتعامد متجه الوحدة العمودي على مستوى الحلقة السلكية، ويمكن إيجاد اتجاهه من خلال القاعدة الثانية لليد اليمنى الموضحة في (الشكل 7.28)، وفقًا للتيار المتدفق حول الحلقة.

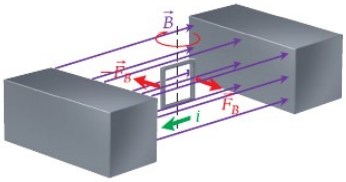
في الشكل 7.27، يتدفق التيار إلى خارج الصفحة في الضلع الأيمن للحلقة، والموضح بنقطة في دائرة (تمثل طرف رأس السهم)، ويتدفق إلى داخل الصفحة في الضلع الأيسر للحلقة، والموضح بعلامة إكس في دائرة (تمثل ذيل السهم). مقدار القوة المؤثرة في كل من الحافتين الرأسيتين هو

$$F = iaB$$

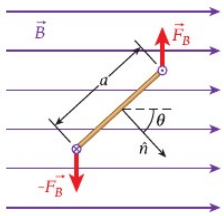
تكون القوتان المؤثرتان في الضلعين الأفقيين للحلقة متوازيين مع محور الدوران ولا تنتجان عزمًا، ويبلغ مجموعهما صفرًا. لذا لا توجد محصلة قوى تؤثر في الحلقة.

يعطينا مجموع العزمَين على الضلعين الرأسيين للحلقة المربعة محصلةَ العزم المبذول على الحلقة حول مركزها:

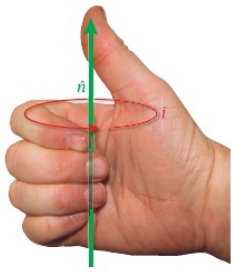
$$\tau_1 = (iaB)\left(\frac{a}{2}\right)\sin\theta + (iaB)\left(\frac{a}{2}\right)\sin\theta = ia^2B\sin\theta = iAB\sin\theta \quad (7.13)$$



الشكل 7.26 تركيب مُبسَّط لمحرك كهربائي يتكون من حلقة يسري فيها تيار وموضوعة في مجال مغناطيسي.

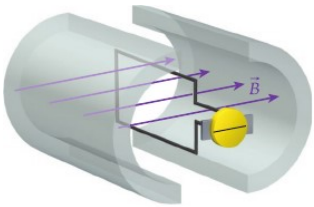


الشكل 7.27 منظر سفلي لحلقة يسري فيها تيار وموضوعة في مجال مغناطيسي، ويوضح القوى المؤثرة في الحلقة.



الشكل 7.28 القاعدة الثانية لليد اليمنى تحدِّد اتجاه متجه الوحدة العمودي لحلقة يسري فيها تيار. طبقًا للقاعدة، إذا دوَّرتَ أصابع يدك اليمنى في اتجاه سريان التيار في الحلقة، فسيشير إبهامك في اتجاه متجه الوحدة العمودي.

McGraw-Hill Education حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة



الشكل 7.29 حلقة سلكية موصّلة بمصدر تيار كهربائي عبر حلقة عاكس التيار.

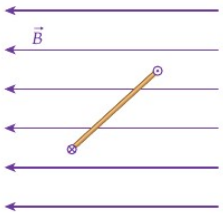
حيث يشير الرقم السفلي 1 في τ_1 إلى أنه العزم المبذول على حلقة واحدة، وتمثل $A = a^2$ مساحة الحلقة. يرجع سبب استمرار دوران الحلقة وعدم توقفها عند $\theta = 0°$ إلى اتصالها بتركيب يسمى **عاكس التيار**، الذي يغيّر اتجاه التيار أثناء دوران الملف. يتكون عاكس التيار من حلقة مقسومة إلى نصفين يتصل نصفاها بطرفَي الحلقة، كما هو موضح في الشكل 7.29. يغير التيار المار في الحلقة اتجاهَه مرتين لكل دوران كامل للحلقة.

إذا استُبدلت الحلقة الواحدة بملف يتكون من عدة حلقات متصلة تمامًا ببعضها، فسيكون إيجاد العزم المبذول على الملف بضرب العزم المبذول على الحلقة، τ_1 من المعادلة 7.13 في عدد اللفات (حلقات الملف)، N:

$$\tau = N\tau_1 = NiAB\sin\theta \tag{7.14}$$

هل يُستخدم تعبير إيجاد العزم هذا مع أشكال أخرى مساحتها A خلاف المربعات؟ الإجابة هي نعم، لكننا لن نثبت ذلك هنا.

مراجعة المفاهيم 7.4



يوضح الشكل منظرًا علويًا لحلقة يسري فيها تيار وموضوعة في مجال مغناطيسي منتظم. سيؤدي العزم المؤثر في الحلقة إلى دورانها:

a) في اتجاه عقارب الساعة.

b) في عكس اتجاه عقارب الساعة.

c) لن تدور الحلقة.

7.6 عزم ثنائي القطب المغناطيسي Magnetic Dipole Moment

يمكن وصف الملف الذي يسري فيه التيار بمعامل يحوي على معلومات حول خاصية رئيسة للملف في المجال المغناطيسي. يُعرَّف **بعزم ثنائي القطب المغناطيسي**، $\vec{\mu}$، ويكون مقداره لملف سلكي يسري فيه تيار

$$\mu = NiA \tag{7.15}$$

حيث N عدد اللفات وi التيار المار في السلك وA مساحة الحلقات. يمثل اتجاه عزم ثنائي القطب المغناطيسي متجهَ الوحدة العمودي $\hat{n}$، ونحدّده باستخدام القاعدة الثانية لليد اليمنى. باستخدام المعادلة 7.15، يمكننا إعادة صياغة المعادلة 7.14 كما يلي

$$\tau = (NiA)B\sin\theta = \mu B\sin\theta \tag{7.16}$$

ونحصل على عزم ثنائي القطب المغناطيسي من خلال المعادلة

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B} \tag{7.17}$$

أي أنّ العزم المؤثر في ملف يسري فيه تيار هو حاصل الضرب الاتجاهي لعزم ثنائي القطب المغناطيسي للملف في المجال المغناطيسي.

مسألة محلولة 7.3 العزم المؤثر في حلقة مستطيلة يسري فيها تيار مستمر

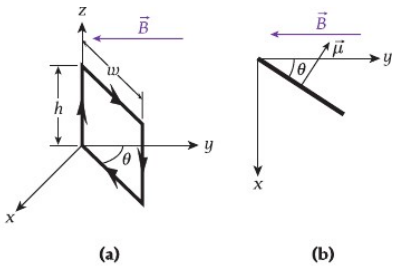
وُضعت حلقة مستطيلة طولها $h = 6.50$ cm وعرضها $w = 4.50$ cm في مجال مغناطيسي منتظم مقداره $B = 0.250$ T ويؤثر في اتجاه y السالب، كما هو موضح في (الشكل 7.30a). وتصنع الحلقة زاوية $\theta = 33.0°$ مع المحور y، كما هو موضح في الشكل. يسري في الحلقة تيار شدته $i = 9.00$ A في الاتجاه الموضح بالأسهم.

المسألة

ما مقدار العزم المؤثر في الحلقة حول المحور z؟

يُتبع–

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education



الشكل 7.30 (a) حلقة مستطيلة يسرى فيها تيار موضوعة في مجال مغناطيسي. (b) منظر للحلقة المستطيلة بالنظر إليها على امتداد المستوى *xy*. يتعامد عزم ثنائي القطب المغناطيسي على مستوى الحلقة وحدّد اتجاهه القاعدةُ الثانية لليد اليمنى.

الحل

فكّر العزم المؤثر في الحلقة يساوي ناتج الضرب الاتجاهي لعزم ثنائي القطب المغناطيسي والمجال المغناطيسي. وعزم ثنائي القطب المغناطيسي عمودي على مستوى الحلقة، ونحدّد اتجاهه باستخدام القاعدة الثانية لليد اليمنى.

ارسم يوضح الشكل 7.30b منظر الحلقة وهي متجهة إلى أسفل على المستوى *xy*.

ابحث مقدار عزم ثنائي القطب المغناطيسي للحلقة هو

$$\mu = NiA = iwh \quad \text{(i)}$$

مقدار العزم المؤثر في الحلقة هو

$$\tau = \mu B \sin\theta_{\mu B} \quad \text{(ii)}$$

حيث $\theta_{\mu B}$ الزاوية بين عزم ثنائي القطب المغناطيسي والمجال المغناطيسي. بالنظر إلى الشكل 7.30b، نجد أن

$$\theta_{\mu B} = \theta + 90^\circ \quad \text{(iii)}$$

بسّط يمكننا دمج المعادلات (i) و(ii) و(iii) للحصول على

$$\tau = iwhB\sin(\theta + 90^\circ)$$

احسب بالتعويض بالقيم العددية، نحصل على

$$\tau = (9.00\ \text{A})(4.50\times10^{-2}\ \text{m})(6.50\times10^{-2}\ \text{m})(0.250\ \text{T})[\sin(33.0^\circ + 90^\circ)]$$
$$= 0.0055195\ \text{N m}$$

قرّب سنقرب النتيجة التي توصلنا إليها إلى ثلاثة أرقام معنوية:

$$\tau = 5.52\times10^{-3}\ \text{N m}$$

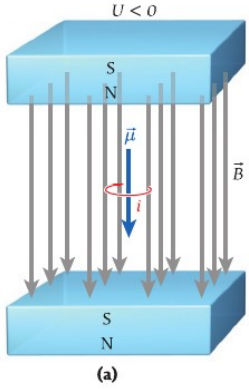
تحقّق ثانية مقدار القوة المؤثرة في كل من الحافتين الرأسيتين للحلقة يساوي

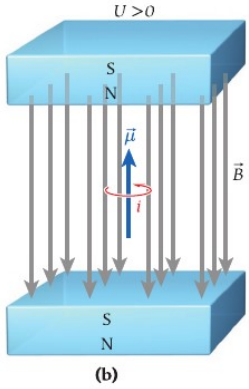
$$F_B = ihB = (9.00\ \text{A})(6.50\times10^{-2}\ \text{m})(0.250\ \text{T}) = 0.146\ \text{N}$$

يساوي مقدار العزم عندئذٍ مقدار القوة المؤثرة في الحافة الرأسية التي ليست على امتداد المحور *z* مضروبًا في ذراع العزم (وهو *w*) مضروبًا في جيب الزاوية المحصورة بين القوة وذراع العزم:

$$\tau = Fw\sin(33.0^\circ + 90^\circ) = 0.146\ \text{N}(4.50\times10^{-2}\ \text{m})[\sin(33.0^\circ + 90^\circ)] = 5.52\times10^{-3}\ \text{N m}$$

وهذه هي النتيجة نفسها المحسوبة أعلاه.





الشكل 7.31 متجه عزم ثنائي القطب المغناطيسي في مجال مغناطيسي خارجي: (a) عندما يتوازى ثنائي القطب المغناطيسي مع المجال المغناطيسي الخارجي. تنتج طاقة وضع سالبة؛ (b) وعندما يكون ثنائي القطب المغناطيسي عكسي التوازي مع المجال المغناطيسي الخارجي. تنتج طاقة وضع موجبة.

لثنائي القطب المغناطيسي طاقة وضع في المجال المغناطيسي الخارجي. إذا كان عزم ثنائي القطب موازيًا للمجال المغناطيسي، فإن مقدار طاقة الوضع لثنائي القطب يكون أقل ما يكون. وإذا كان عزم ثنائي القطب في عكس اتجاه المجال الخارجي، فإن مقدار طاقة الوضع لثنائي القطب يكون أكبر ما يكون. نعلم أن الشغل الذي يبذله العزم يساوي

$$W = \int_{\theta_0}^{\theta} \tau(\theta')d\theta' \quad (7.18)$$

باستخدام نظرية الشغل والطاقة والمعادلة 7.16 وبوضع $\theta_0 = 90^\circ$، يمكننا التعبير عن طاقة الوضع المغناطيسية، U، لثنائي القطب المغناطيسي في مجال مغناطيسي خارجي، $\vec{B}$ كما يلي

$$W = \int_{\theta_0}^{\theta} \tau(\theta)d\theta' = \int_{\theta_0}^{\theta} \mu B\sin\theta'\,d\theta' = -\mu B\cos\theta'\Big|_{\theta_0}^{\theta} = U(\theta) - U(90^\circ)$$

أو

$$U(\theta) = -\mu B\cos\theta = -\vec{\mu}\cdot\vec{B} \quad (7.19)$$

حيث θ الزاوية بين عزم ثنائي القطب المغناطيسي والمجال المغناطيسي الخارجي.

تصل طاقة وضع ثنائي القطب المغناطيسي في مجال مغناطيسي خارجي إلى أدنى قيمة لها، $-\mu B$، عندما يكون متجه العزم المغناطيسي لثنائي القطب موازيًا لمتجه المجال المغناطيسي الخارجي. وتنتج أعلى قيمة، $+\mu B$، عندما يكون المتجهان عكسيا التوازي (انظر الشكل 7.31). وتعتمد طاقة الوضع على الاتجاه

McGraw-Hill Education محفوظة لصالح مؤسسة © حقوق الطبع والتأليف

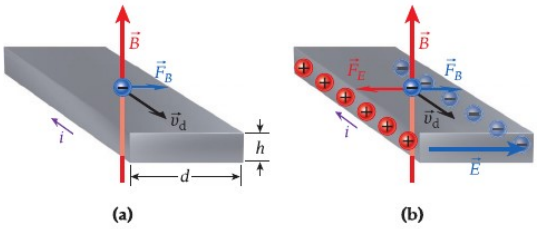
في حالات فيزيائية متنوعة، عندما تكون ثنائيات الأقطاب المغناطيسية في المجالات المغناطيسية الخارجية مجرد نموذج بسيط. إنّ ثنائيات الأقطاب المغناطيسية الوحيدة التي درسناها حتى الآن هي حلقات يسري فيها تيار. لكن توجد أنواع أخرى من ثنائيات الأقطاب المغناطيسية تشمل القضبان المغناطيسية وكذلك الأرض. كما أن للجسيمات الأولية المشحونة، مثل البروتونات، لها عزم ثنائي قطب مغناطيسي داخلي.

7.3 سؤال الاختبار الذاتي

ما أقصى فرق في طاقة الوضع المغناطيسية بين اتجاهين مختلفين لحلقة مساحتها $0.100\ m^2$ يمر فيها تيار شدته $2.00\ A$ وموضوعة في مجال مغناطيسي مقداره $0.500\ T$؟

7.7 تأثير هول Hall Effect

افترض أن موصلاً يسري فيه تيار، i، يتدفق في اتجاه متعامد على مجال مغناطيسي $\vec{B}$ (الشكل 7.32a). تتحرك الإلكترونات في الموصل بسرعة متجهة $\vec{v}_d$ في الاتجاه المعاكس للتيار. وتتعرض الإلكترونات المتحركة لقوة متعامدة على سرعتها المتجهة، ما يجعلها تتحرك نحو حافة واحدة للموصل. بعد مرور فترة من الزمن، تكون إلكترونات كثيرة قد تحركت إلى حافة واحدة للموصل، ما يولد شحنة سالبة على هذه الحافة ويترك شحنة موجبة على الحافة المقابلة للموصل. ينتج عن توزيع الشحنة هذا مجال كهربائي، $\vec{E}$. يبذل قوة على الإلكترونات في اتجاه معاكس لاتجاه القوة التي يبذلها المجال المغناطيسي. وعندما يكون مقدار القوة التي يبذلها المجال الكهربائي على الإلكترونات مساويًا لمقدار القوة التي يبذلها المجال المغناطيسي، فإن العدد الكلي للإلكترونات على حواف الموصل لن يتغير مع مرور الزمن. تسمى هذه النتيجة **تأثير هول**. ويُطلق على فرق الجهد، ΔV_H، بين حواف الموصل عند الوصول إلى حالة الاتزان **فرق جهد هول**، ونحصل عليه من المعادلة



الشكل 7.32 (a) موصل يسري فيه تيار موضوع في مجال مغناطيسي. وناقلات الشحنة هي الإلكترونات. (b) انساقت الإلكترونات إلى جانب واحد من الموصل، تاركةً شحنة موجبة صافية على الجانب المقابل. ينتج عن توزيع الشحنات هذا مجال كهربائي. وفرق الجهد عبر الموصل هو فرق جهد هول.

$$\Delta V_H = Ed \tag{7.20}$$

حيث d عرض الموصل، وE مقدار المجال الكهربائي الناتج.

يمكن استخدام تأثير هول لإثبات أن ناقلات الشحنة في الفلزات تكون سالبة الشحنة. فإذا كانت ناقلات الشحنة في الفلز موجبة الشحنة وتتحرك في اتجاه التيار الموضح في الشكل 7.32a، فإن هذه الشحنات الموجبة ستتجمع على حافة الموصل نفسها مثل الإلكترونات في الشكل 7.32b، ناتجًا عنها مجال كهربائي مختلف الشحنة. لذا تكون ناقلات الشحنة سالبة، ومن ثَمَّ فهي إلكترونات. كما يُثبت تأثير هول أنه في بعض أشباه الموصلات، تكون ناقلات الشحنة عبارة عن فجوات (إلكترونات مفقودة)، والتي تبدو وكأنها ناقلات موجبة الشحنة.

يمكن استخدام تأثير هول أيضًا لإيجاد مقدار المجال المغناطيسي عن طريق قياس التيار المتدفق في الموصل وفرق الجهد الناتج عبر الموصل. للحصول على قانون إيجاد المجال المغناطيسي، نبدأ بشرط الاتزان لتأثير هول، أي تَساوي مقدارَي القوة المغناطيسية والقوة الكهربائية:

$$F_E = F_B \Rightarrow eE = v_d Be \Rightarrow B = \frac{E}{v_d} = \frac{\Delta V_H}{v_d d} \tag{7.21}$$

حيث نعوض عن E من المعادلة 7.20 في الخطوة الأخيرة. وعلمنا أن سرعة الانسياق v_d، لإلكترون في موصل يمكن أن ترتبط بمقدار شدة التيار، J، في الموصل:

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

حيث A مساحة المقطع العرضي للموصل، وn عدد الإلكترونات لكل وحدة حجم في الموصل. كما هو موضح في الشكل 7.32a، نحصل على مساحة المقطع العرضي من المعادلة $A = dh$، حيث d عرض الموصل وh سمكه. بحل $i/A = nev_d$ لإيجاد سرعة الانسياق، وبالتعويض بـ hd عن A نحصل على

$$v_d = \frac{i}{Ane} = \frac{i}{hdne}$$

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

بالتعويض عن v_d في المعادلة 7.21، نحصل على

$$B = \frac{\Delta V_H}{v_d d} = \frac{\Delta V_H dhne}{id} = \frac{\Delta V_H hne}{i} \quad (7.22)$$

وهكذا، تعطي المعادلة 7.22 شدة المجال المغناطيسي (المقدار) من قيمة مقيسة لفرق جهد هول، ΔV_H، والسمك المعلوم، h، وكثافة ناقلات الشحنة، n، للموصل. وبالمثل، يمكن إعادة ترتيب المعادلة 7.22 واستخدامها لإيجاد جهد هول إذا كانت شدة المجال المغناطيسي معلومة:

$$\Delta V_H = \frac{iB}{neh} \quad (7.23)$$

مثال 7.5 تأثير هول

لنفترض أننا نستخدم مسبار هول لقياس مقدار مجال مغناطيسي منتظم. مسبار هول عبارة عن شريط نحاسي سمكه، h، يساوي 2.00 mm. مقدار الجهد المقيس عبر المسبار هو 0.250 μV عندما تمر فيه تيارًا شدته 1.25 A.

المسألة

ما مقدار المجال المغناطيسي؟

الحل

نحصل على المجال المغناطيسي من المعادلة 7.22:

$$B = \frac{\Delta V_H hne}{i}$$

نعرف من المعطيات قيم V_H وh، وi. ونعرف قيمة e. نُعرّف كثافة الإلكترونات، n، بأنها عدد الإليكترونات لكل وحدة حجم:

$$\frac{\text{عدد الإلكترونات}}{\text{الحجم}} = n$$

كثافة النحاس تساوي $\rho_{Cu} = 8.96\ \text{g/cm}^3 = 8960\ \text{kg/m}^3$، وكتلة المول الواحد من النحاس تساوي 63.5 g و6.02×10^{23} من الذرات. فلكل ذرة من النحاس إلكترون توصيل واحد. ومن ثمَّ فإن كثافة الإلكترونات تساوي

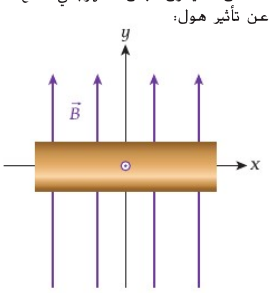
$$n = \left(\frac{\text{إلكترون واحد}}{\text{ذرة واحدة}}\right)\left[\frac{6.02\times10^{23}\ \text{ذرة}}{63.5\ \text{g}}\right]\left[\frac{8.96\ \text{g}}{1\ \text{cm}^3}\right]\left[\frac{1.0\times10^{6}\ \text{cm}^3}{1\ \text{m}^3}\right] = 8.49\times10^{28}\ \frac{\text{إلكترونًا}}{\text{m}^3}$$

يمكننا الآن حساب مقدار المجال المغناطيسي:

$$B = \frac{(0.250\times10^{-6}\ \text{V})(0.002\ \text{m})\left[8.49\times10^{28}\ \frac{\text{إلكترونًا}}{\text{m}^3}\right](1.602\times10^{-19}\ \text{C})}{1.25\ \text{A}} = 5.44\ \text{T}$$

مراجعة المفاهيم 7.5

موصل يمر فيه تيار موضوع في مجال مغناطيسي منتظم، كما هو موضح في الشكل. سيكون المجال الكهربائي الناتج عن تأثير هول:



a) في اتجاه x الموجب.

b) في اتجاه x السالب.

c) في اتجاه y الموجب.

d) في اتجاه y السالب.

ما تعلمناه | دليل المذاكرة للاختبار

- تُشير خطوط المجال إلى اتجاه المجال المغناطيسي في الفراغ. لا تنتهي خطوط المجال المغناطيسي عند الأقطاب المغناطيسية، بل تشكل حلقات مقفلة.
- نحصل على القوة المغناطيسية المؤثرة في جسيم شحنته q ويتحرك بسرعة متجهة $\vec{v}$ في مجال مغناطيسي منتظم $\vec{B}$، من خلال المعادلة $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$. ونعرف اتجاه القوة باستخدام القاعدة الأولى لليد اليمنى.
- عندما يتحرك جسيم شحنته q بسرعة v عموديًا على مجال مغناطيسي مقداره B، فإن مقدار القوة المغناطيسية المؤثرة في الجسيم المشحون المتحرك يساوي $F = |q|vB$.
- وحدة قياس شدة المجال المغناطيسي هي التسلا، واختصارها T.
- يبلغ متوسط مقدار المجال المغناطيسي للأرض عند السطح حوالي 0.5×10^{-4} T.
- عندما يتحرك جسيم كتلته m وشحنته q بسرعة v عموديًا على مجال مغناطيسي مقداره B، فإن مسار حركته يمثل دائرة نصف قطرها $r = mv / |q|B$.
- نحصل على تردد المسرّع الدوراني، ω، لجسيم شحنته q وكتلته m يتحرك في مدار دائري في مجال مغناطيسي منتظم مقداره B من خلال المعادلة $\omega = |q|B/m$.

McGraw-Hill Education محفوظة لصالح مؤسسة © حقوق الطبع والتأليف

- نحصل على القوة التي يبذلها المجال المغناطيسي، $\vec{B}$، على طول سلك، $\vec{L}$، يسري فيه تيار، i، من خلال المعادلة $\vec{F} = i\vec{L} \times \vec{B}$. ومقدار هذه القوة هو $F = iLB \sin\theta$ حيث θ الزاوية المحصورة بين اتجاه التيار واتجاه المجال المغناطيسي.
- مقدار العزم المؤثر في حلقة يسري فيها تيار، i، في مجال مغناطيسي مقداره B هو $\tau = iAB \sin\theta$، حيث A مساحة الحلقة وθ الزاوية بين متجه الوحدة العمودي على الحلقة واتجاه المجال المغناطيسي. نعرف اتجاه متجه الوحدة العمودي على الحلقة باستخدام القاعدة الثانية لليد اليمنى.
- يمكننا إيجاد مقدار عزم ثنائي القطب المغناطيسي لملف يسري فيه تيار، i، من خلال المعادلة $\mu = NiA$، حيث N عدد الحلقات (اللفات) وA مساحة الحلقة. يمثل اتجاه عزم ثنائي القطب متجه الوحدة العمودي، ونحدّده باستخدام القاعدة الثانية لليد اليمنى.
- ينتج تأثير هول عندما يتدفق تيار i، في موصل سمكه h موجودٍ في مجال مغناطيسي مقداره B مُنتجًا فرق جهد عبر الموصل (فرق جهد هول). ونحصل عليه من خلال المعادلة $\Delta V_H = iB/neh$، حيث n عدد الإلكترونات لكل وحدة حجم، و e مقدار شحنة الإلكترون.

إجابات أسئلة الاختبار الذاتي

7.1 الجسيم 1: $F_B = qvB\sin\theta =$
$(6.15 \times 10^{-6}\ \text{C})(465\ \text{m/s})(0.165\ \text{T})(\sin 30.0°) = 2.36 \cdot 10^{-4}\ \text{N}$

الجسيم 2: $F_B = qvB\sin\theta =$
$(6.15 \times 10^{-6}\ \text{C})(465\ \text{m/s})(0.165\ \text{T})(\sin 90.0°) = 4.72 \cdot 10^{-4}\ \text{N}$

الجسيم 3: $F_B = qvB\sin\theta =$
$(6.15 \times 10^{-6}\ \text{C})(465\ \text{m/s})(0.165\ \text{T})(\sin 150.0°) = 2.36 \times 10^{-4}\ \text{N}$

7.2 a) موجبة
b) تقلّ سرعته
c) لا (لذا لابد أنّ قوة أخرى تؤثر في الجسيم لتقلل من سرعته).

7.3 $\Delta U = U_{max} - U_{min} = 2\mu B = 2iAB =$
$2(2.00\ \text{A})(0.100\ \text{m}^2)(0.500\ \text{T}) = 0.200\ \text{J}$

إرشادات حل المسائل

1. عند التعامل مع المجالات والقوى المغناطيسية، ستحتاج إلى إنشاء رسم تخطيطي واضح للمسألة في ثلاثة أبعاد. غالبًا ما يكون رسم السرعة المتجهة ومتجهات المجال المغناطيسي (أو طول السلك ومتجهات المجال) على حدة مفيدًا في تصور المستوى الذي يقعون عليه، حيث ستكون القوة المغناطيسية عمودية على ذلك المستوى.

2. تذكر أن قواعد اليد اليمنى تنطبق على الشحنات والتيارات الموجبة. فإذا كانت الشحنة سالبةً أو التيار سالبًا، فيمكنك استخدام قاعدة اليد اليمنى، وعندئذٍ ستكون القوة في الاتجاه المعاكس.

3. يتعرض الجسيم الموجود في مجال كهربائي ومجال مغناطيسي لقوة كهربائية، $\vec{F}_E = q\vec{E}$، وقوة مغناطيسية، $\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$. لذا تأكد من جمع القوى الفردية جمعًا اتجاهيًا.

أسئلة الاختيار من متعدد

7.1 مجال مغناطيسي موجه في اتجاه معين في مستوى أفقي، ويتحرك إلكترون في اتجاه معين في المستوى الأفقي. في هذه الحالة، يوجد
a) اتجاه واحد محتمل للقوة المغناطيسية المؤثرة في الإلكترون.
b) اتجاهان محتملان للقوة المغناطيسية المؤثرة في الإلكترون.
c) عدد لانهائي من الاتجاهات المحتملة للقوة المغناطيسية المؤثرة في الإلكترون.

7.2 جسيم شحنته q ظل في وضع السكون عند تشغيل مجال مغناطيسي فجأة. وكان تأثير المجال في اتجاه z. ما اتجاه محصلة القوى المؤثرة في الجسيم المشحون؟
a) في اتجاه x
b) في اتجاه y
c) محصلة القوى تساوي صفرًا.
d) في اتجاه z

7.3 أي مما يلي له أكبر تردد للمسرع الدوراني؟
a) إلكترون يتحرك بسرعة v في مجال مغناطيسي مقداره B
b) إلكترون يتحرك بسرعة $2v$ في مجال مغناطيسي مقداره B
c) إلكترون يتحرك بسرعة $v/2$ في مجال مغناطيسي مقداره B
d) إلكترون يتحرك بسرعة $2v$ في مجال مغناطيسي مقداره $B/2$
e) إلكترون يتحرك بسرعة $v/2$ في مجال مغناطيسي مقداره $2B$

7.4 في تأثير هول، نحصل على فرق الجهد الناتج عبر موصل ذي سمك محدّد في مجال مغناطيسي ناتج عن تيار متدفق في الموصل من
a) قسمة حاصل ضرب كثافة الإلكترونات، وشحنة الإلكترون، وسمك الموصل على حاصل ضرب مقدار التيار ومقدار المجال المغناطيسي.
b) المعكوس الضربي للتعبير المذكور في الاختيار (a).
c) قسمة حاصل ضرب شحنة الإلكترون، وسمك الموصل على حاصل ضرب كثافة الإلكترونات ومقداري التيار والمجال المغناطيسي.
d) المعكوس الضربي للتعبير المذكور في الاختيار (c).
e) لا شيء مما سبق.

7.5 يتحرك إلكترون (شحنته $-e$ وكتلته m_e) في اتجاه x الموجب فدخل جهاز محدد السرعات. ويتكون جهاز محدد السرعات من مجالات إلكترونية ومغناطيسية متقاطعة؛ وكان تأثير $\vec{E}$ في اتجاه y الموجب، بينما كان تأثير $\vec{B}$ في اتجاه z الموجب. وبالنسبة إلى السرعة المتجهة v (في اتجاه x الموجب)، كانت محصلة القوى المؤثرة في الإلكترون صفرًا. ويتحرك الإلكترون في مسار مستقيم خلال محدد السرعات.

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

ما السرعة المتجهة التي سينحرك بها بروتون (شحنته $+e$ وكتلته $m_p = 1836\, m_e$) في مسار مستقيم خلال منتقي السرعات؟

a) v c) $v/1836$

b) $-v$ d) $-v/1836$

7.6 في أي اتجاه تؤثر القوة المغناطيسية في إلكترون يتحرك في اتجاه x الموجب في مجال مغناطيسي يؤثر في اتجاه z الموجب؟

a) اتجاه y الموجب c) اتجاه x السالب

b) اتجاه y السالب d) أي اتجاه في المستوى xy

7.7 A يتحرك جسيم مشحون في مجال مغناطيسي منتظم. أي من العبارات التالية صحيحة حول القوة المغناطيسية المبذولة على الجسيم؟ (افترض أن المجال المغناطيسي ليس موازيًا للسرعة المتجهة أو عكسي التوازي معها).

a) لا تبذل شغلاً على الجسيم.

b) قد تزيد من سرعة الجسيم.

c) قد تُغيِّر السرعة المتجهة للجسيم.

d) يمكن أن تؤثر في الجسيم أثناء وجوده في حالة حركة فقط.

e) لا تُغيِّر الطاقة الحركة للجسيم.

7.8 يتحرك إلكترون في مسار دائري نصف قطره r_i في مجال مغناطيسي منتظم. ما نصف القطر النهائي للمسار عندما يتضاعف مقدار المجال المغناطيسي؟

a) $\frac{r_i}{4}$ c) r_i

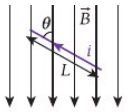
b) $\frac{r_i}{2}$ d) $2r_i$ e) $4r_i$

7.9 تصل بروتونات الرياح الشمسية إلى المجال المغناطيسي للأرض بسرعة 400 km/s. إذا كانت مقدار هذا المجال هو 5.0×10^{-5} T وكانت سرعة البروتونات المتجهة عمودية عليها. فما تردد المسرع الدوراني للبروتونات بعد دخول المجال؟

a) 122 Hz c) 321 Hz e) 763 Hz

b) 233 Hz d) 432 Hz

7.10 جزء معزول من سلك طوله $L = 4.50$ m يسري فيه تيار مقداره $i = 35.0$ A ويميل بزاوية $\theta = 50.3°$ بالنسبة إلى مجال مغناطيسي ثابت مقداره $B = 6.70 \times 10^{-2}$ T (انظر الشكل). ما مقدار القوة المغناطيسية المؤثرة في السلك؟



a) 2.66 N

b) 3.86 N

c) 5.60 N

d) 8.12 N

e) 11.8 N

7.11 يتكون ملف من حلقات دائرية نصف قطرها $r = 5.13$ cm و$N = 47$ لفة. ويتدفق تيار $i = 1.27$ A عبر الملف الموضع في مجال مغناطيسي منتظم مقداره 0.911 T. ما أقصى عزم يؤثر في الملف نتيجة المجال المغناطيسي؟

a) 0.148 N m

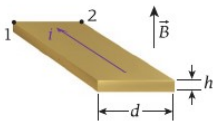
b) 0.211 N m

c) 0.350 N m

d) 0.450 N m

e) 0.622 N m

7.12 موصل نحاسي يتدفق فيه تيار $i = 1.41$ A، متعامدًا على مجال مغناطيسي منتظم مقداره $B = 4.94$ T، كما هو موضح في الشكل. يبلغ عرض الموصل $d = 0.100$ m ويبلغ سمكه $h = 2.00$ mm. ما مقدار فرق الجهد الكهربائي بين النقطتين 1 و2؟



a) 2.56×10^{-9} V

b) 5.12×10^{-9} V

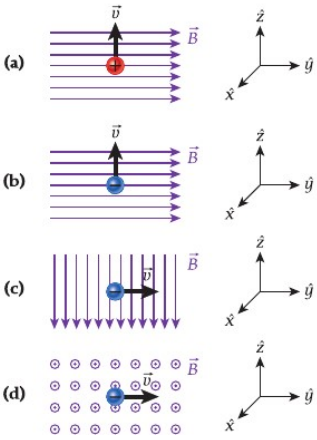
c) 7.50×10^{-8} V

d) 2.56×10^{-7} V

e) 9.66×10^{-7} V

أسئلة مفاهيمية

7.13 ارسم القوة المغناطيسية المؤثرة في كل الجسيمات المتحركة الموضحة في الأشكال على النظام الإحداثي xyz وحدد اتجاهها (بدلالة متجهات الوحدة $\hat{x}$ و$\hat{y}$ و$\hat{z}$). *ملحوظة:* يتجه محور y الموجب إلى اليمين، ويتجه محور z الموجب إلى أعلى الصفحة. ويتجه محور x الموجب إلى خارج الصفحة.



7.14 جسيم كتلته m، وشحنته q، وسرعته المتجهة v، دخل مجالًا مغناطيسيًا مقداره B ويؤثر في اتجاه متعامد على السرعة الابتدائية للجسيم. ما الشغل الذي يبذله المجال المغناطيسي على الجسيم؟ كيف يؤثر ذلك في حركة الجسيم؟

7.15 يتحرك إلكترون بسرعة متجهة ثابتة. عندما يدخل في مجال كهربائي متعامد على سرعته المتجهة، سيسلك الإلكترون مسارًا _____. وعندما يدخل الإلكترون في مجال مغناطيسي متعامد على سرعته المتجهة، سيسلك مسارًا _____.

7.16 بروتون يتحرك في اتجاه y السالب في مجال مغناطيسي تعرض لقوة مقدارها F تؤثر في اتجاه x السالب.

a) ما اتجاه المجال المغناطيسي الناتج عن هذه القوة؟

b) هل ستتغير إجابتك إذا كان الجسيم المعطى في المسألة "إلكترونًا"، لا "بروتونًا"؟

7.17 في المنطقة التي تكون فيها كثافة التيار صفرًا، من الممكن رياضيًا تحديد جهد مغناطيسي قياسي مشابه للجهد الكهروستاتيكي: $\vec{B}(\vec{r}) = -\nabla V_B(\vec{r})$ أو $V_B(\vec{r}) = -\int_{\vec{r}_0}^{\vec{r}} \vec{B} \cdot d\vec{s}$ لكن لم يحدث ذلك. اشرح لماذا لم يحدث ذلك.

7.18 وُضع سلك يسري فيه تيار داخل مجال مغناطيسي كبير ومنتظم، $\vec{B}$. لكن لم يتأثر السلك بأي قوة. اشرح كيف يمكن أن يحدث ذلك.

7.19 يتحرك جسيم مشحون تحت تأثير مجال كهربائي فقط. هل من الممكن أن يتحرك الجسيم بسرعة ثابتة؟ ماذا يحدث لو استُبدل المجال الكهربائي بمجال مغناطيسي؟

7.20 يتحرك جسيم مشحون بسرعة v، بزاوية θ بالنسبة إلى المحور z. فدخل عند اللحظة الزمنية $t = 0$ منطقة فراغ يوجد فيها مجال مغناطيسي مقداره B في اتجاه zالموجب. متى سيخرج من منطقة الفراغ هذه؟

7.21 إذا حُرك إلكترون أفقيًا من الشمال الغربي تجاه الجنوب الشرقي في منطقة فراغ يكون فيها تأثير المجال المغناطيسي للأرض أفقيًا نحو الشمال، فما اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة في الإلكترون؟

McGraw-Hill Education حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة

7.22 عند سطح الأرض، يوجد مجال كهربائي تأثيره إلى أسفل تقريبًا ومقداره 150 V/m. افترض أن لديك مدفع إلكترونات يمكن ضبطه (بحيث يمكنك إطلاق الإلكترونات بأي طاقة حركية تريدها) وجهاز كشف لتحديد اتجاه حركة الإلكترونات عند مغادرتها للمدفع. اشرح كيف يمكنك استخدام المدفع لإيجاد الاتجاه نحو القطب المغناطيسي الشمالي. وما الطاقة الحركية التي تحتاج إليها الإلكترونات على وجه التحديد؟ (*تلميح:* قد يكون من الأسهل التفكير في تحديد الاتجاه الشرقي أو الغربي).

7.23 يساوي الشغل الذي يبذله المجال المغناطيسي على جسيم مشحون متحرك في المسرع الدوراني صفرًا . كيف يمكن إذًا استخدام المسرع الدوراني كمسرع للجسيمات، وما الميزة الأساسية لحركة الجسيم التي تجعل هذا ممكنًا؟

تمارين

يشير رقم المسألة الأزرق إلى توفر حل في دليل حلول الطالب. وتشير علامة النقطة الواحدة • والنقطتين •• إلى زيادة مستوى صعوبة المسألة.

القسم 7.2

7.24 يتحرك بروتون بسرعة 4.00×10^5 m/s في اتجاه y الموجب فدخل مجالًا مغناطيسيًا منتظمًا مقداره 0.400 T ويؤثر في اتجاه xالموجب. احسب مقدار القوة المغناطيسية المؤثرة في البروتون.

7.25 مقدار القوة المغناطيسية المؤثرة في جسيم شحنته $-2e$ ويتحرك بسرعة $v = 1.00 \cdot 10^5$ m/s هو 3.00×10^{-18} N . ما مقدار مركّبة المجال المغناطيسي العمودية على اتجاه حركة الجسيم؟

7.26 • يتحرك جسيم شحنته +10.0 μC بسرعة 300. m/s في اتجاه z الموجب.

a) أوجد أقل مقدار للمجال المغناطيسي اللازم للحفاظ على حركة الجسيم في مسار مستقيم بسرعة ثابتة إذا كان هناك مجال كهربائي منتظم مقداره 100 V/m يؤثر في اتجاه y الموجب.

b) أوجد أقل مقدار للمجال المغناطيسي اللازم للحفاظ على حركة الجسيم في مسار مستقيم بسرعة ثابتة إذا كان هناك مجال كهربائي منتظم مقداره 100 V/m يؤثر في اتجاه z الموجب.

7.27 • يتحرك جسيم شحنته 20.0 μC على امتداد المحور x بسرعة 50.0 m/s. فدخل مجالاً مغناطيسيًا مقداره $\vec{B} = 0.300\hat{y} + 0.700\hat{z}$ بوحدة التسلا. أوجد القوة المغناطيسية المؤثرة في الجسيم مقدارًا واتجاهًا.

7.28 •• نحصل على المجال المغناطيسي في منطقة في الفراغ (حيث $x > 0$ و$y > 0$) من خلال المعادلة $\vec{B} = (x - az)\hat{y} + (xy - b)\hat{z}$. حيث a وb ثابتان موجبان. إذا دخل إلكترون متحرك بسرعة متجهة ثابتة، $\vec{v} = v_0\hat{x}$، هذه المنطقة، فما إحداثيات النقاط التي تكون عندها محصلة القوى المؤثرة في الإلكترون مساوية صفرًا؟

القسم 7.3

7.29 بروتون يتسارع من السكون بفرق جهد 400. V. وعندما دخل مجالاً مغناطيسيًا منتظمًا، سلك مسارًا دائريًا نصف قطره 20.0 cm. أوجد مقدار المجال المغناطيسي.

7.30 إلكترون سرعته 4.00×10^5 m/s دخل مجالاً مغناطيسيًا منتظمًا مقداره 0.0400 T بزاوية 35.0° بالنسبة إلى خطوط المجال المغناطيسي. إذا سلك الإلكترون مسارًا حلزونيًا، فأوجد ما يلي:

a) نصف قطر المسار الحلزوني.

b) المسافة التي سيتحركها الإلكترون إلى الأمام بعد إكمال دورة واحدة.

7.31 جسيم كتلته m وشحنته q يتحرك داخل مجال كهربائي ومجال مغناطيسي، $\vec{E}$ و$\vec{B}$. إذا كانت سرعة الجسيم $\vec{v}$، وكمية حركته $\vec{p}$، وطاقته الحركية K، فأوجد التعبيرات العامة لـ $d\vec{p}/dt$ وdK/dt بدلالة هذه الكميات السبع.

7.32 أُمطرت الأرض بكمية كبيرة من جزيئات كونية تُعرف باسم *الميونات*. ولهذه الجسيمات شحنة تماثل لشحنة الإلكترون، لكنها أثقل بكثير ($m = 1.88 \times 10^{-28}$ kg). افترض أنه تمّ توليد مجال مغناطيسي قوي مقداره $B = 0.500$ T في مختبر ودخل ميونٌ هذا المجال بسرعة متجهة 3.00×10^6 m/s بزاوية قائمة بالنسبة إلى المجال. كم سيكون نصف قطر المدار الناتج للميون؟

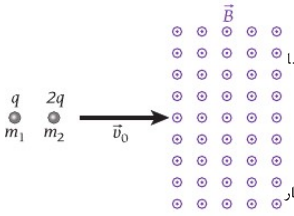
7.33 يتحرك إلكترون في مجال مغناطيسي عكس اتجاه عقارب الساعة في دائرة على المستوى xy. إذا كان تردد المسرّع الدوراني $\omega = 1.20 \times 10^{12}$ Hz. فما مقدار المجال المغناطيسي، $\vec{B}$؟

7.34 إلكترون طاقته تساوي 4.00×10^2 eV وإلكترون طاقته تساوي 2.00×10^2 eV محصوران في مجال مغناطيسي منتظم ويتحركان في مسارين دائريين في مستوى عمودي على المجال المغناطيسي. ما النسبة بين نصفَي قطري مداريهما؟

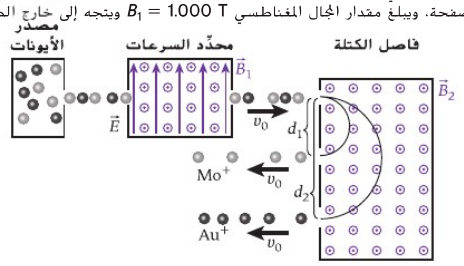
7.35 • بروتون سرعته المتجهة الأولية $(10^5 \text{ m/s})(1.00\hat{x} + 2.00\hat{y} + 3.00\hat{z})$ دخال مجالاً مغناطيسيًا مقداره $(0.500 \text{ T})\hat{z}$. صِف حركة البروتون.

7.36 • كرة نحاسية صغيرة كتلتها 3.00×10^{-6} kg وشحنتها 5.00×10^{-4} C تسارعت بدءًا من وضع السكون عبر فرق جهد 7000.–V قبل دخولها مجالًا مغناطيسيًا مقداره 4.00 T موجهًا بشكل عمودي على سرعتها المتجهة. ما نصف قطر انحناء حركة الكرة في المجال المغناطيسي؟

7.37 • جسيمان كتلتاهما m_1 وm_2 وشحنتاهما q و$2q$ يتحركان بالسرعة المتجهة نفسها، v. فدخلا مجالًا مغناطيسيًا شدته B عند النقطة نفسها، كما هو موضح في الشكل. وفي المجال المغناطيسي، تحركا في مسارَين على شكل نصف دائرة نصفا قطريهما R و$2R$. ما النسبة بين كتلتيهما؟ هل من الممكن تطبيق مجال كهربائي يؤدي إلى تحرك الجسيمات في مسار مستقيم في المجال المغناطيسي؟ إذا كانت الإجابة هي نعم، فما مقدار المجال واتجاهه؟



7.38 • يوضح الشكل رسمًا تخطيطيًا لمطياف كتلة بسيط يتكون من منتقي سرعات وجهاز كشف عن الجسيمات حال استخدامه لفصل ذرات الذهب (Au) والموليبدنوم (Mo) أحادية التأين ($q = +e = 1.602 \times 10^{-19}$ C). يبلغ مقدار المجال الكهربائي داخل محدد السرعات $E = 1.789 \times 10^4$ V/m ويتجه إلى أعلى الصفحة، ويبلغ مقدار المجال المغناطيسي $B_1 = 1.000$ T ويتجه إلى خارج الصفحة.



a) ارسم متجه القوة الكهربائية، $\vec{F}_E$، ومتجه القوة المغناطيسية، $\vec{F}_B$، المؤثرتين في الأيونات داخل محدد السرعات.

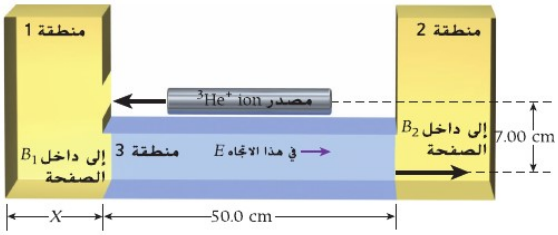
b) احسب السرعة المتجهة، v_0، للأيونات التي تتحرك في مسار مستقيم. هل تعتمد v_0 على نوع الأيون (الذهب مقابل الموليبدنوم)، أم تكون السرعة هي نفسها لكلا نوعي الأيونات؟

c) اكتب معادلة حساب نصف قطر المسار نصف الدائري لأيون في جهاز الكشف عن الجسيمات: $R = R(m, v_0, q, B_2)$.

d) تخرج أيونات الذهب (المثبتة بالكرات الرمادية داكنة اللون) من جهاز الكشف عن الجسيمات عند مسافة $d_2 = 40.00$ cm من فتحة المدخل، بينما تخرج أيونات الموليبدنوم (المثبتة بالكرات الرمادية فاتحة اللون) من جهاز الكشف عن الجسيمات عند مسافة $d_1 = 19.81$ cm من فتحة المدخل. إذا كانت كتلة أيون الذهب تبلغ $m_{gold} = 3.271 \times 10^{-25}$ kg. فاحسب كتلة أيون الموليبدنوم.

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

7.39•• يوضح الشكل مسرع جسيمات صغير يسرع أيونات $^3He^+$. تخرج أيونات $^3He^+$ من مصدر الأيونات بطاقة حركية تبلغ 4.00 keV. وتحتوي المنطقتان 1 و2 على مجالات مغناطيسية موجهة إلى داخل الصفحة، وتحتوي المنطقة 3 على مجال كهربائي موجه من اليسار إلى اليمين. ويخرج شعاع أيونات $^3He^+$ من المسرّع من فتحة موجودة على اليمين تقع على مسافة 7.00 cm أسفل مصدر الأيونات، كما هو موضح في الشكل.



a) إذا كان $B_1 = 1.00$ T وكان طول المنطقة 3 هو 50.0 cm ومقدار مجالها الكهربائي $E = 60.0$ kV/m، فما قيمة B_2 اللازمة لتتحرك الأيونات في مسار مستقيم وتخرج من فتحة الخروج بعد تسريعها مرتين في المنطقة 3؟

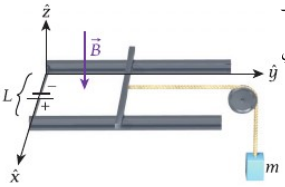
b) ما أقل عرض X يجب أن يكون للمنطقة 1؟

c) ما السرعة المتجهة للأيونات عندما تغادر المسرع؟

القسم 7.4

7.40 وُضع سلك مستقيم طوله 2.00 m يسري فيه تيار 24.0 A على سطح طاولة أفقي في مجال مغناطيسي أفقي منتظم. ويصنع السلك زاوية 30.0° مع خطوط المجال المغناطيسي. إذا كان مقدار قوة المؤثرة في السلك 0.500 N، فما مقدار المجال المغناطيسي؟

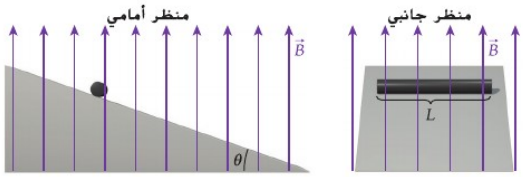
7.41 كما هو موضح في الشكل، يمكن أن ينزلق موصل مستقيم موازٍ للمحور x من دون احتكاك فوق سافي توصيل أفقيين موازيين للمحور y وتفصل بينهما مسافة $L = 0.200$ m. في مجال مغناطيسي رأسي مقداره 1.00 T. ويسري في الموصل تيار منتظم شدته 20.0 A. إذا رُبط خيط في منتصف الموصل تمامًا ومر فوق بكرة عديمة الاحتكاك، فما مقدار الكتلة m التي تُعلق في الخيط بحيث تسمح للموصل بأن يكون في وضع السكون؟



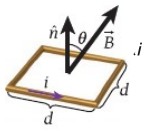
7.42 سلك نحاسي نصف قطره 0.500 mm يسري فيه تيار عند خط الاستواء للأرض. افترض أن المجال المغناطيسي للأرض يساوي 0.500 G عند خط الاستواء وموازٍ لسطح الأرض، وأن التيار الساري في السلك يتدفق تجاه الشرق. فما التيار اللازم للسلك بالارتفاع في الهواء؟

7.43• صفيحة نحاسية طولها 1.00 m، وعرضها 0.500 m، وسمكها 1.00 mm موجهة بحيث تكون أكبر مساحة سطح لها عمودية على مجال مغناطيسي شدته 5.00 T. إذا كانت شدة التيار الساري بطول الصفيحة هي 3.00 A. فما مقدار القوة المؤثرة في هذه الصفيحة؟ ما وجه المقارنة بين هذا المقدار ومقدار القوة المؤثرة في سلك نحاسي رفيع يحمل التيار نفسه وموجه عموديًا على المجال المغناطيسي نفسه؟

7.44• ساق موصّل طوله L ينزلق بحرية إلى أسفل مستوى مائل، كما هو موضح في الشكل. وكانت زاوية ميل المستوى θ بالنسبة إلى المستوى الأفقي. إذا كان هناك مجال مغناطيسي منتظم شدته B يؤثر في اتجاه y الموجب، فأوجد مقدار التيار الكهربائي واتجاهه الذي يجب أن يمر عبر الساق ليثبته في مكانه على المستوى المائل.



7.45• حلقة سلكية مربعة حرة الدوران طول ضلعها $d = 8.00$ cm، ويسري فيها تيار كهربائي مقداره $i = 0.150$ A. وُضعت بين قطبي مغناطيس كهربائي يولد مجالًا مغناطيسيًا منتظمًا مقداره 1.00 T. وكان متجه الحلقة العمودي $\hat{n}$. يصنع في البداية زاوية مقدارها 35.0° مع اتجاه متجه المجال المغناطيسي (كما هي موضحة في الشكل). إذا كان السلك نحاسيًا (كثافته $\rho = 8960$ kg/m^3)، وقطره 0.500 mm، فما مقدار العجلة الزاوية الابتدائية للحلقة لحظة انطلاقها؟



7.46• مدفع كهرومغناطيسي يُسرّع مقذوفًا من وضع السكون باستخدام القوة المغناطيسية المبذولة على سلك يسري فيه تيار كهربائي. وللسلك نصف قطر $r = 5.10 \cdot 10^{-4}$ m وهو مصنوع من النحاس الذي كثافته $\rho = 8960$ kg/m^3. يتكون المدفع من ساقين طول كل منهما $L = 1.00$ m موضوعين في مجال مغناطيسي ثابت مقداره $B = 2.00$ T وموجه عموديًا على مستوى الساقين. وينشئ السلك توصيلًا كهربائيًا عبر الساقين عند طرفيهما. وعند الإطلاق، يتدفق تيار كهربائي مقداره 1.00×10^4 A عبر السلك، ما يُسرّع حركة السلك على امتداد الساقين. احسب السرعة النهائية للسلك لحظة مغادرته للساقين. (تجاهل الاحتكاك).

القسمان 7.5 و7.6

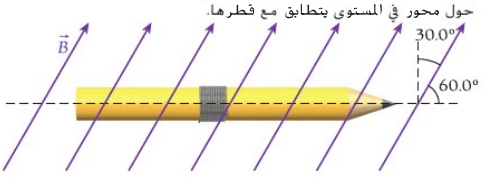
7.47• حلقة سلكية مربعة طول ضلعها ℓ تقع في المستوى xy، بحيث يقع مركزها عند نقطة الأصل وتتوازى أضلاعها مع المحورين x وy. ويسري فيها تيار كهربائي، i، نراه يتدفق عكس اتجاه عقارب الساعة عند النظر إليها على امتداد المحور z من الاتجاه الموجب. تقع الحلقة في مجال مغناطيسي تحدده المعادلة $\vec{B} = (B_0/a)(z\hat{x} + x\hat{z})$، حيث B_0 شدة مجال ثابت، وa ثابت مع بُعد الطول، و$\hat{x}$ و$\hat{z}$ متجهتا وحدة في اتجاه x الموجب واتجاه z الموجب. احسب محصلة القوى المبذولة على الحلقة.

7.48 ملف مستطيل مُكوّن من 20 لفة يسري فيه تيار كهربائي مقداره 2.00 mA متدفقًا عكس اتجاه عقارب الساعة. يتوازى جانبان من الملف مع المحور y وطول كل منهما 8.00 cm. بينما يتوازى الجانبان الآخران مع المحور x وطول كل منهما 6.00 cm. ويؤثر في الملف مجال مغناطيسي منتظم مقداره 50.0 μT في اتجاه x الموجب. ما العزم الذي يجب بذله على الملف لتثبيته في مكانه؟

7.49 ملف يتكون من 120 لفة دائرية من سلك نصف قطره 4.80 cm. ويمر تيار كهربائي مقداره 0.490 A عبر الملف. والملف موجه رأسيًا ويدور بحرية حول محور رأسي (موازٍ للمحور z) ويتعرض الملف لمجال مغناطيسي أفقي منتظم يؤثر في اتجاه x الموجب. إذا وجّه الملف موازيًا للمحور x، فستؤثر قوة مقدارها 1.20 N في حافة الملف في اتجاه y الموجب وبإمكانها منع الملف من الدوران. احسب شدة المجال المغناطيسي.

7.50 تم لف عشرين لفة سلكية بقوة حول قلم رصاص قطره 6.00 mm. ثم وُضع القلم في مجال مغناطيسي منتظم مقداره 5.00 T، كما هو موضح في الشكل. إذا مر تيار كهربائي شدته 3.00 A في حلقات السلك، فما مقدار العزم المبذول على القلم الرصاص؟

7.51• سلك نحاسي كثافته $\rho = 8960$ kg/m^3 تم لفه ليكوّن حلقة دائرية نصف قطرها 50.0 cm. تبلغ مساحة المقطع العرضي للسلك 1.00×10^{-5} m^2. وتُذل على السلك فرق جهد مقداره 0.0120 V. ما أقصى عجلة زاوية للحلقة عند وضعها في مجال مغناطيسي مقداره 0.250 T؟ تدور الحلقة حول محور في المستوى يتطابق مع قطرها.

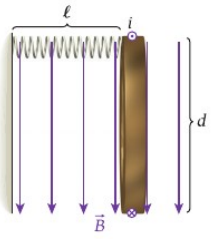


7.52 جلفانومتر بسيط مصنوع من ملف يتكون من N من لفات سلكية مساحتها A. ويتصل الملف بكتلة، M، بواسطة ساق صلب خفيف طوله L. في حالة عدم مرور تيار كهربائي في الملف، تتدلى الكتلة إلى أسفل بشكل مستقيم، ويقع الملف في مستوى أفقي. والملف موضوع في مجال مغناطيسي منتظم مقداره B وموجه أفقيًا. احسب الزاوية من المستوى الرأسي للساق الصلب كدالة للتيار، i، في الملف.

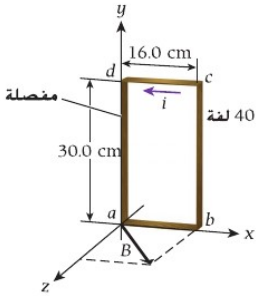
McGraw-Hill Education محفوظة لصالح مؤسسة © حقوق الطبع والتأليف

7.53 أثبتْ أن عزم ثنائي القطب المغناطيسي لإلكترون يدور في ذرة الهيدروجين يتناسب طرديًا مع كمية الحركة الزاوية للإلكترون. $\mu = -eL/(2m)$:L ، حيث $-e$ شحنة الإلكترون وm كتلته.

7.54 • يوضح الشكل منظرًا علويًا لحلقة سلكية يمر فيها تيار كهربائي قطرها $d = 8.00$ cm، وتتدلى من السقف بخيط رفيع. يتدفق تيار كهربائي مقداره 1.00–A في الحلقة في الاتجاه المشار إليه في الشكل. والحلقة متصلة بأحد طرفي زنبرك ثابته 100. N/m. عندما تكون الحلقة في الموضع الموضّح في الشكل، يصل الزنبرك إلى طول اتزانه. ℓ. أوجد استطالة الزنبرك عندما يؤثر فيه مجال مغناطيسي مقداره $B = 2.00$ T في اتجاه موازٍ لمستوى الحلقة، كما هو موضح في الشكل.



7.55 • ملف سلكي يتكون من 40 لفة مستطيلة، عرضه 16.0 cm وطولها 30.0 cm. ووُضع الملف في مجال مغناطيسي منتظم تحدده المعادلة $\vec{B} = 0.0650\text{T}\,\hat{x} + 0.250\text{T}\,\hat{z}$. يتصل الملف عن طريق مفصلة بقضيب رفيع ثابت على طول المحور y (بطول القطعة المستقيمة da الموضحة في الشكل). ويقع أساسًا في المستوى xy. ويمرّ تيار كهربائي مقداره 0.200 A عبر السلك.



a) ما مقدار القوة، $\vec{F}_{ab}$، واتجاهها التي يبذلها $\vec{B}$ على القطعة ab من الملف؟

b) ما مقدار القوة، $\vec{F}_{bc}$، واتجاهها التي يبذلها $\vec{B}$ على القطعة bc من الملف؟

c) ما مقدار محصلة القوى، F_{net}، التي يبذلها $\vec{B}$ على الملف؟

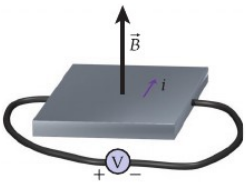
d) ما مقدار العزم، $\vec{\tau}$، واتجاهه الذي يبذله $\vec{B}$ على الملف؟

e) في أي اتجاه، إن وُجد، سيدور الملف حول المحور y (عندما يُنظر إليه من أعلى على امتداد هذا المحور)؟

القسم 7.7

7.56 ترانزستور في دائرة إلكترونية عالية يتحكم في تيارات كهربائية ضخمة من خلال بذل جهد صغير على صفيحة رقيقة من الإلكترونات. وتعتبر كثافة الإلكترونات وتنقلها في الصفيحة عنصرين أساسيين في عمل أجهزة ترانزستور التنقلية الإلكترونية العالية. تتم دراسة أجهزة ترانزستور التنقلية الإلكترونية العالية المصنوعة من (نيتريد ألومنيوم الغاليوم ونيتريد الغاليوم والسيليكون) لأنها تبشّر بأداء أفضل مع التيارات الكهربائية ودرجات الحرارة والترددات العالية، ما يميزها عن غيرها من أجهزة الترانزستور المصنوعة من السيليكون فقط. وفي إحدى الدراسات، استُخدم تأثير هول لقياس كثافة الإلكترونات في أحد أجهزة الترانزستور الجديدة هذه. عند تدفق تيار كهربائي مقداره 10.0 μA بطول صفحية من الإلكترونات طولها 1.00 mm. وعرضها 0.300 mm. وسُمكها 10.0 nm. ينشأ مجال مغناطيسي متعامدًا على اللوح مقداره 1.00 T ويُنتج جهدًا كهربائيًا مقداره 0.680 mV بعرض الصفيحة. ما كثافة الإلكترونات في الصفيحة؟

7.57 • يوضح الشكل رسمًا تخطيطيًا لتركيب مُعدّ لقياس تأثير هول باستخدام طبقة رقيقة من أكسيد الزنك كثافته 1.50 μm. تبلغ شدة التيار الكهربائي، i، المار عبر الطبقة الرقيقة 12.3 mA، ويصل جهد هول، V_H، إلى 20.1 mV– عندما يؤثر مجال مغناطيسي مقداره $B = 0.900$ T عموديًا على التيار المتدفق.



a) ما ناقلات الشحنة في الطبقة الرقيقة؟
تلميح: يمكن أن تكون الناقلات إلكترونات شحنتها $e-$، أو فجوات إلكترونية (إلكترونات مفقودة) شحنتها $e+$.

b) احسب كثافة ناقلات الشحنة في الطبقة الرقيقة.

تمارين إضافية

7.58 يُستخدم مسرّع دوراني موضوعٌ في مجال مغناطيسي مقداره 9.00 T لزيادة سرعة البروتونات إلى 50.0% من سرعة الضوء. ما تردد المسرّع الدوراني لهذه البروتونات؟ وما نصف قطر مسار البروتونات في المسرّع الدوراني؟ ما تردد المسرّع الدوراني ونصف قطر المسار للبروتونات نفسها في المجال المغناطيسي للأرض؟ افترض أن المجال المغناطيسي للأرض يساوي 0.500 G.

7.59 وُضع سلك مستقيم يمر فيه تيار كهربائي شدته 3.41 A ليصنع زاوية قياسها 10.0° مع المستوى الأفقي بين طرفي قطبي مغناطيس ينتج مجالًا مقداره 0.220 T إلى أعلى. وكان قطر كل طرف من طرفي قطبي المغناطيس 10.0 cm. إذا تسببت القوة المغناطيسية في تحريك السلك إلى خارج الفراغ الموجود بين القطبين، فما مقدار هذه القوة؟

7.60 يتحرك إلكترون بسرعة $v = 6.00 \times 10^7$ m/s عموديًا على المجال المغناطيسي للأرض. إذا كانت شدة المجال 0.500×10^{-4} T. فما نصف قطر المسار الدائري الذي يسلكه الإلكترون؟

7.61 سلك مستقيم يمر فيه تيار كهربائي ثابت وُضع في المجال المغناطيسي للأرض. إذا كان مقدار المجال المغناطيسي في هذا الموقع 0.430 G. فما أقل كمية للتيار الكهربائي يجب أن تمر عبر جزء طوله 10.0 cm من السلك لتؤثر فيه قوة مقدارها 1.00 N؟

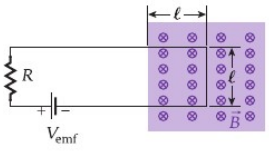
7.62 ملف دائري نصف قطره 10.0 cm يتكون من 100 لفة سلكية ويسري فيه تيار كهربائي شدته i، 100. mA. يدور الملف بحرية في منطقة ذات مجال مغناطيسي أفقي ثابت تحدده العلاقة $\vec{B} = (0.0100\text{ T})\,\hat{x}$. إذا كان متجه الوحدة العمودي على سطح الملف يصنع زاوية قياسها 30.0° مع المستوى الأفقي، فما مقدار محصلة عزم المؤثر في الملف؟

7.63 عند لحظة زمنية $t = 0$، يعبر إلكترونٌ محور y الموجب (أي أن $x = 0$) عند مسافة 60.0 cm من نقطة الأصل بسرعة متجهة 2.00×10^5 m/s في اتجاه x الموجب. ويقع الإلكترون داخل مجال مغناطيسي منتظم.

a) أوجد مقدار المجال المغناطيسي واتجاهه الذي يجعل الإلكترون يعبر المحور x عند $x = 60.0$ cm.

b) ما الشغل المبذول على الإلكترون أثناء هذه الحركة؟

c) ما الزمن الذي سيستغرقه انتقال الإلكترون من المحور y إلى المحور x؟



7.64 • بطارية جهدها الكهربائي 12.0 V موصَّلة بمقاوم 3.00 Ω في حلقة سلكية مستطيلة وثابتة أبعادها 3.00 m في 1.00 m. وكما هو موضح في الشكل. يوجد جزء من السلك طوله $\ell = 1.00$ m في نهاية الحلقة يمتد إلى داخل منطقة أبعادها 2.00 m في 2.00 m ذات مجال مغناطيسي مقداره 5.00 T موجّه إلى داخل الصفحة. ما محصلة القوى المؤثرة في الحلقة؟

7.65 جسيم ألفا ($m = 6.64 \times 10^{-27}$ kg, $q = +2e$) يتسارع متأثرًا بفرق جهد مقداره 2700 V. ويتحرك في مستوى عمودي على مجال مغناطيسي منتظم مقداره 0.340 T. ما يتسبب في انحناء مسار جسيم ألفا. أوجد نصف قطر الانحناء ومدة الدوران.

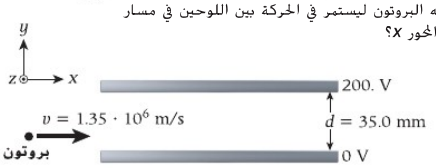
7.66 • في مساحة معينة، يتحدد المجال المغناطيسي بالقرب من سطح الأرض من المعادلة $\vec{E} = (-150.\text{ N/C})\,\hat{z}$. ويتحدد المجال المغناطيسي للأرض من المعادلة $\vec{B} = (50.0\ \mu\text{T})\,\hat{r}_N - (20.0\ \mu\text{T})\,\hat{z}$. حيث $\hat{z}$ متجه وحدة يتجه رأسيًا إلى أعلى، و$\hat{r}_N$ متجه وحدة أفقي يتجه شمالًا. ما السرعة المتجهة، $\vec{v}$، التي ستسمح للإلكترون الموجود في هذه المساحة بالتحرك في مسار مستقيم بسرعة ثابتة؟

7.67 • يستخدم كاشفُ تسريب الهيليوم مطيافَ الكتلة للكشف عن التسريبات الصغيرة في غرفة تفريغ. تم تفريغ الغرفة بمضخة تفريغ ثم رشها من الخارج بغاز الهيليوم. في حالة حدوث أي تسريب، تمر جزيئات الهيليوم عبر فتحة التسريب إلى الغرفة، ثم يأخذ كاشف التسريب عينة من حجمها. وفي المطياف، يتم تسريع أيونات الهيليوم وتحريرها إلى داخل أنبوب لتصبح حركتها عموديةً على مجال مغناطيسي مؤثر، $\vec{B}$، ثم تتبع مسارًا دائريًا نصف قطره r لتصطدم بعد ذلك بالكاشف. احسب السرعة المتجهة اللازمة إذا لم يتجاوز نصف قطر المسار الدائري للأيونات 5.00 cm. وكان مقدار المجال المغناطيسي 0.150 T، وكانت كتلة ذرة الهيليوم–4 تعادل حوالي 6.64×10^{-27} kg. افترض أن كل أيون أحاديّ التأين (أي يفقد إلكترون واحد عن الذرة المتعادلة). ما معامل التغير في السرعة المتجهة اللازمة في حالة استخدام ذرات الهيليوم–3 التي تعادل كتلتها حوالي $\frac{3}{4}$ من كتلة ذرات الهيليوم–4؟

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

•**7.68** في المختبر، تقوم بإعداد تجربة باستخدام مدفع إلكترونات تنبعث منه إلكترونات بطاقة حركية 7.50 keV نحو الهدف الذري. احسب الانحراف (مقدارًا واتجاهًا) الذي سيحدث في حزمة الإلكترونات نتيجة تأثير المجال المغناطيسي للأرض (0.300 G) إذا كان اتجاه الحزمة في البداية نحو الشرق وتقطع مسافة 1.00 m من المدفع إلى الهدف. (*تلميح:* احسب نصف قطر الانحناء أولًا. ثم أوجد مقدار انحراف حزمة الإلكترونات عن خط مستقيم بعد أن تقطع مسافة قدرها 1.00 m).

•**7.69** دخل بروتون في المنطقة بين اللوحين الموضحين في الشكل ويتحرك في اتجاه المحور x بسرعة $v = 1.35 \cdot 10^6$ m/s. إذا كان الجهد الكهربائي للوح العلوي 200 V، وكان الجهد الكهربائي للوح السفلي 0 V، فما اتجاه المجال المغناطيسي $\vec{B}$، ومقداره الذي سيحتاج إليه البروتون ليستمر في الحركة بين اللوحين في مسار مستقيم في اتجاه المحور x؟



•**7.70** يتحرك إلكترون بسرعة متجهة ثابتة $\vec{v} = v_0\hat{x}$، فدخل منطقة في الفراغ ذات مجال مغناطيسي. وكان المجال المغناطيسي، $\vec{B}$، ثابتًا ويؤثر في اتجاه z. ما مقدار القوة المغناطيسية واتجاهها التي ستؤثر في الإلكترون؟ إذا كان عرض المنطقة الموجود فيها المجال المغناطيسي هو d، فما أقل قيمة للسرعة المتجهة التي سيحتاج إليها الإلكترون للخروج من هذه المنطقة؟

•**7.71** ملف مربع مكوَّن من 30 لفة كتلته 0.250 kg وطول ضلعه 0.200 m مُعلَّق بشكل أفقي ويمر فيه تيار كهربائي شدته 5.00 A. إذا وُضع في مجال مغناطيسي يؤثر رأسيًا إلى أسفل ومقداره 0.00500 T، فأوجد قياس الزاوية التي يصنعها مستوى الملف مع المستوى الرأسي عندما يكون الملف في حالة اتزان. استخدم $g = 9.81$ m/s^2.

•**7.72** حلقة سلكية نصف دائرية نصف قطرها R تقع في المستوى xy ومتمركزة عند نقطة الأصل. ويسري في السلك تيار كهربائي، i، عكس اتجاه عقارب الساعة حول نصف الدائرة، من $x = -R$ إلى $x = +R$ على المحور x. إذا كان هناك مجال مغناطيسي، $\vec{B}$، يتجه إلى خارج المستوى في اتجاه z الموجب، فاحسب محصلة القوى المؤثرة في الحلقة النصف دائرية.

•**7.73** بروتون يتحرك بسرعة $v = 1.00 \times 10^6$ m/s فدخل منطقة في الفراغ ذات مجال مغناطيسي تحدده العلاقة $\vec{B} = (-0.500\ \text{T})\,\hat{z}$. وكان متجه السرعة المتجهة للبروتون يصنع زاوية $\theta = 60.0°$ مع محور z الموجب.

a) حلِّل حركة البروتون وصف مساره (من الناحية النوعية فقط).

b) احسب نصف القطر، r، للمسار الذي سيقطعه البروتون على مستوى متعامد على المجال المغناطيسي (في المستوى xy).

c) احسب الزمن الدوري، T، والتردد، f، لحركة البروتون في ذلك المستوى.

d) احسب انحدار الحركة (المسافة التي يقطعها البروتون في اتجاه المجال المغناطيسي في زمن دوري واحد).

تمارين بمعطيات متعددة

7.74 كرة صغيرة من الألمنيوم كتلتها 5.063 g وشحنتها 11.03 C تتحرك شمالًا بسرعة 3079 m/s. إذا أردت أن تتحرك الكرة في مسار دائري أفقي نصف قطره 2.137m في اتجاه عقارب الساعة عند النظر إليها من أعلى، متجاهلًا تأثير الجاذبية، فما مقدار المجال المغناطيسي الذي يجب أن يؤثر في كرة الألمنيوم لكي تسلك هذا المسار؟

7.75 كرة صغيرة من الألمنيوم شحنتها 11.17 C تتحرك شمالًا بسرعة 3131 m/s. إذا أردت أن تتحرك الكرة في مسار دائري أفقي نصف قطره 2.015 m في اتجاه عقارب الساعة عند النظر إليها من أعلى، متجاهلًا تأثير الجاذبية، وباعتبار أن مقدار المجال المغناطيسي الذي يجب أن يؤثر في الكرة لتسلك هذا المسار هو $B = 0.8000$ T. فما كتلة الكرة؟

7.76 كرة مشحونة صغيرة من الألمنيوم كتلتها 3.435 g تتحرك شمالًا بسرعة 3183 m/s. إذا أردت أن تتحرك الكرة في مسار دائري أفقي نصف قطره 1.893 m في اتجاه عقارب الساعة عند النظر إليها من أعلى، متجاهلًا تأثير الجاذبية، وباعتبار أن مقدار المجال المغناطيسي الذي يجب أن يؤثر في الكرة لتسلك هذا المسار هو $B = 0.5107$ T. فما شحنة الكرة؟

7.77 يُستخدم منتقي سرعات في مطياف كتلة لإنتاج حزمة من الجسيمات المشحونة تتحرك بسرعة متجهة منتظمة. إذا افترضنا أن المجالَين في منتقي السرعات يتحددان من العلاقتين $\vec{E} = \left(1.749 \times 10^4\ \text{V/m}\right)\hat{x}$ و $\vec{B} = (46.23\ \text{mT})\,\hat{y}$، فأوجد السرعة التي يمكن أن يتحرك بها جسيم مشحون عبر منتقي السرعات في اتجاه z من دون أن ينحرف.

7.78 يُستخدم منتقي سرعات في مطياف كتلة لإنتاج حزمة من الجسيمات المشحونة تتحرك بسرعة متجهة منتظمة. إذا افترضنا أن المجالَين في منتقي السرعات يتحددان من العلاقتين $\vec{E} = \left(2.207 \times 10^4\ \text{V/m}\right)\hat{x}$ و $\vec{B} = B_y\hat{y}$، وأن السرعة التي يتحرك بها جسيم مشحون عبر محدد السرعات في اتجاه z من دون أن ينحرف تساوي 4.713×10^5 m/s. فما قيمة B_y؟

7.79 يُستخدم منتقي سرعات في مطياف كتلة لإنتاج حزمة من الجسيمات المشحونة تتحرك بسرعة متجهة منتظمة. إذا افترضنا أن المجالَين في منتقي السرعات يتحددان من العلاقتين $\vec{E} = E_x\hat{x}$ و $\vec{B} = (47.45\ \text{mT})\,\hat{y}$. وأن السرعة التي يتحرك بها جسيم مشحون عبر منتقي السرعات في اتجاه z من دون أن ينحرف تساوي 5.616×10^5 m/s، فما قيمة E_x؟

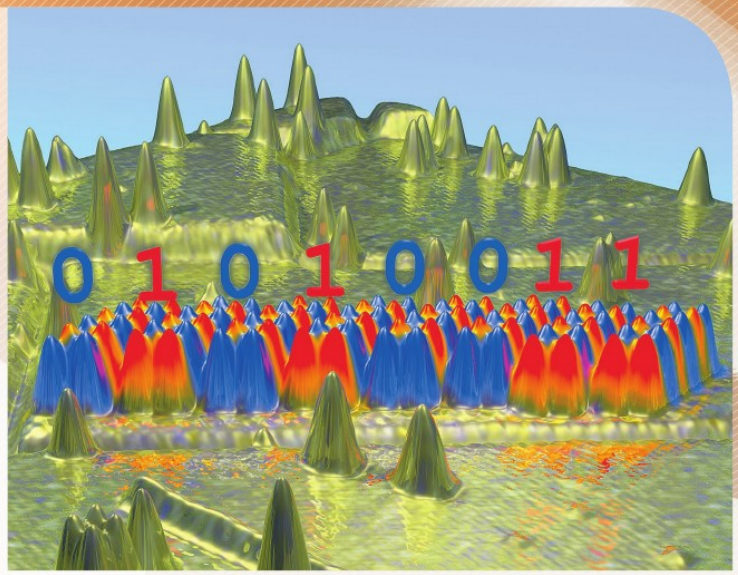
McGraw-Hill Education حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة

المجالات المغناطيسية للتيار الكهربائي المستمر

Magnetic Fields of Moving Charges

8

ما سنتعلمه 196
8.1 قانون بيو سافار 196
8.2 المجالات المغناطيسية الناتجة عن مرور التيار 197
المجال المغناطيسي الناتج عن مرور تيار مستمر في سلك طويل مستقيم 197
السلكان المتوازيان 198
مسألة محلولة 8.1 المجال المغناطيسي الناتج عن أربعة أسلاك 199
تعريف الأمبير 200
مثال 8.1 القوة المبذولة على حلقة يمر فيها تيار 201
مسألة محلولة 8.2 المسرع الكهرومغناطيسي 201
المجال المغناطيسي الناتج عن مرور تيار مستمر في حلقة سلك 204
مسألة محلولة 8.3 المجال المغناطيسي الناتج عن مرور تيار في سلك يحتوي على حلقة 205
8.3 قانون أمبير 206
المجال المغناطيسي داخل سلك طويل مستقيم 207
8.4 المجالات المغناطيسية الخاصة بالملفات اللولبية والحلقية 208
مثال 8.2 الملف اللولبي 209
مسألة محلولة 8.4 المجال المغناطيس لملف حلقي 210
مسألة محلولة 8.5 حركة الإلكترون داخل ملف لولبي يمر فيه تيار 211
8.5 الذرات كمغناطيسات 212
مثال 8.3 العزم المغناطيسي المداري لذرة الهيدروجين 213
اللف المغزلي 214
8.6 الخواص المغناطيسية للمادة 214
الدايامغناطيسية والبارامغناطيسية 215
الفيرومغناطيسية 216
8.7 المغناطيسية والموصلية الفائقة 217
ما تعلمناه/ دليل المذاكرة للاختبار 218
إرشادات حل المسائل 219
أسئلة الاختيار من متعدد 219
أسئلة مفاهيمية 220
تمارين 221
تمارين بمعطيات متعددة 224



الشكل 8.1 يحمل هذا المصفوف المكوّن من 96 ذرة حديد 1 بايت (8 بت) من المعلومات في المجالات المغناطيسية للذرات — وهو إنجازٌ هائل في تخزين البيانات.

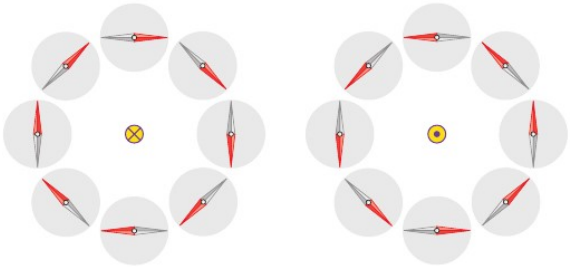
رأينا في الوحدة 7 أنَّ المجال المغناطيسي يمكن أن يؤثر على مسار جسيم مشحون أو على تدفق تيار. وفي هذه الوحدة، نتناول المجالات المغناطيسية *الناتجة* عن التيارات الكهربائية. يُولّد أي جسيم مشحون مجالاً مغناطيسيًا، إذا كان متحركًا. بينما يَنتج العديد من المجالات المغناطيسية من خلال توزيعات التيار المختلفة. وتُعرف المغناطيسات الكهربائية القوية المُستخدمة في الصناعة، وفي الأبحاث الفيزيائية، وفي التشخيصات الطبية، وفي التطبيقات الأخرى بأنّها ملفات لولبية في الأساس، أي ملفاتٍ من سلك حامل للتيار تحتوي على مئات أو آلاف اللفات. سنعرف في هذه الوحدة سبب توليد الملفات اللولبية على وجه الخصوص للمجالات المغناطيسية المفيدة. كما سنعرف أنّ الذرة المفردة يمكن أن تحتوي على مجال مغناطيسي دائم. يوضّح الشكل 8.1 كيف يمكن استخدام المجالات المغناطيسية لذرات الحديد (الموضّحة باللونين الأحمر والأزرق) لتخزين المعلومات. ولا تزال هذه التكنولوجيا في مهدها (صدرت هذه الصورة عام 2012). ومع ذلك، إذا كان من الممكن الارتقاء بهذه التكنولوجيا، فإنها سوف تسمح بتخزين 10 تيرابايت من البيانات على سنتيمترٍ مربع واحد لسطح حديدي، وهي كثافة أعلى مما يمكن تحقيقه حاليًا من خلال معامل أكبر من 1000.

Chapter Sourced From: 8. Magnetic Fields of Moving Charges, Chapter 28, from University Physics with Modern Physics, 2e by Bauer and Westfall ©2014

ما سنتعلمه

- تُولّد الشحنات المتحركة (التيارات) مجالاتٍ مغناطيسية.
- يتغيَّر المجال المغناطيسي الناتج عن تيارٍ متدفق في سلكٍ طويل مستقيم تغيرًا عكسيًا مع المسافة التي يبعدها عن السلك.
- ينجذب السلكان المتوازيان اللذان يمر فيهما تياران متوازيان في الاتجاه نفسه إلى بعضهما. يتنافر السلكان المتوازيان اللذان يمر فيهما تياران متوازيان في اتجاهين متعاكسين مع بعضهما.
- يُستخدَم قانون أمبير لحساب المجال المغناطيسي الناتج عن بعض توزيعات التيار المتماثلة، تمامًا كما يفيد قانون جاوس في حساب المجالات الكهربائية في الحالات التي يكون فيها تماثل في توزيع السحنة.
- يتغيَّر المجال المغناطيسي داخل سلك طويل مستقيم تغيُّرًا خطيًا مع المسافة من مركز السلك.
- الملف اللولبي عبارة عن مغناطيس كهربائي يمكن استخدامه لإنتاج مجال مغناطيسي ثابت بحجم كبير.
- يمكن النظر إلى بعض الذرات على أنها مغناطيسات صغيرة ناتجة عن حركة الإلكترونات في الذرة.
- يمكن أن تظهر ثلاثة أنواع من المغناطيسية في المواد المختلفة، وهي: الدايا مغناطيسية، والبارا مغناطيسية، والفيرو مغناطيسية.
- يمكن استخدام المغناطيس فائق التوصيل لإنتاج مجالاتٍ مغناطيسية قوية للغاية.

8.1 قانون بيو سافار Biot-Savart Law



الشكل 8.2 سلك (دائرة صفراء) يمر تيارٌ خلاله: (a) إلى داخل الصفحة (مُشار إليه بالتقاطع)، (b) خارجًا من الصفحة (مُشار إليه بالنقطة). يظهر اتجاه إبرة بوصلة موضوعة بالقرب من السلك في مواقع مختلفة حول السلك.

تناولَت الوحدة 7 المجالات المغناطيسية وخطوط المجال من خلال توضيح الكيفية التي توجّه بها إبرة البوصلة نفسها بالقرب من مغناطيس دائم. وفي عرضٍ توضيحي مماثل، يتم تمرير تيار قوي عبر سلك (مستقيم طويل للغاية) (مع العزل أو من دونه). وإذا وُضِعت بعد ذلك إبرة بوصلة بالقرب من السلك، فإنَّ إبرة البوصلة توجّه نفسها نسبيًا إلى السلك بالطريقة الموضّحة في الشكل 8.2. وكان أول من أبدى هذه الملاحظة هو عالِم الفيزياء الدانماركي هانز أورستد (1777–1851) عام 1819 أثناء إجرائه عرضًا توضيحيًا للطلاب خلال إحدى المحاضرات. ونستنتج أنّ التيار المتدفق في السلك ينتج مجالاً مغناطيسيًا. ونظرًا لأنّ اتجاه البوصلة يشير إلى اتجاه المجال المغناطيسي، فإنّنا نستنتج أيضًا أنَّ خطوط المجال المغناطيسي تكوّن دوائر حول هذا السلك الحامل للتيار. لاحظ الاختلاف بين الجزأين (a) و(b) للشكل 8.2: فعندما ينعكس اتجاه التيار، ينعكس أيضًا اتجاه إبرة البوصلة. إذا تحركت إبرة البوصلة وابتعدت أكثر فأكثر عن السلك، فإنّها في النهاية توجّه نفسها مرةً أخرى في اتجاه المجال المغناطيسي للأرض، وإنْ كان الشكل لا يوضح هذا. ويشير هذا إلى أنّ المجال المغناطيسي الناتج عن السلك يصبح أضعف نتيجة زيادة المسافة من السلك. السؤال التالي الذي يتعين علينا الإجابة عنه هو: كيف يمكننا تحديد المجال المغناطيسي الناتج عن شحنة متحركة؟

لوصف المجال الكهربائي بدلالة الشحنة الكهربائية، أوضحنا أن:

$$dE = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{|dq|}{r^2}$$

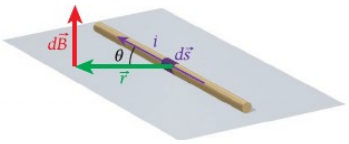
حيث dq هو عنصر الشحنة. يشير المجال الكهربائي في اتجاه نصف قطري (داخلي باتجاه الشحنة الكهربائية أو خارجي بعيدًا عنها، حسب إشارة الشحنة). لذا

$$d\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{dq}{r^3}\vec{r} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{dq}{r^2}\hat{r}$$

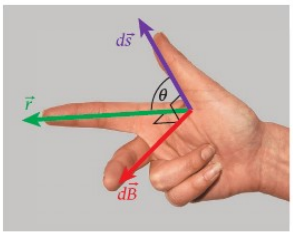
تُعد الحالة أكثر تعقيدًا قليلاً بالنسبة إلى المجال المغناطيسي؛ لأنّ عنصر التيار، $i\,d\vec{s}$ الذي ينتج مجالاً مغناطيسيًا يكون له اتجاه، على عكس الشحنة النقطية غير الاتجاهية التي تنتج مجالاً كهربائيًا. ونتيجةً لسلسلة طويلة من التجارب التي تتضمن اختبارات مشابهة لتلك الاختبارات الموضّحة في الشكل 8.2، والتي أُجريت في القرن التاسع عشر، أثبتَ العالمان الفرنسيان، جان بابتيست بيو (1774–1862) وفيليكس سافار (1791–1841)، أنّ المجال المغناطيسي الناتج عن عنصر التيار، $i\,d\vec{s}$، يتحدَّد من خلال

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{i d\vec{s}\times\vec{r}}{r^3} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{i d\vec{s}\times\hat{r}}{r^2} \quad (8.1)$$

McGraw-Hill Education حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة



(a)



(b)

الشكل 8.3 (a) تمثيل ثلاثي الأبعاد لقانون بيو–سافار. يكون المجال المغناطيسي التفاضلي متعامدًا على كلٍّ من عنصر التيار التفاضلي ومتجه الموقع. (b) القاعدة الأولى لليد اليمنى المُطبَقة على الكميات المتضمّنة في قانون بيو–سافار.

هنا، $i\,d\vec{s}$ عبارة عن متجه طول تفاضلي ds يشير في الاتجاه الذي يتدفق فيه التيار على طول الموصِّل، بينما $\vec{r}$ هو متجه الموقع المقيس من عنصر التيار *إلى* النقطة التي يُحدَّد عندها المجال. يوضّح الشكل 8.3 الحالة الفيزيائية التي يُعبَّر عنها من خلال هذا القانون، الذي يُطلق عليه **قانون بيو–سافار**.

ويُطلق على الثابت μ_0 في المعادلة 8.1 **النفاذية المغناطيسية للفراغ** وتبلغ قيمته

$$\mu_0 = 4\pi\times10^{-7}\ \frac{\text{T m}}{\text{A}} \tag{8.2}$$

من المعادلة 8.1 والشكل 8.3، يمكنك ملاحظة أنَّ اتجاه المجال المغناطيسي الناتج عن عنصر التيار $i\,d\vec{s}$ يكون متعامدًا على كلٍّ من متجه الموقع وعنصر التيار. ويتحددَّ مقدار المجال المغناطيسي من خلال

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{i\,ds\sin\theta}{r^2} \tag{8.3}$$

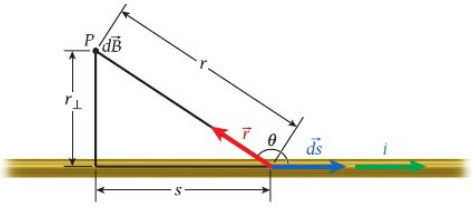
حيث θ (قيمها المحتملة بين 0° و180°) هو الزاوية الواقعة بين اتجاه متجه الموقع وعنصر التيار. ويتحدَّد اتجاه المجال المغناطيسي من خلال شكل مختلف للقاعدة الأولى لليد اليمنى، الموضّحة في الوحدة 7. ولتحديد اتجاه المجال المغناطيسي باستخدام يدك اليمنى، أشر بإبهامك في اتجاه عنصر التيار التفاضلي، وبالسبابة في اتجاه متجه الموقع. وسيشير الإصبع الأوسط في اتجاه المجال المغناطيسي التفاضلي.

8.2 المجالات المغناطيسية الناتجة عن مرور التيار
Magnetic Fields due to Current Distributions

تناولت الوحدة 7 مبدأ تراكب للمجالات المغناطيسية. ومن خلال استخدام مبدأ التراكب هذا، يمكننا حساب المجال المغناطيسي في أي نقطة في الفضاء كمجموع المجالات المغناطيسية التفاضلية التي يُعبَّر عنها من خلال قانون بيو–سافار. يتناول هذا القسم المجالات المغناطيسية الناتجة عن أكثر أشكال الأسلاك الحاملة للتيار شيوعًا.

المجال المغناطيسي الناتج عن مرور تيار في سلك طويل مستقيم

لنتناول أولاً المجال المغناطيسي الناتج عن سلك مستقيم لامتناهي الطول يحمل تيارًا i. ونفترض أنَّ المجال المغناطيسي $d\vec{B}$ عند النقطة P، التي تمثّل المسافة العمودية $r_\perp$ من السلك (الشكل 8.4). ويتحدَّد مقدار المجال dB، عند تلك النقطة الناتجة عن عنصر التيار $i\,ds$ من خلال المعادلة 8.3؛ حيث يتحدَّد اتجاه المجال من خلال $d\vec{s}\times\vec{r}$. ويكون خارج الصفحة. نوجد المجال المغناطيسي من النصف الأيمن من السلك، ونضرب في 2 لإيجاد المجال المغناطيسي من السلك بأكمله. ومن ثمّ، يتحدَّد مقدار المجال المغناطيسي عند المسافة العمودية $r_\perp$ من السلك من خلال



الشكل 8.4 مجال مغناطيسي من سلك طويل مستقيم يحمل تيارًا.

$$B = 2\int_0^\infty dB = 2\int_0^\infty \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{i\,ds\sin\theta}{r^2} = \frac{\mu_0 i}{2\pi}\int_0^\infty \frac{ds\sin\theta}{r^2}$$

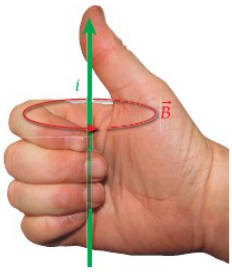
يمكننا ربط r وθ بـ $r_\perp$ وs (r وs وθ) من خلال $r=\sqrt{s^2+r_\perp^2}$ و$\sin\theta=\sin(\pi-\theta)=r_\perp/\sqrt{s^2+r_\perp^2}$ (انظر الشكل 8.4). بالتعويض عن r و$\sin\theta$ في التعبيرات السابقة بـ B نحصل على

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi}\int_0^\infty \frac{r_\perp\,ds}{(s^2+r_\perp^2)^{3/2}}$$

بتقييم هذا التكامل المحدد، نوجد

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi}\left[\frac{1}{r_\perp^2}\frac{r_\perp s}{(s^2+r_\perp^2)^{1/2}}\right]_0^\infty = \frac{\mu_0 i}{2\pi r_\perp}\left[\frac{s}{(s^2+r_\perp^2)^{1/2}}\right]_{s\to\infty} - 0.$$

McGraw-Hill Education حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة



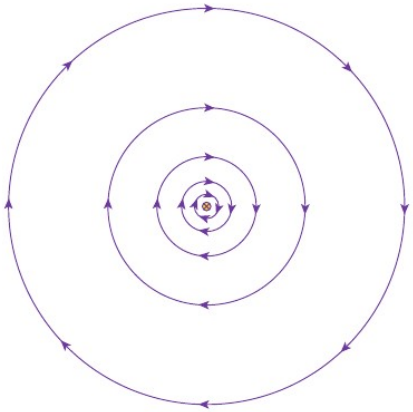
الشكل 8.5 القاعدة الثالثة لليد اليمنى للمجال المغناطيسي من سلك يحمل تيارًا.

بالنسبة إلى $r_\perp$ ≫ s. يقترب الحد الموضوع بين قوسين من القيمة 1. ولذلك، فإنَّ مقدار المجال المغناطيسي عند المسافة العمودية $r_\perp$ من سلك طويل مستقيم يحمل تيارًا، i، يساوي

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r_\perp} \quad (8.4)$$

يمكن إيجاد اتجاه المجال المغناطيسي في أي نقطة من خلال تطبيق القاعدة الأولى لليد اليمنى على عنصر التيار ومتجهات الموقع الموضَّحة في الشكل 8.4. وينتج عن ذلك قاعدة جديدة لليد اليمنى، تُسمَّى *القاعدة الثالثة لليد اليمنى (قبضة اليد اليمنى)*، والتي يمكن استخدامها لتحديد اتجاه المجال المغناطيسي الناتج عن سلك حامل للتيار. إذا كنت تمسك السلك بيدك اليمنى، بحيث يشير إبهامك في اتجاه التيار، ولفة أصابعك في اتجاه المجال المغناطيسي (الشكل 8.5).

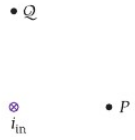
بإمعان النظر في سلكٍ حامل للتيار يتبين أنَّ خطوط المجال المغناطيسي تكوِّن حلقاتٍ متحدة المركز (الشكل 8.6). ويُلاحَظ من المسافة بين خطوط المجال أنَّ المجال يبلغ أقصى شدةٍ له بالقرب من السلك، ثم تنخفض شدته بالتناسب مع $1/r_\perp$، كما تشير المعادلة 8.4.



الشكل 8.6 خطوط المجال المغناطيسي حول سلك مستقيم طويل (دائرة صفراء عند المركز) متعامد على الصفحة ويحمل تيارًا يتدفق إلى داخل الصفحة.

مراجعة المفاهيم 8.1

سلك يحمل تيارًا، i_{in}، إلى داخل الصفحة كما يظهر في الشكل. ما الاتجاه الذي يشير إلى المجال المغناطيسي في النقطتين P وQ؟



a) إلى اليمين عند النقطة P ولأعلى (باتجاه أعلى الصفحة) عند النقطة Q

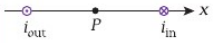
b) لأعلى عند النقطة P وإلى اليمين عند النقطة Q

c) لأسفل عند النقطة P وإلى اليمين عند النقطة Q

d) لأعلى عند النقطة P وإلى اليسار عند النقطة Q

مراجعة المفاهيم 8.2

يمر في السلك 1 تيار يتدفق خارجًا من الصفحة، i_{out}، كما يظهر في الشكل. ويمر في السلك 2 تيار يتدفق إلى داخل الصفحة، i_{in}. ما اتجاه المجال المغناطيسي عند النقطة P؟



a) لأعلى في مستوى الصفحة

b) إلى اليمين

c) لأسفل في مستوى الصفحة

d) إلى اليسار

e) المجال المغناطيسي عند النقطة P يساوي صفرًا.

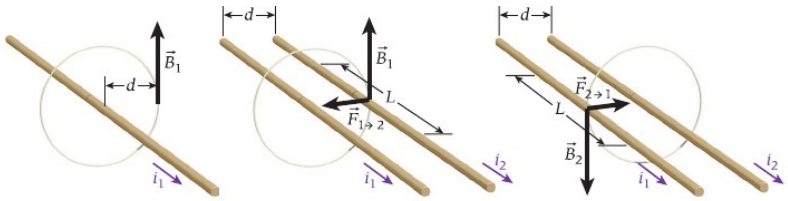
السلكان المتوازيان

لندرس الحالة التي يحمل فيها سلكان متوازيان التيار. يبذل كلٌّ من السلكين قوة مغناطيسية على الآخر؛ وذلك لأنّ المجال المغناطيسي لأحد السلكين يبذل قوة على الشحنات المتحركة في السلك الآخر. ويتحدَّد مقدار المجال المغناطيسي الناتج عن سلك حامل للتيار من خلال المعادلة 8.4. ويكون المجال المغناطيسي متعامدًا دائمًا على السلك باتجاهٍ يتحدَّد من خلال القاعدة الثالثة لليد اليمنى (الشكل 8.5).

لنفترض أولاً أنّ السلك 1 يحمل التيار i_1، باتجاه اليمين، كما هو موضَّح في الشكل 8.7a. ويكون مقدار المجال المغناطيسي عند المسافة العمودية d من السلك 1 هو

$$B_1 = \frac{\mu_0 i_1}{2\pi d} \quad (8.5)$$

McGraw-Hill Education حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة



الشكل 8.7 (a) المجال المغناطيسي من سلك واحد حامل للتيار. (b) مجال مغناطيسي متولّد عن التيار المار في سلكٍ يبذل قوةً على سلك ثانٍ حامل للتيار. (c) مجال مغناطيسي مُتولّد عن التيار المار في السلك الثاني الذي يبذل قوةً على السلك الأول الحامل للتيار.

يحدد اتجاه $\vec{B}_1$ من خلال القاعدة الثالثة لليد اليمنى. ويظهر عند نقطة معينة في الشكل 8.7a.

لنفترض الآن أنّ السلك 2 حامل للتيار، i_2، في نفس اتجاه i_1 وموضوع بالتوازي مع السلك 1 على المسافة d منه (الشكل 8.7b). ويبذل المجال المغناطيسي الناتج عن السلك 1 قوة مغناطيسية على الشحنات المتحركة في التيار المتدفق في السلك 2. في الوحدة 7، رأينا أنّ القوة المغناطيسية المبذولة على سلك حامل للتيار تتحدّد من خلال المعادلة

$$\vec{F} = i\vec{L} \times \vec{B}$$

ومن ثمّ، يكون مقدار القوة المغناطيسية المبذولة على الطول، L، من السلك 2 هو

$$F = iLB\sin\theta = i_2 L B_1 \tag{8.6}$$

لأنّ $\vec{B}_1$ يكون متعامدًا على السلك 2، وبالتالي فإنّ $\theta = 90°$. بالتعويض عن B_1 من المعادلة 8.5 في المعادلة 8.6، نحصل على مقدار القوة التي يبذلها السلك 1 على الطول L للسلك 2:

$$F_{1\to 2} = i_2 L\left(\frac{\mu_0 i_1}{2\pi d}\right) = \frac{\mu_0 i_1 i_2 L}{2\pi d} \tag{8.7}$$

وفقًا للقاعدة الأولى لليد اليمنى، يشير $\vec{F}_{1\to 2}$ إلى السلك 1 ويكون متعامدًا على كلا السلكين. وتتيح لنا عملية حسابية مماثلة استنتاج أنّ القوة الناتجة من السلك 2 والمبذولة على الطول L، للسلك 1 مساوية لها في المقدار ومعاكسة في الاتجاه: $\vec{F}_{2\to 1} = -\vec{F}_{1\to 2}$ تظهر هذه النتيجة في الشكل 8.7c. كما أنّها نتيجة بسيطة لقانون نيوتن الثالث.

مراجعة المفاهيم 8.3

في الشكل 8.2، توضح إبرة البوصلة المجال المغناطيسي حول سلك حامل للتيار. في الشكل، يتطابق طرف إبرة البوصلة الذي يشير ناحية الشمال مع

a) الطرف الأحمر.

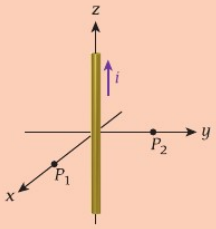
b) الطرف الرمادي.

c) إما الطرف الأحمر أو الطرف الرمادي، بناءً على الطريقة التي تتحرّك بها البوصلة تجاه السلك.

d) لا يمكن تحديد الطرف من منطلق المعلومات المتضمّنة في الشكل.

سؤال الاختبار الذاتي 8.1

يحمل السلك المعروض في الشكل التيار i في اتجاه z الموجب. ما اتجاه المجال المغناطيسي الناتج عند النقطة P_1؟ ما اتجاه المجال المغناطيسي الناتج عند النقطة P_2؟

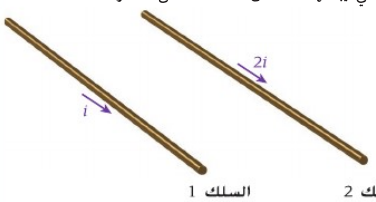


سؤال الاختبار الذاتي 8.2

تخيّل سلكين متوازيين يحملان تيارن متساويان في الاتجاه نفسه. هل القوة بين السلكين عبارة عن قوة جذب أو قوة تنافر؟ والآن، تخيّل سلكين متوازيين يحملان تيارًا في اتجاهين مختلفين. ما القوة بين السلكين؟

مراجعة المفاهيم 8.4

سلكان متوازيان قريبان من بعضهما البعض، كما هو موضح في الشكل. يحمل السلك 1 التيار i ويحمل السلك 2 التيار $2i$. ما العبارة التي تنطبق على القوى المغناطيسية التي يبذلها السلكان أحدهما على الآخر؟



a) لا يبذل السلكان قوى أحدهما على الآخر.

b) يبذل السلكان قوى جذب بالمقدار نفسه أحدهما على الآخر.

c) يبذل السلكان قوى تنافر بالمقدار نفسه أحدهما على الآخر.

d) يبذل السلك 1 قوةً على السلك 2 أكبر مما يبذلها السلك 2 على السلك 1.

e) يبذل السلك 2 قوةً على السلك 1 أكبر مما يبذلها السلك 1 على السلك 2.

مسألة محلولة 8.1 المجال المغناطيسي الناتج عن أربعة أسلاك

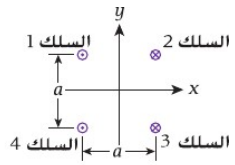
أربعة أسلاك يحمل كل منها تيارًا مقداره $i = 1.00$ A. وتوجد الأسلاك في الزوايا الأربع لمربع طول ضلعه $a = 3.70$ cm. ويحمل سلكان منهما التيار إلى داخل الصفحة، بينما يحمل الاثنان الآخران التيار خارج الصفحة (الشكل 8.8).

المسألة

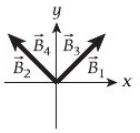
ما مركّبة y للمجال المغناطيسي في مركز المربع؟

- يُتبع

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education



الشكل 8.8 أربعة أسلاك واقعة عند زوايا مربع. يحمل سلكان منها تيارًا في الصفحة، ويحمل السلكان الآخران تيارًا خارج الصفحة.



الشكل 8.9 المجال المغناطيسي من الأسلاك الأربعة الحاملة للتيار.

الحل

فكّر المجال المغناطيسي في مركز المربع هو مجموع متجهات المجالات المغناطيسية الناتجة من الأسلاك الأربعة الحاملة للتيار. ويكون مقدار المجال المغناطيسي الناتج عن كلٍّ من الأسلاك الأربعة متماثلاً. ويُحدَّد اتجاه المجال المغناطيسي الناتج عن كل سلك باستخدام القاعدة الثالثة لليد اليمنى.

ارسم يوضّح الشكل 8.9 المجالات المغناطيسية الناتجة عن الأسلاك الأربعة: $\vec{B}_1$ هو المجال المغناطيسي الناتج عن السلك 1، و$\vec{B}_2$ هو المجال المغناطيسي الناتج عن السلك 2، و$\vec{B}_3$ هو المجال المغناطيسي الناتج عن السلك 3، و$\vec{B}_4$ هو المجال المغناطيسي الناتج عن السلك 4. لاحظ أنّ كلاً من $\vec{B}_2$ و$\vec{B}_4$ متساويان، و$\vec{B}_1$ و$\vec{B}_3$ متساويان.

ابحث يتحدَّد مقدار المجال المغناطيسي الناتج عن كلٍّ من الأسلاك الأربعة من خلال

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r} = \frac{\mu_0 i}{2\pi\left(a/\sqrt{2}\right)}$$

حيث $a/\sqrt{2}$ هو المسافة من كل سلك إلى مركز المربع.

تحدّد القاعدة الثالثة لليد اليمنى اتجاهات المجالات المغناطيسية، الموضّحة في الشكل 8.9. وتتحدَّد مركّبة y لكلٍّ من المجالات المغناطيسية من خلال

$$B_y = B\sin 45^\circ$$

حوّل إلى أبسط صورة إنّ مجموع مركّبات y للمجالات المغناطيسية الأربعة يساوي

$$B_{y,\text{sum}} = 4B_y = 4B\sin 45^\circ = 4\frac{\mu_0 i}{2\pi\left(a/\sqrt{2}\right)}\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) = \frac{2\mu_0 i}{\pi a}$$

حيث استخدمنا $\sin 45^\circ = 1/\sqrt{2}$

احسب بالتعويض باستخدام القيم العددية نحصل على

$$B_{y,\text{sum}} = \frac{2\mu_0 i}{\pi a} = \frac{2\left(4\pi\times10^{-7}\ \text{T m/A}\right)(1.00\ \text{A})}{\pi\left(3.70\times10^{-2}\ \text{m}\right)} = 2.16216\times10^{-5}\ \text{T}$$

قرّب نقرّب النتيجة إلى ثلاثة أرقام معنوية:

$$B_{y,\text{sum}} = 2.16\times10^{-5}\ \text{T}$$

تحقّق ثانية للتحقّق ثانية من النتيجة، يمكننا حساب مقدار المجال المغناطيسي في مركز المربع الناتج عن أحد الأسلاك:

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi\left(a/\sqrt{2}\right)} = \frac{\left(4\pi\times10^{-7}\ \text{T m/A}\right)(1.00\ \text{A})\sqrt{2}}{2\pi\left(3.70\times10^{-2}\ \text{m}\right)} = 7.64\times10^{-6}\ \text{T}$$

ومن ثمّ، يكون مجموع مركّبات y

$$B_{y,\text{sum}} = \frac{4\left(7.64\times10^{-6}\ \text{T}\right)}{\sqrt{2}} = 2.16\times10^{-5}\ \text{T}$$

وهذا يتوافق مع النتيجة التي توصلنا إليها.

تعريف الأمبير

تُستخدَم القوة $F_{1\to2}$ التي تعبر عنها المعادلة 8.7 في تعريف النظام الدولي للأمبير: *الأمبير* (A) هو التيار الثابت الذي، إذا مر في موصلين متوازيين مستقيمين بطول لانهائي، ويبعدان عن بعضهما مسافة 1 m في الفراغ، سيؤثر كل منهما في وحدة الطول (1 m) من الآخر بقوة مقدارها 2×10^{-7} N. وتعبر عن هذه الحالة الفيزيائية المعادلة 8.7 لإيجاد القوة بين سلكين متوازيين حاملَيْن للتيار حيث $i_1 = i_2 = 1$ A و $d = 1$ m و $F_{1\to2} = 2\times10^{-7}$ N. ويمكننا من المعادلة 8.7 ايجاد μ_0:

$$\mu_0 = \frac{(2\pi d)F_{1\to2}}{i_1 i_2 L} = \frac{2\pi(1\ \text{m})\left(2\times10^{-7}\ \text{N}\right)}{(1\ \text{A})(1\ \text{A})(1\ \text{m})} = 4\pi\times10^{-7}\ \frac{\text{T m}}{\text{A}}$$ بالضبط

وهذا يشير إلى أنّ النفاذية المغناطيسية للفراغ محددة على أنها تساوي $\mu_0 = 4\pi\cdot10^{-7}$ T m/A (انظر المعادلة 8.2).

McGraw-Hill Education محفوظة لصالح مؤسسة © حقوق الطبع والتأليف

عندما تناولنا قانون كولوم، حُدِّدت قيمة السماحية الكهربائية للفراغ ϵ_0: $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}\ \mathrm{C^2/(N\ m^2)}$. وبما أنّ $1\ \mathrm{A} = 1\ \mathrm{C/s}$ و $1\ \mathrm{T} = 1\ \mathrm{(N\ s)/(C\ m)}$ (انظر الوحدة 7)، فإنّ ناتج الثابتين، ϵ_0 و μ_0، يساوي

$$\mu_0\epsilon_0 = \left(4\pi\times10^{-7}\ \frac{\mathrm{T\ m}}{\mathrm{A}}\right)\left(8.85\times10^{-12}\ \frac{\mathrm{C^2}}{\mathrm{N\ m^2}}\right) = 1.11\times10^{-17}\ \frac{\mathrm{s^2}}{\mathrm{m^2}}$$

وهي تحتوي على وحدة معكوس وحدة مربع السرعة. ومن ثَمَّ، يُحدِّد $1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$ قيمة هذه السرعة على أنها قيمة سرعة الضوء، $c = 3.00\times10^8\ \mathrm{m/s}$. وهذه ليست مصادفة بأي حالٍ من الأحوال كما سنرى في الوحدات القادمة. وفي الوقت الحالي، يكفي ذكر النتيجة التجريبية:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}}$$

بما أنَّ النفاذية المغناطيسية للفراغ محدّدة على أنها تساوي $\mu_0 = 4\pi\times10^{-7}\ \mathrm{T\ m/A}$ بالضبط، وسرعة الضوء محدّدة على أنها تساوي $c = 299{,}792{,}458\ \mathrm{m/s}$ بالضبط، فإنَّ المعادلة $c = 1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$ ويمكن أيضًا ايجاد قيمة السماحية الكهربائية للفراغ.

مثال 8.1 القوة المغناطيسية المبذولة على حلقة يمر فيها تيار

يحمل سلك طويل مستقيم تيارًا مقداره $i_1 = 5.00\ \mathrm{A}$ باتجاه اليمين (الشكل 8.10). وتُوضَع حلقة مربعة يبلغ طول ضلعها $a = 0.250\ \mathrm{m}$ بحيث تكون أضلاعها كما في الشكل 8.10 والمسافة $d = 0.100\ \mathrm{m}$ من السلك. وتحمل الحلقة المربعة تيارًا مقداره $i_2 = 2.20\ \mathrm{A}$ في عكس اتجاه عقارب الساعة.

المسألة

ما محصّلة القوى المغناطيسية المؤثرة في الحلقة المربعة؟

الحل

ترجع القوة المبذولة على الحلقة المربعة إلى المجال المغناطيسي المُتولِّد عن التيار المتدفق في السلك المستقيم. وتخبرنا القاعدة الثالثة لليد اليمنى أنّ المجال المغناطيسي الناتج عن التيار المتدفق في السلك يكون موجّهًا في الصفحة في المنطقة التي توجد فيها الحلقة (انظر الشكل 8.10). ونعلم من قاعدة اليد اليمنى والمعادلة 8.4 أنَّ القوة الناتجة المبذولة على الضلع الأيسر من الحلقة تكون باتجاه اليمين، بينما تكون القوة المبذولة على الضلع الأيمن من الحلقة باتجاه اليسار. في الشكل 8.10، تُمثَّل هاتان القوتان بالأسهم الخضراء. وتكون القوتان متساويتين في المقدار ومتضادتين في الاتجاه، لذا يكون مجموعهما صفرًا. ويكون اتجاه القوة المبذولة على الضلع العلوي للحلقة إلى أسفل (السهم الأحمر في الشكل 8.10، الذي يشير إلى اتجاه y السالب)، ويتحدَّد مقدارها من خلال المعادلة 8.7:

$$F_{\mathrm{down}} = \frac{\mu_0 i_1 i_2 a}{2\pi d}$$

حيث a هو طول الضلع العلوي للحلقة. بينما يكون اتجاه القوة المبذولة على الضلع السفلي إلى أعلى (السهم الأحمر الآخر في الشكل 8.10، الذي يشير إلى اتجاه y الموجب)، ويتحدَّد مقدارها من خلال

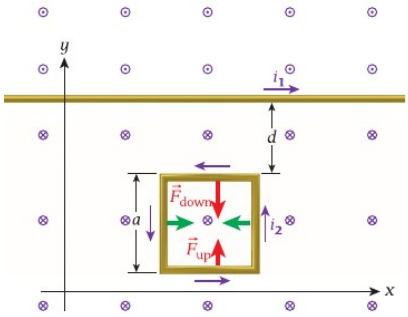
$$F_{\mathrm{up}} = \frac{\mu_0 i_1 i_2 a}{2\pi(d+a)}$$

ومن ثَمَّ، يمكننا التعبير عن محصّلة القوة المغناطيسية المبذولة على الحلقة على النحو التالي:

$$\vec{F} = (F_{\mathrm{up}} - F_{\mathrm{down}})\hat{y}$$

وبالتعويض بالقيم، نحصل على

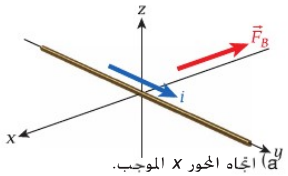
$$\vec{F} = \frac{(4\pi\times10^{-7}\ \mathrm{T\ m/A})(5.00\ \mathrm{A})(2.20\ \mathrm{A})(0.250\ \mathrm{m})}{2\pi}\left(\frac{1}{0.350\ \mathrm{m}} - \frac{1}{0.100\ \mathrm{m}}\right)\hat{y} = (-3.93\times10^{-6})\,\hat{y}\ \mathrm{N}$$



الشكل 8.10 سلك يحمل تيارًا وحلقة مربعة.

مراجعة المفاهيم 8.5

يحمل سلكٌ تيارًا، i، في اتجاه y الموجب، كما يظهر في الشكل. يقع السلك في مجال مغناطيسي منتظم، $\vec{B}$ مُوجَّه بطريقة تعمل على زيادة القوة المغناطيسية إلى أقصى درجة. تسري القوة المغناطسية المؤثرة على السلك، $\vec{F}_B$ في اتجاه x السالب. ما اتجاه المجال المغناطيسي؟



a) اتجاه المحور x الموجب.

b) اتجاه المحور x السالب

c) اتجاه المحور y السالب.

d) اتجاه المحور z الموجب

e) اتجاه المحور z السالب.

مسألة محلولة 8.2 المسرع الكهرومغناطيسي

يجري تطوير مسرعات كهرومغناطيسية لتسريع حبيبات الوقود في تجارب الاندماج النووي، ولإطلاق المركبات الفضائية إلى مداراتها. وتُجري البحرية الأمريكية تجارب باستخدام هذه المسرعات لإطلاق

-يتبع

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education



الشكل 8.11 مطلق قذائف كهرومغناطيسي جديد.

مقذوفاتٍ بسرعاتٍ عالية للغاية، مثل مُطلِق القذائف الموضّح في الشكل 8.11. في مُطلِق القذائف هذا، تسري التيارات عبر ساقي توصيلٍ متوازيين، متصلين بموصِّل قابل للتحرك وموجَّه بشكل متعامد على الساقين. ويتم توصيل المقذوف بالموصِّل القابل للتحرك. بالنسبة إلى هذا المثال، سنفترض أنّ مُطلِق القذائف يتكوَّن من ساقين متوازيين بمقطع عرضي يبلغ نصف قطره $r = 5.00\ \text{cm}$. وتفصل بين مَركزيه المسافة $d = 25.0\ \text{cm}$. ويبلغ طولهما $L = 5.00\ \text{m}$. وأنّ مُطلِق القذائف يُسرِّع المقذوف لبلوغ طاقة حركية مقدارها $K = 32.0\ \text{MJ}$. كما يعمل المقذوف أيضًا كموصِّل قابل للتحرك.

المسألة

ما مقدار التيار اللازم لتسريع المقذوف؟

الحل

فكِّر يسري التياران في الساقين في اتجاهين متعاكسين. ويكون التيار المتدفق عبر الموصِّل القابل للتحرك متعامدًا على التيارين المتدفقين في الساقين. وتكون المجالات المغناطيسية الناتجة عن الساقين في الاتجاه نفسه، كما أنّها تبذل قوى على الموصِّل القابل للتحرك في الاتجاه نفسه. وتعتمد القوة الناتجة عن المجال المغناطيسي لكل ساق على المسافة من الساق. ومن ثَمَّ، يجب علينا إجراء تكامل للقوة على طول المسافة بين الساقين للحصول على القوة الكلية. تكون القوة الكلية المبذولة على الموصِّل القابل للتحرك ضِعف القوة الناتجة عن المجال المغناطيسي من ساق واحد. وتكون الطاقة الحركية التي اكتسبها المقذوف هي القوة الكلية التي تبذلها المجالات المغناطيسية للساقين مضروبةً في المسافة التي تؤثر فيها القوة.

ارسم يوضّح الشكل 8.12 المنظر العلوي والمقطع العرضي للساقين والموصِّل القابل للتحرك.

ابحث إنّ الموصِّل القابل للتحرك الحامل للتيار، والذي يكمل الدائرة بين الساقين، هو مقذوف أيضًا، ويتسارع تحت تأثير القوى المغناطيسية الناتجة عن الساقين. وتعتمد القوة المبذولة على المقذوف على المسافة، x، من مركز ساق، كما هو موضّح في الشكل 8.12b. ومن ثَمَّ، لحساب القوة الكلية المبذولة على المقذوف، يجب علينا حساب التكامل على طول المقذوف. نستخدم المعادلة 8.4 لإيجاد مقدار المجال المغناطيسي، B_1، من التيار i المتدفق في الساق 1 عند المسافة x من مركز الساق:

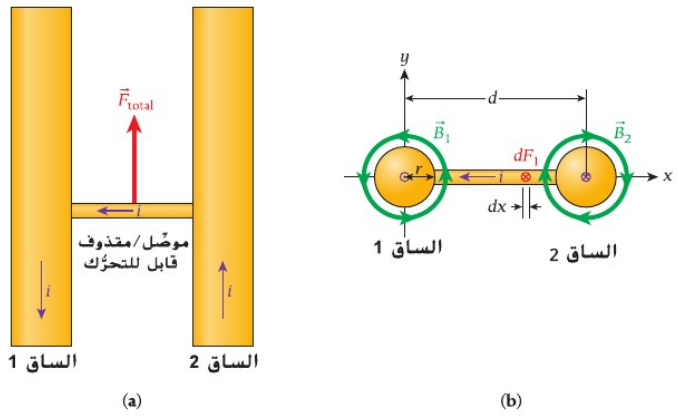
$$B_1 = \frac{\mu_0 i}{2\pi x}$$

وفقًا للمعادلة 8.6، فإنّ مقدار القوة التفاضلية، dF_1، المبذولة على الطول التفاضلي dx، للمقذوف من خلال المجال المغناطيسي الناتج عن الساق 1 يساوي

$$dF_1 = i(dx)B_1 = i(dx)\left(\frac{\mu_0 i}{2\pi x}\right)$$

يتحدَّد اتجاه القوة من خلال القاعدة الثالثة لليد اليمنى، والتي تخبرنا أنَّ اتجاه القوة إلى أعلى في مستوى الصفحة في الشكل 8.12a. وفي الصفحة في الشكل 8.12b. ويتحدَّد مقدار القوة المبذولة على المقذوف من خلال حساب التكامل dF_1 على طول المقذوف:

$$\text{(i)}\quad F_1 = \int_r^{d-r} dF_1 = \int_r^{d-r} \frac{\mu_0 i^2}{2\pi}\frac{dx}{x} = \frac{\mu_0 i^2}{2\pi}[\ln x]_r^{d-r} = \frac{\mu_0 i^2}{2\pi}(\ln(d-r) - \ln r) = \frac{\mu_0 i^2}{2\pi}\ln\left(\frac{d-r}{r}\right)$$



الشكل 8.12 رسم تخطيطي لمطلق قذائف: (a) منظر علوي، (b) منظر المقطع العرضي.

McGraw-Hill Education محفوظة لصالح مؤسسة © حقوق الطبع والتأليف

نظرًا لأنّ المجال المغناطيسي الناتج عن الساق 2 يكون في نفس اتجّاه المجال المغناطيسي الناتج عن الساق 1. فإنّ القوة التي يبذلها المجال المغناطيسي الناتج عن الساق 2 على المقذوف هي نفسها القوة الناتجة عن الساق 1. ومن ثَمَّ، فإنّ مقدار القوة الكلية المبذولة على المقذوف يساوي

$$F_{\text{total}} = 2F_1 \quad \text{(ii)}$$

تساوي الطاقة الحركية التي اكتسبها المقذوف مقدار القوة المبذولة مضروبةً في المسافة التي تؤثر فيها القوة

$$K = F_{\text{total}}L \quad \text{(iii)}$$

حوّل إلى أبسط صورة يمكننا دمج المعادلات (i) و(ii) و(iii) للحصول على

$$K = 2F_1L = 2\left[\frac{\mu_0 i^2}{2\pi}\ln\left(\frac{d-r}{r}\right)\right]L = \frac{\mu_0 L i^2}{\pi}\ln\left(\frac{d-r}{r}\right)$$

بحل هذه المعادلة لإيجاد التيار، نحصل على

$$i = \sqrt{\frac{K\pi}{\mu_0 L \ln\left(\frac{d-r}{r}\right)}}$$

احسب بالتعويض بالقيم العددية، نحصل على

$$i = \sqrt{\frac{K\pi}{\mu_0 L \ln\left(\frac{d-r}{r}\right)}} = \sqrt{\frac{\left(32.0\times10^6\ \text{J}\right)\pi}{\left(4\pi\times10^{-7}\ \frac{\text{T m}}{\text{A}}\right)(5.00\ \text{m})\ln\left(\frac{25.0\ \text{cm}-5.00\ \text{cm}}{5.00\ \text{cm}}\right)}} = 3.397287\times10^6\ \text{A}$$

قرّب نقرّب النتيجة إلى ثلاثة أرقام معنوية:

$$i = 3.40\cdot10^6\ \text{A} = 3.40\ \text{MA}$$

تحقَّق ثانية لنتحقَّق ثانية من النتيجة بالنظر إلى القوة المبذولة على المقذوف. بالتعويض بالنتيجة الخاصة بالتيار في المعادلة (i) لإيجاد مقدار القوة التي يبذلها المجال المغناطيسي للساق 1. نحصل على

$$F_1 = \frac{\mu_0 i^2}{2\pi}\ln\left(\frac{d-r}{r}\right) = \frac{\left(4\pi\times10^{-7}\ \frac{\text{T m}}{\text{A}}\right)\left(3.40\times10^6\ \text{A}\right)^2}{2\pi}\ln\left(\frac{25.0\ \text{cm}-5.00\ \text{cm}}{5.00\ \text{cm}}\right) = 3.20\times10^6\ \text{N}$$

يمكننا تقريب مقدار هذه القوة بافتراض أنّ القوة ثابتة على طول الموصِّل ومتساوية مع القيمة عند $x = d/2$:

$$F_1 = i(d-2r)B = i\left(\frac{\mu_0 i(d-2r)}{2\pi\left(\frac{d}{2}\right)}\right) = \frac{\mu_0 i^2}{\pi}\frac{d-2r}{d}$$

$$= \frac{\left(4\pi\times10^{-7}\ \frac{\text{T m}}{\text{A}}\right)\left(3.40\times10^6\ \text{A}\right)^2}{\pi}\frac{[25.0\ \text{cm}-2(5.00\ \text{cm})]}{25.0\ \text{cm}} = 2.77\times10^6\ \text{N}$$

تقع هذه القيمة في نطاق المعامل 2 من القيمة التي حسبناها للقوة، والتي تبدو منطقية. ومع ذلك، للتأكُّد فحسب، دعونا نحسب الطاقة الحركية للمقذوف باستخدام القيمة المحسوبة للقوة:

$$K = F_{\text{total}}L = 2F_1L = 2\left(3.20\times10^6\ \text{N}\right)(5.00\ \text{m}) = 32.0\times10^6\ \text{J}$$

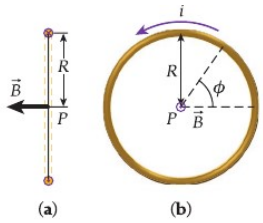
تتفق هذه النتيجة مع 32.0 MJ المُفترَضة في حالة المسألة.

لاحظ أنّه إذا تحدَّد من خلال مطلِق القذائف هذا أن الطاقة الحركية لمقذوفٍ كتلته $m = 5.00$ kg هي 32.0 MJ، فستكون سرعته

$$v = \sqrt{\frac{2K}{m}} = \sqrt{\frac{2\left(32.0\times10^6\ \text{J}\right)}{5.00\ \text{kg}}} = 3.58\ \text{km/s}$$

سيكون مُطلِق القذائف قادرًا على إطلاق مقذوف بسرعة مقدارها 10 أضعاف سرعة الصوت، وهي ما تُعد أكبر بكثير من السرعة التقليدية لرصاصة، أي ما يعادل 3 أضعاف سرعة الصوت.

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education



الشكل 8.13 حلقة دائرية نصف قطرها R تحمل تيارًا i. a) منظر جانبي. (b) منظر أمامي. يشير التقاطع في الدائرة الصفراء العليا في الجزء (a) أنّ التيار أعلى الحلقة يكون في الصفحة، وتشير النقطة الموجودة في الدائرة الصفراء السفلى في الجزء (a) إلى أنّ التيار الوجود أسفل الحلقة يكون خارج الصفحة تقع النقطة P عند مركز الحلقة.

المجال المغناطيسي الناتج عن مرور تيار في حلقة سلك

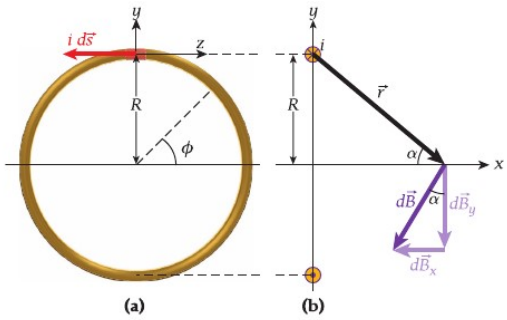
لإيجاد المجال المغناطيسي في مركز حلقة سلك دائرية حاملة للتيار، يوضّح الشكل 8.13a مقطعًا عرضيًا لحلقة دائرية نصف قطرها R تحمل التيار، i. وبتطبيق المعادلة 8.3، $dB = \mu_0 i\,ds\sin\theta/(4\pi r^2)$. على هذه الحالة، يمكننا أن نلاحظ أنّ $r = R$ و$\theta = 90°$ لكل عنصر تيار $i\,ds$ على طول الحلقة. وبالنسبة إلى مقدار المجال المغناطيسي في مركز الحلقة الناتجة عن كل عنصر تيار، فإنّنا نحصل على

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{i\,ds\sin 90°}{R^2} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{i\,ds}{R^2}$$

بالدوران حول الحلقة في الشكل 8.13b، يمكننا ربط الزاوية ϕ بعنصر التيار من خلال $ds = R\,d\phi$. ما يسمح لنا بحساب مقدار المجال المغناطيسي في مركز الحلقة:

$$B = \int dB = \int_0^{2\pi}\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{iR\,d\phi}{R^2} = \frac{\mu_0 i}{2R} \tag{8.8}$$

ضع في اعتبارك أنّ المعادلة 8.8 تُحدِّد مقدار المجال المغناطيسي فقط في مركز الحلقة، حيث يبلغ المقدار $B(r = 0) = \frac{1}{2}\mu_0 i/R$. ولتحديد اتجاه المجال المغناطيسي، نستخدم مرةً أخرى شكلاً مختلفًا من القاعدة الأولى لليد اليمنى. باستخدام يدك اليمنى، أشِر بإبهامك في اتجاه عنصر التيار (في الصفحة للدائرة العليا في الشكل 8.13a المميَّز بتقاطع)، وبالسبابة في اتجاه المتجه القطري الناتج عن عنصر التيار (إلى أسفل)؛ ومن ثمّ سيشير إصبعك الأوسط إلى اليسار. وباستخدام القاعدة الثالثة لليد اليمنى (الشكل 8.5)، نجد أيضًا أن التيار الموضَّح في الشكل 8.13 ينتج مجالاً مغناطيسيًا $\vec{B}$ متجهًا نحو اليسار.



الشكل 8.14 الهندسة المستخدمة لحساب المجال المغناطيسي على طول محور حلقة الحاملة للتيار: (a) منظر أمامي، (b) منظر جانبي.

والآن، لنوجد المجال المغناطيسي الناتج عن الحلقة على طول محور الحلقة بدلاً منه في المركز (الشكل 8.14). علينا أن ننشئ نظامًا إحداثيًا، بحيث يقع محور الحلقة على طول المحور x، ويقع مركز الحلقة عند $x = 0$ و$y = 0$ و$z = 0$. المتجه القطري $\vec{r}$ عبارة عن الإزاحة إلى أي نقطة على طول المحور x من عنصر التيار، $i\,d\vec{s}$ على طول الحلقة. ويقع عنصر التيار الموضَّح في الشكل 8.14 في اتجاه z السالب. بينما يقع المتجه القطري $\vec{r}$ في المستوى xy، ويكون متعامدًا على عنصر التيار. وتكون هذه الحالة مماثلة لأي عنصر تيار حول الحلقة. ومن ثمّ، يمكننا استخدام المعادلة 8.3 حيث $\theta = 90°$ والحصول على تعبير لإيجاد مقدار المجال المغناطيسي dB عند أي نقطة على طول المحور x:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{i\,ds\sin 90°}{r^2} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{i\,ds}{r^2}$$

يحُدِّد شكل مختلف من القاعدة الأولى لليد اليمنى اتجاه المجال المغناطيسي dB: باستخدام يدك اليمنى، أشِر بإبهامك في اتجاه عنصر التيار (اتجاه z السالب)، وبالسبابة في اتجاه المتجه القطري (اتجاه x الموجب واتجاه y السالب)؛ وسيتحدَّد اتجاه المجال المغناطيسي dB من خلال إصبعك الأوسط (اتجاه x السالب واتجاه y السالب). يظهر المجال المغناطيسي dB في الشكل 8.14. وللحصول على المجال المغناطيسي الكلي، يتعيّن علينا حساب التكامل على عنصر التيار التفاضلي. ومن تماثل الحالة، يمكننا ملاحظة أنّ مركّبة y للمجال المغناطيسي، dB_y، سيجري تكاملها إلى الصفر. وتتحدّد مركّبة x للمجال المغناطيسي، dB_x، من خلال

$$dB_x = dB\sin\alpha = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{i\,ds}{r^2}\sin\alpha$$

حيث α هي الزاوية بين $\vec{r}$ والمحور x (انظر الشكل 8.14b). ويمكننا التعبير عن مقدار $\vec{r}$ بدلالة x وR حيث $r = \sqrt{x^2 + R^2}$ والتعبير عن $\sin\alpha$ بدلالة x ونصف قطر الحلقة R على النحو التالي: $\sin\alpha = R/\sqrt{x^2 + R^2}$ ويمكننا بعد ذلك إعادة كتابة التعبير لإيجاد مركّبة x للمجال المغناطيسي dB على هذا النحو

$$dB_x = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{i\,ds}{x^2 + R^2}\frac{R}{\sqrt{x^2 + R^2}} = \frac{\mu_0 i\,ds}{4\pi}\frac{R}{\left(x^2 + R^2\right)^{3/2}}$$

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

إنَّ هذه المعادلة الخاصة بإيجاد B_x يكون مستقلاً عن موقع عنصر التيار، وبالتالي يمكن تبسيط التكامل لإيجاد مقدار المجال الكلي إلى

$$B_x = \int dB_x = \frac{\mu_0 iR}{4\pi\left(x^2 + R^2\right)^{3/2}} \int ds$$

بالدوران حول الحلقة، يمكننا ربط الزاوية ϕ بعنصر التيار من خلال $ds = R\,d\phi$ (انظر الشكل 8.14a). ما يتيح لنا حساب المجال المغناطيسي على طول محور الحلقة:

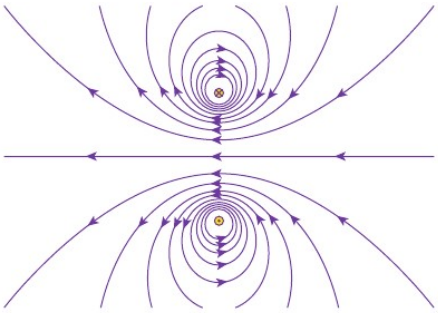
$$B_x = \frac{\mu_0 iR}{4\pi\left(x^2 + R^2\right)^{3/2}} \int_0^{2\pi} R\,d\phi = \frac{\mu_0 i 2\pi}{4\pi} \frac{R^2}{\left(x^2 + R^2\right)^{3/2}}$$

or

$$B_x = \frac{\mu_0 i}{2} \frac{R^2}{\left(x^2 + R^2\right)^{3/2}} \tag{8.9}$$

من خلال تطبيقنا السابق للشكل المختلف من القاعدة الأولى لليد اليمنى، نعلم أنَّ المجال المغناطيسي على طول محور الحلقة يكون في اتجاه x السالب، كما هو موضّح في الشكل 8.14. ويمكننا أيضًا تطبيق القاعدة الثالثة لليد اليمنى للحصول على اتجاه المجال المغناطيسي: في أي نقطة على الحلقة، أشِر بظل إبهامك على الحلقة في اتجاه التيار، وستنقبض أصابعك في اتجاهٍ يشير إلى أنَّ المجال داخل الحلقة يكون في اتجاه x السالب.

باستخدام أساليب أكثر تقدمًا وبمساعدة جهاز الكمبيوتر، يمكننا تحديد المجال المغناطيسي الناتج عن حلقة حاملة للتيار في نقاط أخرى في الفضاء. تظهر خطوط المجال المغناطيسي الناتجة عن حلقة سلكية في الشكل 8.15. ولا تكون قيمة المجال المغناطيسي التي تحدّدها المعادلة 8.8 صحيحةً إلا في نقطة المركز في الشكل 8.15، بينما لا تكون قيمة المجال المغناطيسي التي تحدّدها المعادلة 8.9 صحيحةً إلا على طول محور الحلقة.



الشكل 8.15 خطوط المجال المغناطيسي من حلقة سلك تحمل تيارًا. بالنظر إلى حافة الحلقة، تشير الدائرة الصفراء العلوية المحتوية على خطين متقاطعين إلى التيار المتجه داخل الصفحة، بينما تشير الدائرة الصفراء السفلية المحتوية على نقطة إلى التيار المتجه خارج الصفحة.

مسألة محلولة 8.3 المجال المغناطيسي الناتج عن مرور تيار في سلك يحتوي على حلقة

تتكوّن حلقة يبلغ نصف قطرها $r = 8.30$ mm في منتصف سلكٍ طويل مستقيم معزول يحمل تيارًا مقداره $i = 26.5$ mA (الشكل 8.16a).

المسألة

ما مقدار المجال المغناطيسي في مركز الحلقة؟

الحل

فكّر يساوي المجال المغناطيسي في مركز الحلقة مجموع متجهات المجالات المغناطيسية الناتجة عن كلٍّ من السلك الطويل المستقيم والحلقة.

ارسم يظهر المجال المغناطيسي الناتج عن السلك الطويل المستقيم، $\vec{B}_{\text{wire}}$، والمجال المغناطيسي الناتج عن الحلقة، $\vec{B}_{\text{loop}}$، في الشكل 8.16b.

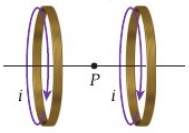
يُتبع

سؤال الاختبار الذاتي 8.3

أثبت أن المعادلة 8.9 لإيجاد مقدار المجال المغناطيسي على طول محور حلقة حاملة للتيار تُختزَل إلى المعادلة 8.8 لإيجاد مقدار المجال المغناطيسي عند مركز الحلقة الحاملة للتيار.

مراجعة المفاهيم 8.6

تحمل حلقتان متماثلتان من السلك التيار نفسه، i. كما يظهر في الشكل. ما اتجاه المجال المغناطيسي عند النقطة P؟



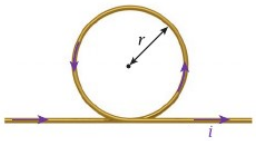
a) لأعلى (باتجاه أعلى الصفحة)

b) باتجاه اليمين

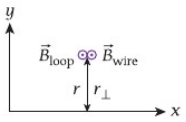
c) لأسفل

d) باتجاه اليسار

e) المجال المغناطيسي عند النقطة P يساوي صفرًا.



(a)



(b)

الشكل 8.16 (a) حلقة نصف قطرها r في سلك طويل مستقيم معزول يحمل تيارًا، i. (b) أُزيحَ المجال المغناطيسي من السلك والمجال المغناطيسي من الحلقة قليلاً للتوضيح.

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

ابحث باستخدام القاعدة الثالثة لليد اليمنى، نجد أنَّ كلا المجالين المغناطيسيين يشيران خارج الصفحة في مركز الحلقة، كما هو موضَّح في الشكل 8.16b. ومن ثَمَّ، يمكننا جمع مقدار المجال المغناطيسي الناتج عن السلك ومقدار المجال المغناطيسي الناتج عن الحلقة. يتحدَّد مقدار المجال المغناطيسي الناتج عن السلك في مركز الحلقة من خلال المعادلة 8.4:

$$B_{\text{wire}} = \frac{\mu_0 i}{2\pi r_\perp}$$

حيث $r_\perp$ هي المسافة العمودية من السلك، والتي تساوي r، نصف قطر الحلقة. بينما يتحدَّد مقدار المجال المغناطيسي الناتج عن الحلقة في مركزها من خلال المعادلة 8.8:

$$B_{\text{loop}} = \frac{\mu_0 i}{2r}$$

حوّل إلى أبسط صورة يجب أن نجمع مقداري المجالين المغناطيسيين بما أنَّ اتجاه المتجهات واحد:

$$B = B_{\text{wire}} + B_{\text{loop}} = \frac{\mu_0 i}{2\pi r} + \frac{\mu_0 i}{2r} = \frac{\mu_0 i}{2r}\left(\frac{1}{\pi} + 1\right).1$$

احسب بالتعويض باستخدام القيم العددية نحصل على

$$B = \frac{\mu_0 i}{2r}\left(\frac{1}{\pi} + 1\right) = \frac{\left(4\pi \times 10^{-7}\ \text{T m/A}\right)\left(26.5 \times 10^{-3}\ \text{A}\right)}{2\left(8.30 \times 10^{-3}\ \text{m}\right)}\left(\frac{1}{\pi} + 1\right) = 2.64463 \times 10^{-6}\ \text{T}$$

قرِّب نقرّب النتيجة إلى ثلاثة أرقام معنوية، ونلاحظ اتجاه المجال:

$$\vec{B} = 2.64 \times 10^{-6}\ \text{T}\ \textbf{خارج الصفحة}$$

تحقَّق ثانية للتحقّق ثانية من النتيجة التي توصلنا إليها، يمكننا حساب مقدار المجال المغناطيسي الناتج عن كلٍّ من السلك والحلقة بشكلٍ منفصل. يبلغ مقدار المجال المغناطيسي الناتج عن السلك

$$B_{\text{wire}} = \frac{\mu_0 i}{2\pi r} = \frac{\left(4\pi \times 10^{-7}\ \text{T m/A}\right)\left(26.5 \times 10^{-3}\ \text{A}\right)}{2\pi\left(8.30 \times 10^{-3}\ \text{m}\right)} = 6.385 \times 10^{-7}\ \text{T}$$

بينما يبلغ مقدار المجال المغناطيسي الناتج عن الحلقة

$$B_{\text{loop}} = \frac{\mu_0 i}{2r} = \frac{\left(4\pi \times 10^{-7}\ \text{T m/A}\right)\left(26.5 \times 10^{-3}\ \text{A}\right)}{2\left(8.30 \times 10^{-3}\ \text{m}\right)} = 2.006 \times 10^{-6}\ \text{T}$$

ويتطابق مجموع هذين المقدارين مع النتيجة التي توصلنا إليها:

$$6.385 \times 10^{-7}\ \text{T} + 2.006 \times 10^{-6}\ \text{T} = 2.64 \times 10^{-6}\ \text{T}$$

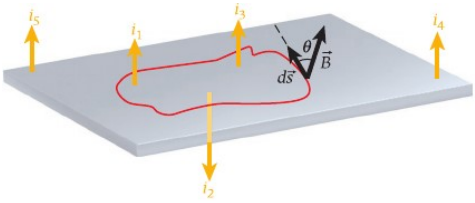
8.3 قانون أمبير Ampere's Law

إن حساب المجال الكهربائي الناتج عن توزيع شحنة كهربائية يمكن أن يتطلب إجراء حساب تكاملٍ ليس بالسهل. ومع ذلك، إذا كان لتوزيع الشحنة تماثل أسطواني أو كروي أو سطحي، فيمكننا تطبيق قانون غاوس والحصول على المجال الكهربائي بطريقة رائعة. وبالمثل، قد تنطوي عملية حساب المجال المغناطيسي الناتج عن توزيع عشوائي لعناصر التيار باستخدام قانون بيو–سافار (المعادلة 8.1) على تقييم تكاملٍ صعب. وبدلاً من ذلك، يمكننا تجنّب استخدام قانون بيو–سافار وتطبيق **قانون أمبير** بدلاً منه لحساب المجال المغناطيسي الناتج عن توزيع عناصر التيار عندما يكون للتوزيع تماثل أسطواني أو غير ذلك من أنواع التماثل. وفي كثيرٍ من الأحيان، يمكن حل المسائل بجهدٍ أقل بكثير بهذه الطريقة مقارنةً باستخدام التكامل المباشر. العبارة الرياضية لقانون أمبير هي

$$\oint \vec{B} \bullet d\vec{s} = \mu_0 i_{\text{enc}} \qquad (8.10)$$

يعني الرمز $\oint$ أنَّ حساب التكامل الخاص بالتكاملية، $\vec{B} \bullet d\vec{s}$، تمَّ على حلقةٍ مغلقة، تُسمَّى **الحلقة الأمبيرية**. يتم اختيار هذه الحلقة بحيث لا يكون حساب التكامل في المعادلة 8.10 صعبًا، وهو إجراءٌ تماثل للإجراء المُستخدَم في تطبيق قانون جاوس. يساوي التيار الكلي المغلق في هذه الحلقة i_{enc}، والذي يُعد مشابهًا أيضًا لقانون جاوس، حيث يحصُر السطح المغلق المحدَّد شحنةً كلية.

McGraw-Hill Education حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة



الشكل 8.17 خمسة تيارات وحلقة أمبيرية.

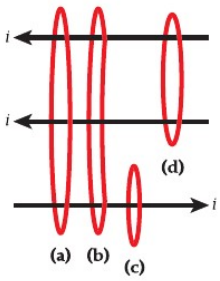
وكمثال على كيفية استخدام قانون أمبير، تأمل التيارات الخمسة الموضَّحة في الشكل 8.17، والتي تكون جميعها متعامدة على المستوى. تحصر الحلقة الأمبيرية، التي يمثلها الخط الأحمر، التيارات i_1، وi_2، وi_3. وتستبعد التيارين i_4 وi_5. ووفقًا لقانون أمبير، يتحدَّد تكامل الحلقة المغلقة على المجال المغناطيسي الناتج عن هذه التيارات الثلاثة من خلال

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \oint B\cos\theta\, ds = \mu_0 (i_1 - i_2 + i_3)$$

حيث θ هي الزاوية بين اتجاه المجال المغناطيسي، $\vec{B}$ واتجاه عنصر الطول، $d\vec{s}$ عند كل نقطة على طول الحلقة الأمبيرية. ويمكن إجراء التكامل على الحلقة الأمبيرية في أيٍّ من الاتجاهين. ويشير الشكل 8.17 إلى اتجاه تكامل من الاتجاه $d\vec{s}$ إلى جانب المجال المغناطيسي الناتج. ويمكن تحديد رمز إشارة التيارات المساهمة باستخدام إحدى قواعد اليد اليمنى: اقبض أصابعك في اتجاه التكامل، ومن ثَمَّ تكون التيارات المتجهة في نفس اتجاه إبهامك موجبة. ويكون تياران من التيارات الثلاثة في الحلقة الأمبيرية موجبين، ويكون الثالث سالبًا. من السهل جمع التيارات الثلاثة، لكنّ التكامل $\oint B\cos\theta\, ds$ لا يمكن حسابه بسهولة. ومع ذلك، لنتناول بعض الحالات الخاصة التي تحتوي فيها الحلقات الأمبيرية على توزيعاتٍ متماثلة للتيار يمكن استغلالها لإجراء التكامل.

مراجعة المفاهيم 8.7

تحمل الأسلاك الثلاثة تيارات بالمقدار نفسه، i، في الاتجاهات الموضَّحة في الشكل. وتظهر أربع حلقات أمبيرية (a)، و(b)، و(c) و(d). ما الحلقة الأمبيرية التي يكون فيها مقدار $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s}$ عند أقصى قيمة له؟



a) الحلقة a
b) الحلقة b
c) الحلقة c
d) الحلقة d
e) تنتج كلُّ الحلقات الأربع القيمة نفسها لـ $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s}$

المجال المغناطيسي داخل سلك طويل مستقيم

يوضِّح الشكل 8.18 التيار، i، المتدفق خارج الصفحة في سلك يقطع عرضي دائري يبلغ نصف قطره R. وهذا التيار موزّع بانتظام على مساحة المقطع العرضي للسلك. ولإيجاد المجال المغناطيسي الناتج عن هذا التيار، نستخدم حلقة أمبيرية يبلغ نصف قطرها $r_\perp$، تمثلها الدائرة الحمراء. إذا كانت لـ $\vec{B}$ مركَّبة خارجية (أو داخلية)، فستكون لها، بالتماثل، مركَّبة خارجية (أو داخلية) عند كل النقاط الموجودة حول الحلقة، ولا يمكن أن يكون خط المجال المغناطيسي المتناظر مغلقًا أبدًا. ولذلك، يجب أن يكون $\vec{B}$ مماسيًا للحلقة الأمبيرية. ومن ثَمَّ، يمكننا إعادة كتابة تكامل قانون أمبير على النحو التالي:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = B \oint d\vec{s} = B 2\pi r_\perp$$

يمكننا حساب التيار المغلق من نسبة مساحة الحلقة الأمبيرية إلى مساحة المقطع العرضي للسلك.

$$i_{\text{enc}} = i \frac{A_{\text{loop}}}{A_{\text{wire}}} = i \frac{\pi r_\perp^2}{\pi R^2}$$

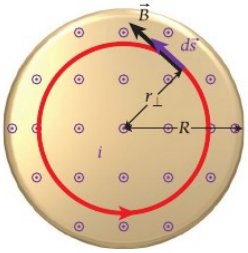
وبالتالي، نحصل على

$$2\pi B r_\perp = \mu_0 i \frac{\pi r_\perp^2}{\pi R^2}$$

أو

$$B = \left(\frac{\mu_0 i}{2\pi R^2}\right) r_\perp \qquad (8.11)$$

لنقارن بين المعادلات التي تصف مقادير المجال المغناطيسي خارج السلك وداخله — المعادلتان 8.4 و8.11. أولاً، بالتعويض عن R بـ $r_\perp$ في كلا المعادلتين، نحصل على النتيجة المماثلة لمقدار المجال المغناطيسي على سطح السلك في كلتا الحالتين: $B(R) = \mu_0 i/2\pi R$. تعطي كلتا المعادلتين الحل نفسه على سطح السلك. داخل السلك، نجد أنّ مقدار المجال المغناطيسي يزداد خطيًا حيث $r_\perp$ حتى يصل إلى القيمة $B(R) = \mu_0 i/(2\pi R)$، ثم يقل مع معكوس $r_\perp$. ويوضِّح الشكل 8.19 هذه التغيرات في الرسم البياني في الأسفل. يوضِّح الجزء العلوي من الشكل المقطعَ العرضي عبر السلك (الجزء الذهبي)، وخطوط المجال المغناطيسي (الدوائر السوداء، وهي متباعدة للإشارة إلى شدة المجال المغناطيسي)، ومتجهات المجال المغناطيسي عند نقاط محدَّدة في الفضاء (الأسهم الحمراء).



الشكل 8.18 استخدام قانون أمبير لإيجاد المجال المغناطيسي المتولِّد داخل سلك مستقيم طويل.

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

8.4 المجالات المغناطيسية الخاصة بالملفات اللولبية والحلقية
Magnetic Fields of Solenoids and Toroids

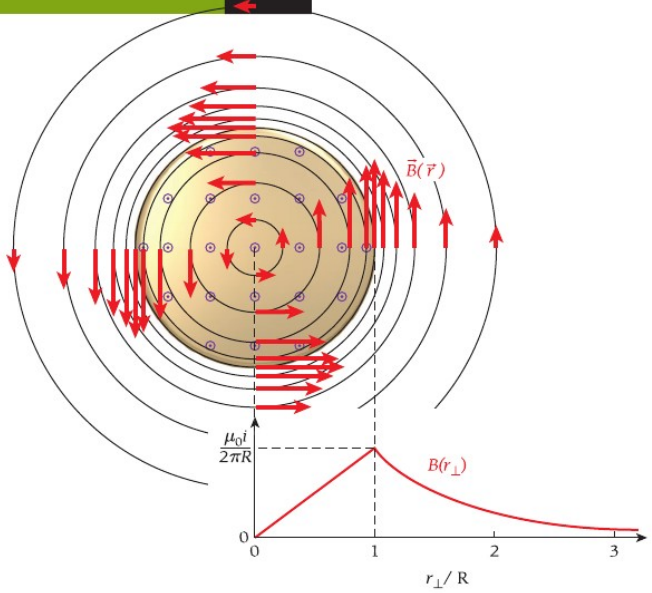
رأينا أنّ التيار المتدفق عبر حلقة واحدة من السلك يُنتِج مجالاً مغناطيسيًا غير منتظم، كما هو موضَّح في الشكل 8.15. ومع ذلك، غالبًا ما تتطلب تطبيقات الحياة اليومية مجالاً مغناطيسيًا منتظمًا. يُسمى الجهاز المُستخدَم عادةً لتوليد مجال مغناطيسي منتظم **ملف هلمهولتز** (الشكل 8.20a). يتكوَّن ملف هلمهولتز من حلقتين محوريتين من السلك. وتتكوَّن كل حلقة محورية من حلقاتٍ متعددة (ملفاتٍ أو لفات) من سلك واحد، وبالتالي تعمل من الناحية المغناطيسية كحلقة واحدة.

تظهر خطوط المجال المغناطيسي الناتجة عن ملف هلمهولتز في الشكل 8.20b. ويمكنك ملاحظة أنَّ ثمة منطقة ذات مجال مغناطيسي منتظم (تتميز بأجزاءٍ فيها خطوط المجال متوازية) في المركز بين الحلقات، على عكس المجال الناتج عن حلقة واحدة الموضَّح في الشكل 8.15. مرةً أخرى، حُسبَت خطوط المجال هذه بمساعدة جهاز كمبيوتر لتوفير فهم نوعي لهندسة المجالات المغناطيسية.

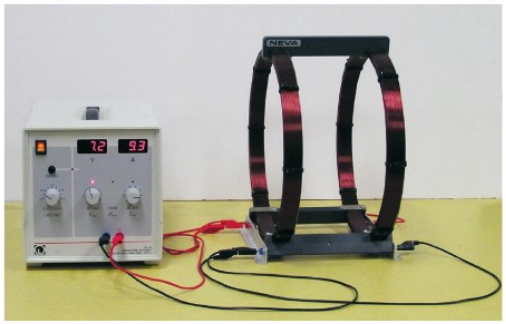
بالانتقال إلى خطوةٍ أبعد بشأن الحلقات المتعددة، يوضِّح الشكل 8.21 خطوط المجال المغناطيسي الناتجة عن أربع حلقاتٍ محورية من السلك. تُوسَّع منطقة المجال المغناطيسي المنتظم في مركز الحلقات، ولكن لاحظ أنَّ المجال لا يكون منتظمًا بالقرب من الأسلاك وبالقرب من الطرفين.

ويتولَّد المجال المغناطيسي المنتظم القوي من **ملف لولبي**، يتكوَّن من حلقاتٍ كثيرة، متقاربة من سلك ملفوف. ويوضِّح الشكل 8.22 خطوط المجال المغناطيسي الناتجة عن ملف لولبي ذي 600 لفة. ويمكنك ملاحظة أنَّ خطوط المجال المغناطيسي قريبة للغاية من بعضها داخل الملف اللولبي ومتباعدة في الجزء الخارجي منه. وكما هو الحال داخل ملف هلمهولتز (الشكل 8.20b)، يكون المجال المغناطيسي منتظمًا داخل الملف اللولبي. ويُعد تباعد خطوط المجال مقياسًا لشدة المجال المغناطيسي. ويمكنك ملاحظة أنَّ المجال المغناطيسي أقوى بكثير داخل الملف اللولبي مقارنةً بالجزء الخارجي من الملف اللولبي.

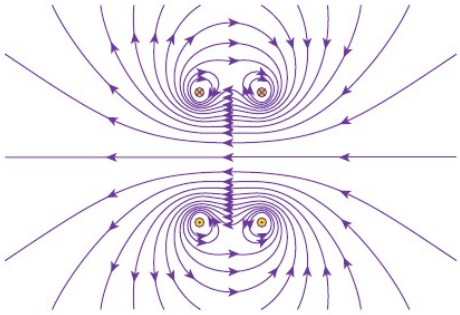
تكون قيمة المجال المغناطيسي في الجزء الخارجي من الملف اللولبي *النموذجي* صفرًا، بينما تكون القيمة داخله عبارة عن قيمة محددة ثابتة منتظمة. ولتحديد مقدار المجال المغناطيسي داخل ملف لولبي نموذجي، يمكننا تطبيق قانون أمبير (المعادلة 8.10) على جزء من ملف لولبي متباعد عن طرفيه (الشكل 8.23). وللقيام بذلك، نختار أولاً حلقة أمبيرية لإجراء عملية التكامل عليها. يتمثل الاختيار الأفضل،



الشكل 8.19 تغيرات المجال المغناطيسي بتغير البعد من مركز سلك يتدفق فيه تيار خارج الصفحة.



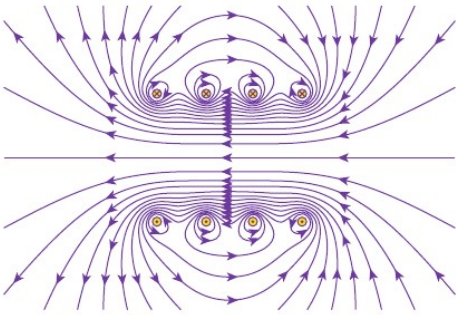
(a)



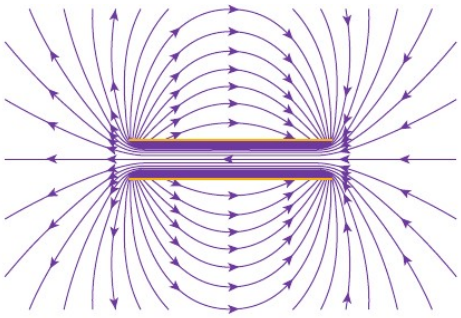
(b)

الشكل 8.20 (a) ملف هلمهولتز نموذجي يُستخدَم في التجارب الفيزيائية لتوليد مجال مغناطيسي منتظم في الجزء الداخلي منه. (b) خطوط المجال المغناطيسي لملف هلمهولتز.

McGraw-Hill Education حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة



الشكل 8.21 المجال المغناطيسي الناتج عن أربع ملفات من أسلاك محورية بها الكثير من اللفات.

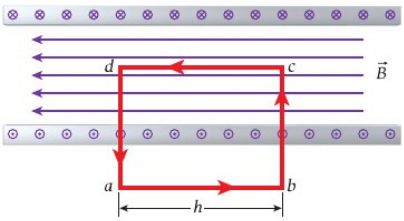


الشكل 8.22 خطوط المجال المغناطيسي لملف لولبي مكوّن من 600 لفة. يتدفق التيار في الجزء العلوي من الملف اللولبي إلى داخل الصفحة، بينما يتدفق التيار في الجزء السفلي من الملف اللولبي إلى خارجها.

الموضَّح بالمستطيل الأحمر في الشكل 8.23، في مسار مغلق للتيار والاستفادة من تماثل الملف اللولبي، وكذلك تحويل تقييم التكامل إلى أبسط صورة:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \int_a^b \vec{B} \cdot d\vec{s} + \int_b^c \vec{B} \cdot d\vec{s} + \int_c^d \vec{B} \cdot d\vec{s} + \int_d^a \vec{B} \cdot d\vec{s}$$

تبلغ قيمة التكامل الثالث على الضلع الأيمن، الواقع بين النقطتين c وd في الجزء الداخلي من الملف اللولبي، Bh. بينما تبلغ قيمة التكاملين الثاني والرابع صفرًا؛ لأنّ المجال المغناطيسي يكون متعامدًا على اتجاه التكامل. ويبلغ التكامل الأول، الواقع بين النقطتين a وb في الجزء الخارجي من الملف اللولبي النموذجي، صفرًا لأنَّ مقدار المجال المغناطيسي يكون صفرًا خارج الملف اللولبي. ومن ثَمَّ، تبلغ قيمة التكامل على الحلقة الأمبيرية بالكامل Bh.



الشكل 8.23 حلقة أمبيرية لتحديد مقدار المجال المغناطيسي لملف لولبي نموذجي.

التيار المغلق هو التيار المحصور في لفات الملف اللولبي الموجودة ضمن الحلقة الأمبيرية. ويكون التيار واحدًا في كل لفة لأنَّ الملف اللولبي مصنوع من سلك واحد. ويتدفق التيار نفسه عبر كل لفة. وبالتالي، فإنَّ التيار المغلق يساوي عدد اللفات مضروبًا في التيار:

$$i_{\text{enc}} = nhi$$

حيث n هو عدد اللفات لكل وحدة طول. لذلك، وفقًا لقانون أمبير، فإنّنا نحصل على

$$Bh = \mu_0 nhi$$

وبالتالي، يبلغ مقدار المجال المغناطيسي داخل ملف لولبي نموذجي

$$B = \mu_0 ni \tag{8.12}$$

لا تكون المعادلة 8.12 صحيحةً إلا بعيدًا عن طرفي الملف اللولبي. ولاحظ أنَّ B لا يعتمد على موقع داخل الملف اللولبي؛ يُنتِج الملف اللولبي النموذجي مجالاً مغناطيسيًا ثابتًا ومنتظمًا داخله ولا يُنتِج مجالاً خارجه. تكون للملف اللولبي الفعلي، مثل الملف اللولبي الموضَّح في الشكل 8.22، مجالاتٌ حافيَّة بالقرب من طرفيه، ولكن لا يزال بإمكانه إنتاج مجال مغناطيسي منتظم عالي الجودة.

مثال 8.2 الملف اللولبي

للملف اللولبي الخاص بالكاشف STAR الموجود في مختبر بروكهافن الوطني في نيويورك، والذي تناولناه بالمناقشة في الوحدة 7، مجال مغناطيسي مقداره 0.50 T عندما يمر فيه تيار مقداره 0.40 kA. ويبلغ طول الملف اللولبي 8.0 m.

المسألة

ما عدد اللفات في هذا الملف اللولبي، بافتراض أنّه ملف لولبي نموذجي؟

-يُتبع

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

الحل

نستخدم المعادلة 8.12 لحساب مقدار المجال المغناطيسي لملف لولبي نموذجي:

$$B = \mu_0 ni \quad \text{(i)}$$

يتحدَّد عدد اللفات لكل وحدة طول من خلال

$$n = \frac{N}{L} \quad \text{(ii)}$$

حيث N هو عدد اللفات، بينما L هو طول الملف اللولبي. بالتعويض عن n من المعادلة (ii) في المعادلة (i)، نحصل على

$$B = \mu_0 i \frac{N}{L} \quad \text{(iii)}$$

بحل المعادلة (iii) لإيجاد عدد اللفات، نحصل على

$$N = \frac{BL}{\mu_0 i} = \frac{(0.50\ \text{T})(8.0\ \text{m})}{\left(4\pi \times 10^{-7}\ \frac{\text{T m}}{\text{A}}\right)(0.40 \times 10^3\ \text{A})} = 8.0 \times 10^3 \text{ لفة}$$

مراجعة المفاهيم 8.8

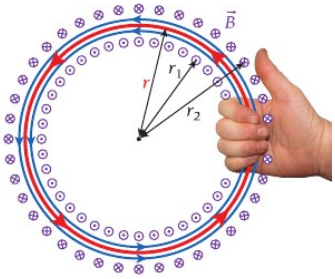
لديك ملفّ لولبي يحتوي على عدد محدد من اللفات، موصَّل بمصدر طاقة يمكنه إمداد كمية ثابتة من التيار. لمضاعفة المجال داخل الملف اللولبي، يمكنك

a) مضاعفة نصف قطر الملف اللولبي.

b) شطر نصف قطر الملف اللولبي نصفين.

c) مضاعفة طول الملف اللولبي.

d) شطر طول الملف اللولبي نصفين.



الشكل 8.24 ملف حلقي
يحتوي على حلقة أسبيرية (حمراء) على شكل دائرة نصف قطرها r. تنص القاعدة الرابعة لليد اليمنى على أنك إذا وضعت أصابع يدك اليمنى في اتجاه تدفق التيار، فسيوضح الإبهام اتجاه المجال المغناطيسي داخل المغناطيس الحلقي.

في حال ثني الملف اللولبي بحيث يمكن أن يلتقي طرفاه (الشكل 8.24)، فإنّه يكتسب شكلاً دائريًا (طارة) بحيث يكوّن السلك سلسلةً من الحلقات، يحمل كلٌّ منها التيار نفسه المتدفق عبره. ويُسمَّى هذا الملف *المغناطيس الحلقي*، أو **الملف الحلقي**. كما هو الحال بالنسبة إلى الملف اللولبي النموذجي، يبلغ مقدار المجال المغناطيسي خارج ملفات مغناطيس حلقي نموذجي صفرًا. يمكن حساب مقدار المجال المغناطيسي داخل ملف حلقي باستخدام قانون أمبير واختيار حلقة أمبيرية على هيئة دائرة نصف قطرها r، مثل هذه $r_1 < r < r_2$، حيث r_1 وr_2 هما نصفا القطر الداخلي والخارجي للملف الحلقي. ودائمًا ما يكون المجال المغناطيسي مماسًا للحلقة الأمبيرية، ومن ثمَّ يكون لدينا

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = 2\pi r B$$

التيار المغلق هو عدد الحلقات (أو اللفات)، N، في الملف الحلقي مضروبًا في التيار، i، المار في السلك (لكل حلقة)، ومن ثمَّ، يعطينا قانون أمبير

$$2\pi r B = \mu_0 N i$$

ولذلك، يتحدَّد مقدار المجال المغناطيسي داخل الملف الحلقي من خلال

$$B = \frac{\mu_0 N i}{2\pi r} \quad (8.13)$$

لاحظ أنَّ على عكس المجال المغناطيسي داخل الملف اللولبي، يعتمد مقدار المجال المغناطيسي داخل ملف حلقي على نصف القطر. فكلما زاد نصف القطر، قلَّ مقدار المجال المغناطيسي. يُمكن معرفة اتجاه المجال المغناطيسي باستخدام *القاعدة الرابعة لليد اليمنى:* إذا لففتَ أصابع يدك اليمنى حول الملف الحلقي في اتجاه التيار، كما يظهر في الشكل 8.24، فإنَّ الإبهام سيشير في اتجاه المجال المغناطيسي داخل الملف الحلقي.

مسألة محلولة 8.4 المجال المغناطيسي لملف حلقي

مغناطيس حلقي مصنوع من سلك نحاسي طوله 202 m له القدرة على حمل تيار مقداره $i = 2.40$ A. يبلغ متوسط نصف قطر المغناطيس الحلقي له $R = 15.0$ cm ويبلغ قطر مقطعه العرضي $d = 1.60$ cm (الشكل 8.25a).

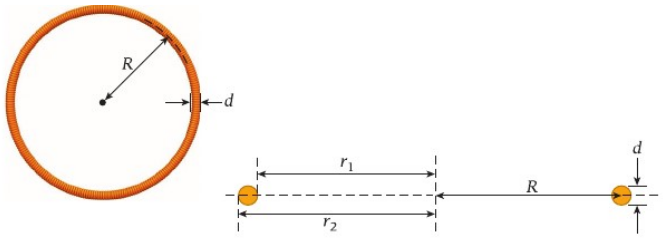
المسألة

ما أكبر مجال مغناطيسي عند مركز مغناطيس حلقي نصف قطره، R؟

الحل

فكِّر يُحدّد عدد اللفات في المغناطيس الحلقي من خلال قسمة طول السلك على محيط مساحة المقطع العرضي له. وباستخدام هذه المعلومات، يمكن حساب المجال المغناطيسي للمغناطيس الحلقي عندما تكون $r = R$.

McGraw-Hill Education محفوظة لصالح مؤسسة © حقوق الطبع والتأليف



(a) (b)

الشكل 8.25 (a) مغناطيس حلقي. (b) مقطع عرضي للمغناطيس الحلقي.

ارسم يعرض الشكل 8.25b مقطعًا عرضيًا للمغناطيس الحلقي.

ابحث تمثل المعادلة 8.13 مقدار المجال المغناطيسي لمغناطيس حلقي:

(i)
$$B = \frac{\mu_0 N i}{2\pi R}$$

حيث N هو عدد اللفات وR هو نصف القطر الذي يُقاس عنده المجال المغناطيسي. يمكن إيجاد عدد اللفات، N، من خلال قسمة طول سلك الملف، L، على محيط مساحة المقطع العرضي:

(ii)
$$N = \frac{L}{\pi d}$$

حيث d هو قطر مساحة المقطع العرضي للملف.

حوّل إلى أبسط صورة يمكننا دمج المعادلتين (i) و(ii) للحصول على تعبير B:

$$B = \frac{\mu_0 (L/\pi d) i}{2\pi R} = \frac{\mu_0 L i}{2\pi^2 R d}$$

احسب بالتعويض باستخدام القيم العددية نحصل على

$$B = \frac{\mu_0 L i}{2\pi^2 R d} = \frac{\left(4\pi \times 10^{-7}\ \text{T m/A}\right)(202\ \text{m})(2.40\ \text{A})}{2\pi^2 \left(15.0 \times 10^{-2}\ \text{m}\right)\left(1.60 \times 10^{-2}\ \text{m}\right)} = 0.0128597\ \text{T}$$

قرّب نقرّب النتيجة إلى ثلاثة أرقام معنوية:

$$B = 1.29 \times 10^{-2}\ \text{T}$$

تحقَّق ثانية للتحقق ثانيةً، فإننا نحسب مقدار المجال داخل ملف لولبي طوله مساوٍ لمحيط المغناطيس الحلقي. عدد اللفات لكل وحدة طول هو

$$n = \frac{L/\pi d}{2\pi R} = \frac{L}{2\pi^2 R d} = \frac{(202\ \text{m})}{2\pi^2 \left(15.0 \times 10^{-2}\ \text{m}\right)\left(1.60 \times 10^{-2}\ \text{m}\right)} = 4264\ \text{لفة/m}$$

مقدار المجال المغناطيسي داخل ملف لولبي يحتوي على هذا العدد من اللفات لكل وحدة طول هو

$$B = \mu_0 n i = \left(4\pi \times 10^{-7}\ \text{T m/A}\right)\left(4264\ \text{m}^{-1}\right)(2.40\ \text{A}) = 1.29 \times 10^{-2}\ \text{T}$$

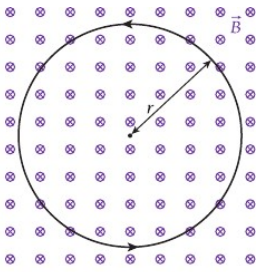
ومن ثَمَّ، تبدو الإجابة التي توصلنا إليها بخصوص مقدار المجال داخل الملف الحلقي منطقية.

مسألة محلولة 8.5 حركة الإلكترون داخل ملف لولبي يمر فيه تيار

يحتوي الملف اللولبي النموذجي على 200 لفة لكل cm. يتحرّك الإلكترون داخل الملف اللولبي في دائرة نصف قطرها $r = 3.00$ cm متعامدًا على محور الملف اللولبي. يتحرّك الإلكترون بسرعة $v = 0.0500c$، حيث c هي سرعة الضوء.

-يُتبع-

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education



الشكل 8.26 إلكترون يتحرّك في مسار دائري داخل ملف لولبي.

المسألة

ما مقدار التيار في الملف اللولبي؟

الحل

فكّر يُنتج الملف اللولبي مجالاً مغناطيسيًا منتظمًا، يتناسب مع التيار المتدفق في ملفه. يرتبط نصف قطر حركة الإلكترون الدائرية بسرعة الإلكترون والمجال المغناطيسي داخل الملف اللولبي.

ارسم يوضح الشكل 8.26 المسار الدائري للإلكترون في المجال المغناطيسي المنتظم للملف اللولبي.

ابحث يُحدَّد مقدار المجال المغناطيسي داخل الملف اللولبي من خلال

$$B = \mu_0 ni \quad \text{(i)}$$

حيث i هو التيار داخل الملف اللولبي وn هو عدد اللفات لكل وحدة طول. توفِّر القوة المغناطيسية قوة الجذب المركزي التي يحتاج إليها الإلكترون ليتحرّك في مسار دائري، وبذلك يُمكن ربط نصف قطر مسار الإلكترون بـ $\vec{B}$:

$$r = \frac{mv}{eB} \quad \text{(ii)}$$

حيث m هي كتلة الإلكترون، و v هي سرعته، و e هو مقدار شحنة الإلكترون.

حوّل إلى أبسط صورة بدمج المعادلتين (i) و(ii)، يصبح لدينا

$$r = \frac{mv}{e(\mu_0 ni)}$$

بحل هذه المعادلة لإيجاد التيار المتدفق في الملف اللولبي، نحصل على

$$i = \frac{mv}{er\mu_0 n} \quad \text{(iii)}$$

احسب تم تحديد سرعة الإلكترون بدلالة سرعة الضوء:

$$v = 0.0500c = 0.0500\left(3.00\times10^{8}\ \text{m/s}\right) = 1.50\times10^{7}\ \text{m/s}$$

بالتعويض بسرعة الإلكترون والقيم العددية الأخرى في المعادلة (iii)، نحصل على

$$i = \frac{mv}{er\mu_0 n} = \frac{\left(9.11\times10^{-31}\ \text{kg}\right)\left(1.50\times10^{7}\ \text{m/s}\right)}{\left(1.602\times10^{-19}\ \text{C}\right)\left(3.00\times10^{-2}\ \text{m}\right)\left(4\pi\times10^{-7}\ \text{T m/A}\right)\left(200\times10^{2}\ \text{m}^{-1}\right)}$$
$$= 0.113132\ \text{A}.$$

قرّب نقرّب النتيجة إلى ثلاثة أرقام معنوية:

$$i = 0.113\ \text{A}$$

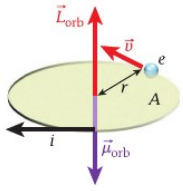
تحقَّق ثانية للتحقق ثانيةً من النتيجة، فإننا نستخدمها لحساب مقدار المجال المغناطيسي داخل الملف اللولبي:

$$B = \mu_0 ni = \left(4\pi\times10^{-7}\ \text{T m/A}\right)\left(200\times10^{2}\ \text{m}^{-1}\right)(0.113\ \text{A}) = 0.00284\ \text{T}$$

يبدو مقدار المجال المغناطيسي هذا منطقيًا. ومن ثَمَّ، تبدو القيمة التي حسبناها للتيار داخل الملف اللولبي منطقية.

8.5 الذرات كمغناطيسات Atoms as Magnets

تحتوي الذرات التي تتكوَّن منها كل مادة على إلكتروناتٍ متحركة، تُكوِّن حلقات تيار تُنتج مجالاتٍ مغناطيسية. وفي معظم المواد، تكون حلقات التيار هذه مُوجَّهة بشكل عشوائي وتكون محصلة المجال المغناطيسي الذي تُنتجه معدومة. في بعض المواد، يصطف جزءٌ من حلقات التيار هذه بمحاذاة بعضها البعض. وتُنتج هذه المواد، التي يُطلق عليها *المواد المغناطيسية* (القسم 8.6)، محصلة مجال مغناطيسي. ويمكن أن تحتوي مواد أخرى على حلقات تيار تتم محاذاتها عن طريق مجال مغناطيسي خارجي وتصبح مُمغنطة.



الشكل 8.27 إلكترون يتحرّك بسرعة ثابتة في مدار دائري في ذرة.

McGraw-Hill Education مؤسسة محفوظة لصالح © حقوق الطبع والتأليف

لنتأمل نموذجًا مبسَّطًا جدًا للذرة: إلكترون يتحرّك بسرعة ثابتة v في مدار دائري نصف قطره r (الشكل 8.27). يُمكننا أن نفكّر في شحنة الإلكترون المتحركة على أنها التيار، i. يتم تعريف التيار على أنه الشحنة المارة بنقطة معينة في كل وحدة زمنية. في هذه الحالة، الشحنة هي شحنة الإلكترون، حيث مقدارها هو e، والزمن هو الزمن الدوري، T، لمدار الإلكترون. ومن ثَمَّ، يُمكن الحصول على مقدار التيار عن طريق

$$i = \frac{e}{T} = \frac{e}{2\pi r/v} = \frac{ve}{2\pi r}$$

يُمكن الحصول على مقدار عزم ثنائي القطب المغناطيسي للإلكترون المتحرك عن طريق

$$\mu_{\text{orb}} = iA = \frac{ve}{2\pi r}\left(\pi r^2\right) = \frac{ver}{2} \tag{8.14}$$

يُمكن الحصول على مقدار كمية الحركة الزاوية (الزخم الزاوي) المدارية للإلكترون عن طريق

$$L_{\text{orb}} = rp = rmv$$

حيث m هي كتلة الإلكترون. بحل المعادلة 8.14 لإيجاد v والتعويض في معادلة كمية الحركة الزاوية المدارية سنحصل على

$$L_{\text{orb}} = rm\left(\frac{2\mu_{\text{orb}}}{er}\right) = \frac{2m\mu_{\text{orb}}}{e}$$

نظرًا لأن عزم ثنائي القطب المغناطيسي وكمية الحركة الزاوية عبارة عن كمياتٍ متجهة، يُمكننا أن نكتب

$$\vec{\mu}_{\text{orb}} = -\frac{e}{2m}\vec{L}_{\text{orb}} \tag{8.15}$$

ويجب وضع رمز السالب؛ لأن التيار يُعرَّف بدلالة اتجاه تدفق الشحنة الموجبة.

مثال 8.3 العزم المغناطيسي المداري لذرة الهيدروجين

افترض أنّ ذرة الهيدروجين تتكوَّن من إلكترون يتحرّك بسرعة v في مدار دائري نصف قطره r حول بروتون ثابت. وافترض كذلك أنّ قوة الجذب المركزي التي تُحافظ على حركة الإلكترون في مداره عبارة عن قوة كهروستاتيكية بين البروتون والإلكترون. نصف قطر مدار الإلكترون هو $r = 5.29 \times 10^{-11}\ \text{m}$.

المسألة

ما مقدار العزم المغناطيسي المداري لذرة الهيدروجين؟

الحل

مقدار العزم المغناطيسي المداري هو

$$|\mu_{\text{orb}}| = \frac{e}{2m}L_{\text{orb}} = \frac{e}{2m}(rmv) = \frac{erv}{2} \tag{i}$$

بمساواة مقدار قوة الجذب المركزي التي تُحافظ على حركة الإلكترون في مداره بالقوة الكهروستاتيكية بين الإلكترون والبروتون، نحصل على

$$\frac{mv^2}{r} = k\frac{e^2}{r^2}$$

حيث k هو ثابت كولوم. يُمكننا حل هذه المعادلة لإيجاد سرعة الإلكترون:

$$v = e\sqrt{\frac{k}{mr}} \tag{ii}$$

بالتعويض عن v من المعادلة (ii) في المعادلة (i) نحصل على

$$|\mu_{\text{orb}}| = \frac{er}{2}\left(e\sqrt{\frac{k}{mr}}\right) = \frac{e^2}{2}\sqrt{\frac{kr}{m}}$$

عند التعويض بالقيم العددية السابقة، نحصل على

$$|\mu_{\text{orb}}| = \frac{\left(1.602\times10^{-19}\,\text{C}\right)^2}{2}\sqrt{\frac{\left(8.99\times10^{9}\,\text{N m}^2/\text{C}^2\right)\left(5.29\times10^{-11}\,\text{m}\right)}{9.11\times10^{-31}\,\text{kg}}} = 9.27\times10^{-24}\,\text{A m}^2$$

– يُتبع

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

تتوافق هذه النتيجة مع القياسات التجريبية للعزم المغناطيسي المداري لذرة الهيدروجين. ومع ذلك، ثمة توقعاتٌ أخرى حول خصائص ذرة الهيدروجين وذراتٍ أخرى تستند إلى فكرة أنَّ الإلكترونات الموجودة في الذرات لها مداراتٌ مدارية، ولا تتوافق هذه التوقعات مع الملاحظات التجريبية. ومن ثَمَّ، فالوصف التفصيلي للخصائص المغناطيسية للذرات يجب أن يتضمّن ظواهر يتم وصفها من خلال فيزياء الكم.

اللف المغزلي

لا يُعد عزم ثنائي القطب المغناطيسي الناتج عن الحركة المدارية للإلكترونات المساهم الوحيد في العزم المغناطيسي للذرات. فالإلكترونات وجسيماتٌ أولية أخرى لها عزومها المغناطيسية الداخلية نتيجةً للفها المغزلي. ظاهرة اللف المغزلي سيتم مناقشة في فيزياء الكم، ولكن ثمة بعض الحقائق التي اكتُشفت عن اللف المغزلي وعلاقته بكمية الحركة الزاوية الداخلية للجسيم ولا تتطلَّب فهمًا لميكانيكا الكم. لكلٍّ من الإلكترونات والبروتونات لف مغزلي مقداره $s = \frac{1}{2}$. مقدار كمية الحركة الزاوية (الزخم الزاوي) لهذه الجسيمات هو $S = \hbar\sqrt{s(s+1)}$ ويمكن أن تكون لمركَّبة z الخاصة بكمية الحركة الزاوية القيمة $S_z = -\frac{1}{2}\hbar$ أو $S_z = +\frac{1}{2}\hbar$، حيث $\hbar$ هو ثابت بلانك مقسوم على 2π. لا يُمكن تفسير هذا اللف المغزلي بالحركة المدارية لبنيةٍ أساسية ما في الجسيمات. فالإلكترونات، على سبيل المثال، جسيماتٌ نقطية حقيقية. ومن ثَمَّ، فاللف المغزلي خاصية داخلية، مثلها مثل الكتلة أو الشحنة الكهربائية.

تُحدَّد الخاصية المغناطيسية لمعظم المادة بالعزوم المغناطيسية للّف المغزلي للإلكترون. ويرتبط العزم المغناطيسي لجسيم يتمتع بخاصية اللف المغزلي $\vec{\mu}_s$ بكمية الحركة الزاوية للف المغزلي للجسيم، $\vec{S}$، من خلال العلاقة

$$\vec{\mu}_s = g\frac{q}{2m}\vec{S} \tag{8.16}$$

حيث q هي شحنة الجسيم وm هي كتلته. وتكون الكمية g بلا أبعاد وتُسمَّى *العامل* g. بالنسبة إلى الإلكترون، فإنَّ قيمته العددية هي $g = -2.0023193043622(15)$. وهي من أكثر الكميات المَقيسة بدقة في الطبيعة. إذا قارنت هذه المعادلة بالمعادلة 8.15 لعزم ثنائي القطب المغناطيسي الناتج عن كمية الحركة الزاوية المدارية، فستلاحظ أنهما متشابهتان للغاية.

8.6 الخواص المغناطيسية للمادة Magnetic Properties of Matter

في الوحدة 7، رأينا أن ثنائيات الأقطاب المغناطيسية لا تتأثر بمحصلة القوة في مجال مغناطيسي خارجي متجانس، ولكن يكون لها عزم دوران. يُحرّك عزم الدوران ثنائي القطب الحر في اتجاه متوازٍ عكسيًا مع المجال الخارجي؛ لأن هذه هي الحالة التي تكون فيها طاقة الوضع المغناطيسية أقل ما يكون. رأينا في القسم 8.5 أنَّ الذرات يمكن أن تكون لها ثنائيات أقطاب مغناطيسية. ماذا سيحدث عندما تتعرض للمادة (المكوَّنة من ذرات) لمجال مغناطيسي خارجي؟

قد تشير عزوم ثنائيات أقطاب الذرات في مادةٍ ما في اتجاهاتٍ مختلفة أو في اتجاهٍ واحد. تُعرَّف **المَغنطة**، $\vec{M}$، المادة على أنها محصلة عزم ثنائي القطب الناتج عن عزوم ثنائيات أقطاب الذرات في المادة لكل وحدة حجم. ومن ثَمَّ، يعتمد المجال المغناطيسي $\vec{B}$ داخل المادة على المجال المغناطيسي الخارجي $\vec{B}_0$ والمَغنطة $\vec{M}$.

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \mu_0\vec{M} \tag{8.17}$$

حيث μ_0 مرةً أخرى هي النفاذية المغناطيسية للفراغ. وبدلاً من تضمين المجال المغناطيسي الخارجي، $\vec{B}_0$ من المعتاد استخدام **شدة المجال المغناطيسي**، $\vec{H}$

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}_0}{\mu_0} \tag{8.18}$$

من خلال هذا التعريف لقوة المجال المغناطيسي، يُمكن كتابة المعادلة 8.17

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \tag{8.19}$$

بما أنَّ وحدة المجال المغناطيسي هي $[B] = \text{T}$ ووحدة النفاذية المغناطيسية هي $[\mu_0] = \text{T m/A}$. فإنَّ وحدتي المَغنطة وشدة المجال المغناطيسي هما $[M] = [H] = \text{A/m}$.

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

الدايامغناطيسية والبارامغناطيسية

إنَّ السؤال الذي لم يُجَب عنه حتى الآن هو كيف تعتمد المَغنطة على المجال المغناطيسي الخارجي $\vec{B}_0$، أو بشكل مكافئ، على شدة المجال المغناطيسي $\vec{H}$ في معظم المواد (ليس كلها!). تكون هذه العلاقة خطيَّة:

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} \tag{8.20}$$

حيث يُطلق على ثابت التناسب χ_m **القابلية المغناطيسية** للمادة (الجدول 8.1). لكن، ثمة مواد لا تخضع لهذه العلاقة الخطيَّة البسيطة للمعادلة 8.20. وأشهر هذه المواد هي المواد الفيرومغناطيسية التي سنناقشها في القسم التالي. ولنتناول أولاً المواد الدايامغناطيسية والبارامغناطيسية التي تنطبق عليها المعادلة 8.20.

إذا كان $\chi_m < 0$، فإنَّ ثنائيات الأقطاب داخل المادة تُنظِّم نفسها بحيث تُعاكِس المجال المغناطيسي الخارجي، تمامًا مثل ثنائيات الأقطاب الحرة. وفي هذه الحالة، يُشير متجه المَغنطة في الاتجاه المعاكس لمتجه شدة المجال المغناطيسي. يُطلَق على المواد ذات $\chi_m < 0$ *المواد* الدايامغناطيسية. تظهر خاصيّة **الدايامغناطيسية** على معظم المواد. في المواد الدايامغناطيسية، يُستحَث عزم ثنائي قطب مغناطيسي ضعيف عن طريق مجال مغناطيسي خارجي في اتجاه معاكس لاتجاه المجال الخارجي. ويختفي المجال المغناطيسي المُستحَث عند إزالة المجال الخارجي. وإذا كان المجال الخارجي غير منتظم، فإنَّ التفاعل بين عزم ثنائي القطب المُستحَث للمادة الدايامغناطيسية والمجال الخارجي يُولِّد قوةً مُوجهَّة من منطقة ذات شدة مجال مغناطيسي أكبر إلى منطقة ذات شدة مجال مغناطيسي أقل.

يعرض الشكل 8.28 مثالاً على مادة بيولوجية تظهر عليها الخاصيّة الدايامغناطيسية. تؤدي قوى الدايامغناطيسية المُستحثَّة عن طريق مجال مغناطيسي خارجي غير منتظم مقداره 16 T إلى رفع ضفدع حي. (لم ينزعج الضفدع فيما يبدو بهذه التجربة.) وتكون القوة الدايامغناطيسية الضئيلة عادةً كبيرةً بما يكفي في هذه الحالة للتغلب على الجاذبية.

إذا كانت القابلية المغناطيسية في المعادلة 8.20 أكبر من صفر، $\chi_m > 0$، فإنَّ مَغنطة المادة تشير في الاتجاه نفسه الخاص بشدة المجال المغناطيسي. لاحظ أنَّ χ_m للفراغ تساوي 0. تُسمّى هذه الخاصيّة **البارامغناطيسية**، ويُطلق على المواد التي تظهر عليها *المواد* البارامغناطيسية. تظهر الخاصيّة البارامغناطيسية على المواد التي تحتوي على عناصر انتقالية معيّنة (بما في ذلك الأكتنيدات والعناصر الأرضية النادرة). وتحتوي كل ذرة في هذه العناصر على ثنائي قطب مغناطيسي دائم. لكن عادةً ما تكون عزوم ثنائيات الأقطاب هذه موجَّهة بشكل عشوائي ولا تُنتج محصلة مجال مغناطيسي. ومع ذلك، في وجود مجال مغناطيسي خارجي، تتراص بعض ثنائيات الأقطاب المغناطيسية هذه في اتجاه المجال الخارجي. عند إزالة المجال الخارجي، يختفي عزم ثنائي القطب المغناطيسي المُستحَث. وإذا كان المجال الخارجي غير منتظم، فإنَّ عزم ثنائي القطب المغناطيسي المُستحَث يتفاعل مع المجال الخارجي ليُولِّد قوة مُوجهَّة من منطقة ذات شدة مجال مغناطيسي أقل إلى منطقة ذات شدة مجال مغناطيسي أكبر — عكس تأثير الدايامغناطيسية.

بالتعويض بتعبير $\vec{M}$ من المعادلة 8.20 في المعادلة 8.19 الخاصة بالمجال المغناطيسي $\vec{B}$ داخل مادةٍ ما، نحصل على

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0(\vec{H} + \chi_m\vec{H}) = \mu_0(1 + \chi_m)\vec{H} \tag{8.21}$$

بالتشابه مع معامل السماحية الكهربائية النسبي، يعرف **معامل النفاذية المغناطيسية النسبي**، κ_m، بأنه

$$\kappa_m = 1 + \chi_m \tag{8.22}$$

ومن ثَمَّ يُمكن التعبير عن النفاذية المغناطيسية، μ، لمادةٍ ما بـ

$$\mu = (1 + \chi_m)\mu_0 = \kappa_m\mu_0 \tag{8.23}$$

يتيح لنا استبدال μ_0 بـ μ في قانون بيو–سافار (المعادلة 8.1) وقانون أمبير (المعادلة 8.10) استخدامَ هذين القانونين لحساب المجال المغناطيسي في مادة معينة.

وأخيرًا، فإنَّ مقدار المَغنطة في المواد البارامغناطيسية يعتمد على درجة الحرارة. يتم التعبير عادةً عن تبعية درجة الحرارة هذه بـ *قانون كوري*:

$$M = \frac{cB}{T} \tag{8.24}$$

حيث c هو ثابت كوري، وB هو مقدار المجال المغناطيسي، وT هي درجة الحرارة بالكلفن.

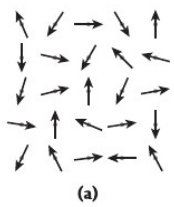
الجدول 8.1 قيم القابلية المغناطيسية لبعض المواد الشائعة الدايامغناطيسية و البارامغناطيسية

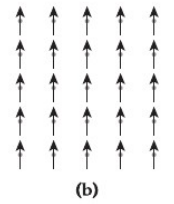
المادة	القابلية المغناطيسية χ_m
الألمنيوم	$+2.2 \times 10^{-5}$
البزموت	1.66×10^{-4}
الماس (الكربون)	-2.1×10^{-5}
الجرافيت (الكربون)	-1.6×10^{-5}
الهيدروجين	-2.2×10^{-9}
الرصاص	-1.8×10^{-5}
الليثيوم	$+1.4 \times 10^{-5}$
الزئبق	-2.9×10^{-5}
الأكسجين	$+1.9 \times 10^{-6}$
البلاتين	$+2.65 \times 10^{-4}$
السيليكون	-3.7×10^{-6}
الصوديوم	$+7.2 \times 10^{-6}$
كلوريد الصوديوم (NaCl)	-1.4×10^{-5}
التنجستين	$+6.8 \times 10^{-5}$
اليورانيوم	$+4.0 \times 10^{-4}$
الفراغ	0
الماء	$-9. \times 10^{-6}$

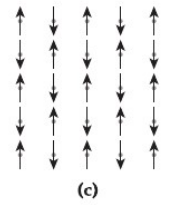


الشكل 8.28 ضفدع حي مرفوع بواسطة مجال مغناطيسي قوي في مختبر High Field Magnet Laboratory. بجامعة رادبود في مدينة نايميخن في هولندا.

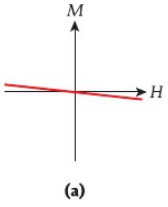
حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

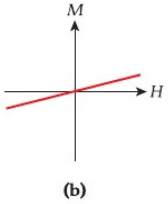


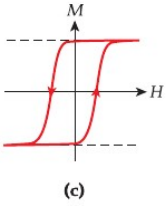




الشكل 8.29 نطاقات مغناطيسية: (a) مُوجَّهة عشوائيًا؛ (b) ترتيب فيرومغناطيسي نموذجي؛ (c) ترتيب فيرومغناطيسي مضاد نموذجي. (لاحظ أن هذا الشكل التوضيحي يعرض فقط النطاقات المغناطيسية الفردية في سيناريو مثالي. ويمكن أيضًا أن تكون للنطاقات المغناطيسية مقادير مختلفة تمامًا، وعادةً ما تكون كذلك.)







الشكل 8.30 المغنطة كإحدى وظائف شدة المجال المغناطيسي: (a) لمواد الدايامغناطيسية؛ (b) لمواد البارامغناطيسية؛ (c) حلقة التباطؤ للمواد الفيرومغناطسية.

الفيرومغناطيسية

تظهر خاصيّة **الفيرومغناطيسية** على عناصر الحديد والنيكل والكوبلت والجادولينيوم والدسبروزيوم، والسبائك المحتوية على هذه العناصر. وتتسم المادة ذات الفيرومغناطيسية بترتيب طويل المدى على المستوى الذري، ما يجعل عزوم ثنائيات أقطاب الذرات تصطف بمحاذاة بعضها البعض في منطقة محدودة يُطلَق عليها **النطاق**. يُمكن أن يكون المجال المغناطيسي داخل النطاق قويًا. لكن في معظم نماذج المادة، تكون النطاقات مُوجَّهة بشكل عشوائي، وهو ما لا يترك محصلة مجال مغناطيسي. يوضّح الشكل 8.29a عزوم ثنائيات أقطاب مغناطيسية مُوجهَّة بشكل عشوائي في نطاق ما. ويوضّح الشكل 8.29b ترتيبًا فيرومغناطيسيًا نموذجيًا. يوضِّح الشكل 8.29c الحالة المثيرة لترتيب فيرومغناطيسي مضاد نموذجي، حيث يتسبب التفاعل بين عزوم ثنائيات الأقطاب المغناطيسية المتجاورة في توجيه العزوم في اتجاهاتٍ متعاكسة. ولا يُمكن ملاحظة هذا الترتيب إلا عند درجات الحرارة المنخفضة للغاية.

يُمكن لمجال مغناطيسي خارجي أن يُوجِّه القطاعات كما يظهر في الشكل 8.29b، نتيجةً للتفاعل بين عزوم ثنائيات الأقطاب المغناطيسية للنطاق والمجال الخارجي. ونتيجةً لذلك، تحتفظ المادة الفيرومغناطيسية بكل المغناطيسية المُستحَثة أو بعضها عند إزالة المجال المغناطيسي الخارجي، حيث تظل النطاقات متحاذية. بالإضافة إلى ذلك، سيكون المجال المغناطيسي الناتج من التيار المار في ملفٍ لولبي أو حلقي أكبر في حال وجود مادة فيرومغناطيسية في الجهاز. لكن على عكس المواد الدايامغناطيسية والمواد البارامغناطيسية، لا تخضع المواد الفيرومغناطيسية للعلاقة الخطيّة البسيطة المحددة في المعادلة 8.20. تحتفظ النطاقات باتجاهاتها، ومن ثمَّ تظهر على المادة مَغنطةٌ لاصفرية حتى في غياب المجال المغناطيسي الخارجي. (وهذا هو سبب وجود المغناطيسات الدائمة.)

يوضِّح الشكل 8.30 علاقة المَغنطة بشدة المجال المغناطيسي واعتمادها عليه في أنواع المواد الثلاثة التي ناقشناها. يوضّح الشكل 8.30a والشكل 8.30b التبعية الخطّية وفقًا للمعادلة 8.20 للمواد الدايامغناطيسية والمواد البارامغناطيسية على التوالي. ويوضِّح الشكل 8.30c حلقة التباطؤ النموذجية التي تم الحصول عليها للمواد الفيرومغناطيسية. توضِّح الأسهم على المنحنى الأحمر الاتجاه الذي تسير فيه عملية المَغنطة، بينما تُمثل الخطوط المتقطعة أقصى مَغنطة (موجبة وسالبة) ممكنة. يُمكن التعبير عن المَغنطة، لأي نقطة على حلقة التباطؤ هذه، بدلالة القيمة الفعلية للنفاذية المغناطيسية μ للمادة الفيرومغناطيسية، على نحو مماثل لما تم تحديده في المعادلة 8.23. ولكن هذه النفاذية *ليست* قيمة ثابتة، فهي تعتمد على شدة المجال المغناطيسي الواقعة عليها وكذلك على المسار الذي تصل فيه شدة المجال إلى تلك القيمة. وبغض النظر عن ذلك، يُمكن أن تكون القيم الفعلية للنفاذية، μ، للمواد الفيرومغناطيسية أكبر بكثير من قيم المواد البارامغناطيسية (أكبر بمعامل يصل إلى 10^4).

تتسم الفيرومغناطيسية بأنها تعتمد على درجة الحرارة. فعند درجة حرارة معينة، يُطلَق عليها *درجة حرارة كوري*، تتوقف المواد الفيرومغناطيسية عن إظهار الفيرومغناطيسية. وعند هذه النقطة، تتغلب الحركة الحرارية على الترتيب الفيرومغناطيسي الناتج عن تفاعل عزوم ثنائيات الأقطاب في هذه المواد. درجة حرارة كوري للحديد هي 768°C يعرض الشكل8.31 عرضًا توضيحيًا بسيطًا، حيث يعمل تسخين مغناطيس حديدي دائم (الشكل 8.31b) على تقليل التجاذب بين المادة ومغناطيس آخر



الشكل 8.31 عرض توضيحي لعلاقة درجة الحرارة الخاصة بالفيرومغناطيسية: (a) يمثِّل مغناطيس دائم ثقل البندول وينحرف من الوضع الرأسي بفعل مغناطيس آخر (الركن الأيسر السفلي من كل إطار)؛ (b) يُسخَّن المغناطيس وتبدأ درجة حرارته في الارتفاع؛ (c) درجة حرارة المغناطيس مرتفعة بما يكفي لتلاشي مجاله المغناطيسي ويتدلى بزاوية أقل بكثير؛ (d) بينما يبرد المغناطيس، يبدأ في استعادة مجاله المغناطيسي الأصلي؛ و(e) يعود إلى موقعه الأصلي.

McGraw-Hill Education حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة

(الشكل 8.31c). وبينما يبرد المغناطيس بعد ذلك (الشكل 8.31d)، فإنه يصبح مغناطيسًا دائمًا مرةً أخرى (الشكل 8.31e).

8.7 المغناطيسية والموصلية الفائقة
Magnetism and Superconductivity

يُمكن إنشاء مغناطيساتٍ للاستخدامات الصناعية والبحث العلمي باستخدام سلك مقاوِم عادي يتدفق عبره تيار. والمغناطيس النموذجي من هذا النوع هو المغناطيس اللولبي الكبير. يُولِّد التيار المتدفق في سلك المغناطيس حرارةً مقاوِمة، وعادةً ما يتم التخلص من الحرارة باستخدام ماء ذو موصلية منخفضة تسري عبر موصلاتٍ مجوفة. (تمت تنقية الماء ذو الموصلية المنخفضة حتى لا يوصِّل الكهرباء.) عادةً ما تُولِّد هذه المغناطيسات الموجودة في درجة حرارة الغرفة مجالاتٍ مغناطيسية تصل شدتها إلى 1.5 T. وتكون عادةً غير مكلِّفة نسبيًا في إنشائها ولكنها مكلِّفة في تشغيلها نظرًا لارتفاع تكاليف الكهرباء.

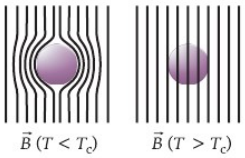
تتطلب بعض الاستخدامات، مثل التصوير بالرنين المغناطيسي (MRI)، مجالاتٍ مغناطيسية بأعلى مقدار ممكن لضمان الحصول على أفضل نسبة إشارة إلى الضجيج في القياسات. وللحصول على هذه المجالات، تُنشأ المغناطيسات باستخدام ملفاتٍ فائقة التوصيل بدلاً من الملفات المقاومة. يمكن أن يُولِّد هذا المغناطيس مجالاً أقوى من المغناطيس الموجود في درجة حرارة الغرفة بمقدار 10 T أو أكبر. تظهر خاصيّة الموصلية الفائقة في بعض المواد مثل الزئبق والرصاص عند درجات حرارة الهيليوم السائل، ولكن بعض الفلزات التي تتسم بأنها موصلات جيدة في درجة حرارة الغرفة، مثل النحاس والذهب، لا تصبح أبدًا فائقة التوصيل. يتمثل العيب الذي ينطوي عليه المغناطيس فائق التوصيل في ضرورة إبقاء الموصل عند درجة حرارة الهيليوم السائل، والتي تساوي تقريبًا 4 K (على الرغم من أنَّ بعض الاكتشافات الحديثة التي سنتناولها لاحقًا في هذا القسم تُقلِّل هذا الحد). ومن ثَمَّ، يجب وضع المغناطيس في مبرد مملوءٍ بالهيليوم السائل للحفاظ على برودة المغناطيس. تتمثل إحدى مميزات المغناطيس فائق التوصيل في أنه بمجرد أن يثبُت التيار في ملف المغناطيس، سيستمر في التدفق حتى تتم إزالته بوسيلة خارجية. ومع ذلك، يتم تعويض الطاقة المتوفرة نتيجة عدم حدوث فقد مقاومي في الملف – ولو جزئيًا على الأقل – باستخدام الطاقة اللازمة للحفاظ على برودة الملف فائق التوصيل.

عندما يتدفق التيار عبر الزئبق أو الرصاص فائق التوصيل، يصبح المجال المغناطيسي داخل المادة صفرًا. ويُطلَق على تقليل المجال المغناطيسي إلى الصفر داخل المادة التي تَم تبريدها بصورة كافية حتى تصبح فائقة التوصيل *ظاهرة مايسنر*. فوق درجة الحرارة الحرجة T_c، للانتقال إلى الموصلية الفائقة، تختفي ظاهرة مايسنر، وتصبح المادة موصلاً عاديًا (الشكل 8.32).

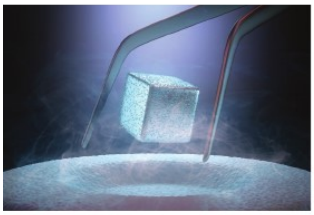
يعرض الشكل 8.33 عرضًا توضيحيًا رائعًا لظاهرة مايسنر: تتسبب قطعةٌ من موصل فائق التوصيل (تَم تبريدها إلى درجة حرارة أدنى من درجة حرارتها الحرجة) في طفو مغناطيس دائم فوقها عن طريق فصل المجال المغناطيسي الداخلي للمغناطيس. تستطيع القطعة القيام بذلك لأن التيارات فائقة التوصيل على سطحها تُولِّد مجالاً مغناطيسيًا معاكسًا للمجال المطبَّق، ما ينتج عنه مجالٌ محصلته صفر داخل الموصل فائق التوصيل وتنافرٌ بين المجالات فوق الموصل الفائق.

إنَّ الموصل المُستخدَم في مغناطيس فائق التوصيل مصمَّمٌ خصيصًا للتغلب على ظاهرة مايسنر. ويتم إنشاء الموصلات فائقة التوصيل الحديثة من خيوطٍ من سبيكة نيوبيوم وتيتانيوم مُدمجَة في نحاس صلب. تحتوي خيوط النيوبيوم والتيتانيوم على نطاقات مجهرية يُمكن أن يوجد فيها مجال مغناطيسي دون أن يتم استبعاده. ويكون النحاس بمثابة دعم ميكانيكي ويُمكن أن يتجاوز حمل التيار إذا أصبح الموصل فائق التوصيل موصلاً عاديًا. ويمكن لهذا النوع من الموصلات فائقة التوصيل أن يُولِّد مجالاتٍ مغناطيسية يصل مقدارها إلى 15 T.

خلال العقدين الماضيين، اكتشف الفيزيائيون والمهندسون مواد جديدة تتسم بأنها موصلاتٌ فائقة التوصيل عند درجات الحرارة الأعلى من 4 K. وقد سُجِّلت درجات حرارة حرجة تصل إلى 160 K لهذه *الموصلات فائقة التوصيل ذات درجات الحرارة المرتفعة*، وهو ما يعني إمكانية جعلها موصلاتٍ فائقة التوصيل عن طريق تبريدها باستخدام النيتروجين السائل. يبحث الكثير من الباحثين حول العالم عن مواد تكون بمثابة موصلات فائقة التوصيل عند درجة حرارة الغرفة. ستُحدِث هذه المواد تغيُّرًا جذريًا في مجالاتٍ صناعية كثيرة، ولا سيَّما مجال النقل وشبكة الكهرباء. يُعد مشروع Tres Amigas SuperStation في مدينة كلوفيس بولاية نيو مكسيكو أحد أكبر المشروعات المستقبلية التي تستخدم أسلاك



الشكل 8.32 ظاهرة مايسنر. وفيها تستبعد المادة المجالات المغناطيسية الخارجية من الجزء الداخلي منها عندما تنخفض درجة حرارتها إلى ما دون درجة الحرارة الحرجة والتي تصبح عندها فائقة التوصيل.



الشكل 8.33 من خلال ظاهرة مايسنر، يخرج موصِّل فائق التوصيل من المجال المغناطيسي لمغناطيس دائم، والذي يحوم فوقه بعد ذلك.



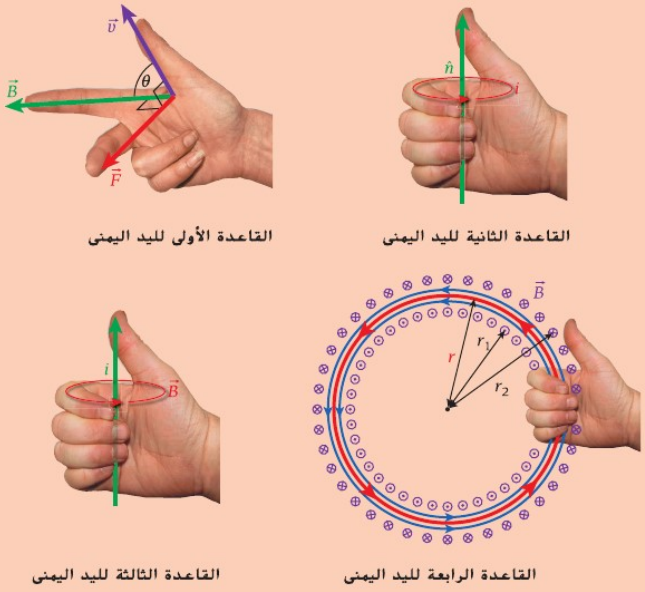
الشكل 8.34 محوِّل تيار عالي الجهد في محطة فرعية لتوليد الطاقة.

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

فائقة التوصيل لنقل ما يصل إلى 5 جيجاوات لكل كابل من قدرة التيار العالي. سيربط المشروع بين شبكتي الكهرباء الرئيستين في أمريكا الشمالية، وهما Eastern Interconnection وWestern Interconnection. وشبكة Texas Interconnection.

ما تعلمناه | دليل المذاكرة للاختبار

- النفاذية المغناطيسية للفراغ μ_0 تساوي $4\pi \times 10^{-7}$ T m/A
- يصف قانون بيو–سافار، $d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{i\,d\vec{s} \times \hat{r}}{r^2}$ المجال المغناطيسي، $d\vec{B}$ الناتج عن عنصر التيار، $i\,d\vec{s}$ عند الموضع $\vec{r}$ بالنسبة إلى عنصر التيار.
- مقدار المجال المغناطيسي على المسافة $r_\perp$ من سلك طويل مستقيم يحمل تيارًا i هو $B = \mu_0 i/2\pi r_\perp$.
- مقدار المجال المغناطيسي عند مركز حلقة سلكية نصف قطرها R تحمل تيارًا i هو $B = \mu_0 i/2R$.
- يُمثِّل $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 i_{enc}$ قانون أمبير حيث $d\vec{s}$ هو مسار التكامل وi_{enc} هو التيار المغلق في الحلقة الأمبيرية المحدَّدة.
- مقدار المجال المغناطيسي داخل ملف لولبي يحمل تيارًا i ويحتوي على عدد n من اللفات لكل وحدة طول هو $B = \mu_0 ni$
- يُمثِّل $B = \mu_0 Ni/2\pi r$ مقدار المجال المغناطيسي داخل ملف حلقي يحتوي على عدد N من اللفات ويبلغ نصف قطره r ويحمل تيارًا.
- يُمكن الربط بين عزم ثنائي القطب المغناطيسي وكمية الحركة الزاوية المدارية لإلكترون شحنته $-e$ وكتلته m يتحرَّك في مدار دائري من خلال المعادلة $\vec{\mu}_{orb} = -\frac{e}{2m}\vec{L}_{orb}$
- بالنسبة إلى المواد الدايامغناطيسية والبارامغناطيسية، تتناسب المَغنطة مع شدة المجال المغناطيسي: $\vec{M} = \chi_m \vec{H}$ تتبع المواد الفيرومغناطيسية حلقة تباطؤ، ومن ثمَّ لا تكون العلاقة الخطية.
- يرجع المجال المغناطيسي المتولِّد داخل مادة دايامغناطيسية أو بارامغناطيسيةإلى شدة المجال المغناطيسي الخارجي والمَغنطة: $\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0(\vec{H} + \chi_m\vec{H}) = \mu_0(1 + \chi_m)\vec{H} = \mu_0\kappa_m\vec{H} = \mu\vec{H}$ حيث k_m هو معامل النفاذية المغناطيسية النسبي
- يُوضِّح الشكل 8.35 قواعد اليد اليمنى الأربع المرتبطة بالمجالات المغناطيسية. تحدِّد القاعدة الأولى لليد اليمنى اتجاه القوة المغناطيسية على جسيم مشحون يتحرَّك في مجال مغناطيسي. تحدِّد القاعدة الثانية لليد اليمنى اتجاه متجه الوحدة العمودي لحلقة تحمل تيارًا. تحدِّد القاعدة الثالثة لليد اليمنى اتجاه المجال المغناطيسي الناتج عن سلك يحمل تيارًا. تحدِّد القاعدة الرابعة لليد اليمنى اتجاه المجال المغناطيسي داخل ملف حلقي.



الشكل 8.35 القواعد الأربع لليد اليمنى المرتبطة بالمجالات المغناطيسية.

إجابات أسئلة الاختبار الذاتي

8.1 يُشير المجال المغناطيسي عند النقطة P_1 إلى اتجاه y الموجب. ويُشير المجال المغناطيسي عند النقطة P_2 إلى اتجاه x السالب.

8.2 يجذب السلكان المتوازيان اللذان يحملان تيارًا في الاتجاه نفسه بعضهما البعض. بينما السلكان المتوازيان اللذان يحملان تيارًا متدفقًا في اتجاهاتٍ متعاكسة مع بعضهما.

8.3 $$B_x = \frac{\mu_0 i}{2}\frac{R^2}{\left(0^2 + R^2\right)^{3/2}} = \frac{\mu_0 i}{2}\frac{R^2}{R^3} = \frac{\mu_0 i}{2R}$$

McGraw-Hill Education محفوظة لصالح مؤسسة © حقوق الطبع والتأليف

إرشادات حل المسائل

1. عند استخدام قانون بيو–سافار، يجب دائمًا أن ترسم مخططًا للحالة مع تمييز عنصر التيار. تحقَّق من تحويل التماثلات إلى أبسط صورة قبل البدء في إجراء العمليات الحسابية؛ حيث يمكنك أن توفر على نفسك قدرًا كبيرًا من العمل.

2. عند تطبيق قانون أمبير، اختر حلقة أمبيرية تتسم ببعض التماثل الهندسي لتحويل تقييم التكامل إلى أبسط صورة. ويمكنك غالبًا أن تستخدم اقاعدة الثالثة لليد اليمنى لتختار اتجاه التكامل على طول الحلقة: أشِرْ بإصبع الإبهام في اتجاه محصلة التيار المار عبر الحلقة واقبض أصابعك في اتجاه التكامل. ستُذكِّرك أيضًا هذه الطريقة بجمع التيارات المارة عبر حلقة أمبيرية لتحديد التيار المغلق.

3. تذكَّر مبدأ التراكب للمجالات المغناطيسية: محصلة المجال المغناطيسي عند أي نقطة في الفضاء هي مجموع متجهات المجالات المغناطيسية الفردية المتولِّدة عن أجسام مختلفة. تأكّد أنك لا تجمع المقادير فحسب. بدلاً من ذلك، يجب بوجه عام أن تجمع المركّبات المكانية لمصادر المجال المغناطيسي المختلفة بصورة منفصلة.

4. لا تزال كلُّ المبادئ التي تحكم حركة الجسيمات المشحونة في المجالات المغناطيسية وكلُّ إرشادات حل المسائل الواردة في الوحدة 7 سارية. ولا يهم إنْ كان المجال المغناطيسي ناجمًا عن مغناطيس دائم أو مغناطيس كهربائي.

5. لحساب المجال المغناطيسي في مادةٍ ما، يمكنك استخدام الصيغ المُشتقَّة من قانون أمبير وقانون بيو–سافار، لكن يجب أن تستبدل μ_0 بـ $\mu = (1+\chi_m)\mu_0 = \kappa_m\mu_0$.

أسئلة الاختيار من متعدد

8.1 السلكان الطويلان المستقيمان متوازيان. يمر في السلكين تياران مختلفين من حيث المقدار. إذا تضاعف مقدار التيار المتدفق في كل سلك، فسيصبح مقدار القوة بين الأسلاك

a) ضعف مقدار القوة الأصلية.
b) أربعة أضعاف مقدار القوة الأصلية.
c) مساويًا لمقدار القوة الأصلية.
d) نصف مقدار القوة الأصلية.

8.2 يُنتج عنصر للتيار مجالاً مغناطيسيًا في المنطقة المحيطة به. عند أي نقطة في الفضاء، يُشير المجال المغناطيسي الناجُ عن عنصر التيار في اتجاهٍ

a) قطري من عنصر التيار للنقطة في الفضاء.
b) موازٍ لعنصر التيار.
c) عمودي على عنصر التيار وفي الاتجاه القطري.

8.3 إذا تضاعف عدد اللفات في ملف لولبي، ونقصَ طوله إلى النصف، فكيف سيتغيّر مقدارمجاله المغناطيسي؟

a) يتضاعف.
b) ينشطر نصفين.
c) يتضاعف أربع مرات.
d) يظل كما هو دون تغيير.

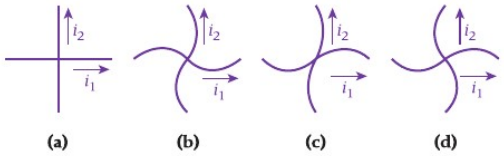
8.4 تأمل سلكين متوازيين يحملان تيارًا. تُولِّد المجالات المغناطيسية قوى تجاذب بين السلكين، ونتيجةً لذلك يبدو أن المجال المغناطيسي الناجُ عن أحد السلكين يبذل شغلاً على السلك الآخر. كيف يُفسَّر ذلك؟

a) لا تستطيع القوة المغناطيسية أن تبذل شغلاً على شحناتٍ معزولة؛ وهذا لا يوضّح أي شيء عن الشغل الذي يُمكن أن تبذله هذه القوة المغناطيسية على شحناتٍ محتجزة داخل موصل.
b) بما أنَّه يمكن للمجال الكهربائي وحده أن يبذل شغلاً على الشحنات، فإنَّ المجالات الكهربائية هي التي تبذل الشغل هنا.
c) يرجع هذا الشغل الظاهر إلى نوع آخر من القوة.

8.5 إذا تمّ لف سلك مغناطيس لولبي بحيث تلمس كل حلقة الحلقات المجاورة لها، أيُّ مما يلي سيزيد المجال المغناطيسي داخل المغناطيس؟

a) تصغير نصف قطر الحلقات
b) زيادة نصف قطر السلك
c) زيادة نصف قطر المغناطيس اللولبي
d) تصغير نصف قطر السلك
e) غمر المغناطيس في البنزين

8.6 تقاطَع السلكين المعزولين بزاوية 90°. تمّ تمرير تيارَيْن خلال السلكين. أيُّ من الاشكال التالية يقدم أفضل تمثيل لترتيب السلكين إذا كان التيار في السلك الأفقي يتدفق في اتجاه x الموجب والتيار في السلك الرأسي يتدفق في اتجاه y الموجب؟



8.7 ما القاعدة العملية الجيدة لتصميم ملف مغناطيسي بسيط؟ إذا كان لدينا ملف دائري يبلغ نصف قطره ~ 1 cm. فما المقدار التقريبي للمجال المغناطيسي بالغاوس لكل أمبير في كل لفة؟ (*ملاحظة*: $1\,G = 0.0001\,T$)

a) (A–لفة)/0.0001 G
b) (A–لفة)/0.01 G
c) (A–لفة)/1 G
d) (A–لفة)/100 G

8.8 أسطوانة صلبة تحمل تيارًا منتظمًا فوق مقطعها العرضي. أين يوجد أكبر مقدار للمجال المغناطيسي؟

a) عند مركز المقطع العرضي للأسطوانة
b) في منتصف الأسطوانة
c) على السطح
d) لا شيء مما سبق

8.9 سلكان طويلان مستقيمان يتدفق فيهما تياران في اتجاهٍ واحد، كما يظهر في الشكل. وتكون القوة بين السلكين

a) جاذبة.
b) تنافرية.
c) صفرًا.

8.10 في تجربة للتأثير المغناطيسي البصري، وُضِعَتْ قارورة كروية الشكل بحجم 10 mL تحتوي على عينة سائل في مجالٍ مغناطيسي منتظم بدرجة كبيرة وسُلِّطَ شعاع ليزر عبر العينة. أيُّ مما يلي يجب استخدامه لإنشاء المجال المغناطيسي المنتظم اللازم في التجربة؟

a) ملف مُسطَّح قطره 5 cm مُكوّن من لفة واحدة من سلك معياره 4
b) ملف ملفوف بإحكام مصنوع من سلك معياره 18 مكّون من 20 لفة في طبقة واحدة ويبلغ قطره 10 cm
c) ملف لولبي طوله 10 cm وقطره 2 cm ملفوف بإحكام ومصنوع من سلك معياره 18
d) مجموعة من ملفين محوريين يبلغ قطر كل منهما 10 cm ويحتوي كل منهما على لفة واحدة من سلك معياره 4 ويبعد الملفان عن بعضهما بمسافة 5 cm

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

8.11 افترض أنه يُمكن تمثيل صاعقة برق على هيئة تيار في خط مستقيم طويل. إذا مرَّت شحنة مقدارها 15.0 C بنقطةٍ في زمن 1.50×10^{-3} s، فما مقدار المجال المغناطيسي على مسافة 26.0m من صاعقة البرق؟

a) 7.69×10^{-5} T c) 4.21×10^{-2} T e) 2.22×10^{2} T

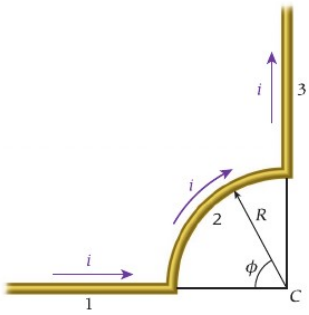
b) 9.22×10^{-3} T d) 1.11×10^{-1} T

8.12 ملفان لولبيان متساويان في الطول، عدد اللفات في الملف اللولبي 1 أكبر بمقدار 15 مرةً ونصف قطره أكبر بمقدار $\frac{1}{9}$ ويحمل تيارًا يبلغ مقداره 7 أضعاف شدة التيار في الملف اللولبي 2. احسب نسبة مقدار المجال المغناطيسي داخل الملف اللولبي 1 إلى مقدار المجال المغناطيسي داخل الملف اللولبي 2.

a) 105 c) 144 e) 197

b) 123 d) 168

8.13 يحمل السلك الموضّح في الشكل تيارًا i ويحتوي على جزءٍ على شكل قوس دائري نصف قطره R وزاوية $2/\pi$ وقسمين مستقيمين متعامدين بشكل متبادل، وفي حال تمديدهما، سيتقاطعان مع مركز القوس، C. ما المجال المغناطيسي عند النقطة C الناتج عن السلك؟

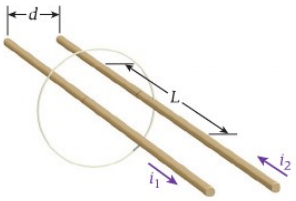


a) $B=\frac{\mu_0 i}{2R}$ c) $B=\frac{\mu_0 i}{6R}$

b) $B=\frac{\mu_0 i}{4R}$ d) $B=\frac{\mu_0 i}{8R}$

e) $B=\frac{\mu_0 i}{12R}$

8.14 يحمل السلك 1 تيارًا i_1 ويحمل السلك 2 تيارًا i_2 في الاتجاه المعاكس، كما يظهر في الشكل. ما اتجاه القوة التي يبذلها السلك 1 على طول L من السلك 2؟



a) باتجاه السلك 1

b) بعيدًا عن السلك 1

c) لا يبذل السلك 1 قوةً على السلك 2 في هذه الحالة.

أسئلة مفاهيمية

8.15 يستخدم الكثير من التطبيقات الكهربائية كابلات زوجية مجدولة يلتف فيها السلك الأرضي وسلك الإشارة حول بعضهما في شكل حلزوني. لماذا؟

8.16 ناقش كيف يؤثر المجال المغناطيسي الناتج عن التيارات المارة في الأسلاك والأجهزة في مبنى سكني في دقة إبرة البوصلة في تحديد اتجاه الشمال الحقيقي.

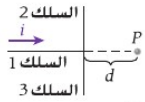
8.17 هل يُمكن أن يوجد ملف لولبي نموذجي، لا يتضمن مجالاً مغناطيسيًا خارجه؟ إذا كان الجواب لا، فهل يجعل ذلك اشتقاق المجال المغناطيسي داخل الملف اللولبي غير صالح (القسم 8.4)؟

8.18 تؤثر القوى المحافظة في الأجسام بطريقة تقلل من طاقة الوضع الخاصة بالنظام. استخدم هذا المبدأ لشرح اتجاه القوة المؤثرة على الحلقة الحاملة للتيار الموضّحة في مثال 8.1.

8.19 يتحرّك جسمان في الفراغ، شحنة كل منهما q وكتلته m، في مساراتٍ متوازية على مسافة d عن بعضهما وبسرعة v (أقل بكثير من سرعة الضوء). احسب نسبة مقدار القوة المغناطيسية التي يبذلها كلٌّ منهما على الآخر إلى مقدار القوة الكهربائية التي يبذلها كلٌّ منهما على الآخر: F_m/F_e.

8.20 يحمل أنبوبٌ أسطواني طويل ومستقيم، نصف قطره الداخلي هو a ونصف قطره الخارجي هو b، تيارًا كليًا i منتظمًا عبر مقطعه العرضي. حدِّد مقدار المجال المغناطيسي الناتج عن الأنبوب عند نقطة المنتصف بين نصفي القطر الداخلي والخارجي.

8.21 ثلاث أسلاك مستقيمة متماثلة مُوصَلة على شكل T، كما يظهر في الشكل. في حال تدفق تيار i في نقطة الاتصال، ما المجال المغناطيسي عند النقطة P، الواقعة على مسافة d من نقطة الاتصال؟



8.22 يُوجد مجال مغناطيسي ثابت ومنتظم في منطقةٍ معينة، $\vec{B}$، وكذلك، لا يتغيَّر أي مجال كهربائي في المنطقة بمرور الوقت. أوجِد كثافة التيار $\vec{J}$ في هذه المنطقة.

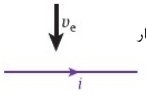
8.23 تُحدِّد الحاصيّة المغناطيسية لمعظم المواد إلى حدٍ كبير بالعزوم المغناطيسية للّف المغزلي للإلكترون بدلاً من عزوم ثنائيات الأقطاب المدارية. (تأثير النواة ضئيلٌ للغاية، حيث يكون العزم المغناطيسي للّف المغزلي للبروتون أصغر من العزم المغناطيسي للإلكترون بحوالي 658 مرة.) في حال حدوث لف مغزلي لإلكتروناتٍ مفردة في ذرات أو جزيئات مادةٍ ما، ستؤدي العزوم المغناطيسية المرتبطة به إلى ظهور خاصيّة المغناطيسية المسايرة أو المغناطيسية الحديدية إذا كانت التفاعلات بين الذرات أو الجزيئات قوية بما يكفي لجعلها تتحاذى في قطاعات. وإذا كانت محصلة اللف المغزلي المفردي في هذه الذرات أو الجزيئات منعدمة، فستؤدي الاضطرابات المغناطيسية في مدارات الإلكترونات إلى ظهور خاصيّة المغناطيسية المعاكسة.

a) غاز الهيدروجين الجزيئي (H_2) ضعيف المغناطيسية المعاكسة. ما دلالة ذلك بالنسبة إلى اللف المغزلي للإلكترونين في جزيء الهيدروجين؟

b) ماذا تتوقع أن يكون السلوك المغناطيسي لغاز الهيدروجين الذري (H)؟

8.24 إذا تمّ تعريض المواد لمجالات مغناطيسية عالية بصورة كافية فإنها تتشبَّع بالمغنطة أو تقترب من أقصى درجة منها. هل تتوقع أن يكون (أقصى) تشبع مغناطيسي للمواد ذات المغناطيسية المسايرة أقل بكثير من المواد ذات المغناطيسية الحديدية أم مساويًا لها تقريبًا أم أكبر منها بكثير؟ اشرح لماذا.

8.25 سلك مستقيم طويل يحمل تيارًا، كما يظهر في الشكل. قُذِفَ إلكترون واحد من أعلى باتجاه السلك مباشرةً. يوجد مسار الإلكترون والسلك في المستوى نفسه. هل سينحرف الإلكترون عن مساره الابتدائي، وإذا كانت الإجابة نعم، ففي أي اتجاه؟



8.26 حلقة مربعة طول ضلعها L تحمل تيارًا i. أوجِد مقدار المجال المغناطيسي الناتج عن الحلقة عند مركزها، في صورة دالة لـ i وL.

8.27 يتدفق تيار كثافته الثابتة، J_0، عبر هيكل أسطواني طويل جدًا وموصّل، نصف قطره الداخلي a ونصف قطره الخارجي b. ما المجال المغناطيسي في المناطق $r<a$، $a<r<b$، و$r>b$؟ هل $B_{a<r<b}=B_{r>b}$ لـ $r=b$؟

8.28 يحمل سلكان متوازيان تيارًا i في اتجاهين متعاكسين ويبعدان عن بعضهما مسافة D كما يظهر الشكل. وتحمل حلقة دائرية، نصف قطرها $R=D/2$، التيار نفسه الذي يتدفق في عكس اتجاه عقارب الساعة. حدِّد مقدار واتجاه المجال المغناطيسي الناتج عن الحلقة والسلكين المتوازيين عند مركز الحلقة، في صورة دالة لـ i وR.



8.29 تختلف كثافة التيار في موصّل أسطواني نصف قطره R تبعًا لـ $J(r)=J_0e^{-r/R}$ (في المنطقة من صفر إلى R). عبِّر عن مقدار المجال المغناطيسي في المنطقتين $r<R$ و$r>R$. ارسم مخططًا عن التبعية القطريّة، $B(r)$.

McGraw-Hill Education حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة

تمارين

يشير رقم المسألة الأزرق إلى توفر حل في دليل حلول الطالب. تشير علامة النقطة الواحدة • والنقطتين •• إلى زيادة مستوى صعوبة المسألة.

القسمان 8.1 و8.2

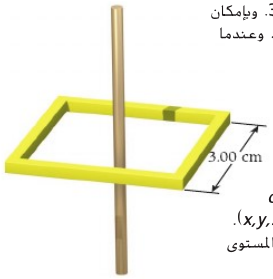
8.30 سلكان طويلان متوازيان يبعدان عن بعضهما بمسافة 3.0 mm. التيار المتدفق في أحدهما ضِعف التيار في السلك الآخر. إذا كان مقدار القوة المبذولة على طول 1.0 m من أحد السلكين هو 7.0 μN، فما مقدار التيارين؟

8.31 قُذِفَ إلكترون من مدفع إلكتروناتٍ بسرعة 4.0×10^5 m/s ثم تحرّك موازيًا لسلك مستقيم طويل يحمل تيارًا مقداره 15 A وعلى مسافة 5.0 cm فوقه. حدّد مقدار عجلة الإلكترون واتجاهها لحظة خروج الإلكترون من المدفع.

8.32 يتحرّك إلكترون في خطٍ مستقيم بسرعة 5.00×10^6 m/s. ما مقدار المجال المغناطيسي واتجاهه الناتج عن الإلكترون المتحرك على مسافة $d = 5.00$ m في مسار حركته؟ كيف ستتغيرّ الإجابة إذا كان الجسيم المتحرك بروتونًا؟

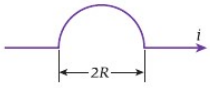
8.33 افترض أنّ المجال المغناطيسي للأرض ناتجٌ عن تيار مفرد يتحرّك في دائرة نصف قطرها 2.00×10^3 km عبر لُبّ الأرض المنصهر. وتبلغ شدة المجال المغناطيسي للأرض على السطح القريب من قطب مغناطيسي 6.00×10^{-5} T تقريبًا. كم تبلغ تقريبًا شدة التيار الازمة لتوليد هذا المجال؟

8.34 يبلغ طول ضلع أميتر مربع 3.00 cm. وبإمكان أضلاعه قياس المجال المغناطيسي المُعرضَة له. وعندما يُثبَّت الأميتر حول سلك يحمل تيارًا مستمرًا كما يظهل في الشكل، تكون القيمة المتوسطة للمجال المغناطيسي المَقيس على الأضلاع 3.00 G.ما مقدار التيار في السلك؟

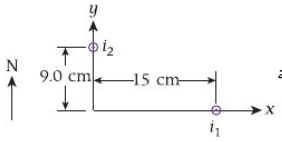


8.35 • يقع سلك مستقيم طويل يحمل تيارًا مقداره 2.00-A على المحور x. ويتحرّك جسيم شحنته $q = -3.00$ μC موازيًا للمحور y عند النقطة $(x,y,z) = (0,2,0)$. أين يجب وضع سلك مستقيم طويل آخر في المستوى xy حتى لا يتأثر الجسيم بأي قوة مغناطيسية عند عبوره المستوى؟

8.36 • أوجِد المجال المغناطيسي عند مركز سلك على شكل نصف دائرة كالموضّح في الشكل، نصف قطره $R = 10.0$ cm. إذا كان التيار في السلك $i = 12.0$ A.



8.37 • سلكان طويلان للغاية يسيران موازيين للمحور z كما يظهر في الشكل. ويحمل كلٌّ منهما تيارًا $i_1 = i_2 = 25.0$ A. متدفق في اتجاه المحور z الموجب. يتحدّد المجال المغناطيسي للأرض من خلال $\vec{B} = (2.60 \cdot 10^{-5})\hat{y}$ T (في المستوى xy وفي اتجاه الشمال). وُضعت إبرة بوصلة مغناطيسية عند نقطة الأصل. حدّد الزاوية θ بين إبرة البوصلة والمحور x. (*تلميح:* ستحاذي إبرة البوصلة محورها على طول اتجاه محصلة المجال المغناطيسي.)

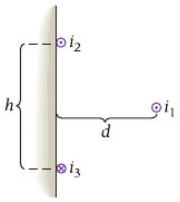


8.38 • ملفان محوريان متماثلان، مصنوعان من سلك يبلغ نصف قطره 20.0 cm، وموضوعان فوق بعضهما مباشرةً، ويبعدان بمسافة 2.00 mm. يُوجد الملف السفلي على منضدة مسطحة ويمر به تيار i في اتجاه عقارب الساعة، بينما يحمل الملف العلوي تيارًا مماثلاً وتبلغ كتلته 0.0500 kg. حدّد المقدار والاتجاه الذي يجب أن يكون عليه التيار في الملف العلوي للحفاظ على الملف مرفوعًا على مسافة 2.00 mm عن الملف السفلي.

8.39 • يحمل سلك مستقيم طويل يقع على المحور x تيارًا i. يتدفق في اتجاه x الموجب. ويقع سلك مستقيم طويل آخر على المحور y ويحمل تيارًا i في اتجاه y الموجب. ما مقدار واتجاه المجال المغناطيسي عند النقطة $z = b$ على المحور z؟

8.40 • تحمل حلقة سلك مربعة، يبلغ طول ضلعها 10.0 cm، تيارًا مقداره 0.300 A.ما المجال المغناطيسي في مركز الحلقة المربعة؟

8.41 • يعرض الشكل المقطع العرضي عبر ثلاثة أسلاك طويلة، يبلغ التوزيع الخطي لكتلتها 100. g/m. تحمل هذه الأسلاك التيارات i_1 وi_2 وi_3 في الاتجاهات الموضّحة. يبعد السلكان 2 و3 بمسافة 10.0 cm عن بعضهما ويحمل كلٌّ منهما تيارًا مقداره 600، ومثبتان بسطح رأسي A. ما التيار، i_1، الذي سيسمح للسلك 1 أن "يطفو" على مسافة متعامدة مقدارها $d = 10.0$ cm من السطح الرأسي؟ (تجاهَل سَمك الأسلاك.)



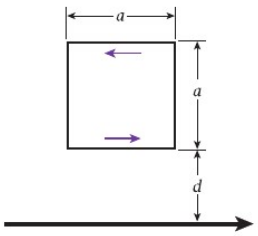
8.42 • تتكوَّن بنية دبوس شعر من سلكين مستقيمين شبه لامنتهيين يبعدان عن بعضهما بمسافة 2.00 cm وتربطهما معًا قطعة سلك نصف دائرية (يجب أن يكون نصف قطرها 1.00 cm ويقع مركزها عند نقطة الأصل للإحداثيات xyz). يمتد السلك العلوي على طول المستقيم $y = 1.00$ cm. ويمتد السلك السفلي على طول المستقيم $y = -1.00$ cm؛ ويقع هذان السلكان في الجانب الأيسر $(x < 0)$ للمستوى xy. تبلغ شدة التيار في بنية دبوس الشعر 3.00 A، ويتجه التيار يمينًا في السلك العلوي. في اتجاه عقارب الساعة حول نصف الدائرة، ويسارًا في السلك السفلي. أوجِد المجال المغناطيسي عند نقطة أصل النظام الإحداثي.

8.43 • يقع سلك مستقيم طويل على طول المحور x ($y = 0$ و$z = 0$). يحمل السلك تيارًا مقداره 7.00 A في اتجاه المحور x الموجب. ما مقدار واتجاه القوة على جسيم شحنته 9.00 C يقع عند النقطة (0,+2.00 m,+1.00 m) عندما تصل سرعته المتجهة إلى 3000 m/s في كلٍّ من الاتجاهات التالية؟

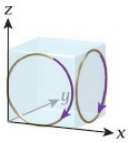
a) اتجاه المحور x الموجب.
b) اتجاه المحور y الموجب.
c) اتجاه المحور z السالب.

8.44 • يحمل سلك مستقيم طويل تيارًا مقداره 10.0 A باتجاه المحور x الموجب. كما يظهر في الشكل. توجد بالقرب من السلك حلقةٌ مربعة من سلك نحاسي تحمل تيارًا مقداره 2.00 A في الاتجاه الموضَّح. ويبعد الجانب القريب من الحلقة مسافة $d = 0.500$ m عن السلك. يبلغ طول كل ضلع من أضلاع المربع $a = 1.00$ m.

a) أوجد محصّلة القوى بين الجسمين الحاملين للتيار.
b) أوجد محصّلة عزم الدوران في الحلقة.



8.45 صندوق مربع يبلغ طول ضلعه 1.00 m. يقع أحد أركانه عند نقطة أصل نظام إحداثي، كما يظهر في الشكل. رُبط ملفان بالجزء الخارجي من الصندوق. يقع أحد الملفين على وجه الصندوق في المستوى xz عند النقطة $y = 0$. ويقع الملف الثاني على وجه الصندوق في المستوى yz عند النقطة $x = 1.00$ m. ويبلغ طول قطر كل ملف 1.00 m ويحتوي كلٌّ منهما على 30.0 لفة من سلك يحمل تيارًا مقداره 5.00 A في كل لفة. يسري التيار المتدفق في كل ملف في اتجاه عقارب الساعة عند النظر إلى الملف من خارج الصندوق. ما مقدار واتجاه المجال المغناطيسي في مركز الصندوق؟

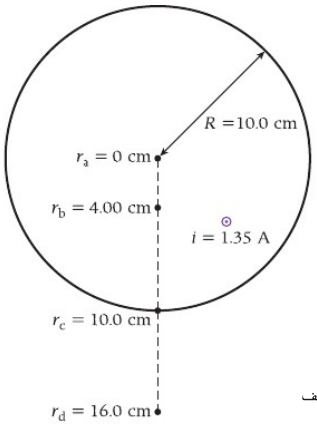


القسم 8.3

8.46 تختلف كثافة التيار في موصل أسطواني نصف قطره R حيث $J(r) = J_0 r/R$ (في المنطقة من صفر إلى R). عبّر عن مقدار المجال المغناطيسي في المنطقتين $r < R$ و$r > R$. ارسم مخططًا عن التبعية القطريّة، $B(r)$.

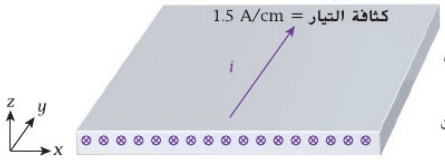
حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

8.47 يعرض الشكل مقطعًا عرضيًا عبر قطر دائرة موصل أسطواني طويل مصمت. يبلغ نصف قطر الأسطوانة $R = 10.0\ \text{cm}$. يُوزّع تيار مقداره 1.35 A بانتظام على الموصل ويتدفق خارجًا من الصفحة. احسب اتجاه ومقدار المجال المغناطيسي في المواقع $r_a = 0.0\ \text{cm}$ و$r_b = 4.00\ \text{cm}$ و$r_c = 10.0\ \text{cm}$ و$r_d = 16.0\ \text{cm}$.



8.48•• يتكوّن سلك محوري من لب نحاسي نصف قطره 1.00 mm محاط بغلافٍ نحاسي يبلغ نصف قطره الداخلي 1.50 mm ويبلغ نصف قطره الخارجي 2.00 mm. ويتدفق التيار، i، في اتجاه واحد في اللب وفي الاتجاه المعاكس في الغلاف. مثّل مقدار المجال المغناطيسي بيانيًا في صورة دالة للمسافة من مركز السلك.

8.49•• صفيحة كبيرة جدًا من مادة موصلة تقع في المستوى xy، كما يظهر في الشكل، يتدفق خلالها تيار منتظم في الاتجاه y. تبلغ كثافة التيار 1.5 A/cm. استخدم قانون أمبير لـ حساب اتجاه ومقدار المجال المغناطيسي أعلى مركز الصفيحة مباشرةً (بعيدًا عن أيّ من الحواف).



القسم 8.4

8.50 يتدفق تيار مقداره 2.00 A خلال ملف لولبي يحتوي على 1000 لفة، وتبلغ مساحته $L = 40.0\ \text{cm}$. ما مقدار المجال المغناطيسي داخل الملف اللولبي؟

8.51 يبلغ قطر الملف اللولبي A ضِعف قطر الملف اللولبي B. وطوله ثلاثة أضعاف طول الملف اللولبي B. وعدد لفاته أربعة أضعاف عدد لفات الملف اللولبي B. يتدفق خلال الملفين تياران متساويان في المقدار. أوجد نسبة مقدار المجال المغناطيسي في الجزء الداخلي من الملف اللولبي A إلى مقدار المجال المغناطيسي في الجزء الداخلي من الملف اللولبي B.

8.52 رُبط ملف لولبي طويل (يبلغ نصف قطره 6.00 cm) بسلك رفيع مكوّن من 1000 لفة في المتر، الذي يمر خلاله تيار مقداره 0.250 A. وأُدخِلَ سلك يحمل تيارًا مقداره 10.0 A على طول محور الملف اللولبي. ما مقدار المجال المغناطيسي عند نقطة على بُعد 1.00 cm من المحور؟

8.53 يحمل سلك مستقيم طويل تيارًا مقداره 2.5 A.

a) ما شدة المجال المغناطيسي على مسافة 3.9 cm من السلك؟

b) إذا كان السلك لا يزال يحمل تيارًا مقداره 2.5 A. ولكنه يُستخدَم في تكوين ملف لولبي طويل يحتوي على 32 لفة في السنتيمتر الواحد ويبلغ نصف قطره 3.9 cm. فما شدة المجال المغناطيسي داخل الملف اللولبي؟

8.54 يعرض الشكل 8.20a ملف هلمهولتز يُستخدَم في توليد مجالاتٍ مغناطيسية منتظمة. افترض أن ملف هلمهولتز يتكوّن من مجموعتين من حلقات الأسلاك المحورية المكوَّنة من 15 لفة بنصف قطر $R = 75.0\ \text{cm}$، التي تبعد عن بعضها بمسافة R. ويحمل كل ملف تيارًا مقداره 0.123 A يتدفق في الاتجاه نفسه. احسب مقدار واتجاه المجال المغناطيسي في المنتصف بين الملفات.

8.55•• يستخدم جهاز للكشف عن الجسيم ملفًا لولبيًا مكوَّن من سلك يحتوي على 550 لفة في السنتيمتر الواحد. يحمل السلك تيارًا مقداره 22 A. يبلغ نصف القطر الداخلي لجهاز كشف أسطواني يقع داخل الملف اللولبي 0.80 cm.

وُجّهت أشعة الإلكترون والبوزيترون نحو الملف اللولبي الموازي لمحوره. ما أقل كمية حركة (زَخَم) متعامدة على محور الملف اللولبي يمكن أن يحتوي عليها الجسيم في حال إمكانية إدخاله في جهاز الكشف؟

الأقسام من 8.5 حتى 8.7

8.56 يبلغ مقدار العزم المغناطيسي للف المغزلي لإلكترون $\mu = 9.285 \times 10^{-24}\ \text{A m}^2$ ومن ثَمّ، فإنه يحتوي على طاقة مرتبطة باتجاهه في مجال مغناطيسي. إذا كان الفرق بين طاقة إلكترون "يلف بشكل مغزلي لأعلى" في مجال مغناطيسي مقداره B وطاقة إلكترون آخر "يلف بشكل مغزلي لأسفل" في المجال المغناطيسي نفسه (حيث يشير "لأعلى" و"لأسفل" إلى اتجاه المجال المغناطيسي) هو $9.460 \times 10^{-25}\ \text{J}$، فما هو المجال المغناطيسي، B؟

8.57 عندما يُوضَع ثنائي قطب مغناطيسي في مجال مغناطيسي، تكون له قابلية طبيعية لتقليل طاقته الكامنة من خلال محاذاة نفسه مع المجال. ولكن في حال وجود طاقة حرارية كافية، فإن القطب قد يدور بحيث لا يظل محاذيًا للمجال. يحدّد استخدام $k_B T$ كمقياس للطاقة الحرارية، حيث k_B هو ثابت بولتزمان وT هي درجة الحرارة بالكلفن. درجة الحرارة التي توجد فيها طاقة حرارية كافية لتدوير ثنائي القطب المغناطيسي المرتبط بذرة هيدروجين من اتجاهٍ موازٍ لمجال مغناطيسي مُطبَق إلى اتجاهٍ متوازٍ عكسيًا مع المجال المُطبَق. افترض أنّ شدة المجال هي 0.15 T.

8.58 يصبح الألومنيوم فائق التوصيل عند درجة حرارة 1.0 K تقريبًا إذا تعرض لمجال مغناطيسي يقل مقداره عن 0.0105 T. حدّد أقصى تيار يمكن أن يتدفق في سلك ألومنيوم فائق التوصيل يبلغ نصف قطره $R = 1.0\ \text{mm}$.

8.59 إذا أردت إنشاء مغناطيس كهربائي من خلال تمرير تيار مقداره 3.00 A عبر ملف لولبي مكوّن من 500 لفة وبطول 3.50 cm وأردت أن يصل مقدار المجال المغناطيسي داخل الملف اللولبي إلى $B = 2.96\ \text{T}$، فيمكنك إدخال قلب حديديك في الملف اللولبي. ما قيمة النفاذية المغناطيسية النسبية التي يجب أن توجد في قلب الحديديك لإتمام هذه العملية بنجاح؟

8.60 ما مقدار المجال المغناطيسي داخل سلك طويل مستقيم من التنغستين، يبلغ قطر المقطع العرضي الدائري له 2.4 mm، ويحمل تيارًا مقداره 3.5 A، على مسافة 0.60 mm من محوره المركزي؟

8.61• اشحن كرةً مطاطية صغيرة كتلتها 200 g من خلال حكّها بشعرك. تكتسب الكرة شحنةً مقدارها 2.00 μC. اربطها بعد ذلك بخيط طوله 1.00 m واجعلها تتأرجح في دائرة أفقية. مولّدةً قوة جذب مركزي مقدارها 25.0 N. ما العزم المغناطيسي للجهاز؟

8.62• تأمل نموذجًا لذرة الهيدروجين التي يدور فيها إلكترون حول بروتون في المستوى المتعامد على كمية الحركة الزاوية (الزخم الزاوي) للّف المغزلي للبروتون (وعزم ثنائي القطب المغناطيسي) على مسافة مساوية لنصف قطر بور، $a_0 = 5.292 \times 10^{-11}\ \text{m}$. (يُعد هذا نموذجًا كلاسيكيًا مبسّطًا للغاية.) يمكن أن يكون اللف المغزلي للإلكترون موازيا للّف المغزلي للبروتون أو متوازيًا عكسيًا معه، ويكون المدار واحدًا في كلتا الحالتين. ولكن، بما أنّ البروتون يُنتِج مجالاً مغناطيسيًا في موضع الإلكترون، وللإلكترون عزم ثنائي القطب الداخلي الخاص به، فإن طاقة الإلكترون تختلف تبعًا للّف المغزلي له. ويمكن نمذجة المجال المغناطيسي الناتج عن اللف المغزلي للبروتون في صورة مجال ثنائي القطب، مثل المجال الكهربائي الناتج عن ثنائي قطب كهربائي. احسب فرق الطاقة بين ترتيبي اللف المغزلي للإلكترون. تأمل فقط التفاعل بين عزم ثنائي القطب المغناطيسي واللف المغزلي للإلكترون والمجال الناتج عن اللف المغزلي للبروتون.

8.63•• تخيّل أن إلكترونًا على شكل كرة تتوزع كثافته بانتظام، يبلغ إجمالي شحنته $-e = -1.602 \times 10^{-19}\ \text{C}$، يدور بتردد زاوي، ω.

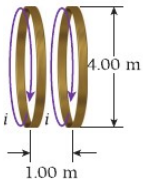
a) اكتب تعبيرًا لإيجاد كمية الحركة الزاوية الكلاسيكية لدورانه، L.

b) اكتب تعبيرًا لإيجاد عزم ثنائي القطب المغناطيسي له، μ.

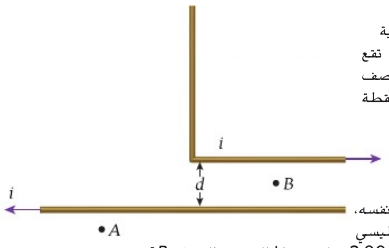
c) أوجِد النسبة، $\gamma_e = \mu/L$، المعروفة باسم *النسبة المغناطيسية الدورانية*.

تمارين إضافية

8.64 وُضع ملفان مكوّنان من 50 لفةً، يبلغ قطر كل منهما 4.00 m، على مسافة 1.00 m عن بعضهما، كما يظهر في الشكل. ويتدفق تيار مقداره 7.00 A في أسلاك الملفين؛ ويسري التيار في كلا الملفين في اتجاه عقارب الساعة عند النظر إليهما من الجانب الأيسر. ما مقدار المجال المغناطيسي في المنتصف بين الملفين؟



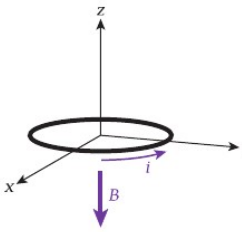
McGraw-Hill Education محفوظة لصالح مؤسسة © حقوق الطبع والتأليف



8.65 تفصل مسافةٌ رأسية d بين السلكين في الشكل. تقع النقطة B عند نقطة المنتصف بين السلكين، بينما تقع النقطة A على مسافة $d/2$ من السلك السفلي. والمسافة الأفقية بين A وB أكبر بكثير من d. يحمل كلا السلكين التيار نفسه، i. وتبلغ شدة المجال المغناطيسي عند النقطة A تكون 2.00 mT. ما شدة المجال عند النقطة B؟

8.66 تخيّل أنك تقف في بقعة يكون فيها المجال المغناطيسي للأرض أفقيًا، ويشير ناحية الشمال، ويبلغ مقداره 40.0 μT. وفوق رأسك مباشرةً، على ارتفاع 12.0 m، يحمل كابل أفقي طويل تيارًا مباشرًا مستقرًا مقداره 500. ويتجه ناحية الشمال. احسب الزاوية θ التي تنحرف بها إبرة البوصلة المغناطيسية عن الشمال المغناطيسي الحقيقي بفعل تأثير الكابل. لا تنسَ أنّ رمز $-\theta$ يشير إلى الانحراف ناحية الشرق أو الغرب؟

8.67 يبلغ عزم ثنائي القطب المغناطيسي للأرض حوالي 8.0×10^{22} A m^2. مصدر المجال المغناطيسي للأرض غير معروف؛ وقد يكون أحد الاحتمالات الواردة أنّه يرجع إلى دوران الأيونات في اللُّب الخارجي المنصهر للأرض. افترض أنّ الأيونات الدائرة تُحرّك حلقةً دائرية يبلغ نصف قطرها 2500 km. ما "التيار" الذي يجب أن تُنتِجه (الأيونات) للحصول على المجال الملحوظ؟

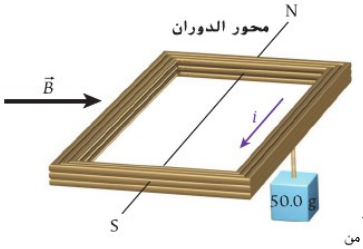


8.68 يبلغ نصف قطر حلقة سلك دائرية $R = 0.12$ m وتحمل تيارًا $i = 0.10$ A. تُوضَع الحلقة في المستوى xy في مجال مغناطيسي منتظم يتحدّد من خلال $\vec{B} = -1.5\hat{k}$ T كما يظهر في الشكل. حدّد اتجاه ومقدار العزم المغناطيسي للحلقة، واحسب الطاقة الكامنة للحلقة في الموقع الموضّح. إذا كانت حلقة السلك تتحرّك بحرية، إذا فكيف ستَوجّه نفسها لتقليل طاقتها الكامنة، وما هي قيمة أقل طاقة كامنة؟

8.69 ثمة ملف لولبي بطول 0.90 m يبلغ نصف قطره 5.0 m. عندما يحمل السلك تيارًا مقداره 0.20 m. فإنّ المجال المغناطيسي داخل السلك يكون 5.0 mT. ما عدد لفات السلك في الملف اللولبي؟

8.70 في كابل محوري، يحمل اللُّب المصمت التيار i. ويحمل أيضًا الغلاف التيار i ولكنه يكون في الاتجاه المعاكس. ونصف قطره الداخلي a، ونصف قطره الخارجي b. وتُوزَّع كثافة التيار بالتساوي على كل موصل. أوجِد تعبيرًا لإيجاد المجال المغناطيسي على مسافة $a < r < b$ من مركز اللُّب.

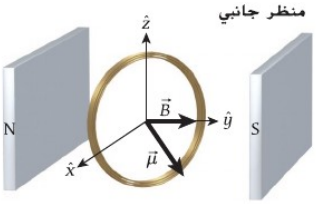
8.71• يقع ملف مستطيل مكوّن من 50 لفة، أبعاده هي 10.0 cm × 20.0 cm. في مستوى أفقي، كما يظهر في الشكل. محور دوران الملف محاذٍ للشمال والجنوب. ويحمل تيارًا $i = 1.00$ A ويقع في مجال مغناطيسي يتجه من الغرب إلى الشرق. وتتدلى كتلة تزن 50.0 g من جانب واحد من الملف. حدّد شدة المجال المغناطيسي اللازمة للحفاظ على الملف في الاتجاه الأفقي.



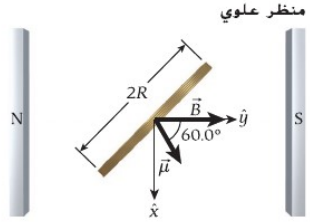
8.72• سلكان طويلان مستقيمان ومتوازيان تفصل بينهما مسافة 20.0 cm. ويحمل كل سلك تيارًا مقداره 10.0 A في الاتجاه نفسه. ما مقدار المجال المغناطيسي الناتج عند نقطةٍ على مسافة 12.0 cm من كل سلك؟

8.73• جسيم كتلته 1.00 mg وشحنته q. يتحرّك بسرعة 1000 m/s على طول مسار أفقي طوله 10.0 cm أسفل سلك مستقيم حامل للتيار وبشكل موازٍ له. حدّد q إذا كان مقدار التيار في السلك هو 10.0 A.

8.74• وُضِعَ ملف موصّل يتكوّن من عدد n من لفات السلك، في مجال مغناطيسي منتظم يتحدّد من خلال $\vec{B} = 2.00\hat{y}$ T كما يظهر في الشكل. يبلغ نصف قطر الملف $R = 5.00$ A. وتبلغ الزاوية بين متجه المجال المغناطيسي ومتجه الوحدة العمودي على الملف $\theta = 60.0°$ تبلغ شدة التيار المتدفق عبر الملف $i = 5.00$ A.



a) حدّد اتجاه التيار في الملف، في ضوء اتجاه عزم ثنائي القطب المغناطيسي، $\vec{\mu}$ كما يظهر في الشكل.

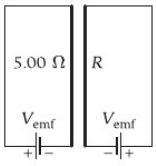


b) احسب عدد اللفات، n، التي ينبغي أن يتضمّنها الملف ليكون عزم الدوران على الحلقة 3.40 N m.

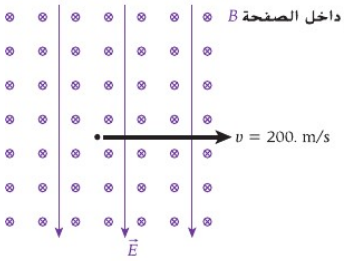
c) في حال تقليل نصف قطر الحلقة $R = 2.50$ cm. ما عدد اللفات، N، اللازم ليظل عزم الدوران كما هو لا يتغيّر؟ افترض أنّ i وB وθ ظلت كما هي.

8.75• تحتوي حلقة سلك، يبلغ نصف قطرها $R = 2.50$ cm، على حلقةٍ أصغر عند مركزها يبلغ نصف قطرها $r = 0.900$ cm ومستويات الحلقتين متعامدة أحدها على الآخر. عندما يمر تيار مقداره 14.0 A عبر كلتا الحلقتين، تكتسب الحلقة الصغرى عزم دوران بسبب المجال المغناطيسي الناتج عن الحلقة الكبرى. حدّد عزم الدوران هذا، بافتراض أنّ الحلقة الصغرى صغيرة بما يكفي لأن يظل المجال المغناطيسي الناتج عن الحلقة الكبرى هو نفسه عبر سطحها بالكامل.

8.76• وُصِّلَ سلكان،يبلغ طول كل منهما 25.0 cm، ببطاريتين منفصلتين شدة كل منهما 9.00–V. كما يظهر في الشكل. تبلغ مقاومة السلك الأول 5.00 V. بينما مقاومة السلك الآخر غير معروفة (R). إذا كانت المسافة الفاصلة بين السلكين هي 4.00 mm. فما قيمة R التي ستُولِّد قوةً مقدارها 4.00×10^{-5} N بينهما؟ وهل هي قوة جذب أم قوة تنافر؟



8.77• يتحرّك بروتون تحت التأثير المجمّع لمجال كهربائي ($E = 1000$ V/m) ومجال مغناطيسي ($B = 1.20$ T)، كما يظهر في الشكل.

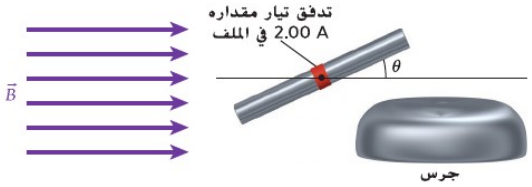


a) ما عجلة البروتون لحظة دخوله المجالين المتقاطعين؟

b) ماذا كانت ستصبح العجلة في حال عكس اتجاه حركة البروتون؟

8.78• تطير طائرة لعبة، تزن كتلتها 0.175 kg. وتبلغ شحنتها 36 mC. بسرعة 2.8 m/s على ارتفاع 17.2 cm فوق سلك، يحمل تيارًا مقداره 25 A وبشكل موازٍ له. تتعرّض الطائرة لبعض العجلة. حدّد هذه العجلة.

8.79• أُنشئ جرس باب كهرومغناطيسي عن طريق لف سلك 70 لفةً حول قضيب طويل رفيع، كما يظهر في الشكل. تزن كتلة القضيب 30.0 g. ويبلغ طوله 8.00 cm . وتبلغ مساحة مقطعه العرضي 0.200 cm^2.



حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

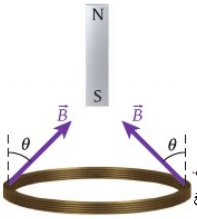
يدور القضيب بحرية حول محورٍ عبر مركزه، الذي هو أيضًا مركز الملف. في البداية، يصنع القضيب زاوية $\theta = 25.0°$ مع المستوى الأفقي. عندما تكون $\theta = 0.00°$، يضرب القضيب الجرسَ. يبلغ المجال المغناطيسي المنتظم 900. تُوجَّه G عند زاوية $\theta = 0.00°$.

a) إذا تدفق تيار مقداره 2.00 A في الملف، فما عزم الدوران على القضيب عندما تكون $\theta = 25.0°$؟

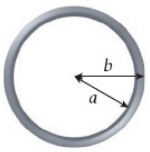
b) ما السرعة الزاويّة للقضيب عندما يضرب الجرس؟

•**8.80** يحمل سلكان طويلان متوازيان، تفصل بينهما مسافة d، تيارين في اتجاهين معكوسين. إذا كان السلك الأيسر يحمل تيارًا $i/2$ ويحمل السلك الأيمن تيارًا i، فحدّد أين ستكون قيمة المجال المغناطيسي صفرًا.

•**8.81** يتم رفع ملف سلك مُوجَّه أفقيًا – يبلغ نصف قطره 5.00 cm ويحمل تيارًا i – من خلال القطب الجنوبي على قضيب مغناطيسي مُوجَّه رأسيًا ومُعلَّق فوق مركزه، كما يظهر في الشكل. إذا كانت المجال المغناطيسي على كل أجزاء الملف يصنع زاوية مقدارها $\theta = 45.0°$ مع القضيب الرأسي، فحدّد مقدار التيار اللازم للحفاظ على طفو الملف في الهواء. يبلغ مقدار المجال المغناطيسي $B = 0.0100$ T. ويبلغ عدد اللفات في الملف $N = 10.0$. ويبلغ إجمالي كتلة الملف 10.0 g.



•**8.82** كما يظهر في الشكل، تحمل أسطوانة موصّلة طويلة ومجوَّفة، نصف قطرها الداخلي a ونصف القطر الخارجي b، تيارًا يتدفق خارجًا من الصفحة. افترض أنَّ $a = 5.00$ cm و$b = 7.00$ cm، وأنَّ التيار $i = 100.$ mA. موزّع بانتظام على الجدار الأسطواني (بين a وb). أوجِد مقدار المجال المغناطيسي في كل من المسافات التالية r من مركز الأسطوانة:



a) $r = 4.00$ cm

b) $r = 6.50$ cm

c) $r = 9.00$ cm

•**8.83** يحمل سلك يبلغ نصف قطره R التيار i. وتُحدَّد كثافة التيار من خلال $J = J_0(1 - r/R)$، حيث تُقاس r من مركز السلك ويكون J_0 ثابتًا. استخدم قانون أمبير لإيجاد المجال المغناطيسي داخل السلك على مسافة $r < R$ من المحور المركزي.

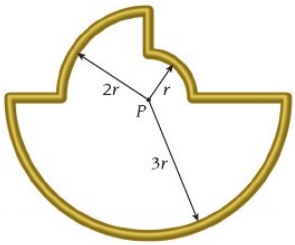
•**8.84** يتدفق تيار مقداره 3.0 A في سلك دائري يبلغ نصف قطره 5.0 cm. يُوضَع السلك في مجال مغناطيسي منتظم 5.0 mT.

a) حدّد أقصى عزم دوران على السلك.

b) حدّد مدى طاقة الوضع المغناطيسية للسلك.

تمارين بمعطيات متعددة

8.85 تحمل الحلقة الموضَّحة في الشكل تيارًا مقداره 3.857 A، والمسافة $r = 1.411$ m. ما مقدار المجال المغناطيسي عند النقطة P داخل الحلقة؟



8.86 تحمل الحلقة الموضَّحة في الشكل تيارًا مقداره 3.961 A. ويبلغ مقدار المجال المغناطيسي عند النقطة P داخل الحلقة 7.213×10^{-7} T. ما قيمة r؟

8.87 في الحلقة الحاملة للتيار الموضَّحة في الشكل، تبلغ المسافة $r = 2.329$ m. ويبلغ مقدار المجال المغناطيسي عند النقطة P داخل الحلقة 5.937×10^{-7} T. ما مقدار التيار في الحلقة؟

8.88 يبلغ نصف القطر الداخلي لمغناطيس حلقي 1.895 m ويبلغ نصف قطره الخارجي 2.075 m. عندما يحمل السلك تيارًا مقداره 33.45 A، فإنَّ المجال المغناطيسي على مسافة 1.985 m من مركز المغناطيس الحلقي يكون 66.78 mT. ما عدد لفات السلك الموجودة في المغناطيس الحلقي؟

8.89 يبلغ نصف القطر الداخلي لمغناطيس حلقي 1.121 m ويبلغ نصف قطره الخارجي 1.311 m. ويبلغ المجال المغناطيسي على مسافة 1.216 m من مركز الملف الحلقي 78.30 mT. توجد 22,381 لفةً من السلك في المغناطيس الحلقي. ما مقدار التيار في المغناطيس الحلقي؟

8.90 يبلغ نصف القطر الداخلي لمغناطيس حلقي 1.351 m ويبلغ نصف قطره الخارجي 1.541 m. يحمل السلك تيارًا مقداره 49.13–A. وتوجد 24,945 لفةً في المغناطيس الحلقي. ما مقدار المجال المغناطيسي على مسافة 1.446 m من مركز المغناطيس الحلقي؟

حقوق الطبع والتأليف © محفوظة لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education