توهّج فتيل السلك الدقيق للمصباح بسبب مرور التيار الكهربائي فيه. تتحوّل الطاقة الكهربائية إلى طاقةٍ حراريّةٍ (بوساطة التصادمات بين الإلكترونات المتحركة وذرات السلك) تجعل درجة حرارة السلك عاليةً جدًّا بحيث يتوهّج. إنّ التيّار الكهربائيّ والقدرة الكهربائيّة في الدارات الكهربائيّة ذات أهميّةٍ أساسيّةٍ في حياتنا اليوميّة. نتناول في هذا الفصل كلًّا من ac، و dc الذي يتضمّن التحليل دون المجهريّ للتيّار الكهربائيّ أيضًا.

الفصل 18

التيارات الكهربائية

درسنا في الفصلين السابقين الكهرباء الساكنة: شحنات كهربائية ساكنة. وفي هذا الفصل، سندرس الشحنات المتحركة. ونسمي تدفق الشحنة التيارَ الكهربائي.

في حياتنا اليومية، التيارات الكهربائية في الأسلاك والموصلات الأخرى مألوفة لنا. وبالفعل، فإنّ أغلب الأجهزة الكهربائية العملية تعتمد على التيار الكهربائي؛ ومن أمثلة ذلك التيار الذي يمر في المصباح، والتيار الذي يمر في عنصر التسخين للسخان الكهربائي، وكذلك التيار الذي يمر في الأجهزة الإلكترونية. ويمكن أن توجد التيارات الكهربائية أيضا في الموصلات كالأسلاك، وكذلك في الأجهزة الأخرى مثل (أنبوب الأشعة المهبطية) التلفاز أو شاشة الحاسوب الذي تتدفق فيه الإلكترونات المشحونة خلال الفراغ (البند 17-10).

في حالات الكهرباء الساكنة، لاحظنا في (البند 16 - 9) أنّ المجال الكهربائي يجب أن يكون صفرًا داخل الموصل (إن لم يكن كذلك فإنّ الشحنات تتحرك). ولكن عندما تتحرك الشحنات في موصل، يكون هناك مجالٌ كهربائيٌّ داخل الموصل عادة. وبالفعل، فإنّ المجال الكهربائي ضروريٌّ لجعل الشحنات تتحرك ولكي يبقيها متحركة في أي موصل طبيعي. ويمكن التحكم بتدفق الشحنة باستعمال المجال الكهربائي والجهد الكهربائي (الفولتية) وهي مفاهيم تمت مناقشتها سابقًا. ولكي يمرَّ تيارٌ في سلك؛ يجب أن يكون هناك فرق جهد بين طرفي السلك، ويمكن الحصول على هذا الفرق بوساطة بطارية.

في البداية، سوف ننظر إلى التيار الكهربائي من وجهة نظر عينيّة: أي التيّار كما يُقاس في مختبر. وسننظر لاحقا في هذا الفصل إلى التيارات من وجهة نظر مجهرية (نظريا) على أنّها تدفق للإلكترونات في سلك.

حتى عام 1800م، كان التطور التقني للكهرباء يتضمن بشكل أساسي توليد شحنة ساكنة بوساطة الاحتكاك. ولكن تغير ذلك كله في عام 1800 عندما اخترع أليساندرو فولتا (1827 - 1745: الشكل 18-1) البطارية الكهربائية التي تمكّن من خلالها الحصول على أول تدفق ثابت للشحنة الكهربائية، أي، تيار كهربائي ثابت.

الشكل 18-1: أليساندرو فولتا. في هذه الصورة، يعرض فولتا بطاريته لنابليون في عام 1801م.

18-1 البطارية الكهربائية

إنّ الأحداث التي أدّت إلى اكتشاف البطارية مثيرة، ليس لأنّ هذا يُعَدُّ اكتشافًا مهمًّا فقط، ولكن لأنّه أحدث مناظرة علمية مشهورة أيضًا.

وفي الثمانينيات من القرن الثامن عشر، أجرى لويجي جلفاني وهو أستاذ في جامعة بولونا (1737-1798) سلسة من التجارب على تقلص عضلة رجل ضفدع من خلال مؤثر كهربائي انتج عن طريق كهرباء ساكنة. وجد جلفاني أنّ العضلة تتقلص أيضًا عند إدخال فلزين مختلفين في الضفدع. اعتقد جلفاني أن مصدر الشحنة الكهربائية كان عضلة الضفدع أو العصب نفسه، وأن الفلز يقوم بنقل الشحنة فقط إلى النقاط المناسبة. وعندما نشر بحثه في عام 1791 سمَّى هذه الشحنة بـ " كهرباء الحيوان". وتساءل الكثيرون بمن فيهم جلفاني نفسه: هل اكتشف ما كان مرجوًّا منذ أمدٍ طويلٍ " قوة الحياة".

أمّا فولتا الذي كان يعمل في جامعة بافيا على بعد 200 km فكان يشك في نتائج جلفاني، وبدأ يعتقد أن مصدر الكهرباء لم يكن في الحيوان نفسه، وإنما بسبب التلامس بين الفلزين المختلفين. أدرك فولتا أن الموصل الرطب مثل عضلة الضفدع أو الرطوبة عند نقطة التلامس بين فلزين مختلفين كان ضروريا في الدارة حتى تكون فاعلة. وفهم فولتا أيضا أن تقلص عضلة الضفدع كان بمثابة جهاز حساس للكشف عن الشدة الكهربائية أو القوة الدافعة الكهربائية (الكلمات التي كان يستخدمها لما يُسَمّى اليوم الجهد) وأنّه أكثر حساسية من أفضل مكشاف كهربائي طوره هو أو آخرون* .

الشكل 18-2: بطارية فولتية من بحث فولتا الأصلي.

أثبت فولتا من خلال بحثه أن مجموعة معينة من الفلزات تحدث تأثيرا أكثر من غيرها، وباستعمال القياسات، قام بترتيبها حسب قدرتها على التأثير (هذه المجموعة الكهروكيميائية مازالت تستخدم من قبل الكيميائيين حتى يومنا هذا). كما وجد أيضًا أن الكربون يمكن أن يستخدم بدلًا من أحد هذه الفلزات.

أدرك فولتا مساهمته العظيمة في مجال العلوم. وضع قطعة قماش أو ورقة مشبعة بمحلول ملحي أو حمضي مخفف بين قرصين أحدهما من الخارصين والآخر من الفضة، وشكل بطارية من مثل هذه الأزواج وذلك بوضع أحدهما فوق الآخر كما في (الشكل 18-2). إنّ هذا التراكم للأقراص "أو البطارية يحدث فرق جهد متزايدًا. وبالفعل، عند توصيل نهايتي هذا التراكم مع بعضهما بوساطة شريط فلزي، فإن شرارة كهربائية تنتج. قام فولتا بتصميم وبناء أول بطارية كهربائية، ونشر اكتشافه في عام 1800.

الخلايا الكهربائية والبطاريات

تنتج البطارية الكهرباء بتحويل الطاقة الكيميائية إلى طاقة كهربائية. ويتوافر في الوقت الحاضر تشكلية واسعة من الخلايا الكهربائية والبطاريات: من بطاريات مصباح الجيب إلى بطارية التخزين التي في السيارة. تحتوي البطاريات البسيطة على لوحين أو قضيبين من فلزين مختلفين (يمكن أن يكون أحدهما من الكربون) تسمى **أقطابا**. تغمس الأقطاب في محلول مثل حامض مخفف، يسمى كهروليت (محلول كهربائي). يسمى مثلُ هذا الجهاز الخليةَ الكهربائية، في حين تسمى مجموعة الخلايا الموصولة مع بعضها **بطارية**، بالرغم من أنّ الخلية الواحدة في الوقت الحاضر تُسَمّى بطاريّة.

أقطاب

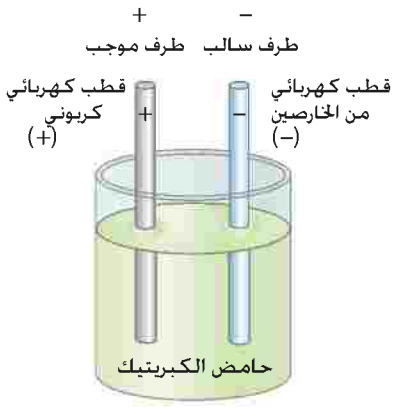
*الكشاف الكهربائي الأكثر حساسية الذي طوره فولتا (انظر البند 16-4 والشكل 16-10) تمكن من قياس 40 V لكل زاوية (زاوية انفراج الورقتين). وعلى الرغم من ذلك، فقد كان باستطاعته تقدير فروق الجهد التي تنتج بوساطة فلزين مختلفين متلامسين: عند تلامس الفضة-الخارصين حصل على 0.7 V وهو قريب جداً من القيمة الحالية المعروفة وهي 0.78 V.

إنّ التفاعلات الكيميائية التي تحدث في أغلب الخلايا الكهربائية معقّدة جدًّا. وسنصف هنا كيفيّة عمل إحدى أبسط الخلايا مع التركيز على الجوانب الفيزيائية.

إنّ الخليّة المبينة في (الشكل 18-3) تستعمل حامض كبريتيك مخفّف كمحلول كهربائي (كهروليت). أحد الأقطاب مصنوع من الكربون والآخر من الخارصين. ويُسَمّى الجزء الخارج من المحلول لكلّ قطبٍ طرفا، ويتمّ توصيل الأسلاك والدارات مع هذه الأطراف. ويحاول الحامض تحليل قطب الخارصين. تترك كلّ ذرّةٍ خارصين إلكترونين على القطب، وتدخل إلى المحلول كأيون موجب. وهكذا يكتسب قطب الخارصين شحنة سالبة. وعندما يصبح المحلول الكهربائي (الكهروليت) موجب الشحنة فإن الإلكترونات تنتزع من قطب الكربون. وبالتالي يصبح قطب الكربون موجب الشحنة. ولأنّ الشحنة على القطبين مختلفة، ينشأ فرق جهد (أو فولتية) محدد بين طرفي البطارية. وإذا سمح للشحنة بالتدفق بين الطرفين من خلال سلك (أو مصباح كهربائي) فإنّ كميّةً أكثر من الخارصين تتحلّل. وبعد فترةٍ زمنيّةٍ يستهلك أحد القطبين أو القطب الآخر وتصبح الخلية ميتة.

تعتمد الفولتية التي توجد بين طرفي بطارية على المواد التي يصنع منها القطبان، وعلى مقدرتهما على التحلل أو منح الإلكترونات.

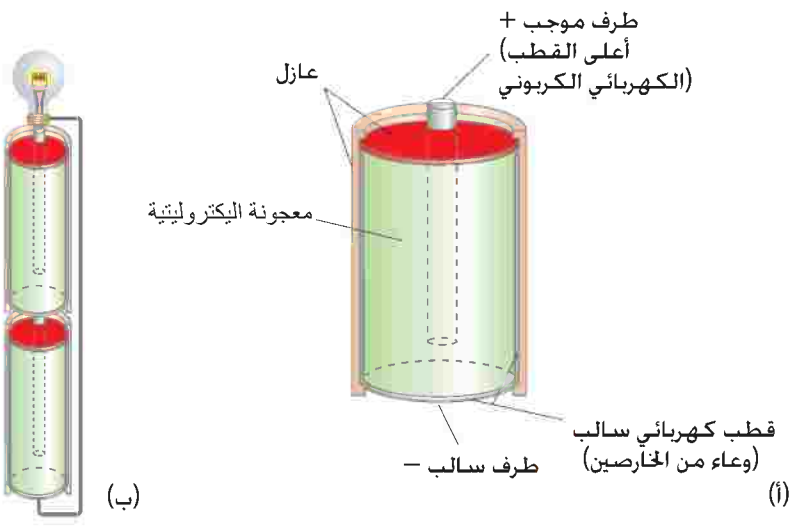
وعند توصيل خليتين أو أكثر بحيث يتصل الطرف الموجب لإحداهما مع الطرف السالب للأخرى يقال عندها بأنهما موصولتان على التوالي وتجمع فولتيتهما. لذلك فإن الفولتية بين نهايتي بطاريتي (الفولتية بين طرفي كلٍّ واحدةٍ منهما) مصباح جيب موصولتين على التوالي تساوي 3.0 V. في حين أنّ ست خلايا (فولتية كلّ واحدة منها 2 V) لبطاريّة التخزين في السيارة تُعطى 12 V. يبين (الشكل 18-4 أ) مخطّط خلية جافة أو بطارية مصباح جيب الشائعة التي تستخدم في المذياع المحمول وأجهزة *CD* الرقمية. ويوضح (الشكل 18-4 ب) خليتين صغيرتين موصولتين على التوالي إلى فتيل مصباح جيب. يتكوّن فتيل مصباح الإنارة من سلك رفيع على شكل ملفٍّ يوضع داخل زجاجة مفرغة من الهواء كما في (الشكل 18-5). وفي الصورة الكبيرة الموجودة في افتتاحية هذا الفصل صفحة 493. يسخن الفتيل ويتوهج عندما تمر الشحنة خلاله.



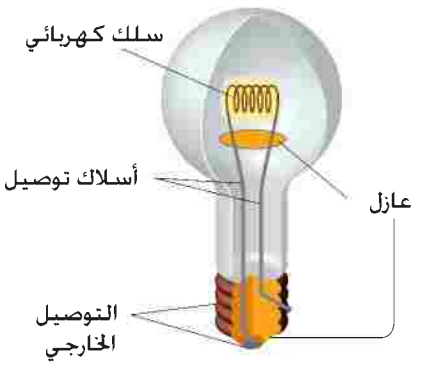
الشكل 18 - 3: خلية كهربائية بسيطة

تنتج البطاريات فرق جهد (فولتية).

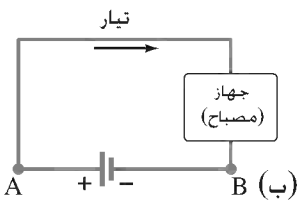
الشكل 18-4 (أ) مخطط للخلية الجافة المألوفة (مثل خلية D أو AA). كأس أسطوانية من الخارصين مغطاة من الجوانب: الجزء السفلي المستوي هو القطب السالب. (ب) خليتان جافتان موصولتان على التوالي. لاحظ أن الطرف الموجب لإحداهما يتصل مع الطرف السالب للأخرى.



الشكل 18-5 فتيل مصباح الإنارة: يتوهج المصباح عندما يصبح السلك الدقيق لهذا الفتيل ساخناً جدا. يسمى هذا النوعُ المصباحَ المتوهج (مقارنة مع المصباح الفلوري).



(أ)



الشكل 18-6: (أ) دارة كهربائية بسيطة. (ب) رسم تخطيطي للدارة نفسها، يحتوي على بطارية، وأسلاك توصيل (الخطوط العريضة ذات اللون الرمادي) ومصباح أو جهاز آخر.

2-18 التيار الكهربائي

إن الهدف من البطارية هو إنتاج فرق جهد يجعل الشحنات تتحرك. عندما يتم توصيل مسار موصل مغلق بين طرفي بطارية، فإننا نحصل على دارة كهربائية (الشكل 18 - 6 أ). وعلى مخطط أي دارة كما في (الشكل 18 - 6 ب). نستعمل الرمز

دارة كهربائية

رمز بطارية

[رمز البطارية]

ليمثل بطارية. إنّ الجهاز الموصول مع البطارية يمكن أن يكون مصباحًا كهربائيًّا، أو سخّانًا، أو مذياعًا، أو أي أداة أخرى. عندما تتشكّل مثل هذه الدارة، تتدفق الشحنة في الدارة خلال الأسلاك من أحد الطرفين إلى الطرف الآخر طالما أنّ المسار الموصل مغلق. يُسَمّى مثل هذا التدفق للشحنة **تيارًا كهربائيًّا**. وبدقة أكثر يعرف التيار الكهربائي في سلك على أنّه مقدار الشحنة الكليّة التي تمرّ خلال كامل المقطع المستعرض للسلك عند أي نقطة لكل وحدة زمن. وهكذا يعرف التيار I كما يلي:

تيار كهربائي

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \qquad \textbf{(1 - 18)}$$

حيث تمثل ΔQ كمية الشحنة التي تمر خلال الموصل في أي موضع خلال الفترة الزمنية Δt.

وحدة التيار الكهربائي: الأمبير

يقاس التيار الكهربائي بالكولوم لكلّ ثانية؛ وقد أُعطي اسمًا خاصًّا وهو الأمبير (اختصارًا *amp* أو A) نسبة إلى الفيزيائي الفرنسي أندريه أمبير (1836 - 1775). وهكذا فإنّ $1\ A = 1\ C/s$. وغالبًا ما تستعمل وحدات أصغر لقياس التيار، مثل ملي أمبير $(1\ mA = 10^{-3}\ A)$ وميكروأمبير $(1\ \mu A = 10^{-6}\ A)$.

$(1\ A = 1\ C/s)$

دارة كهربائية: مغلقة أو مفتوحة

يمكن أن يتدفق التيار في دارة فقط إذا كان هناك مسارٌ موصلٌ مغلق. ليكون لدينا **دارة كاملة**. ولكن إذا كان هناك انفصال في الدارة، مثل سلك مقطوع، عندئذ تسمى **دارة مفتوحة** ولا يتدفق التيار. في أي دارة تحتوي على مسار وحيد فقط يتبعه التيار كما في (الشكل 6-18 ب)، فإن شدة التيار في أي لحظة عند نقطة ما (مثل النقطة A) هي شدة التيار نفسها عند أي نقطة أخرى (مثل B). وهذا نتيجة لحفظ الشحنة الكهربائية: الشحنة لا تفنى. البطارية لا تخلق (أو تفني) أي شحنة كلية، كما أن المصباح الكهربائي لا يمتص الشحنة ولا يفنيها.

تنويه:

البطارية لا تخلق شحنة، والمصباح الكهربائي لا يفني الشحنة.

المثال 1-18 التيار تدفق للشحنة

يمرُّ تيارٌ ثابت شدته 2.5 A في سلك لمدة 4.0 min (أ) كم كمية الشحنة التي تمرُّ في نقطةٍ ما في الدارة خلال 4.0 min؟ (ب) كم عدد الإلكترونات في هذه الكمية؟

النهج: التيار هو تدفق الشحنة لكلّ وحدةٍ زمن (المعادلة 1-18) لذلك فإنّ كميّة الشحنة التي تمرُّ في نقطةٍ ما هي حاصل ضرب التيار في الفترة الزمنية. للحصول على عدد الإلكترونات (ب) نقسم على شحنة الإلكترون.

الحل: (أ) بما أنّ التيار 2.5 A، أو 2.5 C/s، فإننا نحصل على الشحنة الكلية التي تمرُّ في نقطةٍ ما من السلك خلال 4.0 min (= 240 s)، من المعادلة 1-18:

$$\Delta Q = I\,\Delta t = (2.5\ C/s)(240\ s) = 600\ C$$

(ب) الشحنة التي يحملها إلكترون تساوي 1.60×10^{-19} C، وبالتالي فإن 600 C تحتوي على عددٍ من الإلكترونات يساوي:

$$\frac{600\ C}{1.6 \times 10^{-19}\ C/electron} = 3.8 \times 10^{21}\ electrons.$$

تمرين (أ) إذا مرّ مليون إلكترون من نقطةٍ ما في سلك، فما شدّة التيار بوحدة الأمبير؟

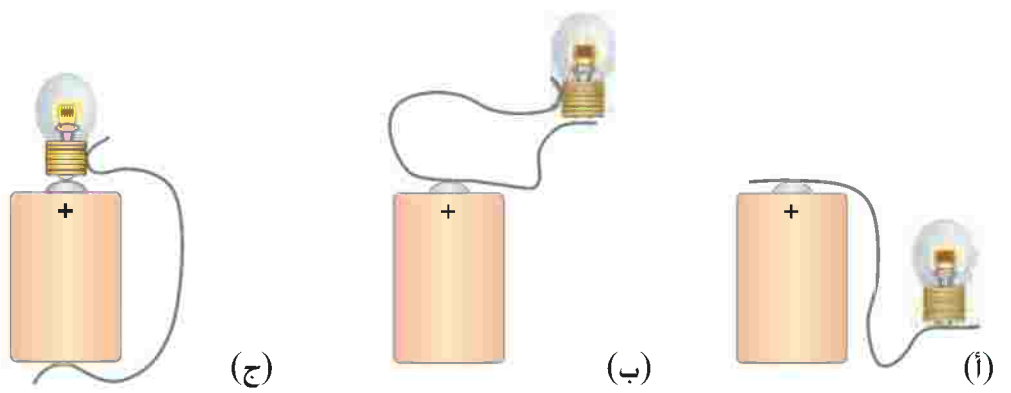
المثال المفاهيمي 18-2 كيف يتم وصل البطارية؟

ما الخطأ في كلّ مخطّطٍ من المخطّطات المبينة في (الشكل 18-7) لإضاءة مصباح كهربائي باستعمال بطارية مصباح الجيب وسلك؟

الجواب: (أ) لا يُوجد مسارٌ مغلقٌ تتدفّقُ خلاله الشحنة. قد يبدأ تدفّقٌ بسيط للشحنات باتجاه المصباح، ولكنّها تصل إلى "طريق مسدود" يتوقف عنده تدفّقُ الشحنات في الحال.

(ب) الآن، هناك مسارٌ مغلق يمرُّ خلاله التيار إلى المصباح. ولكن السلك يلامس أحد طرفي البطارية فقط. لذلك لا يوجد فرق جهد في الدارة يجعل الشحنة تتحرّك باستمرار.

(ج) هنا لا يوجد خطأ في التوصيل: فهذه دارة كاملة. يمكن أن تتدفق الشحنة من أحد طرفي البطارية خلال السلك والمصباح إلى الطرف الآخر. ويؤدي هذا إلى إضاءة المصباح.

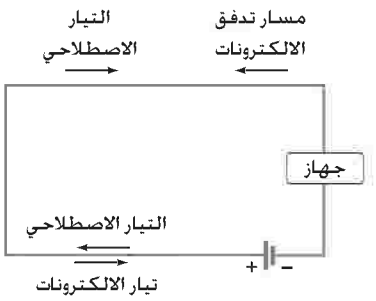


الشكل 18-7: المثال 18-2.

في العديد من الدارات الحقيقية، توصل الأسلاك مع موصل مشترك لضمان الاستمرارية. يُسَمّى هذا الموصل المشترك "**الأرضي**" ويمثل عادة هكذا ⏚ وهو متصل حقيقة بالأرض في بناية أو منزل. وفي السيارة، يُسَمّى أحد طرفي البطارية "الأرضي" ولكنه غير موصول بالأرض ـــ بل إنّه موصول بهيكل السيارة، مثل التوصيل مع كلّ مصباح والأجهزة الأخرى. لذلك فإنّ هيكل السيارة موصول في دارة: لضمان مسار مغلق لتدفق الشحنة.

رأينا في الفصل 16 (البند 16-3) أنّ الموصلات تحتوي على عدد كبير جدًّا من الإلكترونات الحرة. لذا فإنّه عند توصيل سلك موصل بطرفي بطارية فإن الإلكترونات تتدفق في السلك. وعندما يتم توصيل السلك، ينتج فرق جهد بين طرفي البطارية يعمل على إيجاد مجال كهربائي داخل السلك ويكون موازيًا له. تنجذب الإلكترونات الحرة من إحدى نهايتي السلك إلى الطرف الموجب، وفي الوقت نفسه تغادر إلكترونات أخرى الطرف السالب للبطارية وتدخل السلك* عند الجانب الآخر. هناك تدفق مستمر للإلكترونات خلال السلك يبدأ عندما يتم توصيل السلك بطرفي البطارية. وعلى أيّ حال، عندما وضع مصطلحًا الشحنة الموجبة والسالبة قبل قرنين من الزمن، افترض أن الشحنة الموجبة هي التي تتدفق في السلك. وللغايات جميعها تقريبًا، فإنّ تدفق الشحنة الموجبة في اتجاه ما يكافىء تماما تدفق الشحنة السالبة في الاتجاه المعاكس، كما في (الشكل 18-8). في الوقت الحاضر، ما زلنا نستعمل المصطلح التاريخي لتدفق الشحنة الموجبة عندما نناقش اتجاه التيار. لذلك عند الحديث عن اتجاه التيار في دارة، فإنّنا نعني الاتجاه الذي يجب أن تتدفق فيه الشحنة الموجبة. ويشار إلى ذلك أحيانا **بالتيار الاصطلاحي**. وعندما نريد الحديث عن اتجاه تدفق الإلكترونات، فإنّنا نذكر صراحةً أنّه تيار إلكتروني. في السوائل والغازات يمكن لكلا الشحنتين (أيونات) أن تتحرّكا.

* هذا لا يناقض ما تم توضيحه في البند 16-9 في حالة السكون، لا يمكن أن يكون هناك مجال كهربائي داخل موصل وإلّا لتحركت الشحنات. وبالفعل، عندما يكون هناك مجال كهربائي داخل موصل فإنّ الشحنات تتحرك فنحصل على تيار كهربائي.



الشكل 18-8: تيار اصطلاحي من + إلى − يكافىء تدفق إلكترون سالب من − إلى +.

تنويه:

ميز التيار الاصطلاحي من تدفق الإلكترونات.

3-18 قانون أوم: المقاومة والمقاومات

لتوليد تيار كهربائي في دارة، يجب أن يكون هناك فرق في الجهد. إحدى طرق توليد فرق جهد بين طرفي سلك هي في توصيل نهايتيه مع الطرفين المتقابلين لبطارية. لقد كان جورج سيمون أوم أول من أثبت تجريبيًّا أنَّ التيار المارّ في سلك فلزي يتناسب مع فرق الجهد V المؤثر بين طرفيه:

$$I \propto V.$$

فعلى سبيل المثال، إذا وصل سلك إلى بطارية 6-V فإن التيار الذي سيمر في السلك يكون ضعف التيار فيما لو وصل السلك إلى بطارية 3-V. ووجد كذلك أن عكس إشارة الفولتية لا يؤثر في شدة التيار.

تشابه مع تدفق الماء

يمكن مقارنة تدفق الشحنة في سلك مع تدفق الماء في نهر أو في أنبوب بفعل الجاذبية الأرضية. إذا كان النهر أو الأنبوب مستوياً تقريباً، فسيكون معدل التدفق صغيرا. ولكن إذا كانت إحدى النهايتين مرتفعة بطريقة ما عن الأخرى، فإن معدل التدفق – أو التيار – يكون كبيرا. فكلما زاد الفرق في الارتفاع ، ينساب التيار بشكل أكبر. رأينا في الفصل 17 أنّ الجهد الكهربائي في حالة الجاذبية الأرضية يناظر الارتفاع لجرف. وهذا يطبق في الحالة الراهنة على الارتفاع الذي يتدفق منه السائل. تماما، كلما زاد الارتفاع زاد تدفق الماء . لذا، فإنّ فرق جهد " أو فولتية" كبير يسبب تيارا كهربائيا كبيرا.

تعتمد شدة التيار في سلك على المقاومة التي يبديها السلك لتدفق الإلكترونات و ليس فقط على الفولتية. تبدي جدران الأنبوب أو ضفتا النهر والصخور التي في المنتصف مقاومةً لتدفق التيار، وهذا يشبه تدفق الإلكترونات التي تقاوم بسبب التصادمات مع ذرّات مادة السلك. وكلّما زادت المقاومة، يقل التيار لفولتية ما V. وبالتالي نعرف المقاومة الكهربائية بحيث يتناسب التيّار عكسيًّا مع المقاومة: أي أن

$$R = \frac{V}{I} \qquad \textbf{(2-18أ)}$$

حيث R مقاومة السلك أو أيّ جهاز آخر، وV فرق الجهد المؤثر بين طرفي السلك أو الجهاز. أمّا I فتمثل التيار الذي يمر فيه . وغالبا ما تكتب المعادلة 18-2أ كمايلي:

قانون أوم

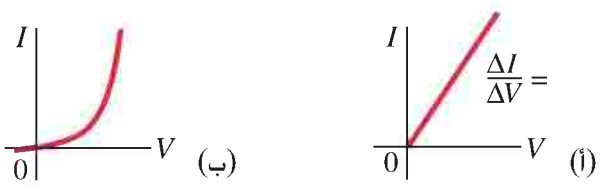
$$V = IR. \qquad \textbf{(2-18 ب)}$$

كما أشرنا أعلاه، وجد أوم تجريبيا أن مقاومة (R) الموصلات الفلزية ثابته ولا تعتمد على الجهد V، وهذه النتيجة تعرف بـ "**قانون أوم**". وتسمى المعادلة 18-2 ب، $V = IR$ أحيانا قانون أوم، ولكن فقط عندما تطبق على مواد أو أجهزة لا تعتمد مقاومتها على الجهد V. ولكن R غير ثابتة للعديد من المواد غير الفلزية، ولا لبعض الأجهزة مثل الديود، وأنبوب التفريغ، والترانزستور وغيرها. وهكذا، فإن قانون أوم ليس قانونًا أساسيًّا، ولكنه يصف نوعًا معينًا من المواد؛ الموصلات الفلزية. تُسَمّى المواد أو الأجهزة التي لا تخضع لقانون أوم (R = ثابت) غير أومية، انظر (الشكل 18-9).

وحدة المقاومة الكهربائية: الأوم ($1\,\Omega = 1\,V/A$)

وحدة المقاومة الكهربائية هي **الأوم** وتكتب اختصارًا Ω (حرف لاتيني، أوميغا). أي أن $1.0\,\Omega$، $R = V/I$ يكافىء $1.0\,V/A$.

الشكل 18-9 رسوم بيانية للتيار مقابل الجهد (أ) موصل فلزي يخضع لقانون أوم. (ب) جهاز غير أومي، في هذه الحالة ديود شبه موصل.



المثال 18-3 مقاومة فتيل مصباح الجيب.

يمرّ تيار كهربائي شدته 300 mA ناتج من بطارية 1.5-V في فتيل صغير لمصباح الجيب، كما في (الشكل 18-10). (أ) ما مقاومة فتيل المصباح؟ (ب) إذا أصبحت البطارية ضعيفة وهبط الجهد إلى 1.2 V، فكيف يتغير التيار؟

النهج: يمكن تطبيق قانون أوم على الفتيل، حيث إن الجهد المؤثر هو فولتية البطارية.

الحل: (أ) نحول 300 mA إلى 0.30 A ونستعمل المعادلة 18-2:

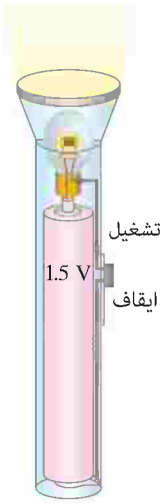
$$R = \frac{V}{I} = \frac{1.5\ \text{V}}{0.30\ \text{A}} = 5.0\ \Omega$$

(ب) إذا بقيت المقاومة كما هي، فإن التيار يصبح:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{1.2\ \text{V}}{5.0\ \Omega} = 0.24\ \text{A} = 24\ \ \text{mA}$$

أي يقل بمقدار 60 mA.

ملحوظة: مع انخفاض التيار في الفرع (ب) تقل درجة حرارة الفتيل ويصبح المصباح أقل سطوعًا. وتعتمد المقاومة أيضًا على درجة الحرارة (البند 18-4) لذلك فإن العملية الحسابية التي قمنا بها تقريبية فقط.



الشكل 18-10: مصباح جيب (المثال 18-3). لاحظ كيف أن الدارة مغلقة على طول الشريط الجانبي.

تمرين ب: ما مقاومة فتيل مصباح جيب إذا مر فيه تيار شدته 0.50A عند توصيله مع 120 V؟

إنّ الأجهزة الكهربائية جميعها، من السخان إلى فتيل المصباح إلى مضخم المسجل تبدي مقاومة لتدفق التيار. يعد فتيل المصباح الكهربائي (الشكل 18-5) والسخان الكهربائي أنواعا خاصة من الأسلاك تنتج مقاومتها عندما تصبح ساخنة جدا. وبصورة عامة فإن مقاومة أسلاك التوصيل قليلة جدا مقارنة مع مقاومة سلك فتيل المصباح أو مع مقاومة ملف؛ لذلك فإن الأسلاك عادة ما يكون تأثيرها في مقدار التيار أقل ما يمكن. تستعمل **المقاومات** للتحكم في مقدار التيار في العديد من الدارات، وخاصة الأجهزة الإلكترونية

تتراوح المقاومات مابين أقل من أوم إلى ملايين الأومات. (انظر الشكلين 18-11 و 18-12). تقسم الأنواع الرئيسة للمقاومات إلى: مقاومات على شكل "سلك ملفوف" مكوّنة من ملفٍّ سلكٍ رفيع، ومقاومات مركّبةً تركيبًا وهي مصنوعة عادةً من الكربون، وكربون رفيع أو أغشية فلزية.

الشكل 18-11: صورة مقاومات، إضافة إلى أجهزة أخرى على لوحة دارة كهربائية.

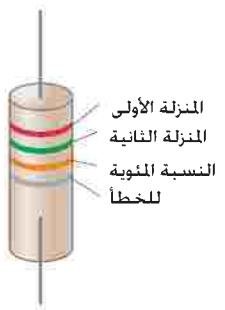
عندما نرسم مخطط دارة نستعمل الرمز

[رمز المقاومة] رمز مقاومة

ليشير إلى مقاومة. ترسم الأسلاك التي مقاومتها مهملة ببساطة كخط مستقيم.

الشيفرة اللونية للمقاومات

اللون	العدد	المضاعف	الخطأ
أسود	0	1	
بني	1	10^1	
أحمر	2	10^2	
برتقالي	3	10^3	
أصفر	4	10^4	
أخضر	5	10^5	
أزرق	6	10^6	
بنفسجي	7	10^7	
رمادي	8	10^8	
أبيض	9	10^9	
ذهبي		10^{-1}	5%
فضي		10^{-2}	10%
لا لون			20%



الشكل 18-12: تكتب قيمة المقاومة على خارجها، وقد تعطى كشيفرة لونية كما هو موضح أعلاه وفي الجدول: يمثل اللونين الأول والثاني أول منزلتين في قيمة المقاومة، أما اللون الثالث فيمثل القوة للعدد عشرة التي يجب أن يضرب فيه، في حين يشير اللون الرابع إلى النسبة المئوية للخطأ في التصنيع. فعلى سبيل المثال، المقاومة التي ألوانها الأربعة هي الأحمر ، والأخضر ، والأصفر و الفضي تكون مساوية: $25 \times 10^4\ \Omega = 250{,}000\ \Omega = 250\ \text{k}\Omega$ زائد أو ناقص 10%.

المثال المفاهيمي 18-4 التيار والجهد

يمرُّ تيار I في المقاومة R كما في (الشكل 18-13). (أ) أيّ النقطتين تكون عندها قيمة الجهد أعلى: A أم B؟ (ب) أي النقطتين يكون عندها شدة التيار أكبر: A أم B؟

الجواب: (أ) تتدفق الشحنة الموجبة دائما من + إلى - : أي من جهد عال إلى جهد أقلّ. فكّر فيما يقابل ذلك في مجال الجاذبية الأرضية، حيث تسقط كتلة ما من نقطة طاقة الوضع عندها مرتفعة إلى نقطة طاقة الوضع عندها أقل. وكذلك الحال بالنسبة إلى تيار موجب I، حيث إن جهد النقطة A أعلى من جهد النقطة B .

(ب) يتطلب حفظ الشحنة أن يكون مقدار الشحنة الذي يتدفق إلى المقاومة عند النقطة A مساوياً لمقدار الشحنة الذي يخرج منها عند النقطة B. لا تستهلك الشحنة أو التيار عند مروره في المقاومة، تماما كما يحدث بالنسبة إلى الجسم الذي يسقط في مجال الجاذبية حيث تتغير طاقة الوضع، ولكن دون كسب كتلة أو فقدها. لذلك فإنّ شدّة التيار عند A هي شدة التيار عند B نفسها.

الشكل 18-13: المثال 18-4

يُسَمّى النقص في الجهد الكهربائي، مثلًا من النقطة A إلى النقطة B في المثال 18-4، هبوط الجهد أو هبوط الفولتية.

هبوط الفولتية

بعض التوضيحات المساعدة

سنلخص هنا بعض سوء الفهم المحتمل وتوضيحاته بإيجاز. إنّ البطاريات لا تعطي تيارًا ثابتًا، ولكنّها تحاول أنّ تبقي على فرق جهد ثابت أو قريبًا من الثبات. (التفاصيل في الفصل اللاحق). لذا، يجب أن تعدّ البطارية مصدرًا للفولتية.

تنويه:
تؤثر الفولتية عبر جهاز، ويمر التيار خلال جهاز.

الفولتية تؤثر عبر سلك أو جهاز. يمرّ التيار الكهربائي **خلال** سلك أو جهاز (موصول مع بطارية)، وتعتمد شدّته على مقاومة ذلك الجهاز. والمقاومة خاصية للسلك أو الجهاز. ومن جهة أخرى، تكون الفولتية خارج السلك أو الجهاز، وتؤثّر عبر نهايتيهما. وقد يُسَمّى التيار خلال الجهاز "الاستجابة": يزداد التيار إذا زادت الفولتية أو إذا قلت المقاومة حيث، $I = V/R$. التيار ليس كمية متجهة على الرغم من أنّ له اتجاهًا. وفي أي سلك، فإنّ التيار دائمًا يكون موازيًا للسلك بصرف النظر عن كيفية انحنائه، تمامًا مثل الماء في أنبوب. يكون اتجاه التيار الاصطلاحي (موجبا) من الجهد المرتفع (+) إلى الجهد المنخفض (-) .

تنويه:
التيار لا يستهلك.

إنّ التيار والشحنة لا يزداد أي منهما أو يقل أو يستهلك عندما يمرّ خلال سلك أو جهاز آخر. وأنّ كمية الشحنة التي تعبر من إحدى النهايتين تخرج من النهاية الأخرى.

4-18 المقاومية

وجد تجريبيا أن المقاومة R لأي سلك تتناسب طرديا مع طوله L وعكسيًّا مع مساحة مقطعه المستعرض A: أي أنّ:

$$R = \rho \frac{L}{A} \qquad \textbf{(3-18)}$$

حيث ρ ثابت التناسب، وتُسَمّى **المقاومية** وهي تعتمد على المادة المستعملة. القيم المثالية لـ ρ التي تُقاس بوحدات $\Omega \cdot m$ (انظر المعادلة 3-18)، معطاة لمواد مختلفة في العمود المتوسط للجدول 1-18 . تعتمد هذه القيم نوعًا ما على كلّ من: النقاوة، والمعالجة الحرارية، ودرجة الحرارة وعوامل أُخرى. لاحظ أنّ للفضة أقل مقاومية، وبالتالي فهي أفضل موصل (على الرغم من أنه ثمين). أما مقاومية النحاس فقريبة من تلك التي للفضة، إلا أنّ النحاس أرخص ثمنًا بكثير، وعليه فإنّ أكثر أسلاك التوصيل مصنوعة من النحاس. ولكنّ الألمنيوم، رغم أنّ مقاومته أكبر من تلك التي للنحاس إلا أنه أقل كثافة، ولذلك يفضل على النحاس في بعض الحالات حيث يستعمل في خطوط الإرسال؛ لأنّ مقاومته للوزن نفسه أقلّ من تلك التي للنحاس.

المقاومية
(الوحدات = $\Omega \cdot m$)

الجدول 18-1 المقاومية ومعاملات درجة الحرارة (عند 20°C)

المادة	المقاومية $\rho(\Omega \cdot m)$	المعامل الحراري $\alpha\,(C°)^{-1}$
موصلات		
فضة	1.59×10^{-8}	0.0061
نحاس	1.68×10^{-8}	0.0068
ذهب	2.44×10^{-8}	0.0034
ألمنيوم	2.65×10^{-8}	0.00429
تنجستن	5.6×10^{-8}	0.0045
حديد	9.71×10^{-8}	0.00651
بلاتين	10.6×10^{-8}	0.003927
زئبق	98×10^{-8}	0.0009
نيكروم (سبيكة *Cr , Fe, Ni*)	100×10^{-8}	0.0004
*أشباه الموصلات**		
كربون (جرافيت)	$(3-60) \times 10^{-5}$	−0.0005
جرمانيوم	$(1-500) \times 10^{-3}$	−0.05
سيليكون	0.1–60	−0.07
عوازل		
زجاج	$10^{9} - 10^{12}$	
مطاط قاس	$10^{13} - 10^{15}$	

* تعتمد قيمها بشدة على وجود الشوائب ولو بمقدار قليل.

المثال 18-5 أسلاك مكبر الصوت

افترض أنّك تريد توصيل نظام صوتي مع مكبر صوت بعيد (الشكل 18-14). (أ) إذا كان طول كلّ سلك 20 m، فما قطر سلك النحاس الذي يجب أن يستعمل حتى تبقى مقاومة كل سلك أقلّ من 0.10 Ω؟ (ب) إذا كان التيار لكلّ مكبّر صوت يساوي 4.0 A، فما فرق الجهد أو هبوط الفولتية بين طرفي كل سلك؟

النهج: نحل المعادلة 3-18 لنحصل على المساحة A التي من خلالها نستطيع حساب نصف قطر السلك باستعمال $A = \pi r^2$. القطر يساوي $2r$. (ب) يمكن استعمال قانون أوم $V = IR$.

الحل: (أ) نحل المعادلة 3-18 بالنسبة للمساحة A ونجد ρ للنحاس من الجدول 18-1:

$$A = \rho \frac{L}{R} = \frac{(1.68 \times 10^{-8}\,\Omega \cdot \text{m})(20\,\text{m})}{(0.10\,\Omega)} = 3.4 \times 10^{-6}\,\text{m}^2$$

مساحة المقطع المستعرض A لسلك دائري تساوي $A = \pi r^2$. وعليه فإنّ نصف القطر يجب أن يكون على الأقل:

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = 1.04 \times 10^{-3}\,\text{m} = 1.04\,\text{mm}$$

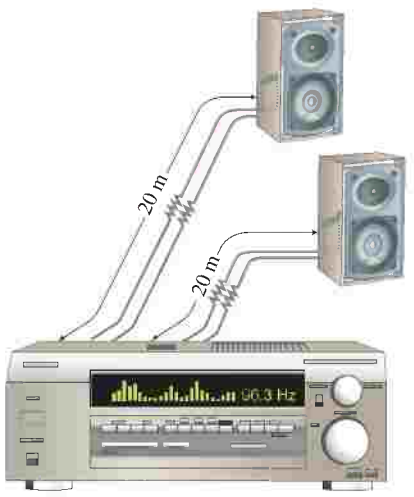
القطر يساوي ضعف نصف القطر، وعليه يجب أن يكون

$$2r = 2.1\,\text{mm}.$$

(ب) من $V = IR$ نجد أنّ هبوط الجهد بين طرفي كلّ سلك يساوي:

$$V = IR = (4.0\,\text{A})(0.10\,\Omega) = 0.40\,\text{V}$$

ملحوظة: إنّ هبوط الجهد عبر الأسلاك يقلّل الفولتية التي تصل إلى طرفي مكبّر الصوت من مضخم النظام الصوتي. وهكذا ينخفض مستوى الصوت قليلا.



الشكل 18-14: المثال 18-5

المثال المفاهيمي 18-6 الإستطالة يغير المقاومة

سلك مقاومته R، سحب بانتظام حتى أصبح ضعف طوله الأصلي. ماذا يحدث لمقاومته؟

الجواب: إذا أصبح الطول ضعف الطول الأصلي L، فإنّ مساحة المقطع المستعرض تقل إلى النصف؛ لأنّ الحجم $(V = AL)$ لهذا السلك يبقى كما هو. ومن المعادلة 3-18، نلاحظ أنّ المقاومة تزداد بمقدار أربعة اضعاف $(2/\frac{1}{2} = 4)$.

تمرين ج: قطر أسلاك النحاس في المنازل حوالي 1.5 mm. ما طول سلك مقاومته 1.0-Ω ؟

* اعتماد المقاومة على درجات الحرارة.

تعتمد المقاومية لمادة ما على درجة الحرارة. وبشكل عام فإنّ مقاومية الفلزات تزداد بزيادة درجة الحرارة. وهذا غير مستغرب؛ لأنّه عند درجات الحرارة المرتفعة، فإنّ الذرات تتحرك بسرعة أكثر وتترتب بشكل أقلّ تنظيما. لذا فمن المتوقع أن تتصادم أكثر مع تدفق الإلكترونات. وإذا لم يكن التغير في درجة الحرارة كبيرًا، فإنّ مقاومية الفلزات تزداد تقريبًا بشكل خطي مع درجة الحرارة؛ أي أنّ:

تأثير درجة الحرارة في المقاومية

$$\rho_T = \rho_0[1 + \alpha(T - T_0)] \qquad \textbf{(4-18)}$$

حيث ρ_0 المقاومية عند درجة حرارة مرجعية T_0 (مثل 0°C او 20°C)، ρ_T المقاومية عند درجة الحرارة T، و α هو **المعامل الحراري للمقاومية**. قيم α معطاة في الجدول 18-1. لاحظ أنّ المعامل الحراري لأشباه الموصلات يمكن أن يكون سالبًا. لماذا؟ على ما يبدو أنّه عند درجات الحرارة المرتفعة فإنّ بعض الإلكترونات التي تكون في الوضع الطبيعي غير حرّةٍ تصبح في أشباه موصّلات حرّة، ويمكن أن تساهم في التيار. لذلك فإنّ مقاومة أشباه الموصّلات يمكن أن تقلّ مع زيادة درجة الحرارة، بالرغم من أنّ هذه الحالة لا تحدث على الدوام.

المثال 18-7 مقياس درجة الحرارة ذو المقاومة.

تطبيق الفيزياء
مقياس درجة الحرارة ذو المقاومة

يمكن توظيف اختلاف المقاومة الكهربائية مع درجة الحرارة لعمل قياسات دقيقة لدرجة الحرارة. إنّ البلاتين شائع الاستعمال لأنّه خال نسبيًّا من تأثيرات التآكل، كما أنّ درجة انصهاره عالية. افترض أنّه عند 20°C تكون مقاومة مقياس درجة الحرارة ذي المقاومة البلاتينية 164.2 Ω. وعندما يوضع في محلول معيّن، فإنّ مقاومته ترتفع إلى 187.4 Ω. ما درجة حرارة هذا المحلول؟

النهج: بما أنّ المقاومة R تتناسب طرديًّا مع المقاومية ρ ، لذا يمكن دمج المعادلتين 18-3 و 18-4 لإيجاد R بدلالة درجة الحرارة T، ومن ثم حل تلك المعادلة لإيجاد T.

الحل: نضرب المعادلة 18-4 في (L/A) لنحصل على (انظر أيضًا إلى المعادلة 18-3).

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

هنا $R_0 = \rho_0 L/A$ هي مقاومة السلك عند درجة الحرارة $T_0 = 20.0°C$. نحل هذه المعادلة بالنسبة إلى T لنجد أن (انظر إلى الجدول 18-1 للحصول على α)

$$T = T_0 + \frac{R - R_0}{\alpha R_0} = 20.0°C + \frac{187.4\,\Omega - 164.2\,\Omega}{(3.927 \times 10^{-3}(C°)^{-1})(164.2\,\Omega)} = 56.0°C$$

ملحوظة: إحدى فوائد أجهزة قياس درجة الحرارة ذوات المقاومات أنّه يمكن استعمالها عند درجات حرارة عالية جدًّا أو منخفضة، حيث تكون أجهزة قياس درجة الحرارة السائلة والغازية عديمة الفائدة.

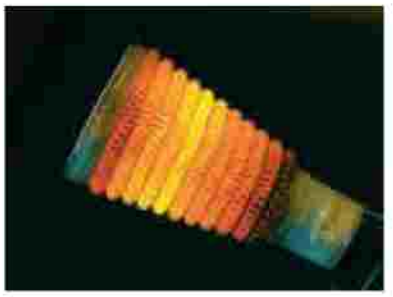
ملحوظة: يكون استعمال **المقاومة الحرارية** في بعض التطبيقات ملائماً أكثر (الشكل 18-15). تتكون هذه المقاومة من أكسيد فلزي أو شبه موصل تتغير مقاومته مع درجة الحرارة بشكل متكرر، يمكن أن تصنع المقاومات الحرارية بحيث تكون صغيرة جدًّا، ولكن استجابتها سريعة جدًّا للتغيرات في درجة الحرارة.

الشكل 18-15: يبين مقاومة حرارية بجانب مسطرة مدرجة بالمليمترات لتدريجه.

تعتمد قيم α نفسها على درجة الحرارة، لذلك فمن الضروري اختيار مجال درجة الحرارة الذي تكون فيه كل قيمة من قيم α صحيحة (مثلاً في كتيب البيانات الفيزيائية). إذا كان مجال درجة الحرارة واسعاً، فإن المعادلة 18-4 غير كافية، لذا فإن الحدود التي تتناسب طرديًّا مع مربع أو مكعب درجة الحرارة تكون ضرورية. ولكن هذه الحدود صغيرة جدا، باستثناء عندما يكون $T - T_0$ كبيراً.

18-5 القدرة الكهربائية

تُعدّ الطاقة الكهربائيه مفيدة لنا؛ والسبب في هذا أنّه يمكن تحويلها إلى أشكال أخرى للطاقة بسهولة: فالمحركات تحوّل الطاقة الكهربائية إلى طاقة ميكانيكية (سنناقش ذلك في الفصل 20).
وفي أجهزة أخرى كالسخان الكهربائي، والفرن الكهربائي، وجهاز التحميص، ومجفف الشعر، فإنّ الطاقة الكهربائية تحوّل إلى طاقة حرارية في سلك مقاومة يُسَمّى عنصر التسخين.



الشكل 16-18: يتوهج ملف عنصر التسخين لسخان كهربائي بسبب تحول الطاقة بفعل التيار الكهربائي.

وفي المصباح الكهربائي المألوف، يصبح فتيله (الشكل 18-5 وصورة افتتاحية الفصل) ساخنًا جدًّا ثمّ يتوهج. تتحول أجزاء قليلة بالمئة من الطاقة إلى ضوء مرئي، أمّا الجزء الباقي (أكثر من 90%) فيتحول إلى طاقة حرارية. إنّ فتيل المصباح الكهربائي وعناصر التسخين (الشكل 18-16) في أجهزة الكهرباء المنزلية لها مقاومات تتراوح قيمتها بين عدد قليل من الأومات إلى عدّة مئات منها.

وفي مثل هذه الأجهزة، تتحول الطاقة الكهربائية إلى طاقة حرارية أو ضوء وتحدث تصادمات عديدة بين الإلكترونات المتحركة وذرات السلك. وفي كل تصادم، ينتقل جزء من الطاقة الحركية للإلكترون إلى الذرة التي يتصادم معها، ويكون نتيجة ذلك ازدياد الطاقة الحركية لذرات السلك، فتزداد درجة حرارة السلك تبعا لهذا. إن الزيادة في الطاقة الحرارية يمكن أن تنتقل كحرارة بوساطة التوصيل والحمل إلى الهواء في السخان الكهربائي أو وعاء الطهي، وبوساطة الإشعاع إلى الخبز في جهاز التحميص، أو أنها تشع ضوءا.

ولإيجاد القدرة المحولة بوساطة جهاز كهربائي، تذكر أن الطاقة المتحولة عندما تتحرك شحنة Q خلال فرق جهد V تساوي QV (المعادلة17-3). وبالتالي، فإن القدرة P، وهي معدل الطاقة المتحولة تساوي:

$$P = \frac{\text{الطاقة المتحولة}}{\text{الزمن}} = \frac{QV}{t}$$

الشحنة التي تتدفق لكل ثانية Q/t تساوي التيار I. لذا يكون لدينا:

القدرة الكهربائية (عام)

$$P = IV. \qquad \textbf{(5-18)}$$

تعطي هذه العلاقة العامة القدرة المتحولة بوساطة أيّ جهاز، حيث I التيار الذي يمرّ في الجهاز، أما V ففرق الجهد بين طرفيه. كما تعطي هذه العلاقة القدرة التي يزودها مصدر ما مثل البطارية. إن وحدة القدرة الكهربائية في النظام الدولي SI هي **واط** $(1\ \text{W} = 1\ \text{J/s})$

ويمكن كتابة معدل الطاقة المتحولة في المقاومة R بطريقتين: ابدأ من العلاقة العامة $P = IV$، وعوض فيها $V = IR$.

القدرة الكهربائية

$$P = IV = I(IR) = I^2R \qquad \textbf{(6 - 18 أ)}$$

القدرة الكهربائية (في المقاومة R)

$$P = IV = \left(\frac{V}{R}\right)V = \frac{V^2}{R} \qquad \textbf{(6 - 18 ب)}$$

تطبق المعادلتان 18-6 أ و ب فقط على المقاومات، في حين تطبق المعادلة 18-5 ، $P = IV$ على أي جهاز بما فيها المقاوم.

مثال 18-8 المصابيح الأمامية للسيارة

احسب مقاومة مصباح الضوء الأمامي لسيارة، إذا علمت أن قدرته 40-W، وأنه مصمم ليتحمل فرقاً في الجهد مقداره 12 V (الشكل 18-17).

النهج: المعطيات هي قدرة المصباح وفرق الجهد بين طرفيه، لذا نحل المعادلة 18-6 ب لإيجاد R.

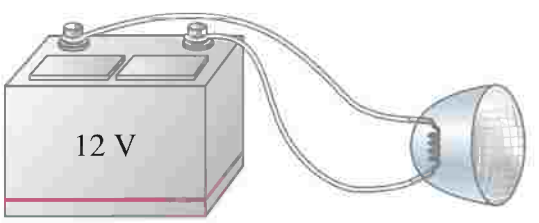
الحل: المعطيات $V = 12\ \text{V}, P = 40\ \text{W}$. وبحل المعادلة 18-6 ب بالنسبة إلى R نحصل على:

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{(12\ \text{V})^2}{(40\ \text{W})} = 3.6\ \Omega$$

ملحوظة: هذه هي المقاومة عندما يسخن المصباح ويتوهج عند قدرة 40 W. عندما يكون المصباح باردا، تكون مقاومته قليلةً جدًّا، كما في المعادلة 4-18. وبما أن شدة التيار تزداد بانخفاض قيمة المقاومة، فإنّ المصباح يحترق عند تشغيله.

تطبيق الفيزياء

لماذا يحترق المصباح الكهربائي عند بداية تشغيله؟



المصباح الأمامي 40-W

الشكل 17-18: المثال 8-18

تنويه:

يدفع ثمن الطاقة التي تساوي القدرة × الزمن، وليس ثمن القدرة.

كيلو واط – ساعة (وحدة الطاقة التي تستعملها شركات الطاقة).

إنّ الطاقة هي التي تدفع ثمنها على فاتورة الكهرباء وليست القدرة. وبما أنّ القدرة هي معدّل الطاقة المتحولة، فإنّ الطاقة الكليّة التي يستخدمها أيّ جهاز تساوي القدرة المستهلكة مضروبة في الزمن الذي يعمل خلاله الجهاز. وإذا كانت القدرة بالواط والزمن بالثانية، فإن الطاقة تقاس بوحدة الجول؛ لأنّ $1\ W = 1\ J/s$. تحدد شركات الكهرباء الطاقة عادةً بوحدة قياسٍ كبيرةٍ وهي **كيلو واط – ساعة** (kWh)، حيث:

$$kWh = (1000\ W)(3600\ s) = 3.60 \times 10^6\ J$$

المثال 18-9 السخان الكهربائي

يسحب سخّان كهربائي تياراً شدته 15.0 A من مصدر جهد 120-V. ما القدرة المطلوبة لهذا السخّان؟ وما التكلفة الشهرية (30 يوم) لتشغيلة 3.0 h في اليوم إذا علم أنّ شركة الكهرباء تتقاضى 9.2 سنتات لكلّ kWh ؟

النهج: معلوم لدينا التيار والفولتية، لذا نستعمل المعادلة 18-5 لإيجاد القدرة، ثم نضرب القدرة (بوحدة kW) في الزمن الذي يستعمل خلاله السخان لنحصل على الطاقة المتحولة في شهر، ثمّ نضرب في تكلفة وحدة الطاقة $0.092 لكل kWh لنحصل على التكلفة الشهريّة.

الحل: القدرة تساوي

$$P = IV = (15.0\ A)(120\ V)$$
$$= 1800\ W$$

أو 1.80 kW. الزمن (بالساعات) الذي يستخدم خلاله السخان في الشهر يساوي $(3.0\ h/d)(30\ d) = 90\ h$، وهذا الزمن بتكلفة 9.2¢/kWh يساوي ما مقداره شهريا $(1.80\ kW)(90\ h)(\$0.092/kWh) = \$15$

ملحوظة: التيار الكهربائي المنزلي هو في الحقيقة متردد (ac)، ولكن هذا الحلّ ما زال صالحًا على فرض أنّ القيم المعطاة لكلٍّ من V و I هي المتوسط المناسب لهما (rms) كما سيتم مناقشته في البند 18-7.

المثال 18-10 تقدير صاعقة البرق

البرق مثال مثير للتيار الكهربائي في ظاهرة طبيعية (الشكل 18-18). هناك تنوّعٌ كبيرٌ في صواعق البرق، ولكن الظاهرة العادية يمكن أن تنقل طاقة مقدارها $10^9\ J$ عبر فرق جهد قد يصل إلى $5 \times 10^7\ V$ خلال فترة زمنية تقدر بحوالي 0.2 s. استعمل هذه المعلومات لتقدير: (أ) الكمية الكلية للشحنة التي تنتقل بين غيمة والأرض. (ب) التيار في صاعقة البرق. (ج) متوسط القدرة التي تزود خلال 0.2 s.

النهج: نقدر كمية الشحنة Q، استنادا إلى أن التغير في طاقة الوضع الكهربائية يساوي فرق الجهد V_{ba} ضرب الشحنة Q (المعادلة 17-3). نساوي ΔPE مع الطاقة المتحولة، $\Delta PE \approx 10^9\ J$. ثم نجد التيار I الذي يساوي Q/t (معادلة 18-1) والقدرة هي الطاقة /الزمن.

الحل: (أ) من المعادلة 17-3، الطاقة المتحولة هي $\Delta PE = QV_{ba}$. نحل لإيجاد Q:

$$Q = \frac{\Delta PE}{V_{ba}} \approx \frac{10^9\ J}{5 \times 10^7\ V} = 20\ \text{coulombs}$$

(ب) التيار خلال الفترة الزمنية 0.2 s يساوي حوالي:

$$I = \frac{Q}{t} \approx \frac{20\ C}{0\ 2\ s} = 100\ A$$

(ج) متوسط القدرة التي تزود خلال 0.2 s يساوي:

$$P = \frac{\text{الطاقة}}{\text{الزمن}} = \frac{10^9\ J}{0\ 2\ s} = 5 \times 10^9\ W = 5\ GW.$$

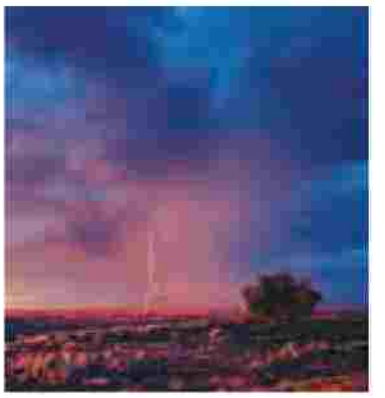
ويمكن أيضًا استعمال المعادلة 18-5:

$$P = IV = (100\ A)(5 \times 10^7\ V) = 5\ GW$$

ملحوظة: بما أنّ أكثر صواعق البرق تتكون من عدة مراحل، فمن المحتمل أنّ أجزاءً فرديّةً منها تحمل تيارات أكثر بكثير من 100 A الذي حسبناه في هذا المثال.

تطبيق الفيزياء

البرق



الشكل 18-18: المثال 18-10 صاعقة البرق.

تمرين د: بما أنَّ $1\ kWh = 3.6 \times 10^6\ J$، ما الكتلة التي يجب أن ترفع باتجاه معاكس للجاذبية لمسافة متر لعمل كمية مكافئة من الشغل.

6-18 القدرة في الدارات الكهربائية المنزلية

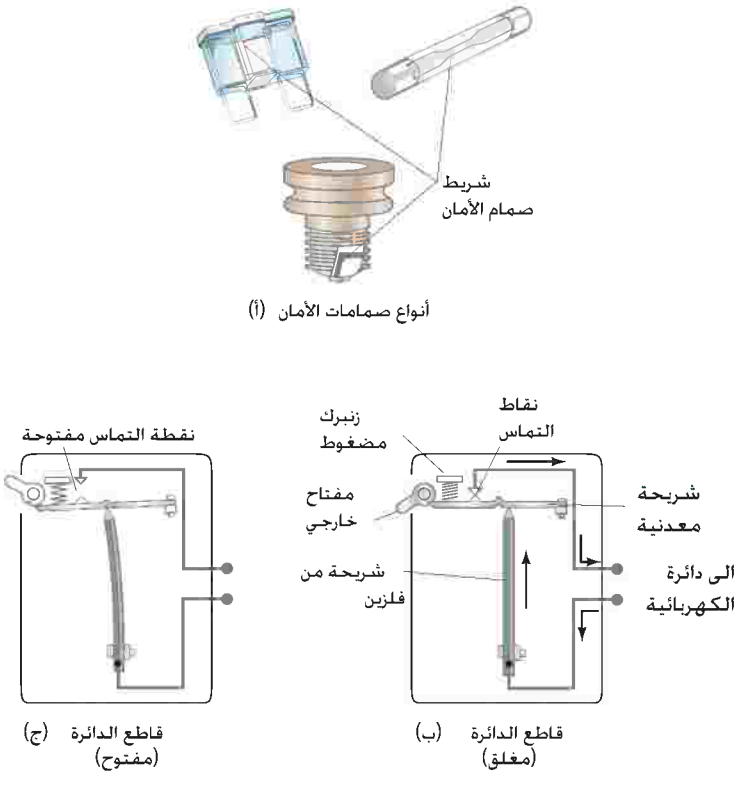
تطبيق الفيزياء

الأمان – أسلاك الدارات المنزلية تسخن.

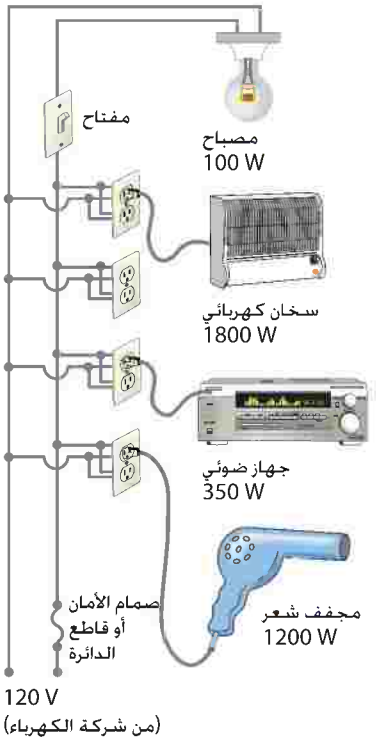
صمامات أمان، قواطع دارة، عطل التماس.

إنّ الأسلاك الكهربائية التي تحمل الكهرباء إلى مصابيح الإنارة والأجهزة الكهربائة المنزلية الأخرى لها مقاومة معينة، على الرغم من أنها صغيرة عادة. ومع ذلك، إذا كان التيار كبيراً كفاية، فإنّ الأسلاك سوف تسخن وتنتج طاقة حرارية بمعدل يساوي I^2R، حيث R هي مقاومة السلك. ولكن الخطر المحتمل هو أنّ الأسلاك التي تحمل التيار في جدار بناية قد تصبح ساخنة جدًّا بحيث تكون سببًا في بداية حريق. إنّ مقاومة الأسلاك السميكة أقلّ (انظر المعادلة 18-3) ولهذا فإنّها قادرةً على حمل تيار أكبر دون أن تسخن كثيرًا. وعندما يحمل سلك تيارًا أكبر من حدّ الأمان، يقال بأنّه "حمل زائد". ولتجنّب التحميل الزائد: يركب في الدارات الكهربائية صمامات أمان أو قواطع الدارة. وهي في الأساس مفاتيح كهربائية (الشكل 18-19) تفتح الدارة عندما يتجاوز التيار قيمة محددة. فعلى سبيل المثال، يفتح صمامُ الأمان أو قاطعُ الدارة A-20 الدارةَ عندما تزيد قيمة التيار المار فيه على A 20. إذا كررت دارة ما حرق صمام الأمان أو فتح قاطع الدارة، فإنّ هناك احتمالين: ربّما يكون هناك أجهزة كثيرة تسحب تيارًا من تلك الدارة أو أنّ هناك عيبًا ما في مكان ما مثل عطل تماس. وعطل التماس في الدارة يعني أن هناك سلكين متلامسين، وهو ما لايجب أن يحدث (ربما لأن الطبقة العازلة أصبحت تالفة) لأنه يختزل المسار الذي يتبعه التيار. وهكذا تصبح مقاومة الدارة صغيرة جدا، لذا يكون التيار كبيرًا جدًّا. ويجب أن يتم إصلاح عطل التماس في الدارات سريعًا.

الشكل 18-19: (أ) صمامات الأمان. عندما تتجاوز شدة التيار قيمة معينة، تنصهر الشريحة الفلزية وتفتح الدارة. لذلك يجب استبدال صمام الأمان. (ب) أحد أنواع قواطع الدارة. يمر التيار الكهربائي خلال شريحة من فلزين. عندما تتجاوز شدة التيار مستوى الأمان، فإن تسخين الشريحة المكونة من فلزين يجعل الشريحة تنحني بعيدا إلى اليسار بحيث إن الثلم الذي في الشريحة الفلزية حاملة الزنبرك يسقط فوق نهاية الشريحة المكونة من فلزين. (ج) ثم تفتح الدارة عند نقاط التماس (النقطة التي تلامس الشريحة الفلزية) ويقلب المفتاح الخارجي أيضا. وحالما تبرد الشريحة المكونة من فلزين، يمكن إعادة ضبطها باستعمال المفتاح الخارجي. نوع مغناطيسي لقواطع الدارة نوقش في الفصلين 20 و 21.



تُصَمَّمُ الداراتُ الكهربائية المنزلية بحيث توصل الأجهزة المختلفة للحصول على الفولتية المعيارية (عادة 120 V في الولايات المتحدة) من شركة الكهرباء (الشكل 18-20). تُسَمّى الدارات مع الأجهزة المرتبة في (الشكل 18-20) دارات التوازي، كما ستناقش في الفصل اللاحق. عندما يحترق صمام الأمان أو يفتح قاطع دارة، فمن الضروري اختبار التيار الكلي الذي كان يسحب من الدارة، ويمثل مجموع التيارات في كل جهاز.



الشكل 18-20: توصيل الأجهزة الكهربائية المنزلية.

تطبيق الفيزياء

صمامات الأمان المناسبة والتماس الكهربائي.

مثال 18-11 هل يحترق صمام الأمان؟

احسب التيار الكلي الذي تسحبه الأجهزة التي في (الشكل 18-20) جميعها.

النهج: كل جهاز له الفولتية 120-V نفسها. التيار الذي يسحبه كل جهاز من المصدر يمكن إيجاده من $I = P/V$ (المعادلة 18-5).

الحل: الدارة التي في (الشكل 18-20) تسحب التيارات التالية:

يسحب المصباح الكهربائي $I = P/V = 100\ \text{W}/120\ \text{V} = 0.8\ \text{A}$، أمّا السخان الكهربائي فيسحب $1800\ \text{W}/120\ \text{V} = 15.0\ \text{A}$.

في حين أن أقصى ما يسحبه المسجل هو $350\ \text{W}/120\ \text{V} = 2.9\ \text{A}$. وأخيرا، فإن مجفف الشعر يسحب $1200\ \text{W}/120\ \text{V} = 10.0\ \text{A}$. وأن التيار الكلي الذي تسحبه هذه الأجهزة يساوي:

$$0.8\ \text{A} + 15.0\ \text{A} + 2.9\ \text{A} + 10.0\ \text{A} = 28.7\ \text{A}$$

إذا استعملت في الوقت نفسه.

ملحوظة: يسحب السخان الكهربائي تيارا أكثر مما يسحبه 18 مصباحا كهربائيًّا قدرة كلٍّ منها 100-W. ولهذا يجب أن يكون السخان الكهربائي متصلاً مع دارة خاصة به كي يكون آمنا.

إذا صممت الدارة التي في (الشكل 18-20) لصمام أمان يتحمل 20-A، فإنه يحترق، وهذا مانأمله لمنع أسلاك التحميل الزائد من أن تصبح ساخنة جدًّا وتشعل حريقًا. لذا يجب أن يفصل بعض هذه الأجهزة كهربائيًّا من هذه الدارة حتى يكون التيار الذي يسحب أقل من 20 A (غالبا ما يكون في المنازل والشقق العديد من الدارات). إذا صُمِّمت الدارة من أسلاك سميكة وصمام أمان يتحمل 30-A، فإنّ صمام الأمان يجب ألا يحترق، ولكن إذا احترق فإنّ المشكلة تكون بسبب عطل تماس. (المكان المرجح الذي يحصل فيه عطل التماس يكون في سلك أحد الأجهزة) يختار صمام أمان حجمه مناسب حسب السلك الذي يستعمل لتزويد التيار، وصمام الأمان المناسب الذي يتحمل تيارًا ما يجب ألا يستبدل أبدًا بآخر يتحمل تيارًا أعلى. عندما يحترق صمام الأمان أو يفتح قاطع دارة، فإنّه يعمل كمفتاح يجعل الدارة مفتوحة. إنّ المقصود بالدارة المفتوحة هو أن المسار الموصل المغلق لم يعد موجودًا، لذلك لا يمكن أن يتدفق التيار، كما لو أن $R = \infty$.

تطبيق الفيزياء

تمديد الأسلاك والخطر المحتمل.

تمرين هـ: قدرة مدفأتك الكهربائية 1800-W ولكنّها بعيدة عن مكتبك بحيث لا تستطيع تدفئة قدميك. ولأنّ سلك المدفأة قصير، أوصلتها مع سلك يتحمل 11 A. لم يعدْ هذا الإجراء خطيرًا؟

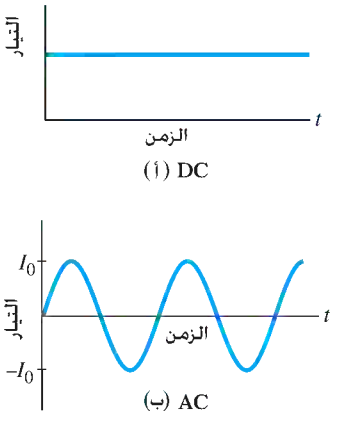
18-7 التيار المتردد

عند توصيل بطارية بدارة، يتحرك التيار مستمرًا في اتجاه واحد. وهذا ما يُسَمّى **التيار المستمر** أو *dc*. إنّ المولدات الكهربائية في محطّات الطاقة الكهربائية تولد **تيارًا مترددًا** أو ac. (أحيانًا تستعمل الحروف الكبيرة *DC* أو *AC*). يعكس التيار المتردّد اتجاهه مرّات كثيرة في كلّ ثانية، وهو جيبي عمومًا كما في الشكل 18-21. تتحرك الإلكترونات بداية في السلك في اتجاه واحد، ومن ثم في الاتجاه الآخر. التيار الذي تزود به المنازل والمحال التجارية من شركات الكهرباء هو ac في أنحاء العالم كافة. وسوف نناقش دارات التيار المتردد بالتفصيل في الفصل 21 ونحللها. ولكن، بما أنّ دارات التيار المتردّد شائعة كثيرًا في الحياة الواقعية، فسنناقش بعض خصائصها الأساسية هنا.

إنّ الفولتية التي تنتجها مولدات ac الكهربائية تكون جيبية، كما سنرى لاحقًا. وبالتالي، فإنّ التيار الناتج منها يكون جيبيًّا أيضًا (الشكل 18-21 ب). ويمكن كتابة الفولتية بدلالة الزمن كما يلي:

$$V = V_0 \sin 2\pi f t = V_0 \sin \omega t$$

يتذبذب الجهد V بين $+V_0$ و $-V_0$، ويعرف V_0 بـ "**فولتية الذروة**". أمّا التردد f فهو عدد الذبذبات الكاملة التي تعمل في الثانية الواحدة، و $\omega = 2\pi f$. وفي أغلب المناطق في الولايات المتحدة وكندا فإن f تساوي 60 Hz.



الشكل 18-21: (أ) تيار مستمر. (ب) تيار متردد

(تعني الوحدة هيرتز "*hertz*" كما رأينا في الفصل 11، عدد الدورات في الثانية). وفي دول كثيرة يستعمل التردد 50 Hz. تستعمل المعادلة $V = IR$ ،18-2 في حالة التيار المتردد أيضا: فإذا كان الجهد عبر مقاومة R، فإن التيار I الذي يمر خلال المقاومة يساوي

$$I = \frac{V}{R} = \frac{V_0}{R}\sin\omega t = I_0 \sin\omega t \qquad \textbf{(7-18)}$$

تُسَمّى الكمية $I_0 = V_0/R$ تيار الذروة. ويُعدّ التيار موجبا إذا تدفق في اتجاه واحد، في حين يُعدّ سالبًا إذا تدفق في الاتجاه المعاكس. يتضح من (الشكل 18-21 ب) أن التيار المتردد كثيرًا ما يكون موجبًا كما يكون سالبا. لذلك فإن متوسط التيار يكون صفراً. ولكن لا يعني ذلك أنه لا يحتاج إلى قدرة، أو أنه لا يولد حرارة في المقاومة. وتتحرك الإلكترونات ذهابا وإيابا لإنتاج حرارة. وبالفعل، فإن القدرة المتحولة في مقاومة R عند أي لحظة تساوي

$$P = I^2R = I_0^2 R \sin^2\omega t$$

وبما أن التيار تربيعي، فإننا نلاحظ أن القدرة موجبة دائما ، كما رسمت بيانيًّا في (الشكل 18-22).
الكمية $\sin^2\omega t$ تتراوح بين 1 و 0. وليس من الصعب إثبات أن متوسط قيمتها يساوي $\frac{1}{2}$ ، كما هو مشار إليه في (الشكل 18-22). لذلك فإنّ متوسط القدرة المتحولة، $\overline{P}$ يساوي:

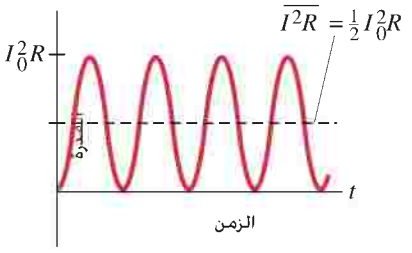
$$\overline{P} = \tfrac{1}{2} I_0^2 R$$

وبما أنّه يمكن أيضًا كتابة القدرة هكذا

فإنّ متوسط القدرة يكتب كما يلي أيضا:

$$\overline{P} = \frac{1}{2}\frac{V_0^2}{R}$$

وعليه، فإنّ المتوسط أو متوسط القيمة لمربع التيار أو الجهد هو المهم في حساب متوسط القدرة $\overline{I^2} = \frac{1}{2} I_0^2$ و $\overline{V^2} = \frac{1}{2} V_0^2$. والجذر التربيعي لكلٍّ منها يُسَمّى جذر متوسط مربع القيمة للتيار والفولتية. ويكتب اختصارًا **rms**، وتُعطى كما يلي:-



الشكل 18-22: القدرة المتحولة في مقاومة في دارة ac.

جذر متوسط مربع التيار.

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\overline{I^2}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} = 0.707 I_0 \qquad \textbf{(8-18أ)}$$

جذر متوسط مربع الفولتية

$$V_{\text{rms}} = \sqrt{\overline{V^2}} = \frac{V_0}{\sqrt{2}} = 0.707 V_0 \qquad \textbf{(8-18ب)}$$

تُسَمّى قيم جذر متوسط مربع التيار والفولتية أحيانًا بالقيم الفاعلة. وهي مفيدة لأنّه يمكن تعويضها مباشرة في الصيغ الرياضية للقدرة (المعادلتان 18-5 و 18-6) للحصول على متوسط القدرة:

$$\overline{P} = I_{\text{rms}} V_{\text{rms}} \qquad \textbf{(9-18 أ)}$$

$$\overline{P} = \tfrac{1}{2} I_0^2 R = I_{\text{rms}}^2 R \qquad \textbf{(9-18 ب)}$$

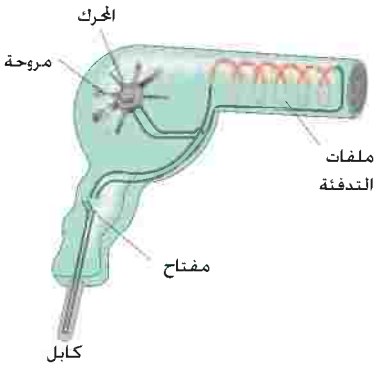
$$\overline{P} = \tfrac{1}{2}\frac{V_0^2}{R} = \frac{V_{\text{rms}}^2}{R} \qquad \textbf{(9-18 ج)}$$

لذلك، فإنّ التيار المباشر الذي تكون فيه قيمتا التيار والفولتية مساويتان لقيمتي جذر متوسط مربع كلٍّ من التيار والفولتية لتيار متردد سوف ينتج القدرة نفسها. إنّ قيمة جذر متوسط مربع التيار هي التي تحدد أو تقاس. فعلى سبيل المثال، في الولايات المتحدة وكندا فولتية الخط العيارية* تساوي 120-V *ac*. إن 120 V هي قيمة V_{rms}؛ أي أن فولتية الذروة V_0 هي:

$$V_0 = \sqrt{2}\, V_{\text{rms}} = 170 \text{ V}$$

ولكن في أغلب دول العالم (أوروبا ، واستراليا ، وآسيا) تكون قيمة جذر متوسط مربع الفولتية 240 V. وعليه، فإن فولتية الذروة تساوي 340 V.

* قد تتفاوت فولتية الخط اعتماداً على الحمل الكلي: على أي حال، يبقى التردد 60 Hz أو 50 Hz ثابتًا تمامًا.



الشكل 18-23: مجفف شعر. أغلب التيار يذهب خلال ملفات التسخين، مقاومة نقية، وجزء صغير يذهب إلى المحرك لتشغيل المروحة (المثال 18-12).

المثال 18-12 مجفف الشعر

(أ) احسب مقاومة وتيار الذروة في مجفف شعر قدرته 1000-W (الشكل 18-23) وصل مع خط جهد مقداره 120-V. (ب) ماذا يحصل إذا وصل مع خط جهد 240-V في بريطانيا؟

النهج: معلوم لدينا $\overline{P}$ و V_{rms}. لذلك فإن $I_{\text{rms}} = \overline{P}/V_{\text{rms}}$ (المعادلة 18-9أ أو 18-5) و $I_0 = \sqrt{2}\, I_{\text{rms}}$. ثم نجد المقاومة من $V = IR$.

الحل: (أ) نحل المعادلة 18-9 أ بالنسبة إلى I_{rms}:

$$I_{\text{rms}} = \frac{\overline{P}}{V_{\text{rms}}} = \frac{1000\ \text{W}}{120\ \text{V}} = 8.33\ \text{A}$$

ثم

$$I_0 = \sqrt{2}\, I_{\text{rms}} = 11.8\ \text{A}$$

المقاومة تساوي

$$R = \frac{V_{\text{rms}}}{I_{\text{rms}}} = \frac{120\ \text{V}}{8.33\ \text{A}} = 14.4\ \Omega$$

يمكن حساب المقاومة أيضًا باستعمال قيم الذروة:

$$R = \frac{V_0}{I_0} = \frac{170\ \text{V}}{11.8\ \text{A}} = 14.4\ \Omega$$

(ب) عند توصيله مع خط جهد 240-V، يتدفق تيار أكثر وتتغير المقاومة مع زيادة درجة الحرارة (البند 18-4). ولكن دعنا نقدّر القدرة المتحولة على أساس قيمة المقاومة 14.4-Ω نفسها. يكون متوسط القدرة

$$\overline{P} = \frac{V_{\text{rms}}^2}{R} = \frac{(240\ \text{V})^2}{(14.4\ \Omega)} = 4000\ \text{W}$$

وهذا يمثل أربعة أضعاف قدرة مجفف الشعر. ومن دون شك، فإن هذا يؤدي إلى انصهار عنصر التسخين أو سلك ملفات المحرك.

المثال 18-13 قدرة النظام الصوتي

إنَّ كلَّ قناة في مستقبل النظام الصوتي قادرة على تزويد قدرة 100 W لتغذية مكبر صوت مقاومته 8-Ω (الشكل18-14). احسب قيمتي جذر متوسط مربع الفولتية والتيار اللذين يغذيان مكبر الصوت: (أ) عند القيمة القصوى للقدرة 100 W. (ب) عند قدرة 1.0 W عندما تنخفض حدة الصوت.

النهج: نفترض أنّه يمكن اعتبار مكبر الصوت كمقاومة بسيطة (ليس صحيحًا تمامًا، انظر إلى الفصل 21) قيمتها $R = 8.0\ \Omega$.

معلوم لدينا القدرة P. لذلك يمكن إيجاد I_{rms} و V_{rms} باستعمال معادلات القدرة 18-9.

الحل: (أ) نحل المعادلة 18-9 ج بالنسبة إلى V_{rms} ونضع $\overline{P} = 100\ \text{W}$ (عند القيمة القصوى):

$$V_{\text{rms}} = \sqrt{\overline{P}R} = \sqrt{(100\ \text{W})(8.0\ \Omega)} = 28\ \text{V}$$

ثم نحل المعادلة 18-9 ب بالنسبة إلى I_{rms} لنحصل على

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{\overline{P}}{R}} = \sqrt{\frac{100\ \text{W}}{8.0\ \Omega}} = 3.5\ \text{A}$$

أو يمكن استعمال قانون أوم ($V = \text{I}R$):

$$I_{\text{rms}} = \frac{V_{\text{rms}}}{R} = \frac{28\ \text{V}}{8\,0\ \Omega} = 3.5\ \text{A}$$

(ب) عندما $\overline{P} = 1.0\ \text{W}$.

$$V_{\text{rms}} = \sqrt{(1.0\ \text{W})(8.0\ \Omega)} = 2.8\ \text{V}$$

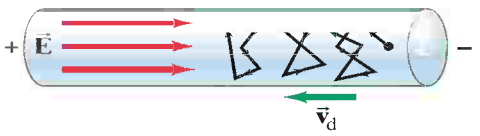
$$I_{\text{rms}} = \frac{2.8\ \text{V}}{8.0\ \Omega} = 0.35\ \text{A}.$$

تمرين و: ماذا يجب أن تكون قيمتا جذر متوسط مربع الفولتية والتيار للنظام الصوتي الذي في المثال 18-13 إذا تم توصيل 100 W إلى مكبر صوت مقاومته 4 Ω؟

وضّح هذا البند مقدمة مختصره للخصائص البسيطة للتيار المتردد. وسوف نناقش دارات التيار المتردد بالتفصيل في الفصل 21. وفي الفصل 19 سوف نتعامل مع تفاصيل دارات التيار المستمر فقط.

* 8-18 التيار الكهربائي من وجهة نظر مجهرية

من المفيد تحليل نموذج بسيط للتيار الكهربائي على المستوى المجهري للذرات والإلكترونات. فعلى سبيل المثال في سلك موصل، يمكن تخيل أنّ الإلكترونات الحرة تتحرك عشوائيا بسرعات عالية وتتصادم مع ذرات السلك (إلى حد ما مثل جزيئات الغاز في البندين13-9 و 13-11). عندما ينشأ مجال كهربائي في السلك (الشكل 18-24) بسبب فرق الجهد المؤثر بين طرفيه، تتأثر الإلكترونات بقوة وتبدأ بالتسارع. ولكنها عندما تصل إلى أكثر أو أقل من متوسط سرعة ثابتة (بسبب التصادمات مع ذرات السلك) تُسَمّى حينها **السرعة الانسياقية** v_d. وهذه السرعة الانسياقية تكون عادةً أقلّ من متوسط السرعة العشوائية للإلكترونات.



الشكل 18-24: المجال الكهربائي $\vec{E}$ داخل السلك يمنح الإلكترونات عشوائية الحركة سرعة انسياقية v_d.

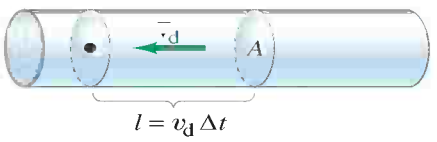
السرعة الانسياقية

ومن المفيد أن نربط السرعة الانسياقية v_d مع التيار الجاهري I في السلك. خلال الفترة الزمنية Δt سوف تتحرك الإلكترونات في المتوسط مسافة $l = v_d\,\Delta t$. افترض أن مساحة المقطع المستعرض للسلك A. ففي الفترة Δt، الإلكترونات جميعها التي في الحجم $V = Al = Av_d\,\Delta t$ سوف تمر خلال المقطع المستعرض للسلك، كما في (الشكل 18-25). وإذا كان هناك عدد مقداره n من الإلكترونات الحرة (شحنة كل منها e) لكل وحدة حجم، فإن العدد الكلي للإلكترونات هو $N = nV$ (حيث V هو الحجم وليس الفولتية) والشحنة الكلية ΔQ التي تمر خلال المساحة A في الفترة الزمنية Δt تساوي:

$$\Delta Q = (\text{عدد الشحنات } N) \times (\text{الشحنة لكل جسيم})$$
$$= (nV)(e) = (nA\,v_d\,\Delta t)(e)$$

وهكذا، فإن التيار I في السلك هو

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = neAv_d \qquad \textbf{(10-18)}$$



الشكل 18-25: الإلكترونات في الحجم AL سوف تمر خلال المقطع المستعرض المشار إليه خلال الفترة الزمنية Δt، حيث $l = v_d\,\Delta t$

التيار (متغيرات مجهرية)

المثال 18-14 سرعة إلكترون في سلك.

سلك نحاس قطره 3.2 mm يحمل تياراً شدته 5.0-A. حدد السرعة الانسياقية للإلكترونات الحرّة. افترض توافر إلكترون واحد لكلّ ذرة نحاس Cu حر الحركة (باقي الإلكترونات تبقى مرتبطة بالذرة).

النهج: يمكن تطبيق المعادلة 18-10 لإيجاد السرعة الانسياقية إذا تمكنا من تحديد العدد n الذي يمثل عدد الإلكترونات الحرة لكل وحدة حجم. بما أننا افترضنا أنّ هناك إلكترونًا واحدًا حرَّ الحركة لكلّ ذرة، فإنّ عدد الإلكترونات الحرة n يساوي عدد ذرات النحاس Cu. الكتلة الذرية للنحاس تساوي 63.5 u (انظر إلى الجدول الدوري على الجانب الداخلي للغطاء الخلفي للكتاب). تحتوي 63.5 g من Cu على مول واحد أو 6.02×10^{23} إلكترون حر. ثم نستعمل كثافة كتلة النحاس (الجدول 10-1) $\rho_D = 8.9 \times 10^3\ \text{kg/m}^3$ لإيجاد حجم هذا المقدار من النحاس، وبالتالي $n = N/V$. (استعملنا PD هنا حتى نميزها عن المقاومية ρ)

الحل: كثافة الكتلة $\rho_D = m/V$ ترتبط مع عدد الإلكترونات الحرّة لكلّ وحدة حجم، $n = N/V$ من خلال

$$n = \frac{N}{V} = \frac{N}{m/\rho_D} = \frac{N\ (1\ \text{mole})}{m\ (1\ \text{mole})}\,\rho_D$$
$$= \text{¢}\frac{6.02 \times 10^{23}\ \text{electrons}}{63.5 \times 10^{-3}\ \text{kg}}\ \left(8.9 \times 10^3\ \text{kg/m}^3\right)$$
$$= 8.4 \times 10^{28}\ \text{m}^{-3}.$$

مساحة المقطع المستعرض للسلك تساوي

$$A = \pi r^2 = (3.14)\left(1.6 \times 10^{-3}\ \text{m}\right)^2 = 8.0 \times 10^{-6}\ \text{m}^2$$

ثم نستخدم معادلة 18-10، فتكون السرعة الانسياقية هي:

$$v_d = \frac{I}{neA} = \frac{5.0\ \text{A}}{\left(8.4 \times 10^{28}\ \text{m}^{-3}\right)\left(1.6 \times 10^{-19}\ \text{C}\right)\left(8.0 \times 10^{-6}\ \text{m}^2\right)}$$
$$= 4.7 \times 10^{-5}\ \text{m/s},$$

وهي حوالي 0.05 mm/s فقط.

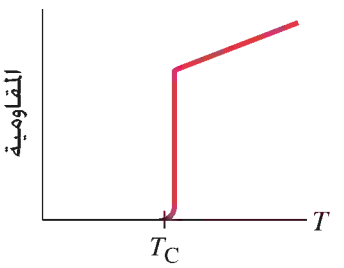
ملحوظة: يمكن مقارنة هذه السرعة الانسياقية مع السرعة الحقيقة لإلكترونات حرة تدور بنشاط داخل الفلز مثل جزيئات في غاز، وقد وجد أن هذه السرعة هي حوالي $1.6 \times 10^6\ \text{m/s}$ عند 20°C.

السرعة الانسياقية التي تتحرك بها الإلكترونات في سلك ما قليلة جدًّا، حوالي 0.05 mm/s فقط للمثال 14-18، وهذا يعني أنّ الإلكترون يحتاج إلى حوالي 20×10^3 s او $5\frac{1}{2}$ h حتى يقطع مسافة 1 m. وعلى أيّ حال فإنّه لا يمثل السرعة التي تنتقل بها الكهرباء: عندما تضغط على مفتاح الكهرباء، فإنّ الضوء – حتى ولو كان على بعد عدة أمتار – ينبعث تقريبا بشكل لحظي لأن المجالات الكهربائية تنتقل أساسًا بسرعة الضوء $(3 \times 10^8 \text{ m/s})$. يمكن التفكير في الإلكترونات التي في سلك كما لو أنّها مثل أنبوب يمتلىء تمامًا بالماء: عندما تدخل كمية قليلة من الماء من إحدى نهايتي الأنبوب، يخرج بعض منه تقريبًا بشكلٍ فوريٍّ من الجهة الأخرى للأنبوب.

" سرعة" انتقال الكهرباء

* 9-18 المواد فائقة الموصلية

عند درجات الحرارة المنخفضة جدًّا، أيْ أقلّ بكثير من 0°C، تصبح مقاومية فلزات معينة ومركبات أو سبائك معينة صفراً، كما تم قياسها بوساطة أكثر الأجهزة دقة. تسمى المواد التي في مثل هذه الحالة فائقة الموصلية. وقد كان *H.K,Onnes* (1926-1853) أول من لاحظ هذه الظاهرة في عام 1911 عندما برد الزئبق إلى درجة حرارة أقل من 4.2 K (−269°C). وجد *Onnes* أنّ مقاومية الزئبق أصبحت صفرا بشكل مفاجىء عند درجة الحرارة هذه. وبشكل عام ، فإنّ الموصلات فائقة التوصيل تصبح فائقة الموصلية فقط عند درجات حرارة أقل من درجة حرارة التحول أو درجة الحرارة الحرجة T_C. والتي تكون عادة قريبة من الصفر المطلق. لقد لوحظ أن التيار في مادة فائقة الموصلية على شكل حلقة يستمر في التدفق لسنوات في غياب فرق الجهد، ودون أن تنخفض شدته. تبين القياسات أن المقاومية للموصلات فائقة التوصيل أقل من $4 \times 10^{-25}\ \Omega \cdot \text{m}$ وهي أقل من تلك التي للنحاس بحوالي 10^{16} مرة وتعد صفرا في النواحي العملية. انظر (الشكل 18-26).



الشكل 18-26: مادة فائقة الموصلية مقاوميتها صفر عندما تكون درجة حرارتها أقل من T_C "درجة حرارتها الحرجة". عند T_C تقفز المقاومية إلى قيمتها الطبيعية التي لا تساوي صفراً وتزداد مع درجة الحرارة كما لأغلب المواد الأخرى (المعادلة 18-4)

لقد أجري العديد من البحوث على المواد فائقة الموصلية في محاولة لمعرفة سبب حدوثها، ولإيجاد مواد يمكن أن تصبح فائقة التوصيل عند درجات حرارة مرتفعة يمكن الوصول إليها بسهولة ولتقليل الثمن والتبريد غير المناسب عند درجات الحرارة المنخفضة المطلوب الوصول إليها. قبل عام 1986 كانت أعلى درجة حرارة تصبح عندها مادة ما فائقة التوصيل 23 K وهذا يتطلب هيليوما سائلا لحفظ المادة مبردة. ففي عام 1987 تم تطوير مركب من يتريوم، باريوم، نحاس، وأكسجين (*YBCO*) يمكن أن يصبح فائق الموصلية عند 90 K. وبما أن درجة الحرارة هذه أعلى من درجة غليان النيتروجين السائل 77 K فإن النيتروجين السائل يكفي لإبقاء المادة فائقة التوصيل. ويعد هذا التقدم مهما؛ لأنّه يمكن الحصول على النيتروجين السائل بسهولة وبثمن أقل من الهيليوم السائل الذي تحتاج إليه المواد فائقة التوصيل الاعتيادية. ومنذ ذلك الحين، تم تسجيل مواد فائقة الموصلية عند درجات حرارة تصل إلى 160 K إلا أنها مركبات هشة.

المواد فائقة الموصلية عند درجات حرارة مرتفعة.

وهناك أبحاث كثيرة لا زالت تجري لتطوير مواد فائقة الموصلية درجة حرارة تحولها T_C مرتفعة لتعمل كأسلاك تستطيع أن تحمل تيارات كهربائية شدتها كافية لتستعمل في النواحي العملية. تستعمل أكثر التطبيقات حاليا بزموث، سترنشيوم، كالسيوم، نحاس، أكسجين ويعرف اختصارا بـ *BSCCO*. إلا أن المشكلة الرئيسة تكمن في عمل سلك قابل للاستعمال والثني من *BSCCO* وهو مادة هشة. أحد الحلول لهذه المشكلة هو غرس أسلاك فلزية دقيقة من مواد فائقة التوصيل درجة حرارة تحولها مرتفعة في مادة ترابط سبيكة فلزية بحيث يلف السلك فائق الموصلية حول أنبوب يحمل نيتروجينا سائلا حتى يبقي *BSCCO* عند درجة حرارة أقل من T_C.لايمكن أن يكون السلك عديم المقاومة بسبب توصيلات الفضة، ولكن المقاومة تبقى أقل بكثير من مقاومة سلك النحاس العادي.

* 10-18 التوصيل الكهربائي في النظام العصبي للانسان

يعدّ النظام العصبي للإنسان أحد الأمثلة المثيرة على تدفق التيار: فهو الذي يزودنا بالوسائل اللازمة لإدراك العالم، والاتصال ضمن الجسم والسيطرة على عضلات الجسم. وبالرغم من أن تفاصيل عمل النظام العصبي الضخم والمعقد مازالت غير مفهومة تماما، إلا أن لدينا معرفة معقولة عن كيفية إرسال الرسائل ضمن النظام العصبي: إنها إشارات كهربائية تمر عبر العنصر الأساسي للنظام العصبي: الخلية العصبية.

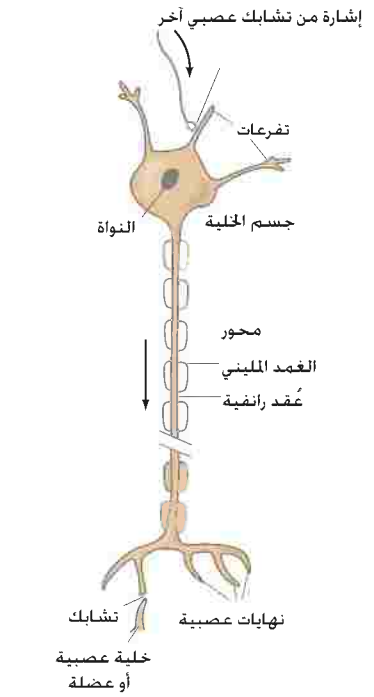
فالخلايا العصبية عبارة عن خلايا حية ذات أشكال غير عادية (الشكل 18-27). ترتبط مع خلية الجسم الأساسية مجموعة من التذيلات تسمى زوائد شجرية، وذيل طويل يسمى محور الخلية العصبية. تستقبل الإشارات بواسطة الزوائد الشجرية، ثم تنتشر على طول محور الخلية العصبية. عندما تصل إشارة ما إلى نهايات العصب، فإنها تنتقل إلى الخلية التالية أو الى عضلة عند وصلة تسمى الوصلة العصبية. (بعض الخلايا العصبية لها خلايا منفصلة تُسَمّى خلايا شوان، تلف حول محاورها: تشكل هذه الخلايا طبقة عازلة تسمى الغمد النخاعي وتساعد في عزل الخلايا العصبية بعضها عن بعض).

تؤدي الخلايا العصبية ثلاث وظائف: **فالخلايا العصبية الحسية** تحمل الرسائل من العيون، والأذان، والجلد، والأعضاء الأخرى إلى النظام العصبي المركزي الذي يتكون من الدماغ والحبل الشوكي. في حين تحمل "الخلايا العصبية المحركة " الإشارات من النظام العصبي المركزي إلى عضلات معينة، ويمكن أن تجعلها تتقلص. هذان النوعان من الخلايا العصبية تشكلان النظام العصبي الخارجي" لتميزه عن النظام العصبي المركزي. أما النوع الثالث من الخلايا العصبية فهو الخلايا العصبية الداخلية التي تنقل الإشارات بين الخلايا العصبية. توجد الخلايا العصبية الداخلية في الدماغ والعمود الفقري، وغالبا ما تتصل مع بعضها لتشكيل تجمع معقد بشكل لا يصدق.

وقبل أن تقوم الخلية العصبية بنقل إشارة كهربائية تكون في حالة تُسَمّى " حالة السكون". وللخلايا العصبية، مثلها مثل الخلايا الحية جميعها شحنة موجبة صافية على السطح الخارجي لغشاء الخلية وشحنة أخرى سالبة على السطح الداخلي كما بينا في البند 11 - 17 بالنسبة إلى عضلات القلب و ECG. وهذا الاختلاف في الشحنة أو "الثناقطبي " يعني وجود فرق جهد عبر غشاء الخلية. عندما لا تقوم الخلية العصبية بإرسال إشارة، فيعبر عن " جهد السكون" هذا كما يلي:

$$V_{\text{داخلي}} - V_{\text{خارجي}}$$

ويتراوح عادة مابين $-60\ \text{mV}$ إلى $-90\ \text{mV}$، حسب نوع الكائن الحي. أغلب الأيونات الشائعة في خلية هي: Na^+ , K^+ و Cl^-. هناك اختلافات كبيرة في تراكيز هذه الأيونات داخل الخلية وخارجها ، كما بينا ذلك في القيم المثالية المعطاة في الجدول 18-2. وهناك أيونات أخرى موجودة أيضا، لذا فإن السوائل داخل محور الخلية وخارجها متعادلة كهربائياً. وبسبب الاختلاف في التركيز، تميل الأيونات للانتشار عبر الغشاء (انظر البند 13-14 عن الانتشار). ومع ذلك، يمنع غشاء الخلية في حالة السكون أي تدفق صاف لـ Na^+ (من خلال آلية الضخ الفاعل لـ Na^+ خارج الخلية). ولكنه يسمح بتدفق أيونات Cl^- وكمية أقل من أيونات K^+، وهذان النوعان من الأيونات يشكلان طبقة شحنة ثنائية القطب على الغشاء. بما أن تركيز K^+ داخل الخلية أكثر منه خارجها، فإن أيونات K^+ تميل للانتشار نحو الخارج عبر الغشاء أكثر منه نحو الداخل. إنّ أيون K^+ الذي يمرّ عبر الغشاء يرتبط بالسطح الخارجي للغشاء، ويترك خلفه شحنة سالبة مكافئة تقع على السطح الداخلي للغشاء (الشكل 18 - 28). أما السوائل نفسها فتبقى متعادلة كهربائياً. في الواقع، إن ما يبقي الأيونات على الغشاء هو جذبها لبعضها بعضا عبر الغشاء. وبشكل مستقل عن هذه العملية، تميل أيونات Cl^- للانتشار إلى داخل الخلية؛ لأن تركيزها في الخارج أعلى. إن انتشار كل من K^+ و Cl^- يميل إلى جعل السطح الداخلي للغشاء مشحوناً بشحنة سالبة، والسطح الخارجي مشحوناً بشحنة موجبة. ونتيجة لتراكم الشحنة على سطح الغشاء، تزداد صعوبة انتشار أيونات أكثر. على سبيل المثال، تحاول أيونات K^+ الحركة نحو الخارج ولكنها تتنافر مع الشحنة الموجودة هناك. يحصل الاتزان عندما يوازن الميل للانتشار بسبب اختلاف التركيز بوساطة فرق جهد كهربائي عبر الغشاء. وكلما كان اختلاف التركيز أكبر، يزداد فرق الجهد عبر الغشاء، وهو كما أشرنا سابقا يتراوح بين $-60\ \text{mV}$ إلى $-90\ \text{mV}$.

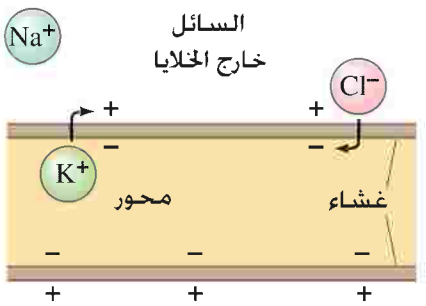


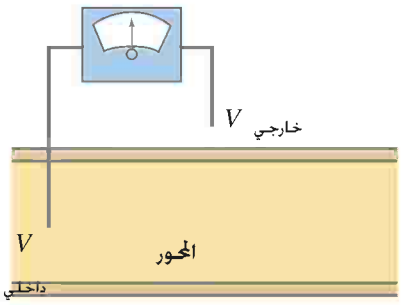
الشكل 18-27: مخطط بسيط للخلية العصبية العادية.

الجدول 18-2: تركيز الأيونات داخل المحور وخارجه

	التركيز داخل المحور (mol/m^3)	التركيز خارج المحور (mol/m^3)
K^+	140	5
Na^+	15	140
Cl^-	9	125

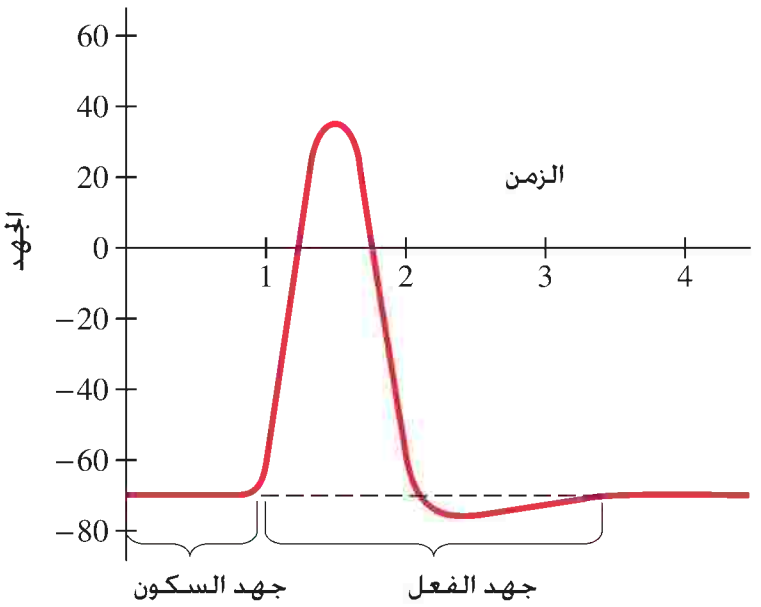
الشكل 18-28: كيف تتشكل طبقة شحنة ثنائية القطب على غشاء خلية.





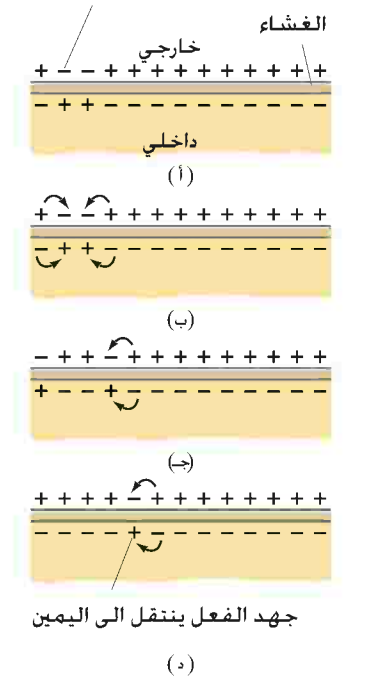
الشكل 18-29: قياس فرق الجهد بين داخل خلية عصبية وخارجها.

إنّ أكثر خاصية مهمّة للخلية ليس جهد السكون الذي لديها (أكثر الخلايا لديها ذلك)، ولكن قدرتها على الاستجابة لحفز وتوصيل إشارة كهربائية على طولها. ويمكن تحفيز العصب بعدة طرق؛ حراريًّا (عندما تلمس فرناً ساخناً) أو كيميائيًّا (كما في حليمات التذوق)، أو ضغطًا (على الجلد أو طبلة الأذن) أو ضوءا (كما في العين)، وقد يكون المحفز كهربائيا لإشارة قادمة من الدماغ أو خلية عصبية أخرى. في المختبر، عادة ما يكون المحفز كهربائياً يؤثر بوساطة مسبار دقيق جدا عند نقطة ما على الخلية العصبية. إذا تجاوز المحفز حدًا معينًا، تنتقل ذبذبة الفولتية إلى أسفل محور الخلية. ويمكن الكشف عن ذبذبة الفولتية هذه عند نقطة ما على محور الخلية بوساطة فولتميتر أو جهاز رسم الذبذبات، يوصل كما في (الشكل 18-29). إنّ ذبذبة الفولتية هذه لها الشكل الموضح في (الشكل 18-30)، وتُسَمّى **جهد الفعل**. كما يمكن ملاحظة أنّ الجهد يزداد من جهد سكون مقداره حوالي $-70\ \text{mV}$ ويصبح موجبا $30\ \text{mV}$ أو $40\ \text{mV}$. يستمر جهد الفعل إلى حوالي $1\ \text{ms}$ وينتقل إلى أسفل محور الخلية العصبية بسرعة $30\ \text{m/s}$ إلى $150\ \text{m/s}$. عندما يحفز جهد الفعل، يقال بأن العصب "انفعل".



الشكل 18-30 :جهد الفعل

الشكل 18-31: انتشار جهد الفعل على طول غشاء محور الخلية العصبية.



ما الذي يسبب جهد الفعل؟ على ما يبدو أن غشاء الخلية له القدرة على تعديل خصائص نفاذيته. وعند النقطة التي يحدث عندها التحفيز، يصبح الغشاء فجأة أكثر نفاذية لـ K^+ من أيونات K^+ و Cl^-؛ لذلك فإن أيونات Na^+ تسرع إلى الخلية، ويصبح السطح الداخلي لجدار الخلية موجب الشحنة، ويوجه فرق الجهد بسرعة ليصبح موجبًا ($+30\ \text{mV} \approx$ كما في الشكل 18-30). وعندما يعود الغشاء فجأة إلى صفاته الأصلية، فإنه يصبح غير نفاذ لـ Na^+، وفي الحقيقة فإنه يضخ أيونات Na^+ إلى الخارج. ثم يسود مرة أخرى انتشار أيونات K^+ و Cl^- ويسترجع جهد السكون ($-70\ \text{mV}$ في الشكل 18-30).

ما الذي يجعل جهد الفعل ينتقل على طول محور الخلية العصبية؟ يحدث جهد الفعل عند نقطة التحفيز كما هو مبين في (الشكل 18-31أ). وعند هذه النقطة، يكون الغشاء بشكل مؤقت موجبًا على الداخل وسالبًا على الخارج. تنجذب الشحنات المجاورة نحو هذه المنطقة كما في (الشكل 18-31ب). يهبط الجهد في هذه المناطق المتجاورة ويسبب نشوء جهد الفعل فيها. لذا، عندما يعود الغشاء إلى وضعه الطبيعي عند النقطة الأصلية، فإن المكان القريب منها يتأثر بجهد الفعل، وعليه، فإن جهد الفعل ينتقل إلى أسفل محور الخلية العصبية (الشكلان 18-31 ج و د).

وقد تتساءل: هل يغيّر عدد الأيونات الذي يعبر خلال الغشاء التراكيز بشكل ملحوظ. الجواب: لا. ويمكن أن نبين لماذا إذا افترضنا محور الخلية العصبية كمكثف كما في المثال التالي:

المثال 18-15 تقدير مكثف محور الخلية العصبية

(أ) اعمل تقديرًا لرتبة المقدار لمكثف محور خلية عصبية طوله 10 cm ونصف قطره 10 μm. سمك الغشاء حوالي 10^{-8} m وثابت العزل حوالي 3 .(ب) بأيّ معامل يتغير تركيز (عدد الأيونات في ذلك الحجم) أيونات Na^+ في الخلية نتيجة لجهد الفعل الواحد؟

النهج: نعمل نموذجا لغشاء محور الخلية العصبية ليكون مواسعاً متوازي اللوحين أسطواني الشكل. شحنة كل لوح تخالف شحنة اللوح المقابل. والمسافة بين اللوحين هي سمك الغشاء $d \approx 10^{-8}$ m. نحسب أولا مساحة الأسطوانة. ثم نستعمل المعادلة 17-9، $C = K\epsilon_0 A/d$ ، لإيجاد المكثف. (ب) في هذا الجزء نستعمل تغير الفولتية خلال جهد الفعل الواحد لإيجاد كمية الشحنة التي تتحرك عبر الغشاء.

الحل: (أ) المساحة A هي مساحة أسطوانة نصف قطرها r وطولها l

$$A = 2\pi rl \approx (6.28)(10^{-5}\,\text{m})(0.1\,\text{m}) \approx 6 \times 10^{-6}\,\text{m}^2$$

من المعادلة17-9، نجد أن:

$$C = K\epsilon_0 \frac{A}{d} \approx (3)(8.85 \times 10^{-12}\,\text{C}^2/\text{N}\cdot\text{m}^2)\frac{6 \times 10^{-6}\,\text{m}^2}{10^{-8}\,\text{m}} \approx 10^{-8}\,\text{F}$$

(ب) بما أنّ الفولتية تتغير من -70 mV إلى حوالي $+30$ mV، فإنّ التغير الكلي حوالي 100 mV. وبالتالي فإن كمية الشحنة التي تتحرك تساوي:

$$Q = CV \approx (10^{-8}\,\text{F})(0.1\,\text{V}) = 10^{-9}\,\text{C}$$

كل أيون يحمل شحنة $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C. لذلك فإنّ عدد الأيونات التي تتدفق لكل جهد فعل تساوي:

$$Q/e = (10^{-9}\,\text{C})/(1.6 \times 10^{-19}\,\text{C}) \approx 10^{10}$$

حجم محور الخلية العصبية الأسطواني الشكل يساوي:

$$V = \pi r^2 l \approx (3)(10^{-5}\,\text{m})^2(0.1\,\text{m}) = 3 \times 10^{-11}\,\text{m}^3$$

تركيز أيونات Na^+ داخل الخلية (الجدول 18-2) يساوي:

$$15\,\text{mol/m}^3 = 15 \times 6.02 \times 10^{23}\,\text{ions/m}^3 \approx 10^{25}$$

لذا، فإنّ عدد أيونات Na^+ الموجودة داخل الخلية هو:

$$(10^{25}\,\text{ions/m}^3) \times (3 \times 10^{-11}\,\text{m}^3) \approx 3 \times 10^{14}$$

وهكذا، فإن جهد الفعل الواحد سوف يغير تركيز أيونات Na^+ بحوالي $\frac{1}{3} \times 10^{-4}$ $= 10^{10}/(3 \times 10^{14})$، أو جزء من 30,000. وهذا التغير في التركيز صغير جدًّا بحيث لا يمكن قياسه.

وهكذا، فإنّ 1000 فعل سوف لن تعدل التركيز بشكل ملحوظ. وبالتالي فليس من الضروري أن تقوم مضخة الصوديوم بإزالة أيونات Na^+ بسرعة بعد كل جهد فعل، ولكن يمكن أن تعمل ببطء طوال الوقت حتى تحافظ على تركيز ثابت نسبيا.

إن انتشار ذبذبة عصبية كما وصف هنا يطبق على محور خلية عصبية لا نخاعية. أما محاور الخلايا العصبية النخاعية من جهة أخرى، فإنها معزولة من السائل الذي خارج الخلية بوساطة الغمد النخاعي إلا عند عقد رانفير *(Nodes of Ranvier)* (الشكل 18-27). لا يمكن أن يتولد جهد الفعل حيثما يكون الغمد النخاعي. وحالما تحفز مثل هذه الخلية العصبية، تستمر الذبذبة في الانتقال على طول الغشاء، ولكن بوجود مقاومة؛ وبالتالي تصبح الذبذبة أصغر كلما تحركت إلى أسفل محور الخلية العصبية. ومع ذلك، فإن الإشارة الضعيفة ما تزال قادرة على تحفيز جهد الفعل بشكل كامل عندما تصل إلى عقدة رانفير. لذا فإن الإشارة تضخم بشكل متكرر عند هذه النقاط. قارن هذه مع خلية عصبية لانخاعية تضخم فيها الإشارة بشكل مستمر بوساطة جهود الفعل المتكررة على طولها، وتحتاج إلى طاقة كثيرة. إنّ تطور الخلايا العصبية النخاعية يمكن أن يعدّ تطورًا مهمًّا؛ لأن ذلك يعني إمكانية إرسال ذبذبات العصب بطاقة أقل. وتنتقل الذبذبات بسرعة أكبر لأن التوصيل الاعتيادي أسرع من تكرار توليد جهود الفعل التي تعتمد سرعتها على تدفق الأيونات عبر الغشاء.

ملخص

تعمل **البطارية الكهربائية** كمصدر فرق جهد ثابت تقريبًا عن طريق تحويل الطاقة الكيميائية إلى طاقة كهربائية. تتكون البطارية البسيطة من قطبين مصنوعين من مادتين مختلفتين ومغمورين في محلول أو معجون يُسَمّى كهرولين (محلول كهربائي).

يشير **التيار الكهربائي** I إلى معدل تدفق الشحنة الكهربائية ويقاس بوحدة **أمبير** (A): 1 A يكافىء 1 C/s الذي يمرّ عبر نقطةٍ ما.

اتجاه التيار الاصطلاحي هو اتجاه تدفق الشحنة الموجبة. إن الإلكترونات المشحونة بشحنة سالبة هي التي تتحرك في سلكٍ ما، وبالتالي فإنّها تتدفق باتجاه يعاكس التيار الاصطلاحي. تكافىء الشحنة التي تتدفق في اتجاهٍ ما، دائما الشحنة السالبة التي تتدفق في الاتجاه المعاكس تقريبًا. يتدفق التيار الاصطلاحي الموجب دائمًا من الجهد المرتفع إلى الجهد المنخفض.

تعرف المقاومة R لجهاز ما بوساطة العلاقة

$$V = IR \qquad \textbf{(2-18)}$$

حيث I التيار الذي يمر في الجهاز عند ما يكون فرق الجهد المؤثر بين طرفيه V. للمواد التي مثل الفلزات تكون R ثابتاً مستقلاً عن V (لذلك $I \propto V$) وهذه النتيجة تسمى قانون أوم. لذلك، فإن التيار القادم من بطارية فولتيتها V يعتمد على مقاومة الدارة R الموصولة بالبطارية.

تؤثر الفولتية عبر جهاز أو بين طرفي سلك. التيار يمر خلال سلك أو جهاز. المقاومة خاصية مميزة للسلك أو الجهاز. وحدة قياس المقاومة هي **الأوم** (Ω). حيث $1\,\Omega = 1\,V/A$. انظر الجدول 18-3.

الجدول 18 - 3: ملخص الوحدات

التيار	$1\,A = 1\,C/s$
فرق الجهد	$1\,V = 1\,J/C$
القدرة	$1\,W = 1\,J/s$
المقاومة	$1\,\Omega = 1\,V/A$

تتناسب المقاومة R لسلك ما عكسيا مع مساحة مقطعه المستعرض A. وتتناسب طرديا مع طوله، وكذلك مع خاصية للمادة تسمى المقاومية:

$$R = \frac{\rho L}{A} \qquad \textbf{(3-18)}$$

تزداد المقاومية ρ بزيادة درجة الحرارة للفلزات، ولكنها قد تقل بالنسبة لاشباه الموصلات.

المعدل الذي تتحول عنده الطاقة في مقاومة R من كهرباء إلى أشكال أخرى للطاقة (مثل حرارة وضوء) يساوي حاصل ضرب التيار في الفولتية. أي أنّ القدرة المتحوله تقاس بالواط، وتعطى بالعلاقة:

$$P = IV \qquad \textbf{(5-18)}$$

والتي يمكن كتابتها بالنسبة للمقاومات كمايلي:

$$P = I^2R = \frac{V^2}{R} \qquad \textbf{(6-18)}$$

وحدة القدرة في النظام الدولي SI هي الواط $(1\,W = 1\,J/s)$.

الطاقة الكهربائية الكلية المتحولة في أي جهاز تساوي حاصل ضرب القدرة في الزمن الذي يعمل خلاله الجهاز. وفي النظام الدولي SI للوحدات، تعطى الطاقة بوحدة جول $(1\,J = 1\,W\cdot s)$، ولكن شركات الكهرباء تستعمل وحدات أكبر، كيلو واط ساعة $(1\,kWh = 3.6 \times 10^6\,J)$.

يمكن أن يكون التيار الكهربائي مستمرًّا (dc) وفيه يكون التيار ثابتاً في اتجاه واحد، أو يمكن أن يكون متردّدًا (ac) وفيه يعكس التيار اتجاهه عند تردد معين f، عادة 60 Hz. التيارات المترددة تكون عادة جيبية في الزمن

$$I = I_0 \sin \omega t \qquad \textbf{(7-18)}$$

حيث $\omega = 2\pi f$، وتولد هذه التيارات بوساطة فولتية مترددة.

تعطى قيم جذر متوسط مربع التيار الجيبي المتردد والفولتية الجيبية كذلك بالعلاقتين:)

$$I_{rms} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \quad \text{and} \quad V_{rms} = \frac{V_0}{\sqrt{2}} \qquad \textbf{(8-18)}$$

حيث I_0 و V_0 تمثلان قيمتي الذروة. العلاقة الرياضية للقدرة $P = IV = I^2R = V^2/R$ صالحة بالنسبة لمتوسط القدرة في التيارات المترددة عندما تستعمل قيم rms لكل من V و I.

[* التيار الكهربائي في سلك عند المستوى دون المجهري، يُعَدُّ تدفقًا للإلكترونات بسرعة انسياقية بطيئة v_d. يعطي التيار بالعلاقة:

$$I = neAv_d \qquad \textbf{(10-18)}$$

حيث n عدد الإلكترونات الحرّة لكلّ وحدة حجم، و e شحنة الإلكترون، أمّا A فمساحة المقطع المستعرض للسلك].

[* عند درجات حرارة منخفضة جدًّا، تصبح بعض المواد فائقة الموصلية، وهذا يعني أن مقاومتها الكهربائية تصبح صفرًا].

[* يعمل النظام العصبي في الإنسان من خلال التوصيل الكهربائي: عند انفعال العصب تنتقل إشارة كهربائية كذبذبة فولتية تُسَمّى جهد الفعل].

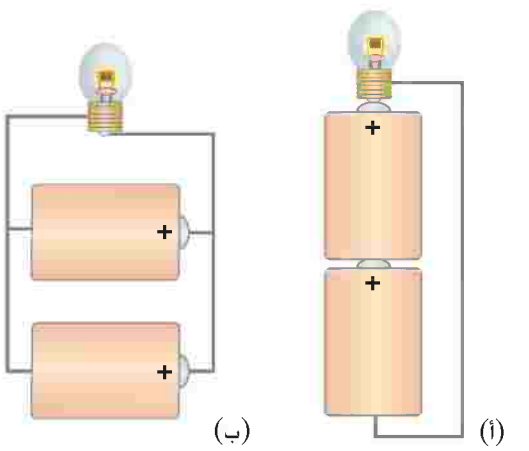
أسئلـــة

1. ما الكمية التي تقيسها بطارية تصنيفها يعطي بـ أمبير – ساعة $(A\cdot h)$؟
2. عند توصيل خلية كهربائية إلى دارة، تتدفق الإلكترونات بعيدا عن الطرف السالب في الدارة. ولكن داخل الخلية، تتدفق الإلكترونات إلى الطرف السالب. فسر ذلك.
3. عندما يشتغل مصباح جيب كهربائي. ما الذي يستهلك في البطارية: تيارها، أم فولتيتها، أم طاقتها، أم قدرتها، أم مقاومتها؟ فسّر ذلك.
4. أحد طرفي بطارية السيارة يقال بأنه موصول مع "الأرض" وبما أنّه ليس متصلا حقيقة مع الأرض، فما المقصود بهذه العبارة؟
5. عندما يفتح صنبور الماء، يتدفق الماء فورا. ليس من الضروري أن تنتظر الماء حتى يتدفق من صمّام الصنبور إلى المزراب. لم لا؟ هل الشيء نفسه صحيح عند وصل سلك إلى طرفي بطارية؟

6. سلكا نحاس وألمنيوم لهما الطول نفسه. هل يمكن أن يكون لهما المقاومة نفسها؟ فسّر إجابتك.
7. إذا زادت مقاومة سخان صغير يستخدم لتسخين الماء لعمل الشاي أو الشوربة (الشكل 18-32)، فهل يسرع ذلك من عملية التسخين، أم يجعلها بطيئة ؟ فسّر ذلك.

الشكل **18-32**: سؤال 7

8. متوازي مستطيلات مصنوع من الكربون أطول جوانبه a , $2a$ و $3a$. كيف يمكن توصيله مع الأسلاك من البطارية لكي تحصل على: (أ) أقلّ مقاومة؟ (ب) أكبر مقاومة؟
9. تشير المعادلة $P = V^2/R$ إلى أنَّ القدرة التي تستنفذ في مقاوم ما تقل إذا قلت قيمة المقاومة، في حين أن المعادلة $P = I^2R$ تتضمن عكس ذلك. هل من تناقض هنا؟ فسّر ذلك.
10. ماذايحدث عندما يحترق فتيل مصباح كهربائي؟
11. وضح لماذا يحترق دائماً فتيل المصباح الكهربائي عند إغلاق مفتاح الكهرباء وليس بعد أن يكون مضاء لبعض الوقت.
12. أيّهما يسحب تياراً كهربائي أكثر: مصباح قدرته 100-W أم مصباح قدرته 75-W؟ أيهما مقاومته أكبر؟
13. تنتقل القدرة الكهربائية على مسافات كبيرة بجهد عال جدًّا. وضح كيف يقلل الجهد العالي القدرة المفقودة في خطوط الإرسال.
14. يحترق صمام أمان يتحمل تيارا شدته 15-A بشكل متكرر. لم يعد تبديله بصمام أمان آخر يتحمل تياراً شدته 25-A خطرًا؟
15. عندما تعمل المصابيح الكهربائية على تردد منخفض ac (فرضا 5 Hz) فإنها تضيء بشكل متقطع . لماذا؟
16. تحت تأثير القدرة ac، تعبر الإلكترونات نفسها ذهابًا وإيابًا خلال المصباح مرارًا وتكرارًا. فسّر لماذا يبقى المصباح مضاءً بدلًا من ذهاب إضاءته بعد أول مرور للإلكترونات.
17. يصنع عنصر التسخين في شوّاية ما من سلك نيكروم. وبعد أن تشتغل الشواية مباشرة، فهل يزداد التيار (I_{rms}) في السلك، أم يقل، أم أنه يبقى ثابتا؟ فسر ذلك.
18. هل يستهلك التيار في مقاومة؟ فسر ذلك.
19. قد يتم توصيل البطاريات مع مصابيح مختلفة بإي من الطريقتين الموضحتين في الشكل 18-33. ما فوائد كل مخطط؟



الشكل **18-33**: سؤال 19

مسائـــل

18 - 2 و 18 - 3 التيار الكهربائي ، المقاومة ، قانون أوم.

(**ملحوظة:** شحنة الإلكترون تساوي 1.60×10^{-19} C).

1. (I) يتدفق تيار شدته 1.30 A في سلك. كم عدد الإلكترونات التي تمر خلال نقطة ما في السلك في كل ثانية؟
2. (I) محطة خدمة تشحن بطارية باستعمال تيار شدته 6.7 A لمدة 5.0 h. كم عدد الشحنات التي تمر خلال البطارية؟
3. (I) ما شدة التيار بالأمبير الذي ينتج من تدفق $1200\ Na^+$ أيون عبر غشاء خلية في $3.5\ \mu s$؟ الشحنة التي على الصوديوم هي الشحنة نفسها التي على الإلكترون، ولكنها موجبة.
4. (I) ما مقاومة محمصة الخبز إذا مرّ فيها تيار شدته 120 V من مصدر جهد 4.2 A؟
5. (I) ماقيمة الفولتية التي تنتج تياراً شدته 0.25 A خلال مقاومة 3800-Ω؟
6. (II) يسحب مجفف شعر تياراً كهربائياً شدته 7.5 A عند توصيله مع مصدر جهد 120-V. (أ) ما مقاومته؟ (ب) كم كمية الشحنة التي تمر خلاله في 15 دقيقة؟ (افترض تياراً مستمراً).
7. (II) يحتوي مجفف الملابس الكهربائي على عنصر تسخين مقاومته 9.6 Ω. (أ) ما شدة التيار في العنصر عند توصيله مع مصدر جهد 240 V؟ (ب)كم كمية الشحنة التي تمر خلال العنصر في 50 دقيقة؟
8. (II) تتصل بطارية 9.0-V مع مصباح كهربائي مقاومته 1.6 Ω. كم عدد الإلكترونات التي تغادر البطارية في كلّ دقيقة؟

9. (II) يقف طائر على خط نقل (dc) للطاقة الكهربائية يحمل تياراً شدته 2800 A (الشكل 18-34). مقاومة السلك $2.5 \times 10^{-5}\,\Omega$ لكل متر، والمسافة بين قدمي الطائر 4.0 cm. ما فرق الجهد بين قدمي الطائر؟

الشكل **18-34**: المسألة 9

10. (II) يسحب جهاز كهربائي تياراً شدته 6.50 A عند 240 V. (أ) إذا هبط الجهد 15%، ما شدة التيار على فرض عدم تغيّر شيء آخر؟ (ب) إذا قلت مقاومة الجهاز 15%، فما شدة التيار التي تمر في الجهاز عند جهد 240 V؟

11. (II) يمر تيار شدته 12-V ناتج من بطارية 12-V في مقاومة. (أ) ما قيمة المقاومة؟ (ب) كم جولا من الطاقة تفقد البطارية في دقيقة واحدة؟

4-18 المقاومية

12. (I) ما قطر سلك تنجستن طوله 1.00-m ومقاومته 0.32 Ω؟

13. (I) ما مقاومة سلك نحاس طوله 3.5-m وقطره 1.5 mm؟

14. (II) احسب نسبة المقاومة بين سلك ألمنيوم طوله 10.0 m وقطره 2.0 mm إلى سلك نحاس طوله 20.0 m وقطره 2.5 mm.

15. (II) هل يمكن أن يكون لسلك نحاس قطره 2.5-mm المقاومة نفسها لسلك تنجستن مساو له في الطول؟ هاتِ تفاصيل عددية.

16. (II) سلك نحاس مقاومته 10.0 Ω. عند أي نقطة يجب أن يقطع السلك بحيث تساوي مقاومة القطعة الأولى 4.0 أضعاف مقاومة القطعة الأخرى؟ ما مقاومة كل قطعة؟

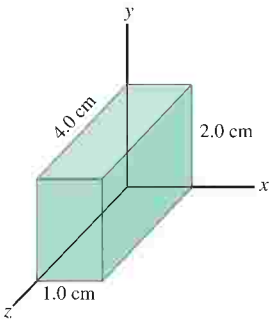
* **17.** (II) بكم يجب أن ترتفع درجة حرارة سلك نحاس (كان في البداية عند درجة حرارة 20°C) حتى تزداد مقاومته بـ 15%؟

* **18.** (II) قدر درجة حرارة النحاس التي تصبح عندها مقاوميته مساوية لتلك التي للتنجستن عند درجة حرارة 20°C.

* **19.** (II) مصباح كهربائي قدرته 100-W ومقاومته حوالي 12 Ω عندما يكون بارداً (20°C) و 140 Ω عندما يكون ساخناً. قدر درجة حرارة فتيل المصباح عندما يكون ساخناً على فرض أن متوسط المعامل الحراري للمقاومية $\alpha = 0.0060\ (\text{C}^\circ)^{-1}$.

20. (II) احسب الهبوط في الجهد على طول سلك طوله 26-m مصنوع من النحاس ورقمه 14 ويستخدم في المنازل (هذا النوع يستعمل في دارات تتحمل تياراً شدته 15-A). قطر السلك 1.628 mm ويحمل تياراً شدته 12-A.

21. (II) متوازي مستطيلات مصنوع من الكربون أطوال أبعاده 1.0 cm , 2.0 cm و 4.0 cm تقع على طول المحاور y , x و z على التوالي. (الشكل 18-35). حدد المقاومة للتيار الذي يمر خلال المادة في الاتجاه (أ) x (ب) y (ج) z. افترض أن المقاومية $\rho = 3.0 \times 10^{-5}\,\Omega\cdot\text{m}$.



الشكل **18-35**: المسألة 21

22. (II) سلكان من الألمنيوم لهما المقاومة نفسها. إذا كان طول أحدهما ضعف طول الآخر، فما النسبة بين قطر السلك الأطول وقطر السلك الأقصر؟

* **23.** (II) وصل سلك ألمنيوم مع مصدر قدرة يعطي بدقة 10.00-V، وتم قياس التيار بدقة فكانت شدته 0.4212 A عند درجة حرارة 20.0°C. وضع السلك في بيئة مختلفة درجة حرارتها مجهولة، وقيس التيار فكانت شدته 0.3618 A. ما درجة الحرارة المجهولة؟

24. (III) يتكون سلك طوله 10.0-m من قطعتين: سلك نحاس طوله 5.0 m متبوع بسلك من الألمنيوم طوله 5.0 m وقطر كل منهما 1.0 mm. وضع فرق جهد 85 mV بين طرفي السلك المركب. (أ) ما المقاومة الكلية للسلكين؟ (ب) ما التيار الذي يمر في السلك؟ (ج) ما فرق الجهد بين طرفي الألمنيوم وكذلك بين طرفي النحاس؟

* **25.** (II) من المهم في بعض التطبيقات عدم تغيّر قيمة المقاومة مع درجة الحرارة. فعلى سبيل المثال افترض أنك صنعت مقاومة قيمتها 4.70-kΩ من مقاوم كربون ومقاوم نيكروم على شكل سلك ملفوف، وصلا مع بعضهما بحيث إن المقاومة الكلية هي مجموع مقاومتهما منفصلين. ما القيمة التي يجب أن تكون لكل مقاوم بحيث لا تعتمد مقاومتهما مجتمعين على درجة الحرارة؟

5-18 و 6-18 القدرة الكهربائية

26. (I) يصمم عنصر التسخين في فرن كهربائي بحيث ينتج 3.3 kW من الحرارة عند وصله مع مصدر جهد 240-V. كم يجب أن تكون مقاومة العنصر؟

27. (I) ما أقصى قدرة تستهلك في مسجل CD محمول يتحمل جهد 3.0-V ويسحب تيارا شدته القصوى 320 mA؟

28. (I) ما أقصى فولتية يمكن أن تؤثر بين طرفي مقاوم 2.7-kΩ يتحمل قدرة $\frac{1}{4}$ watt؟

29. (I) (أ) حدد المقاومة والتيار خلال مصباح كهربائي قدرته 75-W يتصل مع مصدر جهد مناسب قيمته 120 V. (ب) أعد ذلك بالنسبة إلى مصباح قدرته 440-W.

30. (II) مدفأة حوض سمك، قدرتها 110 W وتتحمل فرق جهد 115-V. احسب التيار الذي يمر خلال المدفأة عندما تعمل. (ب) احسب مقاومتها.

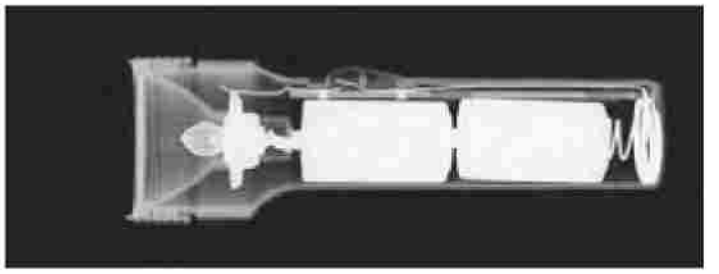
31. (II) 120-V A مجفف شعر ذو قدرتين 850 W و 1250 W. (أ) عند أي قدرة تتوقع أن تكون المقاومة أكبر. (ب)حدد المقاومة عند كل من القدرة المنخفضة والمرتفعة.

32. (II) اشتريت مصباحاً كهربائياً قدرته 75-W من دولة أوروبيّة، حيث تكون الكهرباء المنزلية 240 V. إذا استعملت هذا المصباح الكهربائي في الولايات المتحدة عند 120 V، (افترض عدم تغيّر مقاومته) كيف تكون إضاءته بالنسبة إلى المصابيح التي قدرتها 75-W وتعمل على فرق جهد 120-V؟ [تلميح : افترض أن شدة الإضاءة تتناسب تقريبا مع القدرة المستهلكة].

33. (II) كم kWh من الطاقة تستهلك أداة تحميص قدرتها 550-W عند استعمالها في الصباح إذا تم تشغيلها ما مجموعه 15 دقيقة؟ بسعر 9.0 cents/kWh قدر الزيادة على فاتورة الطاقة الكهربائية الشهرية، إذا قمت بتحميص الخبز في الصباح خلال أربعة أيام في الأسبوع.

34. مصباح قدرته 25-W مضاء في شرفة البيت ليلا ونهارا لمدة عام؟

35. (II) يستعمل مصباح الجيب العادي خليتين لبطاريتين فرق الجهد بين طرفي كل منهما 1.5-V وموصولتين على التوالي كما في الشكل 18 - 4ب (الشكل 18 - 36). يسحب فتيل المصباح تياراً شدته 450 mA عندما يضيء. (أ) احسب مقاومة فتيل المصباح والقدرة المستنفذة. (ب) بأي معامل يجب أن تزداد القدرة إذا استعملت 4 خلايا موصولة على التوالي مع الفتيل نفسه؟ (أهمل تأثير تسخين الفتيل) لماذا يجب عليك عدم محاولة القيام بذلك؟



الشكل **18-36**: المسألة 35

36. (II) ما الكمية الكلية للطاقة التي تختزن في بطارية سيارة من نوع 12-V 85-A·h؟ وما فرق الجهد بين طرفيها عندما تشحن تماماً؟

37. (II) كم عدد المصابيح الكهربائية التي قدرة كل منها 100-W التي يمكن وصلها مع مصدر 120 V كما في الشكل 18-20 دون أن تتسبب باحتراق صمام أمان يتحمل تياراً شدته 15-A؟

38. (II) حبل توصيل مصنوع من سلكين قطره 0.129 cm (سلك نحاس رقمه 16) وطوله 2.7 m (9 أقدام) موصول مع سخان كهربائي يسحب تياراً شدته 15.0 A من مصدر 120-V. كم القدرة التي تستنفذ في هذا الحبل؟

39. (II) تقدم محطة للطاقة قدرة تساوي 620 kW عند 12,000 V لمصنع من خلال أسلاك مقاومتها 3.0 Ω. بكم تكون القدرة المفقود أقل إذا زُوِّدَ المصنع بالكهرباء بجهد 50,000 V بدلا من 12,000 V؟

40. (III) التيار الكهربائي الذي يمر في مغناطيس كهربائي من مصدر جهد 240-V يساوي 17.5 A. عند أي معدل يجب أن يمر ماء التبريد على الملفات بحيث لا ترتفع درجة حرارته أكثر من 7.50 C°؟

41. (III)يمكن أن يستعمل سخان صغير في السيارة لتسخين كأس ماء لإعداد فنجان من القهوة أو الشاي. إذا كان باستطاعة السخان تسخين 120 mL من الماء من 25°C إلى 95°C في 8.0 دقائق. (أ) فكم شدة التيار الذي يسحبه تقريبا من بطارية 12-V السيارة؟ (ب) فما هي مقاومته؟ افترض أن الصانع يدعي أن كفاءته تصل إلى 60%.

7-18 التيار المتردد.

42. (I) احسب تيار الذروة في مقاوم 2.2-kΩ. موصول مع مصدر جهد متردد 220-V rms.

43. (I) فولتية تيار متردد (ac)، قيمة ذروته تساوي 180 V،موصولة بين طرفي مقاوم قيمته 330-Ω. ما قيم rms والذروة للتيار في المقاوم؟

44. (II) قدر المقاومة للدارات الكهربائية التي في منزلك والتي تعمل على جهد 120-V_{rms}، كما تراها شركة الطاقة عندما: (أ) يكون كل شي كهربائي غير موصول كهربائياً.(ب) يكون هناك فقط مصباح كهربائي قدرته 75-W وفتيله محروقا؟

45. (II) قيمة الذروة لتيار متردد في جهاز قدرته 1500-W تساوي 5.4 A ما فولتية rms بين طرفيه؟

46. (II) جهاز لحام قدرته 1800-W موصول مع مصدر متردد 660-V_{rms}. احسب: (أ) فولتية الذروة. (ب) تيار الذروة .

47. (II)(أ) ما القدرة اللحظية القصوى المستنفذة في مضخة قدرتها 3.0-hp موصولة مع مصدر قدرة متردد يساوي 240-V_{rms}؟ (ب) ما أقصى شدة للتيار الذي يمر في المضخة؟

48. (II) سخان كهربائي مقاومة ملفه 34 Ω موصول مع مصدر جهد متردد قيمته 240-V_{rms} (أ) ما متوسط القدرة المستعملة؟ (ب) ما أقصى قيمة وأقل قيمه للقدرة اللحظية؟

* 8-18 التيار الكهربائي من وجهة نظر دون مجهرية .

* **49.** (II) سلك نحاس قطره 0.65-mm يمر فيه تيار شدته 2.3 μA. ما السرعة الانسياقية للإلكترون في السلك؟

* **50.** (II) سلك طوله 5.80-m وقطره 2.0-mm يمر فيه تيار شدته 750-mA عندما يؤثر فرق جهد 22.0 mV بين طرفية. إذا كانت السرعة الانسياقية 1.7×10^{-5} m/s، فحدد: (أ) مقاومة السلك. (ب) مقاومية السلك. (ج) عدد الإلكترونات الحرة لكل وحدة حجم.

* **51.** (III) عند نقطة عالية في الغلاف الجوي للأرض، تتحرك أيونات He^{2+} بتركيز $2.8 \times 10^{12}/m^3$ نحو الشمال بسرعة 2.0×10^6 m/s . وكذلك تتحرك أيونات O_2^- بتركيز $7.0 \times 10^{11}/m^3$ نحو الجنوب بسرعة 7.2×10^6 m/s. حدد مقدار التيار الكلي الذي يمر في وحدة مساحة (A/m^2) واتجاهه.

* 10-18 توصيل الكهرباء في العصب

* **52.** (I) ما مقدار المجال الكهربائي عبر غشاء محور الخلية العصبية التي سمكها 1.0×10^{-8} m إذا كان جهد السكون يساوي 70 mV−؟

* **53.** (II) تحفز خلية عصبية بوساطة نبذبة كهربائية ويكشف عن جهد الفعل عند نقطة تبعد 3.40 cm إلى أسفل محور الخلية بعد مرور 0.0052 s. عندما يكشف عن جهد الفعل عند نقطة تبعد 7.20 cm من نقطة التحفيز نحتاج إلى 0.0063 s. ما سرعة النبذبة الكهربائية على طول محور الخلية؟ (لماذا نحتاج إلى قياسين بدلا من قياس واحد)؟

* **54.** (III) قدر الطاقة المطلوبة لنقل جهد فعل واحد على طول محور الخلية التي في المثال 18-15 (تلميح: الطاقة اللازمة لنقل نبذبة واحدة تعادل الطاقة المختزنة في مكثف محور الخلية المشحونة، انظر البند 9-17). ما الحد الأدنى لمتوسط القدرة التي تحتاج إليها 10^4 خلية عصبية يبعث كل منها 100 نبذبة في الثانية؟

* **55.** (III) خلال جهد الفعل، تتحرك أيونات Na^+ داخل الخلية بمعدل حوالي 3×10^{-7} mol/m²·s. ما القدرة التي يجب أن ينتجها نظام مضخة Na^+ فاعل حتى يحدث هذا التدفق عكس فرق جهد 30-mV+؟ افترض أن طول محور الخلية 10 cm وقطره 20 μm.

مسائـــل عامة

56. كم كولومًا يُوجد في 1.00 أمبير – ساعة؟
57. ما متوسط التيار الذي يسحبه ماتور قدرته 1.0-hp وفرق الجهد بين طرفيه 120-V؟ (1 hp = 746 W)
58. ترك شخص مصابيح سيارته مضاءةً دون قصد. إذا استعمل في كلٍّ مصباحٍ من الضوئين الأماميين فتيلًا قدرته 40 W وفي كل مصباح من المصباحين الخلفيين فتيل قدرته 6 W، أي ما مجموعه 92 W. كم تدوم بطارية جديدة فرق الجهد بين طرفيها 12-V والبطارية من نوع 95 A·h؟ افترض أن فرق الجهد 12 V يظهر بين طرفي كل مصباح.
59. طول عنصر التسخين في سخان قدرته 1500-W وفولتيته 110-V يساوي 5.4 m. إذا صنع عنصر التسخين هذا من الحديد، فكم يجب أن يكون قطره؟
60. تعرف الموصلية G لجسم ما على أنها مقلوب المقاومة R؛ أي أن $G = 1/R$. وحدة قياس الموصلية هي $mho\ (= \text{ohm}^{-1})$ والتي تعرف أيضا سمنز (S). ما موصلية (بوحدة سمنز) جسم ما يسحب تياراً شدته 730 mA عند 3.0 V؟
61. تحتاج مدينة صغيرة إلى قدرة تصل إلى 10 MW. افترض أنه بدلا من تزويدها بالقدرة من خلال خطوط الجهد العالي، تم تزويدها بالقدرة عند جهد 120 V. افترض خطًّا مكونًا من سلكين، قطر سلك النحاس 0.50-cm. قدّر تكلفة الطاقة التي تتحول إلى حرارة في كل ساعة لكل متر. افترض تكلفة الكهرباء هي حوالي 10 سنتات لكل kWh.
62. (أ) يستعمل منزل معين سخّانًا قدرته 1.8-kW لمدة 3.0 h كل يوم، وأربعة مصابيح قدرة كل منها 100-W لمدة 6.0 h يوميا، وفرنا كهربائيا قدرته 3.0-kW لما مجموعه 1.4 h يوميًّا، وأجهزة متفرقة بقدرة تقارب 2.0 kW يوميا. إذا كانت تكلفة الكهرباء $0.105 لكل kWh، فما قيمة فاتورة الطاقة الشهرية (30 يوما) لهذا المنزل؟ (ب) كم كمية الفحم (التي تنتج 7000 kcal/kg) التي يجب أن تحرق بوساطة محطة توليد طاقة فاعليتها 35% لتزويد هذا المنزل بحاجته السنوية من الطاقة؟
63. قطع سلك إلى نصفين ثم لُفّا مع بعضهما جنبا إلى جنب ليشكلا سلكاً أثخن. كم تكون مقاومة هذه المجموعة الجديدة مقارنة مع السلك الأصلي؟
64. صُمم مجفف شعر قدرته 1200-W لفرق جهد 117 V. (أ) ماذا تكون النسبة المئوية للتغير في القدرة الناتجة إذا هبط الجهد إلى 105 V؟ افترض عدم تغير المقاومة. (ب) كيف يؤثر التغير الحقيقي في المقاومية مع درجة الحرارة في إجابتك؟
65. يجب أن تكون أسلاك التوصيل المنزلية ثخينة بشكل كاف بحيث لا تصبح ساخنة وتشكل بداية حريق. ما القطر الذي يجب أن يكون لسلك نحاس كي يحمل تيارًا شدته القصوى 35 A و لاتنتج منه حرارة أكثر من 1.8 W لكل متر من طوله.
66. افرض أنّ تيارًا يُعطى بالمعادلة $I = 1.80 \sin 210t$، حيث I يقاس بالأمبير و t بالثواني. (أ) ماقيمة التردد؟ (ب) ما قيمة rms للتيار؟ (ج) إذا كان هذا التيار يمر في مقاوم 42.0-Ω، فاكتب المعادلة التي تصف الفولتية كدالة في الزمن.
67. فرن ميكروويف يعمل بفاعلية 65%، ويزود داخله بطاقة 950 W في كل ثانية. جد: (أ) الطاقة التي تسحب من المصدر. (ب) التيار المسحوب. افترض أن جهد المصدر 120 V.
68. سُحب سلك مقاومته 1.00-Ω بانتظام حتى أصبح طوله ثلاثةُ أضعاف طوله الأصلي . كم مقاومته بعد السحب؟
69. وصل فرق جهد 220 V إلى موصلين مختلفين مصنوعين من المادة نفسها. أحد الموصلين أطول بمرتين، وقطره أكبر بمرتين من الآخر كذلك. ما نسبة القدرة المتحولة في الموصل الأول بالنسبة إلى الموصل الثاني؟
70. تستعمل مدفأة كهربائية في تدفئة غرفة حجمها 62 m^3. يدخل الهواء إلى الغرفة بدرجة حرارة 5°C ويستبدل تمامًا مرّتين كلّ ساعة. تتسرب الحرارة خلال الجدران بكمية تساوي 850 kcal/h تقريبًا. حتى تبقى درجة حرارة الهواء داخل الغرفة 20°C، ما أقل قدرة يجب أن تكون للمدفأة (الحرارة النوعية للهواء حوالي $0.17\ \text{kcal/kg}\cdot\text{C}^\circ$).
71. وصل فرن قدرته 2200-W مع مصدر جهد 240-V. (أ) ما مقاومة الفرن؟ (ب) كم الزمن الذي يستغرقه حتى يرفع حرارة 120 mL من الماء من 15°C إلى 100°C على فرض أنّ فاعليته 75%؟ (ج) كم تكلفة ذلك على فرض 11 cents/kWh؟
72. تستعمل سيارة كهربائية بطاريات التخزين على أنّها مصدر للطاقة. كتلة السيارة 1560 kg وتغذى بوساطة 24 بطاريّةً كلٌّ منها 12 V, 95 A·h. افترض أنّ السيارة تسير على طرق مستوية بمتوسط سرعة 45 km/h وبمتوسط قوة احتكاك 240 N. افترض فاعلية مقدارها 100% وأهمل الطاقة المستعملة للتسارع. لا يستهلك أي مقدار من الطاقة عندما تقف السيارة لأنّ المحرك ليس بحاجة إلى أن يدور. (أ) حدد القدرة المطلوبة بوحدة hp. (ب) بعد كم كيلومترا تقريبا يجب إعادة شحن البطاريات؟
73. مقاوم 12.5-Ω مصنوع من ملف سلك نحاس كتلته الكلية 18.0 g. ما قطر هذا السلك و طوله؟
74. مصباح كهربائي 100-W , 120-V مقاومته 12 Ω عندما يكون باردًا (20°C) و 140 Ω عندما يكون ساخناً. احسب استهلاكه للطاقة: (أ) عند اللحظة التي يضيء فيها. (ب) بعد لحظات قليلة عندما يسخن.
75. * صُمّم مسارع تيفترون في مختبر فيرمي (إلينوي) ليحمل تيارًا 11-mA ناتجًا من حزمة بروتونات تسير بشكل قريب جدًّا من سرعة الضوء $(3.0 \times 10^8\ \text{m/s})$ حول حلقة محيطها 6300 m. كم عدد البروتونات التي تشكل هذه الحزمة؟
76. يسحب مكيف هواء تياراً شدته 12 A من مصدر متردد 220-V. حبل التوصيل سلك نحاس قطره 1.628 mm. (أ) ما كمية الطاقة التي يسحبها المكيف؟ (ب) إذا كان الطول الكلي للسلك 15 m، فكم كمية الطاقة التي تستنفذ في أسلاك التوصيل؟ (ج) إذا استعملنا سلكًا آخر رقمه 12 وقطره 2.053 mm بدلا منه، فكم كمية الطاقة التي يجب أن تستنفذ؟ (د) افترض أنّ مكيف الهواء يعمل لمدة 12 h كل يوم، فكم المبلغ الذي يتم توفيره شهريًا (30يوما) باستعمال سلك رقمه 12؟ افترض أنّ تكلفة الكهرباء 12 سنتًا لكلّ kWh.

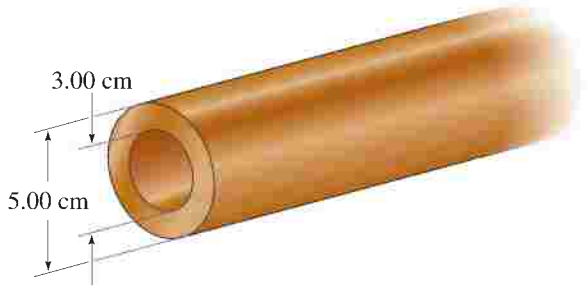
77. مدفأة حوض سمك قدرتها 95 W عند توصيلها مع مصدر جهد 120 V. عنصر التسخين في المدفأة عبارة عن ملف من سلك نيكروم. عندما لا يكون السلك ملفوفًا، يكون طوله الكلي 3.8 m. ما قطر هذا السلك؟

78. يتغير نظام الجهد في سيارة من حوالي 12 V عندما لا تشتغل إلى 13.8 V عند اشتغالها وعمل نظام الشحن، وهذا يشكل فارقًا مقداره 15%. ما النسبة المئوية التي تتغير فيها القدرة التي تزود الضوئين الأماميين عندما يتغير الجهد من 12 V إلى 13.8 V؟ افترض أن مقاومة فتيل المصباح الأمامي تبقى ثابته.

79. مصباح كهربائي A قدرته 40 W، ويتحمل جهد 120 V يستعمل منزليًّا. ومصباح كهربائي آخر B قدرته 40 W، ويتحمل جهد 12 V يستعمل في السيارات.(أ) كم التيار الذي يمرّ خلال كلّ مصباح؟ (ب) ما مقاومة كل مصباح؟ (ج) ما الشحنة التي تمرّ في كلّ مصباح في ساعة واحدة؟ (د) كم كمية الطاقة التي يستعملها كلّ مصباح في ساعة واحدة؟ (ه) أي من المصباحين يجب أن يكون قطر أسلاكه أكبر حتى يتمّ توصيله مع مصدر قدرته.

80. سلك نحاس قطره 0.259 cm يستعمل لتوصيل مجموعة من الأجهزة الكهربائية المنزلية إلى مصدر جهد 120 V، بحيث تكون القدرة الكلية التي تسحبها 2250 W. (أ) ما القدرة التي تستنفذ في 25.0 m من هذا السلك؟ (ب) ما إجابتك إذا استعمل سلك قطره 0.412 cm؟

81. أنبوب من النحاس، قطره الداخلي 3.00 cm وقطره الخارجي 5.00 cm (الشكل 18-37). ما مقاومة 10.0 m من هذا الأنبوب؟



الشكل **18-37**: المسألة 81

82. سحب سلك مقاومته R بانتظام بحيث أصبح طوله ضعف الطول الأصلي، بأيّ عامل تتغير القدرة المستنفذة في السلك، على فرض أنّه بقي موصولًا مع مصدر الجهد نفسه؟

* 83. يستعمل فتيل تنجستن في مصباح جيب يعمل عند جهد 3.2 V وتيار 0.20 A. إذا كانت مقاومته عند درجة حرارة 20°C تساوي 1.5 Ω. فما درجة حرارة الفتيل عندما يشتغل المصباح؟

إجابات التمارين

أ: 1.6×10^{-13} A

ب: 240 Ω

ج: 110 m

د: 370,000 kg أو حوالي 5000 شخص

هـ: 1800 W عند جهد 120 V يسحب تيارًا شدته 15-A. الأسلاك التي في حبل التوصيل تتحمل تيارًا شدته 11 A، لذا من الممكن أن تصبح ساخنة بشكل كاف بحيث تصهر العازل وتسبّب حريقًا.

و: 20 V, 5.0 A