وزارة التربيـــة والتعليـــم والتعليـــم العالـــي
Ministry of Education and Higher Education
State of Qatar • دولـــة قطـــر

الفيزياء

كتاب الطالب

المستوى الحادي عشر

PHYSICS
STUDENT BOOK

GRADE 11

الفصل الدراسي الثاني
SECOND SEMESTER

طبعة - (2025-1447)

وزارة التربيـــة والتعليـــم والتعليـــم العالـــي
Ministry of Education and Higher Education
State of Qatar • دولـــة قطـــر

© وزارة التربية والتعليم والتعليم العالي في دولة قطر

يخضـع هـذا الكتـاب لقانـون حقـوق الطباعـة والنشـر، ويخضـع للاسـتثناء التشـريعي المسـموح بـه قانونًـا ولأحـكام التراخيـص ذات الصلـة.

لا يجـوز نسـخ أي جـزء مـن هـذا الكتـاب مـن دون الحصـول علـى الإذن المكتـوب مـن وزارة التربيـة والتعليـم والتعليـم العالـي فـي دولـة قطـر.

تمّ إعداد الكتاب بالتّعاون مع شركة تكنولاب.

التأليـف: فريـق مـن الخبـراء بقيـادة الدكتـور تـوم سـو وبالتّعـاون مـع شـركة باسـكو العلميّـة.

التّرجمة: مطبعة جامعة كامبريدج.

النشيد الوطني

قَسَمًا بِمَنْ رَفَعَ السَّمَاءْ ... قَسَمًا بِمَنْ نَشَرَ الضِّيَاءْ
قَطَرٌ سَتَبْقَى حُرَّةً ... تَسْمُو بِرُوحِ الأَوْفِيَاءْ
سِيرُوا عَلَى نَهْجِ الأُلَى ... وَعَلَى ضِيَاءِ الأَنْبِيَاءْ
قَطَرٌ بِقَلْبِي سِيرَةٌ ... عِزٌّ وَأَمْجَادُ الإِبَاءْ
قَطَرُ الرِّجَالِ الأَوَّلِينْ ... حُمَاتُنَا يَوْمَ النِّدَاءْ
وَحَمَائِمُ يَوْمَ السَّلاَمْ ... جَوَارِحُ يَوْمَ الفِدَاءْ

وزارة التربيـــة والتعليـــم والتعليـــم العالـــي
Ministry of Education and Higher Education
State of Qatar • دولـــة قطـــر

المراجعة والتّدقيق العلميّ والتّربويّ

إدارة المناهج الدّراسيّة ومصادر التّعلّم

إدارة التقييم

إدارة التوجيه التربوي

خبرات تربويّة وأكاديميّة من المدارس

الإشراف العلميّ والتربويّ

إدارة المناهج الدّراسيّة ومصادر التّعلّم

يعدّ كتاب الطّالب مصدرًا مثيرًا لاهتمام الطّلّاب من ضمن سلسلة كتب العلوم لدولة قطر، فهو يستهدف جميع المعارف والمهارات الّتي يحتاجون إليها للنّجاح في تنمية المهارات الحياتيّة وبعض المهارات في الموادّ الأخرى.

وبما أنّنا نهدف إلى أن يكون طلّابنا مميّزين، نودّ منهم أن يتّسموا بما يأتي:

- البراعة في العمل ضمن فريق.
- امتلاك الفضول العلميّ عن العالم من حولهم، والقدرة على البحث عن المعلومات وتوثيق مصادرها.
- القدرة على التّفكير بشكلٍ ناقدٍ وبنّاء.
- الثّقة بقدرتهم على اتّباع طريقة الاستقصاء العلميّ، عبر جمع البيانات وتحليلها، وكتابة التّقارير، وإنتاج الرّسوم البيانيّة، واستخلاص الاستنتاجات، ومناقشة مراجعات الزّملاء.
- الوضوح في تواصلهم مع الآخرين لعرض نتائجهم وأفكارهم.
- التّمرّس على التّفكير الإبداعيّ.
- التّمسّك باحترام المبادئ الأخلاقيّة والقيم الإنسانيّة.

يتجسّد في المنهج الجديد العديد من التّوجّهات مثل:

- تطوير المنهج لجميع المستويات الدّراسيّة بطريقة متكاملة، وذلك لتشكيل مجموعة شاملة من المفاهيم العلميّة الّتي تتوافق مع أعمار الطّلاب، والّتي تسهم في إظهار تقدّمهم بوضوح.
- مواءمة محتوى المصادر الدّراسيّة لتتوافق مع الإطار العامّ للمنهج الوطنيّ القطريّ بغية ضمان حصول الطّلّاب على المعارف والمهارات العلميّة وتطوير المواقف (وهو ما يُعرف بالكفايات) ممّا يجعل أداء الطّلاب يصل إلى الحدّ الأقصى.
- الانطلاق من نقطة محوريّة جديدة قوامها مهارات الاستقصاء العلميّ، ما أسّس للتّنوّع في الأنشطة والمشاريع في كتاب الطّالب.

- تـوزّع المعرفـة والأفـكار العلميّـة المخصّصـة لـكلّ عـام دراسـيٍّ ضمـن وحـدات بطريقـة متسلسـلة مصمّمـة لتحقيـق التّنـوّع والتّطـوّر.
- تعـدّد الـدّروس فـي كلّ وحـدة، بحيـث يعالـج كلّ درس موضوعًـا جديـدًا، منطلقًـا ممّـا تـمّ اكتسـابه فـي الـدّروس السّـابقة.
- إتاحـة الفرصـة للطّـلّاب، فـي كلِّ درسٍ، للتّحقّـق الذّاتـيّ مـن معارفهـم ولممارسـة قدرتهـم علـى حـلّ المشـكلات.
- احتـواء كلّ وحـدة علـى تقويـم للـدّرس وتقويـم الوحـدة الّتـي تمكّـن الطّـلّاب والأهـل والمدرّسـين مـن تتبّـع التّعلّـم والأداء.

العلـوم مجموعـة مـن المعـارف الّتـي تشـمل الحقائـق والأشـكال والنّظريّـات والأفـكار. ولكـنَّ العالِـم الجيّـد يفهـم أنّ «طريقـة العمـل» فـي العلـوم أكثـر أهمّيّـة مـن المعرفـة الّتـي تحتويهـا.

سـوف يسـاعد هـذا الكتـاب الطُّـلّاب علـى تقديـر جميـع هـذه الأبعـاد واعتمادهـا ليصبحـوا علماء ناجحيـن وليواجهـوا مجموعـة واسـعة مـن التّحدّيـات فـي حياتهـم المهنيّة المسـتقبليّة.

مفتاح كفايات الإطار العام للمنهج التّعليمي الوطني لدولة قطر

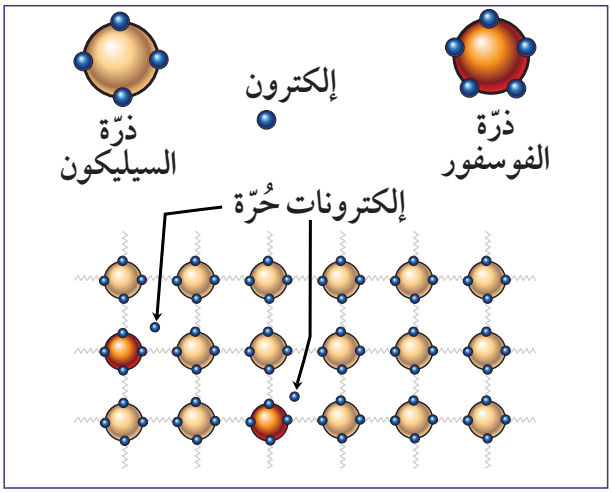
- الاستقصاء والبحث
- التّعاون والمشاركة
- التّواصل
- التّفكير الإبداعيّ والناقد
- حلّ المشكلات
- الكفاية العددية
- الكفاية اللغويّة

الفيزياء

ماذا ستتعلّم من هذا الكتاب

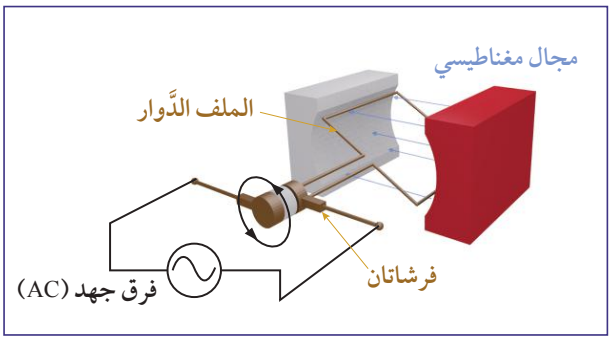
لو تأملت الناس من حولك لوجدت بأن معظمهم لديه هاتفًا جوالاً، لكن كم منهم يعرف كيفية عمل الهاتف الجوال؟ يتناول هذا الكتاب المبادئ الأساسية لمختلف تقنيات الإلكترونيات والموجات، كالتي يعتمد عليها عمل الهواتف الجوالة وأجهزة الراديو والأجهزة البصرية..

تعلّمتَ من قَبْل المبادئ الأساسية للدوائر الكهربائية. تتوسّع الوحدة الرابعة في تلك المبادئ لتشمل دوائر المُكثِّفات وأشباه المُوصلات. تُخزِّن المُكثِّفات الشحنة الكهربائية، وتزوِّدنا بتيارات كهربائية تعتمد قيَمَها على الزمن. وخلافًا لحالة السلك الموصل على الدوام، فإن شبه الموصل يمكن أن يتحوّل من موصل إلى عازل خلال 10^{-9}s فقط. أي جهاز حاسوب حديث قد يحتوي على مليار مفتاح صغير من أشباه الموصلات.



تستخدم أشباه الموصلات خصائص مواد كالسيليكون والفوسفور.

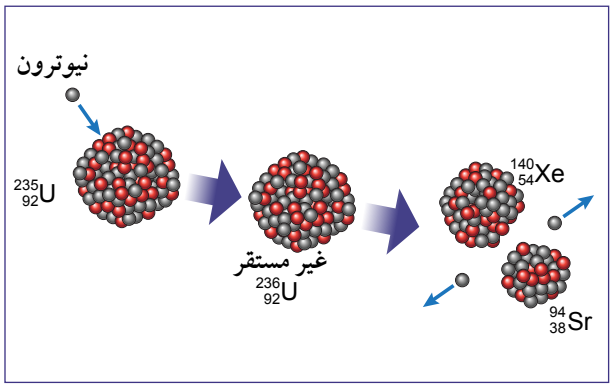
تقدِّم الوحدة الخامسة مبادئ كهرباء التيّار المُتردِّد AC والحثّ الكهرومغناطيسي. ويربط التماثل اللافت في الفيزياء بين المجالين الكهربائي والمغناطيسي، ويشكّل أساس الأجهزة الفعّالة كالمولِّدات الكهربائية.



مبدأ عمل المُولِّد الكهربائي.

الوحدة السادسة تتناول الموجات. تنقل الموجات الطاقة والمعلومات في الطبيعة وفي كافة التقنيات التي يستخدمها الإنسان. فالموجة نفسها التي تسخّن طعامك في فرن الميكروويف تنقل أيضا المحادثات في أجهزة الهواتف الجوالة.

تتناول الوحدة الأخيرة من الفصل الدراسي الثاني الذرات وأنويتها. فالذرة تحتوي في داخلها على طاقة كامنة داخل نواة لا يزيد قطرها عن 10^{-15}m. سيتم شرح النشاط الإشعاعي والتقنيات الفعّالة لكل من الإنشطار والإندماج النوويين.



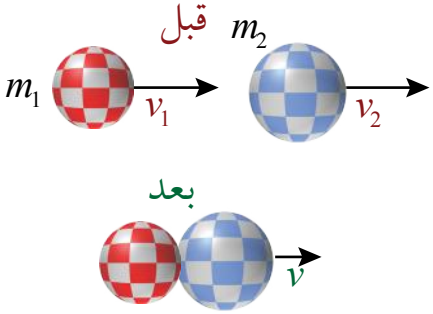
الإنشطار نووي.

بعض أقسام هذا الكتاب

الرّسوم التّوضيحيّة

مفاهيم مهمّة وبيانات وأمثلة لكل فكرة جديدة معروضة من خلال الإيضاحات المفصّلة والشّروحات

تصادم غير مرن تمامًا



أسئلة للمناقشة

سؤال للمناقشة

فكّر في موقف اضطررت فيه إلى إغماض عينيك بسبب وهج الضوء غير المريح

أسئلة المناقشة تزوّد الطلاب بفرصة مناقشة المفاهيم والمعلومات الجديدة.

شريط الأفكار المهمّة

تنتشر جميع الموجات الكهرومغناطيسية بسرعة الضوء.

تحديد وتذكّر النّقاط الرّئيسة.

العلاقات والمعادلات

1-7	العدد الكُتَلي		
◀	$A = Z + N$	A	العدد الكُتَلي (عدد النيوكليونات)
		Z	العدد الذرّي (عدد البروتونات)
		N	عدد النيوترونات

مثلّت علاقات الكمّيّات الفيزيائيّة من خلال المتغيّرات ووحدات قياسها بشكل واضح.

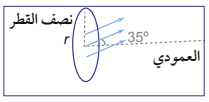
الأمثلة

مثال 4

ملفّ دائري مستوٍ فيه $N = 10$ لفات مصنوع من سلك موصِّل يبلغ نصف قطره 15 cm، يقع تحت تأثير مجال مغناطيسي منتظم. الزاوية بين المجال المغناطيسي والعمودي على الملفّ هي 35°. إذا ازدادت شدة المجال المغناطيسي من 2T إلى 7T خلال 15 s:

a. احسب قيمة القوة الدافعة الكهربائية الحثّية حول الملفّ.

b. ما اتجاه التيّار الحثّي؟



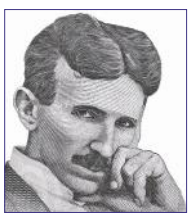
تُظهر الأمثلة جميع خطوات الحلّ والتّبرير للحصول على حسابات صحيحة.

العلم والعلماء

الدرس 3-5: المُحوِّلات الكهربائية

ضوء على العلماء

نيكولا تسلا (1856-1943)



الشكل 5-37 نيكولا تسلا.

ساهم كثير من الناس في التكنولوجيا المبكرة لكهرباء التيار المتردِّد AC. وكان نيكولا تسلا واحدًا من أكثر العلماء شهرة ممن شاركوا في بدايات تلك التكنولوجيا. وُلد تسلا في الإمبراطورية النمساوية (التي تُعرف الآن باسم كرواتيا)؛ ولكنه انتقل فيما بعد إلى الولايات المتحدة.

أثارت عروض الفيزياء التي كان يجريها مُدَرّس تسلا في المدرسة الثانوية فضوله؛ ما ولّد عنده رغبة قوية في معرفة المزيد. ويقال إنه كان يجري حسابات التفاضل والتكامل في رأسه أي من دون

تمّ تطوير معارفنا العلميّة على مدى أكثر من ثلاثة آلاف عام. تُطلعُنا هذه المقالات على إلهام الإنسان وتبصُّرِه في التعامل مع العلم والتكنولوجيا.

الأنشطة

التدرّب العملي من خلال المختبر والمشاريع البحثيّة وغيرها من الأنشطة التي تُرسّخ معاني الأفكار الجديدة وتطوّر العمل المخبري.

نشاط

4-6 توليد الموجات الموقوفة

سؤال الاستقصاء	دراسة وبحث العلاقة بين سرعة الموجة والطول الموجي.
الموادّ المطلوبة	وتر مطاطي (0.5 m)، مولّد إشارة، مولّد اهتزازات، كابلا توصيل، حامل بملاقط

الخطوات

1. اربط مولّد الإشارة بمولّد الاهتزاز مُستخدمًا كابلات التوصيل. قم بتغذية أحد طَرَفي الوتر

تقويم الدّرس

يتميّز كل درس بعرض يحتوي على الأسئلة التي تغطي جميع المفاهيم والمعلومات في هذا الدرس.

تقويم الدرس 7-1

1. أي مما يأتي حجمه أقرب إلى حجم نواة الذرّة؟
   a. بروتون
   b. إلكترون
   c. ذرّة هيدروجين
   d. نظير كربون-12.
2. عنصر تحتوي نواته على 19 بروتونًا و 20 نيوترونًا. كم تبلغ كتلة ذرّة هذا العنصر؟
   a. 6.528×10^{-29}kg

مراجعة الوحدة

ملخّص قصير عند نهاية كل وحدة وهو مرجع سريع للأفكار والمصطلحات الرئيسة.

الوحدة 7
مراجعة الوحدة

الدرس 7-1: الذرّة

- الذرّة هي أصغر جُسيم لعنصر يمكن أن يوجد بشكل منفرد، أو مركّب مع ذرّات أخرى. تتألف الذرّة من نواة ثقيلة مُحاطة بإلكترون واحد أو أكثر.
- الإلكترون واحد من مُكوّنات الذرّة (جُسيم دون ذرّي) له شُحنة سالبة مقدارها -1.602×10^{-19} C، وكتلة مقدارها 9.109×10^{-31} kg.

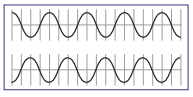
تقويم الوحدة

زوّدت كل وحدة بمجموعة من الأسئلة ذات الاختيار من متعدد كعينة تحضّر الطالب لاختبار نموذجي.

تقويم الوحدة

اختيار من مُتعدّد

1. ما فرق الطور بين الموجتين في الرسم التخطيطي؟
   a. 0°
   b. 90°
   c. 180°
   d. 360°



تقويم الوحدة

أسئلة الاجابة القصيرة وأسئلة ذات الإجابة المطوّلة ذات مستويات ثلاثة من الصعوبة عند نهاية كل وحدة.

تقويم الوحدة

21. استخدم مخطّطًا لإظهار تغيّر فهمنا لتركيب الذرّة على امتداد آلاف السنين الغابرة.
22. في تجربة التشتُّت لرذرفورد، ما سبب عبور معظم جُسيمات ألفا لرقاقة الذهب من دون انحراف؟
23. في تجربة التشتُّت لرذرفورد، ما سبب ارتداد بعض جُسيمات ألفا إلى الوراء؟
24. ما نسبة كتلة كل من الإلكترونات والنواة في ذرّة الكربون إلى كتلة الذرّة الكاملة؟

الوحدة 4

الأجهزة الإلكترونية في دوائر التحكُّم العملية

يخزّن المُكثِّف الشحنة الكهربائية، ويُزَوِّدنا بتيارات كهربائية تعتمد قيمتها على الزمن. الترانزستورات والدايودات من أجهزة أشباه الموصلات التي تُستخدَم لبناء دوائر المنطق.

الوحدة 5

الحثّ الكهرومغناطيسي

يُولِّد المجال المغناطيسي الذي يتغيّر مع الزمن تيارًا حثّيًا في ملف سلكي. تعتمد المولِّدات الكهربائية وسواها من التقنيّات على مبدأ الحث الكهرومغناطيسي.

الوحدة 6

الخصائص المتقدمّة للموجات

الصوت موجة منتقلة من الانضغاطات، والضوء موجة منتقلة من اهتزازات المجالات الكهرومغناطيسية، وكلاهما يشتركان في خصائص الموجات، ومنها التردُّد.

الوحدة 7

الفيزياء الذرّية والنووية الحديثة

يمكن إعادة ترتيب البروتونات والنيوترونات داخل نواة الذرّة للحصول على نواة لذرّة أخرى. قد تحتاج هذه العملية إلى كمّيات هائلة من الطاقة و قد تحررها في تفاعلات الانشطار و الاندماج النووي.

جدول المحتويات

الوحدة 4 الأجهزة الإلكترونية في دوائر التحكُّم العملية 2

الدرس 4-1 المُكثِّفات 4
الدرس 4-2 أشباه الموصلات 19
الدرس 4-3 مُجزِّئ الجهد 28
الدرس 4-4 البوّابات المنطقية 40

الوحدة 5 الحثّ الكهرومغناطيسي 58

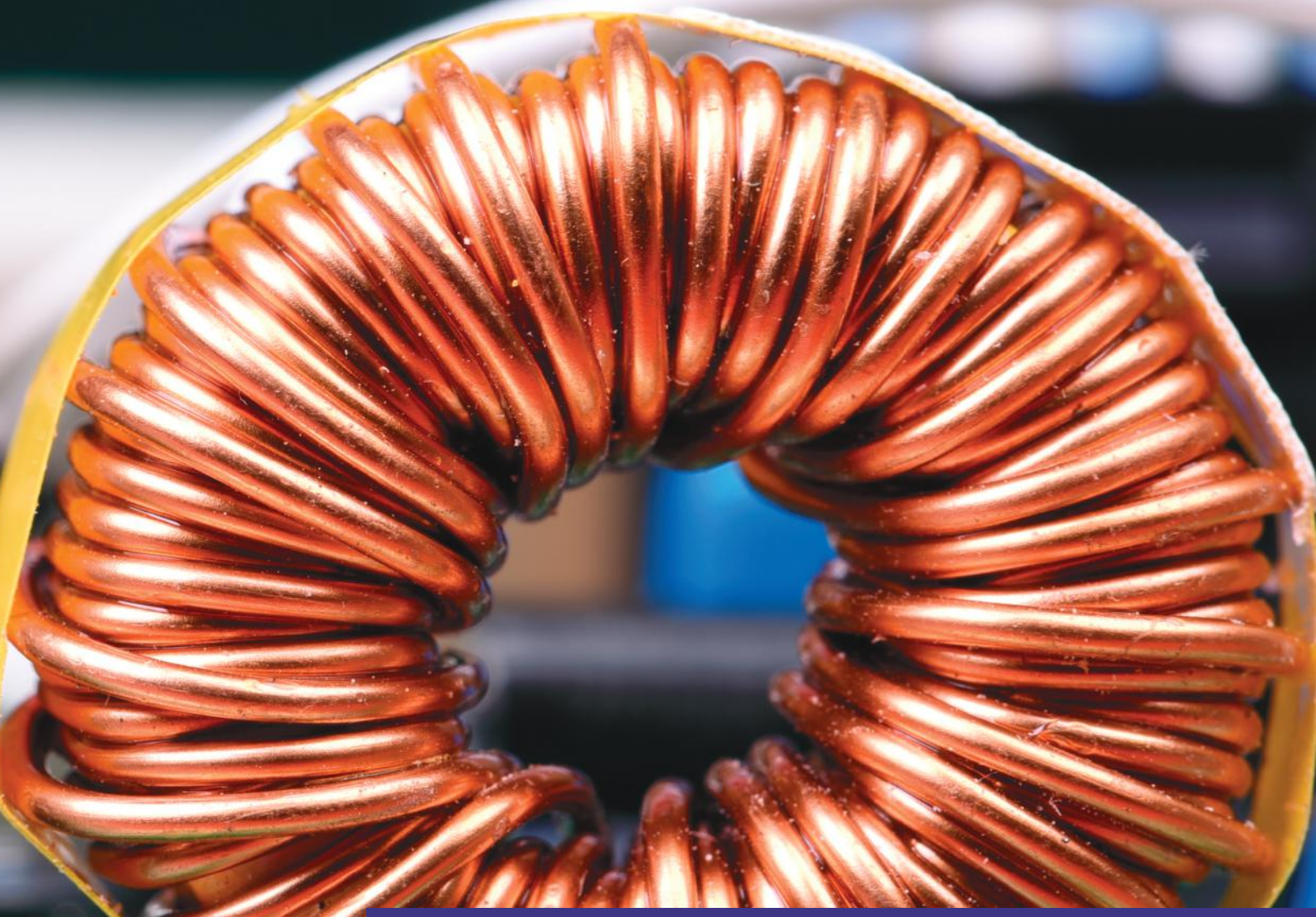
الدرس 5-1 الحثّ الكهرومغناطيسي 60
الدرس 5-2 مولِّدات التيّار المتردِّد (AC) 76
الدرس 5-3 المُحوِّلات الكهربائية 88

الوحدة 6 الخصائص المتقدمّة للموجات 106

الدرس 6-1 خصائص الموجات 108
الدرس 6-2 التداخل في الضوء 118
الدرس 6-3 الأشعة الكهرومغناطيسية 131
الدرس 6-4 الموجات الموقوفة 138

الوحدة 7 الفيزياء الذرّية والنووية الحديثة 166

الدرس 7-1 الذرّة 168
الدرس 7-2 النشاط الإشعاعي 176
الدرس 7-3 عمر النصف 190
الدرس 7-4 التفاعُلات النووية 198



الوحدة 4
الأجهزة الإلكترونية في دوائر التحكُّم العملية

في هذه الوحدة

الدرس 4-1: المُكثِّفات
الدرس 4-2: أشباه الموصلات
الدرس 4-3: مُجزِّئ الجهد
الدرس 4-4: البوّابات المنطقية

P1109
P1110
P1111

الوحدة 4

مقدّمة الوحدة

دائرة التحكُّم هي دماغ إلكتروني يستشعر البيئة المحيطة، ويتم فتح النظام أو غلقه كاستجابة لذلك. تُعدّ دوائر التحكّم جوهر التشغيل الآلي، وتوجد في الكثير من الأدوات والآلات والأجهزة الالكترونية. ولدوائر التحكم دورٌ مهمّ في حفظ الطاقة الكهربائية.

يتغيّر الجهد والتيار الكهربائيّان مع الزمن في دوائر التحكُّم. يعرّفنا الدرس الأوّل بالمكثّفات التي تُخزِّن شحنات كهربائية، ويعالج الدرس الثاني أشباه الموصلات، التي تشمل الترانزستور والدايود وشرائح الكمبيوتر. وبالرغم من وجود أنواع مختلفة من أشباه الموصلات، فإننا سنكتفي بدراسة مادة السيليكون.

ويتناول الدرسان الثالث والرابع المكوِّنات الأساسية لدوائر التحكُّم. يتكوّن مُجزّئ الجهد من مقاومات ويقوم بالعمل الذي يدلّ عليه اسمه. البوابات المنطقية هي دوائر أشباه موصلات تحتوي على العديد من الترانزستورات والمقاومات والمكثّفات. وتقوم باتخاذ قرارات التشغيل الإلكترونية لمُنبِّه عند تحفيز مستشعر النافذة، أو مستشعر الباب.

الأنشطة والتجارب

1-4 دوائر المكثفات

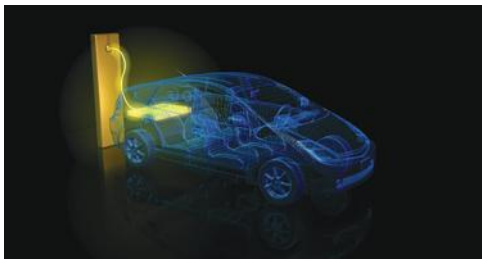
a2-4 دائرة مُجزِّئ الجهد

b2-4 استكشاف دوائر مُجزِّئ الجهد

3-4 الدوائر المنطقية

الدرس 4-1
المُكثِّفات

يتزايد استخدام السيّارات الكهربائية والهجينة يومًا بعد يوم. ويوظِّف العلماء والمهندسون مزيدًا من الوقت والمال لزيادة كفاءتهما وجعلهما صديقتين للبيئة ما أمكن. لمكثفات الألومنيوم الإلكتروليتية ومُكثِّفات الغشاء الرقيق دور أساس في السيّارات الكهربائية والهجينة.



الشكل 4-1 سيّارة كهربائية أثناء شحنها.

تُستَعمل المُكثِّفات في منظم عمل المُحرِّكات، وتقويم التيار AC/DC والشواحن، وكذلك في نظام المكابح التجديدي، حيث يلتقط هذا النظام الطاقة الحركية المفقودة كحرارة، عند انخفاض سرعة السيّارة، ويُحوِّلها إلى كهرباء. يُخزِّن المُكثِّف الطاقة الكهربائية لفترة وجيزة من الزمن، قبل إعادة تدويرها، لزيادة سرعة السيّارة مرّة أخرى. حتى أن بعض السيّارات تستعمل المُكثِّفات الفائقة للحصول على الطاقة المتجدّدة من المكابح.

يقوم العلماء والمهندسون بمحاولات حثيثة، لدمج بطاريات الليثيوم الثقيلة والمُكلِفة مع المُكثِّفات الفائقة.

مخرجات التّعلُّم

P1109.1 يصف كيف تصنع المُكثِّفات ويستقصي خصائصها في الدوائر الكهربائية.

P1109.2 يعرّف سعة المكثف ويحل مسائل حسابية باستخدام المعادلة: $Q = C.V$ ويشتق الصيغة ويستخدمها في حساب الطاقة المختزنة في المُكثِّف: $E = ½QV$.

P1109.3 يستقصي شحن المُكثِّف وتفريغه، ويحل مسائل حسابية باستخدام الثابت الزمني: $\tau = RC$.

P1109.4 يشتق صيغ السعة المكافئة لمكثفات متصلة على التوالي والتوازي، ويستخدمها في حل مسائل حسابية.

المفردات

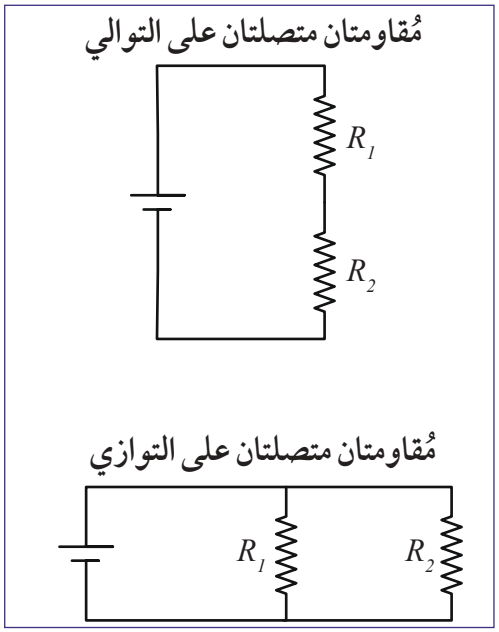
مُكثِّفات	Capacitors
سعة	Capacitance
ثابت زمني	Time constant
حفظ الشحنات	Conservation of charges

مراجعة لما سبق دراسته في الدوائر الكهربائية

1. التيار الكهربائي هو تدفُّق الجُسيمات المشحونة، مثل حركة الإلكترونات داخل الموصلات. وحدة قياس شدة التيار الكهربائي، هي الأمبير(A).
2. يُعزى تدفُّق التيار إلى فرق الجهد، ووحدة قياس فرق الجهد هي الفولت (V). يقاس فرق الجهد بين أي نقطتين في الدائرة الكهربائية.
3. تُحدِّد المُقاوِمات الكهربائية كمّية التيار المُتدفِّق نتيجة لفرق جهدٍ معيَّن. وتسمح المقاومة الكبيرة لتيار صغيرفقط بالمرور. بينما تمرِّر المُقاوِمة الصغيرة تيارًا كبيرًا. وحدة قياس المقاوِمة هي الأوم (Ω).

يمكننا توصيل الدوائر الكهربائية على التوالي، أو على التوازي، كما في **الشكل 4-2**. للدوائر المتصلة على التوالي مسار واحد يتبعه التيار.

تتضمّن الدائرة المتصلة على التوازي مسارات متعددة، يمكن أن يسري فيها التيار الكهربائي.



الشكل 4-2 مقاومات متصلة على التوالي وعلى التوازي.

صيغ مهمّة:

المقاومة الكلية لمقاومات كهربائية متصلة على التوالي

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots$$

المقاومة الكلية لمقاومات كهربائية متصلة على التوازي

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

قانون أوم

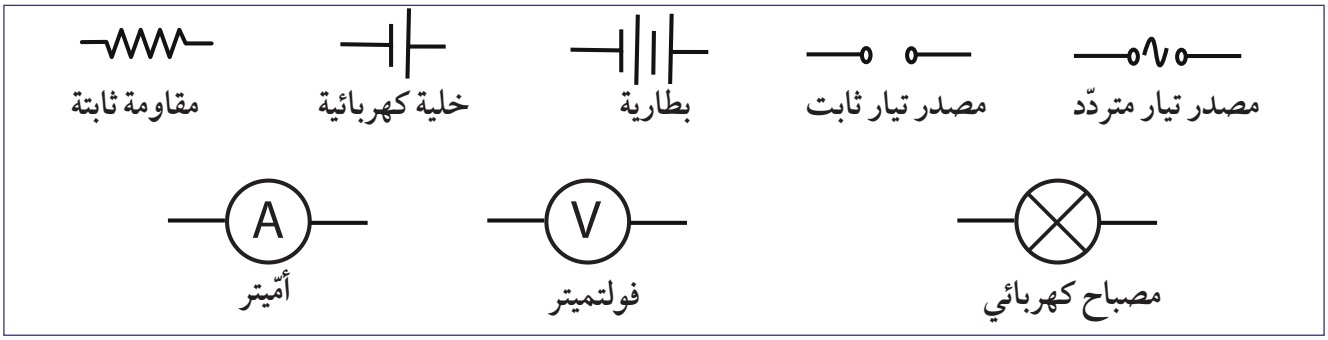
$$V = IR$$

القدرة الكهربائية

$$P = VI$$

الرموز الكهربائية

تُستخدَم رموز المكونات الكهربائية في **الشكل 4-3** إضافة إلى الأسلاك، لإتمام مخططات الدوائر الكهربائية.



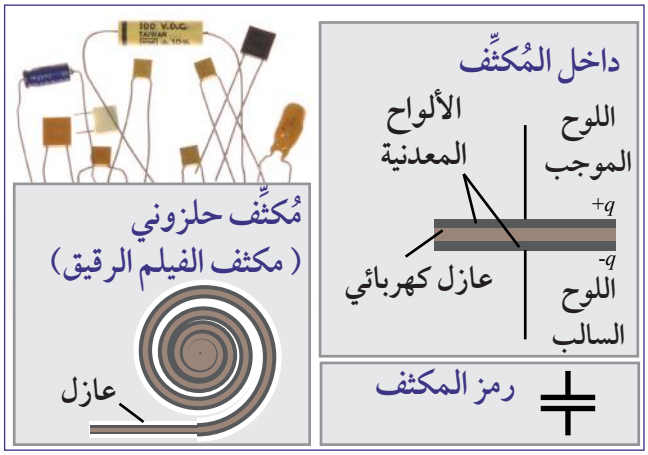
الشكل 4-3 أمثلة على رموز المكونات في الدوائر الكهربائية

المُكثِّف

المُكثِّف Capacitor جهاز يخزّن الشحنات الكهربائية، تُخزّن المُكثِّفات الطاقة الكهربائية، وهي تستعمل في كثير من الأدوات الإلكترونية.

مُكوِّنات المُكثِّف

يتكـــون المُكثِّف من لوحين معدنيَّين موصِلين ومتوازيين، يفصل بينهمـــا عازل كهربـــائي (**الشكل 4-4**).وعـلـى الرغم من أن اللوحين المعدنيَّين متقاربان جدًّا، فإن العازل يمنع أي اتصال كهربائي بينهما. تتنوّع الموادّ التي تكون عوازل كهربائية، فمنها الزجاج والمطّاط والسيراميك والورق، ومواد أخرى. لتخزين شحنة أكبر في حيز أصغر يلجأ المصنِّعون إلى لف الألواح مع العازل بشكل حلزوني لزيادة سعة المكثف.ويرمز للمُكثِّف الكهربائي في الدوائر الكهربائية بخطَّين متوازيين يمثّلان اللوحين المعدنيين المتوازيين للمُكثِّف.

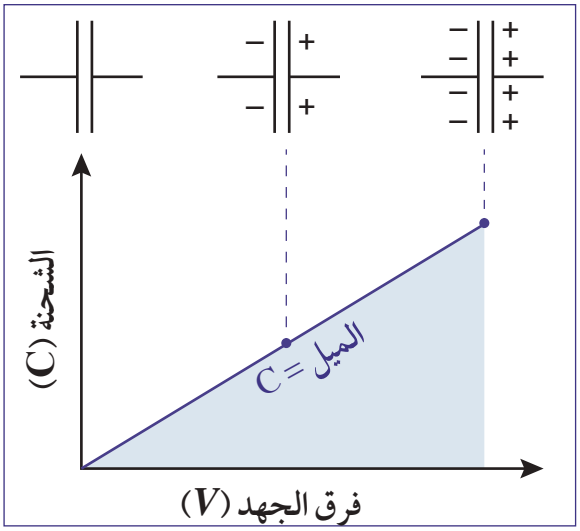


الشكل 4-4 تركيب المكثف الكهربائي و أشكاله.

في بعض الدوائر الكهربائية، يمكننا توصيل المُكثِّف على التوالي مع مقاومة وبطّارية. عند إتمام الدائرة وإغلاق المفتاح الكهربائي، يتم شحن المكثف، حيث تتراكم الشحنات الموجبة على أحد اللوحين، وتتراكم كمية مماثلة من الشحنات السالبة على اللوح الآخر. ينشأ من اختلاف الشحنات على اللوحين فرق جهد كهربائي بين لوحي المكثف. تمثّل المعادلة (4–1) العلاقة بين الشحنة الكهربائية والسعة وفرق الجهد.

1-4	السعة الكهربائية	C	السعة الكهربائية (F)
	$C = \frac{Q}{V}$	Q	الشحنة الكهربائية (C)
		V	فرق الجهد الكهربائي (V)

السعة الكهربائية Capacitance هي نسبة الشحنة الكهربائية المختزنة في مُكثِّف إلى فرق الجهد بين لوحيه. ووحدة قياس السعة، الفاراد (F) نسبة إلى مايكل فاراداي. والفاراد سعة مكثف يمكنه تخزين شحنة مقدارها كولوم واحد عندما يكون فرق الجهد بين لوحيه فولت واحد. تُعد وحدة كولوم واحد كمية كبيرة من الشحنات الكهربائية، وبالتالي فإن فارادًا واحدًا هو أيضًا مقدار كبير من السعة. تتراوح السعة المستخدمة في مجال الإلكترونيات بين بيكوفاراد واحد ($1\text{pF} = 10^{-12}\,\text{F}$) إلى بضع مئات من الميكروفاراد ($1\ \mu\text{F} = 10^{-6}\,\text{F}$).



الشكل 4-5 السعة الكهربائية هي ميل منحنى $Q - V$

مثال 1

وُصل مكثف مع بطارية فرق الجهد بين قطبيها (12 V)، فاختزن شحنة مقدارها (6×10^{-5} C)، احسب سعة هذا المكثف.

المطلوب: $C = ?$

المُعطيات: $V = 12\ \text{V}\ ,\ Q = 6\square10^{-5}\ \text{C}$

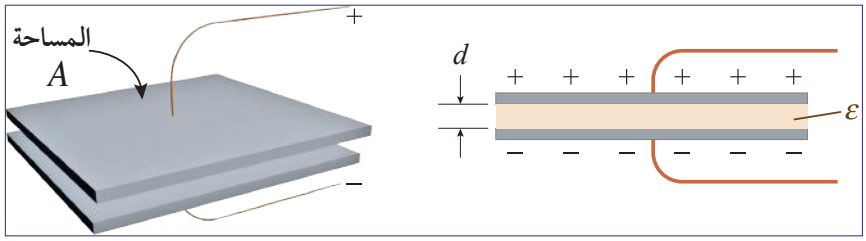
العلاقات: $C = \dfrac{Q}{V}$

الحل: بتطبيق العلاقة:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{6\square10^{-5}}{12} = 5\square10^{-6}\ \text{F}$$

المكثف المتوازي اللوحين

يتكون أبسط أنواع المكثفات من لوحين موصلين ومتوازيين مساحتهما المشتركة A وتفصل بينهما مسافة d كما في **الشكل 4-6**. تُملأ المنطقة بين اللوحين بمادة عازلة سماحيتها الكهربائية ε، وإذا كان الوسط العازل فراغًا تكون سماحيته $\varepsilon_o = 8.85 \times 10^{-12}\ \text{F/m}$.



الشكل 4-6 المكثف المتوازي اللوحين.

2-4 سعة المكثف

$$C = \varepsilon \frac{A}{d}$$

C	السعة الكهربائية (F)
A	المساحة المشتركة للوحين المتوازيين (m^2)
ε	السماحية الكهربائية (F/m)
d	المسافة بين اللوحين (m)

تزداد السعة الكهربائية بازدياد المساحة المشتركة بين اللوحين وتنقص بازدياد المسافة بينهما (المعادلة 2-4). تُملأ المنطقة بين اللوحين، في حالة الأجهزة الالكترونية، بمادة عازلة تكون سماحيتها الكهربائية ε أكبر من سماحية الفراغ ε_o وذلك من أجل زيادة السعة الكهربائية. المواد العازلة المعروفة كالزجاج والبلاستيك لها سماحية تتراوح بين $\varepsilon = (10 - 20) \times 10^{-12}\ \text{F/m}$ بينما سماحية الماء $708 \times 10^{-12}\ \text{F/m}$. يُعرّف ثابت العزل كنسبة سماحية العازل إلى سماحية الفراغ، فتكون السماحية النسبية (ثابت العازلية الكهربائية) للماء:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{708 \times 10^{-12}\ \text{F/m}}{8.85 \times 10^{-12}\ \text{F/m}} = 80$$

مثال 2

احسب السعة الكهربائية لمكثف المساحة المشتركة للوحيه $1\ m^2$ والمسافة بينهما $1\ mm$ حيث العازل هو الفراغ.

المطلوب: $C = ?$

المُعطيات: المساحة المشتركة $A=1\ m^2$ المسافة $d=1\ mm$

العلاقات: $C = \varepsilon_0 \frac{A}{d}$

الحل:

$$C = \varepsilon_0 \frac{A}{d} = \left(8.85\times10^{-12}\ \text{F/m}\right)\left(\frac{1\ \text{m}^2}{0.001\ \text{m}}\right) = \boxed{8.85\times10^{-9}\ \text{F}}$$

مثال 3

احسب المساحة المشتركة للوحي مكثف إذا كانت سعته الكهربائية $10^{-5}\ F$ والمسافة بين لوحيه $0.1\ mm$ وثابت العازلية الكهربائية بين لوحيه $\varepsilon_r = 3.5$.

المطلوب: $A = ?$

المُعطيات: سعته الكهربائية $C=10^{-5}\ F$ ، ثابت العازل الكهربائي $\varepsilon_r = 3.5$ ، المسافة $d=1\ mm$

العلاقات: $C = \varepsilon_0\ \varepsilon_r \frac{A}{d}$

الحل:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d} \quad \rightarrow \quad A = \frac{Cd}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} = \frac{\left(10^{-5}\ \text{F}\right)\left(0.0001\ \text{m}\right)}{\left(8.85\times10^{-12}\ \text{F}\right)\left(3.5\right)} = \boxed{32.3\ \text{m}^2}$$

الطاقة المختزنة في المُكثِّف

أحد لوحي المُكثِّف يُخزِّن شحنات موجبة، بينما يخزّن اللوح الآخر كمية مماثلة من الشحنات السالبة. يؤدي تجمّع شحنة موجبة مقدارها $1\ C$ على أحد لوحي المكثف وأخرى سالبة $-1\ C$ على لوحه الآخر إلى اختزان طاقة في المكثف. تسمى طاقة الوضع المختزنة لكل وحدة شحنات بسبب فرق الجهد بين اللوحين، تعبّر المعادلة (3-4) عن الطاقة الكهربائية التي يختزنها المُكثِّف لشحنة Q وتقاس هذه الطاقة بالجول.

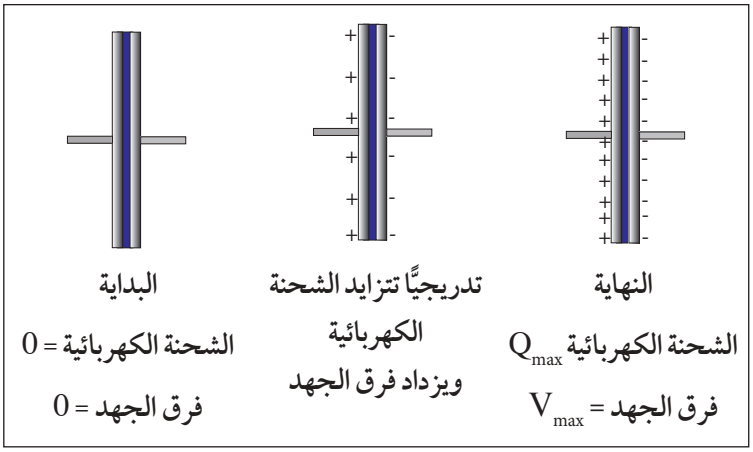
3-4	الطاقة المختزنة في المُكثِّف		
	$E = \frac{1}{2}QV$	E	الطاقة المختزنة (J)
		Q	الشحنة الكهربائية (C)
		V	فرق الجهد الكهربائي (V)

الشغل المبذول والطاقة المختزنة في المكثّف

تذكَّر أن فرق الجهد الكهربائي V بين نقطتين هو الشغل المبذول لتحريك شحنة مقدارها كولوم واحد من نقطة إلى أخرى.

أمّا لتحريك شحنة مقدارها Q تحت فرق جهد V، فإن الشغل المبذول يتحول إلى طاقة مختزنة E. الأمر الذي يمكننا من كتابة المعادلة: $V = \frac{E}{Q}$

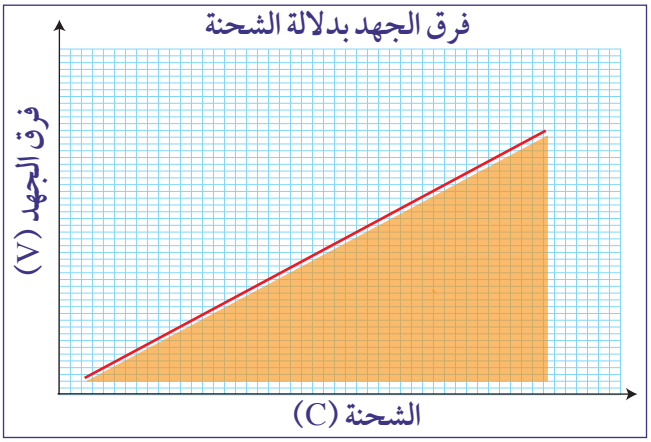
يوضِّح **الشكل 4-7** تزايد الشحنة الكهربائية، وفرق الجهد، تدريجيًّا، في المُكثِّف الفارغ أثناء شحنه. يتطلَّب تخزين الشحنة الأولى شغلًا قليلًا ويكون فرق الجهد قليلًا أيضًا.



الشكل 4-7 ازدياد الشحنة الكهربائية وفرق الجهد

كلما ازدادت شحنة المكثف، تزايد التنافر بين شحناته المتشابهة، وتزايد الجذب بين الشحنات المختلفة؛ فيزداد فرق الجهد بين اللوحين. إذا رسمنا العلاقة بين Q و V نحصل على المنحنى كما في **الرسم البياني 4-8**.

من المعادلة $E = QV$ و**الشكل 4-8**، نلاحظ أن الطاقة المختزنة تساوي المساحة أسفل منحنى فرق الجهد – الشحنة وبالتالي تصبح الطاقة المختزنة $E=\frac{1}{2}QV$.



الشكل 4-8 رسم بياني للعلاقة بين الشحنة الكهربائية وفرق الجهد

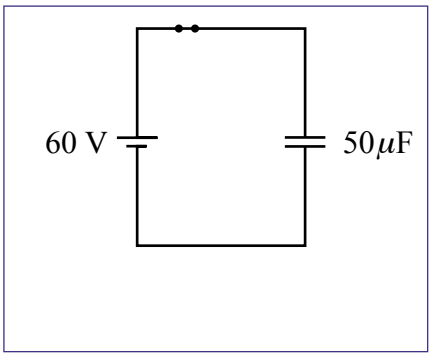
مثال 4

مُكثِّف سعته 50 μF يُراد شحنه ليكون فرق الجهد بين طرفيه 60 V.

1. احسب الشحنة الكهربائية للمُكثِّف.
2. احسب الطاقة المُختزَنة في المُكثِّف.
3. احسب الطاقة المُختزَنة في المُكثِّف إذا تضاعف فرق الجهد بين طرفَيْه إلى 120 V.

المطلوب:

1. الشحنة الكهربائية Q.
2. الطاقة المختزنة E.
3. الطاقة المختزنة E إذا كان فرق الجهد 120V.



الشكل 4-9 دائرة مكثّف.

المُعطيات: $C = 50\ \mu\text{F}$

$V = 60\text{V}$

$V = 120\text{V}$

العلاقات:

$$C = \frac{Q}{V}$$

$$E = \frac{1}{2}Q.V$$

الحل:

1. الشحنة الكهربائية للمُكثِّف يُعبَّر عنها بـ:

$$Q = CV = 50\ \mu\text{F}(60\text{V}) = (50\times10^{-6}\text{F})(60\text{V}) = 0.003\text{C}$$

2. لحساب مقدار الطاقة المُختزَنة في المُكثِّف نستخدم: $E = \frac{1}{2}QV = \frac{1}{2}(0.003)(60) = 0.09J$

3. عند تضاعُف فرق الجهد بين طرفَي المُكثِّف فإن شحنته الكهربائية تتغيَّر، لتصبح:

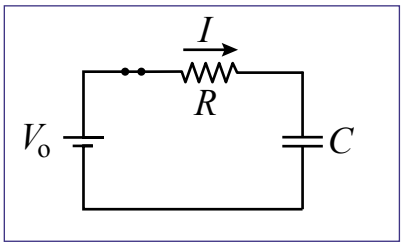
$$Q = CV = (50 \times 10^{-6}\ \text{F})(120\text{V}) = 0.006\ \text{C}$$

الطاقة المُختزَنة في المُكثِّف تصبح عندها:

$$E = \frac{1}{2}Q.V = \frac{1}{2}(0.006C)(120V) = 0.36J$$

شحن المُكثِّف

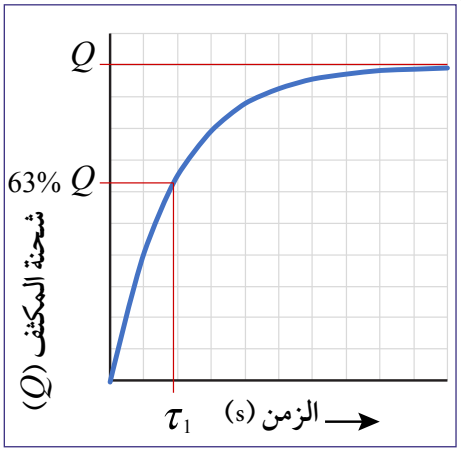
يُشحَن المُكثِّف بوصل طرفَيْه بمصدر فرق الجهد (**الشكل 4-10**).



الشكل 4-10 المُكثِّف في دائرة كهربائية

1. عند غلق الدائرة الكهربائية، يمرّ التيّار الكهربائي، حتى يتراكم ما يكفي من الشحنات على لوحي المُكثِّف لتكوين أقصى فرق جهد V_o.
2. يتوقّف التيّار الكهربائي عن التدفُّق عندما يصل فرق جهد طرفَي المُكثِّف إلى V_o، فيتعادل عندها فرق جهد المصدر مع فرق جهد المُكثِّف.

يعتمد معدَّل تراكم الشحنة الكهربائية على سعة المُكثِّف، وعلى المقاوِمة الكلية في الدائرة. تعرّف المعادلة 4-4 **الثابت الزمني τ time constant**، كحاصل ضرب المقاومة الكلية R للدائرة في سعة المكثف C. ويقاس الثابت الزمني للمكثف بوحدة ثانية (s).



الشكل 4-11 تراكم الشحنة على لوحي مكثّف بدلالة الزمن.

3. في **الشكل 4-11** شحنة المُكثِّف تصل الى 63% من قيمتها القصوى، في الفترة الزمنية 1τ (واحد ثابت زمني) من بدء عملية الشحن.

4-4	الثابت الزمني		
$\tau = RC$		τ	الثابت الزمني (s)
		R	المقاومة الكهربائية (Ω)
		C	السعة الكهربائية (F)

يستغرق شحن المُكثِّف بالكامل ما يقارب (5 τ). وهي المدة نفسها التي يحتاج إليها هذا المُكثِّف لتفريغ شحنته في المقاوِمة نفسها.

الشحنة الكهربائية المتراكمة أثناء الشحن أو التفريغ بدلالة الزمن موضحة في الجدول 4-1.

شحن المُكثِّف		تفريغ المُكثِّف	
الشحنة %	τ	الشحنة %	τ
63.2	1	36.8	1
86.5	2	13.5	2
95.0	3	5.0	3
98.2	4	1.8	4
99.3	5	0.7	5

الجدول 4-1 شحن وتفريغ المكثف.

مثال 5

عند توصيل مكثف سعته (12 μF) على التوالي مع مقاومة (6 Ω) في دائرة كهربائية، فإن زمن شحن المكثف أو تفريغه يعتمد على مقدار كل من المقاومة والسعة. ويمثل ذلك بثابت يسمى الثابت الزمني. احسب الثابت الزمني لهذه الدائرة.

المطلوب: $\tau = ?$

المُعطيات: $R = 6\ \Omega\ ,\ C = 12 \times 10^{-6}\ \text{F}$

العلاقات: $\tau = RC$

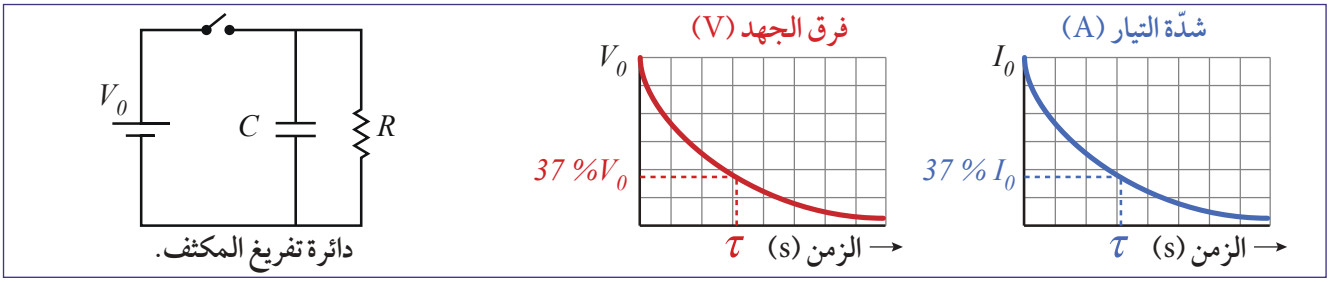
الحل: بتطبيق العلاقة:

$$\tau = RC = 6 \times 12 \times 10^{-6} = 7.2 \times 10^{-5}\ \text{s}$$

تفريغ المُكثِّف

تُعدّ علاقة فرق الجهد بالزمن علاقة أُسّيَّة عند شحن المُكثِّف أو تفريغه. لاحتساب شدّة التيار وفرق الجهد عند أي لحظة زمنية نستخدم المعادلتين 4-5 و 4-6. يُظهر **الشكل 4-12** منحنى شدّة التيار وفرق الجهد عند تفريغ المكثّف.

5-4	فرق الجهد اللحظي أثناء تفريغ مُكثِّف	V	فرق الجهد اللحظي (V)
$V = V_o e^{-\frac{t}{\tau}}$		V_o	فرق الجهد الابتدائي (V)
		t	الزمن (s)
6-4	شدّة التيار الكهربائي أثناء تفريغ المُكثِّف	τ	الثابت الزمني (s)
$I = I_o e^{-\frac{t}{\tau}}$		I	شدّة التيار اللحظي (A)
		I_o	شدّة التيار الابتدائي (A)



الشكل 4-12 دائرة تفريغ المكثف ومنحنيا فرق الجهد وشدّة التيار بالنسبة للزمن.

مثال 6

لاحظنا أثناء تفريغ شحنة مُكثِّف أن فرق الجهد قد انخفض، إلى 10% من قيمته الابتدائية، بعد انقضاء 5s. احسب الثابت الزمني للدائرة.

المطلوب: الثابت الزمني

المُعطيات: $t = 5\text{s}$ ، $\frac{V}{V_0} = 10\%$

العلاقات: $V = V_o e^{-\frac{t}{\tau}}$

الحل: فرق جهد المُكثِّف أثناء تفريغ شحنته: $V = V_o e^{-\frac{t}{\tau}}$

ذلك أن فرق الجهد قد انخفض إلى 10% من قيمته الأولية بعد انقضاء 5s:

فيكون لدينا $0.10V_o = V_o e^{-\frac{5}{\tau}}$

بقسمة طرفَي المعادلة على V_o : $0.10 = e^{-\frac{5}{\tau}}$

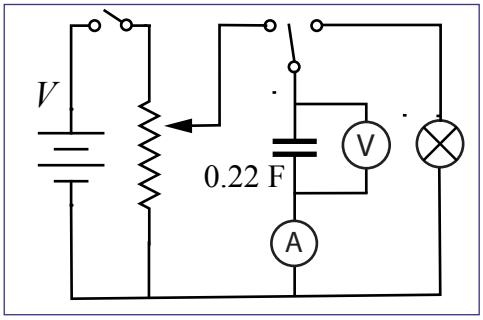
احسب لوغاريتم طرفَي المعادلة : $\ln 0.10 = -\frac{5}{\tau} \Rightarrow \tau = \frac{-5}{\ln 0.10} = 2.17\text{s}$

نشاط عمليّ

1-4 دوائر المُكثِّفات

سؤال الاستقصاء	ما العلاقة بين شدّة التيار وفرق الجهد بين طرفَي المُكثِّف؟
الموادّ المطلوبة	مستشعر فرق جهد وشدّة تيار، مُكثِّف 0.22 F، مقاوِمة 10 Ω، مصباح، مفتاحان، بطارية 1.5 V، أسلاك توصيل، مقياس جهد انزلاقي وملاقط تمساح.

خطوات التجربة



الشكل 4-13 دائرة شحن المكثف وتفريغه.

1. ركِّب الدائرة واضبط مقياس الجهد الانزلاقي (انظر ورقة العمل).
2. اضبط مخرج مقياس الجهد الانزلاقي على 0.5V
3. ابدأ بتسجيل V بدلالة t و I بدلالة t. ثم بدِّل وضع المفتاح لشحن المُكثِّف، وتسجيل البيانات، حتى يصبح فرق الجهد ثابتًا.
4. بدِّل وضع المفتاح لتفريغ المُكثِّف. سجِّل البيانات حتى يصبح فرق الجهد ثابتًا، الأمر الذي يسمح للمُكثِّف بتفريغ شحنته في المصباح.
5. أعد خطوات التجربة مستخدمًا أربع قيم مختلفة لفرق الجهد حتى 3V.

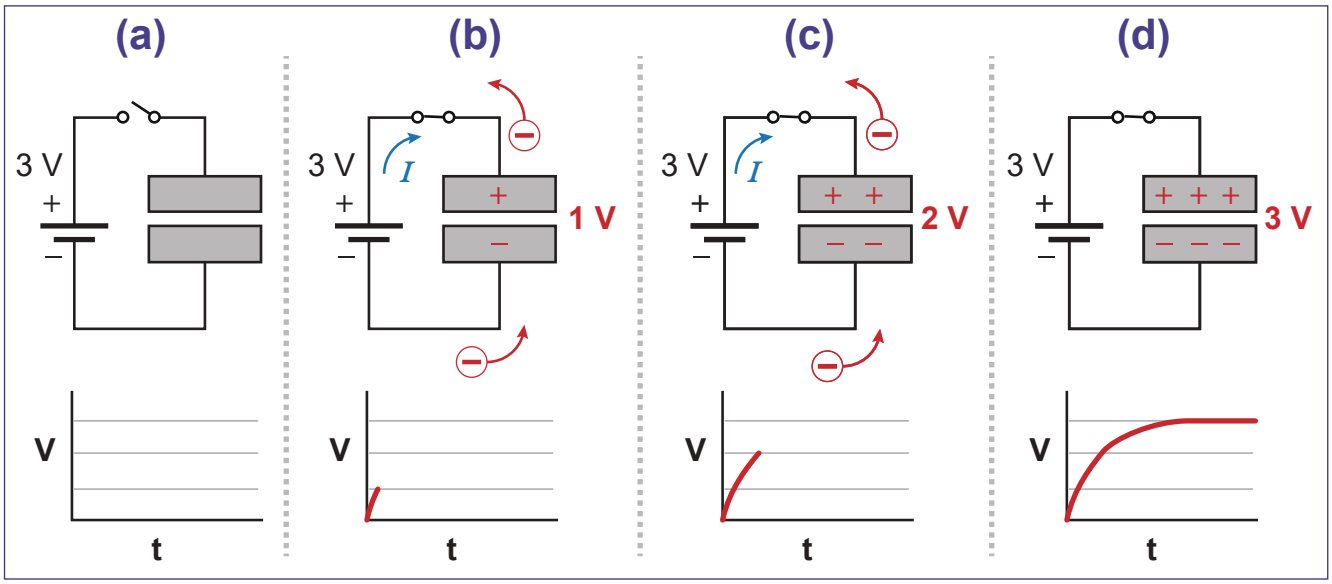
أسئلة

a. صف شدّة التيار وفرق الجهد في أثناء شحن المُكثِّف مستعملًا بيانات شدة التيار وفرق الجهد بدلالة الزمن.
b. صف شدة التيار وفرق الجهد في أثناء تفريغ المكثف في المصباح. ما علاقة شدة التيار وفرق الجهد بشدة إضاءة المصباح؟
c. استعمل الرسم البياني للتيار كي تُقدّر قيمة شحنة المُكثِّف عند فروق جهد مختلفة.(انظر ورقة العمل).
d. أنشئ رسمًا بيانيًا للشحنة بدلالة فرق الجهد. هل يدعم المنحنى فرضية أن الشحنة تتناسب طرديًّا مع فرق الجهد؟
e. استخدم الرسم لاحتساب الطاقة المُختزَنة في المُكثِّف لكل قيمة من قِيَم فرق الجهد.
f. احسب مَيْل منحنى Q بدلالة V. هل يساوي هذا المَيْل سعة المُكثِّف؟
g. احسب الثابت الزمني لكل وضعية من مقياس الجهد. كيف تعكس بيانات الشحن قِيَم الثابت الزمني؟

فهم كيفية تدفق التيار الكهربائي عند شحن المكثف الكهربائي

ليس هناك أي توصيل كهربائي بين لوحَي المُكثِّف، فالفراغ بينهما قد سُدّ بعازل كهربائي. إلا أن التيار الكهربائي يستطيع أن يتدفَّق في دوائر التيار المستمر، ولكن ليس عبر المُكثِّف.

انظر إلى الرسوم في **الشكل 4-14**.



الشكل 4-14 مرور الشحنات والتيار في المُكثِّف.

a. الدائرة مفتوحة. لا أثر لمرور التيار.

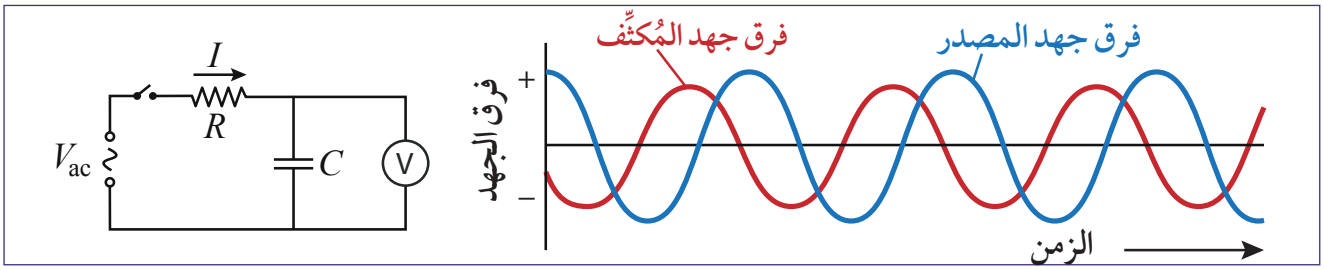
b. الدائرة مغلقة والتيار يسري. يجذب القطب الموجب للبطارية الإلكترونات من لوح المُكثِّف الموصول به، فيترك على اللوح شحنات موجبة. تقوم الشحنات الموجبة بجذب الإلكترونات من قطب البطارية السالب، لتتراكم شحنات سالبة على اللوح الآخر للمكثف

c. يزداد فرق جهد المكثف كلما ازداد تراكم الشحنات على لوحَيْه.

d. يتوقَّف مرور التيار عند تراكم ما يكفي من الشحنات، لتوليد فرق جهد بين اللوحين مساوٍ لفرق جهد البطارية.

يعمل المُكثِّف المشحون بالكامل كدائرة مفتوحة، فيتوقَّف مرور التيار فيه. يمر التيار فقط أثناء عمليتي الشحن والتفريغ.

في دوائر التيار المتردّد(AC) ينعكس التيار مرتين في كل زمن دوري. ويحاول جهد المُكثِّف دائما اللحاق بجهد المصدر (**الشكل 4-15**)، الأمر الذي يجعل المُكثِّف في حالة شحن أوتفريغ على الدوام.



الشكل 4-15 فرق جهد المُكثِّف تحت تأثير تيار متردِّد.

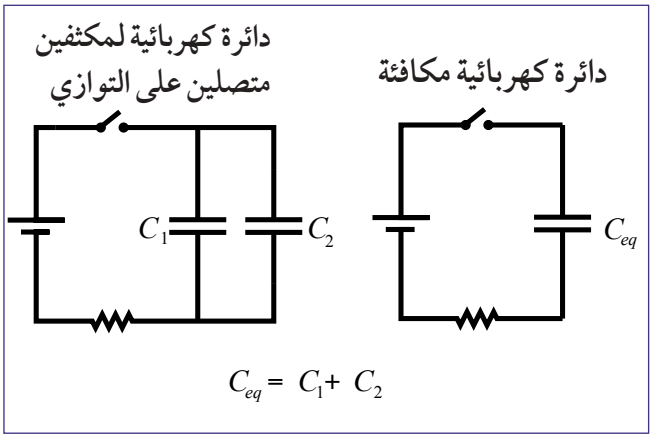
المُكثِّفات في دوائر التيار المُستمرّ

إذا اشتملت الدائرة الكهربائية على أكثر من مُكثِّف، فإن السعة عندها تتمثَّل بنموذج مُكثِّف مُكافِئ لكل المُكثِّفات. تشبه هذه الطريقة نموذج المقاومة المُكافئة لمقاومتين أو أكثر في دائرة كهربائية واحدة. نلاحظ أن هذا التحليل يفترض تغذية الدائرة بتيار مستمرّ لا يكاد يتغيَّر مقارنة بالثابت الزمني للمجموعة. أما الدوائر التي تتغذى بتيار متردد سريع التغيُّر فإنها تعمل بطريقة مختلفة.

المُكثِّفات المتّصلة على التوازي

عند توصيل المُكثِّفات على التوازي **(الشكل 16-4)**، فإن لكل منها فرق الجهد نفسه، وهو فرق جهد البطارية. تكون الشحنة $Q = C_{eq}V$. بينما تكون الشحنة المتجمعة على المكثّف المكافئ:

$$Q_{eq} = Q_1 + Q_2$$
$$C_{eq}V = C_1V + C_2V$$
$$C_{eq} = C_1 + C_2$$



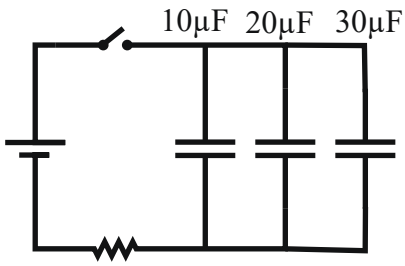
الشكل 16-4 مُكثِّفان متصلان على التوازي.

يعني ذلك أن السعة الكهربائية للمكثف المكافئ لعدة مكثفات متصلة على التوازي، تساوي مجموع سعات هذه المكثفات.

7-4	السعة المكافئة (على التوازي)		
$C_{eq} = C_1 + C_2$		C_{eq}	السعة المكافئة (F)
		C_1	السعة 1 (F)
		C_2	السعة 2 (F)

مثال 7

ما السعة المكافئة عند توصيل مُكثِّف 10 μF ومُكثِّف 20 μF، ومُكثِّف 30 μF على التوازي؟



المطلوب: $C_{eq} = ?$ السعة المكافئة

المُعطيات: $C_1 = 10\ \mu F$ ، $C_2 = 20\ \mu F$ ، $C_3 = 30\ \mu F$

العلاقات: $C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3$

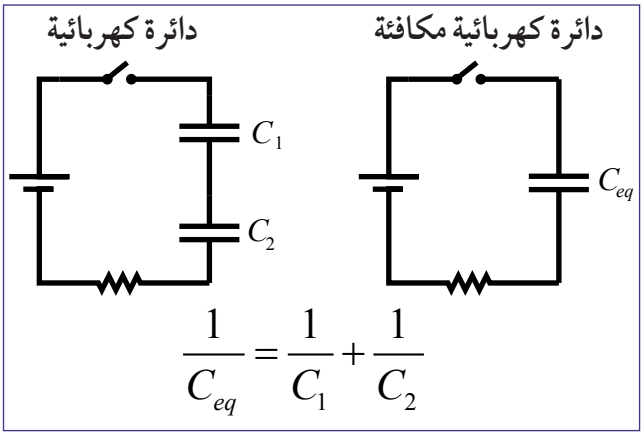
الحل: لحل هذه المسألة علينا استخدام العلاقة المعطاة:

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3 = 10\mu F + 20\mu F + 30\mu F = \boxed{60\mu F}$$

المُكثِّفات المتصلة على التوالي

عند توصيل مُكثِّفين على التوالي (**الشكل 4-17**)، فإن الشحنات المتراكمة على لوحي كلّ منهما يجب أن تكون متساوية، بحسب مبدأ **حفظ الشحنات Conservation of charge**. أي إن مقدار الشحنة في الدائرة يبقى ثابتًا.

تتدفق الشحنات لتتوزَّع على الألواح الفارغة للمُكثِّفات بالتساوي، فيزداد جهد كل منهما ليكون الجهد المكافئ حاصل جمع جهدَيْهما $V = V_1 + V_2$.



الشكل 4-17 مكثفان متصلان على التوالي.

وبما أن $Q = C_1V_1$ و $Q = C_2V_2$، ونسبة الشحنة إلى السعة تساوي الجهد المكافئ، فإن:

$$V = V_1 + V_2$$

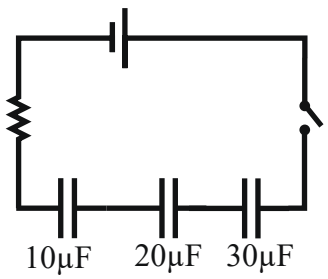
$$\frac{Q}{C_{eq}} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2}$$

$$\therefore \frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

8-4	السعة المكافئة (على التوالي)	C_{eq}	السعة المكافئة (F)
$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$		C_1	السعة 1 (F)
		C_2	السعة 2 (F)

مثال 8

ما السعة المكافئة عند توصيل مُكثِّف 10 μF ومُكثِّف 20 μF، ومُكثِّف 30 μF، على التوالي؟



المطلوب: السعة المكافئة C_{eq} = ?

المُعطيات: $C_1 = 10\ \mu F$ ، $C_2 = 20\ \mu F$ ، $C_3 = 30\ \mu F$

العلاقات:

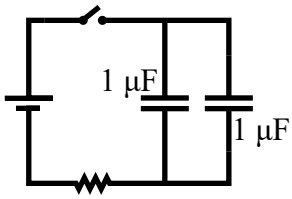
$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

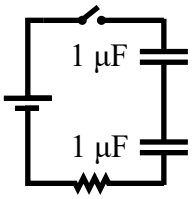
الحل: لحل هذه المسألة، علينا استعمال العلاقة المعطاة:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} = \frac{1}{10} + \frac{1}{20} + \frac{1}{30} = \frac{11}{60} \Rightarrow C_{eq} = \frac{60}{11} = \boxed{5.45\mu F}$$

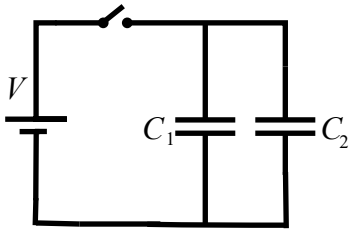
تقويم الدرس 4-1

1. ما أقصى شحنة يمكن للمُكثِّف أن يختزنها؟ دون الحاجة لإجراء عمليات حسابية.
2. يبدأ المُكثِّف بتخزين شحنته بسرعة كبيرة، ولكن معدَّل التخزين يقل كلما ازداد تراكم الشحنات. اشرح بأسلوبك لماذا يحدث ذلك.
3. a. ما الثابت الزمني لمُكثِّف $400\mu F$ عند تفريغ شحنته في مُقاومة $60k\Omega$؟
   b. إذا وصلنا المُكثِّف ببطارية 12 V، فما الشحنة القصوى التي يمكن تخزينها؟
4. أنشأنا دائرتين كهربائيتين من عناصر متشابهة. في إحداهما وصلنا مُكثِّفين سعة كل منهما $1\ \mu F$ على التوالي، بينما في الثانية تم توصيل المكثفين نفسهما على التوازي. أي المُكثِّفين المكافئين سيختزن شحنة كهربائية أكبر؟
   ادعم إجابتك بعمليات حسابية.

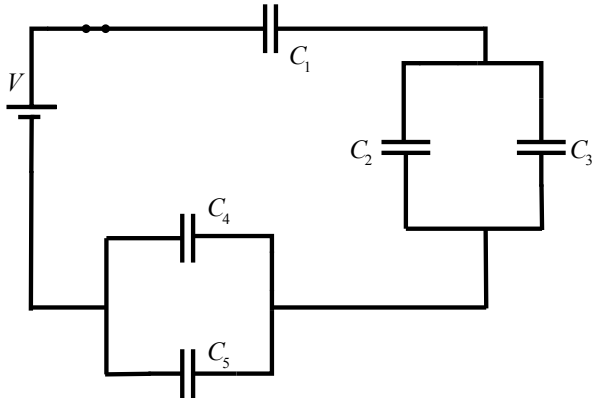




5. في الدائرة المعطاة في الشكل $V = 600\ V$ ، $C_1 = 8.0\mu F$، $C_2 = 9.0\mu F$.
   ما السعة المُكافِئة وما الشحنة الكهربائية في الدائرة؟



6. أثناء تفريغ مُكثِّف مثالي، تتغيَّر قيمة التيار الكهربائي بسرعة كبيرة. ارسم منحنى تغيُّر التيّار بدلالة الزمن للمُكثِّف أثناء التفريغ.
7. ما قيمتا السعة الكهربائية والمقاومة الكهربائية اللتان توصلان معًا للحصول على نظام بثابت زمني 1s؟ ادعم إجابتك بعمليات حسابية.
8. وُصلت خمسة مكثفات في دائرة كهربائية مع بطارية (24 V)، كما في الشكل، إذا كانت سعاتها كما يأتي: $C_1=C_2=C_3=3\mu F$, $C_4=C_5=2\mu F$، احسب السعة المكافئة لجميع المكثفات، ثم احسب شحنة المكثف (C_1).



الدرس 4-2

أشباه الموصلات

اجتاحت الوصلات الثنائية الباعثة للضوء LEDs العالم بقوة وبشكل عاصف. حيث جرى اكتشافها في العام 1907 لكنها لم تُستخدم حتى العام 1960. وهي أجهزة شبه موصِّلة تضيء عندما يتدفّق تيار كهربائي عبرها. كانت تلك الوصلات مكلفة في فترة استخدامها المبكرة، وكانت تستخدم كمؤشرات فقط. لكن بعد مرور 30 عامًا، أصبحت تستخدم في أجهزة التحكم، وبعض شاشات العرض. لم يعد يُقتصر استخدامها على شاشات التلفاز، بل أصبحت شيئًا فشيئًا بديلة لأجهزة الإضاءة.

فمعظم مصابيح الإنارة في الشوارع، وإضاءة الألعاب، وحتى مصابيح الإضاءة المنزلية المعتادة، تصنّع اليوم من وصلات LED. وعندما تبيّن أنّها ذات فاعلية جيدة في الإنارة بكلفة تشغيل مُنخفضة، بدأ مختصو التجميل استخدام هذه التقنية وابتكروا علاجات الاعتناء بالبشرة بواسطتها. وستكون هذه التقنية الجديدة واعدة في علاج تجاعيد البشرة وحب الشباب والالتهابات.

الشكل 4-18 الأنواع المختلفة للوصلات الثنائية الباعثة للضوء LED والتي تُستخدم في صناعات متعددّة.

مخرجات التّعلُّم

P1110.1 يذكر أوجه التشابه والاختلاف بين الموصلات، وأشباه الموصلات والمواد العازلة، استناداً إلى الإلكترونات أو الأيونات المتحرِّكة.

P1110.2 يصف كيف يمكن أن تؤثّر كمية قليلة من الشوائب في خصائص أشباه الموصلات.

المفردات

Electrical conductor	موصل كهربائي
Electrical insulator	عازل كهربائي
Resistivity	مقاومة نوعيّة
Semiconductor	شبه موصل
Conductivity	موصليّة
Siemens per meter	سيمنس لكل متر
N-type semiconductor	شبه موصل من النوع السالب
P-type semiconductor	شبه موصل من النوع الموجب
Transistors	ترانزستورات
p-n junction	وصلة ثنائية p-n
Diode	دايود
Rectification	تقويم

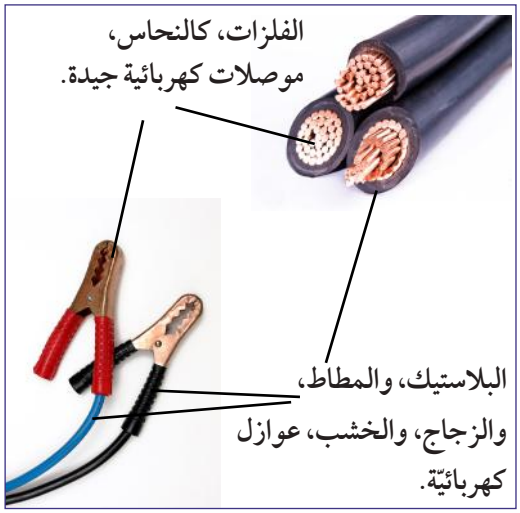
الموصلات والعوازل الكهربائية

سؤال للمناقشة

اذكر أمثلة لبعض الموصلات والعوازل الشائعة؟

يمكننا إلى حدٍّ ما تصنيف المواد إلى مُوصلات وعوازل (**الشكل 4-19**). تُعد الفلزات، كالنحاس، **موصلًا كهربائيًا Electric conductor** لامتلاكه مقاومة منخفضة. حيث أن مقاومة سلك نحاسي عيار 20 وطوله 1m، لا تتجاوز 0.03 Ω. لا ترتبط الإلكترونات في المدارات الخارجيّة للفلز بأي ذرّة محدَّدة، وتكون حرة الحركة، كما هو مبيّن في **الشكل 4-20**. فالإلكترونات الحُرّة هي التي تجعل النحاس والفلزات الأخرى موصلات كهربائيّة جيّدة.

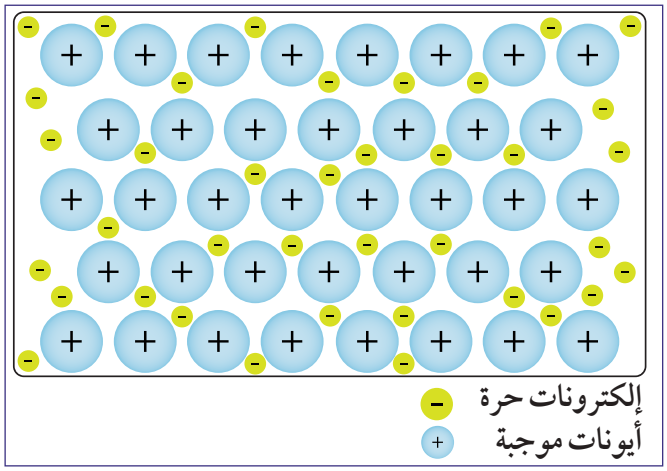
عند وجود فرق جهد كهربائي بين طرفَي مُوصل، تنجذب الإلكترونات نحو الجهد الموجب، وتتنافر مع الجهد السالب. يوفّر فرق الجهد قوة تُحرّك الإلكترونات، وتُمرّر التيار الكهربائي. كلما كان فرق الجهد أكبر، تحرّكت الإلكترونات بكميات أكبر، الأمر الذي يزيد من شدّة التيار وانتقال القُدرة بواسطة الإلكترونات المُتحرّكة إلى جهاز يمكنه الاستفادة من تلك القُدرة، مثل المُحرِّكات الكهربائيّة.



الشكل 4-19 الموصلات والعوازل

المواد ذات المُقاوَمة الكبيرة، تسمى **عوازل كهربائيّة Electric insulators**. وفي المواد العازلة تكون الإلكترونات في المدارات الخارجية للذرّة مرتبطة ارتباطًا قويًّا بنواة تلك الذرة. وبما أن الإلكترونات لا تكون قادرة على الحركة، فلا يتدفّق تيار عند تطبيق فرق جهد بين طرفَي العازل.

يمكن أن تتجاوز مقاوَمة طبقة رقيقة من البلاستيك 1,000,000 Ω. تُغطّى الأجهزة الكهربائية والأسلاك عادةً بمادة عازلة، مثل البلاستيك. ويُعدّ الزجاج والخشب من المواد العازلة أيضًا.

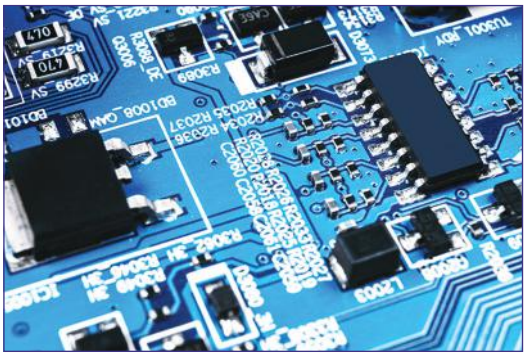


الشكل 4-20 في الموصلات تكون الأيونات الموجبة محاطة بالإلكترونات الحرة

في الموصلات، تكون بعض الإلكترونات حرة الحركة.
في العوازل، تكون جميع الإلكترونات مرتبطة ارتباطًا قويًّا بنواة الذرة.

المقاومة النوعية ρ لمادّة هي مؤشر يعبّر عن مقاومتها. يمتلك النحاس مقاومة نوعية $\rho = 1.68\times10^{-8}\ \Omega\ m$.
وتمتلك العوازل مقاومة نوعيّة بين $10^{9}\ \Omega\ m$ و $10^{15}\ \Omega\ m$.

أشباه الموصلات



الشكل 4-21 لوحة دائرة مع رقاقات السيليكون الميكرويّة.

لولا الإلكترونيات لما كانت الحياة الحديثة بالشكل الذي تبدو عليه اليوم، والتي تعتمد على خصائص أشباه الموصلات. **شبه الموصل** مادة تتوفر فيها أعداد قليلة من الإلكترونات الحرّة لنقل تيار كهربائي. تمتلك أشباه المُوصلات مقاومة نوعية تتراوح بين المقاومة النوعية للعوازل والمقاومة النوعية للموصلات. يُعدّ السيلكون المادّة الأكثر استخدامًا في **أشباه المُوصلات Semiconductors**، ويُستخدم في 99.9% من كل رقاقات الحواسيب والأجهزة الإلكترونيّة **(الشكل 4-21)**.

الموصليّة

الموصليّة Conductivity هي مقلوب المقاومة النوعية. تعني الموصليّة العالية مقاومة مُنخفضة لتدفُّق التيار. وحدة الموصليّة الكهربائيّة هي **السيمنس لكل متر Siemens per meter (S/m)**. يُظهر الجدول 4-2 الموصليّة لمواد نقيّة مختلفة عند درجة حرارة الغرفة.

	المادة	الموصليّة (S/m)
الموصلات	الفضة	6.8×10^{7}
	النحاس	6.0×10^{7}
	الحديد	1.0×10^{7}
العوازل	زجاج السيلكا	10^{-10}-10^{-11}
	الخرسانة	10^{-9}
	أكسيد الألومنيوم	$< 10^{-13}$
أشباه الموصلات	السيلكون	4×10^{-4}
	الجرمانيوم	2×100
	زرنيخ الجاليوم	10^{-6}

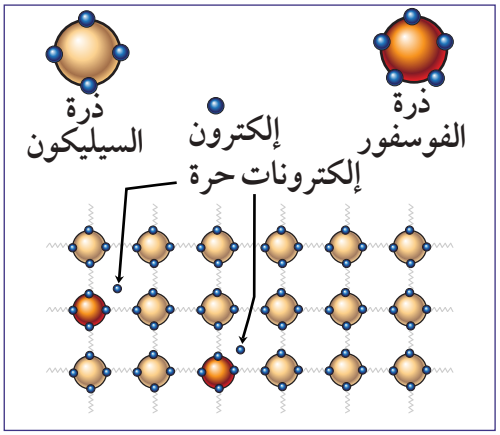
الجدول 4-2 الموصليّة لمواد مختلفة، عند درجة حرارة الغرفة.

التغيُّر في موصليّة السيليكون

تكمن فائدة أشباه الموصلات في الإمكانية الكبيرة لتغيُّر موصليتها بمعامل يفوق 10,000مرة وذلك عن طريق إضافة كميّة صغيرة من عنصر آخر كالبورون أو الفوسفور. تؤدي إضافة ذرّة واحدة من الفوسفور لكل 10 ملايين ذرّة سيليكون إلى زيادة الموصليّة بمقدار 20000 مرة. أما إضافة مثل تلك الكمّيات الصغيرة إلى عناصر أخرى لا يكون لها أي تأثير في الموصلات والعوازل العادية.

أشباه الموصلات من النوع السالب

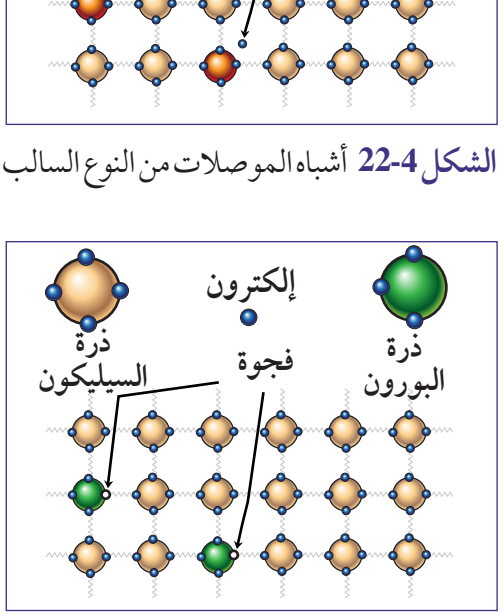
تمتلك ذرّات الفوسفور خمسة إلكترونات تكافؤ، مقارنة بذرّات السيليكون التي تمتلك أربعة منها. عندما ترتبط ذرّات الفوسفور بشبكة ذرّات السيليكون، فإن أربعة من أصل خمسةإلكترونات تكافؤ من ذرّة الفوسفور ترتبط بذرّات السيليكون المجاورة. أما الإلكترون الإضافي فلا يرتبط بأي ذرّة محدَّدة، ويبقى حرًا، حيث يعمل على توصيل التيار الكهربائي، بهذا تنشأ في المادة إلكترونات حاملة للشحنة يتكوّن منها التيار (**الشكل 4-22**). وهكذا فإن إضافة شائبة الفوسفور إلى السيليكون تشكِّل شبه موصل من النوع السالب n الذي تقوم فيه الإلكترونات حاملات الشحنة الأغلبية بنقل التيّار.



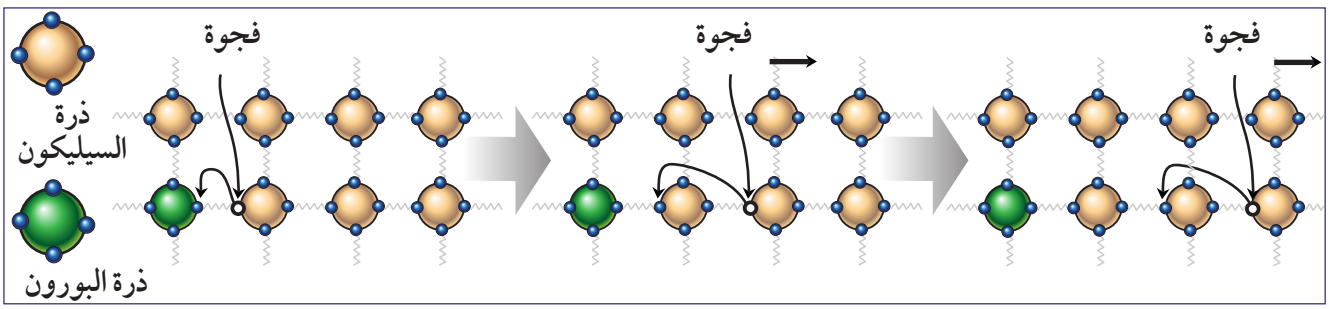
الشكل 4-22 أشباه الموصلات من النوع السالب.

أشباه الموصلات من النوع الموجب

تملك ذرّة البورون ثلاثة إلكترونات تكافؤ، فهي أقل بواحد من إلكترونات السيليكون. عند ارتباط ذرّات البورون بشبكة ذرّات السيليكون، تلتقط ذرّة البورون إلكترونًا من ذرّة السيليكون المجاورة، فتصبح ذرّة السيليكون فاقدة لإلكترون ولها محصِّلة شحنة موجبة تسمى الفجوة (**الشكل 4-23**). وبذلك يشكّل السيليكون مع الشائبة شبه موصل من النوع الموجب والذي تكون فيه الفجوات حاملات الشحنة الأغلبية أو ناقلات الشحنة الأغلبية لنقل التيار. تجذب ذرّة السيليكون الموجبة p الإلكترون من الذرّات المجاورة، فتتحرّك الفجوة. تأخذ الفجوة الجديدة الإلكترون من الذرّة المجاورة، لتتحرّك مرة ثانية كما هو مبيّن في **الشكل 4-24**. وبينما تقفز الإلكترونات مبتعدة باتجاه معيّن، تتحرّك الفجوة في الاتجاه المعاكس حاملةً التيّار.



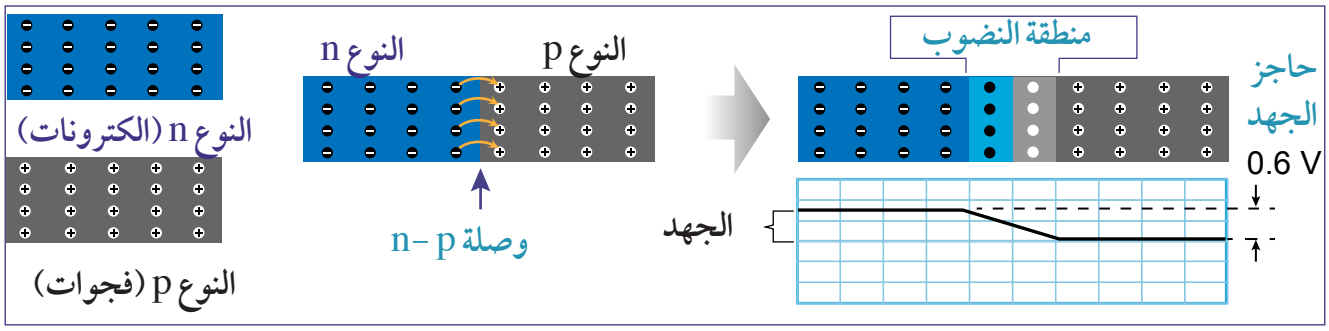
الشكل 4-23 أشباه الموصلات من النوع الموجب.



الشكل 4-24 تحرّكات الفجوة في الموصِّل من النوع الموجب.

وصلة p-n

في الوصلات الثنائية (الدايودات) والترانزستورات يتم الدمج بين نوعي أشباه الموصلات السالب n والموجب p. لنرى ما يحدث عند الوصلة الثنائية التي يلتقي فيها كل من النوعين p و n لأشباه الموصلات، والتي تُسمى **وصلة p-n (p-n junction)**. في البداية، يمتلك الطرف n إلكترونات إضافية. أما الطرف p فيمتلك فجوات موجبة. تتدفّق الإلكترونات السالبة من الطرف n نحو الطرف p، لتندمج مع الفجوات الموجبة. ويصبح الطرف n ذا شحنة موجبة، والطرف p ذا شحنة سالبة. تتحرّك الإلكترونات في السيليكون، حتى يصبح فرق الجهد 0.6V وهو كافٍ لمنع أي إلكترونات إضافية من الانتقال، ويسمّى حاجز الجهد.

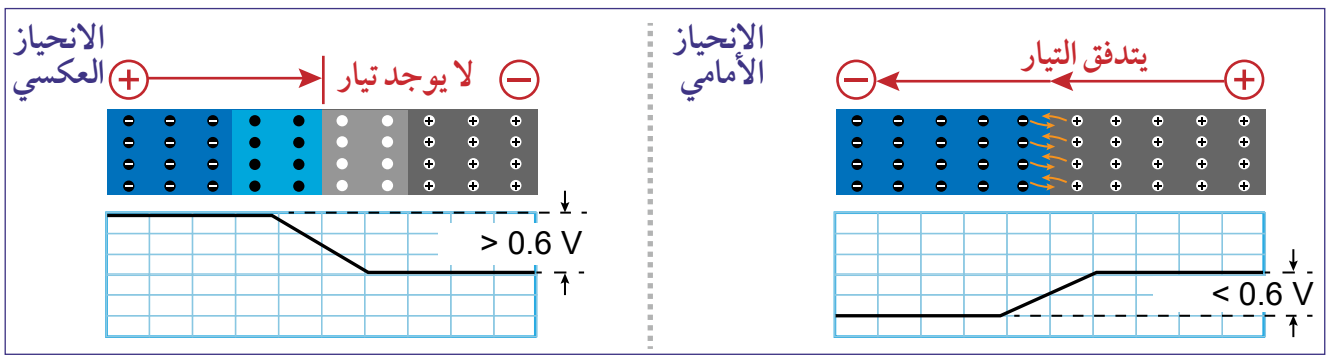


الشكل 4-25 وصلة p–n.

في منطقة الإتصال بين شبه الموصل الموجب والسالب، تتشكّل منطقة نضوب رقيقة جدًا لا تحمل أي من الإلكترونات أو الفجوات (مبيّنة في **الشكل 4-25**). تعدّ منطقة النضوب، منطقة عازلة، لأنها لا تحتوي على أي شحنة مُتحرِّكة قادرة على حمل التيار.

تكمن الخاصّية المُفيدة لمنطقة النضوب، في إمكانيّة التحكّم بها كهربائيًّا، من أجل تعديل عرضها بسرعة، وفي أقل من 10^{-9} s.

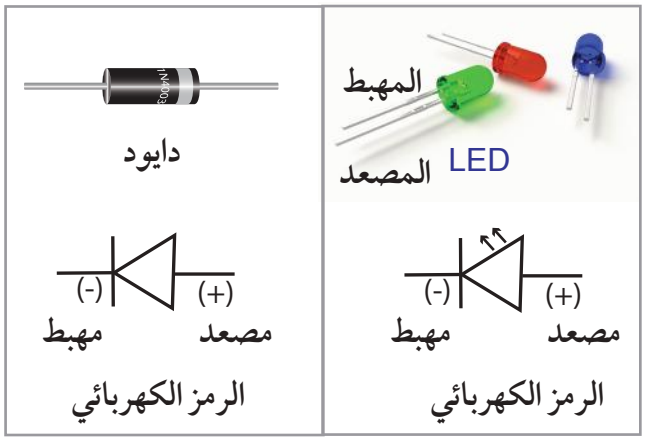
1. إنّ أي جهد مطبّق في الاتّجاه نفسه الذي يكون عليه الجهد 0.6 V سوف يسبّب نموًا في منطقة النضوب، لتصبح تلك المنطقة عازلاً أقوى. وهذا ما يُسمّى بالانحياز العكسي. حيث لا يمكن للتيار التدفّق في الاتجاه العكسي، لأنه سيتوقّف عند منطقة النضوب.
2. أما الجهد المُطبّق في عكس الاتّجاه الذي يكون عليه الجهد 0.6 V فسوف يسبّب ضمور منطقة النضوب لتصبح تلك المنطقة موصِّلة. وهو ما يسمّى الانحياز الأمامي. حيث يتدفّق التيار بسهولة في اتّجاه الانحياز الأمامي.



الشكل 4-26 الانحياز الأمامي والانحياز العكسي لوصلة p-n.

الدايود

الدايود Diode أداة تصنع من مادة شبه موصلة، يسمح للتيار بالتدفُّق عبره في اتجاه واحد فقط. يمتلك الدايود وصلة p–n وحيدة داخله. للدايود طرفان: طرف موجب يُعرف باسم المصعد، وطرف سالب يسمّى المهبط. يستطيع التيار التدفُّق عبر المصعد باتجاه المهبط فقط. يُرمز إلى المهبط عادة بخط (كما هو مبيّن في **الشكل 4-27**). في الموصِّل الثنائي الباعث للضوء (LED)، يكون المهبط ذا الساق الأقصر.

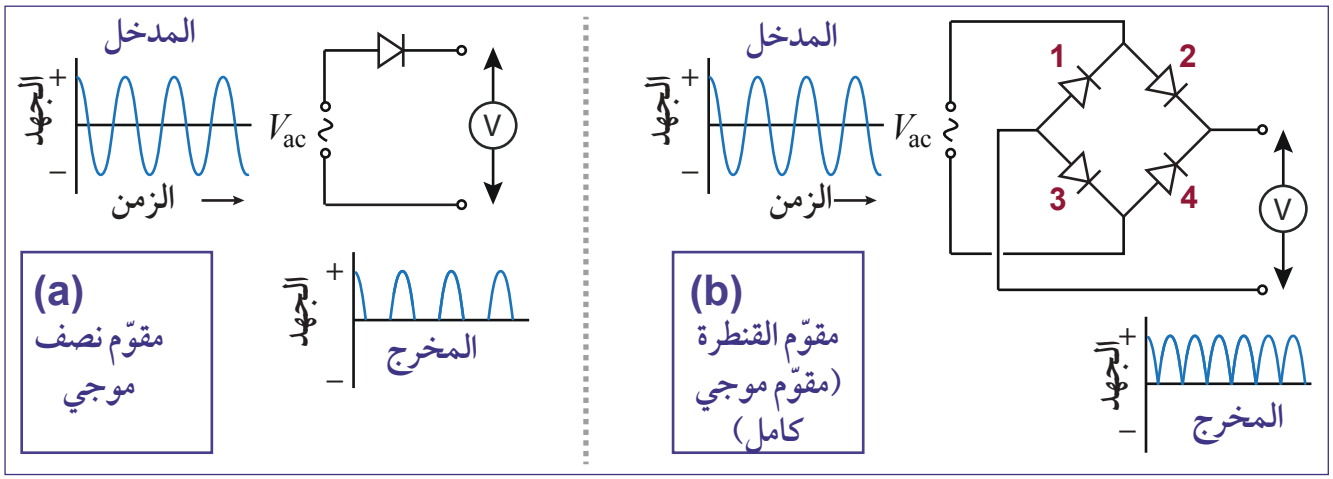


الشكل 4-27 الدايود والـ LED.

تقويم التيار المتردد

من المهم ملاحظة أن طرفَي الدايود يجب وصلهما بشكل صحيح، عندما تكون الدائرة في وضع DC-، حيث يتم توصيل القطب الموجب للبطارية بمصعد الدايود وقطبها السالب بمهبطه. وإلّا لن يمر أي تيّار. يُستخدم الدايود عادة في دوائر التيار المتردّد AC، لتقويم التيّار، حتى يتدفّق في اتجاه واحد. يُطلَق على توحيد اتجاه التيار ليصبح في اتجاه واحد اسم **التقويم Rectification**. يَسمَح مقوّم دايود نصف موجي بالنصف الموجب فقط من تيّار مصدره AC، كما هو مبيّن في **الشكل 4-28**. يُسمى الترتيب الذكي لأربعة دايودات باسم مقوّم القنطرة. حيث يسمح مقوم القنطرة هذا للجزءين الموجب والسالب من تيار AC المدخل بالتدفق، لكنّه يُعطي تيّارًا في الاتجاه الموجب، وبذلك يمكن لمقوم القنطرة تحويل التيار المتردد (AC) إلى تيار له نفس الاتجاه و بالتالي يكون أقرب إلى التيار المستمر (DC).

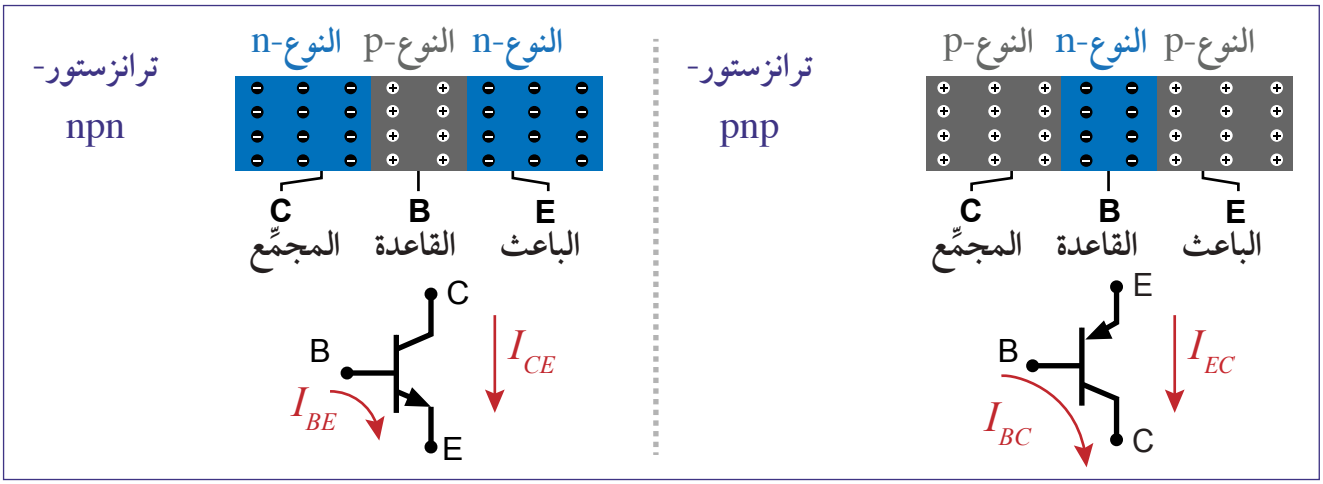
1. عندما يكون نصف الدورة AC الداخلة موجبًا، يتدفق التيار عبر الدايود 2، ليعود عبر الدايود 3.
2. عندما يكون نصف الدورة AC الداخلة سالبًا، يتدفق التيار عبر الدايود 4 ليعود عبر الدايود 1.



الشكل 4-28 دائرتا الدايود النصف موجي ومقوّم القنطرة.

الترانزستور

الترانزستور Transistor جهاز شبه موصل يمتلك وصلتين ثنائيتين p-n وثلاثة أطراف. يُظهر **الشكل 4-29** نوعي الترانزستور npn و pnp ومخطّط دائرتيهما. تسمّى أطراف الترانزستور الثلاثة: المجمِّع والقاعدة والباعث.



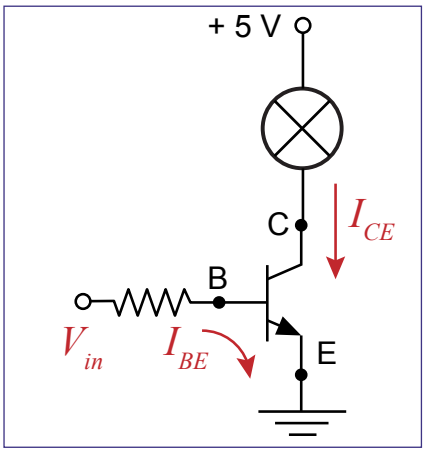
الشكل 4-29 ترانزستور من النوع-npn وترانزستور من النوع-pnp.

من أجل فهم طريقة عمل الترانزستور، افترض المفتاح الميكانيكي العادي. يكون للمفتاح الميكانيكي مقاومة عالية جدًا عندما يكون مفتوحًا، وعندها لا يمر أي تيار كهربائي. ولكن عند غلقه، تنخفض مقاومة المفتاح إلى 0.001 Ω أو أقل. فيمر التيار الكهربائي لأن المقاومة قليلة جدًا.

يشبه الترانزستور مفتاحاً الكترونيًا بين الباعث والمجمّع. يتم التحكّم بالمفتاح بواسطة التيار في القاعدة. تكون مفاتيح الترانزستور سريعة جدًا، يمكن للترانزستور أن يغيّر المقاومة بين المجمّع والباعث من 10^6 Ω إلى 1 Ω خلال 10^{-9} s.

الترانزستور npn

إن تيار كهربائي قليل I_{BE} بين القاعدة والباعث يمكنه اضاءة المصباح. يظهر **الشكل 4-30** ترانزستور npn وظيفته اضاءة المصباح. يتوهج المصباح الكهربائي عندما تُصبح المقاومة بين المجمّع والباعث قليلة وذلك عند تطبيق الجهد V_{in} في القاعدة. يمكن لتيار قليل جدًا في القاعدة تشغيل تيار كبير جدًا I_{CE} بين المجمِّع والباعث.



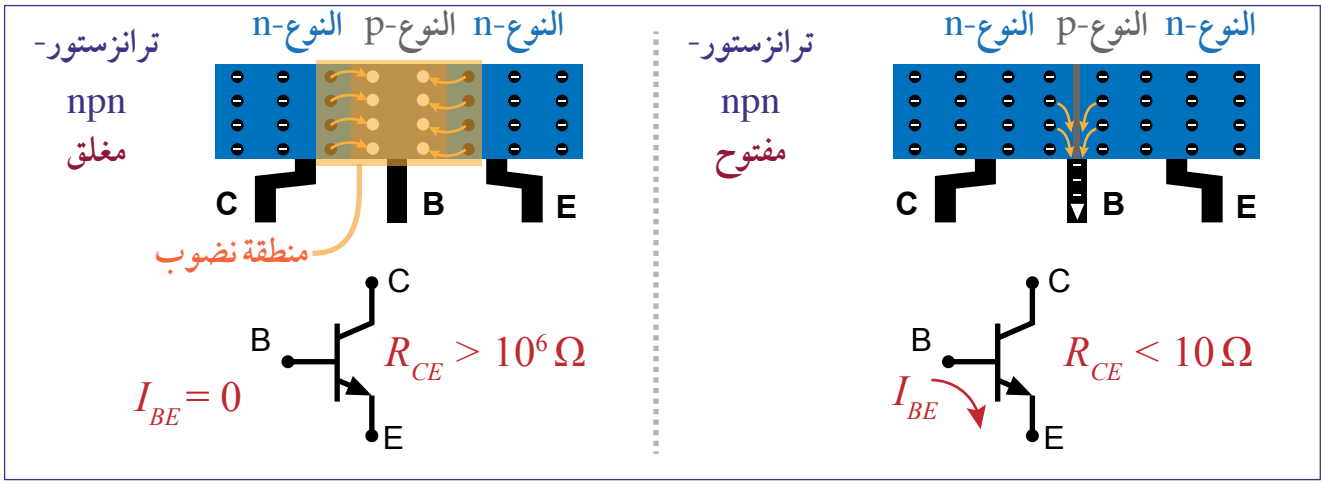
الشكل 4-30 دائرة ترانزستور اضاءة المصباح

الترانزستور pnp

في ترانزستور pnp يَمرُ تيار تشغيل قليل I_{BE} بين الباعث والقاعدة، ويسمح لتيار كبير أن يمر بين الباعث والمجمّع.

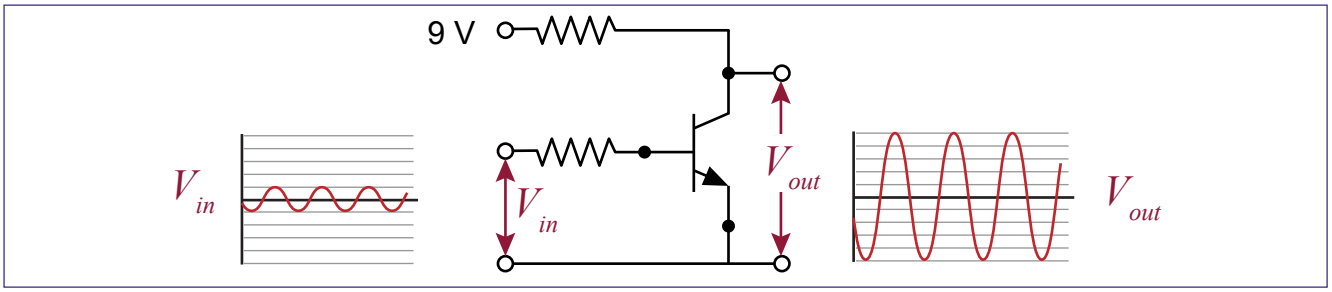
طريقة عمل الترانزستور

كما في حالة الدايود، تعتمد طريقة عمل الترانزستور على تغيير موصِليَّة وصلتي p-n المتجاورتين. افترض الترانزستور npn في **الشكل 4-31**. إن النوع p في القاعدة يشكل طبقة رقيقة جدًا، وتُعيق الوصلتان p-n في الترانزستور مرور التيار في الاتجاهين في الحالة الطبيعية. المقاومة بين المُجمِّع والباعث R_{CE} مرتفعة جدًا لأنه لا توجد شحنات قابلة للحركة في منطقة النضوب.



الشكل 4-31 الترانزستور npn.

يتم تدفق التيار في النوع p (القاعدة) بواسطة الفجوات الموجبة. عندما يتدفق التيار الموجب إلى القاعدة، تتحرك الإلكترونات من النوع n ويصبح النوع p موصلًا. ويمكن لتيار قاعدة I_B قيمته 0.0001 A أن يتحكم بتيار بين المجمّع والباعث I_{CE} قيمته 5 A وهو أكبر بـ 50,000 مَرّة من تيار القاعدة.



الشكل 4-32 دائرة ترانزستور بسيط يعمل كمضخم.

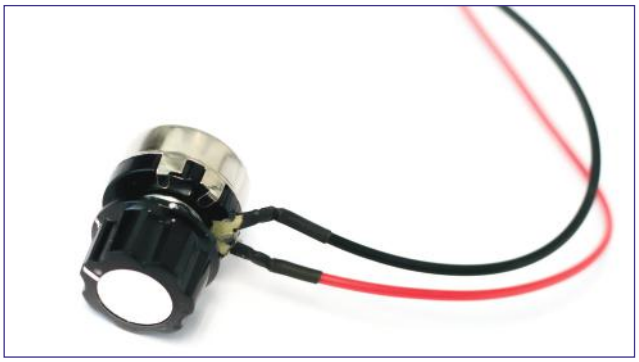
أحد الاستخدامات الهامة الأخرى للترانزستور هو لتضخيم الإشارات. يمكن تضخيم فرق جهد قليل يُطَبَّق عند القاعدة إلى فرق جهد أكبر بكثير كما في **الشكل 4-32**. يعمل مُضَخِّم الترانزستور عندما لا يفتح تيار القاعدة–الباعث I_{BE} الترانزستور بشكل كامل، بل بشكل يتناسب طرديًا مع التيار I_{BE}. يُشَكِّل الترانزستور ومقاومة القاعدة– الباعث مجزّئ جهد متغيّر. يمكن للإشارة الخارجة أن تكون أكبر بكثير من الإشارة الداخلة دون تغيير في طريقة الاعتماد على الزمن. تُستخدم مضخّمات الترانزستور بشكل واسع في تطبيقات عديدة كمستشعرات السيارات وأجهزة الصوت في الحواسيب وأجهزة التلفاز.

تقويم الدرس 4-2

1. صنف المواد التالية إلى موصلة وعازلة وشبه موصلة، ثم اذكر الخصائص التي اعتمدتها في عملية التصنيف. (المواد هي: حديد، سيليكون، زجاج، مطاط، نحاس، جرمانيوم، فضة، جاليوم، تيفلون).
2. كم إلكترون تكافؤ تمتلك ذرّة السليكون؟ وما التأثير الناتج عن اضافة مواد أخرى مثل البورون اليه؟
3. الموصليّة هي قياس لقدرة المادة على توصيل الكهرباء. أجب عن الأسئلة الآتية لكل من الموصلات والعوازل وأشباه الموصلات.
   a. عند درجة حرارة الغرفة، أيُّ نوع من المواد يمتلك موصليّة عالية؟ وأيٌّ منها يمتلك موصليّة مُنخفضة؟
   b. هل تزداد الموصليّة، أم تنقص، أم تبقى كما هي عليه، عند إضافة مقدار ضئيل من العناصر الأخرى، كالبورون أو الفوسفور؟
4. المقاومة النوعية هي مقلوب الموصليّة، فهي قياس لقدرة المادة على ممانعة مرور التيار الكهربائي. أجب عن الأسئلة الآتية لكل من الموصلات والعوازل وأشباه الموصلات.
   a. عند درجة حرارة الغرفة، أي نوع من المواد يمتلك مقاومة نوعية عالية؟ وأيٌّ منها يمتلك مقاومة نوعية مُنخفضة؟
   b. هل تزداد المقاومة النوعية أم تنقص أم تبقى كما هي عند إضافة شائبة؟
5. اشرح بأسلوبك الاختلاف بين النوع n والنوع p من أشباه الموصلات.
6. كم طبقة نضوب يوجد في الترانزستور؟
7. ارسم دائرة يُستخدم فيها الدايود، ليحوّل جهدًا متناوبًا (مترددًا) بين الموجب والسالب إلى جهد موجب فقط (أو صفري).
8. قمنا بوضع LED في دائرة، بحيث أمكن إضاءته. قرّر طالب إعادة تجهيز الدائرة، فعكس توصيل طرفَي جهاز LED. هل سيبقى جهاز LED مضيئًا؟ اشرح إجابتك.

الدرس 3-4
مُجزِّئ الجهد

تخيَّل لو أن مكبِّرات الصوت في المسجد القريب، وفي مركز التسُّوق، لها شدّة صوت واحدة لا يمكن تعديلها. يمكن مثلًا أن يكون الصوت منخفضًا عندما يكون هناك حشد من الناس، أو مرتفعًا عندما لا يكون أحد غيرك. لتغييرشدّة الصوت في أي جهاز، نحتاج إلى مقياس الجهد الإنزلاقي الذي يطلق عليه المهندسون الكهربائيون اسم «وعاء». مقياس الجهد الإنزلاقي هو تقنية بسيطة وموثوق بها.



الشكل 4-33 مقياس الجهد الإنزلاقي

يشتمل جهاز مقياس الجهد الإنزلاقي على مقاومة تتغيّر عند تدوير المقبض، أو تحريك الذراع. على سبيل المثال، تتغيَّر مقاومة مقياس الجهد الإنزلاقي في الدوائر الكهربية من Ω 3 إلى Ω 33.

يُستخدَم تغيير المقاومة لمضاعفة مُعامِل تكبير الصوت في مُضخِّم مُكبِّر الصوت.

مخرجات التّعلُّم

P1111.1 يشتق معادلات لدوائر مجزئ الجهد. ويصف كيف يمكن تغيير الجهد الناتج من مجزئ الجهد.

P1111.2 يرسم ويجمع دوائر لمجزِّئ الجهد لاستقصاء خصائص مكوِّنات كهربائية، مثل مقياس الجهد والوصلة الثنائية (الدايود) والمقاومة الضوئية (LDR) والترانزستور والمقاومة الحرارية (الثرمستور).

المفردات

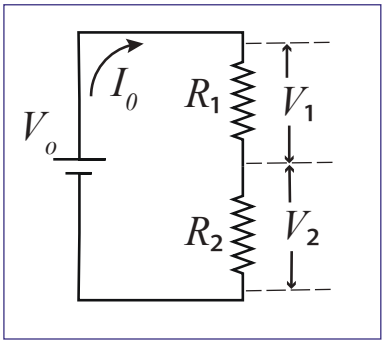
مُجزِّئ الجهد	Potential divider
مقياس الجهد الإنزلاقي	Potentiometer
مقاومة ضوئية	Light dependent resistor (LDR)
مقاومة حرارية (ثرمستور)	Thermistor

مُجزِّئ الجهد

مُجزِّئ الجهد Potential Divider دائرة تُستخدَم لتحويل جهد (فرق جهد) كبير داخل إلى دائرة، إلى جهد خارج أصغر، باستخدام مقاوِمتَين متصلتين على التوالي.

افترض **الشكل 4-34**. نحن نعلم أن شدّة التيار في الدائرة المتصلة على التوالي تكون متساوية، في حين أن الجهد لا يكون كذلك. ذلك أن جهد البطارية، V_o، ينقسم على المقاومتين R_1 و R_2. وهذا هو سبب تسميته بمجزِّئ الجهد.

يمكن استخدام المعادلتين 4-9 و 4-10 لحساب فرق الجهد بين طرفَي كل مقاومة.



الشكل 4-34 دائرة بسيطة لمُجزِّئ الجهد

9-4	فرق الجهد 1 للمقاوِمة الأولى		
$V_1 = \frac{V_o R_1}{R_1 + R_2}$		V_1	فرق جهد المُقاوِمة الأولى (V)
		V_o	فرق جهد البطّارية (V)
		R_1	المقاوِمة الأولى (Ω)
		R_2	المقاوِمة الثانية (Ω)
10-4	**فرق الجهد 2 للمقاوِمة الثانية**		
$V_2 = \frac{V_o R_2}{R_1 + R_2}$		V_2	فرق جهد المقاوِمة الثانية (V)
		R_1	المقاوِمة الأولى (Ω)
		V_o	فرق جهد البطّارية (V)
		R_2	المقاوِمة الثانية (Ω)

اشتقاق معادلات مُجزِّئ الجهد

يمكن اشتقاق المعادلتين 4-9 و 4-10 باستخدام قانون أوم. وبما أن الدائرة هي دائرة متصلة على التوالي، فإن مقاومتها الكلية تساوي $R = R_1 + R_2$

$$V_o = I_o R = I_o (R_1 + R_2) \quad \rightarrow \quad I_o = \frac{V_o}{(R_1 + R_2)}$$

وبما أن التيار المارّ بكلتا المقاومتين هو نفسه، فإن

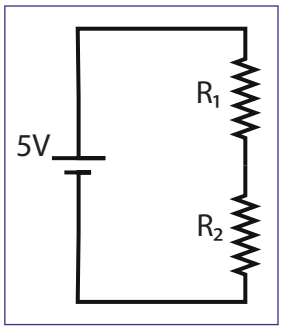
$$V_1 = I_o R_1 = \frac{V_o R_1}{(R_1 + R_2)} \qquad V_2 = I_o R_2 = \frac{V_o R_2}{(R_1 + R_2)}$$

نشاط عمليّ

a3-4 دائرة مُجزِّئ الجهد

سؤال الاستقصاء	كيف تتغيَّر قيمة الجهد الناتج بتغيير قيمة المقاومات؟
الموادّ المطلوبة	مقاومات (نفرض قيمها 75kΩ، 100 kΩ، 150 kΩ، 300 kΩ) مصدر طاقة ثابت الشدة (5V). حوامل للمقاومة ذات طرفين، ملتيميتر (مقياس متعدِّد) رقمي، 4 أسلاك توصيل.

الخطوات



الشكل 4-35

1. ضع كلًّا من المقاومتين في حاملة مقاومة، ثم قم بتوصيلهما، باستخدام أسلاك التوصيل، على التوالي، بمصدر الطاقة.
2. توقّع القيمة النظرية لفرق الجهد كل من المقاومتين الأولى والثانية، باستخدام المعادلتين 4–9 و 4–10 .
3. أدر مقبض الملتيميتر الرقمي إلى خانة الفولت، واختر القيمة المناسبة. ثم قِس فرق جهد مصدر الطاقة.
4. قِس فرق الجهد بين طرفَي كل مقاومة.
5. ضعِ النتائج التي حصلت عليها في الجدول.
6. أعد الخطوات من 1 إلى 4 لثلاث مجموعات مختلفة على الأقل من المقاومات.
7. جدول لإحدى المجموعات

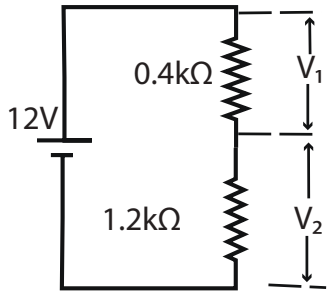
المقاومة(kΩ)	$R_1 =$	$R_2 =$	$R_1 + R_2 =$
فرق الجهد(V)	$V_1 =$	$V_2 =$	$V_0 =$

الأسئلة

a. ما الفرق بين القِيَم النظرية المتوقَّعة والقِيَم العملية؟ إذا كان هناك فرق، فما سببه؟
b. متى يمكن أن تكون كل من V_1 او V_2 مساوية لـ V_0؟ هل يمكنك اختبار ذلك؟
c. هل يمكنك التفكير في استخدام عملي لهذه الدائرة؟ يمكنك البحث عن ذلك إذا لزم الامر.
d. إذا كان لديك مصدر للطاقة قيمته 12V، ولديك مصباح كهربائي يحتاج إلى 3V لكي يعمل بشكل طبيعي. كيف يمكنك تشغيل هذا المصباح باستخدام دائرة مجزِّئ الجهد؟

مثال 9

وصلت دائرة مجزئ جهد مع مصدر طاقة فرق جهده (12 V)، أوجد قيمة فرق الجهد (V_1) وفرق الجهد (V_2) في الشكل المجاور.



المطلوب: $V_2 = ?\ V_1 = ?$

المُعطيات: $V_o = 12\ \text{V}$ ،$R_2 = 1.2\ \text{k}\Omega$ ،$R_1 = 0.4\ \text{k}\Omega$،

العلاقات:

$$V_1 = \frac{V_o R_1}{R_1 + R_2}; V_2 = \frac{V_o R_2}{R_1 + R_2}$$

الحل

$$V_1 = \frac{V_o R_1}{R_1 + R_2} = \frac{12(400)}{400 + 1200} = \frac{4800}{1600} = 3\text{V}$$

$$V_2 = \frac{V_o R_2}{R_1 + R_2} = \frac{12(1200)}{400 + 1200} = \frac{14400}{1600} = 9\text{V}$$

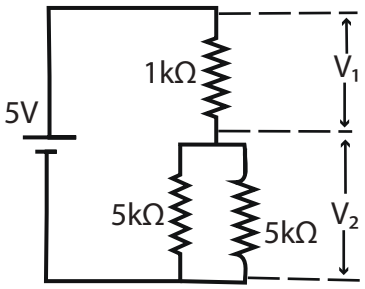
أو يمكن ايجاد V_2 بالطريقة التالية

$$V_o = V_1 + V_2$$

$$V_2 = 12\text{-}3 = 9\ \text{V}$$

مثال 10

أوجد قيمة فرق الجهد V_1 وفرق الجهد V_2 في دائرة مُجزِّئ الجهد في الشكل المجاور.



المطلوب: فرق الجهد V_1 وفرق الجهد V_2

المُعطيات: $V_o = 5\ \text{V}$ ،$R_1 = 1\ \text{k}\Omega$ ،$R_a = 5\ \text{k}\Omega$،

$R_b = 5\ \text{k}\Omega$

العلاقات:

$$V_1 = \frac{V_o R_1}{R_1 + R_2}; V_2 = \frac{V_o R_2}{R_1 + R_2}$$

الحل

الخطوة الأولى هي حساب قيمة المقاوَمة المُكافئة R_2 للمقاوِمتين المتَّصلتين على التوازي

$$\frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b} = \frac{1}{5{,}000\Omega} + \frac{1}{5{,}000\Omega}$$

$$\frac{1}{R_2} = \frac{2}{5{,}000\Omega} \Rightarrow R_2 = \frac{5{,}000\Omega}{2} = 2{,}500\Omega$$

الخطوة الثانية هي حساب V_1 باستخدام العلاقة:

$$V_1 = \frac{V_o R_1}{R_1 + R_2} = \frac{5\text{V}(1{,}000\Omega)}{1{,}000\Omega + 2{,}500\Omega} = \frac{5{,}000\text{V}\Omega}{3{,}500\Omega} = 1.43\text{V}$$

كذلك تحسب V_2 باستخدام المعادلة:

$$V_2 = \frac{V_o R_2}{R_1 + R_2} = \frac{5\text{V}(2{,}500\Omega)}{1{,}000\Omega + 2{,}500\Omega} = \frac{12{,}500\text{V}\Omega}{3{,}500\Omega} = 3.57\text{V}$$

تستطيع التأكُّد من إجاباتك بجمع V_1 و V_2

$$V_1 + V_2 = 1.43\text{V} + 3.57\text{V} = 5\text{V}$$

الإجابات صحيحة لأن جمع فرق الجهدين يساوي فرق جهد مصدر الطاقة.

ألا يحدث نقص في فرق الجهد في حقيقة الأمر؟ وهل الكفاءة تساوي100%؟

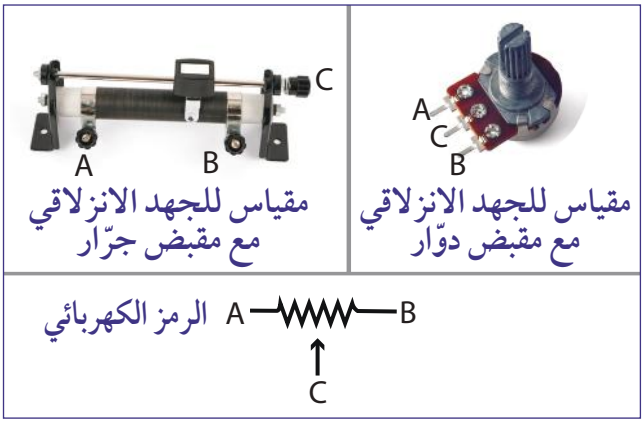
(ملحوظة: ماذا عن مقاومة الأسلاك الكهربائية؟)

المكوِّنات الكهربائية الأساسية

هناك عدّة مكوِّنات كهربائية يمكن استخدامها في الدوائر الكهربائية، لتزويدنا بالوظائف التي نبحث عنها. في ما يأتي بعض المكوِّنات الكهربائية الشائعة التي يمكن أن تعمل كدائرة مُجزِّئ جهد، أو تستخدم ضمن دائرة مُجزِّئ جهد.

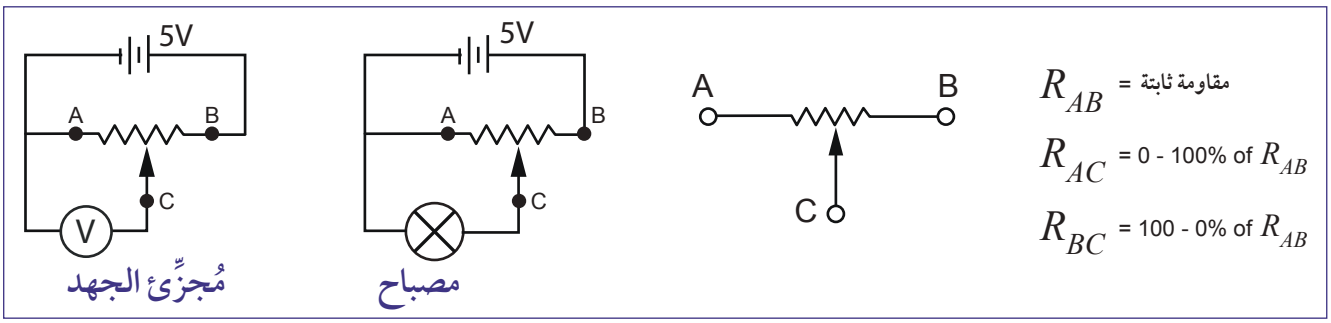
مقياس الجهد الانزلاقي

مقياس الجهد الانزلاقي Potentiometer هو مُجزِّئ جهد قابل للتعديل. وهو يتألف من ثلاثة أطراف ومقبض منزلق أو دوّار. يمكن رؤية الأطراف الثلاثة في **الشكل 4-36**.النقطتان A و B هما طرفا الجهاز الثابتان في حين أن النقطة C هي النقطة المتحرِّكة التي تقيس نسبة المقاومة بين طرفَي مقياس الجهد الانزلاقي.



الشكل 4-36 أنواع مقياس الجهد الانزلاقي.

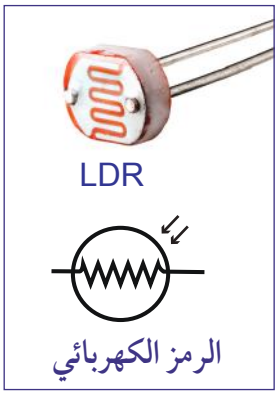
هناك ثلاث مقاومات متوافرة كما في **الشكل 4-37**. يجري توصيل مقياس الجهد الانزلاقي عادة بحيث يكون جهد المخرج عند النقطة C.



الشكل 4-37 مقياس الجهد الانزلاقي في الدوائر.

في دائرة مُجزِّئ الجهد يكون فرق الجهد بين النقطتين A و B مساويًا لجهد البطارية. يمكن تعديل قياس فرق جهد المخرج باستخدام الفولتميتر وذلك بضبط مقياس الجهد الانزلاقي، عبر تحريك المقبض. إذا كان توصيل المقبض C مع أقرب نقطة من الطرف A، فإن الفولتميتر يقيس أدنى قيمة لفرق الجهد الناتج. لكن إذا حرّكنا المقبض باتجاه النقطة B، فإن قيمة الجهد ستزداد. وعند الوصول إلى النقطة B فإن الفولتميتر سيقيس أعلى قيمة لفرق الجهد الناتج. كذلك يمكن استبدال الفولتميتر بمصباح كهربائي، حيث تتغير شدة الإضاءة بتحريك المقبض. ويمكن استخدام جهاز مقياس الجهد الانزلاقي في أجهزة أخرى، مثل المروحة ومكبِّر الصوت.

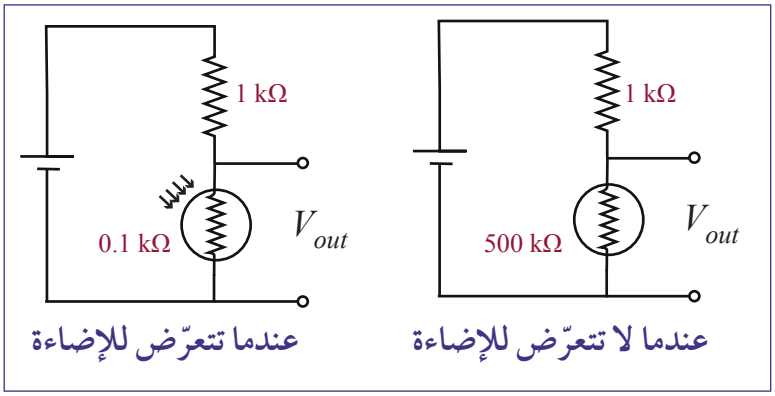
المُقاوِمات الضوئية (LDRs)



الشكل 4-38 مقاوِمة ضوئية

المقاوِمة الضوئية Light Dependent resistor (LDR)، تتغير بحسب شدة الضوء (**الشكل 4-38**). فهي عبارة عن أحد مكونات الدوائر الالكترونية وتتكون من أشباه الموصلات ذات مقاومة عالية، تعتمد قيمتها على شدّة الضوء. فكلما ازدادت شدة الإضاءة على سطح المقاوِمة الضوئية، تنخفض قيمة مقاوَمتها شيئًا فشيئًا، ما يسمح بمرور تيّار كهربائي أكبر. تستخدم المقاومة الضوئية في أجهزة المستشعرات الضوئية. تُحسَب قيمة المقاومة الضوئية في غياب الضوء بالميجا أوم (MΩ). عندما تتعرّض هذه المقاومة لأشعة الشمس، فإن مقاوَمتها تنخفض إلى حوالي Ω 100.

لنفرض أن دائرة مجزِّئ الجهد في (**الشكل 4-39**) مكوَّنة من مقاومة ثابتة متَّصلة على التوالي مع مقاومة ضوئية. ينقسم الجهد بينهما بحسب شدّة الضوء. إذا كانت شدة الضوء قوية، فإن قيمة المقاوِمة الضوئية ستنخفض، ما يؤدي إلى انخفاض فرق جهدها.



الشكل 4-39 مجزيء الجهد باستخدام المقاوِمة الضوئية

عندما تتعرّض الدائرة للضوء، فإن فرق جهد المخرج سينخفض، ذلك أن قيمة المقاوِمة الضوئية تُقدَّر بـ 9% من المقاومة الكلّية للدائرة. وعندما لا يكون هناك ضوء، فإن قيمة المقاوِمة الضوئية تكون مرتفعة، بحيث يصل فرق الجهد الناتج إلى 99% من قيمة فرق جهد البطارية.

تنخفض قيمة المقاومة الضوئية بزيادة شدة الضوء.

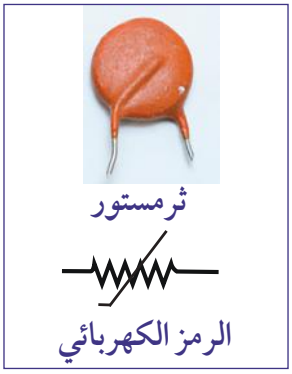
تطبيقات المقاومة الضوئيّة

تُستعمَل المقاومة الضوئية في دوائر كهربائية عدّة. يوضّح **الشكل 4-40** بعض الأجهزة التي تستخدم المقاومة الضوئية. يستخدم غطاء عدسة الكاميرا المقاومة الضوئية لضبط سرعة الغالق أوتوماتيكيًّا. ويضيئ مصباح الشارع وينطفئ أوتوماتيكيًّا، بحسب شدة أشعة الشمس. كذلك فإن الشاشات الحديثة تضبط الإضاءة أوتوماتيكيًّا.

الشكل 4-40 أجهزة تستخدم المقاومة الضوئية.

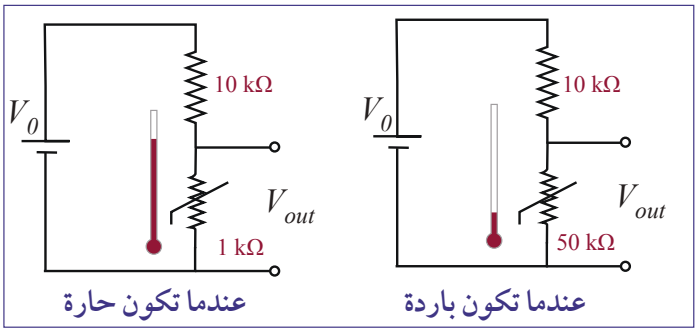
المقاوَمة الحرارية (الثرمستور)

المقاوَمة الحرارية Thermistor مقاوَمة تتغيَّر قيمتُها بتغيُّر درجة الحرارة كما في **الشكل 4-41**. هناك نوعان من المقاوَمة الحرارية: مقاومَة معامل درجة الحرارة السالب (NTC) ومعامل درجة الحرارة الموجب (PTC). تنخفض مقاوَمة (NTC) مع ارتفاع درجة الحرارة، بينما ترتفع مقاوَمة (PTC) مع ارتفاع درجة الحرارة. كلا النوعين يستخدمان في دوائر استشعار درجة الحرارة. سنتناول في هذا الكتاب مقاوَمة معامل درجة الحرارة السالب (NTC) فقط.



الشكل 4-41 الثرمستور.

(الشكل 4-42) يحتوي على مُجزِّئ جهد يتكوَّن من مقاوِمة ثابتة ومقاوِمة حرارية متصلتَين على التوالي. في هذه الحالة، ينقسم فرق الجهد بين المقاوِمتَين بحسب درجة الحرارة. تنخفض قيمة المقاوِمة الحرارية، وبالتالي ينخفض فرق جهدها، مع ارتفاع درجة الحرارة.



الشكل 4-42 مجزِّئ جهد يستخدم مقاوِمة حرارية.

فرق جهدها الناتج عند درجات الحرارة المرتفعة يتغيَّر بتغير النسبة بين المقاوَمة الحرارية والمقاوَمة الكلّية. في **الشكل 4-42** إذا كان $V_0 = 5V$، فإن فرق جهد المخرج V_{out} في حالة السخونة يساوي 0.45V، في حين أنه في حالة البرودة يساوي 4.12V.

$$V_{hot} = \frac{R_{hot}}{R} V_0$$

$$V_{hot} = \frac{1}{11}(5\ \text{V}) = 0.45\text{V} \qquad V_{cold} = \frac{50}{60}(5\ \text{V}) = 4.12\text{V}$$

تقلّ مقاوَمة المقاوِمة الحرارية ذات مُعامِل درجة الحرارة السالب مع ارتفاع درجة الحرارة.

تطبيقات المُقاوِمات الحرارية

توجد المقاوِمة الحرارية في فرن الميكروويف وإنذار الحريق، وحتى في مكيف الهواء كما في **الشكل 4-43**. أحد التطبيقات المهمّة للمقاوِمة الحرارية هي ضبط درجة حرارة الجهاز، ثم خفضها قبل أن تتعطّل. كذلك تستخدم المقاوِمة الحرارية في مراقبة درجة حرارة الزيت، والمبرّد في السيارة.

الشكل 4-43 أجهزة تستخدم المقاوِمة الحرارية.

مثال 11

صمّم دائرة كهربائية:

a. تضيء مصباحًا في الظلام.

b. تطلق صوت صافرة، عندما تصبح الأشياء ساخنة جدًّا.

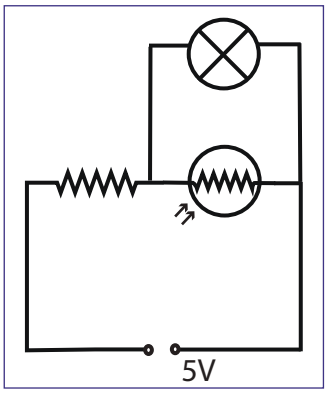
المطلوب: تصميم دائرة

المُعطيات: مصباح وصافرة

الحل

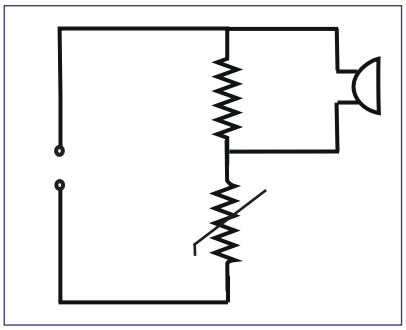
a. بما أننا نريد تصميم دائرة تعمل في الظلام، فإننا نحتاج إلى مقاوِمة ضوئية. نتذكَّر بأن فرق الجهد يتناسب طرديًّا مع المقاوَمة لذلك عندما تكون المقاوَمة مرتفعة يرتفع فرق الجهد بين طرفَي مقاوِمة متغيِّرة. علينا تحضير دائرة مجزِّئ جهد مكوَّنة من مقاوِمة ثابتة، بالإضافة إلى مقاوِمة ضوئية متَّصلة بمصدر طاقة فرق جهده 5V.

في حالة الظلام، تكون قيمة المقاوَمة الضوئية عالية جدًّا. وهذا يعني أن معظم فرق الجهد أيضًا سيكون بين طرفي المقاوِمة الضوئية ما يسمح للمصباح بالإضاءة. لكن إذا نقلنا الدائرة إلى مكان مضيء، فإن المصباح سينطفىء لأن قيمة المقاوَمة الضوئية تنخفض، الأمر الذي يؤدي إلى انخفاض فرق الجهد أيضًا. سيكون معظم فرق الجهد بين طرفَي المقاوِمة الثابتة، كما في **الشكل 4-44**.



الشكل 4-44 مجزِّئ الجهد مع المقاوِمة الضوئية.

b. نريد الآن أن تعمل الدائرة عند درجة حرارة مرتفعة. لذلك نحتاج إلى مستشعر حراري (المقاوِمة الحرارية ذات المُعامِل الحراري السالب). قيمة المقاوَمة الحرارية تكون عالية عندما تكون باردة. فإذا ارتفعت درجة حرارتها، تنخفض مقاومتها، بمعنى أن فرق الجهد سينخفض، وبالتالي يرتفع فرق الجهد المقاومة الثابتة، الأمر الذي يسمح للصافرة بأن تصدر الصوت (**الشكل 4-45**).

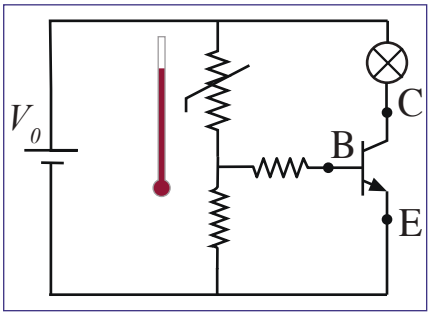


الشكل 4-45 مجزِّئ الجهد مع المقاومة الحرارية.

استخدامات الترانزستور في الدوائر الكهربائية

نتذكَّر أن الترانزستور يعمل كمفتاح كهربائي. عندما يكون فرق الجهد بين القاعدة والباعث أكبر من 0.6V، فإن المقاومة بين المجمّع والباعث، تكون منخفضة جدًّا.

الدائرة 1

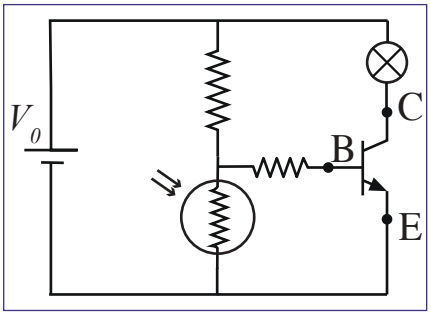


الشكل 4-46 مجزِّئ الجهد مع الترانزستور والمقاوِمة الحرارية.

لنفترض الدائرة في **الشكل 4-46**. عندما ترتفع درجة الحرارة، تتناقص قيمة المقاومة الحرارية، مسبّبة انخفاض فرق الجهد، ويؤدِّي ذلك إلى زيادة فرق جهد المقاوِمة الثابتة مسبِّبة زيادة الجهد V_{BE}، حيث تجعله أكبر من 0.6V. وهذا يعني أن الترانزستور يعمل ويسمح للتيار بالتدفُّق من المجمِّع إلى الباعث الأمر الذي يؤدي إلى إضاءة المصباح.

يمكن تطبيق هذه الدائرة في جهاز إنذار الحرائق، حيث يؤدي ارتفاع درجة الحرارة إلى إطلاق صافرة الإنذار. وكذلك يمكن استخدامها في الثلاجة، حيث يضاء مصباح الثلاجة عندما تكون درجة الحرارة مرتفعة جدًّا.

الدائرة 2



الشكل 4-47 مجزِّئ الجهد مع ترانزستور ومقاومة ضوئية.

لنفترض الآن الدائرة في **الشكل 4-47**، التي تحتوي على ترانزستور ومقاومة ضوئية. عندما لا يكون هناك ضوء، فإن الجهد V_{BE} يكون أكبر من 0.6V، فيعمل الترانزستور ويسمح للتيار بالمرور من المُجمِّع إلى الباعث، الأمر الذي يسمح بإضاءة المصباح. ويمكن استخدام هذه الدائرة أيضًا في الأجهزة التي نريدها أن تعمل في الظلام، كما في حالة الإضاءة الآلية.

لماذا نحتاج إلى الترانزستور؟

تعلّمنا ممّا سبق استخدام دائرة مُجزِّئ جهد مع ترانزستور أو من دونه، حيث تعمل الدائرة بطريقتين متشابهتين. فلماذا نستخدم الترانزستور إذاً؟

يحتاج الترانزستور إلى فرق جهد منخفض ليعمل (0.6 V بالضبط). وبما أن كثيرًا من أجهزة الحاسوب تعطي فرق جهد منخفض عند المخرج على شكل إشارات، فإن الترانزستور يُعدّ مثاليًّا في هذه الحالة. سوف نتعلم أكثر عن هذا في الدرس 4-4.

نشاط عملي

b3-4 استكشاف دوائر مُجزِّئ الجهد

سؤال الاستقصاء	استكشف كيف تعمل المُكوِّنات المختلفة في دائرة مُجزِّئ الجهد.
الموادّ المطلوبة	مصباح، مجفِّف شعر، مقاوِمات مختلفة ذات قيم ثابتة مثل100kΩ، 150kΩ، مقياس الجهد الانزلاقي، مقاومة ضوئية، مقاوِمة حرارية، مصدر للطاقة، ملتيميتر. (اختياريًّا: مصابيح وصافرات).

الخطوات

استخدام مُقاوِمة حرارية

وصِّل المقاوِمة الحرارية بمقاومة ثابتة 150 kΩ، لتشكِّل مُجزِّئ جهد بين طرفَيْ مصدر الطاقة.

1. وصِّل المصباح أو الصافرة على التوازي مع المقاومة الحرارية.
2. وصِّل الملتيميتر أو (الفولتميتر) بين طرفَي المقاوِمة الحرارية، وسجّل قراءته.
3. استخدم مجفِّف الشعر لرفع درجة حرارة المقاومة الحرارية ببطء. لاحظ تغيُّر قراءات الفولتميتر.
4. أعد الخطوتين 3و4 باحلال مقاومة ثانية 100kΩ محل المقاومة الثابتة.

الأسئلة

a. اشرح لماذا يؤدّي تغيُّر المقاومة إلى تغيُّر قراءة الفولتميتر؟
b. صف ماذا يحدث للمصباح أو الصافرة عند تغير درجة حرارة المقاومة الحرارية.
c. ماذا سيحدث لفرق جهد المقاومة إذا رفعنا درجة حرارة المقاومة الحرارية؟

استخدام مُقاوِمة ضوئية

1. وصِّل المقاوِمة الضوئية بمقاوِمة ثابتة 150kΩ لتشكل مجزِّئ جهد حول طرفَي مصدر الطاقة.
2. وصِّل الصافرة على التوازي مع المقاوِمة الضوئية.
3. وصِّل الملتيمتر (أو الفولتميتر) بين طرفَي المقاوِمة الضوئية.
4. أضيء المصباح، وقرّبهُ من المقاوِمة الضوئيّة. لاحظ تغيُّر قراءات الفولتميتر.

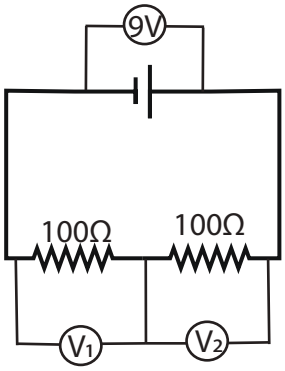
أعد الخطوات 3 و 4 باحلال مقاومة ثانية 100k Ω محل المقاومة الثابتة .

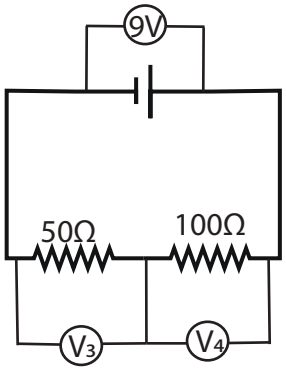
الأسئلة

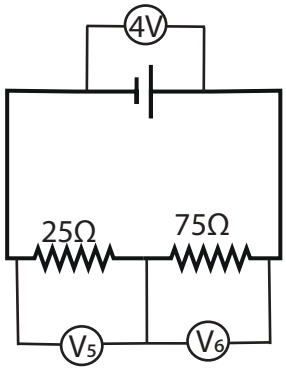
a. اشرح لماذا يؤدي تغيُّر المقاوِمة إلى تغيُّر قراءة الفولتميتر.
b. صف ماذا يحدث للمصباح أو الصافرة عند تغير درجة حرارة المقاومة الحرارية.
c. ماذا سيحدث لفرق جهد المقاوِمة إذا حرَّكنا الدائرة إلى مكان أشدّ إضاءة؟

تقويم الدرس 3-4

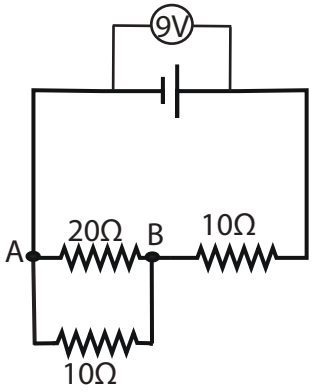
1. يمكن استخدام الدوائر الآتية كمجزِّئ للجهد. احسب قيمة فرق الجهد المجهول.

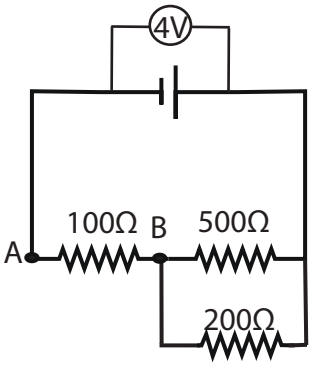


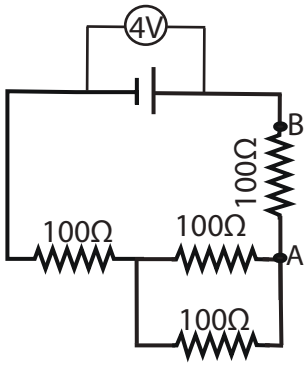




2. يمكن استخدام الدوائر الآتية كمجزِّئ للجهد. احسب فرق الجهد بين النقطتين A و B.







3. يُستخدم مصطلحا مقياس الجهد الانزلاقي ومُجزِّئ الجهد كمفهوم واحد في بعض الأوقات، بالرغم أنهما مختلفين.

a. عدّد أوجه الشبه بينهما.

b. عدّد أوجه الاختلاف بينهما.

4. المقاوِمتان الحرارية والضوئية مهمّتين جدًّا للدوائر التي تعمل ذاتيًّا. أنشىء رسمًا بيانيًّا لتعرض:

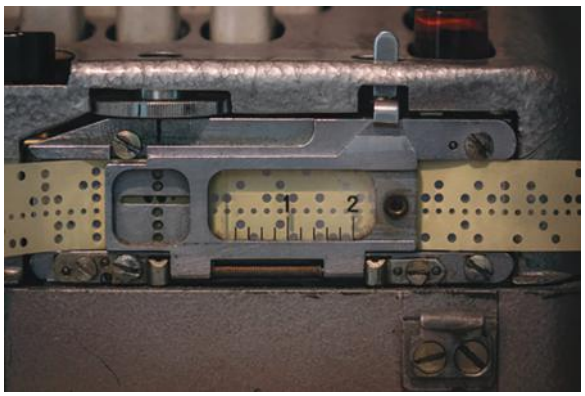
a. كيف تتغيَّر قيمة المقاوِمة الحرارية مع درجة الحرارة.

b. كيف تتغيَّر قيمة المقاوِمة الضوئية مع شدة الضوء.

5. صمِّم دائرة تحتوي على ترانزستور، تصدر إنذارًا صوتيًّا عندما يصبح زيت محرك السيارة ساخنًا جدًّا. تأكد من الرموز الكهربائية للأجزاء الداخلية والخارجية في الدائرة.

الدرس 4-4
البوابات المنطقية

يمكن لأجهزة الحاسوب التواصل فيما بينها وتنفيذ ملايين المهمّات المتكرِّرة في ثوانٍ. داخليًّا، تعمل أجهزة الحاسوب مع الجبر المنطقي، والبوابات المنطقية. جرى تطوير الجبر المنطقي في عام 1854 على يد جورج بول، عالم الرياضيات الإنجليزي. تُسمّى بعض العمليات الأساسية في الجبر المنطقي: AND و OR و NOT. كمثال على التطبيق المنطقي لـ AND المنطقي: إذا كانت العبارة 1 صحيحة، والعبارة 2 صحيحة، فيجب أن تكون 1 و 2 صحيحة أيضًا. في الوقت الحاضر، نستخدم المنطق نفسه لإنشاء بوابات منطقية رقمية تؤدّي وظائف مماثلة. توجد البوابات المنطقية داخل أجهزة الحاسوب، وتستخدم الجهد العالي والجهد المنخفض، لتمثيل الرقمَيْن 1 و 0.



الشكل 4-48 شريط مخرّم قديم لبرنامج حاسوب.

تُستخدَم العمليات المنطقية للتواصل والحساب في الدوائر المنطقية. عندما تم تطوير الجبر المنطقي لأول مرة، بدا ذلك عديم الفائدة تمامًا، ولكنه أصبح الآن أساسًا لكل جهاز تقريبًا مزوَّد بدائرة متكاملة.

يُظهر **الشكل 4-48** شريطًا مخرّمًا كان يستخدم في أجهزة الحاسوب القديمة، لتخزين البيانات بعد إجراء عمليات منطقية.

مخرجات التّعلُّم

P1111.3 يستخدم البوابات المنطقية (NOT وAND وOR وNAND وNOR) في الدوائر العملية ويحدد جداول الحقيقة لهذه البوابات بصورة منفردة أو مجمعة.

المفردات

بوابات منطقية	Logic gates
بوابة NOT	NOT Gate
جدول الحقيقة	Truth table
بوابة AND	AND Gate
بوابة OR	OR Gate
بوابة NAND	NAND Gate
بوابة NOR	NOR Gate
بوابة XOR	XOR Gate

البوّابات المنطقية

يجري إرسال البيانات أو المعلومات عبر أجهزة الحاسوب، من خلال سلسلة من الآحاد 1 والأصفار 0. تتعامل أجهزة الحاسوب، والأجهزة الذكية الأخرى، مع الأرقام 1 و 0 هذه بمساعدة **البوابات المنطقية Logic gates**. البوابات المنطقية هي دوائر رقمية مصنوعة من الترانزستورات والدايودات، تعمل عادة على مدخل أو مدخلين. تستوعب البوابات المنطقية إحدى القيمتين 0 و1 ثم تعالجها وتنتج 0 أو 1 عند المخرج. يمثّل 0 عادةً بجهد منخفض و1 بجهد مرتفع.

في الدوائر المنطقية، يُمَثَّل الجهد من 0 V إلى 0.8 V بصفر (0) ويُمَثَّل الجهد من 2V إلى 5V بواحد (1). تحتوي وحدة المُعالَجة المركزية الحديثة للحاسوب (CPU) على أكثر من مليار بوابة منطقية تسمح للحاسوب بأن يجمع ويقسم ويضرب ويتَّخذ القرارات.

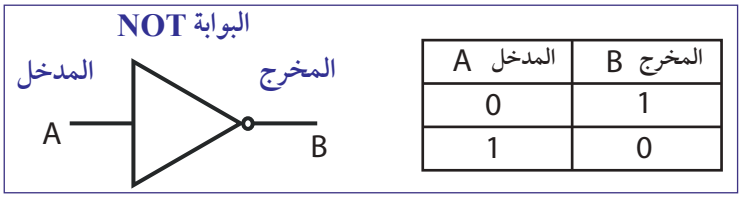
الشكل 4-49 الدوائر المتكاملة للبوابات المنطقية.

نجد البوابات المنطقية الفردية على شكل رُزَم في الدوائر المتكاملة (**الشكل 4-49**).

سندرس ست بوابات منطقية أساسية: NOT، AND، OR، NAND، NOR، و XOR.

البوابة NOT

تُعرَّف **البوابة NOT** أيضًا باسم العاكس. فهي تحتوي فقط على مدخل واحد. وظيفتها عكس إشارة المدخل. يظهر في **الشكل 4-50** رمز البوابة وجدول الحقيقة العائد إليها.



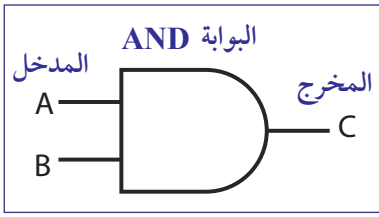
المدخل A	المخرج B
0	1
1	0

الشكل 4-50 جدول الحقيقة للبوابة NOT ورمزها.

جدول الحقيقة هو جدول يمثل جميع المداخل والمخارج الممكنة. يوضِّح جدول الحقيقة للبوابة NOT الآتي: عندما تكون إشارة المدخل 0، يكون المخرج 1. إذا كانت إشارة المدخل 1، يكون المخرج 0.

البوابة AND

تحتوي **البوابة AND** عادةً على مدخلين A وB، وقد تحتوي على أكثر من ذلك. كما يوحي الاسم، يكون المخرج (C) 1 إذا كان كلا المدخلين (A) و (B)1. في أي سيناريو آخر، يكون المخرج 0 (**الشكل 4-51**).

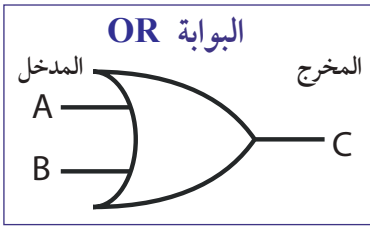


المدخل A	المدخل B	المخرج C
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

الشكل 4-51 رمز البوابة AND وجدول الحقيقة الخاص بها.

البوابة OR

تحتوي **البوابة OR** عادةً على إشارتي مدخل (وقد تحتوي أكثر من ذلك)، ووظيفتها مشابهة جدًا لاسمها. يجب أن يكون للمدخل A أو المدخل B أو كلاهما إشارة 1 ليكون، المخرج 1. إذا كان كلا المدخَلين يساوي 0، يكون المخرج 0 (**الشكل 4-52**).

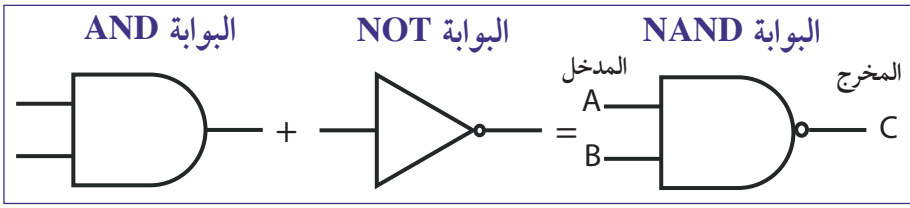


المخرج C	المدخل B	المدخل A
0	0	0
1	1	0
1	0	1
1	1	1

الشكل 4-52 رمز البوابة OR وجدول الحقيقة الخاص بها.

البوابة NAND

تحتوي **البوابة NAND** أيضًا على إشاراتي مدخل (وقد تحتوي أكثر من ذلك). البوابة NAND هي عبارة عن البوابة AND مزودة بعاكس (بوابة NOT) يليها (**الشكل 4-53**). يوضح جدول الحقيقة الأمر الآتي: عندما تكون إشاراتا المدخل A و B، 1 يكون المخرج 0. وفي جميع الحالات الأخرى، يكون المخرج 1.

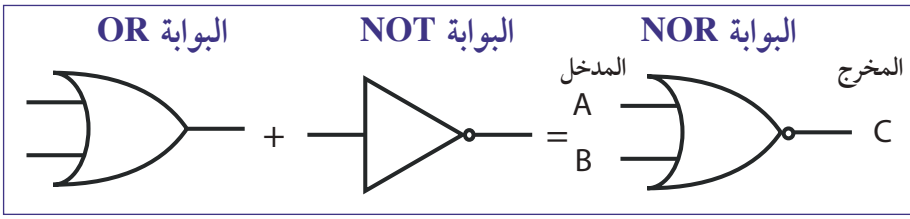


المخرج C	المدخل B	المدخل A
1	0	0
1	1	0
1	0	1
0	1	1

الشكل 4-53 رمز البوابة NAND وجدول الحقيقة الخاص بها.

البوابة NOR

البوابة NOR هي البوابة OR مع عاكس (بوابة NOT) يليها (**الشكل 4-54**). ويتَّضح من جدول الحقيقة، الأمر الآتي: إذا كان أي من المدخلين A أو B أو كلاهما هو 1، يكون المخرج 0. يجب أن يكون كلا المدخلين 0 لإشارة مخرج 1.

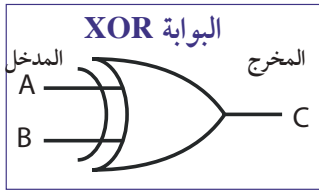


المخرج C	المدخل B	المدخل A
1	0	0
0	1	0
0	0	1
0	1	1

الشكل 4-54 رمز البوابة NOR وجدول الحقيقة الخاص بها.

البوابة XOR

تعني **البوابة XOR** «حصريًّا» البوابة OR (**الشكل 4-55**). وعلى غرار بوابة OR، يحتاج أي من المدخَلين A و B إلى وجود إشارة 1 ليكون المخرج 1، مع ذلك، إذا كان لكل من المدخَلين إشارة 1، يكون المخرج 0. وبعبارة أخرى، يجب أن تكون إشارتا المدخَلين مختلفتَيْن لتكون إشارة المخرج 1. يكون مخرج المدخَلين المتماثلين 0.



المخرج C	المدخل B	المدخل A
0	0	0
1	1	0
1	0	1
0	1	1

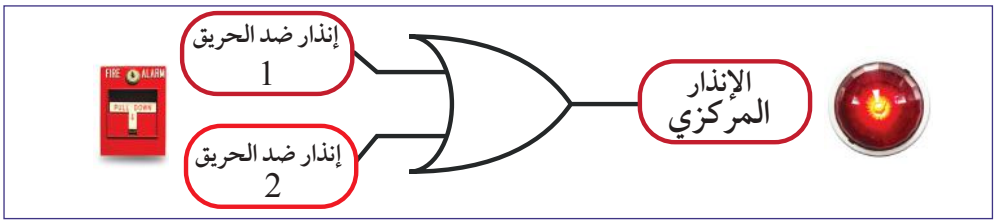
الشكل 4-55 رمز البوابة XOR وجدول الحقيقة الخاص بها.

تطبيقات البوابات المنطقية

تساعدنا جداول الحقيقة على تحديد أي بوابة منطقية يجب استخدامِها وأين. تُستخدَم البوابات المنطقية الأساسية في العديد من الدوائر الشائعة، مثل أنظمة الإقفال، وأجهزة الإنذار ضد السرقة، وثرموستات السلامة، وأنظمة الري الأوتوماتيكية، وما إلى ذلك. يجري تصنيع العديد من الدوائر المُعقَّدة أيضًا باستخدام البوابات المنطقية. فهي تسهم في العمليات الحسابية، وتحليل البيانات المهمة. نبيّن أدناه بعض التطبيقات البسيطة.

نظام الإنذار ضد الحريق، باستخدام البوابة OR

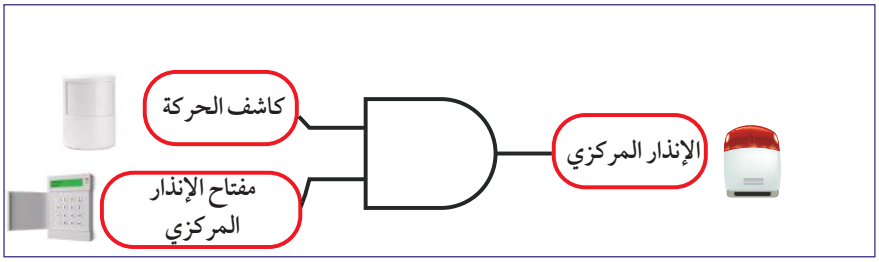
افترض وجود جهازي إنذار ضد الحريق (أو أكثر) في مبنى ما، وكل منهما مرتبط بجهاز الإنذار ضد الحريق المركزي. إذا سُحِب أيٌّ من جهازي الإنذار ضد الحريق، ينطلق نظام الإنذار المركزي، الأمر الذي يؤدي إلى إرسال إشارة بصوت عال، وتشغيل ضوء الطوارئ. في هذه الحالة، البوابة OR وحدها تفي بالغرض. ينبغي أن يكون أحد المدخلين فقط رقمه 1. ولكن حتى إذا جرى سحبهما معًا، فإن النظام يعمل أيضًا (**الشكل 4-56**).



الشكل 4-56
نظام إنذار ضد الحريق.

نظام الإنذار ضد السرقة باستخدام بوابة AND

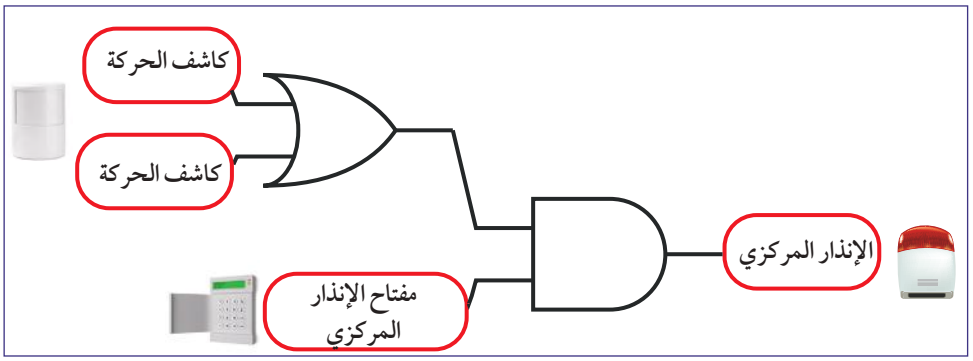
يتكوَّن الإنذار النموذجي ضد السرقة من مفتاح مركزي. يُشغَّل الإنذار عادة أثناء الليل، يشتمل النظام على كاشف للحركة، ويعمل الإنذار المركزي عند تشغيل المفتاح ومرور أي شخص أمام كاشف الحركة (**الشكل 4-57**).



الشكل 4-57 نظام الإنذار ضد السرقة.

نظام الإنذار ضد السرقة باستخدام البوابة AND والبوابة OR

يمكن أن يتكون نظام الإنذار ضد السرقة الأكثر تطوراً من مفتاح مركزي واثنين من كاشفي الحركة المنفصلين. في حالة عبور أحد ما أمام كاشف الحركة وتشغيل المفتاح، سيصدر نظام الإنذار المركزي صوت تحذير. لذا، تحتاج هذه الدائرة إلى بوابة OR وبوابة AND (**الشكل 4-58**).



الشكل 4-58 نظام الإنذار ضد السرقة باستخدام كاشفين.

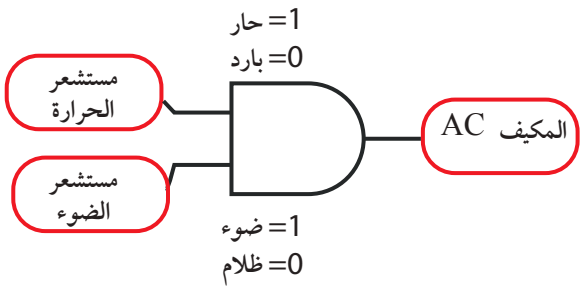
مثال 12

صمِّم دائرة باستخدام بوابات منطقية، تقوم بتشغيل مكيِّف (AC)، عندما يكون الجو حارًّا خلال النهار.

المطلوب: تصميم الدائرة

الحل:

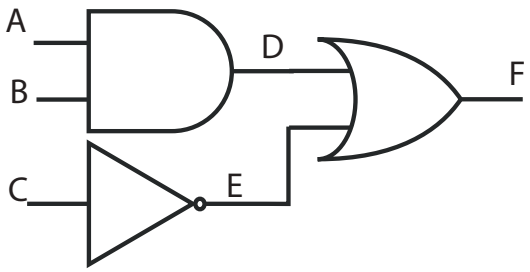
1. لتصميم دائرة، يجب علينا أولاً تحديد المستشعرات التي نحتاج إليها، وما يجب أن تكون عليه المداخل والمخارج. تحتاج الدائرة إلى استكشاف الحرارة والضوء، لذلك نحن بحاجة إلى مستشعر للحرارة، ومستشعر للضوء.
2. وبما أن لدينا مدخلين اثنين ومخرَجًا واحدًا، يمكننا بسهولة كتابة جدول الحقيقة.
3. عندما يرسل مستشعر الحرارة إشارة 1، ويرسل مستشعر الضوء إشارة 1، يجب تشغيل المكيِّف (AC). هذا يعني أنه عندما يكون كلا المدخلين A و B قيمته 1، يكون المخرج أيضًا 1. لدينا بوابة واحدة بإمكانها القيام بذلك فعلًا هي بوابة AND.



مستشعر الحرارة	مستشعر الضوء	اشغال المكيف AC
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

مثال 13

أنشئ جدول حقيقة للدائرة المُقابِلة.



المطلوب: إنشاء جدول الحقيقة.

الحل:

المداخل			المخارج		
A	B	C	D	E	F
0	0	0	0	1	1
0	0	1	0	0	0
0	1	0	0	1	1
0	1	1	0	0	0
1	0	0	0	1	1
1	0	1	0	0	0
1	1	0	1	1	1
1	1	1	1	0	1

الخطوة 1 الخطوة 2 الخطوة 3 الخطوة 4

لإنشاء جدول الحقيقة لدائرة تحتوي على بوابات متعدِّدة، نحتاج إلى إيجاد حل المخرج لكل بوابة على حدة.

الخطوة 1: أولاً، اكتب جميع تركيبات المداخل الممكنة.

الخطوة 2: بعد ذلك، أوجد مخرج D للبوابة AND من خلال النظر إلى المدخلين A وB.

الخطوة 3: اعكس المدخلC، إلى المخرج E.

الخطوة 4: بما أن D وE هما مدخلان للبوابة OR، حُلَّ المخرج F.

نشاط عمليّ

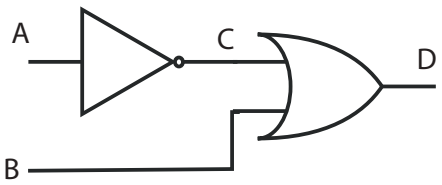
4-4 الدوائر المنطقية

سؤال الاستقصاء	حاول إجراء تركيبات مختلفة من البوابات لإنتاج مخرجات مختلفة.
الموادّ المطلوبة	مفاتيح المداخل (كمفاتيح التبديل) المتصلة ببطارية، وصلة ثنائية باعثة للضوء LED، بوّابات منطقية مختلفة.

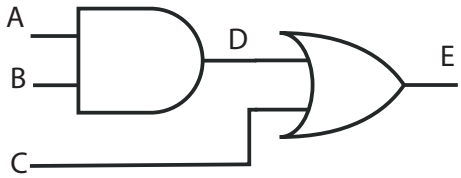
خطوات التّجربة

1. وصِّل البطارية بالمفاتيح.
2. قم ببناء الدائرة 1 ووصِّل كل مدخل بمفتاح لكي تتمكَّن من التحكُّم في المداخل.
3. قم بتوصيل المخرج بالوصلة الثنائية الباعثة للضوء LED.
4. اجعل جميع المداخل صفرًا 0. كيف يكون مخرج الوصلة الثنائية الباعثة للضوء LED؟ إذا أضاءت الوصلة الثنائية الباعثة للضوء LED، تكون القراءة 1.
5. جرِّب جميع تركيبات المداخل الواردة في ورقة العمل. قم بملء الجدول.
6. كرِّر الخطوات من 1 إلى 5 للدوائر المتبقية.

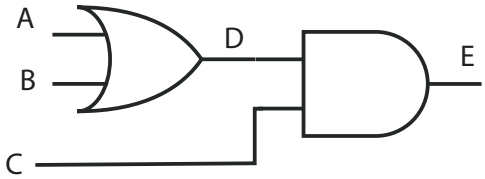
الدائرة 1



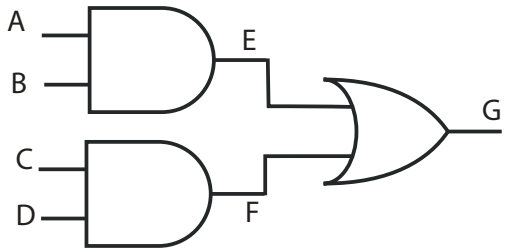
الدائرة 2



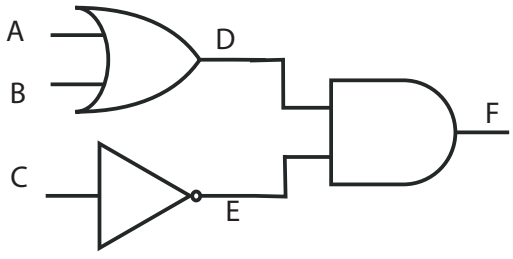
الدائرة 3



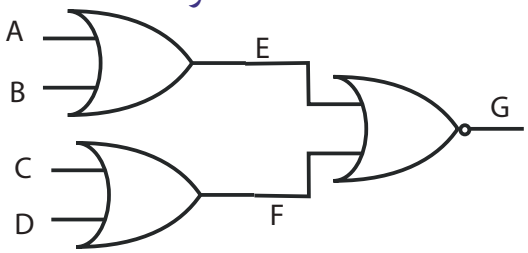
الدائرة 4



الدائرة 5

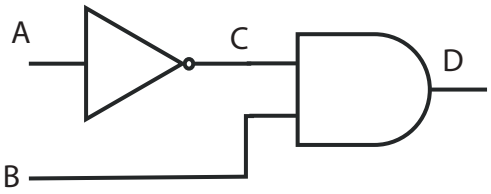


الدائرة 6



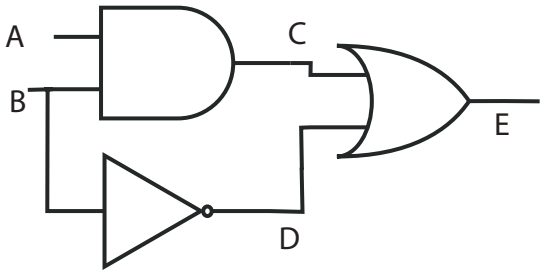
تقويم الدرس 4-4

1. أنشىء جدول الحقيقة للدائرة الآتية:



2. كيف يمكن تحويل بوابة NAND إلى بوابة NOT؟

3. افترض الدائرة الآتية:



a. ما الخطأ في توصيل الدائرة؟

b. أنشىء جدول الحقيقة لهذه الدائرة بعد التعديل.

4. تتمثل إحدى طرق التفكير بوظيفة بوابة المنطق الأساسية في النظر إلى حالة المدخل الفردية التي تضمن حالة مخرج معيّنة. يمكننا، مثلًا، وصف وظيفة بوابة OR على النحو الآتي: «أي مدخل عال يضمن مخرجًا عاليًا». حدِّد أي نوع بوابة منطقية تمثِّلها كل من العبارات الآتية:

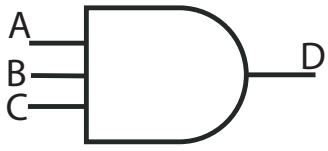
a. أيّ مدخل مرتفع يضمن مخرجًا منخفضًا.

b. أيّ مدخل منخفض يضمن مخرجًا مرتفعًا.

c. أيّ مدخل منخفض يضمن مخرجًا منخفضًا.

(ملاحظة: انظر إلى جداول الحقيقة لكل بوابة)

5. جرى بناء العديد من أنواع دوائر البوابات المنطقية باستخدام أكثر من مدخلين. ذلك مفيد جدًّا، بل ضروري، في بعض تطبيقات الدوائر الرقمية. أنشىء جدول الحقيقة للبوابة مع مداخل للبوّابة AND.



ضوء على العلماء

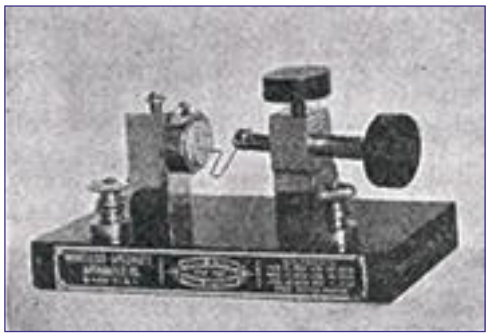
جاجاديش تشاندرا بوز (1858-1937)

الشكل 4-59 تمثال جاجاديش تشاندرا بوز في كامبريدج.

كان أول جهاز شبه موصل حصل على براءة اختراع عام 1901 من اختراع العالم البنغالي جاجاديش تشاندرا بوز المولود في 3 نوفمبر 1858. تلقّى بوز معظم تعليمه في مدينة كلكتا في الهند. وسافر في وقت لاحق إلى بريطانيا لمتابعة التعليم العالي؛ فحصل على درجة البكالوريوس من جامعة كامبريدج وعلى درجتي الماجستير والدكتوراه من جامعة لندن.

كان العديد من الفيزيائيين يعملون، في أواخر القرن التاسع عشر، على الإشعاع الكهرومغناطيسي. تابع بوز بحوثه في المجال نفسه، فقصَّر من طول الموجة الميكروية كي يتمكَّن من دراسة خصائصها المشابهة للضوء. أشعل بوز عام 1894 ملح البارود، وقرع جرس من مسافة باستخدام الموجات الميكروية. وأطلق على تلك الموجات تسمية «الضوء غير المرئي» وكتب: «يمكن للضوء غير المرئي أن يمر بسهولة من خلال جدران الطوب وجدران المباني وسواهما. لذلك يمكن إرسال الرسائل عن طريقه من دون الحاجة إلى أسلاك». بدأ بوز، بعد ذلك، بدراسة تأثير الاستقطاب على الضوء في بعض محاليل السكَّر. استخدم وصلات من أشباه الموصلات ككواشف. بعد ذلك، حصل على براءة اختراع أشباه الموصلات، ووصف خصائصها بأنها لا تتبع قانون أوم. حيث استخدم قطعة من المعدن البلوري تسمّى «الجالينا»، وهي كبريتيد الرصاص.

طُوِّر شبه موصل بوز هذا فيما بعد، إلى مكوّن عملي للمذياع (الراديو) طوّره ج. و. بيكارد عام 1906، وكان يعرف باسم كاشف شارب القط وهو يتكوّن من قطعة صغيرة من المعدن البلوري يلامس سطحها سلك معدني ناعم وقد شكّلت نقطة الاتّصال غير المستقرة هذه وصلة بين شبه موصل ومعدن. كان السلك الناعم يُعرَف باسم المصعد (الأنود) والبلورة الصغيرة بالمهبط (الكاثود). وكان هذا أول كاشف بلوري يجري إنتاجه تجاريًا.



الشكل 4-60 كاشف شارب القط المصنوع من البايريت عام 1914.

الوحدة 4

مراجعة الوحدة

الدرس 4-1: المكثِّفات

المكثِّف: جهاز يختزن الطاقة الكهربائية، ويتكوَّن من موصِّلين تفصل بينهما مادة عازلة.

السِّعة: هي قدرة المُكثِّف على تـخزيـن الشحنة الكهربائية، وتقاس بوحدة الفاراد F.

الثابت الزمني: هو الزمن المُستغرق لشحن المُكثِّف بنسبة 63%.

الدرس 4-2: أشباه الموصلات

الموصل الكهربائي: مادّة تسمح للتيار الكهربائي بالتدفُّق خلالها بسهولة.

العازل الكهربائي: مادة لا تسمح للتيار الكهربائي أن يتدفَّق خلالها بسهولة.

المقاومة النوعية: هي خاصية للمادة تحدد قدرتها على السماح بمرور التيار الكهربي خلالها.

أشباه الموصلات: هي المواد التي تقع بين الموصلات والعوازل، وفيها عدد قليل جدًا من الإلكترونات الحرة. وتزداد موصليتها بإضافة الشوائب إليها. ويوجد نوعان من أشباه الموصلات: أشباه الموصلات من النوع n (التي تكون حاملات الشحنة الاغلبية فيها هي الألكترونات) وأشباه الموصلات من النوع p (التي تكون حاملات الشحنة الاغلبية فيها هي الفجوات).

الترانزستورات والدايودات: تستخدم عادة في أجهزة أشباه الموصلات، وتتكوَّن من وصلات p-n.

الدرس 4-3: مجزّئ الجهد

مجزِّىء الجهد: دائرة تُستَخدم فيها المُقاومات لتجزئة القيم الكبيرة لفرق الجهد إلى فروق جهد أصغر.

مقياس الجهد الانزلاقي: جهاز يعمل مثل مجزِّىء الجهد بمقاومة متغيرة.

المقاوِمات الضوئية (LDR): والمقاومات الحرارية (الثرمستور): مقاوِمات خاصة تختلف في مقاوَمتها بحسب الضوء الساقط عليها، أو درجة حرارتها. توجد هذه المقاوِمات في العديد من دوائر التحكم للأجهزة الأوتوماتيكية.

الدرس 4-4: البوابات المنطقية

- **البوابات المنطقية:** مكوِّنات رقمية تعمل على إدخال إحدى إشارتي «1» أو «0» (إشارة «تشغيل» أو إشارة «إيقاف»).
- **البوابات المنطقية الأساسية** هي: بوابة NOT، وبوابة AND، وبوابة OR، وبوابة NAND، وبوابة NOR، وبوابة XOR.
- **جدول الحقيقة:** جدول يستخدم لبيان جميع المداخل والمخارج الممكنة من البوابات المنطقية والدوائر التي تحتوي على البوابات المنطقية.

اختيار من مُتعدّد

1. ماذا تُسمّى المادة التي توصل التيار الكهربائي بسهولة؟
   a. موصلًا
   b. عازلًا
   c. شبه موصل
   d. شبه موصل فائقًا

2. يظهر أدناه جدول الحقيقة لبوابة منطقية. ما نوع البوابة المنطقية هذه؟

المدخل أ	المدخل ب	المخرج
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

   a. AND
   b. NOR
   c. NOT
   d. OR

3. ما الجهاز الذي يسمح للتيار الكهربائي المستمر بالتدفق من خلاله، ويقوّم التيار المتردِّد؟
   a. الدايود
   b. المكثِّف
   c. المقاوِمة
   d. الترانزستور

4. ما السعة المكافئة للمكثِّفات المتصلة على التوازي؟
   a. حاصل ضرب سعات المكثِّفات الفردية.
   b. مجموع سعات المكثِّفات الفردية.
   c. مقلوب حاصل جمع مقلوب سعات المكثِّفات.
   d. مقلوب حاصل ضرب سعات المكثفات الفردية.

5. ما السعة المكافِئة للمكثِّفات المتصلة على التوالي؟

a. مجموع سعات المكثِّفات الفردية.

b. مثل مقدار المقاومة المكافئة للمقاومات المتَّصلة على التوالي.

c. مقلوب حاصل جمع مقلوب سعات المكثِّفات الفردية.

d. مقلوب حاصل ضرب سعات المكثفات الفردية.

6. قيمة مقدارها $1\ \mu F$ ما مقدراها بوحدة الفاراد؟

a. 10^{-2} F **c.** 10^{-6} F

b. 10^{-4} F **d.** 10^{-12} F

7. ماذا تُسمّى غالبية النواقل في السيليكون المعالَج بشوائب من الفوسفور؟

a. الفجوات **c.** الإلكترونات

b. البروتونات **d.** النيوترونات

8. ماذا تُسمّى غالبية النواقل في شبه الموصِّل من النوع الموجب؟

a. الفجوات **c.** الإلكترونات

b. البروتونات **d.** النيوترونات

9. عَلامَ يعتمد فرق الجهد الناتج في مجزّئ الجهد ؟

a. التيار الكهربائي **c.** المقاوَمة المفردة

b. درجة الحرارة **d.** القيَم النسبية لجميع المقاوَمات

10. كم تكون السعة الكهربائية لِمُكثِّف إذا كانت الشحنة المختزنة على ألواحه كبيرةعند فرق جهد معلوم؟

a. صفرًا **c.** كبيرة

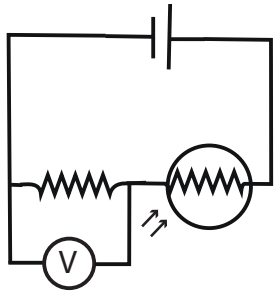
b. صغيرة **d.** لانهائية

11. كم تكون الطاقة المختزنة في مكثِّف سعته $2000\ \mu F$ ومشحون بفرق جهد 10 V؟

a. 0.10 J **c.** 1.3 J

b. 0.12 J **d.** 3 J

12. يبيّن الشكل دائرة كهربائية. إذا كانت شدة الضوء الساقط على المقاومة الضوئية (LDR)تزداد، فماذا يحدث لكل من مقاوَمة LDR وتيار المقاوِمة الثابتة، وقراءة الفولتميتر؟



	مقاوَمة LDR	تيار المقاوِمة الثابتة	قراءة الفولتميتر
a.	تنقص	يزيد	تنقص
b.	تنقص	يزيد	تزيد
c.	تزيد	ينقص	تنقص
d.	تزيد	ينقص	تزيد

13. ما مجموع الشحنة على لوحي مكثّف مشحونين بشحنتين مختلفتين؟

a. صفرًا **c.** كبيرًا

b. صغيرًا **d.** لانهائيًّا

الدرس 4-1: المكثفات

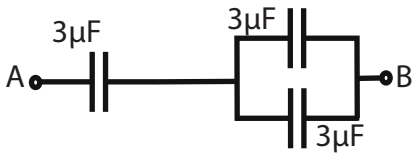
14. مُكثِّف سعته $1{,}000\mu F$، جرى توصيله على التوالي بمقاوِمة.

a. ما الثابت الزمني للمكثِّف، عند تفريغه في مقاوَمة $100k\Omega$؟

b. إذا كان المكثِّف متَّصلاً ببطارية 3V، فما أقصى شحنة يمكن أن تُختزَن عليه؟

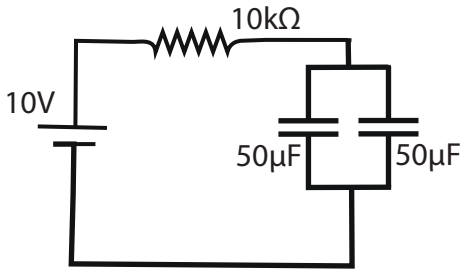
15. ثلاثة مكثِّفات متماثلة ومتصلة، كما هو مبيَّن في الشكل.

احسب السعة المكافئة بين النقطتين A و B.



16. أنشىء رسمًا تخطيطيًا، يمكِّنك من الحصول على سعة مكافئة مقدارها $2.0\ \mu F$، باستخدام أربعة مكثفات، سعة كل منها $2.0\ \mu F$.

17. احسب الشحنة الكلّية المختزنة في الدائرة الكهربائية في الشكل.



18. معادلة الثابت الزمني هي $\tau = RC$. أثبت أن وحدة هذا الثابت هي s.

19. واحدة من معادلات الطاقة المختزنة في مكثِّف، هي:

$$E = \frac{1}{2}QV$$

حيث Q الشحنة المختزنة، وV فرق الجهد عبر المكثّف. بيّن أن هناك تعبيرين آخرين للطاقة المختزنة، هما:

$$E = \frac{1}{2}CV^2$$

$$E = \frac{Q^2}{2C}$$

حيث C هي سعة المكثّف.

الدرس 4-2 أشباه الموصلات

20. بلورات السيليكون هي أشباه موصلات توصل الكهرباء عند وجود شوائب. اشرح لماذا لا تستطيع بلورات السيليكون توصيل الكهرباء من دون وجود شوائب.

21. الفلّزات تفوق المواد الأخرى في توصيل الكهرباء. وضّح سبب ذلك باستخدام ما تعرفه عن التركيب الذرّي للفلّزات.

22. عرّف المفردتين الآتيتين:

a. الموصلية

b. المقاومة النوعية

23. توجد في الترانزستورات والديودات منطقة، تسمّى منطقة النضوب.

a. عرّف منطقة النضوب.

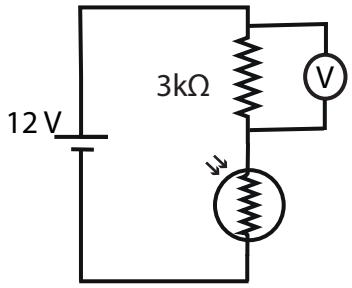
b. اشرح كيف تكوَّنت منطقة النضوب تلك.

24. يتكوّن مقوّم القنطرة من ديودات متّصلة، على شكل حلقة. أنشىء رسمًا بيانيًّا يبيّن التيار بعد مروره من دائرة مقوّم القنطرة.

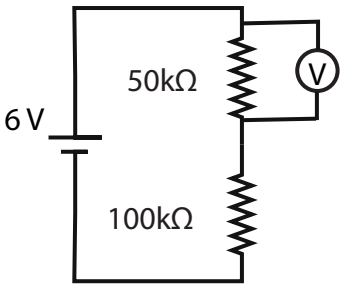
الدرس 3-4 مجزّئ الجهد

25. لخِّص الفرق بين المقاوَمة الحرارية (الثرمستور) NTC والمقاوَمة الحرارية PTC. ضمّن إجابتك رسمًا تخطيطيًّا لكل من المقاومتين الحراريتين، ورسمًا بيانيًّا لفرق الجهد مقابل درجة الحرارة لكلٍّ منهما.

26. باعتماد دائرة مجزِّىء الجهد المعطاة في الشكل، اشرح الشرط المطلوب للحصول على فرق جهد عالٍ على الفولتميتر.



27. تتّصل مقاوِمة 50 kΩ ومقاوِمة 100 kΩ، على التوالي، ببطارية قوّتها الدافعة الكهربائية 6.0 V، ويتّصل الفولتميتر بين طرفَي المقاوِمة 50 kΩ. احسب قراءة الفولتميتر.

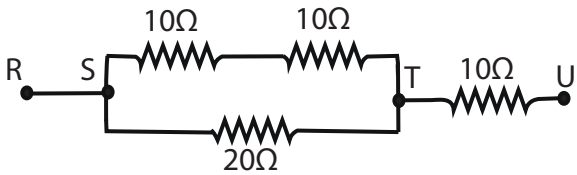


28. ما الفائدة من استخدام المقاوِمة الضوئية (LDR) والمقاوِمات الحرارية (الثرمستورات) والمقاوِمات المتغيّرة في هذه الأيام.
اذكر كل واحدة منها مع فوائدها وقدِّم تحليلًا عامًا لسبب توجُّه العالَم نحو التشغيل الأتوماتيكي أيضًا.

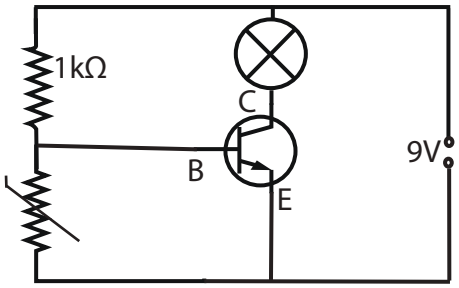
29. ادرس الدائرة الكهربائية المجاورة. إذا كان فرق الجهد بين النقطتين S و T يساوي 9 V، جد فرق الجهد:

بين النقطتين R و U

بين النقطتين T و U



30. مقاوِمة حرارية (ثرمستور) مقاوَمتها في دائرة كهربائية معيَّنة عند درجة حرارة 20°C، تبلغ 800Ω، ومقاومتها عند درجة حرارة 100°C تبلغ 25Ω. اشرح ما يحدث في الدائرة الكهربائية من حيث فرق الجهد بين طرفي الثرمستور، عندما تتغيّر درجة الحرارة من 20°C إلى 100°C. اقترح أيضًا استخدامًا عمليًّا لهذه الدائرة.



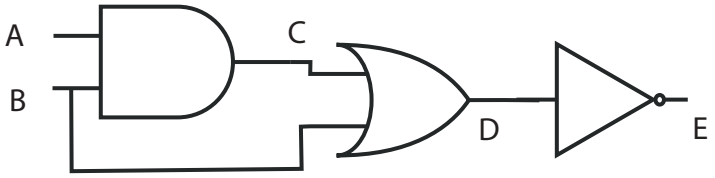
الدرس 4-4: البوّابات المنطقية

31. ليس لكل البوابات المنطقية مدخلان؛ فبعض البوابات لها ثلاثة مداخل لكنها تؤدّي الوظائف المنطقية نفسها.

a. أنشيء جدول الحقيقة للبوابة NOR ذات ثلاثة مداخل.

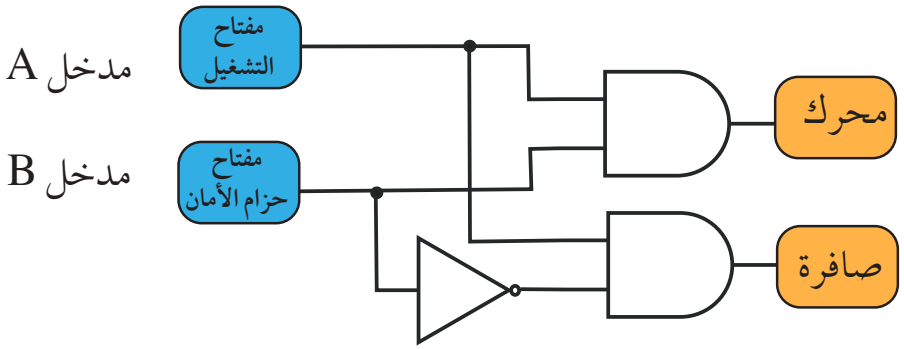
b. أنشيء جدول الحقيقة للبوابة NAND ذات ثلاثة مداخل.

32. أعد الرسم وأكمل جدول الحقيقة للنظام الموضح في الشكل:



المدخل A	المدخل B	المخرج C	المخرج D	المخرج E

33. يبيّن الرسم التخطيطي نظامًا للتنبيه إلى ربط حزام الأمان، والمطلوب تركيبه في سيّارة.



أعد الرسم، وأكمل جدول الحقيقة لهذا النظام:

المدخل A	المدخل B	المحرّك	الصافرة

34. استخدم جدول الحقيقة المكتمل في السؤال 33، لتحديد أي العبارات صحيحة وأيُّها خطأ.

a. لا يمكن أن يصدر صوت الصافرة إذا كان المحرِّك مُطفأ.

b. لا يمكن تشغيل كل من صوت الصافرة والمحرِّك في الوقت نفسه.

c. يمكن تشغيل المحرِّك وحزام الأمان غير مربوط.

d. يصدر صوت الصافرة فقط، عندما لا يكون حزام الأمان مربوطًا.

35. صمِّم دائرة كهربائية عملية تستخدم بوابة ذات ثلاثة مداخل، واذكر أين يمكن أن تُستخدم.

36. يعطي مقياس درجة الحرارة الكهربائي في مصنع، مخرج «0»، إذا كانت درجة الحرارة منخفضة جدًّا. ويعطي مستشعر الرطوبة في المصنع نفسه، مخرج (1)، إذا كانت نسبة الرطوبة في المصنع مرتفعة جدًّا. ويصدر صوت تنبيه، عندما تكون درجة الحرارة منخفضة جدًّا ونسبة الرطوبة مرتفعة جدًا. أنشئ دائرة متصلة بمقياس درجة الحرارة ومجسّ الرطوبة. يجب أن تتكوَّن الدائرة من البوابة NOT والبوابة AND.

الوحدة 5

الحث الكهرومغناطيسي

في هذه الوحدة

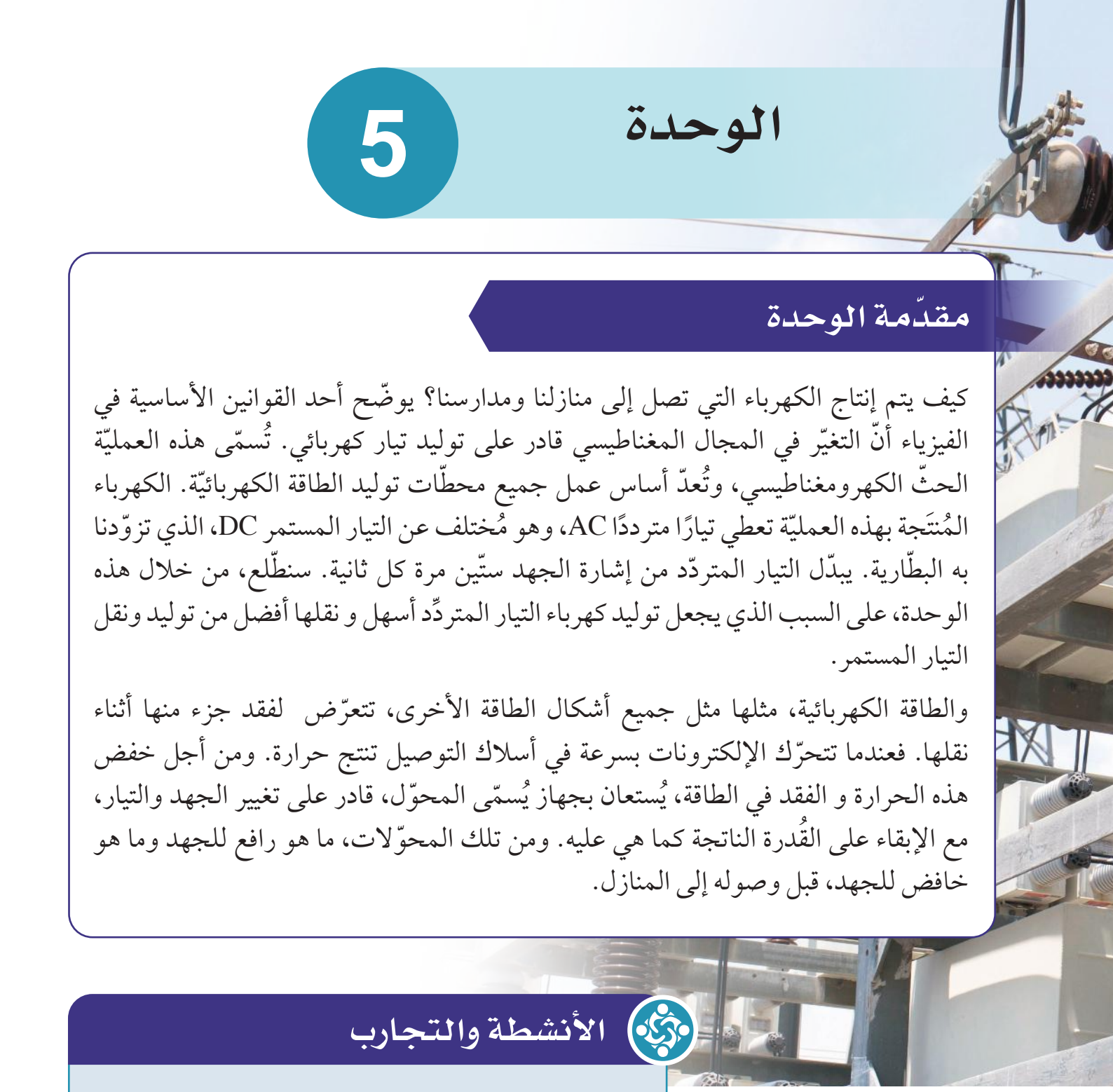
الدرس 5-1: الحث الكهرومغناطيسي

الدرس 5-2: مولدات التيار المتردد (AC)

الدرس 5-3: المحوّلات الكهربائية

P1112
P1113

الوحدة 5



مقدّمة الوحدة

كيف يتم إنتاج الكهرباء التي تصل إلى منازلنا ومدارسنا؟ يوضّح أحد القوانين الأساسية في الفيزياء أنّ التغيّر في المجال المغناطيسي قادر على توليد تيار كهربائي. تُسمّى هذه العمليّة الحثّ الكهرومغناطيسي، وتُعدّ أساس عمل جميع محطّات توليد الطاقة الكهربائيّة. الكهرباء المُنتَجة بهذه العمليّة تعطي تيارًا مترددًا AC، وهو مُختلف عن التيار المستمر DC، الذي تزوّدنا به البطّارية. يبدّل التيار المتردّد من إشارة الجهد ستّين مرة كل ثانية. سنطّلع، من خلال هذه الوحدة، على السبب الذي يجعل توليد كهرباء التيار المتردِّد أسهل و نقلها أفضل من توليد ونقل التيار المستمر.

والطاقة الكهربائية، مثلها مثل جميع أشكال الطاقة الأخرى، تتعرّض لفقد جزء منها أثناء نقلها. فعندما تتحرّك الإلكترونات بسرعة في أسلاك التوصيل تنتج حرارة. ومن أجل خفض هذه الحرارة و الفقد في الطاقة، يُستعان بجهاز يُسمّى المحوّل، قادر على تغيير الجهد والتيار، مع الإبقاء على القُدرة الناتجة كما هي عليه. ومن تلك المحوّلات، ما هو رافع للجهد وما هو خافض للجهد، قبل وصوله إلى المنازل.

الأنشطة والتجارب

a1-5 القوة الدافعة الكهربائية الحثيّة في حلقة مفردة

b1-5 القوة الدافعة الكهربائية الحثيّة في ملفّ لولبي

2-5 صنع مولِّد كهربائي

3-5 المحوِّل الرافع للجهد والمحوِّل الخافض للجهد

الدرس 5-1
الحثّ الكهرومغناطيسي

انتشرت في الأسواق هواتف جوّالة قابلة للشحن لاسلكيًّا. وتوافرت أيضًا فرشاة أسنان كهربائيّة تستخدم الشحن اللاسلكي لتدوم بشكل أطول. لكن كيف تعمل الشواحن اللاسلكيّة؟ عند مرور تيار كهربائي في ملف موجود في قاعدة الشحن يتولد حوله مجال مغناطيسي فيؤثر في ملف آخر موجود في الهاتف، فيسري فيه تيار كهربائي يقوم بشحن البطارية. يستخدم هذا المجال لشحن الأجسام القريبة منه. هل ستتمكّن في القريب العاجل من استبدال جميع الأجهزة السلكيّة لتحل محلّها أجهزة لاسلكية؟

الشكل 5-1 شحن هاتف ذكي بواسطة شاحن لاسلكي.

مخرجات التّعلُّم

P1112.1 يذكر أوجه التشابه والاختلاف بين مفهومي الفيض المغناطيسي وكثافة الفيض المغناطيسي، ويحل مسائل حسابية مرتبطة بالعلاقة بين المفهومين.

P1112.2 يصف القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة من الحركة النسبيّة بين موصل ومجال مغناطيسي، ويذكر العوامل التي تؤثر في قيمة القوة الدافعة الكهربائية الحثية واتجاهها.

P1112.3 يستخدم قانون فارادي وقاعدة لنز في حل مسائل حسابيّة على الحث الكهرومغناطيسي، بما في ذلك عندما تكون كثافة الفيض المغناطيسي غير متعامدة مع الموصل الذي يتحرك ويقطع خطوط الفيض المغناطيسي.

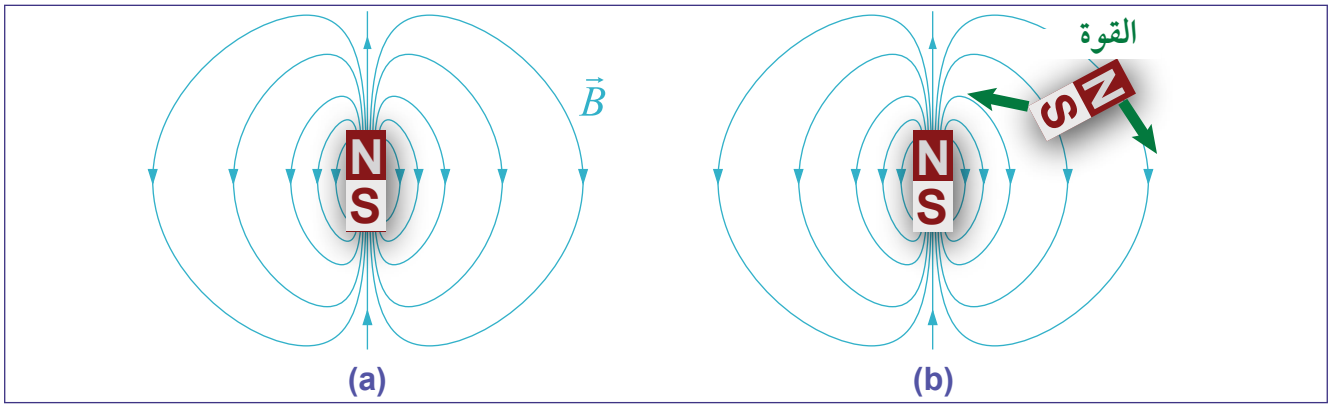
P1112.4 يصف بشكل نوعي كيفية تولد التيّارات الدوّامية ويذكر بعض تطبيقاتها.

المفردات

حثّ كهرومغناطيسي	Electromagnetic induction
تيار حثّي	Induced current
فيض مغناطيسي	Magnetic flux
ويبر	Weber
حثّ مغناطيسي	Magnetic induction
قانون فاراداي للحث	Faraday’s law of induction
حثّ	Induction
قانون لنز	Lenz’s law
قوة دافعة كهربائية حركيّة	Motional emf
تيّارات دوّاميّة	Eddy currents

المجال المغناطيسي

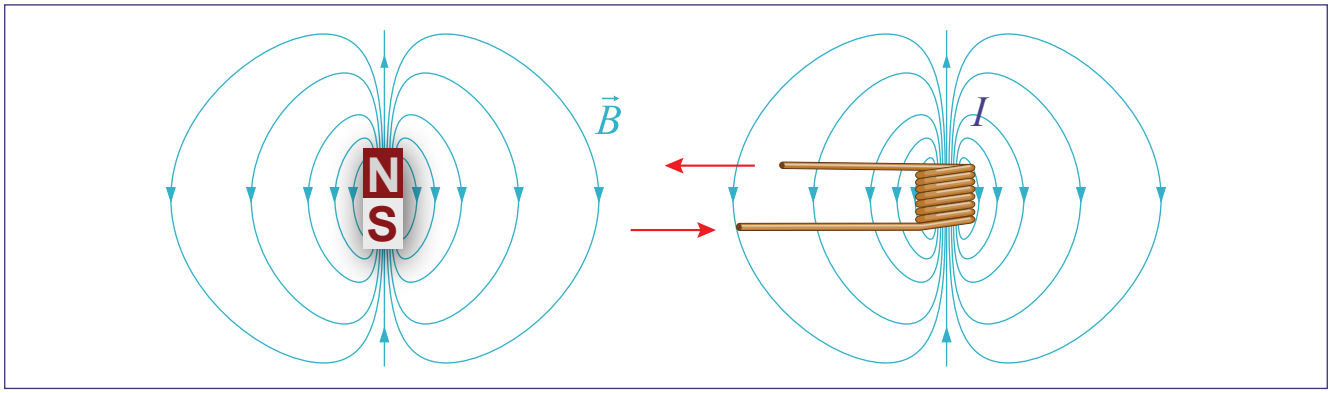
يولد المغناطيس حوله مجالاً مغناطيسيًا، كما في الشكل (**a2-5**)، وعند وضع مغناطيس آخر في هذا المجال، الشكل (**b2-5**)، فإنه يتأثر بقوة مغناطيسية دون أن يتلامس المغناطيسان. فقوى المجالات تؤثر دائمًا عن بعد (**الشكل b2-5**). و يمثل المجال المغناطيسي بخطوط تكون باتِّجاه القوة المؤثِّرة في قطب شمالي افتراضي مفرد. يكون اتجاه خطوط المجال من القطب الشمالي إلى القطب الجنوبي.



الشكل 5-2 تفاعل المغانط من خلال المجال المغناطيسي.

يعرّف المجال المغناطيسي أنه خاصية للحيز المحيط بالمغناطيس يظهر فيه أثر القوة المغناطيسية في مغناطيس آخر. وشدة المجال المغناطيسي هي القوة المغناطيسية التي يؤثر بها المجال المغناطيسي في وحدة الأقطاب الشمالية الافتراضية الموجودة في المجال. وحدة شدّة المجال المغناطيسي B في النظام الدولي للوحدات هي التسلا (T). فمجالٌ شدته 1 T هو مجال قويٌّ جدًّا. تبلغ شدة المجال المغناطيسي الأرضي قرب خط الاستواء حوالي 3×10^{-5} T أو 30 μT. وللحصول على مجال بشدة 1 T نحتاج إلى استخدام مغانط قويّة جدًّا، كتلك المستخدمة في جهاز التصوير بالرنين المغناطيسي.

تنشأ المجالات المغناطيسيّة بشكل أساسي من التيّارات الكهربائيّة. فملف سلكي ينقل تيّارًا كهربائيًا ينشأ عنه مجالٌ مغناطيسيٌّ كالذي نحصل عليه من المغانط الدائمة. فالمجال الناشئ من المغانط الدائمة يتولد بشكل أساسي من الحركة المغزلية للإلكترونات في الذرات. يوفّر المجال المغناطيسي طاقة يمكن أن تُستخدم لتوليد الكهرباء.

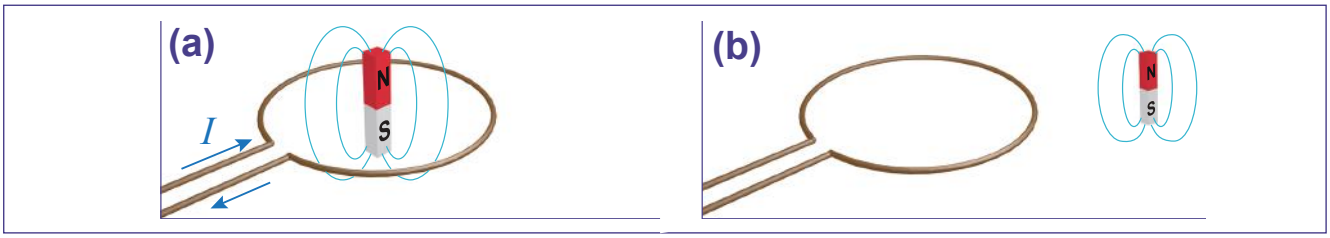


الشكل 5-3 المجال المغناطيسي نفسه يمكن أن ينشأ من مغناطيس، أو من ملف يحمل تيّارًا كهربائيًّا.

ينشأ المجال المغناطيسي للأرض من تيّارات كهربائيّة ضخمة تدور داخل لب الكوكب في الحمم المُنصهرة من النيكل والحديد.

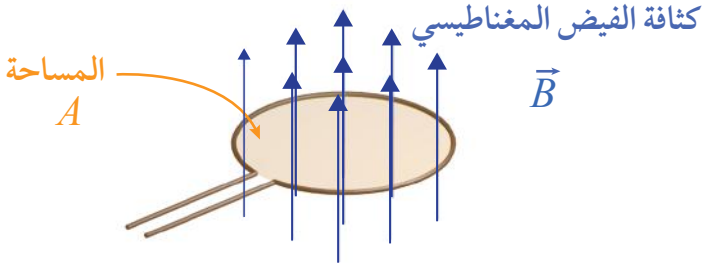
الفيض المغناطيسي

عندما تواجه خطوط المجال المغناطيسي مساحة وتخترقها، يُقال أن المجال المغناطيسي نتج عنه فيض مغناطيسي، ويعتمد مقدار الفيض المغناطيسي على عدد خطوط المجال التي تعبر مساحة معينة وعلى المساحة، فكلما زادت شدة المجال أو زادت المساحة، زاد الفيض المغناطيسي. في **الشكل (a4-5)** يُحدث المغناطيس فيضًا في الحلقة، بينما في **الشكل (b4-5)** لا تخترق خطوط المجال الحلقة ولا تُحدث فيضًا مغناطيسيًا.



الشكل 4-5 الملف نفسه مع مغناطيس يتحرّك في مكانين مختلفين.

لنعتبر أنّ لدينا ملفًّا موجودًا داخل مجال مغناطيسي متعامد مع سطح الملفّ (**الشكل 5-5**). يُعرَّف **الفيض المغناطيسي، Magnetic flux** Φ أنّه حاصل ضرب المساحة في المجال المغناطيسي العمودي عليها ولتوضيح ذلك، نستخدم المسافة بين خطوط المجال للدلالة على شدّته. تكون هذه الخطوط متقاربة في حالة المجال القوي.



الوحدة	الفيض المغناطيسي، Φ
ويبر (Wb)	$\Phi = AB$

الوحدة	كثافة الفيض المغناطيسي، B
تسلا (T) $T = \frac{Wb}{m^2}$	$B = \frac{\Phi}{A}$

الشكل 5-5 ملف سلكي أفقي داخل مجال مغناطيسي مُنتظم عمودي على مستوى الملف.

وحدة قياس الفيض المغناطيسي هي ويبر(Wb) حيث 1 Wb = 1V.s. أما B فهو كثافة الفيض المغناطيسي، ووحدة قياسه Wb/m^2 أو تسلا حيث $1\ T = 1\ Wb/m^2$.

يُقارِن الجدول 5-1 كثافة الفيض المغناطيسي والفيض المغناطيسي.

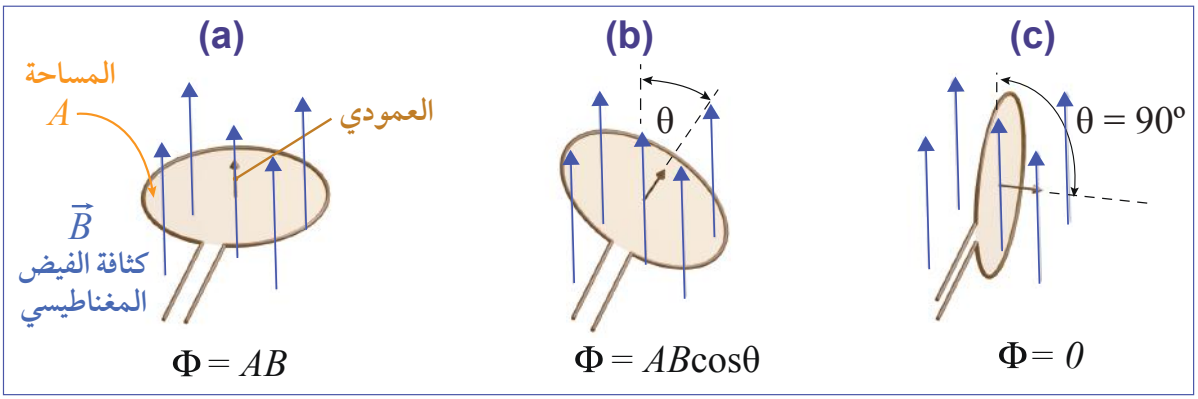
الجدول 5-1 الفيض المغناطيسي وكثافة الفيض المغناطيسي.

الفيض المغناطيسي	كثافة الفيض المغناطيسي
عدد خطوط المجال المغناطيسي التي تنفذ عمودياً خلال مساحة ما	عدد خطوط المجال المغناطيسي التي تنفذ عمودياً خلال وحدة المساحة.
الرمز: Φ	الرمز: B
وحدة القياس: Wb	وحدة القياس: التسلا $T = Wb/m^2$
كمّية قياسيّة	كمية مُتّجهة

تأثير اتّجاه المجال وعدد اللفّات في الفيض المغناطيسي

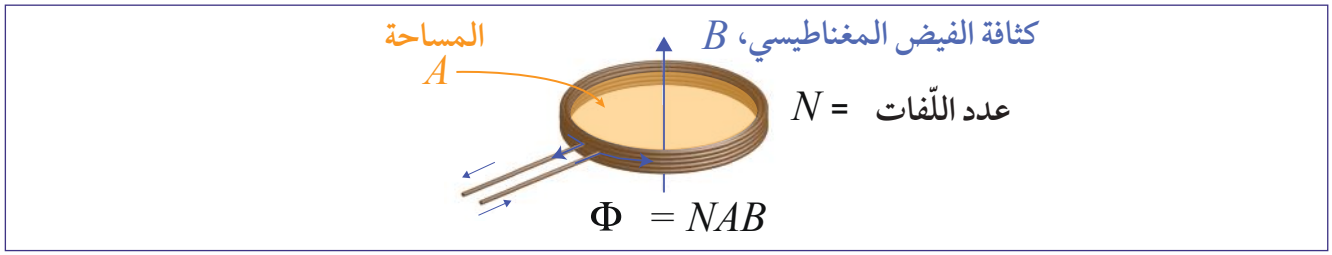
يعتمد الفيض المغناطيسي على اربعة عوامل، هي:

1. شدّة المجال المغناطيسي
2. الزاوية بين خطوط المجال والعمودي على سطح الملف.
3. مساحة الملفّ.
4. عدد لفّات الملفّ.



الشكل 5-6 يعتمد الفيض المغناطيسي على الزاوية بين المجال المغناطيسي والعمودي على سطح الملف.

يُظهر **الشكل 5-6** أنّ مُركّبة المجال المغناطيسي المتعامدة مع سطح الملف هي فقط التي تُسهم في الفيض المغناطيسي. يُعرَّف المستوى الذي يقع فيه الملف بواسطة العمودي على السطح (**الشكل 5-6a**). إذا كانت هناك زاوية بين العمودي والمجال، فإن الفيض سينخفض بمقدار جيب تمام تلك الزاوية، كما في **الشكل 5-6b**. ويكون الفيض صفرًا، عندما تكون الزاوية 90° (**الشكل 5-6c**).

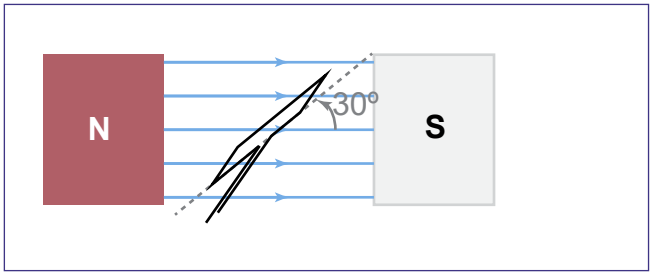


الشكل 5-7 يعتمد الفيض المغناطيسي على عدد اللفات N.

يمر عبر كل لفّة من لفّات الملفّ الفيض المغناطيسي نفسه. يُظهر **الشكل 5-7** أنّ الفيض الكلّي في ملّف يتكوّن من N لَفّة، هو حاصل ضرب N في الفيض عبر لفّة واحدة. تُستنتَجُ العلاقة الكاملة للفيض عبر ملفّ مؤلّف من N لفّة من **المعادلة 1-5**. تفترض هذه المعادلة أن المجال المغناطيسي ثابت عبر مساحة سطح الملف، وأنّ الزاوية بين العمودي على الملف و خطوط المجال المغناطيسي هي θ.

1-5	الفيض المغناطيسي خلال ملفّ	Φ	الفيض المغناطيسي (Wb)
$\Phi = NBA\cos\theta$		N	عدد اللفّات
		B	كثافة الفيض المغناطيسي (شدة المجال المغناطيسي) (T)
		A	مساحة سطح الملفّ (m^2)
		θ	الزاوية بين خطوط المجال المغناطيسي والعمودي على سطح الملفّ

مثال 1



الشكل 5-8 الفيض المغناطيسي عبر ملف.

ملفّ سلكي مربّع الشكل طول ضلعه 0.5 cm. وضع بين قطبي مغناطيس بحيث يصنع زاوية 30° مع الأفقي، كما هو مبيّن في **الشكل 5- 8**. إذا كانت قيمة شدّة المجال المغناطيسي 0.1 T، فكم تكون قيمة الفيض المغناطيسي عبر الملفّ، إذا قمنا بتدوير الملف بزاوية 30°، بدءًا من المحور الأفقي؟

المطلوب: الفيض المغناطيسي Φ

المُعطيات: طول ضلع الملف $l = 0.5\ \text{cm}$

شدة المجال المغناطيسي $B = 0.1\ T$

العلاقات: المساحة، $A = l \times l$، $\Phi = NBA\cos\theta$

الحل: نحتاج أولًا إلى حساب الزاوية الناشئة بين المجال المغناطيسي والعمودي على الملف السلكي

$$\theta = 90° - 30° = 60°$$

الآن نستخدم العلاقة $\Phi = NBA\cos\theta$

$$= (1)(0.1)(0.005)(0.005)\cos 60°$$

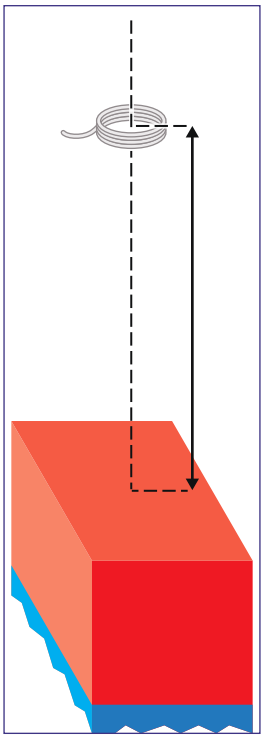
$$\Phi = 1.25 \times 10^{-6}\ \text{Tm}^2 = 1.25 \times 10^{-6}\ \text{Wb}$$

مثال 2

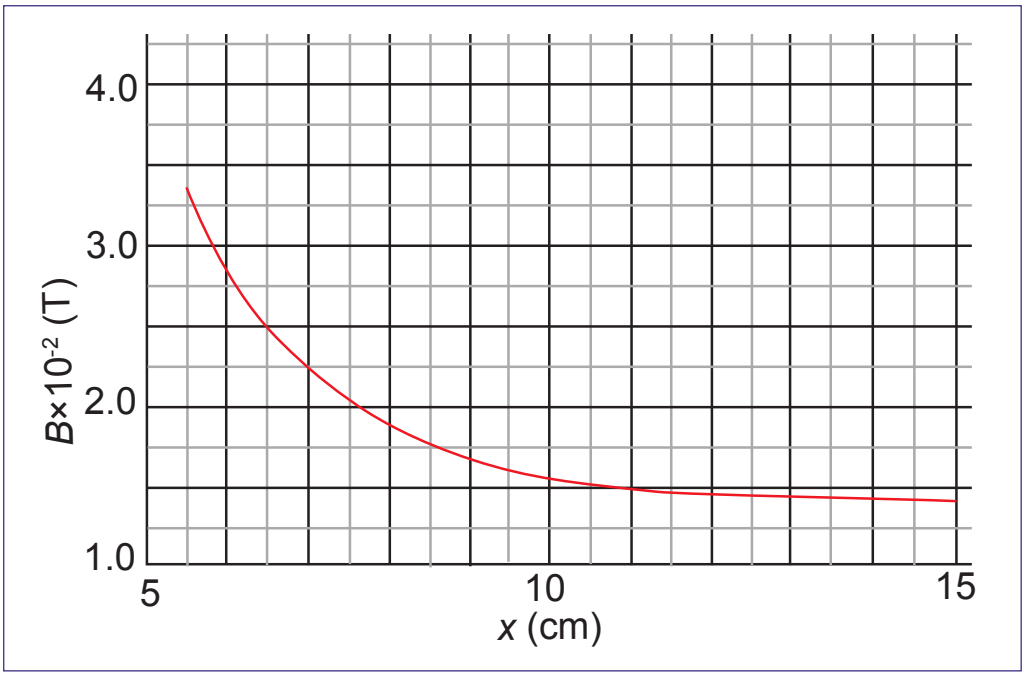
ملفّ دائري صغير، مساحة مقطعه $2.3\times10^{-4}\text{m}^2$ يحتوي على 270 لفّة. وُضع الملفّ على مسافة 7 cm بشكل متوازٍ مع قطب مغناطيسي، كما هو مبيّن في **الشكل 5-9**.

a. باستخدام المخطّط، قدّر متوسّط شدّة المجال المغناطيسي B في الملف.

b. احسب الفيض المغناطيسي الكلّي عبر الملف.



الشكل 5-9 الفيض المغناطيسي عبر ملف.



الشكل 5-10 كثافة الفيض المغناطيسي عند نقاط مختلفة.

المطلوب: **a.** شدّة المجال المغناطيسي B

b. الفيض المغناطيسي Φ

المُعطيات: مساحة مقطع الملف $A = 2.3 \times 10^{-4}\ \text{m}^2$

عدد اللفّات، لفّة $N = 270$

المسافة بين الملف والمغناطيس، $x = 7\ \text{cm}$

الزاوية بين المجال والعمودي على الملف، $\theta = 0°$

العلاقات: $\Phi = NBA\cos\theta$

الحل: **a.** نبحث في الرسم البياني، عند مسافة 7 cm، فيكون مقدار شدّة المجال المغناطيسي $\boxed{2.25\times10^{-2}\text{T}}$

b. الفيض المغناطيسي الكلّي عبر الملفّ هو:

$$\Phi = NBA\cos\theta = (270)(2.25\times10^{-2})(2.3\times10^{-4})\cos0°$$

$$= 1.4\times10^{-3}\ \text{Wb}$$

الحثّ الكهرومغناطيسي

إذا قمت بتحريك مغناطيس داخل ملفّ سلكي، سينشأ تيّار كهربائي مادام المغناطيس في حالة حركة. من الأسهل ملاحظة هذا الأمر باستخدام الملفّ اللولبي (الحلزوني)، وهو عبارة عن عدة لفّات من السلك، أسطوانية الشكل، كما هو موضّح في **الشكل 5-11**.

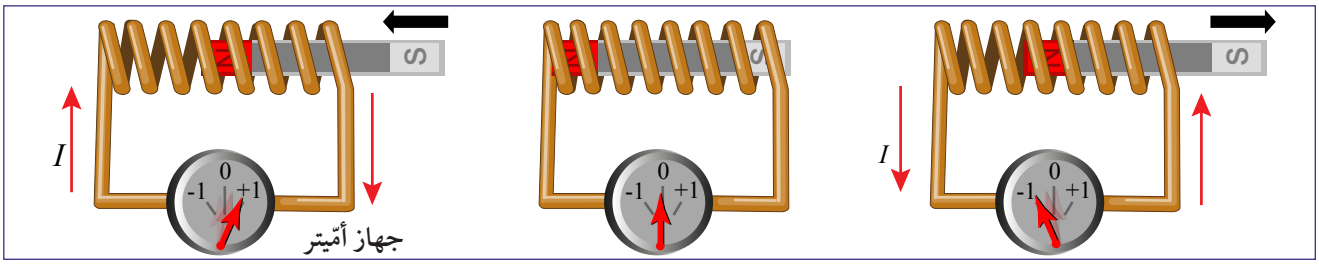
a. عند دخول المغناطيس، يتدفّق التيّار في اتّجاه مُعيَّن.

b. عند توقُّف المغناطيس عن الحركة، يتوقّف التيّار أيضًا.

c. عند سحب المغناطيس، يتدفّق التيّار في الاتجاه المُعاكِس.

سؤال للمناقشة

ما الذي تتذكّره حول المغانط والمغانط الكهربائية وكثافة الفيض المغناطيسي؟



الشكل 5-11 الحثّ الكهرومغناطيسي

عند حدوث تغير في الفيض المغناطيسي خلال ملف نتيجة حركة الملف أو تغير شدة المجال المغناطيسي فإنه ينشأ في الملف تيار كهربائي حثي، هذه الظاهرة تسمى: **الحثّ الكهرومغناطيسي Electromagnetic Induction**. عندما يجري تحريك مغناطيس داخل الملف، يُظهر جهاز الأمّيتر الموصول بالدائرة تيارًا كهربائيًا يُسمّى **التيّار الحثيّ Induced current**، لأن المغناطيس يحثّ التيّار في السلك. ولكن هذا يحدث فقط من خلال حركة المغناطيس بالنسبة إلى الملف، أو حركة الملف بالنسبة للمغناطيس.

التيار الحثي ينشأ فقط عند تغير معدل قطع خطوط المجال المغناطيسي.

يتغيّر اتجاه التيار الحثّي، عندما يتغيّر اتّجاه حركة المغناطيس أو حركة الملف.

نلاحظ ازدياد كمّية التيار المتدفّق في الملف بإحدى الطرق الآتية:

1. زيادة شدّة المجال المغناطيسي.
2. زيادة عدد لفّات الملف.
3. زيادة سرعة الحركة.
4. زيادة مساحة مقطع الملف.

وتعدّ جميع هذه العوامل مهمّة في تصميم المُولِّدات الكهربائيّة، والمُحرِّكات الكهربائيّة.

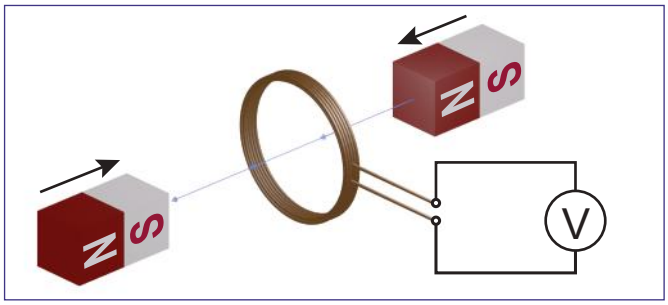
قانون فارادي للحثّ

ينصّ **قانون فارادي للحثّ Faraday's law of Induction** على أن معدّل التغيّر الزمني للفيض المغناطيسي يُحدِثُ فرقًا في الجهد بين طرفَي الموصِّل. يُسمى فرق الجهد هذا بالقوة الدافعة الكهربائيّة الحثّيّة (e.m.f) . إذا كانت دائرة الموصل مفتوحة، ، فلن يكون هناك تيار حثي خلال الموصل، ويكون فرق الجهد الحثي (أو القوة الدافعة الكهربائية) مساويًا لمعدّل تغيّر الفيض المغناطيسي بالنسبة إلى الزمن، كما تعطيه **المعادلة 2-5**.

2-5	قانون فارادي في الملف		
$e.m.f = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$		$e.m.f$	القوة الدافعة الكهربائية الحثّية (V)
		$\Delta\Phi$	التغيّر في الفيض المغناطيسي ($T.m^2$)
		Δt	التغيّر في الزمن (s)

مثال 3

ملف من سلك نحاسي يحتوي على 50 لفّة، مساحة كل منها $4\times10^{-4}\ m^2$. وُضع الملفّ بين مغناطيسين اثنين يتجاذبان. عند تجاذُب المغناطيسين، تزداد قوة المجال المغناطيسي بمعدّل ثابت مقداره $5.0 \times 10^{-2}\ T/s$. احسب فرق الجهد الحثّي بين طرفَي الملف، إذا كان المجال مُنتظمًا وعموديًّا على الملفّ.



الشكل 12-5 الملفّ والمغانط.

المطلوب: فرق الجهد الحثّي، (v) $(e.m.f)$

المُعطيات: المساحة $A = 4\times10^{-4}\ m^2$

$N = 50$، $\frac{\Delta B}{\Delta t} = 5.0\times10^{-2}\ T/s$ ، $\theta=0°$

العلاقات: $\Phi=NBA\cos\theta$ ، $V = \frac{-\Delta\Phi}{\Delta t}$

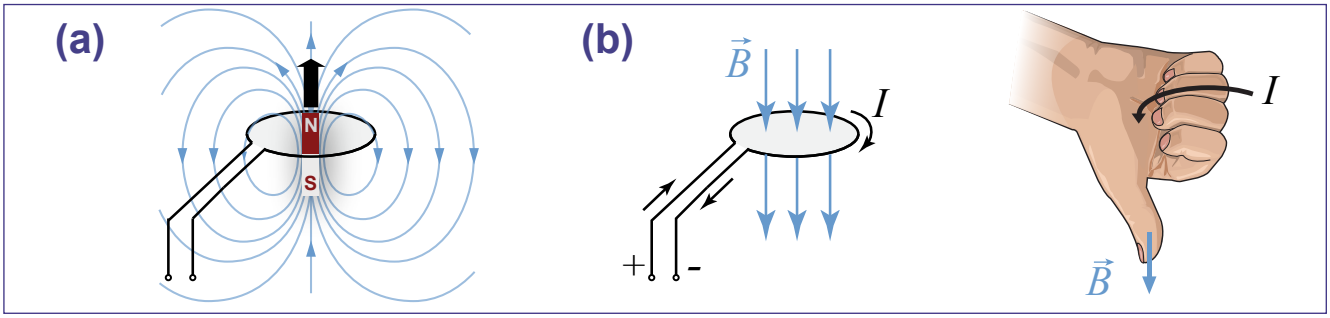
الحل: نقوم أولًا بحساب الفيض، مع ملاحظة أنّ معدّل التغيُّر في الفيض يتناسب طرديًّا مع معدّل التغيّر في شدّة المجال المغناطيسي. بما أنّ المساحة A، وعدد اللفّات N، والزاوية θ، هي ثوابت:

$$e.m.f = \frac{-\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{-1}{\Delta t}(NA\cos\theta)\Delta B \rightarrow e.m.f = -NA\cos\theta\ \frac{\Delta B}{\Delta t}$$

$$e.m.f = -(50)\ (4\times10^{-4}\,m^2)\ (\cos0°)\left(5\times10^{-2}\ \frac{T}{s}\right) = \boxed{-0.001V}$$

قانون لنز

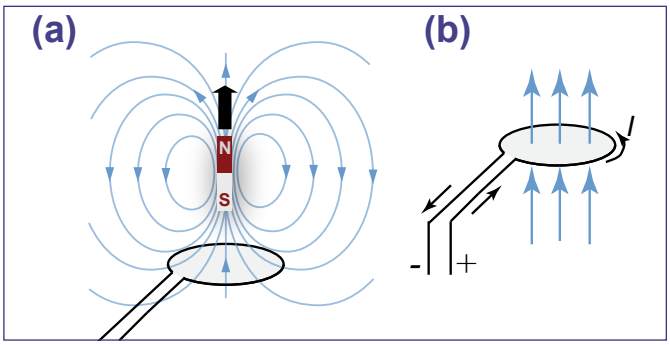
لماذا توجد إشارة سالبة في قانون فارادي؟ ينص **قانون لنز Lenz's law** على أنّ المجال المغناطيسي الحثّي الناتج من التيار الحثّي يقاوم التغيّر في الفيض المغناطيسي الذي أنشأ هذا التيار. يقوم التيار الحثّي بمقاومة التغيّر في الفيض المغناطيسي، كما تقاوم الأجسام أي تغير في حالتها الحركية نتيجة القصور الذاتي. تضاف إلى قانون فارادي إشارة سالبة، لأن التيار الحثي يُولّد مجالًا مغناطيسيًّا يُعاكس التغيّر في الفيض المغناطيسي. يُظهر **الشكل a13-5** مرور مغناطيس عبر موصّل سلكي. تتجه خطوط المجال المغناطيسي للمغناطيس إلى أعلى. فخلال دخول المغناطيس اللفّة، يزداد الفيض المغناطيسي داخلها، فيولّد التيّار الحثّي مجالًا مغناطيسيًا يكون ضدّ هذا التغيّر، ويُنقِص من الازدياد الابتدائي للفيض.



الشكل 13-5 اتّجاه التيار الحثي في ملف.

يكون المجال المغناطيسي الناتج من التيار الحثي موجَّهًا نحو الأسفل، لأن عليه أن يقاوم الازدياد الابتدائي للفيض المغناطيسي. ولكي يكون المجال المغناطيسي موجَّهًا نحو الأسفل كما في **الشكل b13-5**، فسيكون اتجاه التيار الحثّي في اللفّة مع اتّجاه حركة عقارب الساعة.

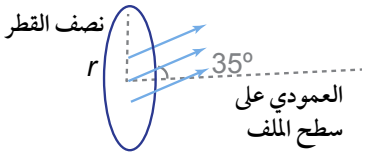
لنفترض أنّ المغناطيس يغادر الملفّ السلكي كما هو مبيّن في **الشكل 14-5**. عندها يتناقص الفيض المغناطيسي داخل الملف. يؤدّي ذلك إلى تولّد مجال مغناطيسي يقاوم هذا التناقص.



الشكل 14-5 عند تناقص الفيض المغناطيسي.

يتحقّق ذلك من خلال مجال مغناطيسي متولّد يكون فيضه في اتّجاه الفيض الابتدائي المتناقص. والآن، كيف سيكون اتّجاه التيار الحثي؟ نستخدم قاعدة قبضة اليد اليمنى، التي تنص على أنه إذا وضعنا أصابع اليد باتجاه التيار في الملف، فإن الإبهام يشير إلى اتجاه المجال المغناطيسي الناشئ. إذا كان المجال المغناطيسي موجّهًا نحو الأعلى، يكون التيار الحثّي في اتّجاه معاكس لحركة عقارب الساعة.

مثال 4



ملفّ دائري مستوٍ فيه N=10 لفات نصف قطره 15 cm مصنوع من سلك موصِّل، يقع تحت تأثير مجال مغناطيسي منتظم. الزاوية بين المجال المغناطيسي والعمودي على الملفّ هي 35°. إذا ازدادت شدة المجال المغناطيسي من 2T إلى 7T خلال 15 s:

a. احسب قيمة القوة الدافعة الكهربائية الحثيّة المتولدة بين طرفي الملف.

b. ما اتجاه التيّار الحثّي؟

المطلوب: **a.** القوة الدافعة الكهربائية الحثيّة e.m.f

b. اتِّجاه التيار الحثّي

المُعطيات: عدد اللفّات $N = 10$

نصف القطر $r = 15\ \text{cm}$

الزاوية بين المجال والعمودي $\theta = 35°$

التغيُّر في شدّة المجال المغناطيسي $\Delta B = B_2 - B_1 = 7 - 2 = 5\text{T}$

التغيُّر في الزمن $\Delta t = 15\text{s}$

العلاقات: $A = \pi r^2$

$$e.m.f = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

الحل: **a.** لحساب قيمة القوة الدافعة الكهربائية الحثيّة، يمكننا إهمال الإشارة السالبة.

$$A = \pi r^2$$

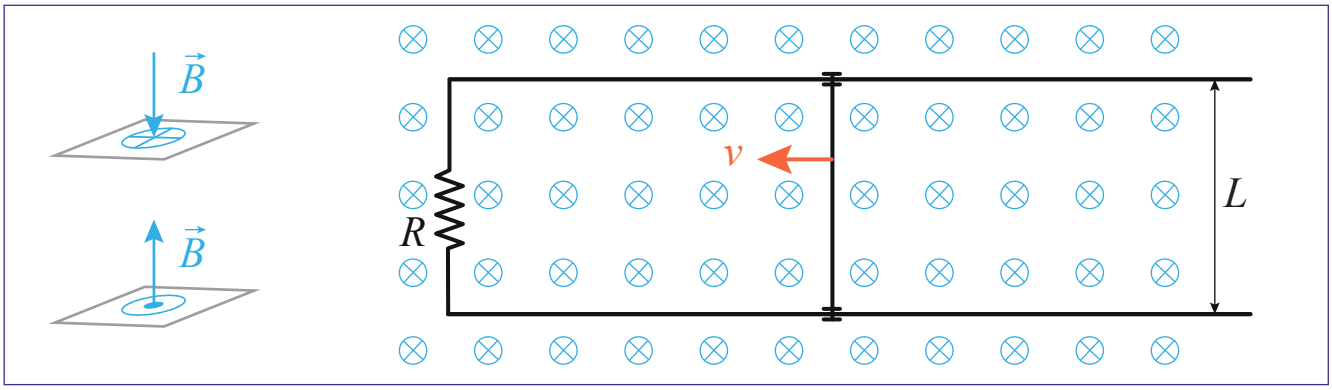
$$\pi r^2 = \pi (0.15)^2 = 0.07\ \text{m}^2$$

$$e.m.f = \text{N}\frac{\Delta\phi}{\Delta\tau} = \text{N}\frac{\Delta\text{B}\left(\text{A}\cos\theta\right)}{\Delta\tau} = 10\frac{5\left(0.07\cos 35\right)}{15} = \boxed{0.19\text{V}}$$

b. يزداد الفيض المغناطيسي ولمعاكسة هذا الازدياد، يجب أن يكون المجال المغناطيسي الناتج من التيار الحثّي متّجهًا بعكس اتجاه المجال الابتدائي . باستخدام قاعدة قبضة اليد اليمنى، نعرف أنّ التيار الحثّي يجب أن يكون باتجاه حركة عقارب الساعة.

القوّة الدافعة الكهربائية الحثية الحركيّة

يمكن الحصول على تغيّرٍ في الفيض المغناطيسي بتحريك موصِّل في منطقة مجال مغناطيسي ثابت. يُسمّى هذا التأثير أحيانًا باسم **القوة الدافعة الكهربائية الحثيّة الحركيّة Motional e.m.f**. لنفترض دائرة مؤلفَّة من مقاومة وسلكين متوازيين طويلين. يتقاطع سلك صلب موصِّل مع السلكين ليغلق الدائرة، ويُشكّل ملفًا مستطيلاً من حلقة واحدة يكون فيه اتجاه الفيض المغناطيسي إلى داخل الصفحة. عندما يتحرَّك السلك يتغيّر الفيض، لأن مساحة السطح تتغيَّر. هذا التغيُّر يولِّد تيارًا حثّيًا **الشكل 5-15**.



الشكل 5-15 قوة دافعة كهربائية حثية حركيّة تتولّد نتيجة لحركة السلك الموصِّل في منطقة المجال المغناطيسي.

بحسب قانون فارادي لملف بلفّة واحدة، يمكننا إنشاء معادلة لفرق الجهد الناتج بين طرفَي السلك المتحرِّك. إذا تحرّك السلك بسرعة v، تكون المسافة Δx التي يقطعها خلال Δt هي $v\Delta t$. التغيّر في الفيض المغناطيسي ناتج من التغيّر في المساحة:

$$e.m.f = \frac{-\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{-\Delta(BA)}{\Delta t} = -\frac{-BL\Delta x}{\Delta t} = -BLv$$

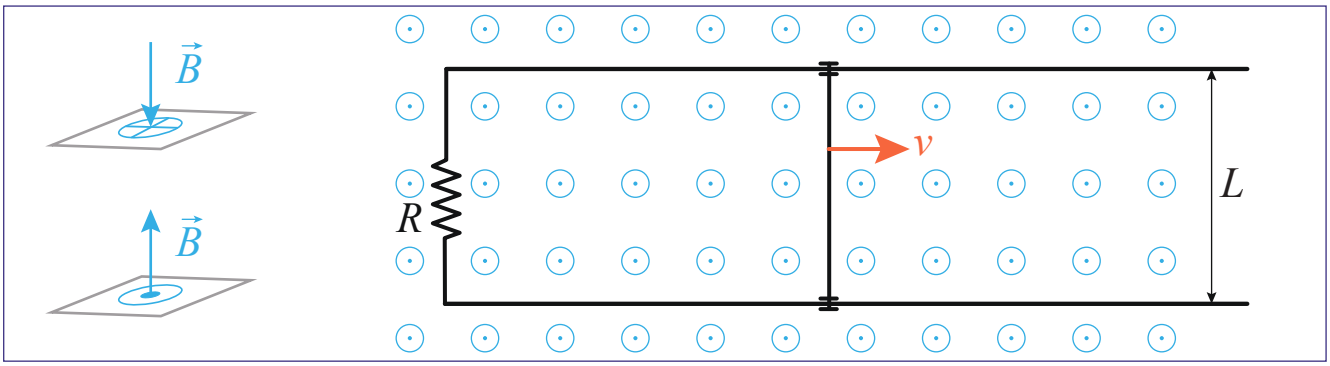
ينتج هذا الجهد، حتى لو لم يكن السلك موصولًا بطرفي الدائرة! والسبب يعود إلى أنّ السلك الموصل والإلكترونات بداخله يتحركان بالسرعة نفسها. وتتعرَّض هذه الإلكترونات لقوة عموديّة على كل من المجال المغناطيسي وسرعة السلك، **المعادلة 5-3**.

3-5	قانون فارادي في سلك موصل	$e.m.f$	القوة الدافعة الكهربائية الحثيّة (V)
	$e.m.f = -BLv\cos\theta$	B	شدة المجال المغناطيسي (T)
		v	سرعة الموصِّل (m/s)
		L	طول الموصِّل (m)
		θ	الزاوية بين اتجاه المجال والعمودي على سطح الملف (°)

يكون هذا التأثير ضئيلًا، فسلك طوله متر واحد يتحرّك بسرعة 100 m/s عبر المجال المغناطيسي الأرضي يولّد جهدًا مقداره 0.005 V فقط. إلاّ أن سلكًا طويلًا مُعلقًا بمركبة فضائيّة يمكن أن يولِّد آلافًا من الفولتات، إذا توافرت طريقة عمليّة لإغلاق الدائرة.

مثال 5

دائرة على شكل حرف U، مزوَّدة بسلك قابل للحركة، توضع في مجال مغناطيسي قيمته B=0.3 T، يتّجه إلى خارج الصفحة **الشكل 5-16**. طول السلك المُتحرّك، L=0.25 m، يتحرّك السلك إلى اليمين بسرعة $v = 0.6$ m/s. احسب الجهد الحثّي في الملف الناشئ، ثمّ حدّد اتّجاه التيار.



الشكل 5-16 سلك موصّل يتحرَّك في مجال مغناطيسي.

المطلوب: e.m.f، اتجاه التيّار

المُعطيات: شدّة المجال المغناطيسي B= 0.3 T

طول السلك $L = 0.25$ m

سرعة السلك $v = 0.6$ m/s

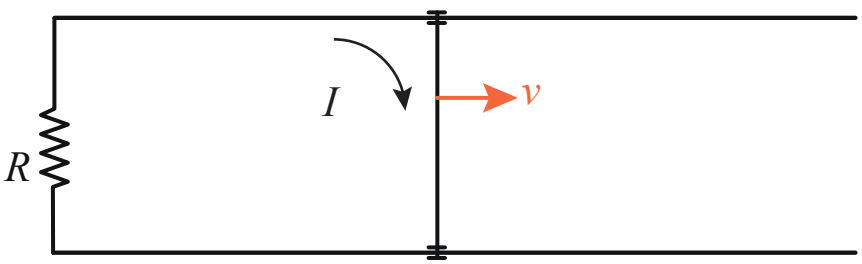
$\theta = 0$

العلاقات: $V=BLv$

الحل: في هذه الحالة، يتغيّر الفيض المغناطيسي؛ لكن ليس بسبب تغيُّر المجال المغناطيسي، بل بسبب تغيُّرالمساحة.

$$V = BLv\cos\theta = (0.3\text{ T})(0.25\text{ m})(0.6\text{ m/s})(1) = \boxed{0.045\text{ V}}$$

لإيجاد اتِّجاه التيار، نطبّق قانون لنز. فعندما يتحرّك السلك يزداد الفيض المغناطيسي الخارج من الصفحة. وبالتالي يجب أن يولّد التيار الحثّي مجالًا مغناطيسيًّا يتّجه إلى داخل الصفحة. بتطبيق قاعدة اليد اليمنى، نحصل على اتّجاه التيّار، وهو اتِّجاه حركة عقارب الساعة.



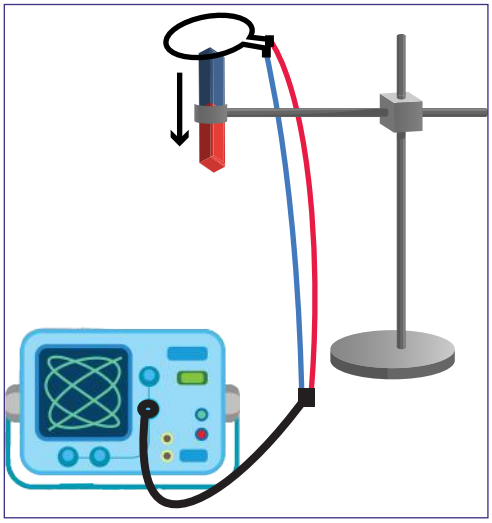
نشاط عمليّ

a1-5

القوة الدافعة الكهربائية الحثيّة في حلقة مفردة

سؤال الاستقصاء	مُلاحظة قوة دافعة كهربائية حثيّة في حلقة مفردة نتيجة لتغيّر المجال المغناطيسي.
الموادّ المطلوبة	سلك نحاسي، مغانط مختلفة، حامل للتعليق، راسم ذبذبات أو مستشعر جهد، سلك راسم الذبذبات مزوَّد بملاقط تمساح، ملاقط بلاستيكيّة.

خطوات التجربة



الشكل 5-17 القوة الدافعة الحثيّة في حلقة مفردة

1. ثبّت المغناطيس على حامل التعليق، كما هو مبيّن في الشكل 5-17.
2. اصنع من السلك النحاسي حلقة دائرية مفردة، ثم قم بتوصيل طرفَي السلك بملاقط التمساح لراسم الذبذبات. صل شريط راسم الذبذبات بالقناة 1 للراسم، ثم اضغط زر التشغيل.
3. احمل الحلقة بزوج من الملاقط البلاستيكيّة، وحرّكها إلى الأعلى والأسفل ببطء. شاهد منحنى الجهد الظاهر على شاشة راسم الذبذبات.
4. أعد الخطوة 3، لكن بتحريك الحلقة بشكل أسرع. ارسم منحنى الجهد الظاهر على شاشة راسم الذبذبات.

الأسئلة

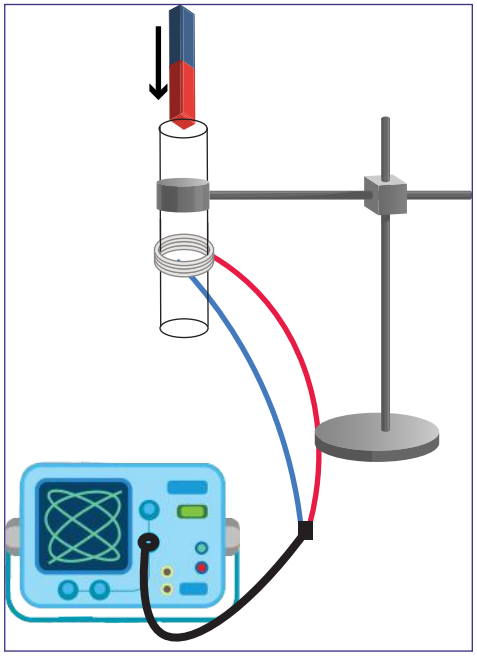
a. ما الفرق بين المنحنيين في الخطوة 3 والخطوة 4؟
b. لماذا يظهر جهد سالب وآخر موجب عند مرور المغناطيس عبر الحلقة؟
c. لماذا تكون $e.m.f$ صفرًا عند حركة الحلقة بمحاذاة مركز المغناطيس؟
d. سجّل طريقتين تجعلان القوة الدافعة الكهربائية الحثيّة أكبر.
e. المجال المغناطيسي في هذا الاستقصاء ثابت، والملف متحرّك. كيف يمكن إعادة تصميم التجربة بجعل الملف ثابتًا والمجال المغناطيسي مُتحرّكًا.

نشاط عملي

b1-5 القوة الدافعة الكهربائية الحثيّة في ملف لولبي

سؤال الاستقصاء	ملاحظة قوة دافعة كهربائية حثيّة في ملف لولبي أثناء تغيير المجال المغناطيسي.
الموادّ المطلوبة	سلك نحاسي، مغانط مختلفة، حامل تعليق، راسم ذبذبات، سلك راسم الذبذبات مزوَّد بملاقط تمساح.

خطوات التجربة



الشكل 5-18 القوة الدافعة الكهربائية الحثيّة في ملف لولبي.

1. لف السلك النحاسي على أنبوب بلاستيكي لتصنع منه ملفًا لولبيًّا مؤلفا من 20 لفّة على الأقل. اربط الأنبوب بالملف اللولبي على حامل التعليق، كما هو مبيّن في **الشكل 5-18**.
2. صل طرفي الملف بملاقط التمساح لسلك راسم الذبذبات، ثم صل الطرف الآخر للسلك بالقناة 1 لراسم الذبذبات ثمّ اضغط زر التشغيل.
3. أسقط المغناطيس بحيث يمر داخل الملف (تأكد من أنّ المغناطيس لن يصطدم بالأرض أو الطاولة، إما بإمساكه عند سقوطه، أو بوضع وسادة أسفله).
4. ارسم منحنى الجهد الظاهر على شاشة راسم الذبذبات.
5. أعد الخطوات 1–4 باستخدام ملفّ يتكون من 40 لفة، ثم 60 لفة.

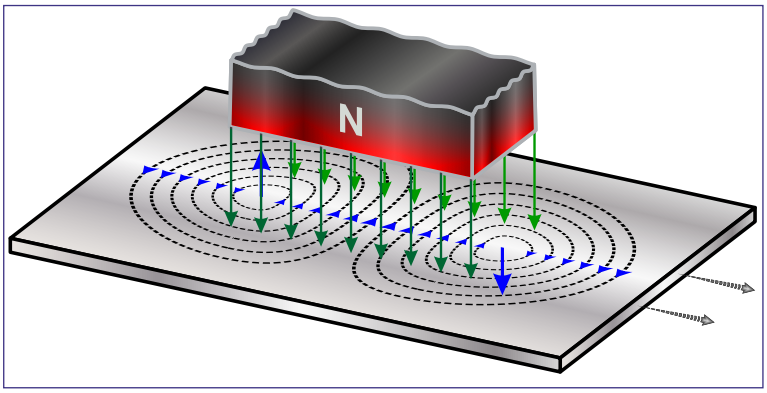
الأسئلة

a. سجّل طريقتين تستطيع من خلالهما الحصول على قوة دافعة كهربائية حثيّة أكبر.
b. في هذا الاستقصاء، المجال المغناطيسي ثابت والملفّ متحرّك. كيف تتغيّر نتيجة الاستقصاء إذا كان المغناطيس مُتحرّكًا والملفّ ثابتا.
c. كيف تتغيّر قوة دافعة كهربائية حثيّة إذا جعلنا مساحة سطح الملفّ ضعف ما هي عليه؟ هل سيتغير منحنى الجهد بالنسبة إلى الزمن أيضًا؟

التيارات الدوّامية

يمكن للفيض المغناطيسي المتغيّر أن يحثّ تيّارًا في أي نوع من الموصِّلات، مهما يكن شكله أو حجمه. إذا لم يكن الموصِّل سلكًا، يتّخذ التيار الحثّي شكل دوّامات صغيرة، تعرف باسم **التيّارات الدوّامية Eddy currents** . تكون التيّارات الدوّامية أقوى عند سطح الموصِّل.

في **الشكل 5-19**، صفيحة رقيقة من الألومنيوم تتحرّك نحو اليمين. يتحرّك الطرف الأيمن من الصفيحة مُبتعدًا عن المغناطيس، فيتناقص الفيض المغناطيسي. وبالتالي يكون اتِّجاه المجال المغناطيسي الناتج عند الطرف الأيمن للصفيحة نحو الأسفل أيضًا. وهو ما يولّد تيّارًا في اتجاه حركة عقارب الساعة.



الشكل 5-19 التيارات الدوّامية في صفيحة من رقاقة الألومنيوم.

يتحرّك الطرف الأيسر من الصفيحة نحو المغناطيس. فيزداد الفيض المغناطيسي. ومن أجل مواجهة هذا التغيُّر، يكون اتِّجاه المجال المغناطيسي المتولّد نحو الأعلى، الأمر الذي يولّد تيّارًا دوّاميًا، بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة.

الآثار الضارة للتيّارات الدوّامية

a. غالبًا ما تُسبِّب التيّارات الدواميّة فقدًا لجزء من الطاقة الكهربائيّة في الأجهزة المغناطيسية، مثل المُحرِّكات؛ ويكون الفقد على شكل حرارة.

b. تسبّب الحرارة الناتجة تلفًا للعوازل الحرارية والكهربائية.

c. تُنتج التيّارات الدوّامية مجالًا مغناطيسيًّا مُعاكسًا على شكل احتكاك.

تطبيقات التيّارات الدوّامية

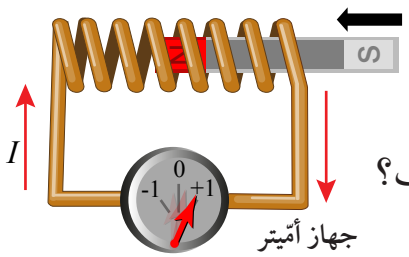
1. تُستخدم التيّارات الدّوامية كمكابح للقطارات المغناطيسية المعلقة. يتحرّك مغناطيس فوق قضبان موصّلة. تُنتج هذه الحركة تيارًا حثيًّا في قضبان القطار يُنشئ مجالًا مغناطيسيًّا وفق قانون لنز؛ فيؤدي إلى إبطاء القطار.

2. في بعض الحالات، يمكننا الاستفادة من الحرارة الناتجة من التيارات الدوامية، حيث تستخدم درجات الحرارة المرتفعة المتولِّدة عن التيارات الدَّوامية في صهر المعادن، وتحضير السبائك في أفران الحث.

3. تُستخدم التيّارات الدوّامية أيضًا للكشف عن وجود عيوب وتشققات في المعدن. فسطح المعدن الذي يحدث فيه شق، لا تنشأ فيه تيارات دواميّة لأن الشق يشكل عازلا للتيار. ويفيد ذلك خصوصًا في التحقُّق من وجود كسور وتشققات في هياكل الطائرات.

تقويم الدرس 5-1

1. يُدخِلُ طالب القطب N لمغناطيس في الطرف الأيمن لملف حلزوني ويلاحظ تحرُّك إبرة الأمّيتر نحو اليمين (الاتجاه الموجب) كيف تتحرّك إبرة الأميتر إذا:

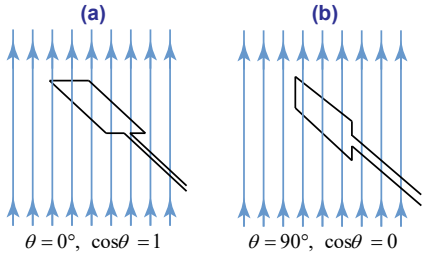


a. توقّفت حركة المغناطيس وبقي قطبه N داخل الملف؟

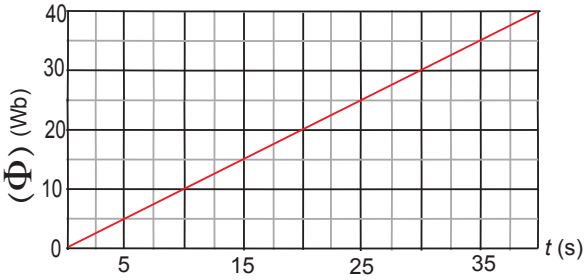
b. سُحِب المغناطيس بالسرعة نفسها التي أُدخِلَ بها؟

c. أُدخِلَ قطب S للمغناطيس من الطرف نفسه، وبالسرعة عينها؟

2. ملفّ سلكي موضوع بشكل عمودي على مجال مغناطيسي منتظم مقداره 0.1 T يتجه إلى أعلى. عرض الملف 20 cm وطوله 60 cm. بدأ الملف بالدوران، ثم توقّف بعد استدارة 90°. ما قيمة الفيض المغناطيسي عبر الملف في كل من الحالتين؟



3. يُظهر الشكل أدناه تغيُّر الفيض المغناطيسي في ملف من لفّة واحدة بدلالة الزمن، احسب القوة الدافعة الكهربائية الحثيّة في الملف.



4. يتعامل أحد العلماء مع مغانط كبيرة. قام بتحريك رأسه داخل المجال المغناطيسي فشعر بالدوار. هل سبب ذلك هو الحثّ الكهرومغناطيسي؟ إذا كان جوابك نعم، اشرح العلاقة بين الدوار والحثّ الكهرومغناطيسي (قد تحتاج إلى إجراء بحث في ذلك).

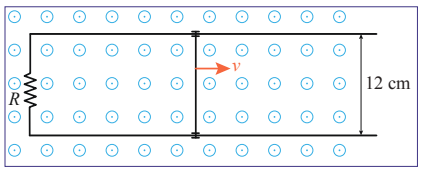
5. إطار معدني مستطيل الشكل طوله (3 cm) وعرضه (8 cm)، وضع بين قطبي مغناطيس على شكل حرف (U)، إذا كانت شدة المجال المغناطيسي (0.05 T)، أحسب الفيض المغناطيسي خلال الإطار في الحالتين:

a. وهو بكامل مساحته داخل المجال المغناطيسي.

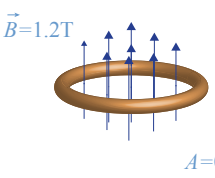
b. عند سحبه للخارج بحيث يبقى نصفه داخل المجال المغناطيسي.

6. حلقة نحاسية على شكل دائرة نصف قطرها (12 cm)، موضوعة داخل مجال مغناطيسي (0.2 T) متعامد مع مساحتها، إذا دارت الحلقة زاوية مقدارها (37 °) خلال مدة زمنية (0.1 s). احسب مقدار القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في الحلقة.

7. يبين الشكل المجاور سلكًا نحاسيًا قابل للانزلاق فوق سلكين موصلين متوازيين يشكلان جزءً من دائرة كهربائية تتخللها مقاومة (6 Ω). تتعرض لمجال مغناطيسي ثابت شدته (0.5 T) باتجاه خارج من الصفحة. إذا تحرك السلك المنزلق نحو اليمين بسرعة (10 m/s). احسب مقدار التيار الحثي المتولد في الدائرة وحدد اتجاهه.



8. حلقة نحاسية ملقاة بوضع أفقي داخل مجال مغناطيسي يتجه نحو الأعلى، كما في الشكل المجاور، إذا انعكس اتجاه المجال خلال زمن (0.04 s). ما مقدار القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في الحلقة. وما اتجاهها؟



الدرس 5-2
مولِّدات التيّار المتردِّد (AC)

تُستخدَم المولِّدات في محطّات توليد الكهرباء لإنتاج الكهرباء. كما تُستخدم في السيّارات التي تعمل على وقود البنزين لتوليد الكهرباء. يعمل المولد في السيارة بشكل مشابه للمولِّد الكهربائي في محطات توليد الكهرباء. لكنه ينتج تيارًا مستمرًا باتجاه واحد، حيث يقوم بشحن بطّارية السيّارة، ويُوفِّر الطاقة للأنظمة التي تعمل بالكهرباء، مثل أنظمة الصوت والإضاءة.

الشكل 5-20 المولد الكهربائي في السيارة (الدينمو).

يحتوي كل من المولِّد الكهربائي والدينامو على ملفّات عدّة من الأسلاك الكهربائية حول قلب حديدي، لأن الحديد يُركّز المجالات المغناطيسية؛ فيؤدّي إلى زيادة كفاءة إنتاج الطاقة الكهربائية. في السيارات الهجينة والسيارات الحديثة التي تعمل على الكهرباء، يعمل محرِّك الدفع الكهربائي كمولِّد، عندما لا تتسارع السيارة. ويجري استخدام جزء من الطاقة الحركية للسيارة في شحن بطاريتها، بدلًا من هدرها كطاقة حرارية.

مخرجات التّعلُّم

P1113.1 يحدد أن التيار الكهربائي المتردد يتولد عند دوران ملف في مجال مغناطيسي منتظم، ويوضح مبدأ عمل مولد كهربائي بسيط للتيار المتردد.

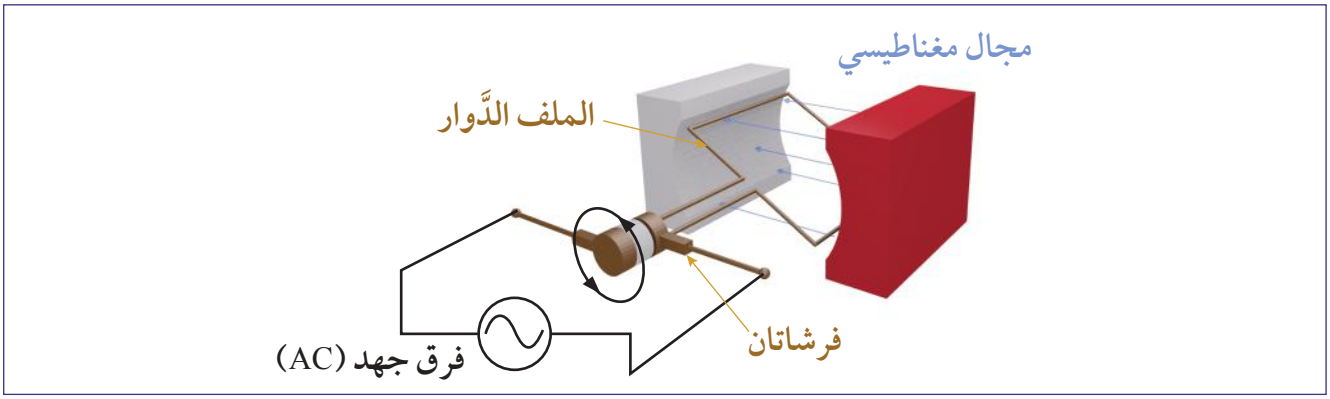
P1113.2 يصف مفاهيم القيمة الفعالة لشدة التيار، والقيمة الفعالة لفرق الجهد، والزمن الدوري، والتردد، والقيمة العظمى لشدة التيار المتردد، ويحل مسائل حسابية حول كل من هذه المفاهيم.

المفردات

مولد تيار متردد (AC)	AC Generator
جهد متردِّد	Alternating voltage
تيار مستمر (DC)	Direct current
تيار متردد (AC)	Alternating current
دائرة تيار متردِّد	AC circuit
قيمة فعالة	Root mean square value (Effective value)

مولِّد التيّار المتردِّد (AC)

مولِّد التيّار المتردِّد هو آلة يقوم عملها على قانون فارادي في الحث،حيث يجري توليد الكهرباء من خلال التغيُّر المستمر للفيض المغناطيسي خلال الملفّ الكهربائي، كما يُظهِر **الشكل 5-21**. نتيجة لدوران الملف حول محوره داخل المجال المغناطيسي، يؤدّي تغيّر الفيض المغناطيسي إلى توليد فرق جهد بين طرفَي الملف. فالزيادة والنقصان في الفيض المغناطيسي يولِّدان فرق جهد يتردَّد بين سالب وموجب. فمصطلح (AC) يعني تيّارًا كهربائيًّا متردِّدًا.



الشكل 5-21 مبدأ عمل المولِّد الكهربائي.

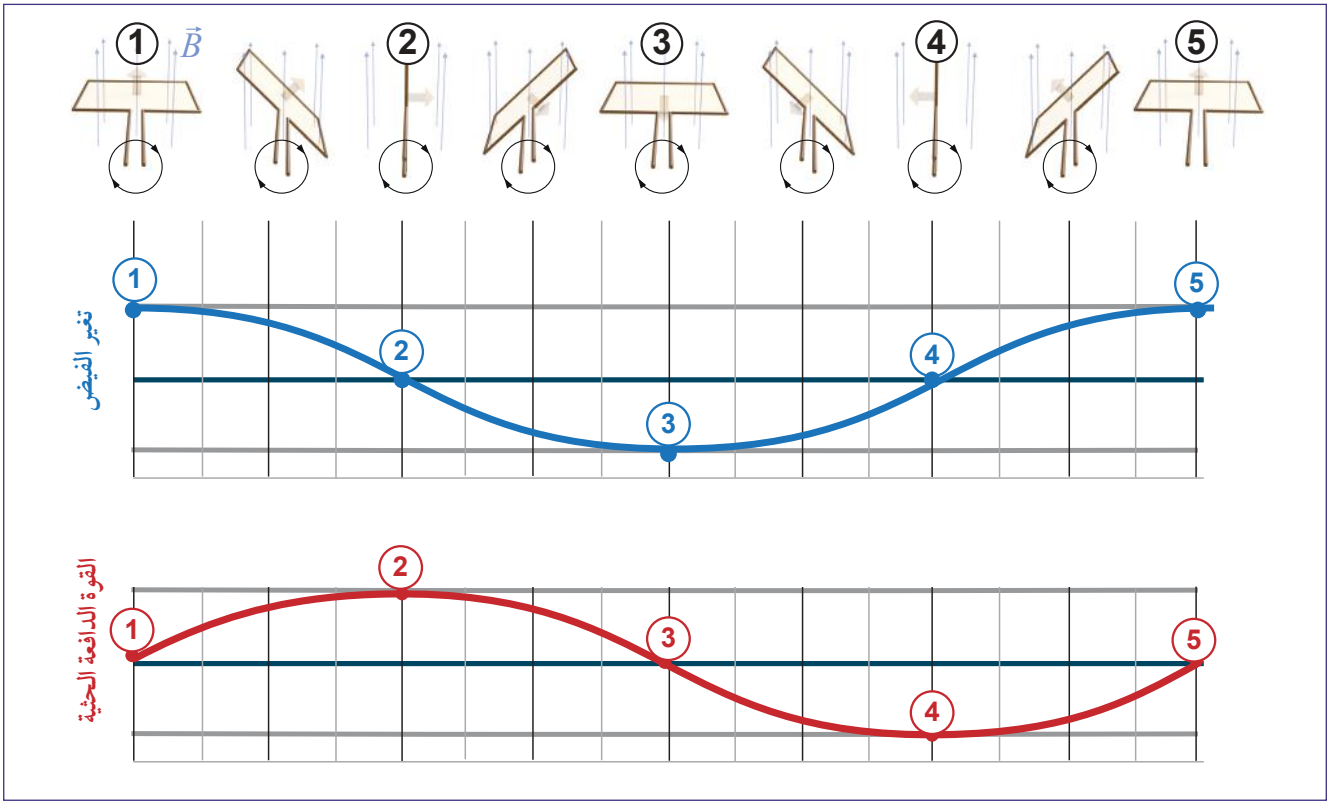
معلوم أن معظم مولِّدات الكهرباء الحديثة في العالم، والتي تنتج جهدًا متردِّدًا، تكون سرعة تغيُّر إشارة الجهد فيها 60 مرّة كل ثانية أي 60Hz. فالملف الظاهر في **الشكل 5-21** يدور بمعدَّل 3600 دورة في الدقيقة. تُستخدَم في بعض البلدان مولّدات بتردُّد 50Hz .الطاقة الميكانيكية اللازمة لدوران الملف وتشغيل المولِّد نحصل عليها من احتراق الغاز أو البنزين أو الديزل أو الفحم. ويمكن أن يكون مصدرها الطاقة النووية أو سقوط الماء أو حركة الرياح. فالمولّد يحوِّل الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربائية؛ فالتيار الكهربائي الحثي يحاول دائما مقاومة التغير في المجال المغناطيسي الأساسي، والطاقة الميكانيكية الداخلة تُبقي الملف في حالة دوران. تحوِّل المولدات الحديثة 90% من الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربائية.

الشكل 5-22 مولِّد كهربائي مفكَّك للصيانة.

يُظهِر **الشكل 5-22** الأجزاء التي تعمل داخل المولِّد الكهربائي (AC). ولكي نحصل على أعلى كفاءة ممكنة، لابد أن يكون هناك ثلاثة أو أكثر من الملفات المزدوجة.

الفيض المغناطيسي في مولِّد التيار المتردِّد (AC)

يوضِّح **الشكل 5-23** الفيض المغناطيسي والقوة الدافعة الحثية المتولدة في الملف الذي يدور داخل مجال مغناطيسي ثابت. النسبة $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ الواردة في قانون فارادي تُمثِّل ميل منحنى تغيُّر الفيض بالنسبة إلى الزمن. أما الإشارة السالبة الموجودة في القانون فتعني أن الجهد يساوي سالب ميل المنحنى.



الشكل 5-23 تغيُّر الفيض المغناطيسي بالنسبة إلى الزمن، الناتج من دوران ملف داخل مجال مغناطيسي.

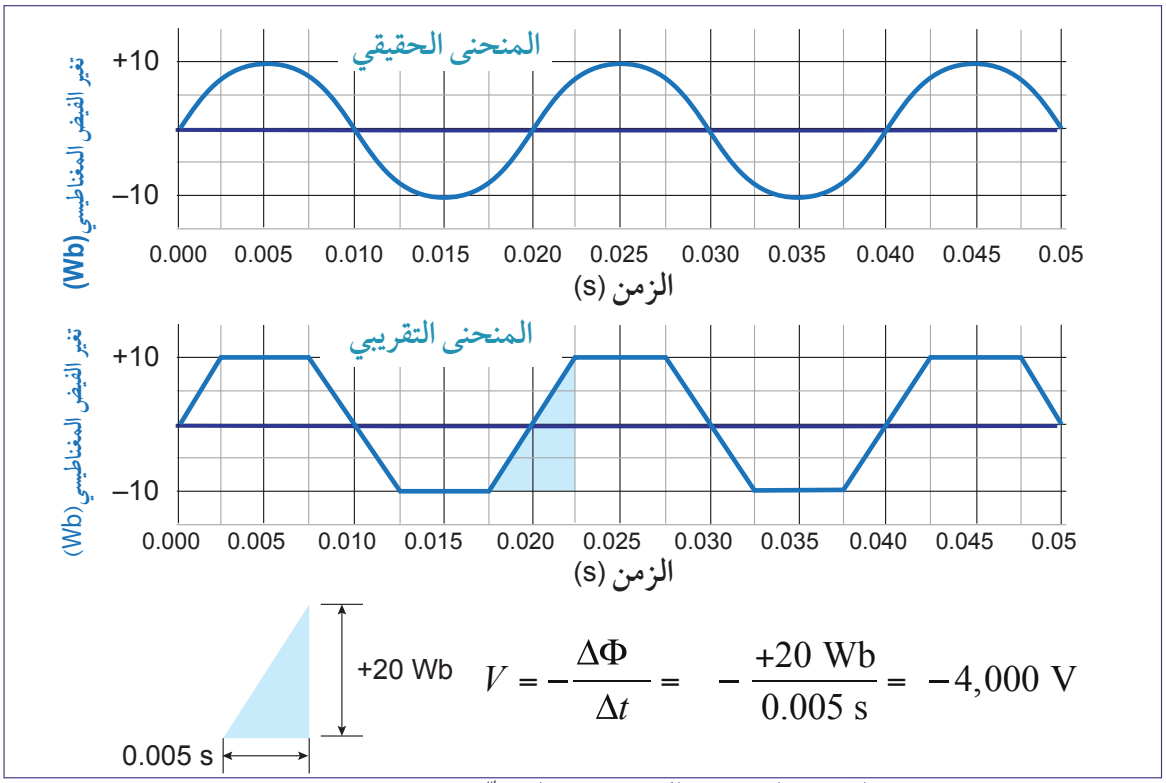
لكي نفهم كيف يعمل مولد التيار المتردِّد، ننظر إلى الفترات الزمنية الأربع الموجودة في **الشكل 5-23** خلال دوران الملف في المجال المغناطيسي. ينشأ الجهد الحثّي نتيجة تغيُّر معدَّل الفيض (الميل)، وليس كمية الفيض نفسها.

1. عند اللحظة (1)، يكون العمودي على الملف موازيًا لاتّجاه المجال المغناطيسي، ما يعني أن الفيض يصل إلى قيمته العظمى، فيكون ميل المنحنى عند هذه اللحظة يساوي صفرًا، وبالتالي يكون الجهد صفرًا.
2. عند اللحظة (2)، تصل قيمة الفيض المغناطيسي إلى الصفر أثناء تناقصها، فيكتسب ميل المنحنى، وكذلك الجهد، أعلى قيمة موجبة.
3. عند اللحظة (3)، يكتسب الفيض المغناطيسي أقصى قيمة سالبة، ويكون ميل المنحنى مساويًا للصفر، ولذلك يكون الجهد صفرًا.
4. عند اللحظة (4)، يكتسب الفيض المغناطيسي صفرًا؛ لكنه يتجه إلى الإزدياد، فيكون ميل المنحنى عند أعلى قيمة موجبة، ما يعني أن الجهد يكون عند أعلى قيمة سالبة.

الجهد الحثي يساوي سالب ميل منحنى تغيُّر الفيض المغناطيسي بالنسبة إلى الزمن

حساب القوّة الدافعة الكهربائية الحثيّة

يربط قانون فارادي القوة الدافعة الكهربائية الحثيّة بمعدّل تغيّر الفيض المغناطيسي مع الزمن. ومُعدّل التغيّر هذا هو ميل منحنى تغير الفيض المغناطيسي بدلالة الزمن. ولإيضاح كيفية الحساب، يُظهر **الشكل 5-24** دالّة جيبية تقريبية تصف تغيّر الفيض المغناطيس بدلالة الزمن.



الشكل 5-24 حساب تقديري للقوة الدافعة الكهربائية الحثيّة.

مثال 6

احسب القوة الدافعة الكهربائية الحثّية من المنحنى التقريبي المُعطيات في **الشكل 5-24**.

a. عند اللحظة 0.015 s.

b. عند اللحظة 0.030 s.

c. ارسم منحنى القوة الدافعة الكهربائية الحثّية بدلالة الزمن.

المطلوب: القوة الدافعة الكهربائية الحثية.

المُعطيات: $t_2 = 0.030\text{ s}$ $t_1 = 0.015\text{ s}$ ، المنحنى

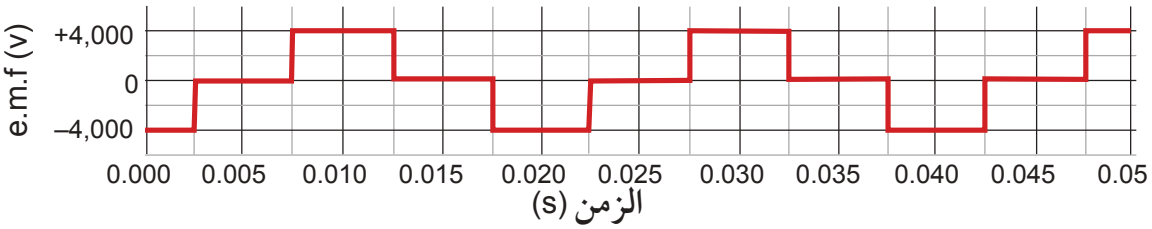
العلاقات: $e.m.f = \frac{-\Delta\Phi}{\Delta t}$

الحل:

a. $e.m.f = \frac{-\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{0\text{ Wb}}{0.005\text{ s}} = \boxed{0\text{ V}}$

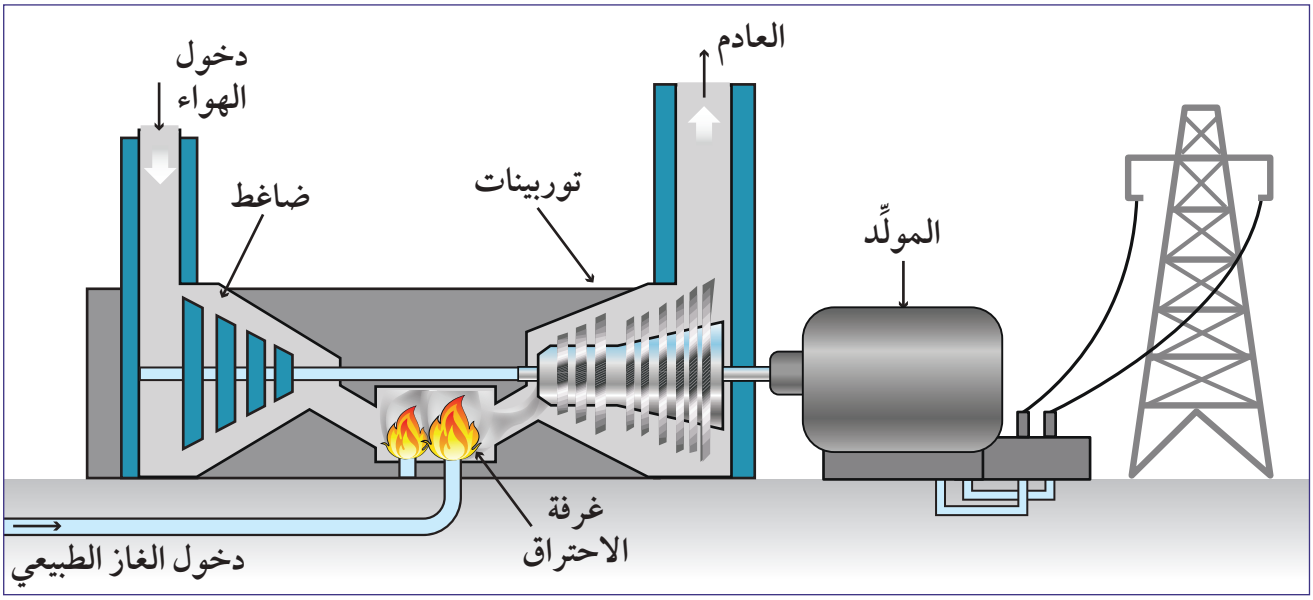
b. $e.m.f = \frac{-\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{-20\text{ Wb}}{0.005\text{ s}} = \boxed{+4{,}000\text{ V}}$

c.



محطّات توليد الكهرباء

جميع محطات توليد الكهرباء التي تعمل على طاقة الرياح أو الماء، أو التي تعمل بالطاقة النووية، أو التي تحرق الغاز والفحم، تحتوي على آلة تولد الحركة الدورانية تسمى توربين، ويعتمد إنتاج الكهرباء في هذه المحطات جميعها على المولدات الكهربائية التي تستمد دورانها من التوربين. فينتج المولد تيارًا كهربائيًا مترددًا يتم توزيعه عبر شبكة الكهرباء الوطنية إلى المنازل والمباني الأخرى.



الشكل 5-25 محطّة توليد كهرباء تعمل على الغاز الطبيعي.

الغاز الطبيعي مصدر شائع للطاقة الكهربائية المُنتَجة في قطر. يحترق الغاز الطبيعي مع الأكسجين في غرفة الاحتراق التي تنتج ثاني أكسيد الكربون (**الشكل 5-25**).

عندما يخرج غاز ثاني أكسيد الكربون من العادم تتحرَّك التوربينات، التي بدورها تجعل ملفات المولدات الموجودة في المجال المغناطيسي في حالة دوران مستمرّ، ينشأ عنها تيار متردِّد.

الشكل 5-26 تستخدم محطّات توليد الكهرباء المولِّدات الكهربائية.

بعض المحطّات الكهربائية، كتلك التي تعمل على الوقود الأحفوري أو الطاقة النووية، تُستخدَم فيها الطاقة لتسخين الماء الذي بدوره ينتج بخار ماء يعمل على تحريك التوربينات.

تستخدم السدود الكهرومائية طاقة الوضع الناشئة عن الجاذبية الأرضية لتدفُّق الماء والتي بدورها تحرِّك التوربينات.

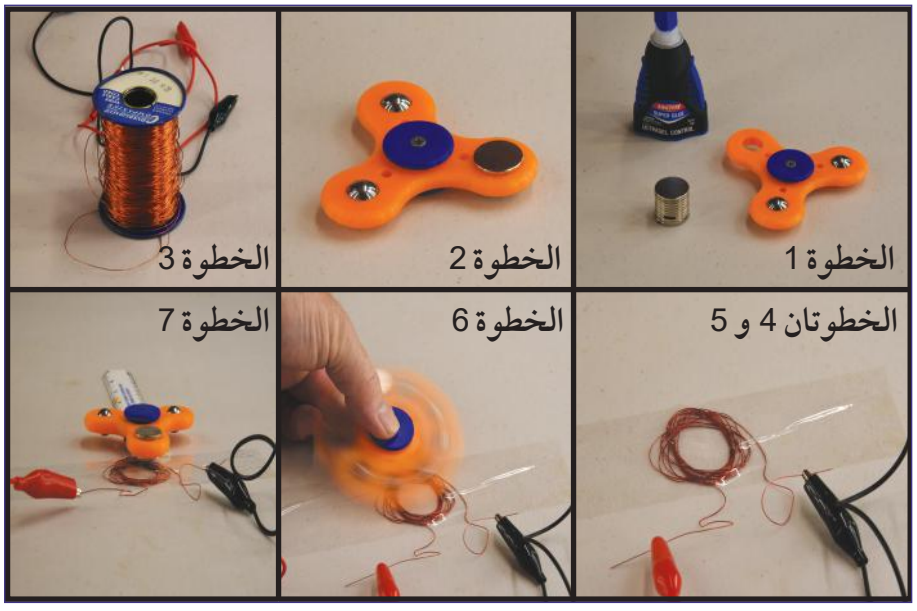
نشاط عملي

5-2 صنع مولِّد كهربائي

سؤال الاستقصاء	كيفية صنع مولِّد كهربائي بسيط.
الموادّ المطلوبة	لعبة الدّوار، مغناطيس قوي دائري الشكل، أسلاك توصيل مزوَّدة بملاقط تمساح، أسلاك نحاسية رفيعة، راسم الذبذبات، الورق الزجاجي (السنفرة)

خطوات التجربة

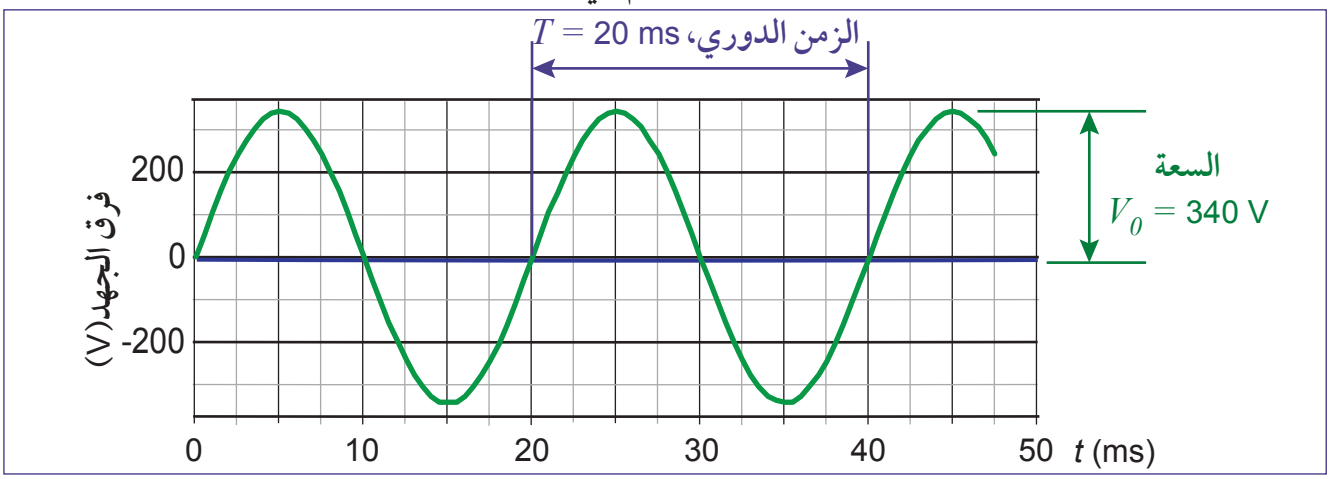
1. أزل واحدًا من الأوزان الموجودة عند أطراف الدوّار، كما في **الشكل 5-27**.
2. ضع المغناطيس مكان الوزن المُزال، ألصقه جيدًا.
3. استخدم الورق الزجاجي (السنفرة) لإزالة المادة العازلة (الورنيش) الموجودة على طرف السلك النحاسي، لكي يظهر الجزء الموصِّل منه.
4. اصنع ملفًّا من الأسلاك الكهربائية، ثم ألصقه بالطاولة. حاول أن يكون الملف مسطّحًا قدر الإمكان.
5. صِل طرفي الملف براسم الذبذبات، مستخدمًا الأسلاك الكهربائية المزوَّدة بملاقط تمساح. ثم شغّل راسم الذبذبات.
6. لفّ الدوّار، لكي يدور. ولاحظ الجهد على شاشة راسم الذبذبات.
7. ضع الدوّار فوق مسطرة، حيث يصبح قريبًا جدًّا من الملف.
8. قِس فرق الجهد وتغيُّر فرق الجهد.



الشكل 5-27 كيفية صنع مولد كهربائي بسيط.

الجهد المتردِّد (AC)

يُنتج مولِّد التيّار المتردِّد جهدًا تتردَّد قيمته بين أقصى قيمة موجبة وأقصى قيمة سالبة في كل دورة من دورات الملف. يُمثَّل التغير في الجهد المتردِّد والتيار المتردِّد على شكل موجة جيبية. يوضح **الشكل 28-5** شكل الموجة الجيبيّة للجهد المتردِّد المستخدم في قَطر.



الشكل 28-5 تغيُّر فرق الجهد بالنسبة إلى الزمن لملف يدور داخل مجال مغناطيسي.

1. الزمن الدوري (T) لموجة هو الزمن بين نقطة على الدورة الأولى وبين النقطة نفسها على الدورة الثانية، الزمن الدوري في المثال: $T = 20\text{ms}$.
2. التردُّد f هو مقلوب الزمن الدوري، أي عدد الدورات في الثانية الواحدة.
وحدة قياس التردُّد هي الهرتز Hz، وهي عدد الموجات في الثانية الواحدة. تردُّد التيار المستخدم في قطر ودول أوروبا هو 50Hz.
3. السعة هي أقصى قيمة للموجة عن موضع الاتزان (قمّة الموجة). السعة في المثال = 340V ويتردَّد الجهد بين 340V و 340V–. هذه السعة هي المستخدمة في قطر، وغالبية الدول الأوروبية.

مثال 7

احسب تردُّد موجة إذا كان زمنها الدوري 0.0167s

المطلوب: $f = ?$

المُعطيات: $T = 0.0167\text{ s}$

العلاقات: $f = \frac{1}{T}$

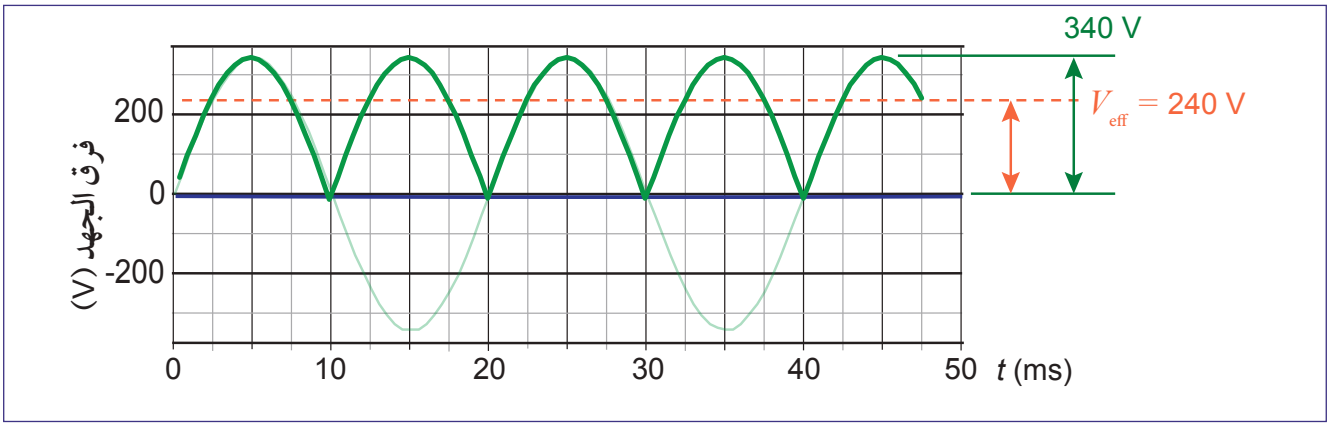
الحل:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.01667\text{ s}} = 60\text{ s}^{-1} = 60\text{ Hz}$$

يُستخدم التردُّد 60 Hz للطاقة الكهربائية في الولايات المتحدة الأمريكية وكندا.

القيمة الفعّالة للجهد (V_{eff})

يمكن وصف جهد البطارية برقم واحد، 1.5V على سبيل المثال. هل يمكنك أن تعبّر عن جهد متردِّد برقم واحد؟ التغير في الجهد المتردِّد تكون قيَمُه متغيِّرة. تبلغ القيمة الفعالة للجهد المستخدم في قطر، ومعظم الدول الأوروبية، 240V، في حين أن القيمة العظمى للجهد تبلغ 340V. فمن أين أتت 240V؟



الشكل 5-29 القيمة الفعّالة للجهد المتردِّد.

بالنظر إلى أن الأجزاء الموجبة والسالبة للجهد المتردِّد متناظرة، يكون متوسط الجهد لدورة واحدة مساويًا للصفر. ولحساب متوسِّط الجهد المفيد، نقوم بتربيع قيم الجهد حتى تصبح كلها موجبة؛ ثم نحسب متوسِّط هذه القيم المربّعة والموجبة، ثم نحسب جذرها التربيعي. يُسمّى الناتج القيمة الفعّالة للجهد V_{eff} أو V_{rms}. يمثِّل **الشكل 5-29**، القيمة الفعّالة للجهد وهي تساوي 240V، وتكون أقلّ من القيمة العظمى للجهد التي تبلغ 340V. ومن الناحية العملية فإننا نستخدم القيمة الفعّالة، وليس القيمة العظمى، للتعبيرعن الجهد المتردِّد. يمكن حساب القيمة الفعالة للجهد من **المعادلة 5-4**.

4-5	القيمة الفعالة للجهد		
	$V_{eff} = \frac{V_o}{\sqrt{2}}$	V_{eff}	القيمة الفعّالة للجهد (V)
		V_o	القيمة العظمى للجهد (V)

مثال 8

احسب القيمة العظمى لجهد قيمته الفعالة 120V.

المطلوب: $V_o = ?$

المُعطيات: $V_{eff} = 120\ V$

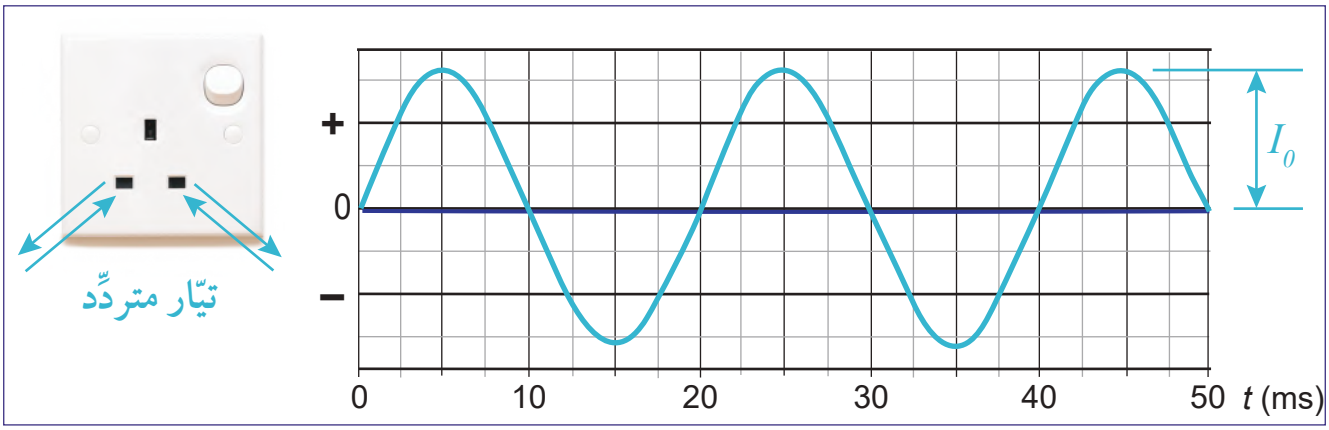
العلاقات: $V_{eff} = \frac{V_o}{\sqrt{2}}$

الحل:

$$V_{eff} = \frac{V_o}{\sqrt{2}} \rightarrow V_o = \sqrt{2} \times V_{eff} = (1.414)(120\ V) = \boxed{170\ V}$$

التيّار المتردِّد (AC)

يطلق على التيار الناتج من بطّارية اسم التيار المستمر أو (DC). والتيار المستمر ثابت الشدّة ويتدفَّق باتِّجاه واحد، لأن القطب الموجب والقطب السالب للبطارية لا ينعكسان. أما **التيّار المتردِّد** (AC) **Alternating current** فيتقلّب اتجاه التيار فيه نتيجة لتقلّب إشارة الجهد. لذلك يكون تردُّد التيار مساويًا لتردُّد الجهد المتردِّد. عندما تقوم بتوصيل جهاز بمأخذ التيار، فإن التيار يعكس اتجاهه 50 مرة في الثانية. **(الشكل 5-30)**.



الشكل 5-30 التيار المتردِّد في قطر.

1. تردُّد التيّار المتردِّد يساوي تردُّد الجهد المتردِّد الذي يسببه.

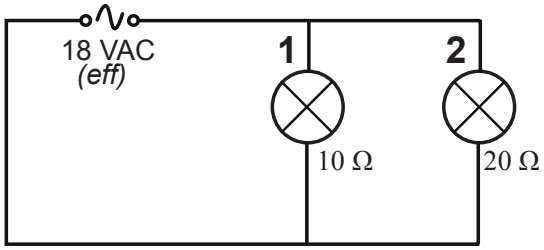
2. القيمة العظمى للتيّار المتردِّد I_o تعتمد على مقاومة الجهاز أو الدائرة الموصول بها. يجري في العادة الحفاظ على جهد التيّار المتردِّد كأساس، وتختلف قيم التيّار باختلاف مقاومة الدائرة.

مثال 9

يجري توصيل مصدر جهد متردِّد، قيمته الفعّالة 18V، بالدائرة المجاورة.

a. احسب القيمة العظمى للتيّار المار في المصباحين (1) و (2).

b. احسب القيمة العظمى للتيّار الكلّي.



المطلوب: $I_1 = ?\ ,\ I_2 = ?\ ,\ I_{total} = ?$

المُعطيات: $R_1 = 10\ \Omega\ ,\ R_2 = 20\ \Omega\ ,\ V_{eff} = 18\ \text{V}$

العلاقات: $V_{eff} = \dfrac{V_o}{\sqrt{2}}$ ، $I = \dfrac{V}{R}$ ، $I_{total} = I_{1+} I_2$

الحل:

$$V_o = \sqrt{2} \times V_{eff} = (1.414)(18V) = 25.5\,\text{V}$$

$$I_1 = \frac{V_o}{R_1} = \frac{25.5\ \text{V}_{peak}}{10\ \Omega} = \boxed{2.55\ \text{A}}$$

$$I_2 = \frac{V_o}{R_2} = \frac{25.5\ \text{V}}{20\ \Omega} = \boxed{1.28\ \text{A}}$$

$$I_{total} = I_1 + I_2 = \boxed{3.83\ \text{A}}$$

القدرة في دوائر التيار المتردِّد

يمكن حساب القدرة الكهربائية لدائرة التيار المستمر (DC) باستخدام المعادلة $P = VI$. لكن في الدائرة ذات الجهد المتردِّد، تعتمد القدرة الكهربائية على القيمة الفعّالة للجهد والتيّار. يمكن حساب القدرة المتوسطة لمقاومة كهربائية في دائرة التيّار المتردّد بالمعادلة 5-5، وحساب القيمة الفعّالة للتيّار المتردِّد بالمعادلة 5-6.

5-5	القدرة المتوسطة في مقاومة دائرة التيّار المتردِّد	P	القدرة المتوسطة (W)
	$P = V_{eff} I_{eff}$	V_{eff}	القيمة الفعّالة للجهد (V)
		I_{eff}	القيمة الفعّالة للتيار (A)
6-5	قانون أوم لدائرة تيار متردِّد تشتمل على مقاومة	I_{eff}	القيمة الفعّالة للتيار (A)
	$I_{eff} = \frac{V_{eff}}{R}$	V_{eff}	القيمة الفعّالة للجهد (V)
		R	المقاومة (Ω)

تُطبَّق المعادلة 5-5 في الدوائر التي تحتوي على مقاومات فقط، أو أجهزة تشتمل على مقاومات، كالمصابيح. لكن في حالة المكثّف والأجهزة الكهرومغناطيسية الأخرى كالمحرِّك الكهربائي، فإن الوضع يختلف، بالنظر إلى وجود فرق في الطور بين التيّار والجهد. نذكر أن جهد المكثِّف يتخلّف في الطور عن التيار، لأنه يستغرق وقتًا للشحن والتفريغ.

مثال 10

مولد صغير للتيار الكهربائي المتردد قيمة جهده العظمى 314 V ، يتّصل بدائرة مقاومتها الكلية 10 Ω. احسب القيمة الفعّالة للجهد والتيّار، وكذلك متوسِّط القدرة الناتجة في المولِّد.

المطلوب: القيمة الفعّالة للجهد V_{eff} والتيّار I_{eff}، القدرة المتوسطة P_{av}.

المُعطيات: $V_o = 314\ \text{V}$ ؛ $R = 10\Omega$

العلاقات: $I = \frac{V}{R}$ ؛ $P = V_{eff} I_{eff}$ ؛ $V_{eff} = \frac{V_o}{\sqrt{2}}$

الحل:

لحساب القيمة الفعّالة للجهد: $V_{eff} = \frac{V_o}{\sqrt{2}} = \frac{314}{\sqrt{2}} = \boxed{222\text{V}}$

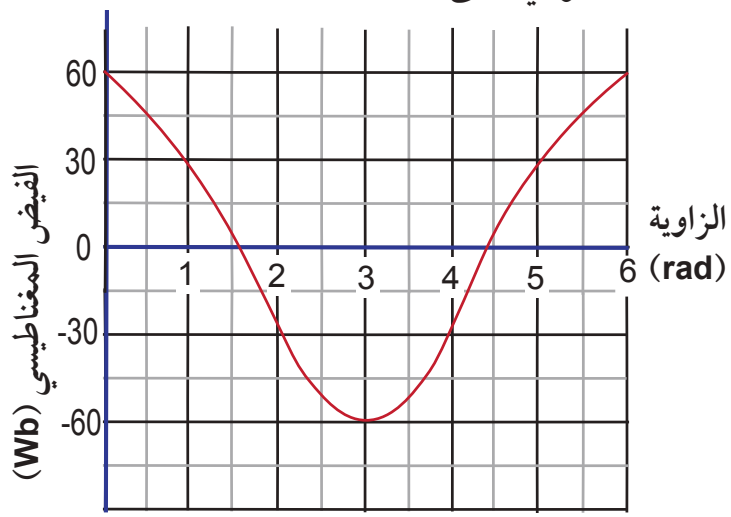
لحساب القيمة الفعّالة للتيّار: $I_{eff} = \frac{V_{eff}}{R} = \frac{222\ \text{V}}{10\ \Omega} = \boxed{22\ \text{A}}$

لحساب القدرة المتوسطة: $P = V_{eff} I_{eff} = (222\ \text{V})(22\ \text{A}) = \boxed{4{,}884\ \text{W}}$

تقويم الدرس 2-5

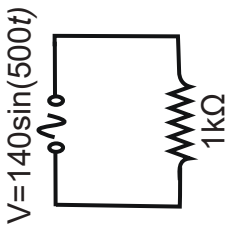
1. مولِّد كهربائي للتيار المتردِّد يحتوي على ملف عدد لفّاته 400، ومساحة مقطعه $100cm^2$، يدور داخل مجال مغناطيسي شدته $3 \times 10^{-2}T$ بسرعة 75 دورة بالدقيقة.
   a. احسب القيمة العظمى للجهد الحثّي.
   b. احسب القيمة العظمى للتيار، إذا كانت المقاومة تساوي 14Ω.

2. وُضِع ملف داخل مجال مغناطيسي ثابت الشدّة. عندما يدور هذا الملفّ، فإن الزاوية بين الخط العمودي على الملفّ واتجاه المجال المغناطيسي تتغيّر. يوضح الرسم البياني الآتي كيفية تغيُّر الفيض المغناطيسي مع الزاوية بين اتجاه المجال المغناطيسي والخط العمودي على الملف.



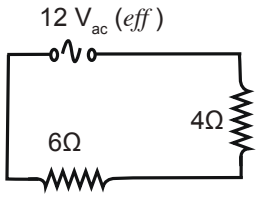
   a. أنشىء رسمًا بيانيًّا يوضح تغيُّر القوة الدافعة الكهربائية الحثّية بالنسبة إلى الزاوية.
   b. إذا تضاعفت سرعة الملف، وفي الاتجاه الدوراني نفسه:
   - كيف سيتغيّر الفيض المغناطيسي بالنسبة إلى الزاوية؟ يمكنك أن ترسم التغيّر على ورقة رسم بياني.
   - أنشىء رسمًا بيانيًّا يوضِّح تغيُّر القوة الدافعة الكهربائية الحثّية بالنسبة إلى الزاوية.

3. في الدائرة المجاورة، احسب:



   a. القيمة الفعّالة للجهد.
   b. القيمة الفعّالة للتيّار.
   c. القدرة القصوى المستهلكة في المقاومة.
   d. متوسِّط القدرة المستهلكة في المقاومة .

تقويم الدرس 5-2

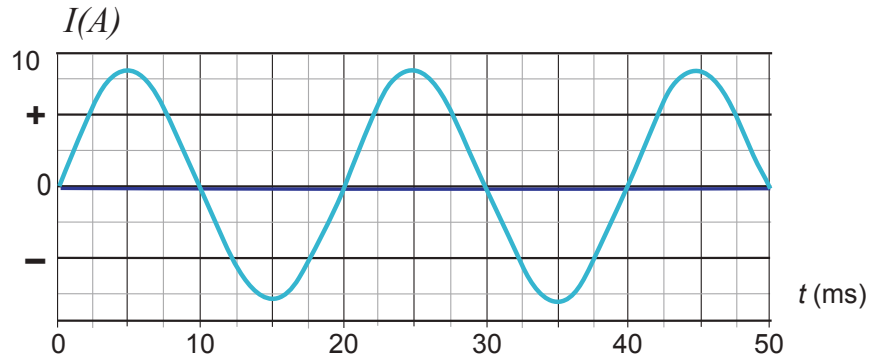


4. دائرة كهربائية تتكون من مصدر جهد متردد يتصل معه مقاومتان كما في الشكل، أحسب القيمة العظمى للتيار الكلي في الدائرة، وفرق الجهد بين طرفي المقاومة الأولى (4 Ω).

5. مولد كهربائي للتيار المتردد قيمة الجهد العظمى (34 V)، يتصل بمجموعة مصابيح عددها (4) متصلة على التوالي مقاومة كل منها.(5 Ω) أحسب القدرة المتوسطة التي يستهلكها كل مصباح.

6. مولد كهربائي يدور بمعدل (3000 rpm) دورة في الدقيقة، ويولد جهدًا كهربائيًا قيمته العظمة (340 V). أحسب القيمة الفعالة للجهد وتردد. هل يكون هذا المولد مناسبًا للمواصفات القطرية؟

7. يوضح الشكل البياني التغير في قيمة التيار المتردد الذي ينتجه مولد كهربائي، معتمدًا على الشكل، حدد القيمة العظمى للتيار الكهربائي، وقيمته الفعالة وتردده.



8. احسب القدرة المتوسطة المستهلكة في مقاومة قيمتها (4 Ω) تتصل مع مصدر جهد متردد قيمته العظمى (12 V).

الدرس 3-5
المحوِّلات الكهربائية

جعلت المُحوِّلات نقل الكهرباء يجري بفاعلية فائقة. وقبل المحوِّلات، كانت الأنظمة السابقة من محطّات توليد التيار المستمر تفقد 20% إلى 85% من الطاقة الكهربائية خلال نقلها من محطات توليد الكهرباء إلى المنازل. صمّم ويليام ستانلي أول محوّل كهربائي تجاري عام 1886 بالاستناد إلى عمل هانز كريستيان أورستد. عالم الفيزياء المشهور الذي يعود له الفضل في توليد الكهرباء عن طريق المجال المغناطيسي. إذ لاحظ عام 1820 أثناء تحضير أدواته لإلقاء محاضرة أن إبرة البوصلة قد انحرفت عند تشغيل الكهرباء. لذلك يعود الفضل إليه عندما اكتشف أن التيار الكهربائي المتدفِّق ينتج مجالًا مغناطيسيًّا.

الشكل 5-31 محول جهد عالي للتيار المتردِّد.

استخدم مايكل فـارادي نتائج أعمال أورستد لإنشاء أول جهاز دوران كهربائي، وهو أساس المحرِّك الكهربائي. واكتشف فـارادي عـام 1831 أن تَغَيُّر المجال المغناطيسي حول سلك يؤدي إلى توّليد كهرباء فيه أيضًا، فأدرك الآتي: بدلًا من تحريك مغناطيس يمكن تغيير المجال المغناطيسي حول السلك، فتتولّد فيه الكهرباء أيضًا. وهذا هو المبدأ الأساسي في عمل المحوّلات الكهربائية.

مخرجات التّعلُّم

P1113.3 يصف مبدأ عمل المحول الكهربائي ويشرح أهميته في نقل الطاقة الكهربائية لمسافات طويلة.

P1113.4 يحل مسائل حسابية حول نقل الطاقة الكهربية.

المفردات

محوّل كهربائي	Transformer
حث متبادل	Mutual induction
محوّل رافع للجهد	step-up transformer
محوّل خافض للجهد	Step-down transformer

نقل الطاقة الكهربائية

تشيّد محطّات توليد الكهرباء في العادة بعيدًا عن المنازل التي يستخدم الناس فيها الطاقة الكهربائية. لأسلاك التوصيل مقاومة منخفضة جدًا؛ لكنها ليست صفرًا. يتدفق التيار الكهربائي عبر خطوط التوصيل، فتفقد بعض الطاقة كحرارة نتيجة لمقاومة الأسلاك. وتتناسب القدرة الكهربائية P المفقودة بسبب مقاومة الأسلاك، طرديًّا مع مربّع شدة التيار المار فيها (**المعادلة 5-7**).

سؤال للمناقشة

لماذا تُستخدم خطوط الجهد العالي لنقل الكهرباء من محطات الطاقة؟

هل يُستخدَم الجهد العالي نفسه لتشغيل الأجهزة في منازلنا؟

7-5 القدرة المفقودة

$$P_{\text{مفقودة}} = I^2R$$

$P_{\text{مفقودة}}$	القدرة المفقودة (W)	
I	شدّة التيار الكهربائي (A)	
R	المقاومة الكهربائية (Ω)	

الجدول 5-1 فقد القدرة عند نقل 240 kW.

	المعادلة	240 V	2,400 V
شدة التيار الكهربائي في خط نقل مقاومته 0.1 Ω	$I = \frac{P}{V}$	1000 A	100 A
القدرة المفقودة في خط النقل	$P_{\text{مفقودة}} = I^2R$	100 kw	1000 W
نسبة القدرة المفقودة من القدرة المنقولة	$\frac{P_{\text{مفقودة}}}{240kW}$	42 %	0.42 %

افترض أن قدرة كهربائية مقدارها 240 kW انتقلت من المولِّد الكهربائي إلى المنازل، عبر خط نقل مقاومته منخفضة مقدارها 0.1 Ω. وهذه القدرة الكهربائية تكفي لتزويد 100 منزل تقريبًا. تخبرنا المعادلة (5-7) أن القدرة الكهربائية التي يحملها تيار 1000 A وجهد 240 V هي نفسها التي يحملها تيار 100 A وجهد 2400 V.

$$P_1 = V_{eff} I_{eff} = (240\ \text{V})(1000\ \text{A}) = 240{,}000\ \text{W}$$

$$P_2 = V_{eff} I_{eff} = (2{,}400\ \text{V})(100\ \text{A}) = 240{,}000\ \text{W}$$

يكون فقد القدرة في خط 240 V مقداره 100 kW كما هو مبيّن في الجدول 5-1، أي بنسبة (0.42%) من القدرة المنقولة، في حين يكون فقد القدرة في خط 2,400 V مقداره 1,000 W فقط أي بنسبة (0.4%) فقط وهي أقل كثيرًا، لأن الفقد من خلال خط نقل الطاقة يتناسب طرديًا مع مربّع التيار. وهذه ميزة كبيرة لاستخدام خطوط نقل ذات جهد عال. تعمل خطوط توصيل الطاقة لمسافات طويلة على فرق جهد 345,000 V. وفي هذه الحالة تكون القدرة المفقودة 0.05 W فقط.

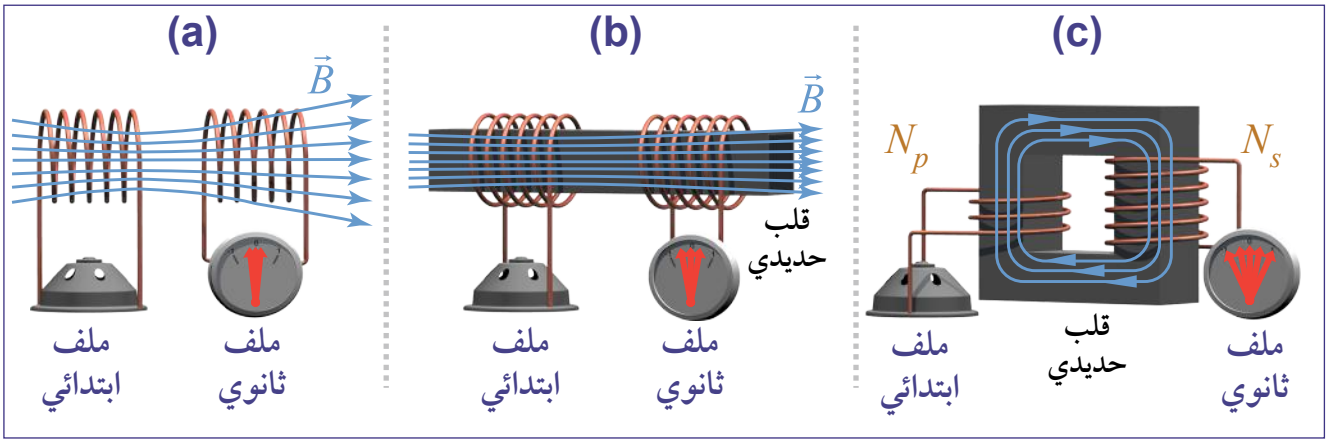
تُستخدم خطوط الجهد العالي لنقل الكهرباء مسافات طويلة، وذلك لخفض فقد الطاقة الكهربائية.

المُحوِّلات الكهربائية

يتم نقل الطاقة بجهد يصل إلى 345,000 V وهو جهد خَطِر، في حين أننا نحتاج إلى الطاقة الكهربائية في المنازل والمؤسسات عند جهد 240V. لذلك نحن نحتاج إلى محوِّلات لنقل الطاقة الكهربائية.

المحوِّل الكهربائي Transformer جهاز يعتمد على قانون فارادي، يعمل على تغيير جهد التيار المتردِّد الداخل فيه إلى جهد تيار متردِّد مختلف خارج منه.

تُستخدم مُحوِّلات كهربائية عديدة لخفض فرق الجهد العالي بكفاءة في خطوط نقل التيار المتردِّد إلى جهد آمن للاستخدام المنزلي.



الشكل 5-32 كيفية عمل المحوِّل الكهربائي.

ولفهم طريقة عمل المحوِّلات، افترض الملفَّين في **الشكل 5-32**.

a. يُنتج التيّار المتردِّد في الملف الابتدائي مجالًا مغنطيسيًا متردِّدًا. وهذا المجال المتردِّد ينشىء فيضًا مغناطيسيًا متردِّدًا في الملف الثانوي؛ فيتولّد تيار متردِّد حثّي في الملف الثانوي (الحث المتبادل).

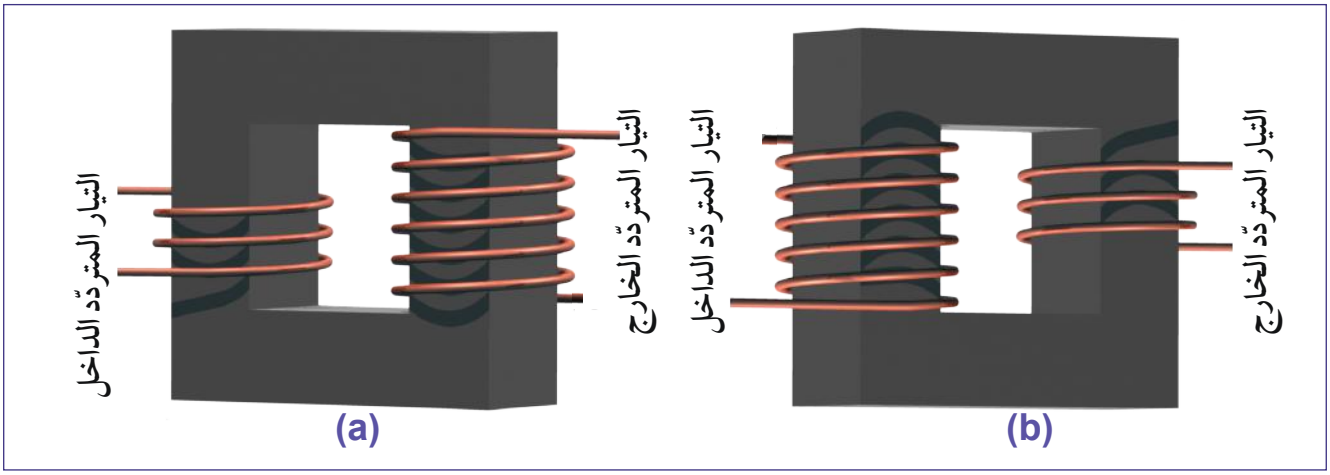
b. أُجريَ تحسين باستخدام قلب حديدي داخل الملفين، حيث يتصف الحديد بأنه مادة مغناطيسية تركِّز المجال المغناطيسي. وبناء على ذلك، أصبح كل الفيض الناتج من الملف الابتدائي تقريبًا يدخل الملف الثانوي من خلال القلب الحديدي.

c. إذا كان للملفَّين الابتدائي والثانوي عدد مختلف من اللفات، فسيكون فرق الجهد مختلفًا فإذا كان عدد اللفات في الملف الثانوي مِثلَيْ عددها في الملف الابتدائي، فإن فرق الجهد فيه سيكون مثلَيْ فرق الجهد في الملف الابتدائي. وبجعل القلب الحديدي مغلقًا على شكل لفّة، فإن المُحوِّل الكهربائي يصبح عندها أكثر كفاءة في تركيز خطوط المجال المغناطيسي. يرتبط فرق الجهد في كل من الملفَّين الابتدائي والثانوي، وعدد اللفات في كل منهما، بالمعادلة 5-8.

8-5	قانون المحول الكهربائي		
	$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p}$	V_p	فرق جهد الملف الابتدائي (V)
		V_s	فرق جهد الملف الثانوي (V)
		N_p	عدد لفّات الملف الابتدائي
		N_s	عدد لفّات الملف الثانوي

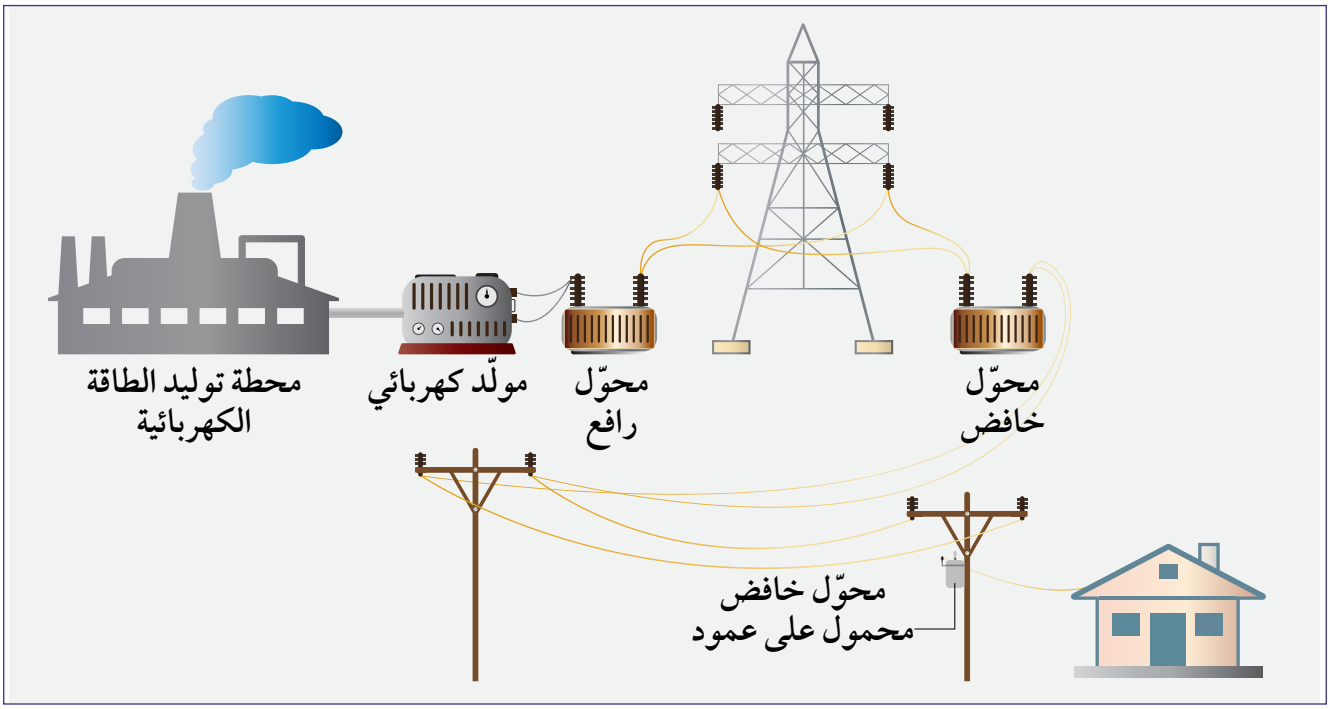
المُحوِّلات الكهربائية الرافعة للجهد والمُحوِّلات الخافضة للجهد

هناك نوعان من المُحوِّلات الكهربائية، هما: **المحوِّل الرافع للجهد Step-up transformer** وعدد لفّات ملفّه الثانوي أكبر من عددها في ملفّه الابتدائي؛ وبالتالي فإن فرق الجهد في ملفه الثانوي أكبر من فرق الجهد في ملفّه الابتدائي (**الشكل 5-33a**). و**المحوّل الخافض للجهد Step-down transformer** وعدد لفّات ملفّه الثانوي أقل من عدد لفات ملفه الابتدائي و بالتالي فإن فرق الجهد في ملفه الثانوي أقل مقارنة بفرق الجهد في ملفه الابتدائي (**الشكل 5-33b**).



الشكل 5-33 محوِّل رافع للجهد (a) ومحوِّل خافض للجهد (b).

تُنتِج محطة توليد الطاقة الكهربائية النموذجية فرق جهد قدره 12,000 V. يُستخدَم مُحوّل رافع للجهد لزيادة فرق الجهد إلى 240,000V من أجل نقله. ويُستخدَم مُحوّل خافض للجهد لتقليل فرق الجهد إلى 2,400V في محطة فرعية في المنطقة. كما. تُستخدم المُحوِّلات الخافضة للجهد لتقليل فرق الجهد من 2,400 V إلى 240 V، قبل الوصول مباشرة إلى المنازل، كما هو مبيّن في **الشكل 5-34**.



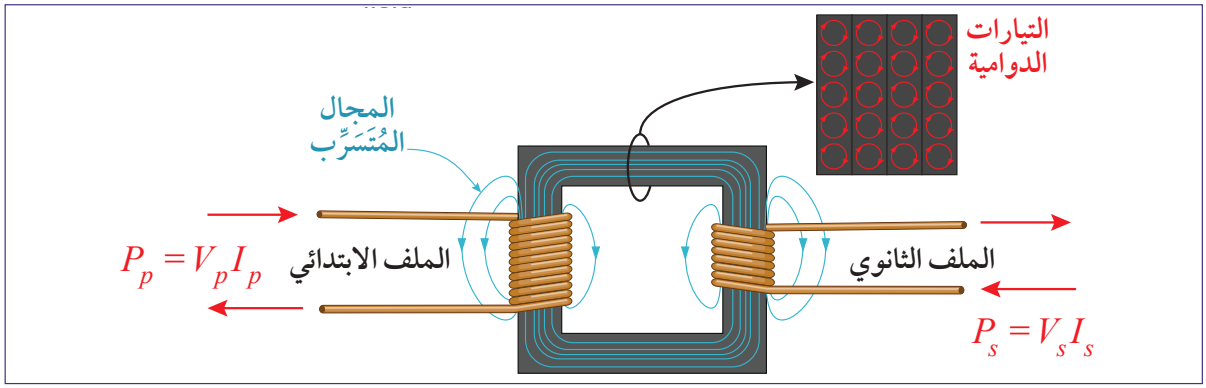
الشكل 5-34 استخدام أنواع مختلفة من المُحوِّلات لتوصيل القدرة الكهربائية إلى المنازل.

كفاءة المحول الكهربائي

في المحوّل المثالي تتغيّر قيمة كل من شدّة التيار وفرق الجهد بين الملف الابتدائي والملف الثانوي، إلّا أن القدرة هي ذاتها في الملفّين. ففي محوّل 10:1 خافض للجهد قد يكون فرق الجهد 2200V وشدّة التيار 10A في الملف الابتدائي في حين أن فرق الجهد في الملف الثانوي 220V وشدة التيار 100A. لكن في حالة المحوّل الحقيقي، تؤدّي عوامل كثيرة إلى فقد جزء من القدرة فتكون القدرة الناتجة في الملف الثانوي أقل منها في الملف الابتدائي (المعادلة 5-9)

أسباب فقد القدرة في المحول

1. ينتج عن التيار في الملفّ الابتدائي تيّارات دوّامية في قلب الحديد كما في **الشكل 5-35**.
2. جزء من المجال المغناطيسي يتسرّب إلى خارج المحوّل.
3. هناك فقد لجزء من القدرة نتيجة لمقاومة الأسلاك التي يمر فيها التيار.



الشكل 5-35 بعض عوامل خفض كفاءة المحول الكهربائي .

9-5	كفاءة المحول الكهربائي		
	$\eta = \frac{P_s}{P_p}$	P_p	القدرة في الملف الابتدائي (W)
		η	الكفاءة (%)
		P_s	القدرة في الملف الثانوي (W)

مثال 11

لمحوّل 120 لفة في ملفّه الابتدائي و 20 لفة في ملفه الثانوي، وكفاءته 90%. يُطبّق فرق جهد 1920 V بين طرفي الملف الابتدائي حيث شدّة التيار 100 A. ما قيمة فرق الجهد وشدة التيار في الملف الثانوي؟

المطلوب: $V_s = ?\ ,\ I_s = ?$

المُعطيات: $V_P = 1920\ \text{V},\ N_s = 20, N_P = 120, I_P = 100\ \text{A}, \eta = 90\ \%$

العلاقات: $\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p}$ ، $P_s = \eta P_p$ ، $P_s = V_s I_s$

الحل:

فرق الجهد في الملف الثانوي: $\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p} \rightarrow V_s = \frac{20}{120}(1920\ \text{V}) = \boxed{320\ \text{V}}$

القدرة في الملف الابتدائي: $P_p = V_p I_p = (1920\ \text{V})(100\ \text{A}) = 192{,}000\ \text{W}$

القدرة في الملف الثانوي: $P_s = \eta P_P = (0.90)(192{,}000\text{w}) = 172{,}800\ \text{W}$

شدة التيار في الملف الثانوي: $P_s = V_s I_s \rightarrow I_s = \frac{P_s}{V_s} = \frac{172{,}800\ \text{w}}{320\ \text{V}} = \boxed{540\ \text{A}}$

مثال 12

يُستخدم مُحوِّل عدد لفّات ملفّه الابتدائي 2,000 لفّة، لخفض فرق جهد متردّد قيمته الفعالة $V_{eff} = 240\ V$ إلى فرق جهد متردِّد قيمته العظمى 5 V.

a. كم عدد لفّات الملف الثانوي؟

b. إذا كانت نسبة كفاءة المحوِّل 80%، وكانت القيمة الفعالة لشدة التيار (I_{eff})في ملفّه الابتدائي 0.25 mA، فما القيمة الفعّالة لشدة التيار في الملف الثانوي.

المطلوب:

a. عدد لفّات الملف الثانوي $N_s = ?$

b. القيمة الفعَّالة لشدة التيار في الملف الثانوي I_{eff}.

المُعطيات:

عدد لفّات الملف الابتدائي لمُحوِّل $N_p = 2000$؛ والقيمة الفعّالة لفرق الجهد في الملف الابتدائي $V_{eff} = 240\ V$؛ والقيمة الفعّالة لشدة التيار في الملفّ الابتدائي $I_{Ieff} = 0.25\ mA$ ؛ والقيمة العظمى لفرق الجهد في الملفّ الثانوي $V_o = 5\ V$ ؛ وكفاءة المحوّل = 80%.

العلاقات:

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p}$$

$$\overline{P} = V_{eff}\, I_{eff}$$

$$V_{eff} = \frac{V_o}{\sqrt{2}}$$

الحل:

a. لحساب عدد اللفات في الملف الثانوي يجب أولًا حساب القيمة الفعالة لفرق الجهد في الملف الثانوي.

$$V_{eff} = \frac{5}{\sqrt{2}} = 3.5V$$

باستخدام معادلة المحول:

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p} \Rightarrow \frac{3.5}{240} = \frac{N_s}{2000} \Rightarrow \boxed{N_s = 29}$$

b. لحساب القيمة الفعالة لشدة التيار في الملف الثانوي، نحتاج أولًا إلى حساب القدرة في الملف الابتدائي وفي الملف الثانوي. $\overline{P}_p = (240)\left(0.25\times10^{-3}\right) = 60\times10^{-3}\ W$

كفاءة المحوّل هي 80 % فقط، لذلك في الملف الثانوي:

$$\overline{P}_s = \left(60\times10^{-3}\right)(0.8) = 48\times10^{-3}\ W$$

$$\overline{P}_s = V_{eff}\ I_{eff} \Rightarrow 48\times10^{-3} = 3.5I_{eff}$$

وهكذا تكون القيمة الفعّالة للتيّار في الملف الثانوي $I_{eff} = 13.7\ mA$

نشاط عمليّ

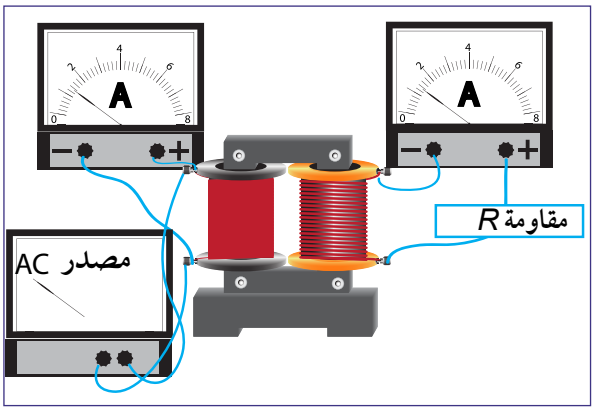
3-5

المحوِّل الرافع للجهد والمحوِّل الخافض للجهد

سؤال الاستقصاء	ما العلاقة بين شدة التيار وفرق الجهد وعدد اللفات في ملفّي المحول.
الموادّ المطلوبة	قلب حديدي ومجموعة من الملفات قابلة للتركيب، مصدر طاقة تيار متردِّد، أسلاك توصيل، جهاز أميتر عدد 2، وفولتميتر واحد، وثلاث مقاومات كل منها 10Ω

خطوات التجربة

1. كوّن دائرة من الملفات والمقاومة 10Ω والقلب الحديدي، كما هو مبيّن في **الشكل 5-36**.
2. اختر ملفّين إبتدائي وثانوي، حيث يكون عدد اللفات في كل منهما 400 لفة، واضبط فرق جهد الملف الابتدائي على 6 V.
3. قس شدة تيار الملف الابتدائي وفرق جهد الملف الثانوي وتيّاره.



الشكل 5-36 قلب حديدي وملفات قابلة للتركيب.

4. كرّر التجربة بتغيير الملف الثانوي إلى ملف عدد لفاته 200 لفّة، ومرة أخرى عددها 600 لفة.
5. سجّل القراءات في الجدول أدناه.
6. كرّر التجربة بضبط الملف الابتدائي على 200 لفّة والثانوي على 400 لفّة.

الجدول

عدد اللفات						
الملف الابتدائي	الملف الثانوي	المقاومة R	V الابتدائي	I الابتدائي	V الثانوي	I الثانوي

الأسئلة

a. ما العلاقة بين شدة تيار الملف الابتدائي وشدة تيار الملف الثانوي، عندما تكون المقاومة ثابتة؟
b. هل يؤدّي تغيير المقاومة إلى تغيير العلاقة بين تيار الملف الابتدائي وتيار الملف الثانوي؟
c. هل هذا محوِّل مثالي؟ (هل كفاءته 100%؟) إذا كان الجواب لا، احسب كفاءته.

تقويم الدرس 3-5

1. املأ الجدول الآتي لملف مثالي:

فرق جهد الملف الابتدائي (V)	فرق جهد الملف الثانوي (V)	عدد لفّات الملف الابتدائي	عدد لفّات الملف الثانوي
60	240		48
200	100	50	
250	50	50	
	600	45	900
180	30	60	

2. لدى طالب روبوت يحتاج إلى فرق جهد 30 V. يقوم الطالب بصناعة محوِّل يشتمل على 1,200 لفّة في ملفّه الابتدائي الذي يتغذّى بفرق جهد 240 V. كم لفة يحتاجها الطالب في ملفه الثانوي حيث يحصل على فرق جهد مخرج 30 V؟

3. تنتج محطة الطاقة 480,00 W من القدرة بجهد 2,400 V.
   a. احسب القدرة المفقودة في خطوط النقل التي تبلغ مقاومتها 5 Ω على افتراض عدم استخدام أي محوِّلات في النقل.
   b. كرّر الحساب عندما تُحوِّل محطة الطاقة الجهد من 2,400 V إلى 24,000 V.

4. يبلغ الجهد المتردِّد في الخطوط الرئيسة لدى بعض البلدان 110 V. اقترح بعض القيم لعدد اللفّات في الملفّين الابتدائي والثانوي، في أحد المحوِّلات لرفع هذا الجهد إلى 240 V.

5. يوصَّل الملف الابتدائي لمحوِّل بمصدر تيّار متردِّد، ويوصَّل الملف الثانوي بمصباح يعمل على جهد 12 V وقدرته 36 W. فإذا كان هناك 4,000 لفّة في الملف الابتدائي، و 200 لفّة في الملف الثانوي. احسب:
   a. جهد المصدر.
   b. القدرة الناتجة من المصدر، إذا كانت كفاءة المحوِّل 100 %.
   c. التيار في الملف الابتدائي.

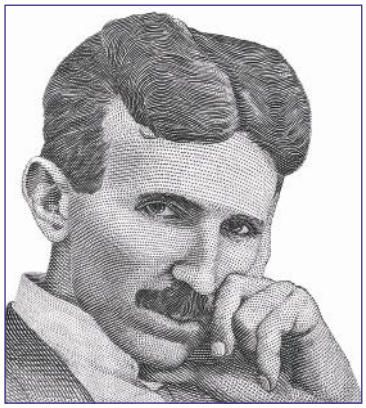
6. خط ناقل للكهرباء مقاومته 0.2 Ω احسب مقدار القدرة الكهربائية المفقودة في الخط، عند نقل تيار شدته 60 A.

7. يتكون محول من ملفين الأول 280 لفة يتصل بجهد فعال مقداره 220 V، وملف ثاني 40 لفة. أحسب فرق الجهد بين طرفي الملف الثاني.

8. محول كفاءته 92 % عدد لفات ملفه الابتدائي 400 والثانوي 2200، إذا كان جهد الملف الابتدائي 220 V والتيار فيه 8 A، فما مقدار الجهد والتيار في الملف الثانوي؟

ضوء على العلماء

نيكولا تسلا (1856-1943)

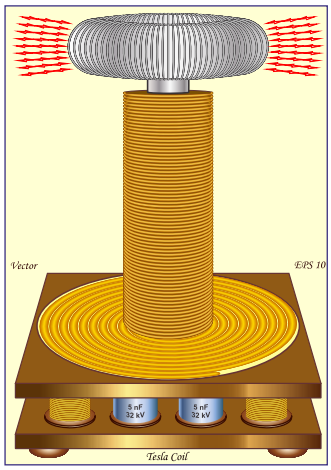


الشكل 5-37 نيكولا تسلا.

ساهم العديد من المختصين في التكنولوجيا المبكرة لكهرباء التيار المتردِّد AC. وكان نيكولا تسلا واحدًا من أكثر العلماء شهرة ممن شاركوا في بدايات تلك التكنولوجيا. وُلد تسلا في الإمبراطورية النمساوية (التي تُعرف الآن باسم كرواتيا)؛ ولكنه انتقل فيما بعد إلى أمريكا.

أثارت عروض الفيزياء التي كان يجريها مُدَرّس تسلا في المدرسة الثانوية فضوله؛ ما ولّد عنده رغبة قوية في معرفة المزيد. قادته قدراته العقلية إلى إنهاء مقررات المدرسة الثانوية التي تستغرق أربع سنوات في ثلاث سنوات. والتحق بعدها بكلية الفنون التطبيقية النمساوية، لكنه في العامَين الأولين لم يكن راضيًا عن نفسه؛ فترك الكلية من أجل الدراسة منفردًا، واختراع بعض الأشياء. وبشخصيته القوية، أصبح لتسلا دور مركزي في المنافسة الشهيرة بين كهرباء التيّار المتردّد وكهرباء التيّار المستمر في الفترة بين عامي: 1880 و 1890.

اختراعاته



الشكل 5-38 ملف تسلا.

هاجر نيكولا تسلا عام 1884 إلى الولايات المتحدة للعمل في شركة إديسون للآلات، وهناك طوّر نظام إضاءة القوس الذي كان يحظى بشعبية كبيرة. كوّن تسلا شركته الخاصة المسماة «شركة تسلا للكهرباء» مع صديق له اسمه ألفريد إس براون؛ فطوّر محرِّكًا كهربائيًّا حثيًّا يعمل على التيار المتردِّد. ثم اخترع دائرة المحوِّل المحَسّنة، التي سُمّيت «ملف تسلا». كان هذا الملف يحتوي على فجوات للهواء بين اللفّات والقلب، لمنع الارتفاع الزائد في درجة الحرارة.

عمل تسلا على الإضاءة اللاسلكية، لكنه لم يتمكَّن من تحويله إلى منتج تجاري ناجح. وعمومًا يُعتقد أن نيكولا تسلا كان لديه ما يقارب 300 براءة اختراع لإنجازاته. وهناك العديد من الاختراعات وبراءات الاختراع التي لم تُحسب له. قدَّمت أعمال تسلا مساهمات كبيرة في كيفية استخدامنا للكهرباء اليوم.

الوحدة 5

مراجعة الوحدة

الدرس 5-1: الحث الكهرومغناطيسي

- **الحث الكهرومغناطيسي** ظاهرة تولد تيار كهربائي حثي في موصل عند تغير الفيض المغناطيسي الذي يقطعه الموصل بالنسبة للزمن.
- **التيار الكهربائي الحثّي** التيار الذي يتولد في الموصِّلات، نتيجة لتغيُّر الفيض المغناطيسي.
- **الفيض المغناطيسي** شدة المجال المغناطيسي خلال مساحة ما.
- **الوِيبر**، Wb وحدة الفيض المغناطيسي 1 Wb يساوي $1\mathrm{Tm}^2$.
- **قانون فارادي للحث** ينّص على أن القوة الدافعة الكهربية الحثية تساوي معدَّل تغيُّر الفيض المغناطيسي بالنسبة إلى الزمن.
- **قانون لنز** ينص على أن التيار الكهربائي الحثي يُنشئُ مجالًا مغناطيسيًّا يقاوم تغيّر الفيض الذي أنشأ هذا التيار.
- **التيّارات الدوّامية** هي تيّارات حثّية تتَّخذ شكل دوّامات صغيرة تتشكَّل في الموصلات التي لها مساحة وحجم يزيد عن الأسلاك الرفيعة.

الدرس 5-2: مولِّدات التيار المتردد AC

- **مولد التيار المتردِّد** AC هو أداة لتوليد الطاقة الكهربائية من الطاقة الميكانيكية. ينتج هذا المولد تيارًا متردِّدا.
- **التيّار المستمر** هو التيّار الذي يتدفَّق في اتجاه واحد فقط، وله مقدار ثابت.
- **التيّار المتردد** هو التيّار الذي يتغيّر اتجاهه وقيمته مع الزمن.
- **القيمة الفعّالة** لشدة التيار أو فرق الجهد في دوائر التيار المتردد هي قيم شدة التيار المستمر التي تولد التأثير الحراري نفسه الذي تولده مثيلاتها في دوائر التيار المتردد خلال الفترة الزمنية نفسها.

الدرس 5-3: المحوِّلات

- **المحوِّل** أداة لتغيير قيمة الجهد قبل نقل الكهرباء وبعده.
- **محوِّل رافع للجهد** يزيد فرق الجهد قبل النقل.
- **محوِّل خافض للجهد** يخفض فرق الجهد قبل النقل.

الوحدة 5

تقويم الوحدة

اختيار من مُتعدّد

1. ماذا تسمى التيارات التي يولدها مجال مغناطيسي في صفيحة رقيقة من الحديد؟
   a. تيارات دوّامية.
   b. تيارات دائرية.
   c. تيار مستمر.
   d. تيار متردِّد.

2. أي من الأسلاك الدائرية الآتية لن تحثّ أي تيار كهربائي؟
   a. سلك دائري ساكن في مجال مغناطيسي ثابت
   b. سلك دائري ساكن في مجال مغناطيسي متغيِّر.
   c. سلك دائري يدور حول محور متعامد مع اتجاه مجال مغناطيسي ثابت.
   d. مغناطيس دائم يدخل ويخرج باستمرار في ملف دائري.

3. لُفّ حول جزء من قلب حديدي سلك ليصنع ثلاث لفّات دائرية. بينما لُف حول الجزء الآخر من القلب الحديدي نفسه ملفّ من ستة لفّات دائرية. مرّرنا تيارًا كهربائيًّا في الملف الأول مع مصباح كهربائي. ثم وُصّل محرِّك إلى الملف الثاني. ما نوع هذه الأداة؟
   a. محرِّك كهربائي.
   b. مولِّد كهربائي.
   c. محوِّل رافع.
   d. محوِّل خافض.

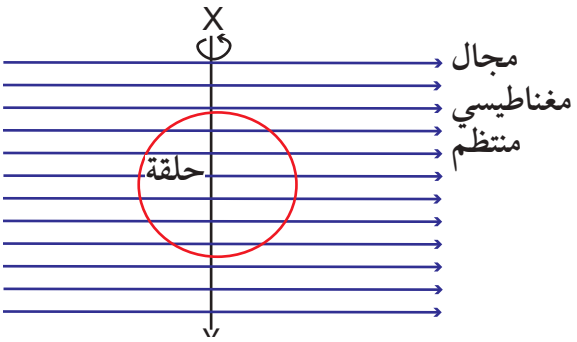
4. أي من الجمل الآتية أفضل تعريف للحث الكهرومغناطيسي؟
   a. إنتاج مجال مغناطيسي بواسطة تيار كهربائي.
   b. إنتاج قوة دافعة كهربائية (حثيّة) بواسطة مجال مغناطيسي متغيِّر.
   c. القوة المؤثرة في شحنة كهربائية تتحرّك في مجال مغناطيسي.
   d. القوة الناشئة عن موصل حامل لتيّار في مجال مغناطيسي.

5. ما قيمة الفيض المغناطيسي عندما يكون المجال المغناطيسي موازيًا لسطح الملف؟
   a. صفر
   b. BA
   c. $BA\cos\theta$
   d. لا نهائي.

6. مصباح كهربائي قدرته 60 W صُمِّم ليعمل على فرق جهد قيمته الفعالة 240 V. كم تبلغ أقصى قيمة لتيار المصدر المتردِّد؟

a. $\frac{1}{4}$ A
b. $\frac{1}{2}$ A
c. $\frac{\sqrt{2}}{4}$ A
d. $\frac{4}{\sqrt{2}}$ A

7. حلقة فلزية تدور حول محور رأسي في مجال مغناطيسي منتظم. عندما يصبح مستوى الحلقة موازيًا لاتجاه المجال المغناطيسي كما في الصورة، فأي من العبارات عن الفيض والتيّار الحثّي تكون صحيحة؟



	شدة التيار الحثّي في الحلقة	التدفُّق الكلّي خلال الحلقة
a.	قيمة قصوى	قيمة قصوى
b.	قيمة قصوى	صفر
c.	صفر	صفر
d.	صفر	قيمة قصوى

8. مولِّد بسيط لتيار متردِّد يحتوي على ملف مسطَّح مستطيل في مجال مغناطيسي منتظم. القيمة القصوى للقوة الدافعة الكهربائية الحثية هي V . إذا ضاعفنا تردُّد الدوران، فكم تبلغ القيمة القصوى الجديدة للقوة الدافعة الكهربائية ($e.m.f$) الناتجة؟

a. V
b. $\sqrt{2}$ V
c. 2V
d. 4V

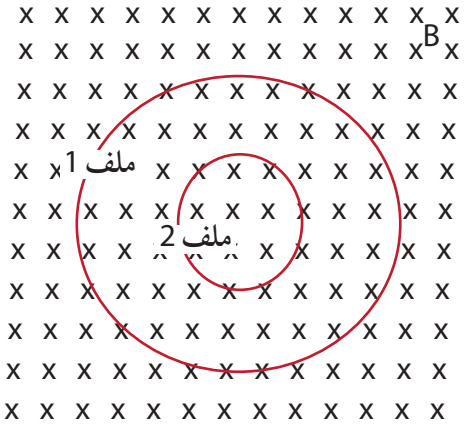
9. جرى توصيل مصدر للتيار المتردِّد بمقاومة R . إذا ضاعفنا الجهد الفعّال الخارج من المصدر، فكم يكون معامل ازدياد القدرة المفقودة في المقاومة؟

a. 1
b. 1.5
c. 2
d. 4

10. يبلغ عدد لفّات الملف الابتدائي لمحوِّل مثالي1000 لفّة، وعدد لفّات الملفّ الثانوي 100 لفّة. يكون تيار الملف الابتدائي 3 A عند تغذيته بقدرة 12W. ما شدة التيار في الملف الثانوي والقدرة فيه؟

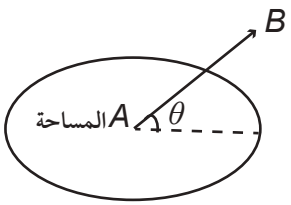
	القدرة المُنتَجة	التيار الثانوي
a.	1.2 W	0.3 A
b.	1.2 W	30 A
c.	12 W	0.3 A
d.	12 W	30 A

11. ملفّان بقطرين مختلفين، وُضعا في المجال المغناطيسي المنتظم نفسه B. إذا ازدادت شدة المجال المغناطيسي مع الزمن، عندها يكون:



a. الجهد الحثّي هو نفسه في الملفَّين.
b. الجهد الحثّي في الملف1 أكبر.
c. الجهد الحثّي في الملف2 أكبر.
d. الجهدان الحثيّان في الملفَّين متعاكسين في الاتجاه.

12. مجال مغناطيسي منتظم شدَّته B، يخترق كلّيًّا ملفًّا مساحته A، حيث الزاوية بين المجال المغناطيسي وسطح الملف θ .ما هو الفيض المغناطيسي الذي يخترق الملف؟



a. BA
b. $BA\cos\theta$
c. $BA\sin\theta$
d. $BA\tan\theta$

الدرس 5-1: الحث الكهرومغناطيسي

13. يحرِّك طالب مغناطيسًا شدته 10^{-5} T داخل ملف بمعدَّل 56 دورة في الثانية . افترض أن شدّة المجال المغناطيسي تتراوح بين 10^{-5} T + و 10^{-5} T – في ثانية واحدة.

قام الطالب بقياس القيمة القصوى للتيار الذي ينشأ في الملف.

a. ما قيمة شدة التيار الذي تم قياسه؟

b. اقترح تغييرًا يجريه الطالب لزيادة شدة التيار.

14. مجال مغناطيسي يشير إلى أسفل طاولة وتتناقص شدّته. حدّد اتجاه التيار الحثّي (اتجاه دوران عقارب الساعة، أو عكسه) في سلك دائري موضوع فوق الطاولة.

15. مجال مغناطيسي يشير إلى داخل الصفحة وشدّته تتزايد. بالنسبة الى سلك دائري على سطح الصفحة، هل يتدفَّق التيار الحثّي باتّجاه دوران عقارب الساعة أم عكسه؟

16. حلقة مساحتها $5.0\ cm^2$، موضوعة في مجال مغناطيسي $B = 0.2$ T. ما مقدار الفيض المغناطيسي النافذ من الحلقة عندما تكون:

a. متعامدة مع خطوط المجال المغناطيسي.

b. موازية لخطوط المجال المغناطيسي.

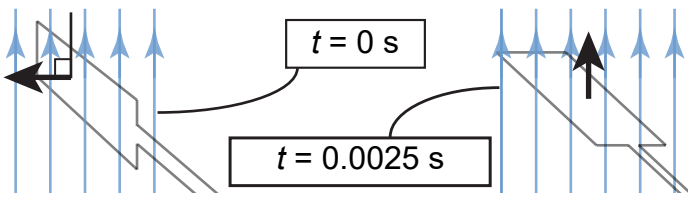
c. مائلة بزاوية 60° مع خطوط المجال.

17. تتَّجه خطوط مجال مغناطيسي من أرض الغرفة إلى السقف في جميع أنحاء الغرفة. يوجد ثلاثة ملفات: A و B و C. الملف A موضوع على الطاولة، والملفB عمودي على مستوى الطاولة، والملف C يميل بزاوية 45° مع الطاولة.

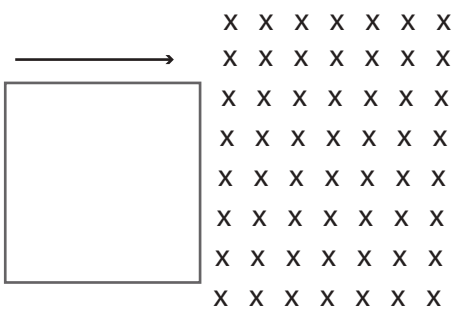
a. رتب الملفات الثلاثة وفق الفيض المغناطيسي المار بها من الأصغر إلى الأكبر.

b. في أي من الملفات – إن وُجد– يتولّد فيه تيار كهربائي حثّي؟

18. يتكون المولِّد الموضَّح في الرسم من ملفّ هو عبارة عن سلك مستطيل (20 cm × 60 cm) في مجال مغناطيسي منتظم 0.1 T. تدير قوة خارجية الملف ربع دورة من (θ=90° إلى θ = 0°) خلال 0.0025 s. احسب الجهد الناتج من المولِّد، خلال ربع الدورة.



19. ملف مربّع الشكل طول ضلعه (0.2 m)، يتحرّك بسرعة ثابتة (0.05 m/s) ليدخل في منطقة مجال مغناطيسي منتظم شدته 0.3T، مُوجّه إلى داخل الصفحة. يتضمّن الملف 50 لفّة من الأسلاك الموصلة. بافتراض أن الملف سيدخل منطقة المجال المغناطيسي في اللحظة t = 0:



a. بيِّن بالرسم البياني تغيُّر الفيض المغناطيسي في الملف بدلالة الزمن.

b. وضِّح بالرسم البياني الجهد الحثّي في الملف بدلالة الزمن.

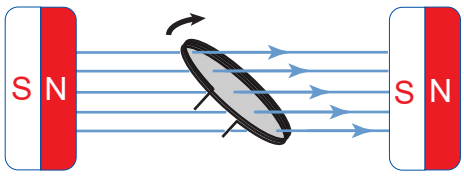
20. تمكّن طالب من توليد الكهرباء عندما قام بلف سلك على شكل حلقة دائرية واحدة وقام بتدويره مرة واحدة في الثانية في المجال المغناطيسي للأرض.

a. ما القيمة القصوى للفيض المغناطيسي Φ، الذي يخترق اللفّة، إذا كان نصف قطرها 1 m؟

b. إذا تغيَّر الفيض من صفر الى هذه القيمة القصوى في ربع ثانية (Δt=0.25s)، فما القيمة المتوسطة للجهد الحثّي؟

الدرس 5-2: مولِّد التيار المتردِّد AC

21. تمثِّل الصورة مولّدًا كهربائيًّا بسيطًا. تُسبِّب القوى الميكانيكية (كالهواء) دوران ملف سلكي داخل مجال مغناطيسي.



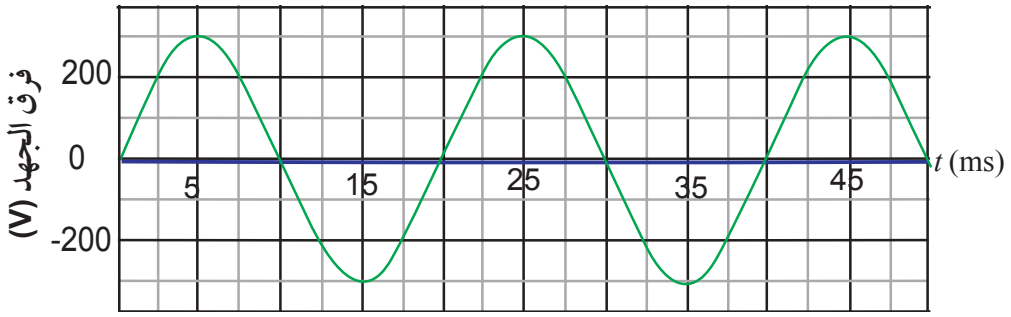
بافتراض أنك لا تستطيع التحكُّم بسرعة الدوران، أذكر ثلاث طرق لزيادة الجهد الناتج.

22. احسب متوسِّط القدرة المستهلكة في مقاومة (30 Ω) موصولة على التوالي بمصدر للتيار المتردِّد، أقصى قيمة لجهده تبلغ 240 V.

23. يُظهر الرسم البياني تغيُّر فرق الجهد مع الزمن في قطعة من آلات مصنع.

a. ما قيمة الجهد الفعّال؟

b. إذا كان متوسِّط القدرة المستهلكة في الآلة 17 kW، احسب القيمة القصوى لشدة التيّار المار فيها.



24. مصباح كهربائي (60 W) تجري تغذيته من مصدر تيّار تردُّده (50Hz)، تبلغ القيمة الفعّالة لجهد المصدر 240 V .

a. احسب القيمة القصوى للتيّار في سلك المصباح.

b. ما القدرة القصوى المستهلكة في المصباح؟

c. أنشىء الرسم البياني للقدرة المستهلكة في المصباح بدلالة الزمن. (ارسم دورة واحدة على الأقل).

الدرس 5-3: المُحوِّلات الكهربائية

25. عندما تولِّد محطّات الطاقة الكهرباء، تقوم باستعمال المحوِّلات لنقل الكهرباء في خطوط للطاقة بتيار منخفض، لخفض خسائر القدرة. يعمل محوِّل آخر قرب منزلك على تحويل الجهد إلى ما يجب أن يكون عليه لتشغيل أدواتك.
أيّ من المحوِّلات هو رافع للجهد؟ وأيّ منها خافض للجهد؟ كيف تعرف ذلك؟

26. يصنع طالب محوّله بِلَفّ 10 لفات سلك حول أحد طرفَيْ ساق حديدية و20 لفّة سلك حول الطرف الآخر. بعد ذلك، يقوم بوصل بطارية (جهد ثابت– DC) للملف الأول. عند فحصه لجهد الملف الثاني، تبيّن له أن لا وجود لفرق جهد فيه. في أي خطوة أخطأ خلال عمله؟

27. كفاءة المحوِّلات لا تصل إلى 100%. اذكر اثنين من التأثيرات التي يمكنها عمليًّا خفض كفاءة المحوِّل (ملحوظة: تحتوي المحوِّلات على موصِّلات كبيرة).

تقويم الوحدة

28. لماذا لا يستطيع المحوِّل أن يعطي 25 V DC، عند وصله ببطارية سيّارة قوة دفعها الكهربائية 9V ؟

29. تنتج إحدى محطّات الطاقة، كهرباء بفرق جهد 13,200 V، ويخفّض محوِّل فرق الجهد إلى 240 V للاستخدام المنزلي.

a. ما القدرة الابتدائية في الخط الذي يبلغ فرق الجهد فيه 13,200 V إذا كانت شدّة تياره 500 A.

b. ما شدّة التيار عند فرق الجهد 240V، إذا كانت كفاءة المحوّل 90%؟

c. ما مقدار القدرة المفقودة الناتجة عن كفاءة المحوّل؟

30. يتكوّن محوِّل من 600 لفّة في ملفّه الابتدائي، و 150 لفّة في ملفه الثانوي.

a. زوَّدنا الملفّ الابتدائي بجهد متردِّد 240 V، وبتردِّد 50 Hz. احسب فرق الجهد والتردُّد الحثّي في الملفّ الثانوي.

b. إذا كان التيار الابتدائي 9.0 A، احسب شدة التيار في الملفّ الثانوي، إذا علمت أن كفاءة المحوِّل 75%.

31. تعمل محطة توليد الكهرباء بطاقة (400 MW) وفرق جهد (75kV)، وتزوِّد البيوت بالطاقة عبر كابلات مقاومتها الكلية 5Ω.

a. احسب نسبة الطاقة المفقودة في الكابلات للطاقة المنتجة.

b. كيف ستتغيَّر الطاقة المفقودة إذا كان فرق الجهد 90 kV ؟

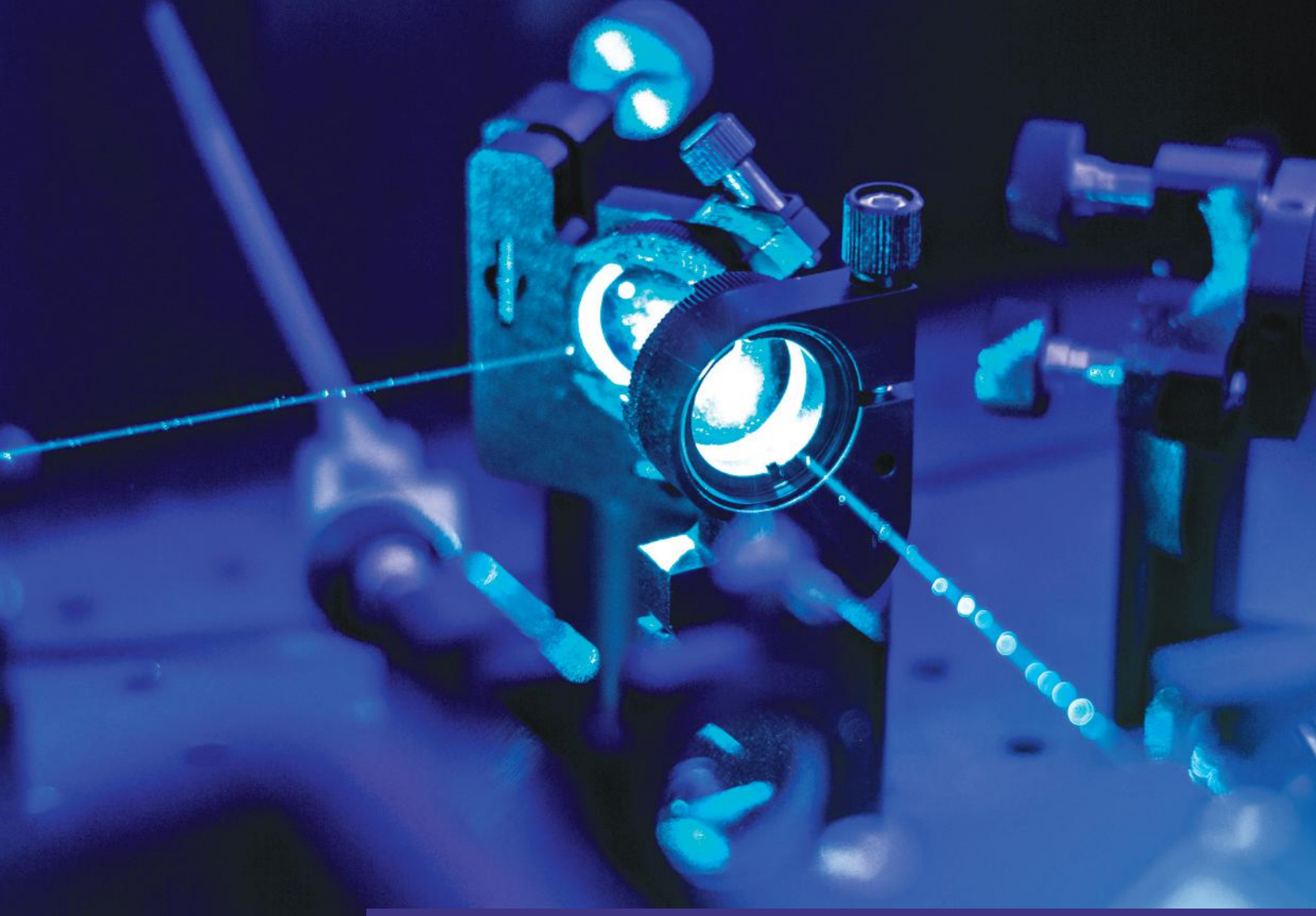
الاستقصاء والبحث

نقل الطاقة بواسطة التيار المتردِّد AC مقابل نقلها بواسطة التيار المستمر DC

وُضعت المحوِّلات الرافعة والخافضة للجهد قيد التطبيق عام 1886 في مساتشوستس USA، رغم أن بلدانًا كهنجاريا وإنجلترا، كانت قد بدأت بالعمل على المحوّلات قبل ذلك الوقت. جعلت المحوِّلات نقل الكهرباء ذات التيار المتردِّد أكثر كفاءة.

تنقل خطوط التيار المستمر العالي الجهد، الكهرباء من دون استعمال للمحوِّلات.

ابحث عن فوائد نقل الكهرباء بالتيار المتردِّد AC مقابل نقلها بالتيار المستمر DC. ضمّن بحثك أيضًا تحقيقًا عن تاريخ المحوِّلات.



الوحدة 6

الخصائص المتقدِّمة للموجات

في هذه الوحدة

الدرس 6-1: خصائص الموجات
الدرس 6-2: التداخل في الضوء
الدرس 6-3: الأشعة الكهرومغناطيسية
الدرس 6-4: الموجات الموقوفة

P1117
P1118
P1119
P1120

6 الوحدة

مقدّمة الوحدة

يُعدّ الضوء الذي ينتقل من الشمس إلى الأرض، والأشعة السينية التي تكشف عن الكسور في العظام، وموجات الراديو المستخدمة في المذياع الذي نستمع إليه، أمثلة على الموجات وتطبيقاتها. تنقل الموجات الطاقة داخل الوسط من خلال اهتزاز جزيئاته، من دون نقل جزيئات الوسط نفسه. يحدث التداخل عند التقاء موجتان معًا وفق شروط معينة، وينتج من التداخُل موجات ذات سعة أكبر أو أصغر. سوف ندرس تأثير التداخل في موجات الصوت والضوء. عندما تنعكس الموجة عن سطح معيَّن، فإنها تتداخل مع الموجة القادمة، وتُنتج الموجات الموقوفة التي تُعدّ أساس الأجهزة التي تعتمد على الرنين. الطيف المرئي جزء من الطيف الكهرومغناطيسي الذي يشتمل على المدى الكامل للتردُّدات والأطوال الموجية للموجات الكهرومغناطيسية. تتكوَّن الموجات الكهرومغناطيسية من مجال كهربائي وآخر مغناطيسي يهتزان باتجاهَين مُتعامدَين، بينما تنتشر الموجة في اتجاه ثالث عمودي على هذين الاتجاهين. سوف ندرس الطيف الكهرومغناطيسي وتطبيقات موجات مختلفة داخل الطيف.

الأنشطة والتجارب

1-6 تداخُل موجات الصوت

2-6 حساب الطول الموجي للضوء

3-6 استقطاب الضوء

4-6 توليد الموجات الموقوفة

الدرس 6-1
خصائص الموجات

قد تكون مشاهدة فيلم في الطائرة أمرًا غير ممتع بسبب هدير محرِّكاتها. يمكن تفادي هذا الأمر باستخدام سمّاعة الرأس. سماعة الرأس التي تعمل على البطاريات لديها ميكروفون يلتقط كُل الأصوات في المنطقة المحيطة. يُنتِج مُولّد الإشارة موجة لها خصائص مطابقة للصوت القادم، من حيث التردُّد والطول الموجي والسِّعة، لكن فرق الطور بينهما يساوي 180°. تصل الموجة الصوتية الجديدة إلى آذاننا مع الضوضاء من الخارج، فتتداخل الموجتان تداخُلًا هدّامًا، حيث يُلغى ضجيج مُحرِّكات الطائرة وهديرها.

يمكن لسماعات الرأس أن تلغي 70% من الضوضاء تقريبًا. يجد كثير من الناس تلك السماعات مفيدة حتى من دون وجود جهاز صوتي. ويعتبر الكثير منهم أن وضع تلك السماعات على آذانهم يجعل الرحلة بالقطار أو الطائرة أكثر راحة ومتعة.

الشكل 6-1 سَمّاعات الرأس تقلّل الضجيج في الطائرة.

مخرجات التّعلُّم

P1117.1 يصف، مستخدمًا مخططات مناسبة، مبدأ تراكب الموجات، ويستخدمه لتوضيح التداخُل.

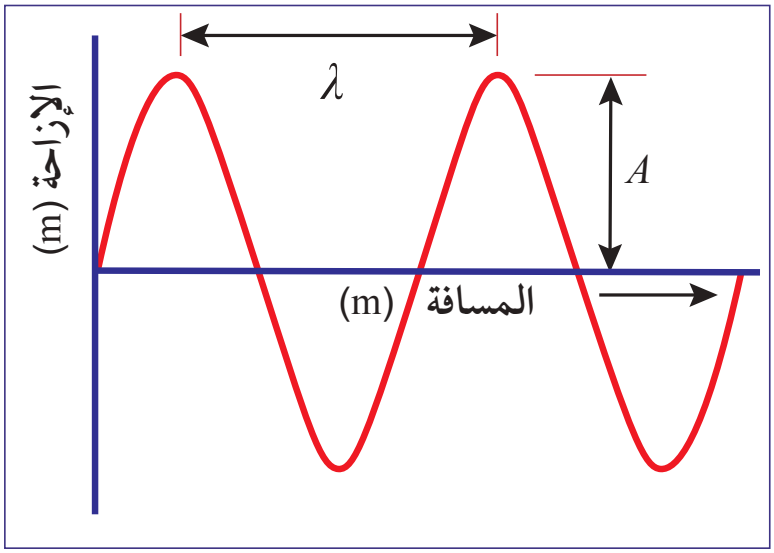
P1117.2 يناقش شروط الحصول على تداخُل ملحوظ للموجات، ويربط التداخُل البناء والهدام بفرق الطور.

المفردات

Phase	طور
Phase difference	فرق الطور
Interference	تداخُل
Principle of superposition	مبدأ التراكُب
Constructive interference	تداخُل بنّاء
Destructive interference	تداخُل هدّام
Beats	ضربات
Path difference	فرق المسار

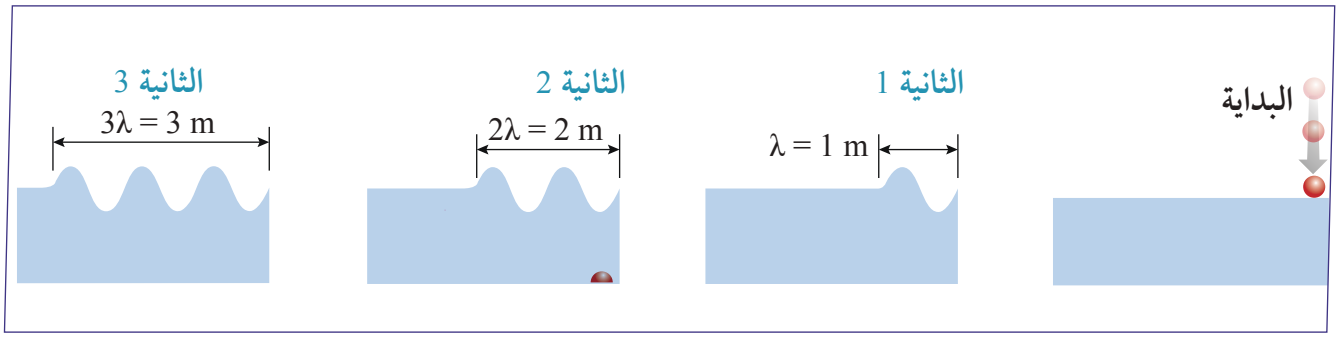
خصائص الموجات

تنتج الموجة من اهتزاز ينتقل في وسط ما، ولها خصائص معيَّنة كالطول الموجي والتردُّد والسعة. الطول الموجي λ هو المسافة التي تقطعها الموجة المنتقلة خلال دورة كاملة، والسعة A هي أقصى إزاحة للاهتزاز عن موضع الاتزان. (**الشكل 6-2**). أما التردُّد f فهو عدد الاهتزازات في وحدة الزمن، ووحدة قياسه الهرتز Hz، وهي عدد الاهتزازات خلال ثانية واحدة. تزداد طاقة الموجة بزيادة التردُّد أو السعة أو كليهما. عند ثبات السعة تملك الموجة التي لها تردُّد أعلى طاقة أكبر. بالمقابل، تملك الموجة التي لها تردُّد منخفض طاقة أقل. وكذلك عند ثبات التردُّد، تملك الموجة التي لها سعة أعلى، طاقة أكبر.



الشكل 6-2 سرعة الموجة.

سرعة الموجة v هي حاصل ضرب التردُّد في الطول الموجي (**المعادلة 6-1**). فالموجة ذات التردد 1 Hz والتي تنتشر في وسط معيّن بسرعة 1 m/s يكون طولها الموجي 1 m. ويبيّن **الشكل 6-3** حركة موجية طولها الموجي 1 m وسرعتها 1 m/s.



الشكل 6-3 سرعة الموجة.

6-1	سرعة الموجة		
$v = f\lambda$		v	سرعة الموجة (m/s)
		f	التردُّد (Hz)
		λ	الطول الموجي (m)

مثال 1

تنتقل موجات الصوت في الهواء بسرعة 340 m/s، قارن بين الطول الموجي لموجتين صوتيتين؛ الأولى ترددها 80 Hz والثانية ترددها 5000 Hz.

المطلوب: $\lambda_1 = ? \ , \lambda_2 = ?$

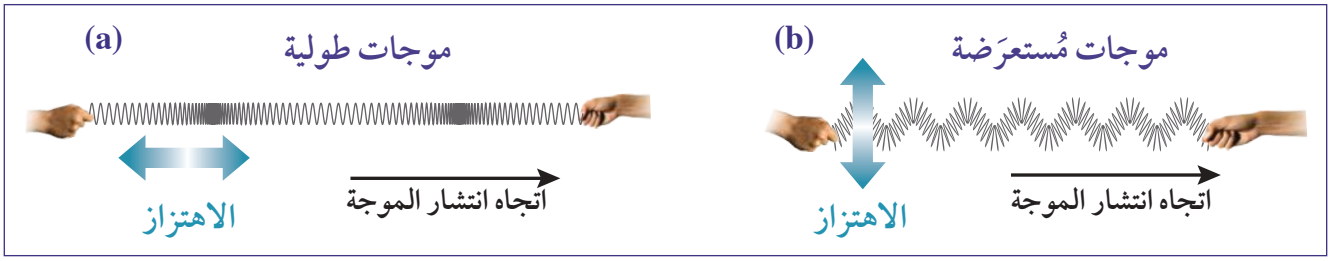
المُعطيات: $f_1 = 80 \text{ Hz} \ , \ f_2 = 5000 \text{ Hz} \ , \ v = 340 \text{ m/s}$

العلاقات: $\lambda = \frac{v}{f}$

الحل:

$$\lambda_1 = \frac{v}{f_1} = \frac{340}{80} = 4.25 \text{ m} \ , \qquad \lambda_2 = \frac{v}{f_2} = \frac{340}{5000} = 0.068 \text{ m}$$

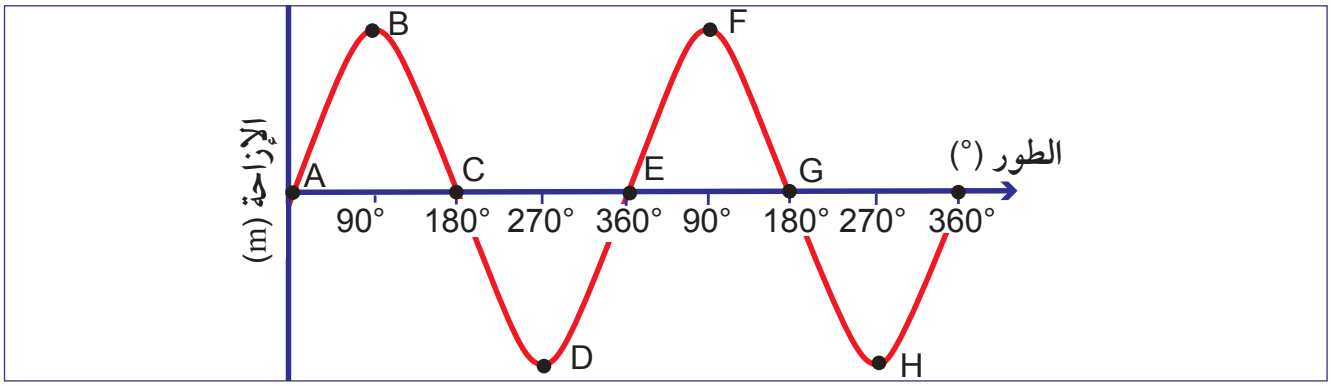
تُقسَّم الموجات وفق اتِّجاه اهتزازِها، إلى قسمين: موجات طولية كالموجات الصوتية، تهتز جسيمات الوسط في اتّجاه انتشارها كما في **الشكل 6-4 (a)**، وموجات مُستعرَضة كالموجات المائية، عندما تهتز جسيمات الوسط في اتّجاه عمودي على اتّجاه انتشارها، كما في **الشكل 6-4 (b)**.



الشكل 6-4 الموجات الطولية والموجات المُستعرَضة.

طور الموجة

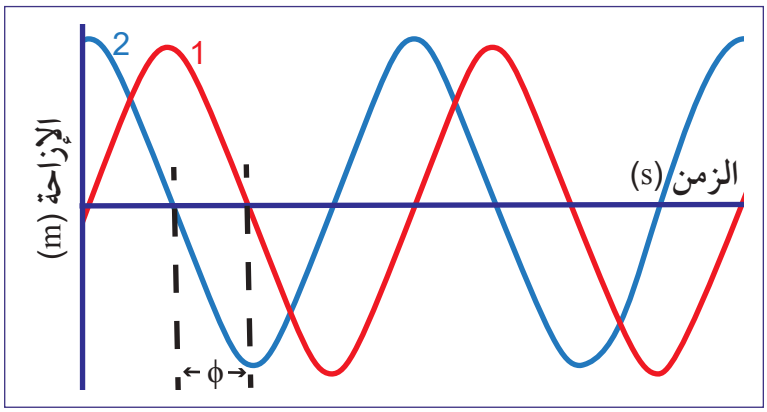
عند انتقال موجة في بركة ماء، تهتز جُسيمات الماء صعودًا ونزولًا. يمكن وصف موقع أيّ من جُسيمات الماء أثناء دورة اهتزاز واحدة من خلال **طور Phase** ذلك الجُسيم. يمكن تحديد هذا الموقع بالدرجات (°)، أو بجزء من الطول الموجي، أو بالراديان (rad). يمثِّل **الشكل 6-5** إزاحة جُسيم أثناء مرور موجة عبره. عندما يكون الجُسيم عند أي من النقطتين A و E، يتحرَّك إلى الأعلى بدءًا من موقع الاتِّزان؛ وبالتالي يكون الطور هو نفسه عند هاتين النقطتين. يمكن تمثيل هذه الدورة الكاملة بـ 2π(rad) أو 360°، لأنها تستغرق اهتزازة كاملة من أوّلها إلى آخرها. على الرغم من أن موقع النقطتين C و G مشابه لموقع النقطة A، فإنهما تتحرَّكان إلى الأسفل ولهما الطور نفسه أيضًا، لكنّ فرق الطور بين كل منهما وبين النقطة A يتمثل بـ π rad أو 180°. النقطتان B و F، أيضًا لهما الطور نفسه، كذلك النقطتان H و D لهما الطور نفسه.



الشكل 6-5 اهتزاز جُسيم الماء.

فرق الطور

افترض أن موجتين متماثلتين، من حيث الطول الموجي والتردُّد والسعة، تنطلقان في لحظتين زمنيتين مختلفتين كما في **الشكل 6-6** . نقول عندئذ إن هناك فرقًا في **الطور Phase difference** بين الموجتين. يمكن قياس فرق الطور بالدرجات أو بالراديان. لإيجاد فرق الطور بين الموجتين نأخذ نقطتين متماثلتين للموجتين (قمتين أو قاعين مثلًا)، ثم نحسب الفرق بينهما بالدرجات أو بالراديان. في هذه الحالة، نرى أن الموجة رقم **2** تتقدم على الموجة رقم **1** بمقدار $\frac{\pi}{2}$ rad أو 90°. ومن هنا نقول إن فرق الطور بينهما 90°.

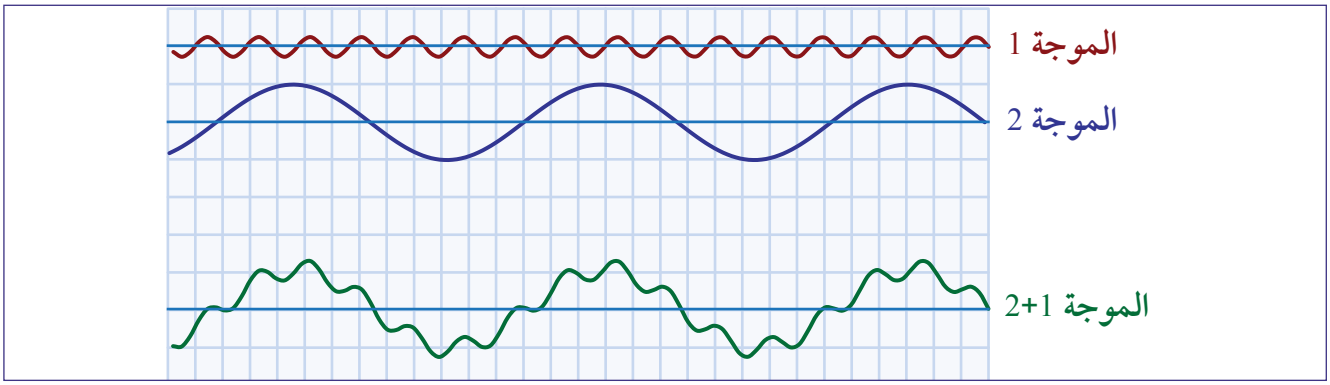


الشكل 6-6 فرق الطور بين موجتين.

مبدأ التراكُب

إذا أسقطنا حجرًا صغيرًا في بركة ماء، تنشأ اهتزازات صغيرة أو موجات حول مكان سقوطه. وإذا أسقطنا حجرًا أكبر عند نقطة أخرى قريبة، فإن الموجات حوله ستكون أكبر. يكون هناك نقاط تلتقي عندها الموجتان الصغيرة والكبيرة. تتداخل الموجتان وفق مبدأ يُسمّى مبدأ التراكب الذي يفسِّر ما يحدث عند التقاء موجتين.

ينصّ **مبدأ التراكب Principle of superposition** على الآتي: عندما تلتقي موجتان عند نقطة معيّنة في وسط ما، تكون الإزاحة الكلّية للنقطة هي حاصل جمع إزاحة الموجتين، كُلٌّ على حدة. الموجتان 1 و 2 في **الشكل 6-7**، مثلًا، تمتلك كل منهما طولًا موجيًّا وتردُّدًا وسعة محدَّدة. عندما تلتقي هاتان الموجتان في الموقع نفسه واللحظة الزمنية نفسها، فإن جمع الإزاحتين يعطينا شكل الموجة 2+1 التي لها طول موجي وتردُّد وسعة مختلفة عن كل من الموجتين 1 و 2. يوضِّح هذا المثال تراكُب موجتين. ولكن في الواقع قد تكون هناك عدة موجات في الوقت نفسه والمكان نفسه.

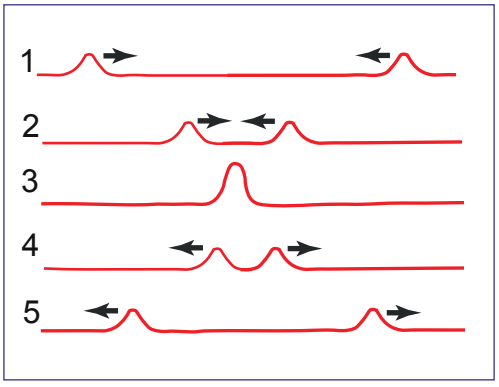


الشكل 6-7 تراكُب موجتين.

التداخُل المؤقَّت للموجات

عندما تسير موجتان إحداهما نحو الأخرى، فإنهما تتداخلان وتنشئان اضطرابًا كبيرًا.

يظهر **الشكل 6-8** نبضتين تسيران في اتّجاهين متعاكسين. تتداخل النبضتان بشكل مؤقت لحظة التقائهما (3)، ثمّ تفترقان، وتتابع كل نبضة طريقها. لا يغيِّر التداخُل المؤقَّت من كمّية الطاقة لكل نبضة.



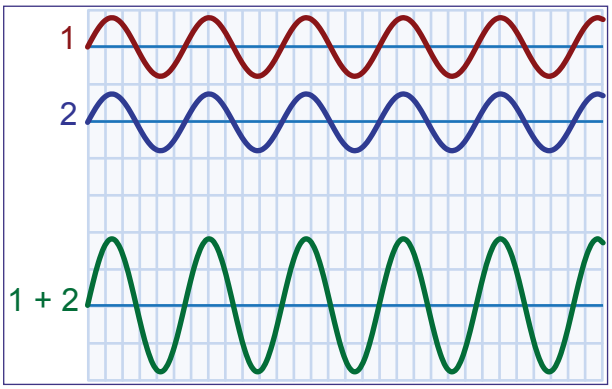
الشكل 6-8 تداخُل مؤقَّت لنبضتين.

تداخل الموجات

يؤدّي وجود موجة أو أكثر لها التردُّد نفسه في نقطة واحدة إلى موجة محصِّلة تكون سعتها أكبر أو أصغر من الموجات المُتداخلة.

التداخُل البنّاء

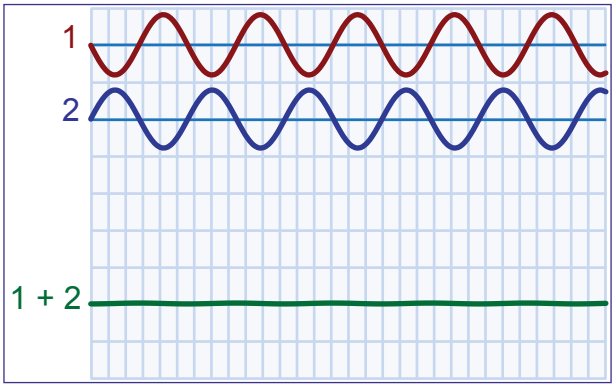
إذا كان للموجات المتداخلة الطور نفسه، تكون سعة الموجة المحصِّلة أقصى ما يمكن، وهي حاصل جمع سعات الموجات، ويُسمَّى التداخُل في هذه الحالة **تداخُلًا بنّاء Constructive interference**. يُظهر **الشكل 6-9** مثالًا على تداخُل بَنّاء لموجتين لهما الطور نفسه والسعة نفسها. تكون سعة الموجة المحصِّلة مِثلي سعة إحدى الموجتين، في حين يبقى تردُّدها وطولها الموجي كأيٍّ من الموجتين.



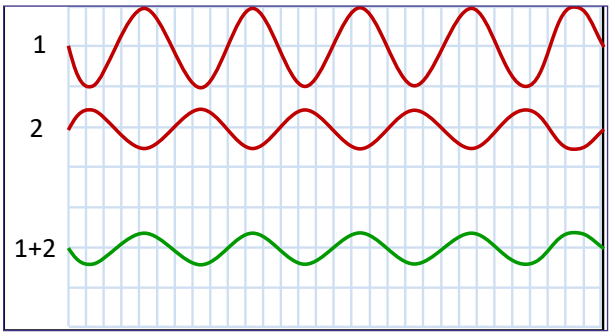
الشكل 6-9 تداخُل بنّاء.

التداخُل الهدّام

ليست كل التداخُلات بنّاءة. فإذا كان الفرق في الطور بين موجتين متداخلتين عند نقطة معيّنة، لهما نفس التردّد والسِّعة يساوي 180° (π rad)، تلتقي قمة إحداهما مع قاع الأخرى، ويكون **التداخُل هدَّامًا Destructive interference**. يوضح **الشكل 6-10(a)** تداخُلًا هدّامًا بين موجتين لهما السعة نفسها، فتكون سعة الموجة المحصِّلة صفرًا في هذه الحالة. لكن إذا كان للموجتين سعتان مختلفتان، تكون سعة الموجة المحصِّلة حاصل طرح السعتين، كما يبين **الشكل 6-10(b)**.



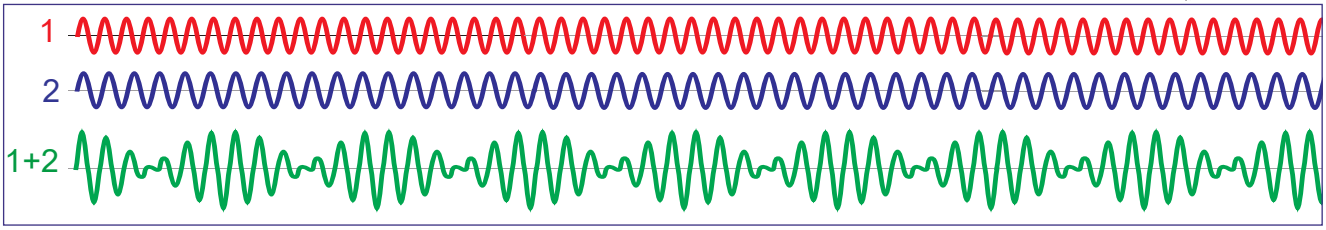
الشكل 6-10 a تداخُل هدّام.



الشكل 6-10 b تداخُل هدّام جزئي.

الضربات

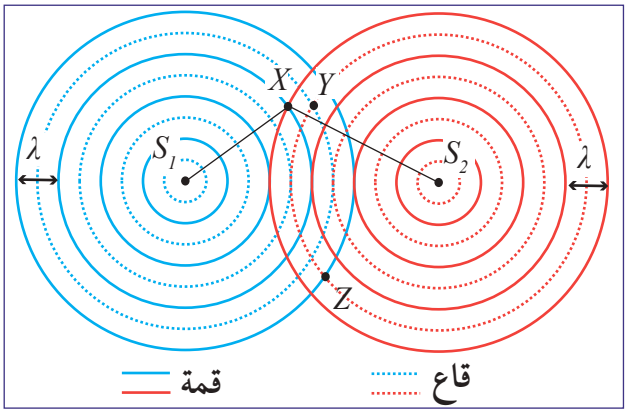
في كثير من الحالات، يحدث تراكُب بين موجتين ليس لهما التردُّد نفسه **الشكل 6-11**. عند جمع موجتين صوتيتين بتردُّدين مختلفَيْن قليلًا، تكون المحصِّلة عبارة عن تراكباتٍ بنّاءة وهدّامة بشكل منتظم ومتوالٍ، ينتج منها صوت نابض ومزعج بعض الشيء يُسمّى بالضربات.



الشكل 6-11 الضربات.

تداخُل مصدر مزدوِج

يمكن تمثيل الموجات بجبهاتها الموجية التي تعبِّر عن طريقة انتشارها، فتكون كروية أو مستوية. عند تحليل التداخُل باستخدام الجبهات الموجية، يصبح حساب النتائج أسهل. لنفترض مصدرَي الموجة الكرويين في **الشكل 6-12** اللذين يصدران موجات لها نفس التردُّد والسعة والطول الموجي والسرعة. تجتمع الجبهات الموجية من كلا المصدرين في عدّة نقاط.



الشكل 6-12 تداخُل موجتين من مصدرين.

لنفرض أن النقطة X هي نقطة التقاء قمّتي موجتين من المصدرين S_1 و S_2. تبعد النقطة X مسافة 3λ عن المصدر S_1، و 4λ عن المصدر S_2. وبما أن النقطة X هي نقطة التقاء قمّتين، فإن التداخُل هنا يعتبر تداخُلًا بنّاءً، وعليه فإن سعة المحصّلة تكون ضعفي سعة كل موجة. يمكن أيضًا ملاحظة التداخُل البنّاء للنقطتين X و Y من خلال حساب فرق المسار، Δl، وهو الفرق في المسافة بين بعد النقطة عن المصدر S_1 وبُعدها عن المصدر S_2 (l_1 و l_2).

تمثِّل النقطة Y نقطة التقاء قاع الموجة من المصدر S_1 مع قاع الموجة من المصدر S_2. يساوي فرق المسار عند هذه النقطة صفرًا. لذلك نستنتج الآتي: إذا كان فرق المسار عند أي نقطة يساوي صفرًا أو أعدادًا صحيحة من الطول الموجي، فإن التداخُل عند هذه النقطة يكون تداخُلًا بنّاء.

فرق المسار للنقطة X	فرق المسار للنقطة Y
$\Delta l = \lvert l_1 - l_2 \rvert$	$\Delta l = \lvert l_1 - l_2 \rvert$
$\Delta l = \lvert 3\lambda - 4\lambda \rvert = \lambda$	$\Delta l = \lvert 3.5\lambda - 3.5\lambda \rvert = 0$

يحدث التداخُل الهدّام عند النقاط التي يساوي فيها فرق المسار مضاعفات لأعداد فردية من نصف الطول الموجي. لنفرض أن النقطة Z هي نقطة التقاء قمّة موجة من المصدر S_1 وقاع موجة من المصدر S_2 يكون فرق المسار عندها:

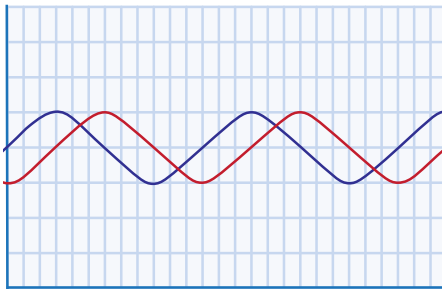
$$\Delta l = \left| 4\lambda - 3\frac{1}{2}\lambda \right| = \frac{1}{2}\lambda$$

التداخُل البنّاء يحدث عند نقطة يكون فرق المسار فيها يساوي أعدادًا صحيحة من مضاعفات الطول الموجي $n\lambda$، حيث n عدد صحيح.

التداخُل الهدّام يحدث عند نقطة يكون فرق المسار فيها يساوي أعدادًا فردية من نصف الطول الموجي. $\frac{n\lambda}{2}$، حيث n عدد فردي.

مثال 2

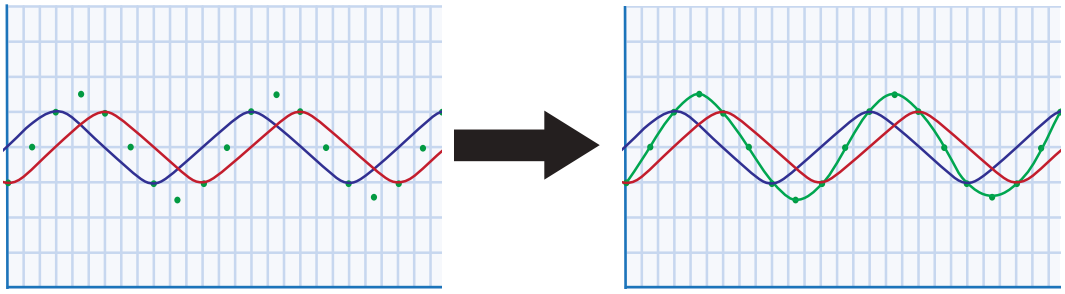
ارسم نموذج التراكب للموجتين الموضحتين في الشكل.



المطلوب: رسم الموجة المحصِّلة

الحل:

1. حدِّد موقع نقاط تشكِّل القمم والقيعان للموجة المحصَّلة، وهي النقاط التي تلتقي فيها الموجتان المُتراكبتان.
2. حدِّد موقع النقاط التي تكون فيها الموجة المحصَّلة في حالة اتِّزان (إزاحتها صفر)، وهي النقاط التي تكون عندها إزاحتا الموجتين متعاكستين.
3. يمكن إضافة محصِّلة نقاط عند لحظات زمنية مختلفة، بجمع الإزاحتين جبريًّا.
4. صِل النقاط المرسومة لتحصل على الموجة الناتجة من التراكُب.



مثال 3

تنتشر موجتان متماثلتان، بطول موجي 2 m، من مصدريهما في الوقت نفسه. تلتقي هاتان الموجتان عند النقطة X التي تبعد 12 m من المصدر الأوّل، و 15 m من المصدر الثاني. ما نوع التداخُل عند النقطة X؟

المطلوب: نوع التداخُل عند النقطة X،

المُعطيات: الطول الموجي $\lambda = 2\ m$، البعد عن المصدر الأوّل $l_1 = 12\ m$ وعن المصدر الثاني $l_2 = 15\ m$

الحل: فرق المسار $\Delta l = 15 - 12 = 3\ m$

فرق المسار بدلالة الطول الموجي $\Delta l = n\ \lambda$ ؛ $n = 1.5$ ؛ $\lambda = 2\ m \Rightarrow \Delta l = 3\ m$

وهو مضاعف فردي لنصف الطول الموجي، لذلك يكون التداخُل هدّامًا.

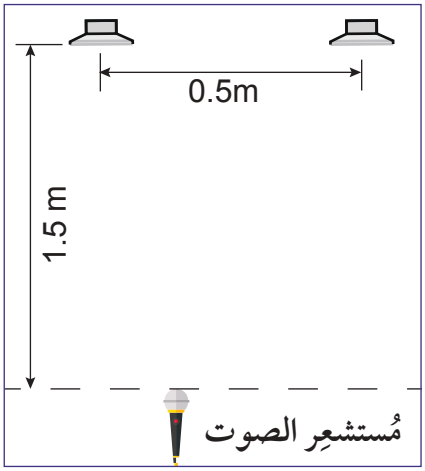
نشاط

1-6 تداخُل موجات الصوت

سؤال الاستقصاء	كيف نتحقَّق من حدوث التداخُل؟
الموادّ المطلوبة	ميكروفون أو مُستشعِر صوت، راسم ذبذبات، عصا مترية، ورق عمل

خطوات التجربة

1. سيقوم معلِّمك بتجهيز الغرفة بمكبِّري صوت ومولِّد إشارة.
2. جهّز نظام الكشف عن الصوت.
3. على خط يبعد 1.5m، تحرك ومعك جهاز مُستشعِر الصوت، حتى تحصل على أدنى مستوى للصوت.
4. سيقوم معلِّمك بإيقاف أحد مُكبِّري الصوت.
5. سيعيد معلِّمك تشغيل المكبِّر مرة أخرى. قِس فرق المسار بين هذه النقطة وكل من المكبّرين.
6. سرْ على طول الخط للعثور على الحد الأدنى التالي، ثم دوِّنه على ورقة العمل، ثم احسب فرق المسار الجديد.
7. ابحث الآن عن موقعين يكون فيهما مستوى الصوت أعلى ما يمكن، ثم احسب فرق المسار لكل موقع.



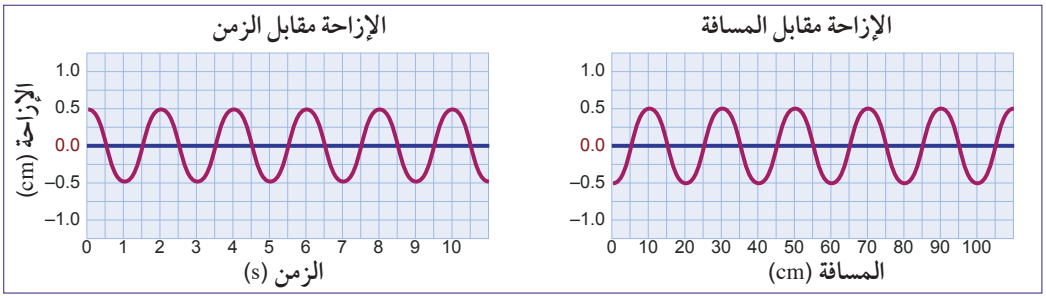
الشكل 6-13 قياس تداخُل الصوت.

الأسئلة

a. اشرح ما لاحظته عند إيقاف تشغيل أحد مكبِّري الصوت.
b. استخدم قيَم فرق المسار التي قستها لحساب الطول الموجي للصوت.
c. إذا كانت سرعة الصوت 340m/s، احسب طول موجة الصوت باستخدام المعادلة $v=f.\lambda$.
d. ما مدى تطابُق قيمتَي الطول الموجي في الفرعين b و c؟ إذا كان هناك أي فرق فما سببه؟

تقويم الدرس 3-6

1. الشكل الأوّل أدناه هو رسم بياني لاهتزاز نقطة على موجة مستعرضة بدلالة الزمن، والشكل الآخر هو رسم بياني للموجة نفسها بدلالة المسافة. استخدم الرسمين البيانيين للإجابة عن الأسئلة الآتية:



أوجد:

a. تردُّد الموجة.

b. الطول الموجي.

c. سعة الموجة.

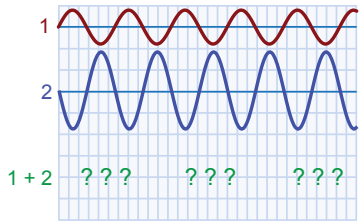
d. سرعة الموجة.

2. هل يمكن الحصول على موجة لها سعة صفر ناتجة من تداخُل موجتين سعة كل منهما لا تساوي الصفر؟ اشرح ذلك.

3. إذا أردت أن تجعل مصدر الضوء أكثر إضاءةً في بقعة محدّدة، فهل تستخدم تداخُلًا بنّاء أم هدّامًا؟

4. ارسم موجتين لهما الطول الموجي نفسه والسعة نفسها لتتداخلا تداخُلًا بنّاء مرّةً وتداخلاً هدامًا مرةً أخرى.

5. تتراكب الموجتان 1 و 2 الموضّحتان في الشكل أدناه. كيف يمكن مقارنة السعة والطول الموجي وطور الموجة المحصَّلة للموجتين 1 و 2؟



6. تنتشر موجة مستعرضة في حبل بسرعة 6 m/s إذا اهتز مصدر الموجات بمعدل 3 مرات في ثانية واحدة. ما مقدار التردد والطول الموجي لهذه الموجات؟

7. تصدر موجتان متماثلتان في صفاتهما من مصدرين متجاورين، الطول الموجي لكل منهما 0.4 m وتسقطان على نقطة واحدة x على شاشة مقابلة للمصدرين. إذا كانت هذه النقطة تبعد عن المصدر الأول 2.4 m وتبعد عن المصدر الثاني 2.6 m فما فرق المسار بينهما بدلالة الطول الموجي؟ وما نوع التداخل عند النقطة x؟

الدرس 6-2
التداخُل في الضوء

أثارت الصور المجسمة ثلاثية الأبعاد (الهولوجرام) Holograms المشاهدين لأكثر من 50 عامًا. وعلى الرغم من أن تقنية جعل الصور المُجسَّمة أكثر واقعية لا تزال قيد التطوير، فإن الصور الثلاثيَّة الأبعاد التي يتم إنتاجها لا تزال مذهلة. يتم إنتاج الصور المجسمة نتيجة التداخُلات البنّاءة والهدّامة التي تحدث نتيجة التقاء موجات الضوء.

تَستخدِم الصور المُجسَّمة ضوء ليزر يسقط على جسمٍ نصف عاكس وهو عبارة عن لوح زجاجي مطليّ بطبقة رقيقة من الفضّة. يسمح اللوح لجُزء من ضوء الليزر بعبوره، ويسبِّب انعكاس بقية موجات الضوء، لتنتقل في اتّجاه آخر. يتم توجيه هذين الشعاعين المنفصلين على النقطة نفسها من لوحة فوتوغرافية باستخدام مرايا. يتولّد هناك فرق في المسار الذي يسلكه الشعاعان، لأن أحدهما يسلك مسارًا أطول من الآخر. يتسبّب هذا الاختلاف في المسار بالتداخُل؛ حيث يُضَخَّم الضوء في بعض الأماكن وتقلّ شدّته في أماكن أخرى.

الشكل 6-14 إسقاط صورة ثلاثية الأبعاد لمنزل.

مخرجات التّعلُّم

P1118.1 يعرض كيف تبين تجربة الشق المزدوج «تجربة يونج» السلوك الموجي للضوء، ويحل مسائل حسابية باستخدام المعادلة: $\lambda = \frac{dx}{D}$.

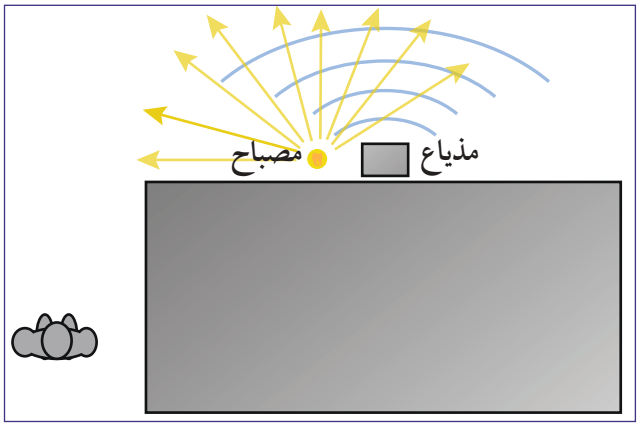
P1118.2 يشتق معادلة محزوز الحيود $d\sin\theta = n\lambda$ ويستخدمها في استقصاء محزوز الحيود والأطوال الموجية لضوء الليزر.

المفردات

Diffraction	الحيود
Polychromatic light	ضوء متعدِّد الألوان
Monochromatic light	ضوء أحادي اللون
Coherent light	ضوء مترابط
Bright fringes	أهداب مضيئة
Dark fringes	أهداب معتمة
Fringe spacing	التباعد الهدبي
Central maximum fringe	الهدبة المُضيئة المركزية
First minimum fringe	الهدبة المُعتمة الأولى
Second Maximum fringe	الهدبة المُضيئة الثانية

الحيود

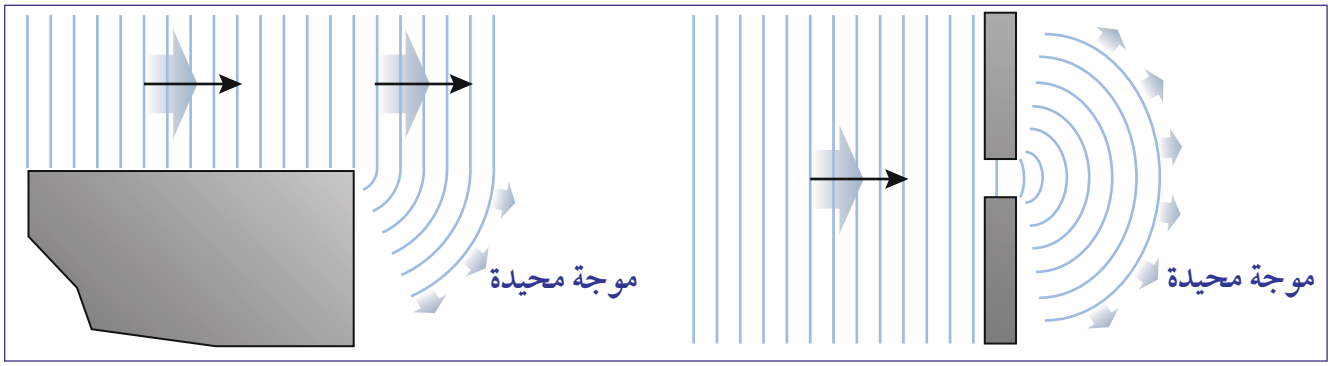
صحيح أن كلًّا من الصوت والضوء موجاتٌ منتشرة، لكنَّهما يتصرّفان بشكل مختلف عندما يواجهان حواجز. إذا وُضع مصباح ومذياع خلف زاوية في غرفة، لا يمكن رؤية المصباح لكن يمكن سماع صوت المذياع (**الشكل 6-15**). يعود ذلك إلى ظاهرة تسمى **الحيود Diffraction** الذي هو خاصية تسمح للموجة بالانحراف لدى اصطدامها بحافة أو زاوية، أو المرور من فتحة ضيّقة عرضها أقل من أو يساوي الطول الموجي.



الشكل 6-15 يمكن سماع صوت المذياع، ولكن لا يمكن رؤية المصباح.

تحيد الموجات الصوتية حول الحواف، لأن الطول الموجي للموجات الصوتية يكون في حدود بضعة سنتيمترات، وهي تقارن بمقياس أبعاد الحافة. لكن الطول الموجي للموجة الضوئية هو 10^{-5} cm وهو أصغر كثيرًا من مقياس أبعاد الحافة نفسها، وبالتالي يكون مقدار الحيود دقيقًا جدًّا وغير ملحوظ. بشكل عام، إذا كان الطول الموجي أصغر كثيرًا من قياس الفتحة التي تمر منها الموجة، فإنها تمر من دون تغيُّر تقريبًا.

يتناسب مقدار الحيود مع النسبة بين الطول الموجي ومقياس الجسم المسبِّب للحيود (الحاجز و الفتحة).



الشكل 6-16 الحيود.

غالبًا ما يغيِّر الحيود اتِّجاه الموجة وشكلها. تحيد الموجة المستوية التي تصل إلى حافة مناسبة، حيث تصبح جبهات الموجة دائرية تقريبًا عند الحافة (**الشكل 6-16**). تنتشر الموجة المستوية نفسها التي تمر عبر فتحة على شكل موجة دائرية عند الجانب الآخر من الفتحة. يفسِّر حيود الصوت سماعك لصوت شخص في الغرفة الأخرى، وإن كان الباب مغلقًا وليس به إلا فتحة صغيرة، أو فتحة المفتاح. يؤدّي الحيود إلى انتشار موجة صوتية من الشق.

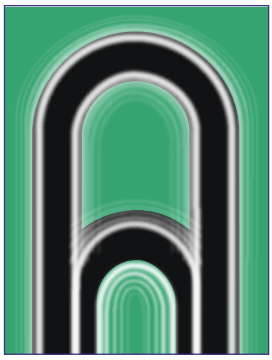
حيود الضوء

تحيد الموجات الصوتية حول حافة جدار الغرفة، لكن الموجات الضوئية لا تحيد، لأن طول موجة الضوء أصغر كثيرًا من قياس الحافة. يمكننا مراقبة حيود الموجات الضوئية حول الأجسام الصغيرة.

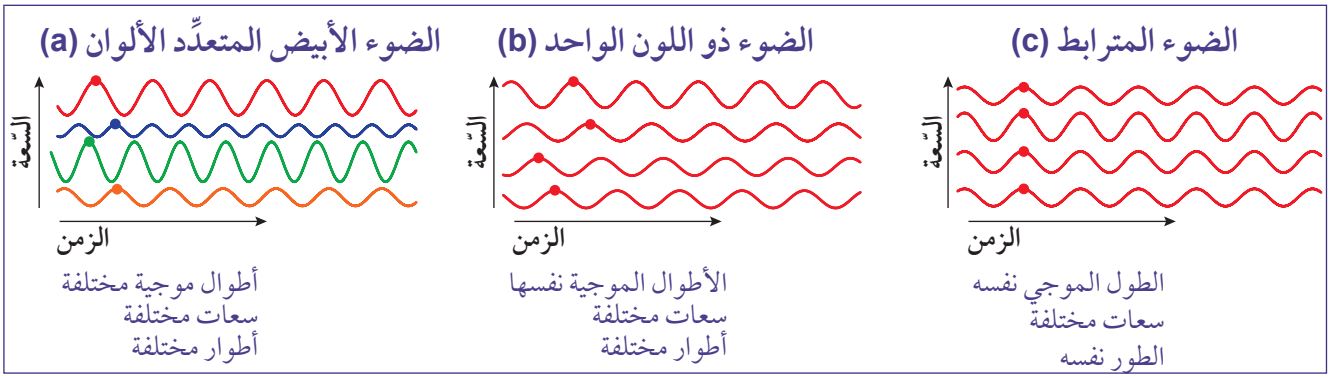
سؤال للمناقشة

أين لاحظت حيود الضوء؟ هل يحدث ذلك بشكل طبيعي؟

عندما تجتاز موجات الضوء حاجزًا، فإن القليل من موجات الضوء ينحرف حول حافة الحاجز. تتداخُل تلك الموجات مع موجات ضوئية أخرى تحيد حول الجانب الآخر من الحاجز. ينتج من ذلك نمط من التداخُل. إذا تم إسقاط الضوء بعد حيوده على شاشة، يظهر نمط من الحزَم المضيئة والمعتمة حول حافة الحاجز. يُظهر **الشكل 6-17** نموذج الحيود حول ظل مشبك ورقي. الحزَم المُضيئة هي عبارة عن تداخُل بَنّاء، والحزم المعتمة هي تداخُل هَدّام. يشكِّل هذا النمط من حيود الضوء مثالًا على كيفية تصُّرف الضوء كموجة.



الشكل 6-17 الحيود حول ظل مشبك الورق.

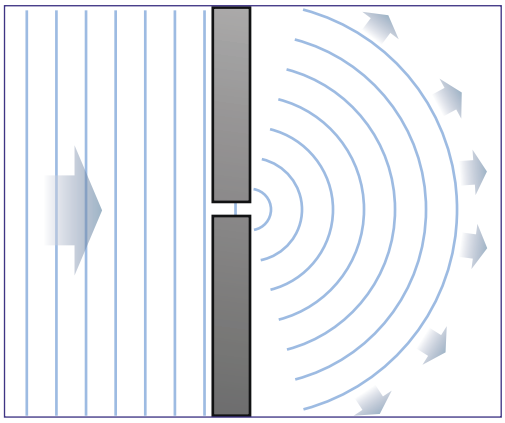


الشكل 6-18 أنواع مختلفة من الضوء.

لا نرى في العادة تداخلًا يؤدي إلى نمط حيود كما في **الشكل 6-17** لأن الضوء الأبيض العادي هو خليط من ألوان لها أطوال موجية وسِعات وأطوار مختلفة. الضوء الذي يشتمل على خليط من الأطوال الموجيَّة يسمى **الضوء المتعدِّد الألوان Polychromatic light** (**الشكل 6-18a**). لا يشكّل الضوء المتعدّد الألوان نمط تداخل واضح بسبب خليط الأطوال الموجيّة.

يكون الضوء **أحادي اللون Monochromatic light** إذا كان له طول موجي واحد (**الشكل 6-18b**). ويكون **الضوء مُترابطًا Coherent** عندما يكون له نفس الطول الموجي والطور (**الشكل 6-18c**)، كما في ضوء الليزر. ظاهرة الحيود الواضحة في **الشكل 6-17** هي نتيجة لضوء أخضر (أحادي اللون) ومترابط. يشكل الضوء المترابط نمط تداخل واضح لأن الموجات لها الطور نفسه. فإذا تداخلت موجتان من موجات المصدر بشكل بَنّاء عند نقطة معينة، فإن كل موجات المصدر تتداخل بشكل بَنّاء عند النقطة نفسها.

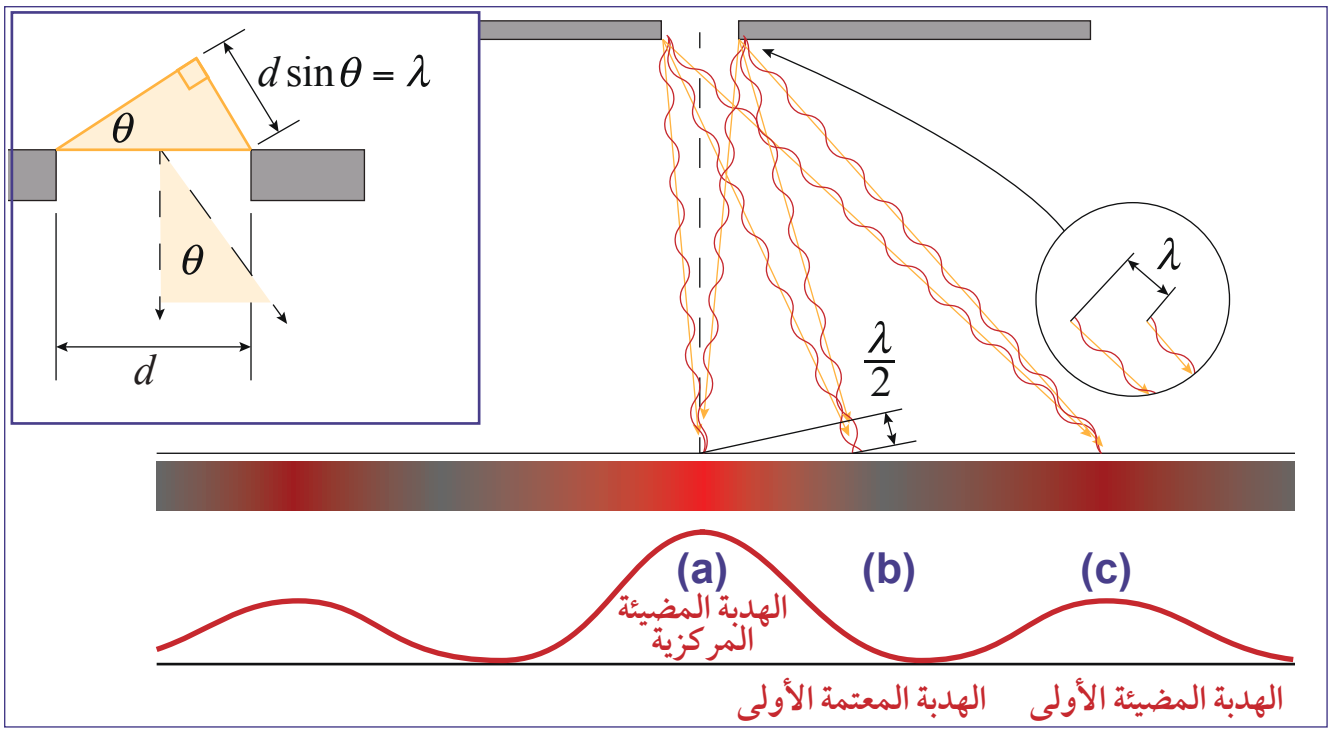
حيود الضوء عبر شقّ رفيع



الشكل 6-19 الحيود من خلال شق رفيع.

تحيد الموجات عند عبورها فتحةً ضيقةً أو شقًّا. عندما يكون مقدار الطول الموجي قريبًا من عرض الشق، تحيد الموجة المستوية من خلال الشق إلى موجة دائرية، كما هو موضَّح في **الشكل 6-19**. لمشاهدة حيود الضوء، نستخدم شقًّا رفيعًا له عرض مماثل لطول موجة الضوء.

الضوء المار عبر شق رفيع يشكّل النموذج الموضَّح في **الشكل 6-20**. التداخل الناتج عن حيود الضوء على جانبي الشق يتسبب بظهور الأهداب المضيئة والأهداب المعتمة على الشاشة. في **الشكل 6-20 (a)**، يتراكب الضوء الذي يمرّ مباشرة عبر الفتحة بشكلٍ بَنّاء لإنشاء بقعة مركزية مضيئة على الشاشة تُعرف بالهدبة المضيئة المركزية.

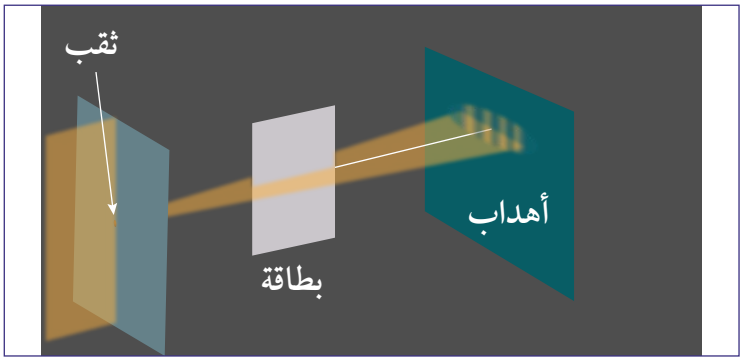


الشكل 6-20 الحيود خلال شق مفرد.

ينتقل الضوء من أجزاء الفتحة المختلفة فيقطع مسافات مختلفة للوصول إلى الشاشة (**الشكل 6-20**). عندما يكون الفرق في المسار $\frac{\lambda}{2}$، تتداخل الموجات من الحواف المقابلة للشق بشكل هدّام. تُظهِر الشاشة منطقة مظلمة تسمّى الهدبة المعتمة الأولى **(b)**. وعندما يكون الفرق في المسار λ، تتداخل الموجات من الحواف المقابلة للشق بشكل بنّاء. تظهر الشاشة منطقة مضيئة تسمّى الهدبة المضيئة الأولى **(c)**.

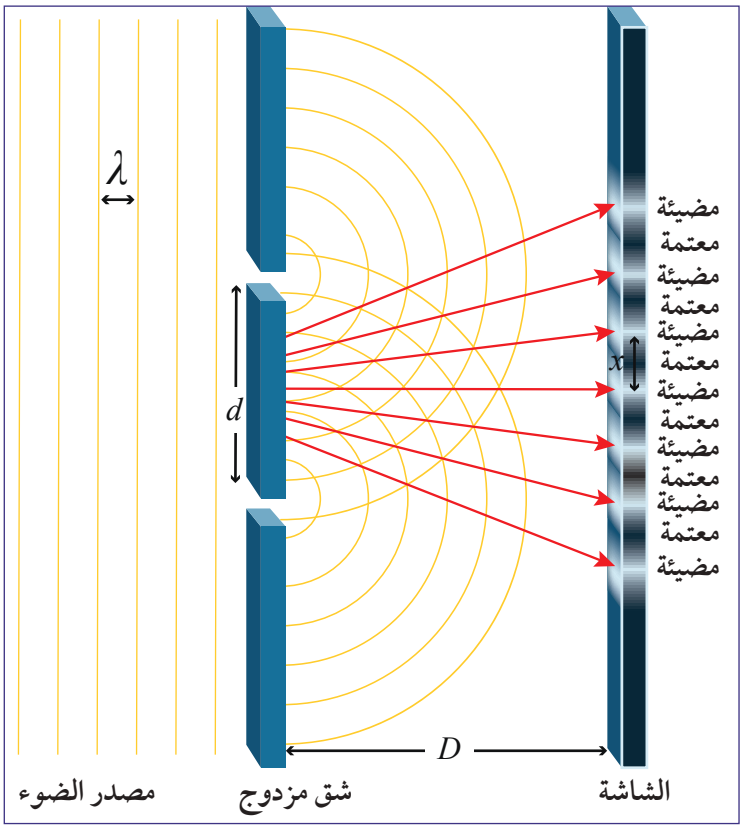
تجربة يونج للشق المزدوج

أجرى توماس يونج عام 1801، تجربة لإظهار أنماط التداخُل الضوئي. استخدم يونج شقًا رفيعًا للحصول على حزمة ضيقة من أشعّة الشمس، ثم قسّم الحزمة ببطاقة رقيقة إلى حزمتين. لاحظ يونج أن الضوء القادم من الحزمتين ينتج نمط تداخُل على الشاشة المقابلة.



الشكل 6-21 تجربة يونج.

تستخدم الطريقة الحديثة للتجربة شقَّين ضيّقين للغاية أمام حزمة من ضوء الليزر. عندما يمر الضوء خلال الشقّين، يتداخل الضوء المار عبر أحد الشقّين مع الضوء المار عبر الشقّ الآخر (**الشكل 6-22**). يمكن رؤية نمط التداخُل الناتج على الشاشة الموضوعة على مسافة معيَّنة مقابل الشقّين. يظهر نمط من **الأهداب المضيئة Bright fringes** بالتناوب مع **الأهداب المعتمة Dark fringes** على الشاشة. الهدبة المضيئة هي النقطة التي يكون فيها فرق المسار مضاعفات أعداد صحيحة للطول الموجي.



الشكل 6-22 تجربة الشق المزدوج.

أمّـا الهدبة المُعتمة فهي النقطة التي يكون فيها فرق المسار مضاعفات أعداد صحيحة فردية لنصف الطول الموجي. تساوي المسافة بين هدبتين مُعتمتين مُتتاليتين المسافة بين هدبتين مُضيئتين مُتتاليتين. تُعرَف هذه المسافة باسم **التباعُد الهدبي Fringe spacing**. يثبت نمط التداخُل أن الضوء يتصرف كموجة. يمكن استخدام تجربة الشق المزدوج لحساب الطول الموجي لمصدر ضوئي أحادي، باستخدام **المعادلة 6–2**.

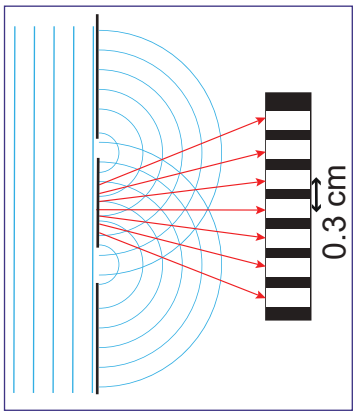
2-6	الطول الموجي من تجربة يونج		
$\lambda = \frac{dx}{D}$		λ	الطول الموجي (m)
		d	المسافة بين الشقين (m)
		x	التباعُد الهدبي (m)
		D	المسافة بين الشق المزدوج والشاشة (m)

مثال 4

يوضّح **الشكل 6-23** تجربة تداخُل شقّ مزدوج. تبلغ المسافة بين الشقّين 4.6×10^{-4} m، بينما تبعد الشاشة عن الشقّين مسافة 2.5 m.

a. احسب الطول الموجي للضوء المُستخدَم في هذه التجربة.

b. ينتج من الضوء نفسه تباعُد هدبيّ يبلغ 0.4 cm مع شق مزدوج مختلف. ما المسافة الفاصلة بين الشقّين إذا كانت المسافة بين الشق المزدوج والأهداب هي نفسها؟



الشكل 6-23

المطلوب:

a. الطول الموجي للضوء، λ ؛

b. المسافة بين الشقّين، d.

المُعطيات:

a. التباعُد الهدبي $x = 0.3$ cm ؛ المسافة بين الشقّين $d = 4.6\times10^{-4}$ m ؛ المسافة بين الشقّين والشاشة $D = 2.5$ m ؛

b. التباعُد الهدبي $x = 0.4$ cm.

العلاقات:

$$\lambda = \frac{dx}{D}$$

الحل:

a. التباعُد الهدبي المُعطى هو 0.3 cm. يجب أن تكون المسافة بالأمتار. 0.3 cm = 0.003 m. باستخدام العلاقة المعطاة:

$$\lambda = \frac{dx}{D} = \frac{4.6\times10^{-4}\left(0.003\right)}{2.5} = \boxed{5.52\times10^{-7}\,\text{m}}$$

b. التباعُد الهدبي هو 0.4 cm. التحويل إلى المتر، 0.4 cm = 0.004 m.

نعلم أن طول الموجة هو : $\lambda = 5.52\times10^{-7}$ m

إعادة ترتيب المعادلة المعطاة وحساب المسافة بين الشقّين:

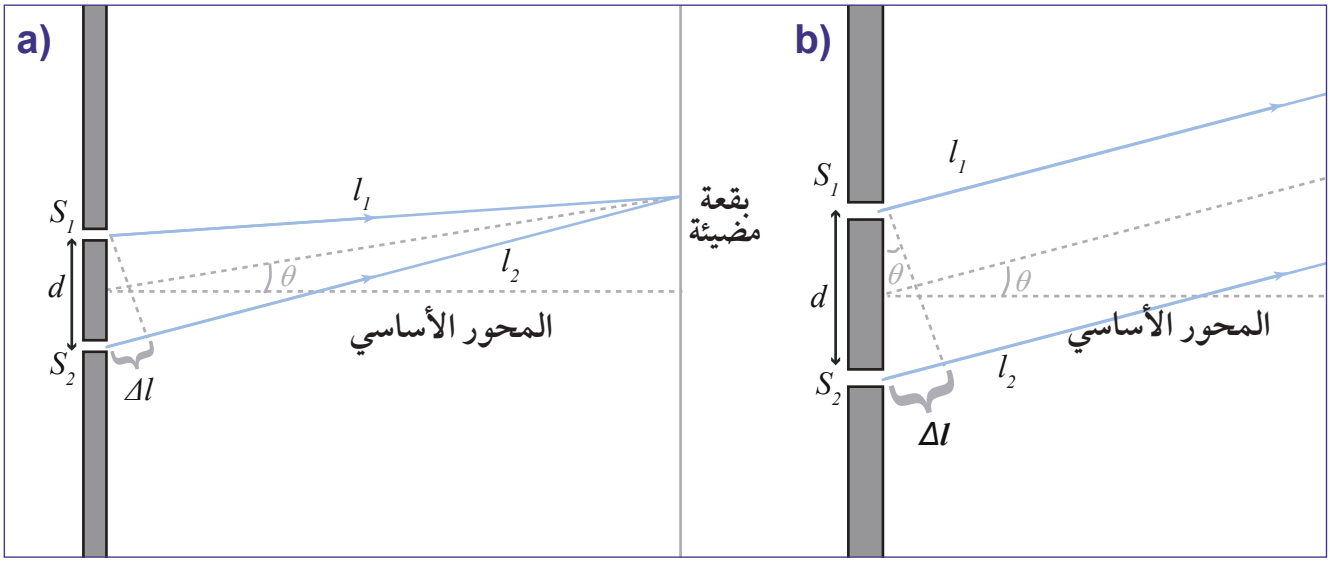
$$d = \frac{\lambda D}{x} = \frac{5.52\times10^{-7}\left(2.5\right)}{0.004} = \boxed{3.45\times10^{-4}\,\text{m}}$$

حساب فرق المسار في تداخُل الضوء

افترض شقّين ضيّقين تفصل بينهما مسافة صغيرة جدًّا d. يمكن أن يعمل هذان الشقّان كمصدرين مترابطين للضوء، عندما يمر ضوء الليزر عبرهما. إذا تم وضع شاشة على بعد أمتار قليلة من المصدر، يتشكّل نمط من الأهداب المضيئة والمعتمة على الشاشة. يمكن حساب موقع الهدبة المضيئة أو الهدبة المعتمة من مركز الشاشة. سوف تظهر هدبة مضيئة على الشاشة، عندما يكون فرق المسار مضاعفات أعداد صحيحة من الطول الموجي، بينما تظهر هدبة معتمة عندما يكون فرق المسار مضاعفات أعداد فردية صحيحة لنصف الطول الموجي.

تداخُل بَنّاء

يوضِّح **الشكل 6-24(a)** موجات الضوء المترابطة التي تدخل شقَّين ضيّقين، وتجتمع على شاشة توضع على بعد أمتار قليلة. نلاحظ أن مسار الموجات التي تخرج من الشق S_2 تقطع مسافة إضافية Δl مقارنة بالموجات القادمة من S_1، فيكون فرق المسار بينهما Δl. وبالنظر إلى أن المسافة بين الشقّين صغيرة جدًّا مقارنة بالمسافة بين الشقّين والشاشة، يمكننا أن نعتبر أن l_1 و l_2 شبه متوازيين (**الشكل 6-24(b)**). باستخدام علم المثلثات نرى أن، $\Delta l = d\sin\theta$. إذا كانت الموجات تجتمع في نقطة يحدث فيها تداخُل بنّاء، يكون فرق المسار هو $d\sin\theta = n\lambda$ (**المعادلة 3-6**)، حيث n رتبة التداخُل، أي رتبة الهدبة المضيئة من مركز الشاشة.



الشكل 6-24 فرق المسار عند نقطة معيّنة.

3-6	التداخُل البناء		
	$d\sin\theta = n\lambda$	λ	الطول الموجي (m)
		d	المسافة بين الشقّين (m)
		n	رتبة التداخُل $n=0,1,2,3,..$
		θ	الزاوية بين الأشعّة والمحور الأساسي (rad) وهي زاوية صغيرة.

4-6	التداخُل الهدّام	λ	الطول الموجي (m)
	$d \sin\theta = \left(n - \frac{1}{2}\right)\lambda$	d	المسافة بين الشقّين (m)
		n	رتبة التداخُل $n = 1,2,3,..$
		θ	الزاوية بين الأشعّة والمحور الأساسي (rad) وهي زاوية صغيرة.

مثال 5

يمر ضوء الليزر عبر شقّين تفصل بينهما مسافة 0.01 mm، ويشكّل موقع الهدبة المضيئة الثانية زاوية تبلغ 7.27° مع المحور الأساسي.

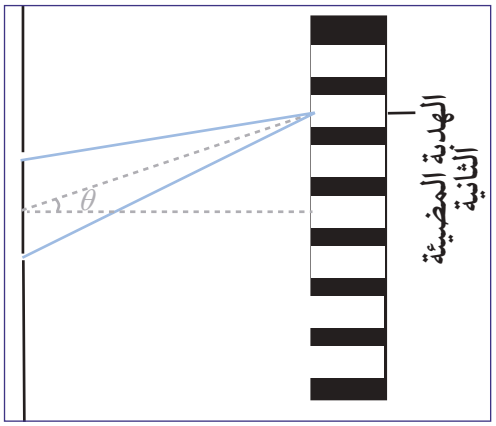
a. ما الطول الموجي للضوء؟

b. ما أعلى رتبة للتداخُل البنّاء الممكن وفق الترتيب الموضَّح؟

المطلوب

a. الطول الموجي للضوء، λ؛

b. الحد الأقصى n الذي يمكن تحقيقه.



الشكل 6-25

المعطيات:

المسافة بين الشقّين $d = 0.01$ mm؛

زاوية الهدبة الثانية مع المحور الأساسي $\theta = 7.27°$؛

رتبة التداخُل $n = 2$.

العلاقات: $d\sin\theta = n\lambda$

الحل:

a. نحوِّل المسافة بين الشقّين من mm إلى m: $d = 0.01 \text{ mm} = 1\times10^{-5} \text{ m}$

باستخدام العلاقة المعطاة: $d\sin\theta = n\lambda$

$$\lambda = \frac{d\sin\theta}{n}$$

$$\lambda = \frac{1\times10^{-5}\left(\sin 7.27°\right)}{2}$$

$$\lambda = \boxed{633\times10^{-9}\text{ m}}$$

b. نرى من العلاقة المعطاة الآتي: مع ازدياد الرتبة n، تزداد $\sin\theta$، ويكون حدها الأقصى $\sin\theta = 1$.

باستبدال القيم المعروفة في (a) والحل لـ n:

$$n = \frac{d\sin\theta}{\lambda} = \frac{1\times10^{-5}\left(1\right)}{633\times10^{-9}\text{ m}} = 15.8$$

وبما أن n يجب أن تكون عددًا صحيحًا، فإن أعلى رتبة للتداخُل البنّاء الممكن في الترتيب الموضح، هي 15.

مثال 6

a. أجريت تجربة باستخدام ضوء ليزر بتمريره من شقين تفصلهما مسافة 8 µm، فتم الحصول على أهداب مضيئة وأخرى معتمة تكونت على شاشة مناسبة. إذا تشكلت الهدبة المعتمة الثانية بحيث تصنع زاوية 6.3 ° مع المحور الأساسي.

a. ما مقدار الطول الموجي لضوء الليزر المستخدم؟

b. ما قياس الزاوية التي يصنعها موقع الهدبة المعتمة الثالثة؟

المطلوب: $\lambda = ? \ , \theta = ?$

المعطيات: $d = 8\ \mu m \ , \theta = 6.3^\circ \ , n = 2 \ , n = 3$

العلاقات: $d \sin\theta = \left(n - \frac{1}{2}\right)\lambda$

الحل:

a.

$$d \sin\theta = \left(n - \frac{1}{2}\right)\lambda \ \rightarrow \ 8 \times 10^{-6} \sin 6.3 = 1.5\,\lambda$$

$$\lambda = \frac{8\times10^{-6} \times \sin 6.3}{1.5} = 5.9 \times 10^{-7}\ m.$$

b. نستخدم العلاقة نفسها لإيجاد زاوية انحراف الهدبة المعتمة الثالثة:

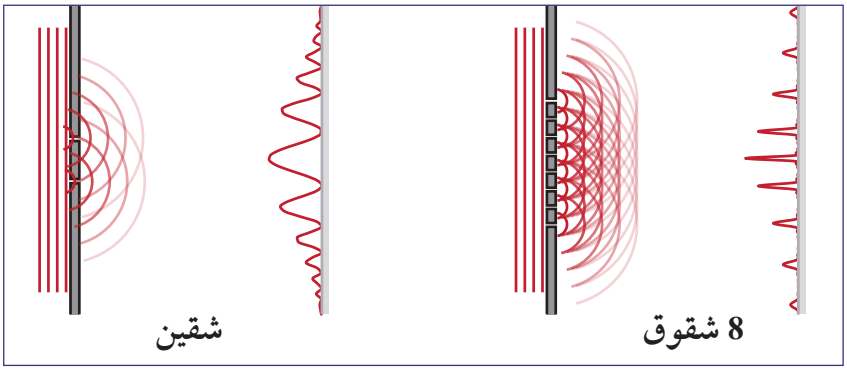
$$d \sin\theta = \left(n - \frac{1}{2}\right)\lambda \ \rightarrow \ \sin\theta = \frac{\left(n - \frac{1}{2}\right)\lambda}{d} = \frac{2.5 \times 5.9\times10^{-7}}{8\times10^{-6}} = 0.183$$

$$\theta = 10.54^\circ$$

الحيود من خلال شقوق مُتعدِّدة

تناولنا أنماط التداخُل التي تتشكَّل عند مرور الضوء من خلال شقّ مفرد وشق مزدوج. يمكن استخدام أنماط التداخُل تلك لحساب الطول الموجي للمصدر الضوئي. يمكن أيضًا استخدام جهاز يُسمّى محزوز الحيود لحساب الطول الموجي لمصدر ضوئي مُعيَّن. **محزوز الحيود Diffraction grating** أداة ذات شقوق عديدة متوازية ضيّقة جدًّا موزَّعة بالتساوي على شريحة، تُستخدم بدلاً من شق واحد أو شق مزدوج؛ لأن زيادة عدد الشقوق تجعل نمط التداخُل الناتج أكثر حدّة ووضوحًا، ما يُسَهّل القياس والاستفادة من العمليات الحسابية.

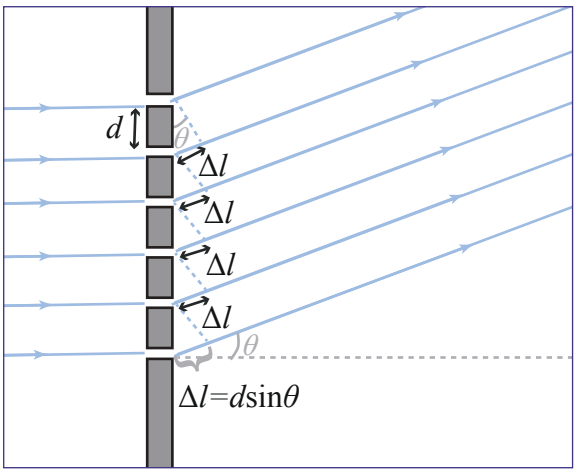
يوضِّح **الشكل 6-26** الفرق بين نموذج التداخُل الناتج من شقّين وآخر ناتج من ثمانية شقوق. النمط الناتج من محزوز الشقوق الثمانية هو أكثر دقة وأسهل في عمليات القياس.



الشكل 6-26 مع ازدياد عدد الشقوق، يصبح نمط التداخُل أكثر دقة.

تحليل محزوز الحيود

تعمل موجات الضوء الأحادية اللون التي تمر عبر محزوز الحيود على نحو مماثل لتلك التي تمر عبر الشقوق المزدوجة. يوضِّح **الشكل 6-27** الأشعّة القادمة إلى نقطة محدَّدة على الشاشة والقادمة من شقوق مختلفة. تقطع هذه الأشعّة مسافات مختلفة للوصول إلى النقطة نفسها على الشاشة، إذ يقطع كل شعاع مسافة إضافية dsinθ مقارنة بالمسافة التي يقطعها الشعاع الواقع فوقه. ولكي يؤدّي تجمّع الموجات عند نقطة إلى تداخُل بنّاء، يجب أن يكون فرق المسار مساويًا لمضاعفات أعداد صحيحة للطول الموجي، أي nλ.



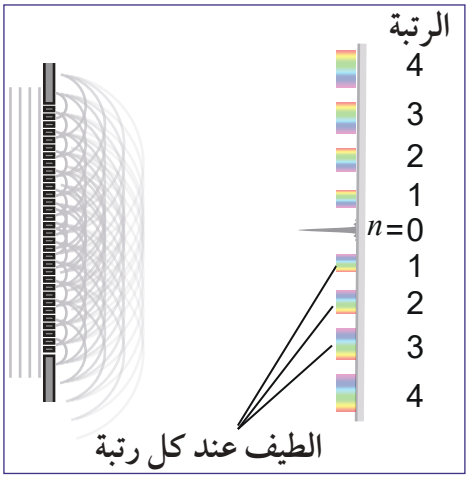
الشكل 6-27 الفرق بين مَسارَي شعاعين متتاليين هو dsinθ.

يتم التمييز بين محزوز حيود وآخر، حسب عدد الخطوط في المليمتر الواحد بدلاً من المسافة بين الشقوق. يمكن الحصول على المسافة بين الشقوق عن طريق حساب مقلوب عدد الخطوط في المليمتر. إن محزوز حيود ذات 600 خط في كل mm، مثلًا، تكون فيه المسافة بين أي خطّين متجاورين:

$d = 1.67\times10^{-6}$ m.

الضوء الأبيض من خلال محزوز الحيود

تناولنا نتائج مرور ضوء أحادي اللون عبر محزوز الحيود. ماذا عن ضوء متعدِّد الألوان، كالضوء الأبيض؟ عندما يمر الضوء الأبيض عبر محزوز الحيود، يشكِّل بقعة بيضاء عند الهدبة المركزية (n=0). لا يحدث أي فصل لألوان الضوء الأبيض في هذه الهدبة المركزية. لكن عند الأهداب المضيئة الأخرى (حول طرفَي الهدبة المركزية)، يتشكَّل طيف من الألوان. يحدث ذلك لأن لكل طول موجي من مكوِّنات الضوء الأبيض موقع تداخُل بَنّاء خاصًّا به على الشاشة (**الشكل 6-28**).



الشكل 6-28 يتشكَّل الطيف عندما يمر الضوء الأبيض عبر محزوز الحيود.

مثال 7

يسقط ضوء طوله الموجي 760 nm عموديًّا على محزوز حيود يتكوَّن من 10000 خطّ في كل cm.

a. ما قياس الزاوية التي تفصل الهدبة المركزية (n = 0) عن الهدبة المضيئة التالية (n = 1)؟

b. ما عدد الهدب المُضيئة التي يمكن رؤيتها؟

المطلوب:

a. قياس الزاوية θ التي تفصل بين الهدبتين n = 0 و n = 1

b. أقصى عدد n يمكن تحقيقه.

المعطيات:

خطوط محزوز الحيود، 10000 خط في كل cm ؛

الطول الموجي λ = 760 nm

العلاقات:

$d\sin\theta = n\lambda$

الحل:

a. يمكن حساب المسافة بين الشقوق بواسطة:

$$d = \frac{1}{10{,}000} = 1\times10^{-4}\,\text{cm} = 1\times10^{-6}\,\text{m}$$

ولحساب قياس الزاوية بين الرتبتين n = 0 إلى n = 1، نستخدم n = 1 في العلاقة: $d\sin\theta = n\lambda$

$$d\sin\theta = n\lambda$$

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{n\lambda}{d}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{1\left(760\times10^{-9}\right)}{1\times10^{-6}}\right) = \boxed{49.46^\circ}$$

b. تكون القيمة العظمى لجيب الزاوية هي: sin θ = 1

$$n = \frac{d\sin\theta}{\lambda} = \frac{1\times10^{-6}\times1}{760\times10^{-9}} = 1.3$$

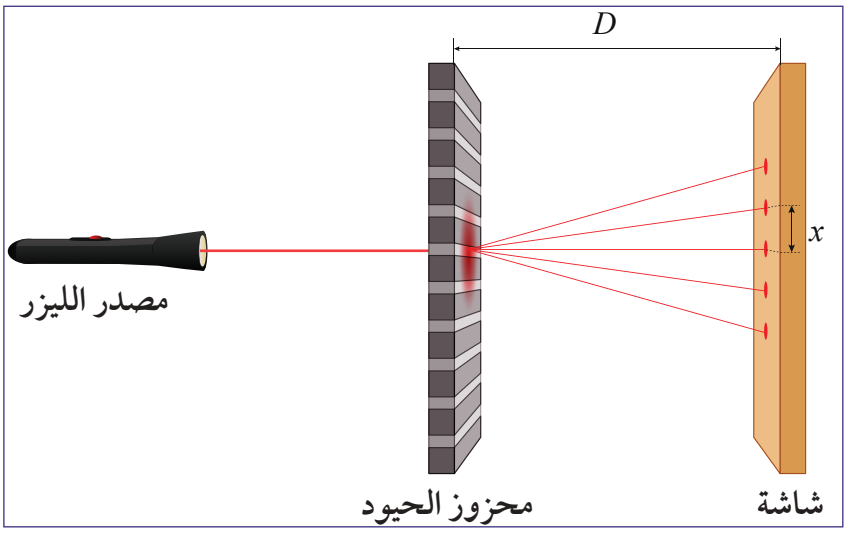
بما أن n يجب أن تكون عددًا صحيحًا، فإن أعلى رتبة للتداخل البناء الممكن في النمط هي n = 1

نشاط

2-6 حساب الطول الموجي للضوء

سؤال الاستقصاء	ما الطول الموجي للضوء بعد مروره عبر محزوز حيود؟
الموادّ المطلوبة	محزوز حيود 600 خط لكل mm، محزوز حيود غير معروف، ريشة، مصدر ليزر، ورقة ملصق فارغة، قلم رصاص، مسطرة، حامل مشبك.

1. ضع محزوز الحيود على حامل المشبك.
2. ضع ورقة الملصق على بعد 2m من محزوز الحيود.
3. ثبّت مصدر الليزر ووجّه ضوءه من خلال محزوز الحيود.
4. سيقوم طالب آخر برسم عام للأهداب الناتجة.



الشكل 6-29 ضوء ليزر يمر من خلال محزوز حيود.

5. قِس المسافة بين الهدبة المضيئة المركزية والهدبة المضيئة الأولى ثم احسب قياس الزاوية θ، باستخدام القياسات وعلم المثلثات $\theta = \tan^{-1}(\frac{x}{D})$.
6. احسب الطول الموجي لليزر باستخدام المعادلة 6-3.
7. كرِّر الخطوات من 1 إلى 6 باستخدام الليزر نفسه، وباستخدام محزوز حيود ذي عدد خطوط غير معروف.
8. احسب التباعُد بين الشقوق، وعدد الخطوط في كل 1 mm.
9. استخدم تقنية الحيود نفسها لحساب التباعد بين الشقوق وعدد الشقوق في المليمتر الواحد للريشة.

الأسئلة:

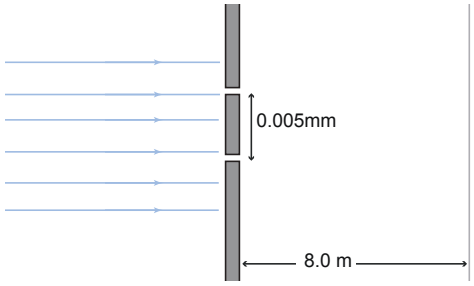
a. افترض أن لديك مصدر ليزر طوله الموجي 480 nm. تنبّأ بمقدار التباعد الهدبي باستخدام المحزوز نفسه الذي استُخدم في الخطوة 1.

b. اشرح لماذا ينتج عن الريشة نمط حيود مشابه للنمط الذي نحصل عليه بواسطة المحزوز.

c. ارسم شكلًا مكبّرًا للريشة وأشر إلى أجزائها التي أدّت إى نمط الحيود الذي لاحظته.

تقويم الدرس 6-2

1. تُستخدم تجربة يونج للشق المزدوج بهدف تقسيم حزمة واحدة من الضوء، فينتج عنها مصدران منفصلان. هل يُنتِجُ مصدران حقيقيان، كمصباحَيْ سيّارة أماميان، أو أي مصباحان متقاربان، نمط التداخُل نفسه؟ اشرح ذلك.
2. اذكر أوجه التشابه وأوجه الاختلاف بين الضوء المتعدِّد الألوان والضوء الأحادي اللون.
3. هل جميع الأضواء الأحادية اللون مترابطة؟ اشرح ذلك.
4. يمر ضوء أحادي اللون ومترابط عبر شقَّين ضيّقين كما هو مبين أدناه. يظهر نمط التداخُل على الشاشة التي تبعد 8.0 m عن الشقّين.

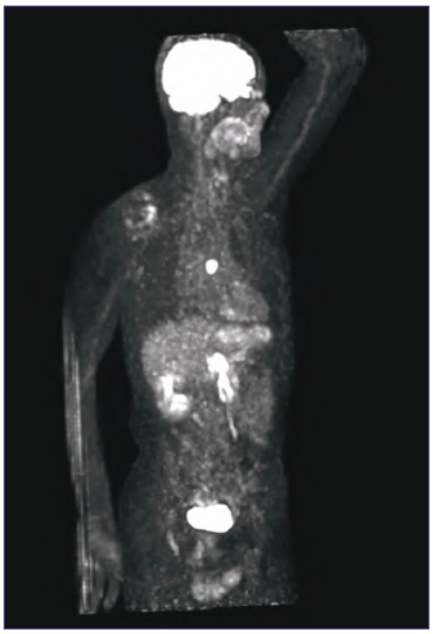


   a. إذا كان التباعُد الهدبي 3.5 cm، احسب الطول الموجي للضوء.
   b. ما قياس زاوية الهدبة المُضيئة ذات الرتبة الأوّلى؟
5. يمر ضوء مترابط طوله الموجي 700 nm عبر شقّ مزدوج، وينتج هدبة مضيئة من الرتبة الثانية. ما أصغر مسافة ممكنة بين الشقوق؟
6. يبلغ الطول الموجي لضوء أحمر 720 nm، يتم إسقاطه بزاوية عمودية على شقين تفصل بينهما مسافة 0.3 mm. يتم تشكيل أهداب على شاشة موضوعة على مسافة 1.2 m من الشقّين.
   a. احسب التباعُد الهدبي.
   b. يعطي الضوء نفسه تباعُدًا هدبيًّا يبلغ 2 mm، لدى تمريره عبر زوج مختلف من الشقوق. ما الفاصل بين الشقّين الجديدين، إذا بقيت المسافة بينهما وبين الشاشة هي نفسها؟
7. عند نفاذ ضوء مترابط من شقين رفيعين متجاورين، وسقوطه على شاشة مقابلة، تتكون أهداب مضيئة وأخرى معتمة على الشاشة. وضح ما يأتي:
   a. ما مقدار زاوية انحراف الهدبة المضيئة المركزية؟
   b. لماذا تظهر الهدبة المركزية الأولى بأكبر شدة ممكنة تفوق شدة باقي الأهداب؟
   c. ما مقدار فرق المسار للموجتين عند التقائهما في الهدبة المضيئة المركزية؟
8. محزوز حيود يحتوي 480 خط في كل ملمتر، سقط عليه ضوء أحادي الموجة فتشكلت أهداب مضيئة وأخرى مظلمة. إذا كانت زاوية انحراف الهدبة المضيئة الأولى ° 18، احسب ما يأتي:
   a. المسافة بين شقين متجاورين على محزوز الحيود.
   b. الطول الموجي للضوء الساقط.

الدرس 6-3
الأشعّة الكهرومغناطيسية

يوجد العديد من الاستخدامات لأشعة جاما في المجال الطبّي، من تعقيم الأدوات الطبيّة، إلى قتل الخلايا السرطانية، إلى التشخيص الطبّي.

السينتيجرافيا (التصوير بأشعّة الوميض) واحد من الاستخدامات الطبيّة لأشعّة جاما. فهي تنتج صورًا لأعضاء الجسم الداخلية. يُحقَن الجسم بنظير مشعّ يبث إشعاعاته حالما تسري في الجسم مادته الكيميائية. تقوم آلة تصوير جاما بالتقاط الإشعاع وتشكيل صورة ثنائية الأبعاد 2-D. تستخدم الصورة لمُعاينة العظام والأنسجة والرئتين والغدد والقلب، وأنظمة أخرى للجسم. يمكن لهذا التصوير الثنائي الأبعاد أن يطلع الطبيب على تغيّرات صحية في وقت مبكر، مقارنة بأنواع الفحص الأخرى.



الشكل 6-30 التصوير بالوميض لكامل الجسم.

مخرجات التّعلُّم

P1119.1 يوضح ظاهرة ترابط الموجات المستعرضة واستقطابها ويصف استخدامات كل منها.

P1119.2 يوضح المقصود بالأشعّة الكهرومغناطيسية من حيث تذبذب المجال الكهربائي والمجال المغناطيسي ويدرك أن جميع الموجات الكهرومغناطيسية تنتقل بالسرعة نفسها في الفراغ.

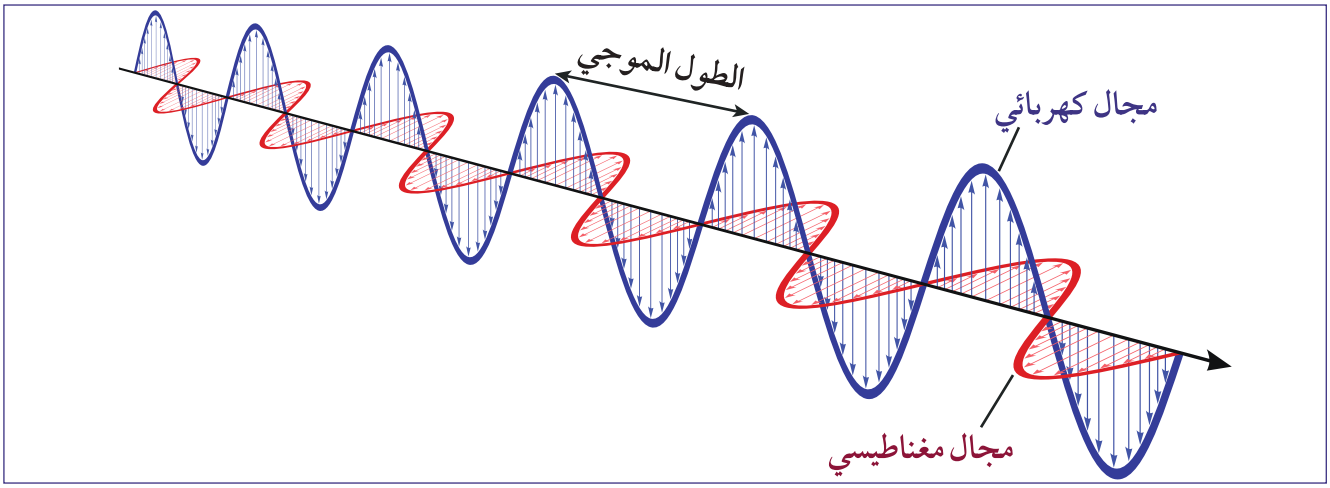
المفردات

Electromagnetic wave	موجة كهرومغناطيسية
Electromagnetic radiation	أشعّة كهرومغناطيسية
Electromagnetic spectrum	طيف كهرومغناطيسي
Gamma rays	أشعّة جاما
X-rays	أشعّة سينية
Ultraviolet rays	أشعّة فوق بنفسجية
Infrared radiation	أشعّة تحت حمراء
Microwaves	موجات الميكروويف
Radio-waves	موجات الراديو
Un-polarized	غير مستقطب
Polarized	مستقطب

الموجات الكهرومغناطيسية

يعدّ الضوء مثالًا على الموجات الكهرومغناطيسية. **الموجة الكهرومغناطيسية Electromagnetic wave** موجة ناتجة من انتشار لمجالين كهربائي ومغناطيسي، يهتزان في اتجاهين متعامدين. كيف يتم إنتاج هذين المجالين؟

بفرض أن شحنة موجبة تهتز صعودًا ونزولًا، فإنها تولّد اهتزازًا في المجال الكهربائي. وتولِّد الشحنة الكهربائية المتحرِّكة (التيار الكهربائي) أيضًا مجالًا مغناطيسيًّا. وبذلك تولِّد الشحنة الكهربائية الموجة المتذبذبة مجالين متذبذبين: كهربائي ومغناطيسي. وأي تغيُّر لأحد هذين المجالين مع الزمن يؤدي إلى تولّد المجال الآخر. يظلّ المجالان الكهربائي والمغناطيسي متعامدين أثناء انتشارهما معًا، ويظلّان مترابطين، ولهما الطور نفسه، حيث يصلان إلى القمم والقيعان في الوقت نفسه (**الشكل 6-31**).



الشكل 6-31 يولِّد المجالان الكهربائي والمغناطيسي المتذبذبان موجة كهرومغناطيسية.

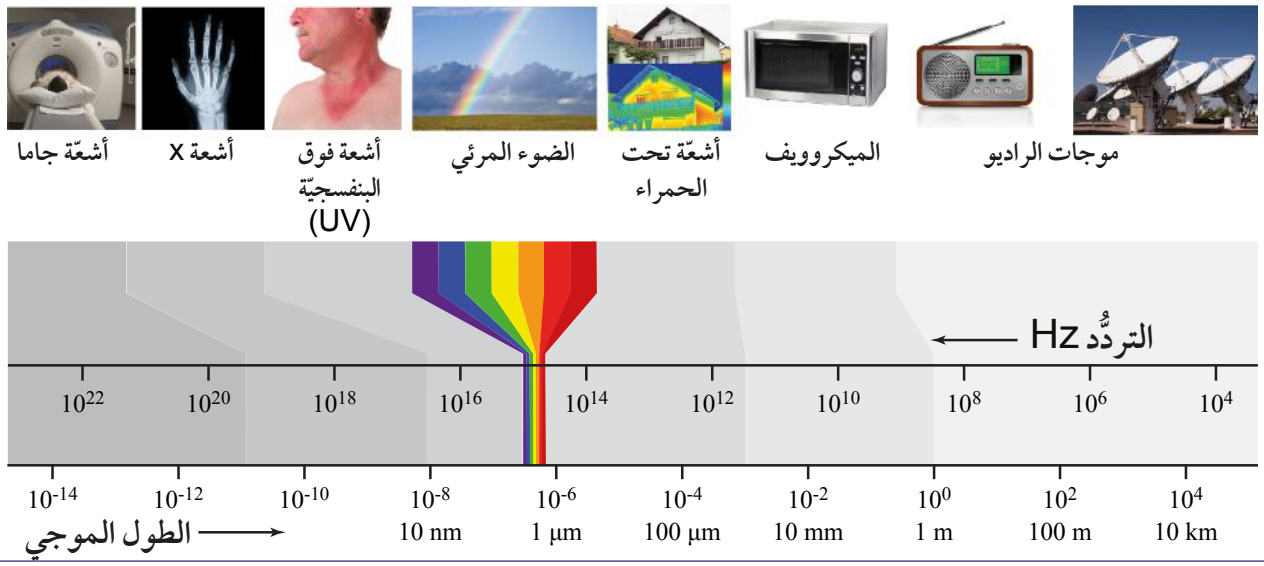
لا تقتصر الموجات الكهرومغناطيسية على الضوء المرئي . فهناك كثير من الموجات غير المرئية ذات الأطوال الموجية المختلفة، مثل أشعّة جاما، والأشعّة تحت الحمراء، وموجات الراديو. تشكِّل كل تلك الموجات طيفًا من الموجات الكهرومغناطيسية، وتحمل طاقة إشعاعية. لذلك يشار إليها **بالأشعّة الكهرومغناطيسية Electromagnetic radiation**.

يشتمل الطيف الكامل للموجات الكهرومغناطيسية على نطاق واسع من التردُّدات والأطوال الموجية والطاقة. ولكنها جميعها تنتقل عبر الفضاء بالسرعة نفسها $c = 3.00\times10^{8}\ m/s$، وهي سرعة الضوء في الفراغ. الموجات الكهرومغناطيسية موجات مُستعرَضة، يمكنها الانتشار في الفراغ.

تنتشر جميع الموجات الكهرومغناطيسية بسرعة الضوء عبر الفراغ.

الطيف الكهرومغناطيسي

يطلق على المدى الكامل للموجات الكهرومغناطيسية اسم **الطيف الكهرومغناطيسي Electromagnetic spectrum** كما في **الشكل 6-32**. يقسم الطيف الكهرومغناطيسي إلى سبع مناطق رئيسة.



الشكل 6-32 الطيف الكهرومغناطيسي.

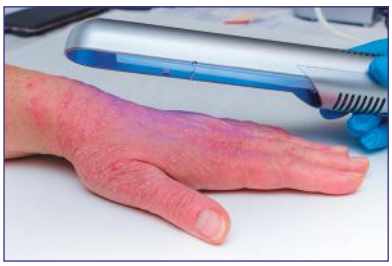
أشعّة جاما ($\lambda < 10^{-12}$ m) والأشعّة السينية (10^{-12} m $< \lambda < 10^{-8}$ m)

تتمثّل الطاقة العُليا للموجات في الطيف الكهرومغناطيسي بطاقة **أشعّة جاما (γ rays)** وبطاقة **الأشعّة السينية (X-rays)** وهما تشكّلان خطرًا على الإنسان إذا تعرّض لهما بجرعات كبيرة. يمكن للأشعّة السينية أن تخترق الجسم، لكن قدرتها غير كافية لاختراق العظام. يمكننا الحصول على صورة للهيكل العظمي من دون الحاجة إلى الجراحة (**الشكل 6-33**). يمكن أن يتتبّع الطبيب حقنة سائل مشع باستخدام PET scan من أشعّة جاما، ويمكنه استخدام الأشعّة السينية CAT scan للحصول على مقاطع ثلاثية الأبعاد للأجزاء الداخلية من جسم المريض.

الشكل 6-33 تصوير للصدر بالأشعّة السينية.

الأشعة فوق البنفسجيّة (10^{-10} m $< \lambda < 10^{-7}$ m)

تعد الأشعة **فوق البنفسجيّة Ultraviolet light** أكثر طاقة من الضوء المرئي، إلا أنّها تُحجب جزئيًّا بواسطة الغلاف الجوي. تمتلك هذه الأشعّة طاقة كبيرة تجعلها أكثر ضررًا لخلايا جلد الإنسان. لذلك يُنصحُ بارتداء واقٍ من أشعّة الشمس في الأيام المشمسة لحماية الجلد. إلا أن نطاقًا ضيقًا من الضوء UV يستخدم لمُعالجة مشكلات جلدية، مثل الأكزيما أو الصدفية. (**الشكل 6-34**).



الشكل 6-34 معالجة الجلد باستخدام الأشعّة فوق البنفسجيّة UV.

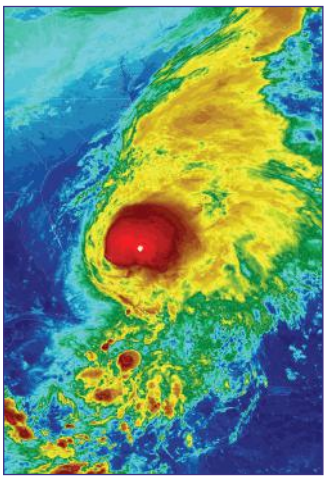
الضوء المرئي

الشكل 6-35 ضوء الشمس يشع من خلال الغيوم.

عندما يتحدث معظم الناس عن الضوء إنما يقصدون عادة الضوء المرئي الذي تراه أعيننا. الضوء المرئي الأبيض هو في الحقيقة مزيج من الألوان الأحمر والأخضر والأزرق.

المصابيح الضوئية والشمس ونجوم أخرى تشع معظم طاقتها الضوئية على شكل ضوء مرئي. كما يُظهر **الشكل 6-35**. تُركِّز مصادر الليزر الضوء المرئي للاستخدامات الطبية والتقنية كما في أجهزة DVD.

الأشعّة تحت الحمراء ($7.4 \times 10^{-7}\ m < \lambda < 10^{-3}\ m$)



الشكل 6-36 صورة لإعصار بالأشعّة تحت الحمراء.

الأشعّة تحت الحمراء Infrared radiation (أو الأشعّة الحرارية) يكون طولها الموجي أطول من الطول الموجي للضوء المرئي، ولكن طاقتها أقلّ. كل جسم في الكون، يطلق عند درجة حرارة معيّنة إشعاعات بمختلف الأطوال الموجية. غير أن معظم الأشعّة التي يطلقها أي جسم تكون من الأشعّة تحت الحمراء. تفيد أجهزة التصوير بالأشعّة تحت الحمراء في الكشف عن التسرّب الحراري في المنزل، وتسهم في خفض استهلاك الطاقة.

تستخدم نظّارات الرؤية الليلية في ساحات المعارك للكشف عن الأشعّة تحت الحمراء الصادرة من أسلحة العدو. أما الأقمار الاصطناعية التي تعمل بالأشعّة تحت الحمراء، والمخصّصة للأحوال الجوية، فهي مزوّدة بأجهزة حسّاسة للكشف عن بخار الماء، حتى خلال الليل كما في **الشكل 6-36**.

موجات الميكروويف ($10^{-3}\ m < \lambda < 1\ m$)

الشكل 6-37 فرن الميكروويف.

تُستعمل موجات **الميكروويف Microwaves** لتسخين الطعام وطهوه، بالنظر إلى قدرتها على نقل الطاقة الحرارية (**الشكل 6-37**)، حيث تمتص جُزيئات ماء الطعام تلك الطاقة الحرارية. تفيد حزم الميكروويف في تكنولوجيا الهواتف الجوالة والرادارات. تكون تردُّدات الميكروويف أعلى من تردُّدات موجات الراديو، ما يجعلها مناسبة لنقل المزيد من البيانات، مقارنة بموجات الراديو.

موجات الراديو ($1\ m < \lambda$)

الشكل 6-38 برج اتصالات الراديو.

تتّسم تردُّدات هذه الموجات بأنها الأقل ترددا في مجموعة الطيف الكهرومغناطيسي. ويُذكَر أن هنريك هرتز Heinrich Hertz كان قد استعان بموجات الراديو لإثبات وجود الموجات الكهرومغناطيسية. تستخدم **موجات الراديو Radiowaves** للاتصالات بواسطة الأقمار الاصطناعية والبث عبر محطّات الإذاعة AM و FM (**الشكل 6-38**). وتستخدم موجات الراديو ذات الطول الموجي الأطول للاتصال بالغوّاصات.

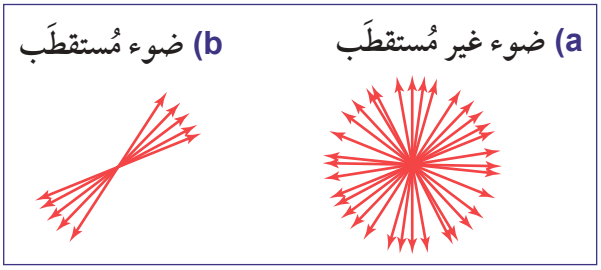
استقطاب الضوء

يتكوّن الضوء، كموجة كهرومغناطيسية، من مجالين كهربائي ومغناطيسي، يهتزان في اتّجاهين مُتعامدين. وبما أن الضوء موجة مُستعرَضة، فإن اتّجاه اهتزاز كل من هذين المجالين يتعامد مع اتّجاه انتشارالضوء. قد يتّخذ اهتزاز المجال الكهربائي المستوى الأفقي، أو المستوى الرأسي أو أي اتّجاه آخر.

عندما يهتز المجال الكهربائي في اتّجاهات عشوائية (الشكل 6-39a) يكون الضوء **غير مُستقطَب**. لكن إذا كانت غالبية الاهتزازات في اتّجاه واحد (الشكل 6-39 b) فيكون الضوء **مُستقطبًا**. **الاستقطاب Polarization** هو خاصّية اهتزاز المجال الكهربائي في اتّجاه ثابت وعمودي على اتّجاه انتشار الموجة.

سؤال للمناقشة

فكِّر في موقف اضطررت فيه إلى إغماض عينيك بسبب وهج الضوء غير المريح



الشكل 6-39 اتّجاه اهتزازات المجال الكهربائي.

طُرق استقطاب الضوء

1. الانعكاس

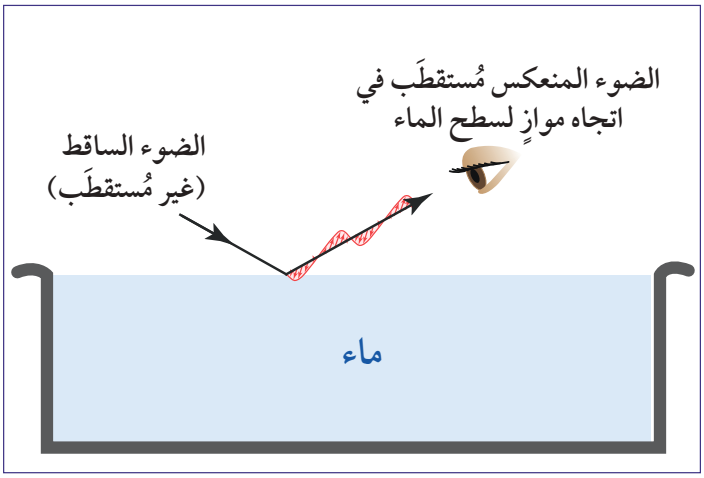
معظم أشكال الضوء المحيطة بنا، بما فيها ضوء المصابيح وضوء الشمس، هي أشكال غير مستقطبة. عندما ينعكس هذا الضوء عن سطح، كالماء أو الثلج أو الرمل النظيف، يصبح مُستقطَبًا في اتّجاه واحد. يسبِّب الضوء المُستقطَب أفقيًّا وهجًا؛ فلا تكون الرؤية عندها مريحة.

2. الاستقطاب باستخدام مرشحات البولارويد

يظهر **الشكل 6-40** كيف أن الضوء المنعكس عن سطح الماء يصبح مُستقطَبًا أفقيًّا (متوازيًا مع السطح الذي انعكس عنه).

عند مشاهدة الضوء المُنعكِس من خلال مرشِّح مستقطِب للضوء عمودي، نلحظ انخفاضًا في الوهج، وتصبح رؤية الاجسام التي تحت الماء أكثر وضوحًا.

يسمح مرشِّح الاستقطاب العمودي فقط بمرور الضوء المستقطب عموديًّا، ويحجب الضوء المستقطب أفقيًّا. وهذا يجعل الرؤية في الخارج واضحة.



الشكل 6-40 الضوء المُنعكِس يصبح أكثر استقطابًا.

تباع أنواع كثيرة من النظّارات الشمسية المزوَّدة بمُرشِّحات الاستقطاب العمودي، لتخفيض وهج الضوء المنعكس. تزيد مُرشِّحات الاستقطاب في آلة التصوير من وضوح الغيوم في السماء.

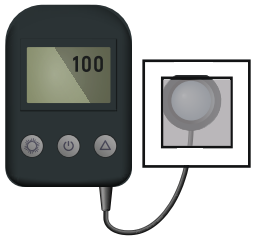
نشاط

3-6 استقطاب الضوء

سؤال الاستقصاء	كيف يؤثِّر مرشِّح مستقطِب في شدّة الإضاءة؟
الموادّ المطلوبة	مرشحان مستقطِبان، حوض ماء، مقياس شدّة الضوء (لوكس ميتر)

الخطوات

1. انظر إلى السماء بالعين المجرَّدة، وأنت في مكان مكشوف.
2. ضع مرشِّح مستقطِب على عينك، وانظر من خلاله. سجِّل أي متغيِّرات.
3. ضع المرشح المستقطِب الثاني فوق الأوَّل ودوّره بزاوية 90°، بحيث يتعامد محوراهما. انظر من خلال المُرشِّحين معًا. سجِّل أي مُتغيِّرات.
4. سجِّل شدّة الإضاءة من دون المرشحين المستقطِبين، مستخدمًا اللوكس ميتر.
5. سجِّل شدّة الإضاءة، عند استخدام مرشِّح مستقطِب واحد.
6. سجِّل شدّة الإضاءة عند استخدام مرشحين مستقطِبين للضوء، عندما يكون محوراهما متعامدَين.



الشكل 6-41 لوكس ميتر مع مُرشِّح بولاروید.

الجدول

	شدّة الإضاءة (lux)
من دون مرشِّحات	
مع مرشِّح مستقطِبٍ واحد	
مع مرشحين مستقطِبين	

أسئلة

a. لِمَ انخفضت شدّة الإضاءة عند إضافة مُرشِّح مستقطِب؟
b. لِمَ تم تدوير المرشِّح الثاني 90°؟ توقّع ما يحدث عند عدم تدوير المرشِّح الثاني 90°.
c. ما الذي تتوقع ملاحظته لو أضفت مرشحًا مستقطِبًا ثالثًا؟ اشرح إجابتك.

تقويم الدرس 3-6

1. صف أحد التطبيقات التكنولوجية المتعلقة بكلّ من الأجزاء الآتية من الطيف الكهرومغناطيسي : الأشعّة السينية، الضوء المرئي، الأشعّة تحت الحمراء، موجات الميكروويف، موجات الراديو.

2. تكون المراقبة الفلكية بتردُّد 1 THz أكثر وضوحًا من الأماكن الأكثر ارتفاعًا، حيث تقلّ نسبة بخار الماء. ما الطول الموجي لتلك الموجة، و إلى أي من مناطق الطيف تنتمي؟

3. كيف يمكن للطبيب أن يستخدم الأشعّة المرئية لتشخيص حالة المريض؟

4. تستطيع الكلاب سماع أصوات يزيد تردُّدها على الأصوات التي يسمعها الإنسان. إذا كان هناك حيوان يستطيع رؤية ضوء بتردُّدات أعلى من تلك التي يراها الإنسان، فأي جزء من الطيف يستطيع أن يرى؟

5. عند استماع الناس إلى المذياع في سيّاراتهم، هل يكون ما يسمعونه هو موجات الراديو؟

6. هل يمكن حجب الضوء كلّيًّا باستخدام زوج من المرشحات المستقطِبة للضوء؟ اشرح ذلك.

7. اذكر طريقتين لاستقطاب الضوء.

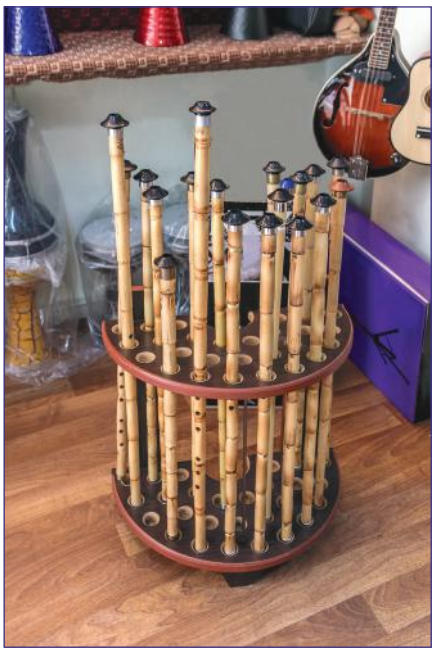
8. سرعة الضوء $c = 3.00\times10^{8}$ m/s. معتمدًا على المسافة الفاصلة بين الأرض ومصادر الضوء المحدَّدة في الجدول الآتي، احسب الزمن الذي يستغرقه وصول الضوء إلينا على الأرض.

المصادر	المسافة(m)	الزمن المُستغرَق (s)	الزمن المُستغرَق (سنوات)
القمر	3.83×10^{8}		
الشمس	1.5×10^{11}		
مجرّة المراة المسلسلة	2.40×10^{24}		
نجم قنطورس الأقرب Proxima Centauri	4.01×10^{16}		

الدرس 6-4
الموجات الموقوفة

آلة الناي من الآلات الشائعة جدًّا في منطقة الشرق الأوسط. فقد انتشرت منذ أكثر من 5000 عام، وكانت أول آلة من نوعها. تتألف آلة الناي من أنبوب مجوّف ومفتوح الطرفين، مصنوع من أعواد القصب. تحتوي مُعظم آلات الناي على سبعة ثقوب، ستة منها للأصابع، وواحد للإبهام. بينما يحتوي الناي الفارسي على ستة ثقوب، خمسة منها للأصابع، وثقب واحد للإبهام.

يتغيّر تردُّد الصوت الذي يصدره الناي وفقًا للثقب الذي يُترَك مفتوحًا خلال العزف. التردُّد الأساسي هو أقلّ تردُّد ممكن لناي معيّن ويبقى ثابتًا. يمكن الحصول على مضاعفات للتردُّد الأساسي من خلال رفع إحدى الأصابع عن الثقوب المختلفة للناي.



الشكل 6-42 مجموعة من آلات الناي.

مخرجات التّعلُّم

P1120.1 يميّز بين الموجات الموقوفة والموجات المستمرة ويصف المقصود بمصطلحي «العقدة» و «البطن».

P1120.2 يصف كيفية إنتاج النغمات التوافقية وعلاقة تردُّد وصوت النغمات التوافقيّة بالتردُّد الأساسي.

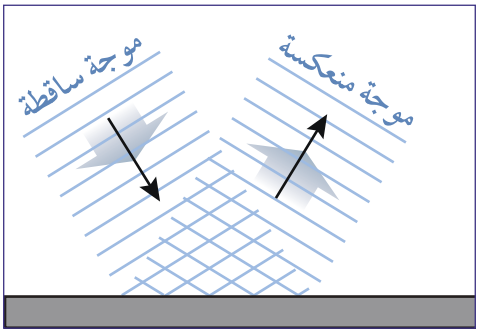
P1120.3 يمثّل ظاهرة الرنين اعتمادًا على اهتزاز الأوتار المشدودة والأعمدة الهوائيّة بالتحديد.

المفردات

Boundary	حَدّ
Open boundary	حدّ مفتوح
Closed boundary	حدّ مغلق
Reflection	إنعكاس
Boundary condition	شرط حَدّي
Standing wave	موجة موقوفة
Node	عقدة
Anti-node	بطن
Fundamental frequency	تردُّد أساسي
First harmonic	نغمة توافقية أولى
Resonance	رنين

الحدود والانعكاس

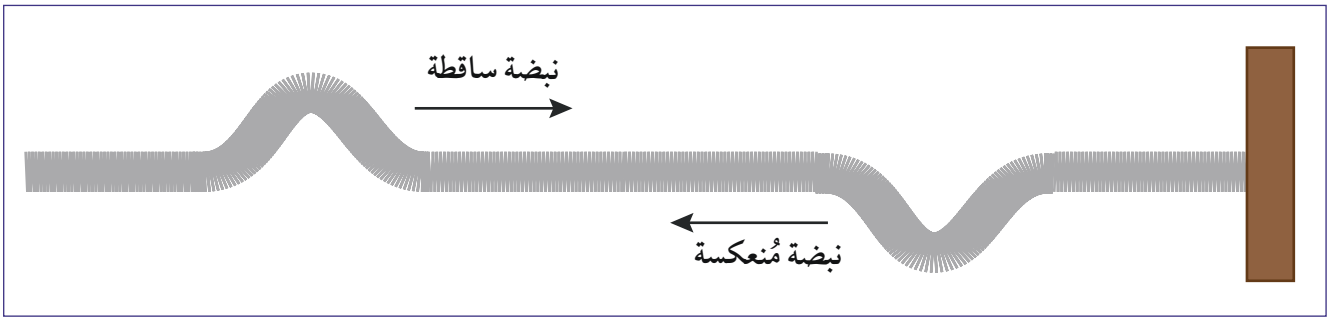
الحدّ Boundary هو فاصلٌ بين وَسطَين مختلفين لهما صفات مختلفة. وأحد أمثلة الحدود هو حائط الغرفة. فهو فاصل بين الهواء ووسط آخر كالخرسانة أو الخشب. ويمكن اعتبار طرف زنبرك طويل حدًّا فاصلًا للموجات على الزنبرك، لأنه يفصلها عن وَسَطٍ آخر.



الشكل 6-43 الانعكاس عن حَدٍّ ثابت.

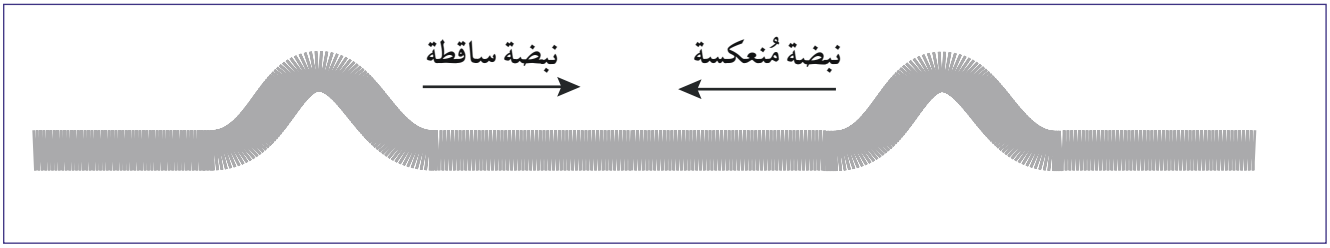
يمكن للموجة أن تنعكس عند وصولها إلى حدٍّ ما. و**الانعكاس Reflection** هو تغيُّر في اتِّجاه انتقال الموجة يصاحب تغيُّرًا في شكل جبهتها واتِّجاه انتشارها. يوضِّح **الشكل 6-43** انعكاس موجة عن حَدٍّ يفصل بين الهواء وجدار صُلب. تنعكس الموجة المستوية كموجة مستوية أخرى تنتشر في اتجاه آخر.

يعتمد نوع الانعكاس عند حد معيّن على كون هذا الحد مغلقًا أو مفتوحًا. الحد المُغلق (الثابت) لا يتحرّك مع وصول الموجة. ومن الأمثلة على **الحد المغلق Closed boundary**، طرف الزنبرك المثبت في الباب، أو الموجة الصوتية المنعكسة عن جدار صلب. يُظهر **الشكل 6-44** نبضة موجية منعكسة مقلوبة عن الجانب الآخر لزنبرك عند طَرَفِه الثابت.



الشكل 6-44 انعكاس نبضة عن حد ثابت.

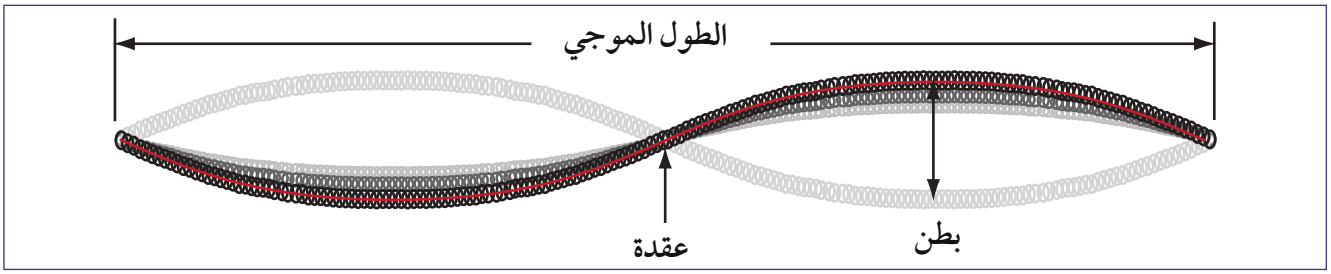
يُعتَبر الطرف الحُر للنابض **حدًّا مفتوحًا Open boundary**. حيث يتحرَّك الطرف الحر عند وصول الموجة المنتقلة إليه. يختلف الانعكاس عند حد مفتوح عن الانعكاس عند حَد مغلق. حيث تنعكس النبضة الموجية كما هي (معتدلة) عندما تواجه حّدًا مفتوحًا، كما هو مبيّن في **الشكل 6-45**، من دون أي تغيُّر في الطور.



الشكل 6-45 انعكاس نبضة عند حد مفتوح.

الموجات الموقوفة

عند انعكاس الموجة المُنتقلة عن حدّ معين، فإنها تتداخل مع الموجة الأصليّة. يمكن للتداخُل البنّاء بين الموجة الساقطة والموجة المنعكسة أن ينتج موجات موقوفة. **الموجة الموقوفة Standing wave** هي اهتزاز للنظام تبقى فيه بعض النقاط (العُقَد) ثابتة، بينما تهتز نقاط أخرى في منتصف المسافة بين عقدتين بِسِعَة قصوى (بُطُون). تتكوّن الموجات الموقوفة نتيجة تداخُل موجتين لهما نفس السعة والطول الموجي والتردُّد، لكنهما تسيران في اتجاهين متعاكسين.

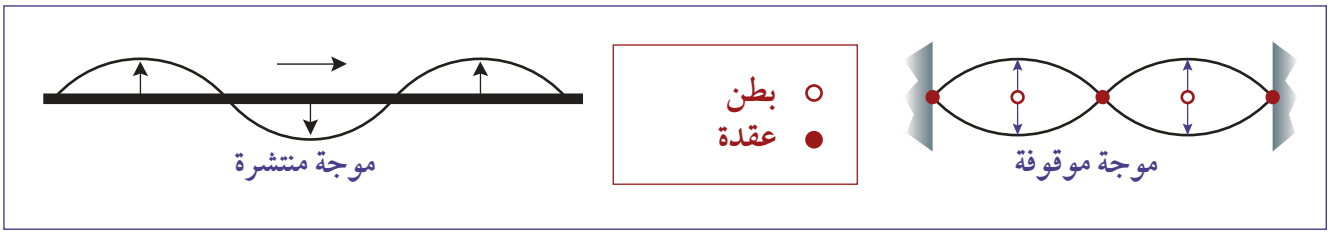


الشكل 6-46 موجة موقوفة في زنبرك.

يُظهر **الشكل 6-46** موجة موقوفة في زنبرك، حيث طول الزنبرك يساوي طول الموجة. **العُقدة Node** هي النقطة التي تكون سعة اهتزازها صفرًا، و**البطن Antinode** هو النقطة التي تهتز بأقصى سعة.

الجدول 6-1 مقارنة الموجات الموقوفة بالموجات المستمرة.

الموجات الموقوفة	الموجات المستمرّة
العُقد والبطون تبقى ثابتة في مواقعها.	القمم والقيعان تنتشر بسرعة الموجة.
تنشأ نتيجة الانعكاس عند حدّ ما.	تنتقل دائمًا من دون حدود.
طاقة الموجة تبقى ثابتة في مكانها.	طاقة الموجة تنتقل مع الموجة.



الشكل 6-47 لا تنتقل عقد وبطون الموجة الموقوفة، بينما تنتقل قمم وقيعان الموجة المستمرّة بسرعة الموجة نفسها.

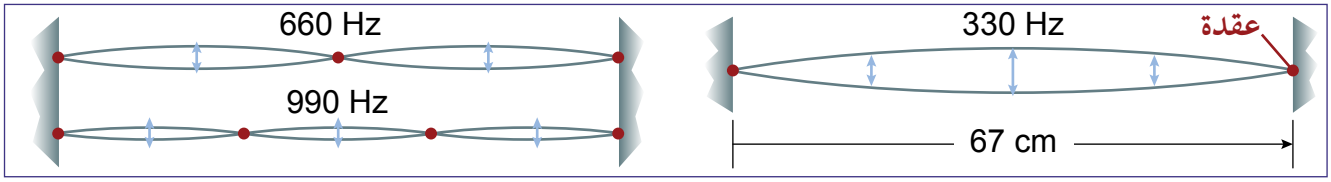
هناك العديد من الأمثلة على الموجات الموقوفة في الطبيعة والتكنولوجيا. وعلينا أن نفهم فكرتين أساسيتين حول الموجات الموقوفة:

1. تنشأ الموجات الموقوفة من الانعكاس عند حدّ معيّن. ومعظم الموجات التي تُحتجز بين حَدّين انعكاسيين يمكن أن تشكل موجة موقوفة.
2. تحتوي الموجة الموقوفة على طاقة تبقى في مكانها، وتتركّز حول تردُّد الموجة الموقوفة.

التردُّد الطبيعي

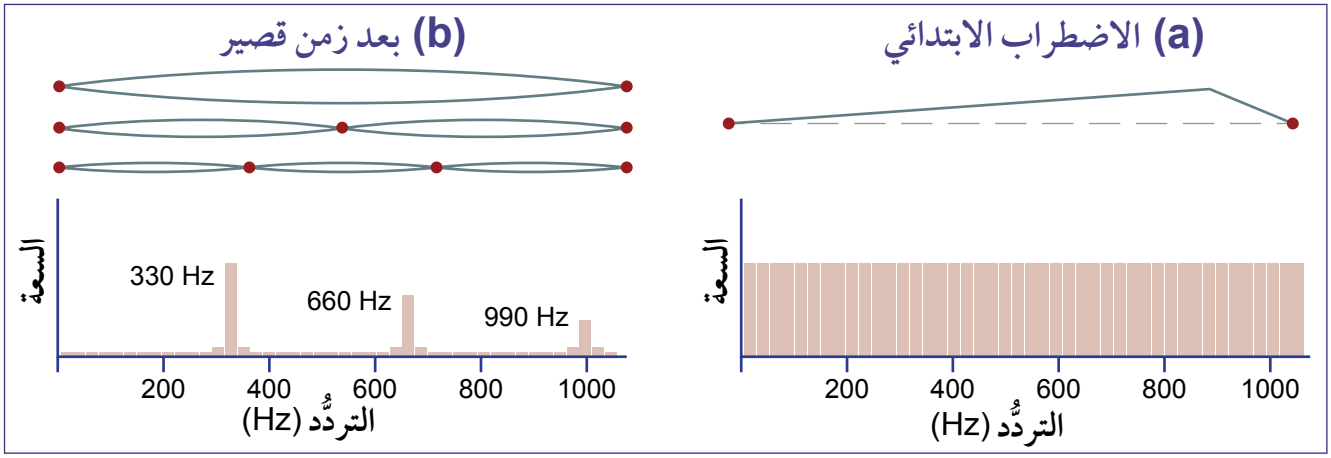
توضّح الموجات الموقوفة فكرة مهمّة، وهي أن لكل نظام تردُّدًا معيّنًا يميل إلى الاهتزاز تحت تأثيره. يُسمّى التردُّد الذي يميل النظام إلى الاهتزاز وفقه، **بالتردُّد الطبيعي Natural frequency**. إذا أُحْدَثَتَ اضطرابًا في خيط، فإنه سيهتز اهتزازًا سريعًا بتردُّده الطبيعي. يتحدّد التردُّد الطبيعي بواسطة الجسم والشروط الحدّية. فإذا افترضنا، على سبيل المثال، سلكًا فولاذيًّا طوله 67 cm وقوة شَدّه 72 N وقمنا بالضرب عليه، فإنه يهتز بتردُّد 330 Hz لسببين:

1. العلاقة بين الطول الموجي والتردُّد ($v = f\lambda$).
2. يكون للموجة ذات التردُّد 330 Hz طول موجيّ يحقّق الشروط الحدّية لوجود عقدة عند كل طرف من طرفَي السلك.



الشكل 6-48 الترددات الطبيعية لسلك مثبّت من الطرفين.

لمعظم الأجسام أكثر من تردُّد طبيعي. **النمط Mode** هو طريقة معيَّنة للاهتزاز بالتردُّد الطبيعي لجسم. يُظهر **الشكل 6-48** الأنماط الثلاثة الأولى لسلك مهتزّ. يُسمّى أقلّ هذه الترددات **بالتردُّد الأساسي Fundamental frequency** وله عقدتان فقط، واحدة عند كل طرف. ويكون للنمط الثاني الذي يكون تردُّده مِثْلَي التردُّد الأساسي عقدتان عند طرفي السلك وواحدة في منتصفه. أما النمط الثالث، فله أربع عقد ويكون تردُّده ثلاثة أمثال التردُّد الأساسي.

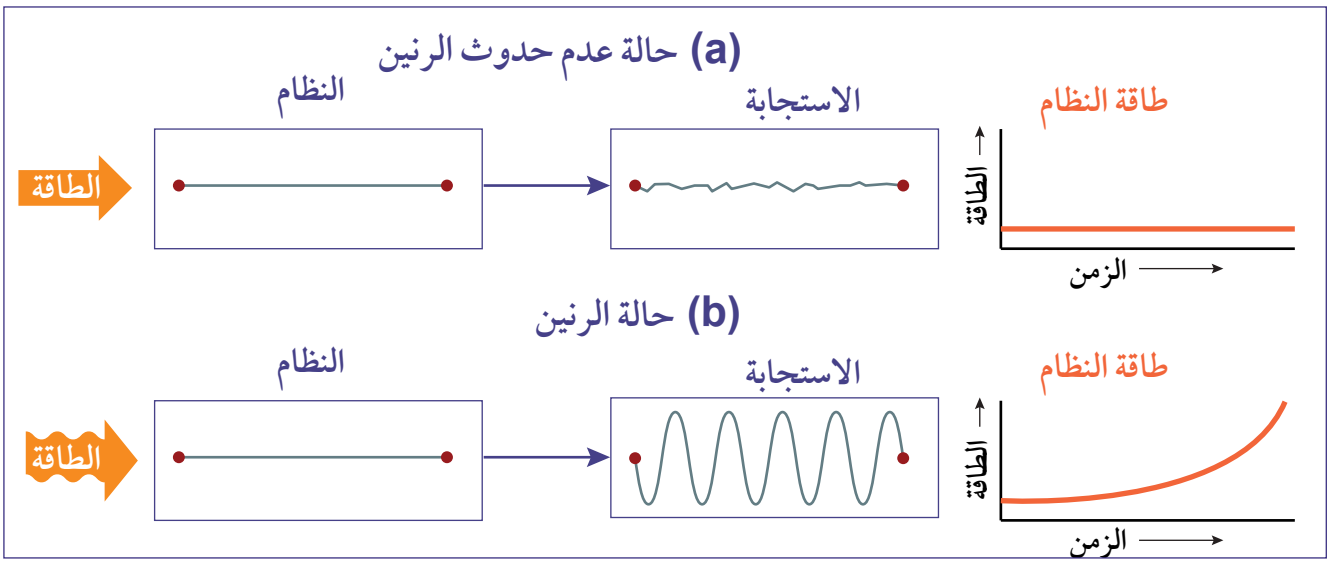


الشكل 6-49 الترددات غير التردُّد الأساسي تتضاءل بسرعة.

نلاحظ من خلال التجربة أن السلك يهتز بترددّاته الطبيعية، بغض النظر عن الطريقة التي نُحدث فيها الاهتزاز الابتدائي. ولفهم ذلك، افترض اهتزازًا ابتدائيًا يشتمل على عدّة ترددّات كما في **الشكل 6-49a**. يؤدّي الاحتكاك وحركة السلك إلى تلاشٍ سريع لكلّ الترددّات ما عدا الترددّات الطبيعية. وبعد زمن قصير لا يبقى سوى اهتزازات التردُّد الطبيعي، كما في الشكل **الشكل 6-49b**.

الرنين

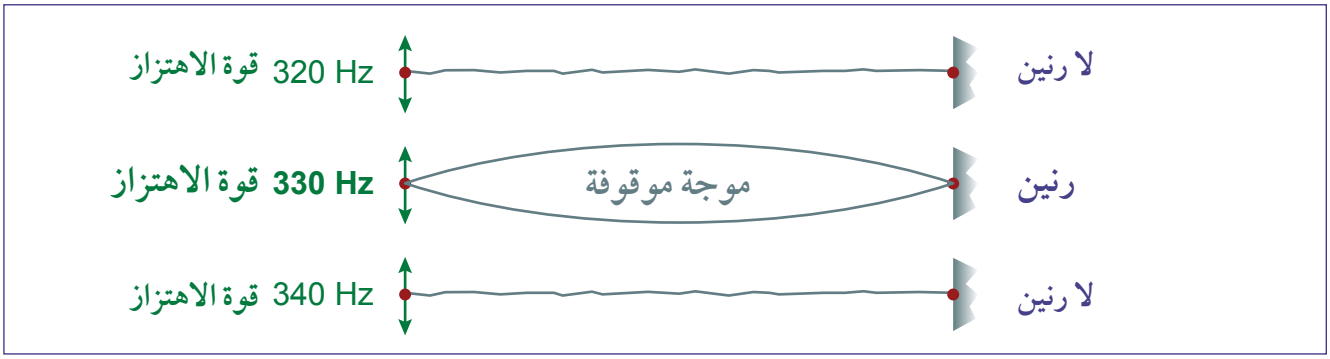
الموجات الموقوفة نوع من أنواع الرنين. والرنين **Resonance** هو تضخيم طبيعي لسعة الاهتزاز يحدث لدى تزويد النظام بطاقةٍ عند تردُّد يساوي تردُّده الطبيعي. تزداد كفاءة النظام الخاضع للرنين في امتصاص الطاقة، وتزداد سعة اهتزازه بسرعة (**الشكل 6-50**).



الشكل 6-50 الطاقة والرنين.

يؤثِّر الرنين بشكل فعّال في طاقة الموجات. يحافظ الرنين على طاقة الموجات عند تردُّدات معيَّنة بينما تتضاءل سِعات التردُّدات الأخرى إلى الصفر بسرعة. كل موجة نصادفها في حياتنا اليومية، بما فيها الموجات الضوئية أو الصوتية أو موجات الأرض أو موجات الراديو، تأخذ شكلها وفق الرنين. ومعظم التقنيات الحديثة، كفرن الميكروويف والآلات الموسيقية والتصوير بالرنين المغناطيسي (MRI) تستخدم الرنين.

ولملاحظة الرنين، نطبّق قوة اهتزازية على نظام قابل للاهتزاز، كالخيط المشدود مثلًا. تؤمِّن القوة الاهتزازية طاقة داخلة للجسم المهتزّ. عندما يتطابق تردُّد القوة الاهتزازية مع التردُّد الطبيعي للجسم، تَنتُج موجة موقوفة ذات سعة عالية (**الشكل 6-51**). لا نحصل على هذه الموجة الموقوفة إذا لم يكن التردُّد الداخل مساويًا للتردُّد الطبيعي للجسم.

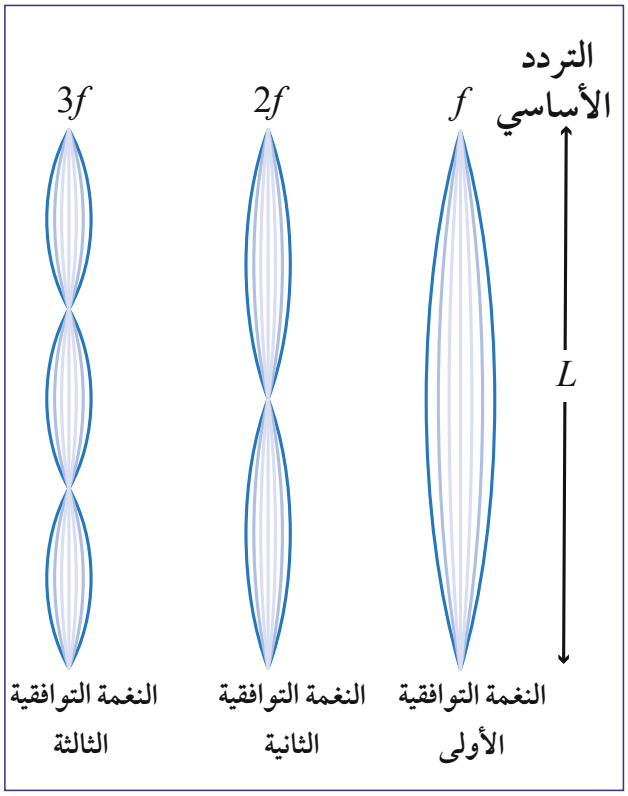


الشكل 6-51 ملاحظة الرنين في الخيط المشدود.

الموجات الموقوفة في الأوتار المهتزّة

يُعتبر الوتر المهتزّ مثالًا جيدًا على الأنظمة الرنّانة. يحدث الرنين في الوتر المهتز بين حَدّين ثابتين عندما يكون طول الوتر من مضاعفات نصف الطول الموجي (**الشكل 6-52**).

- تُسَمّى الموجة الموقوفة ذات التردُّد الأقلّ f (الأساسي) **بالنغمة التوافقية الأولى First harmonic**.
- للنغمة التوافقية الثانية تردُّد يساوي مِثلي تردُّد النغمة التوافقية الأولى أي $2f$.
- للنغمات التوافقية الأعلى تردُّدات nf حيث n عدد صحيح. فتردُّد النغمة التوافقية الثالثة، على سبيل المثال، يساوي $3f$.



الشكل 6-52 الموجات الموقوفة على وتر.

افترض وترًا طوله L، بتردُّد النغمة التوافقية الأولى (**الشكل 6-52**). طول الوتر في هذه الحالة فإن الطول الموجي يساوي مثلي طول الوتر المهتز أي $\lambda_1 = 2L$.

في أي نمط من أنماط الرنين يكون طول الوتر من مضاعفات نصف الطول الموجي. إذا اهتز الوتر بالنغمة التوافقية الثالثة يكون طوله مساويًا لثلاثة أنصاف الطول الموجي. وبناء على ذلك يكون $\lambda_3 = \frac{2}{3}L$. في الحالة العامة يكون الطول الموجي لأي نمط كما في **العلاقة 6-5**.

5-6 **الطول الموجي للموجة الموقوفة في وتر مهتز**

$$\lambda_n = \frac{2L}{n}$$

λ_n	الطول الموجي (m)
L	طول الوتر (m)
n	رتبة النغمات التوافقية $n = 1, 2, 3, \ldots$

مثال 8

تكونت موجة موقوفة في وتر مثبت النهايتين، حيث تردد النغمة التوافقية الرابعة يساوي 16 Hz. إذا كانت سرعة الموجات في الوتر تساوي 12 m/s ، فاحسب كلاً من:

a. الطول الموجي.

b. طول الوتر.

المطلوب: $\lambda = ? \ , L = ?$.

المعطيات: $f_4 = 16 \text{ Hz} \ , v = 12 \text{ m/s}$

العلاقات: $\lambda_n = \frac{2L}{n}$

الحل:

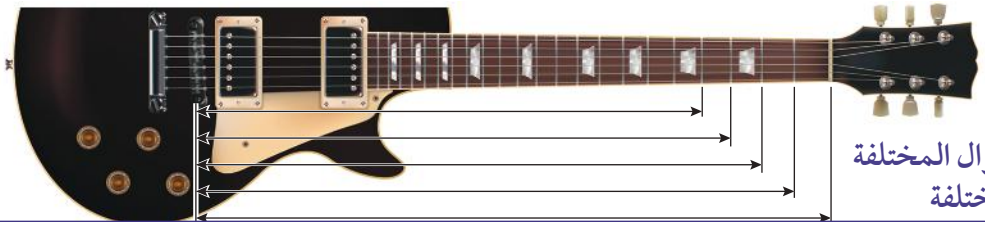
a. لحساب الطول الموجي:

$$\lambda_4 = \frac{v}{f_4} = \frac{12}{16} = 0.75 \text{ m}$$

b. لحساب طول الوتر:

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \rightarrow \lambda_4 = \frac{2L}{4} \rightarrow L = \frac{4 \times 0.75}{2} = 1.5 \text{ m}$$

في العديد من الأنظمة، كما في حالة الآلات الموسيقية، يتعيَّن أن نحصل على تردُّد مُعيَّن. يحدث ذلك بضبط الطول الموجي للجسم الرنّان. فالأطوال المختلفة للأجسام المهتزّة لها تردُّدات رنين مختلفة. يُطبَّق هذا المبدأ على مختلف الآلات الموسيقية، كالعود والقانون والكمان والجيتار.



الشكل 6-53 يتم ضبط تردد الجيتار بتغيير طول وتره المهتز.

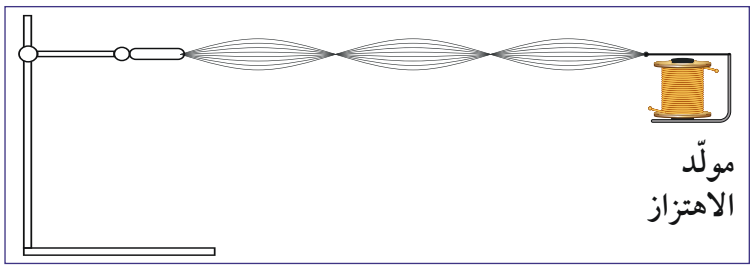
نشاط

4-6 توليد الموجات الموقوفة

سؤال الاستقصاء	دراسة وبحث العلاقة بين سرعة الموجة والطول الموجي.
الموادّ المطلوبة	وتر مطاطي (0.5 m)، مولّد إشارة، مولّد اهتزازات، أسلاك توصيل، حامل بملاقط

الخطوات

1. اربط مولّد الإشارة بمولّد الاهتزاز مُستخدمًا أسلاك التوصيل. قم بربط أحد طَرَفي الوتر المطاطي مع مولّد الاهتزاز.
2. قم بشدّ الوتر المطاطي، حيث يصبح طوله 1 m، ثمّ ثبّت نهايته بملقط الحامل (قد تحتاج إلى تثبيت الحامل بالطاولة بواسطة ملقط).
3. زدْ تردُّدات مولّد الإشارة ببطء بدءًا بـ 10 Hz، حتى تشكّل النغمة التوافقية الأولى. سجّل التردُّد في الجدول المُعطى.
4. زدِ التردُّد مرَّة جديدة حتى تشكّل النغمة التوافقية الثانية. سجّل التردُّد.
5. كرّر التجربة لإيجاد النغمة التوافقية الثالثة، ثمّ سجِّلها.



الشكل 6-54 الوتر المطاطي مربوط بمولّد الاهتزاز.

الجدول

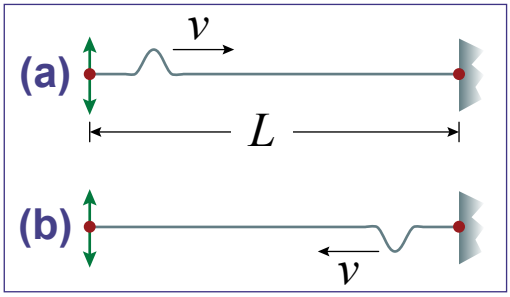
	التردُّد f(Hz)	الطول الموجي λ(m)	السرعة v (m/s)
النغمة التوافقية الأولى			
النغمة التوافقية الثانية			
النغمة التوافقية الثالثة			

أسئلة

a. أكمل الحسابات لملء الجدول السابق.
b. احسب التردُّد الأساسي إذا كان طول الوتر ضعفي ما هو عليه.

الطول الموجي في الأوتار المهتزة

لنفرض أن أحد طرفَي الوتر قد اهتز بسعةٍ صغيرة. يُطلِق مصدر الاهتزاز موجة تصل إلى طرف الوتر الثابت ثم تنعكس عنه (**الشكل 6-55a**). يحدث الرنين عندما تتراكب الموجة المُنعكِسة مع الموجة التالية التي يُطلِقها المصدر. يلزم الموجة زمن T لتقطع المسافة $2L$ ذهابًا وإيابًا على الوتر (**الشكل 6-55b**).



الشكل 6-55 سرعة الموجة.

$T = \frac{2L}{v}$، لكن $v = \lambda f$ و $f = \frac{1}{T}$

بالتعويض نحصل على:

$$T = \frac{2L}{v} = \frac{2L}{\lambda f} \rightarrow \frac{1}{f} = \frac{2L}{\lambda f}$$

$$1 = \frac{2L}{\lambda} \rightarrow \lambda = 2L$$

وهو الطول الموجي الأساسي للرنين.

مثال 9

يتم تجهيز موجة موقوفة في وتر ذي نهايتين مثبتتين، حيث تردُّد النغمة التوافقية الأولى هو 140 Hz. تبلغ سرعة انتقال الموجات في الوتر 230 m/s، وسرعة الصوت في الهواء 340 m/s.

a. احسب طول هذا الوتر.

b. احسب الطول الموجي للصوت المتولِّد.

المطلوب: **a.** طول الوتر L.

b. الطول الموجي للصوت λ

المُعطيات: التردُّد، $f = 140$ Hz

سرعة الموجة على الوتر، $v_1 = 230$ m/s

سرعة الصوت في الهواء، $v_2 = 340$ m/s

العلاقات: $v = f\lambda$ ؛ $\lambda_n = \frac{2L}{n}$.

الحل: **a.** لحساب طول الوتر، نحسب الطول الموجي للنغمة التوافقية الأولى:

$$v = f\lambda \Rightarrow \lambda = \frac{v}{f} = \frac{230}{140} \quad 1.64 \text{ m}$$

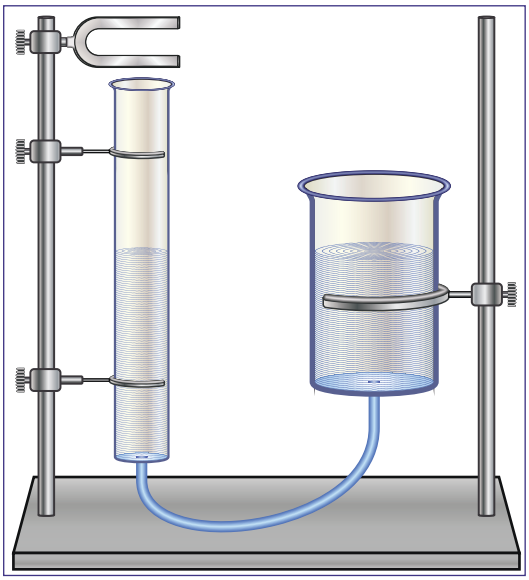
باستخدام الطول الموجي المحسوب، نجد طول الوتر:

$$\lambda_1 = 2L \Rightarrow L = \frac{\lambda_1}{2} = \frac{1.64}{2} \quad \boxed{0.82 \text{ m}}$$

b. تردُّد الصوت المتولِّد هو تردُّد الوتر نفسه. فيكون الطول الموجي:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{340}{140} = \boxed{2.43 \text{ m}}$$

الموجات الموقوفة في الأعمدة الهوائية

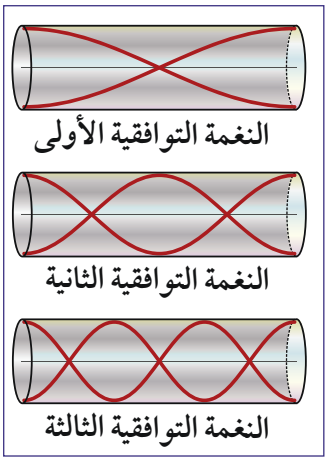


الشكل 6-56 رنين الأنبوب.

مزمار الرنين آلة يمكن استخدامها لتوليد موجة موقوفة في عمود هوائي (**الشكل 6-56**). إذا اهتزّت شوكة رنانة موضوعة أعلى أنبوب فيه ماء، ستدفع الهواء في الأنبوب على الاهتزاز بتردُّد الشوكة الرنانة نفسه. سوف يحدث الرنين فقط إذا كانت الشوكة الرنانة تهتز عند أحد التردُّدات الطبيعية لعمود الهواء داخل الأنبوب. على الرغم من ذلك، يمكن تغيير التردُّد الطبيعي لعمود الهواء داخل الأنبوب. إذا ارتفع مستوى الماء داخل حجرة الرنين، يقلّ طول عمود الهواء داخل الأنبوب، وبالتالي يقل معه الطول الموجي، فيزداد التردُّد المطلوب للرنين.

وكما هي الحال في الأوتار، يسبّب الرنين إحداث الموجات الموقوفة في الأعمدة الهوائية. قد يمتلك المزمار أو عمود الهواء نهايتين مفتوحتين، أو نهاية مفتوحة والأخرى مُغلقة.

الرنين في الأعمدة الهوائية المفتوحة



الشكل 6-57 عمود هوائي بنهايتين مفتوحتين.

ليكن لدينا عمود هوائيّ مفتوح الطرفين طوله L. إذا تكوّنت موجة موقوفة فيه، يتشكّل بطنان عند الطرفين وعقدة في الوسط. يتشكّل البطنان ما دام طرفا الأنبوب مفتوحين. يُظهر **الشكل 6-57** نغمات توافقية مُتشكِّلة في العمود. لا تهتز الجُزيئات الموجودة عند عُقَد الموجة، بينما تكون الجُزيئات الأكثر اهتزازًا هي التي تقع عند البطون.

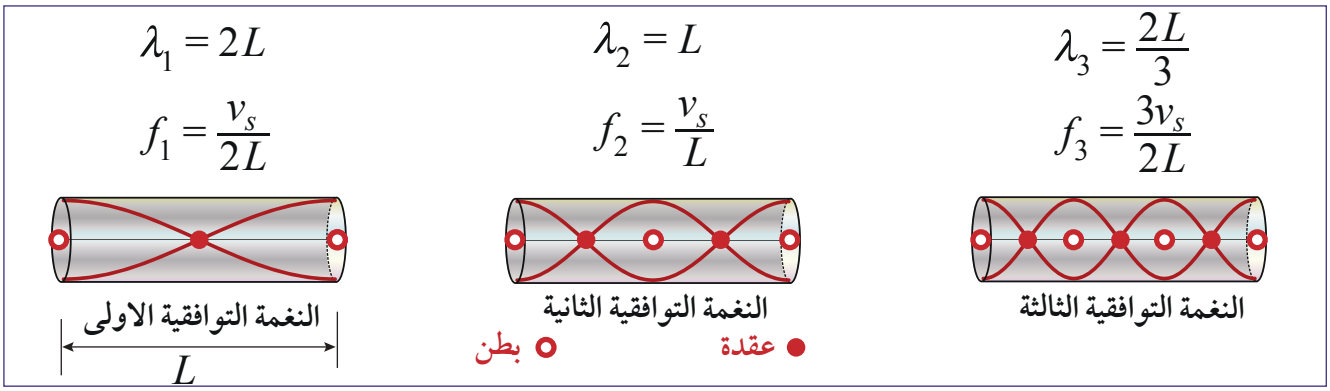
تُظهر النغمة التوافقية الأولى، طولًا موجيًّا يساوي 2L. ويحدث ذلك حين تهتز الموجة داخل العمود عند التردُّد الأساسي. ويتشكّل نصف الموجة فقط على طول العمود.

يحدث ذلك أيضًا في النغمة التوافقية الأولى التي تحدث في الوتر ذي الطرفين الثابتين، على الرغم من أن شكل التوافقية مُختلف. تتألَّف النغمة التوافقية الأوّلى في العمود ذي الطرفين المفتوحين من بطنين وعقدة واحدة. تُظهر النغمة التوافقية الثانية طولًا موجيًّا يساوي 1L، وتتألَّف الموجة من 3 بطون وعقدتين. تمتلك النغمة التوافقية الثالثة طولًا موجيًا يساوي $\frac{2L}{3}$، وتتألَّف الموجة من 4 بطون و 3 عُقد، وهكذا. وبما أنّ شرطي التردُّد والطول الموجي في العمود ذي الطرفين المفتوحين هو نفسه في حالة الوتر ذي الطرفين الثابتين، سوف تكون المعادلة المُستخدمة لحساب الأطوال الموجية هي نفسها.

الشروط الحدّية في الأعمدة الهوائية المفتوحة

الأنابيب ذوات الأطراف المفتوحة أو المغلقة هي أمثلة على الشروط الحدّية، وهي قيود على الموجة عند الحدود. فالموجة المحصورة في عمود تملك شرطين حدّيّين، واحد عند كل طرف.

1. يتطلّب شرط الحد المفتوح وجود بطن للموجة الموقوفة عنده لحدوث حالة الرنين.
2. يتطلّب شرط الحدّ المُغلق وجود عُقدة للموجة الموقوفة عنده لحدوث حالة الرنين.



الشكل 6-58 الأطوال الموجية لموجة موقوفة في مزمار مفتوح الطرفَين.

6-6	الطول الموجي والتردد في الموجات الموقوفة لعمود مفتوح الطرفين		
	$\lambda_n = \frac{2L}{n}$	$f_n = \frac{nv_s}{2L}$	
		λ_n	الطول الموجي (m)
		f_n	التردُّد (Hz)
		n	رتبة النغمة التوافقية، n = 1، 2، 3، ...
		v_s	سرعة الصوت (343 m/s)
		L	طول عمود الهواء (m)

مثال 10

احسب التردُّدات الأربعة الأولى لعمود هوائي طوله 0.5 m داخل مزمار مفتوح الطرفين، عندما يكون المزمار في حالة رنين.

المطلوب: التردُّدات الأربعة

العلاقات:

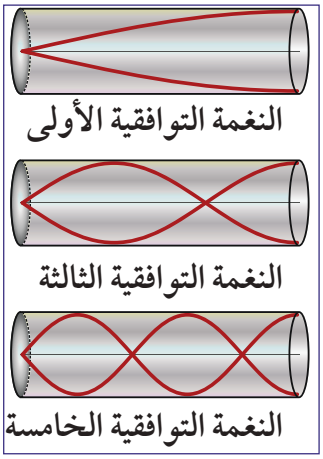
$$f_n = \frac{nv_s}{2L}$$

الحل: باستخدام العلاقة:

$$f_1 = \frac{(343 \text{ m/s})}{2(0.5 \text{ m})} = 343 \text{ Hz} \quad f_2 = \frac{(2)(343 \text{ m/s})}{2(0.5 \text{ m})} = 686 \text{ Hz}$$

$$f_3 = \frac{(3)(343 \text{ m/s})}{2(0.5 \text{ m})} = 1029 \text{ Hz} \quad f_4 = \frac{(4)(343 \text{ m/s})}{2(0.5 \text{ m})} = 1372 \text{ Hz}$$

الرنين في الأعمدة الهوائية المغلقة



الشكل 6-59 عمود هوائي بطرف مُغلق.

نفترض عمودًا طوله L مفتوح عند أحد طرفَيه ومُغلق عند الطرف الآخر. تنطلق موجة صوتية عند الطرف المفتوح، فتصل إلى الطرف المغلق وتنعكس عنه، مولّدةً بذلك رنينًا. يحدث الرنين فقط إذا كان تردُّد الصوت الأصلي مساويًا لمضاعفات التردُّد الأساسي للعمود. لا يحدث اهتزاز للجُزيئات عند الطرف المُغلق للعمود، فتتشكّل عُقدة. لكن، عند الطرف المفتوح للعمود، يحدث أكبر اهتزاز للجُزيئات ويتشكّل بطن.

يُظهر **الشكل 6-59** أول ثلاث نغمات توافقية ممكنة، عندما يكون أحد طرفي العمود مغلقًا. وبما أنّ النغمة التوافقية الأولى لها عُقدة عند أحد الطرفين وبطن عند الطرف الآخر، يكون طول العمود ربع الطول الموجي أي: $L = \frac{\lambda_1}{4}$.

لاحظ أن لا وجود للنغمتين التوافقيتين الثانية والرابعة، بل توافقيات فردية في العمود ذي الطرف المُغلق الواحد. يكون طول التوافقية الثالثة $\frac{3}{4}$ الطول الموجي، أي: $L = \frac{3\lambda_3}{4}$.

وبشكل مشابه، يكون عند التوافقية الخامسة $L = \frac{5\lambda_5}{4}$، والصورة العامّة تُعطى في **المعادلة 6-7**.

7-6 الطول الموجي والتردد في الموجات الموقوفة لعمود هوائي مغلق

$$f_n = \frac{nv_s}{4L} \qquad \lambda_n = \frac{4L}{n}$$

λ_n	الطول الموجي (m)	
f_n	التردُّد (Hz)	
n	رتبة النغمة التوافقية، n = 1، 3، 5، ...	
v_s	سرعة الصوت (343 m/s)	
L	طول عمود الهواء المغلق (m)	

في العمود الهوائي المغلق، تتشكّل فقط نغمات توافقية فردية (n=1,3,5,7....)

مثال 11

ما نسبة الطول الموجي للنغمة التوافقية الأولى على الطول الموجي للنغمة التوافقية التالية لعمود هوائي ذي طرف مغلق.

المطلوب نسبة الطول الموجي، $\frac{\lambda_1}{\lambda_3}$

العلاقات $\lambda_n = \frac{4L}{n}$;

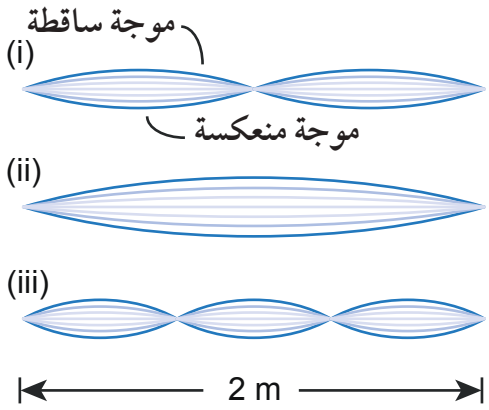
الحل باستخدام العلاقة:

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_3} = \frac{4L}{1} \times \frac{3}{4L} = \frac{3}{1}$$

الطول الموجي للنغمة التوافقية الأولى هو 3 أمثال الطول الموجي للنغمة التوافقية الثالثة.

تقويم الدرس 6-4

1. وقف صديقان عند طرفَيْ حبل طوله 2 m. قام أحدهما بهز الطرف الذي وقف عنده بشكل متكرّر إلى الأعلى والأسفل بعدة سنتيمترات. وبهزّ الحبل بعدة تردُّدات مختلفة، قام بتوليد الأنماط الثلاثة الظاهرة في الشكل المجاور.



   a. ما الطول الموجي للموجة في النمط (i).
   b. لنفترض أنّه أكمل حركة يد كاملة من الأعلى إلى الأسفل وبالعكس خلال نصف ثانية (0.5 s) حتى يتمكّن من توليد النمط (i). ما الزمن الدوري لتلك الموجة وما تردّدها وسرعة انتقالها؟
   c. قام بعد ذلك بتوليد النمط (ii). ما الذي تضاعف: الطول الموجي أم التردُّد؟
   d. في النمط (iii)، كم عدد الأطوال الموجية المحصورة بين طرفَي الحبل؟
   e. أي من الأنماط يمثّل التردُّد الأساسي لاهتزاز الحبل؟
   f. كم عدد العُقد والبطون الظاهرة في كل نمط من أنماط الموجة الموقوفة المبيّنة في الشكل السابق؟

2. ما العلاقة بين عدد العُقد وعدد البطون في موجة موقوفة على وتر مشدود وثابت الطرفين؟

3. قمنا برش مسحوق داخل أنبوبٍ أحد طرفيه مُغلق والآخر مفتوح. وُضع مصدر للصوت بتردُّد 3,000 Hz أمام الطرف المفتوح للأنبوب، فتجمّع المسحوق على شكل أكوام تفصل بينها مسافة 5.5 cm.
   a. احسب الطول الموجي للموجة الناتجة.
   b. احسب سرعة الصوت.

4. احسب التردُّد الأساسي لمزمار مفتوح الطرفين، إذا كان طول المزمار 85 cm.

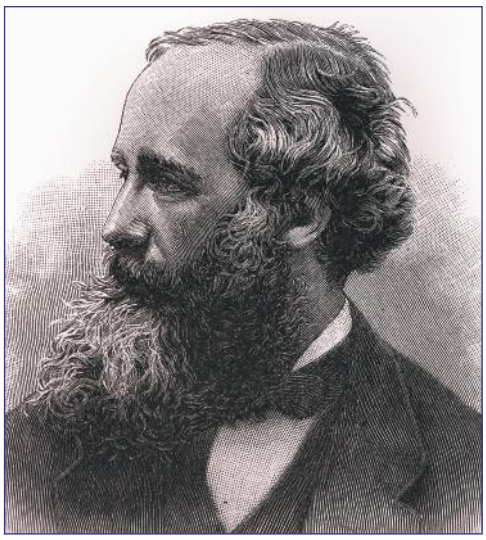
5. وضع طالب شوكة رنانة مهتزة ترددها 620 Hz عند فوهة مخبار مدرّج، ثم بدأ يضيف الماء إلى الأنبوب، وعند سماعه صوت الشوكة الرنانة بشكل واضح قاس ارتفاع الجزء الفارغ من الأنبوب فوجده 0.14 m، معتمدًا على البيانات احسب سرعة الصوت في الهواء.

6. عندما يزداد طول عمود الهواء في أنبوبة مفتوحة الطرفين، وضح ما يحدث (زيادة أم نقصان) للكميات الآتية: الطول الموجي، التردد، الزمن الدوري، سرعة الموجة. ثم فسّر إجابتك.

7. وتر قيثارة مشدود تولدت فيه موجات موقوفة بتردد أساسي196 Hz ، أوجد التردد الأساسي للوتر إذا أصبح طوله 0.8 من الطول الأصلي له.

ضوء على العلماء

جيمس كلارك ماكسويل (1831-1879)



الشكل 4-60 جيمس كلارك ماكسويل (1831-1879)

كان جيمس كلارك ماكسويل أول من افترض فكرة الموجات الكهرومغناطيسيّة في العام 1865. وقد أدّت إسهاماته دورًا حاسمًا في تطور الفيزياء التي نعرفها اليوم. ماكسويل، عالم اسكتلندي، ولد في مدينة أيدنبرج باسكتلندا، عام 1831.

تلقّى ماكسويل تعليمه في المنزل حتى سن العاشرة. كانت والدته مسؤولة عن تعليمه في السنوات الثماني الأولى. وحين توفيت، أدّى كل من والده وعمّته دورًا في تعليمه.

من عمر 11 وحتى 16 عامًا، التحق ماكسويل بأكاديميّة أيدنبرج، وهي مدرسة خاصة مرموقة لا تزال قائمة إلى الآن. كتب ماكسويل أول نشرة علميّة له في ذلك الوقت، بعنوان «المنحنيات البيضوية». انضم ماكسويل إلى جامعة أيدنبرج كطالب جامعي لدراسة البصريات. وانتقل بعد ثلاث سنوات إلى كلية ترنيتي بجامعة كامبريدج. وتخرّج منها عام 1854.

إسهاماته العلميّة

لماكسويل إسهامات علمية كثيرة نذكر بعضها. افترض بدايةً أنّ حلقات زُحل مصنوعة من جُسيمات، وهو ما تمّ إثباته في القرن العشرين.

تنّبأ ماكسويل بوجود موجة مُنتقلة بمجالين مهتزين: كهربائي ومغناطيسي (تعرف اليوم باسم الموجات الكهرومغناطيسية). ومن خلال التجربة اكتشف أنّه عند انتقال هذه الموجات في الفضاء الخالي، فإنها تنتقل بسرعة 310,740,000 متر في الثانية. وهذه القيمة قريبة جدًا من قيمة سرعة الضوء المعروفة اليوم: 299,792,458 m/s. لخّص ماكسويل أيضًا القوانين المعروفة المُتعلقة بالكهرباء والمغناطيسية، في أربع معادلات، تعرف اليوم باسم معادلات ماكسويل.

كان ماكسويل أول من أنتج صورة فوتوغرافية ملوّنة، عن طريق فصل صور لقماش صوفي بواسطة فلاتر منفصلة لكل من الألوان الأحمر والأزرق والأخضر، ثمّ إسقاط تلك الصور الثلاث بعضها فوق بعض.

الوحدة 6

مراجعة الوحدة

الدرس 6-1: خصائص الموجات

- **طور** الموجة يصف الموقع الذي تكون فيه الموجة خلال دورتها الكاملة في أيِّ لحظة من الزمن، أو في أيّ مكان من الوسط. يبلغ طور الموجة الكاملة 360°، أما طور الموجة التي بلغت $\frac{1}{4}$ مسارها خلال دورتها فيبلغ 90°.
- **فرق الطور** يحدث بين موجتين لا تنطلقان من النقطة نفسها في اللحظة نفسها. وهو بالتالي نتيجة الاختلاف في زمن البدء، أو الاختلاف في طول المسار.
- **التداخُل** هو تراكُب موجتين لهما التردُّد نفسه، عند نقطة معيَّنة.
- **مبدأ التراكُب** ينص على أن إزاحة أي نقطة على الموجة المُحصَّلة، هي مجموع إزاحات كل موجة على حدة، وبشكل مستقلّ عن الموجات الأخرى.
- **التداخُل البنّاء** هو التداخُل الذي يحدث عندما يكون للموجة المُحصَّلة أقصى سعة ممكنة، وهي جمع سعتَي الموجتين المُتداخلتين.
- **التداخُل الهدّام** هو التداخُل الذي يحدث عندما يكون للموجة المحصَّلة أقلّ سعة ممكنة، وهي حاصل طرح سعتَي الموجتين المُتداخلتين.
- **الضربة** تناوب في شدة الصوت، ينتج عن تداخُل بنّاء يليه تداخُل هدّام لموجتين لهما تردُّدان مختلفان قليلاً.
- **فرق المسار** هو الفرق في المسافة التي تقطعها موجتان.

الدرس 6-2: التداخل في الضوء

- **الحيود** هو خاصية الموجة التي تسمح لها بالانحناء حول الحواف والعوائق والفتحات الضيقة. يتناسب مقدار الحيود طرديًّا مع نسبة طول الموجة إلى قياس الجسم المُسبِّب للحيود.
- **الضوء المتعدِّد الألوان** هو الضوء الذي يتكوَّن من موجات مختلفة في أطوالها الموجية وتردُّداتها وأطوارها.
- **الضوء الأحادي اللون** هو الضوء الذي يتكوَّن من موجات لها الطول الموجي نفسه، ولكن السعات والأطوار قد لا تكون نفسها.
- **الضوء المترابط** هو الضوء الذي يتكوّن من موجات لها الطول الموجي نفسه وفرق طور ثابت بين الموجات مع مرور الزمن. يعدّ ضوء الليزر ضوءًا مترابطًا.

الوحدة 6

مراجعة الوحدة

- **الهدبة المُضيئة المركزية** بقعة مضيئة تتشكَّل في وسط الشاشة، عندما يمر ضوء عبر شق مفرد، ويشكِّل نمط حيود على شاشة بعيدة عن الشق.
- **الهدبة المُعتمة الأوّلى** بقعة مظلمة تتشكَّل على جانبِي البقعة المضيئة في وسط الشاشة، عندما يمرّ الضوء عبر شق منفرد، ويشكِّل نمط حيود.
- **الهدبة المُضيئة الثانية** البقعة المُضيئة الثانية، التي تتشكَّل بجوار الهدبة المعتمة الأوّلى، عندما يمرّ الضوء عبر شق منفرد، ويشكِّل نمط حيود.
- **الأهداب المُضيئة** تشير إلى البقع المُضيئة التي تظهر على الشاشة، عندما يتداخل الضوء تداخُلًا بنّاءً بعد عبوره الشقّين.
- **الأهداب المُعتمة** تشير إلى البقع المُعتمة التي تظهر على الشاشة عندما يتداخل الضوء تداخُلًا هّدامًا بعد عبوره الشقَّين.
- **التباعُد الهدبي** هو المسافة بين مركزي هدبتَيْن مُضيئتَيْن مُتتاليتَيْن أو هدبتَيْن مُعتمتَيْن مُتتاليتَيْن.

الدرس 6-3: الأشعة الكهرومغناطيسية

- **الموجات الكهرومغناطيسية** موجات مسُتعرَضة ناتجة من اهتزازين متعامدين لمجالين كهربائي ومغناطيسي، وهي تسير بسرعة الضوء.
- **الإشعاع الكهرومغناطيسي** مصطلح آخر يستخدم للإشارة إلى الموجات الكهرومغناطيسية.
- **الطيف الكهرومغناطيسي** يمثِّل كامل نطاق تردُّدات الإشعاع الكهرومغناطيسي.
- **أشعّة جاما** الموجات الأعلى تردُّدًا في طيف الإشعاع الكهرومغناطيسي.
- **الأشعّة السينية** موجات ذات تردُّد مرتفع في طيف الإشعاع الكهرومغناطيسي، تستخدم عادة لتصوير العظام.
- **الضوء غير المُستقطَب** هو الضوء الذي يهتزّ فيه المجال الكهربائي في اتّجاهات عشوائية.
- **الضوء المُستقطَب** هو الضوء الذي يهتز فيه المجال الكهربائي في اتّجاه واحد.

الوحدة 6

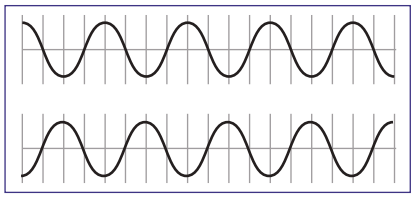
مراجعة الوحدة

الدرس 6-4: الموجات الموقوفة

- **الانعكاس** عملية ارتداد الموجات (بما في ذلك الضوء) عند سقوطها على حَدٍّ أو فاصلٍ بين مادَّتين مختلفتين.
- **الموجة الموقوفة** نمط موجي مستقرّ ينشأ نتيجة لتراكب موجتين متماثلتين إحداهما ساقطة والأخرى منعكسة، كما يحدث في الوتر المهتز.
- **العقدة** النقطة المستقرّة على الموجة الموقوفة، وهي النقطة التي سعة اهتزازها صفر.
- **البطن** النقطة التي لها أقصى سعة على الموجة الموقوفة.
- **التردُّد الأساسي** أدنى تردُّد لجسم مهتز.
- **النغمة التوافقية الأوّلى** هي الموجة التي تتشكَّل من اهتزاز جسم ما عند تردُّده الأساسي.
- **الرنين** يحدث عندما يُجبر جسم على الاهتزاز، وفقًا لتردُّده الطبيعي تحت تأثير قوة خارجية.

اختيار من مُتعدّد

1. ما فرق الطور بين الموجتين في الرسم التخطيطي؟



a. 0°
b. 90°
c. 180°
d. 360°

2. أي تردُّدين لموجتين صوتيَّتين تنشأ منه ضربات؟

a. 400 Hz و 405 Hz
b. 400 Hz و 500 Hz
c. 400 Hz و 800 Hz
d. 400 Hz و 4000 Hz

3. قمت أنت وزميلك بإنشاء موجة موقوفة في حبل. كل منكما يمسك بالحبل ويده ثابتة، وهناك ما مجموعه 5 عقد في هذه الموجة. كم عدد البطون عندئذ؟

a. 3
b. 4
c. 5
d. 6

4. جدار سميك فيه باب يفصل بين غرفتين، والباب مفتوح قليلًا. لكن لا يزال بإمكان الناس في إحدى الغرفتين سماع الصوت من الغرفة الثانية مع أنهم لا يستطيعون رؤية ما خلف الباب. ما اسم هذه الظاهرة؟

a. التداخُل
b. الرنين
c. الحيود
d. التراكُب

5. تتداخُل موجتان، حيث يكون للموجة المركبّة الناتجة سعة أصغر من سعة أيٍّ منهما. ما اسم هذا النوع من التداخُل؟

a. التداخُل البنّاء
b. التداخُل الهدّام
c. التداخُل الحيودي
d. التداخُل الانعكاسي

6. أُجريت تجربة الشق المزدوج، ولوحظ تداخُل يُظهر الأهداب المضيئة والأهداب المُعتمة. ما الذي يحدث إذا تمت مضاعفة الطول الموجي للضوء المستخدم؟

a. تختفي الأهداب.
b. تتباعد الأهداب.
c. تتقارب الأهداب.
d. تبقى الأهداب على التباعد نفسه، ولكنّ إضاءتها تصبح أكثر شدّة.

7. تتداخل موجتان صوتيتان لتنشأ عنهما موجة ذات سعة أكبر من سعة أي منهما. ماذا تمثّل هذه الموجة؟

a. الحيود
b. التداخُل الهدّام
c. تفاعلًا موجيًّا عند حدّ بين وسطين
d. التداخُل البنّاء

8. ما خاصّية الضوء المُستقطَب تمامًا؟

a. جميع الموجات المستعرضة تهتز في المستوى نفسه.
b. جميع الموجات الطولية تهتز في المستوى نفسه.
c. جميع الموجات متماثلة في الطور والسعة.
d. الانعكاس يكون عن سطح موصِّل مثل المياه المالحة.

9. لماذا لا يمكن استقطاب الموجات الصوتية؟

a. لأنها موجات مستعرضة.
b. لأنها موجات طولية.
c. لأنها أبطأ كثيرًا من الموجات الضوئية.
d. لأن سرعتها تساوي حاصل ضرب الطول الموجي في التردُّد.

10. ما الخيار الأفضل لتضخيم الصوت؟

a. الشوكة الرنّانة
b. أنبوبة الرنين
c. العزل الصوتي
d. آلية الصدى الصوتي تحت الماء

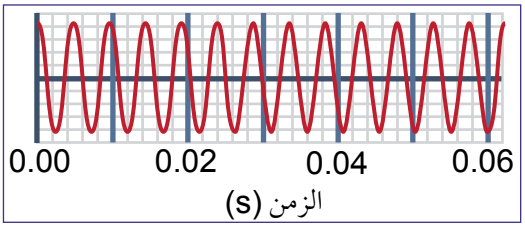
11. يعزف مُكبِّرا صوت نغمتين مختلفتين، إحداهما على تردُّد 440 Hz، وأخرى على تردُّد 430 Hz. ماذا سيسمع المستمع عند تداخُل هاتين النغمتين؟

a. ضربات
b. رنين
c. حيودًا
d. صدى

12. أي من الآتي لا يعتبر مثالًا على الرنين في الصوت؟

a. الليزر
b. الشوكة الرّنانة
c. العزف على آلة موسيقية
d. العزف بوساطة نفخ الهواء في قنّينة

13. يمثّل الرسم البياني موجة صوتية تنتقل بسرعة 343 m/s. ما طولها الموجي؟



a. 0.61 m
b. 1.00 m
c. 1.65 m
d. 20.6 m

14. يهتز عمود الصوت في أنبوبة أورغن طولها 75 cm، ومفتوحة من الطرفين. إذا كان الصوت ينتقل بسرعة 343 m/s في الهواء، فكم يبلغ تردُّد النغمة التوافقية الأولى في هذه الأنبوبة؟

a. 0.219 Hz
b. 115 Hz
c. 229 Hz
d. 686 Hz

15. المسافة بين القمر والأرض 384000 km تقريبًا. كم يستغرق انتقال الضوء من الأرض إلى القمر؟

a. ثانية
b. دقيقة
c. ساعة
d. يومًا

16. أي ممّا يأتي يقدِّم دليلاً على أن الضوء يسلك سلوك الموجات؟

a. الحيود
b. الاستقطاب
c. التداخُل
d. كل ما ورد أعلاه.

17. تعد كل من أجهزة الأشعّة السينية وأجهزة التصوير المقطعي أجهزة تصوير طبّي تستخدم الإشعاع الكهرومغناطيسي. ما الخصائص التي يتَّصف بها الإشعاع المستخدم؟

a. طاقة منخفضة وطول موجي قصير.
b. طاقة منخفضة وطول موجي طويل.
c. طاقة مرتفعة وطول موجي قصير.
d. طاقة مرتفعة وطول موجي طويل.

الدرس 6-1 خصائص الموجات

18. ارسم:

a. موجتَيْن إحداهما ذات طول موجي أكبر من الأخرى.

b. موجتَيْن إحداهما أكبر سعة من الأخرى.

c. موجتَيْن إحداهما ذات زمن دوري أكبر من الأخرى.

19. موجة لها تردُّد 5×10^{14} Hz وطول موجي 6×10^{-7} m.

a. ما سرعة انتقالها؟

b. ما المسافة التي تقطعها الموجة في 8 دقائق و18 ثانية؟

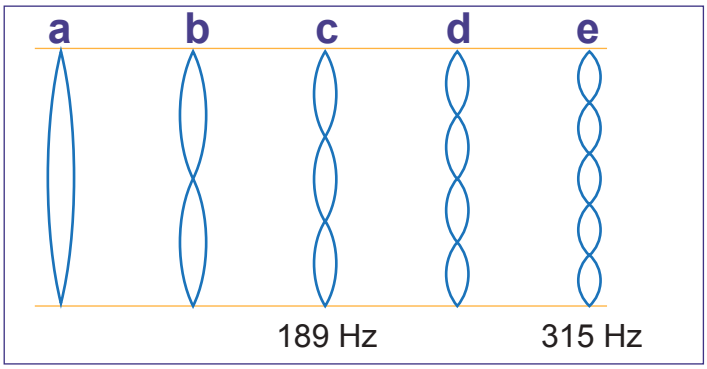
20. موجة كبيرة ذات سعة 40 cm وطول موجي 2.0 m، خضعت لتداخُل مع موجة ثانية ذات سعة 15 cm وطول موجي 2.0 m.

a. إذا كان فرق الطور بين الموجتين 180°، فما هي سعة الموجة الناتجة؟

b. إذا كان للموجتين الطور نفسه، فما هي سعة الموجة الناتجة؟

21. هل يمكن أن تنشأ حالة لا يوجد فيها سوى تداخُل هدّام؟ اشرح ذلك.

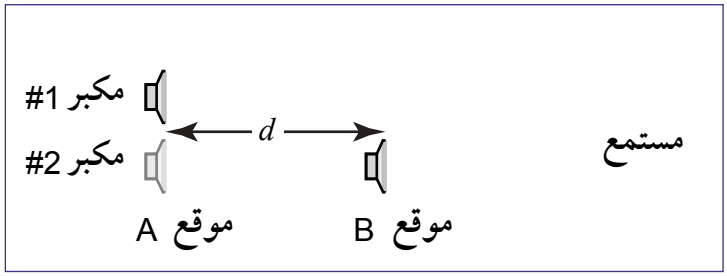
22. املأ التردُّدات المفقودة لأنماط الموجات الموقوفة في الرسم التخطيطي أدناه.



23. يستمع طالب إلى الصوت الصادر عن مُكبِّرَي صوت صغيرين متَّصلين بجهاز الحاسوب المحمول الخاص به. فوضع أوّل مرة مُكبِّرَي الصوت جنبًا إلى جنب (في الموقع A) واستمع إلى النغمة الصادرة عنهما بتردُّد 400 Hz عن بعد عدة أمتار، كما هو موضّح في الرسم.

a. قام طالب آخر بتحريك أحد مُكبِّرَي الصوت ببطء نحوهُ إلى الموقع B، لكن الطالب الأول بالكاد سمع الصوت من مُكبِّرَي الصوت. علِّلْ ذلك؟

b. احسب المسافة d بين الموقعين A وB.



الدرس 2-6: التداخل في الضوء

24. يوجّه ضوء مصباحين متماثلين إلى البقعة نفسها على شاشة، فهل سيتكون نمط للتداخُل هناك؟ اشرح إجابتك.

25. كيف يعتمد الحيود على قياس الجسم الذي تتفاعل معه الموجة؟ مثلًا، لمَ ينحني الصوت حول حافة المبنى في حين لا ينحني الضوء؟

26. في تجربة الشق المزدوج للضوء، كيف تتغيّر المسافة بين أهداب التداخُل مع الطول الموجي للضوء؟

27. شقّان تفصل بينهما مسافة 0.25 mm، وُضِعا على مسافة D = 1.5 m من شاشة، فتشكّلت الهدبة المضيئة الرابعة على مسافة $x = 13$ mm من الهدبة المضيئة المركزية. احسب الطول الموجي للضوء.

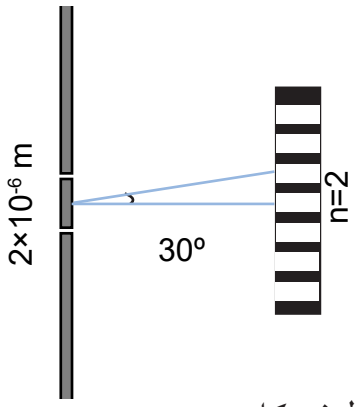
28. ما إيجابية استخدام الشقوق المتعدِّدة في محزوز الحيود مقارنة بالشق المزدوج في تحليل الضوء إلى طيف؟

29. البعد بين الشقين في جهاز تجربة الشقين 0.2 mm. يعبر الضوء الأبيض من خلال الشقَّين فتُلاحظ الأهداب على مسافة 1 m من الشقَّين. إذا كان الطول الموجي للضوء الأحمر 700 nm وللضوء الأزرق 400 nm.

a. احسب التباعُد بين أهداب كل من اللونين.

b. اشرح لماذا تكون الأهداب التي تظهر على الشاشة ملوّنة.

30. يضيء مصباح شقين تفصل بينهما مسافة 2×10^{-6} m.



a. احسب الطول الموجي للضوء، إذا كانت زاوية الهدبة المعتمة الثانية 30°.

b. عند أي زاوية تظهر الهدبة المعتمة الثالثة؟

31. يضيء الضوء الأبيض محزوز حيود مكتوب عليه 600 خط في كل mm.

a. احسب التباعُد بين الشقوق في المحزوز.

b. يسقط الضوء من خلال الشقوق، وتكون الرتبة الأوّلى المضيئة عند 19°. احسب الطول الموجي لمصدر الضوء.

32. يستخدم ضوء طوله الموجي 500 nm لإضاءة محزوز يشتمل على 400 خط في كل mm.

a. احسب الزوايا التي تُلاحَظ عليها الأهداب المضيئة.

b. ما أكبر رتبة يمكن ملاحظتها وفق هذا الترتيب؟

الدرس 6-3: الأشعة الكهرومغناطيسية

33. ما خاصية الأشعّة السينية التي تؤهِّلها للاستخدام في تصوير عظام المرضى في المراكز الطبية؟

34. رتّب الأنواع الآتية من الإشعاع الكهرومغناطيسي وفقًا لتزايد طولها الموجي: الضوء الأصفر، موجات الميكروويف، الأشعّة السينية، الأشعّة فوق البنفسجية، الضوء البنفسجي.

35. احسب تردُّد الإشعاع الكهرومغناطيسي الذي يبلغ طوله الموجي 5×10^{-6} m. ما نوع هذا الإشعاع الكهرومغناطيسي ؟

36. مستقطِبان يميل محور كل منهما عن الآخر بزواية قائمة. اشرح لماذا لا ينتقل الضوء من خلال المُستقطِب الثاني؟

37. نظر طالب إلى زميله أثناء التزلُّج على الماء من خلال قطعة بلاستيكية رقيقة، لكنه وجد صعوبة في رؤيته، بسبب وهج الماء. لماذا يقلّ وهج الماء عندما يدوِّر القطعة البلاستيكية بمقدار 90°.

38. بالرجوع إلى الشكل 6-32 الصفحة 125 الطيف الكهرومغناطيسي، وحدِّد نوع الإشعاع الكهرومغناطيسي الذي ينطبق على كل مما يأتي:

a. الطول الموجي 10×10^{-6} m

b. التردُّد 1050 kHz

c. الطول الموجي 656 nm

d. التردُّد 0.1 THz

39. للتواصُل مع الغواصات يستخدم عادة تردُّدات أقلّ من 1 kHz.

a. ما الأطوال الموجية لموجات الإشعاع الكهرومغناطيسي لتلك التردُّدات؟

b. سمِّ جسمًا في البيئة من حولك يولّد أطوالًا موجية مماثلة في القياس لتلك الأطوال الموجية.

c. كيف يمكن بث هذه الأطوال الموجية؟

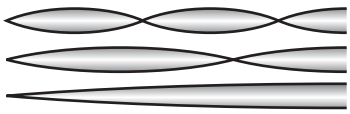
d. هل يمكن للغوّاصات بث هذه الأطوال الموجية؟

الدرس 6-4: الموجات الموقوفة

40. لماذا يجب عليك ضبط طول أنبوبة الرنين كي تحصل على رنين صوت خارجي، مثل صوت الشوكة الرنانة؟

41. يستمع عازف بيانو إلى الضربات بين وترين عند ضربهما في وقت واحد، ليعرف إن كانا متطابقين في التردُّد. ما خاصية الضربات التي تخبر العازف أن الوترين متناغمان تمامًا؟

42. أي من الأنظمة الآتية يمثل رنين أنماط الموجة الموقوفة في الرسم البياني؟



a. أنبوبة ذات طرفين مفتوحتين
b. أنبوبة ذات طرفين مغلقين
c. أنبوبة ذات طرف مفتوح وآخر مغلق

43. عرّف كلمة «توافقي» في سياق تردُّدات الصوت. صف خصائص أصوات الأدوات المختلفة، مثل الجيتار والناي والعود والبيانو، بناء على النغمات التوافقية.

44. يعزف وتر جيتار نغمة أساسية تردُّدها 335 Hz. ما تردُّدات نغمات التوافقيات الأوّلى والثانية والثالثة؟

45. ارسم الموجة الموقوفة التي تمثّل النغمة التوافقية الخامسة في أنبوبة ذات طرف مفتوح، والطرف الآخر مغلق.

46. أنبوبة طولها 0.672 m مفتوحة من كلا الطرفين. فإذا كانت سرعة الصوت 340 m/s،

a. احسب التردُّد الأساسي.
b. ما تردُّد النغمة التوافقية الثانية؟

47. ما طول الوتر الذي يمكن أن يُنتج تردُّدًا أساسيًّا يبلغ 110 Hz؟ (سرعة الصوت 343 m/s).

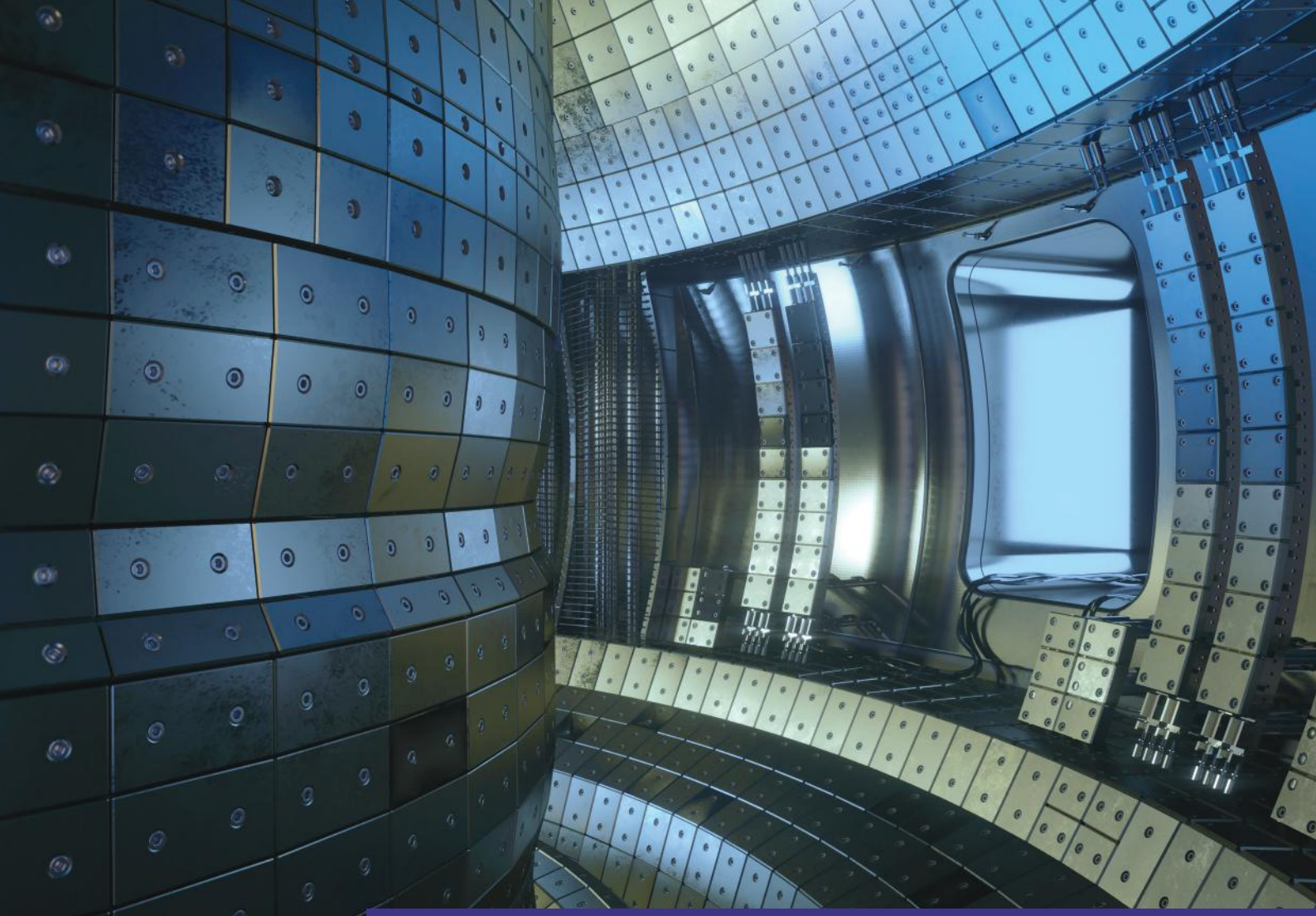
48. شُدّ وتر حتى صار طوله 0.4 m، وثُبّت من كلا طرفيه.

a. ما طول موجة النغمة التوافقية الأوّلى؟
b. ارسم شكل الوتر، عندما يهتز في النغمة التوافقية الثانية.
c. سرعة الموجة على الوتر 150 m/s. احسب تردُّد النغمة التوافقية الثانية.

الاستقصاء والبحث

أفران الميكروويف

توجد أفران الميكروويف في كل منزل تقريبًا، ويمكنها تسخين الطعام في غضون دقائق، وتقليل وقت الطهو بأكثر من 50%. كيف يطبخ الميكروويف الطعام؟ ابحث في كيفية عمل هذه التكنولوجيا، واكتب مقالة قصيرة تصف فيها كيف تنشأ موجات الميكروويف، وما الأطوال الموجية أو التردُّدات المستخدمة، وكيف تُسخّن الموجات الطعام، وكيف يمنع الفرن موجات الميكروويف من الإفلات.



الوحدة 7

الفيزياء الذرّية والنووية الحديثة

في هذه الوحدة

الدرس 7-1: الذرّة
الدرس 7-2: النشاط الإشعاعي
الدرس 7-3: عُمر النصف
الدرس 7-4: التفاعُلات النووية

P1114
P1115
P1116

7 الوحدة

مقدّمة الوحدة

لدينا اليوم فهم واضح لوجود الذرّات والجُسيمات دون الذرية ، ويعود الفضل في ذلك إلى جهود بذلها العديد من العلماء، وساهمت في تشكيل معرفتنا الحديثة. كان هذا التطوُّر تحدّيًا خلّاقًا للغاية، لعدم تمكّن أحد من رؤية الذرّة أو الإلكترون أو البروتون أو النيوترون. في هذه الوحدة، سوف نقوم بمراجعة تركيب الذرّة ودراسة تاريخ النماذج الذرّية، ونتعلّم خصائص الجُسيمات دون الذرّية وتمييز ذرّات العناصر المختلفة.

تكون بعض الذرّات غير مستقرّة، وتنحلّ إلى ذرّات أخرى من خلال الانحلال الإشعاعي. يمكن أن يُنتج الانحلال الإشعاعي جُسيمات ألفا أو بيتا أو أشعّة جاما. ورغم أن النشاط الإشعاعي خطِرٌ جدًّا، إلا أنه يُستخدَم على نطاق واسع في المجالات الطبّية والصناعية. سوف نتعلَّم الفرق بين الإشعاعات الثلاثة الأكثر شيوعًا، وخصائصها. ليس لكل الذرّات المشعّة المعدّل نفسه من الانحلال. وهذه الخاصية تساعدنا على معرفة أعمار الأحافير القديمة. سوف تقدّم إليك هذه الوحدة المعادلات والطرق المستخدمة لحساب الزمن اللازم للمادة المشعة كي تنحلّ.

الأنشطة والتجارب

1-7 تطوُّر النموذج الذرّي

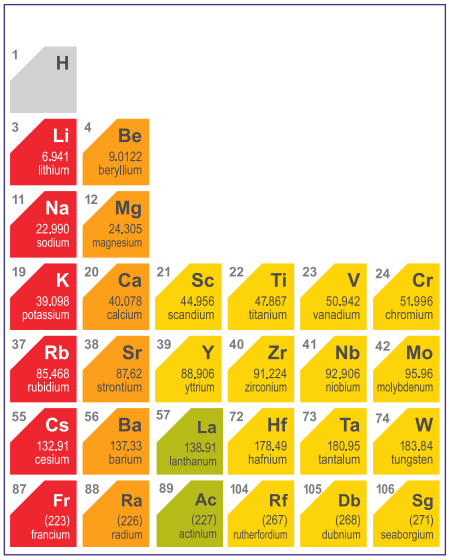
3-7 التحقُّق من عُمر النصف

4-7 مخاطر الانحلال الإشعاعي

الدرس 1-7
الذرّة

تتكون المواد حولنا من عناصر أو مركبات، جميعها من العناصر الطبيعية والتي يبلغ عددها 92 عنصرًا. وكلّ عنصر يتكوَّن من ذرّات، والذرّة هي أصغر جُسَيم في أي عُنصر. وقد رُتِّبت جميع العناصر في جدول دوريّ.

صمّم العالم الروسي الكيميائي ديمتري مندليف الجدول الدوري للعناصر. فنظم الخصاص المعروفة عن العناصر، على أساس كُتلها الذرية، ثم نظَّم العناصر في مجموعات، بحسب خصائصها المشتركة. توقَّع مندليف اكتشاف المزيد من العناصر. لذلك ترك لها أماكن خالية في الجدول.ظلَّ سبب اختلاف العناصر بعضها عن بعض مجهولًا حتى الأعوام المئة الأخيرة. ففي العام 1914، أضاف العالِم الإنجليزي هنري موزلي العدد الذرّي للعناصر، وأعاد ترتيبها. ثم جاء اكتشاف النيوترون على يد العالم جيمس شادويك سنة 1932 وهو آخر الجُسيمات المُكتَشفة داخل الذرّة؛ . لم يكن مفهوم القوى التي تعمل على تماسك مكونات النواة واضحًا، حتى تمّ اكتشاف الكواركات داخل النيوترونات والبروتونات عام 1970. استغرق العمل على تطوير الجدول الدوري 80 عامًا، حتى جرى التوصُّل إلى النسخة التي نتداولها اليوم، **الشكل 7-1**.



الشكل 7-1 جزء من الجدول الدوري الحديث.

مخرجات التّعلُّم

P1114.1 يفسر نتائج تجربة التشتت لرذرفورد ويصف كيف أدت إلى نماذج التركيب الذرّي الحديثة.

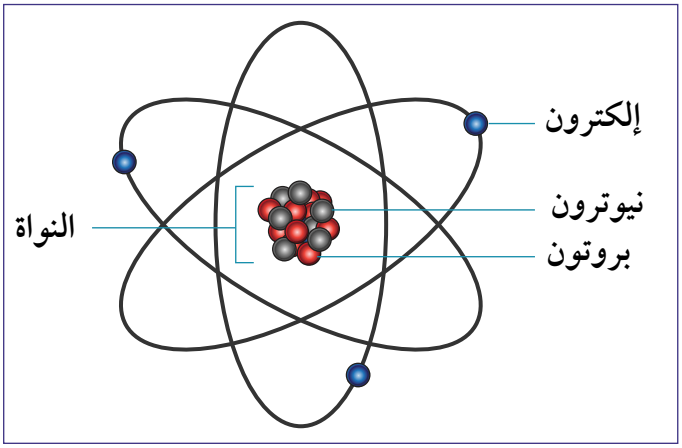
المفردات

Atom	ذرّة
Electrons	إلكترونات
Protons	بروتونات
Neutrons	نيوترونات
Elementary charge	شحنة أوَّلية
Atomic number	العدد الذرّي
Alpha particles	جُسيمات ألفا
Isotopes	النظائر
Atomic mass number	العدد الكُتلي

تركيب الذرَّة

تحتوي الذرَّة على ثلاثة أنواع أساسية من الجُسيمات، وهي **الإلكترونات Electrons** و**البروتونات Protons** و**النيوترونات Neutrons** كما في **الشكل 7-2**. تعتبر الإلكترونات أقل تلك الجُسيمات كتلة، وهي تحمل شحنة كهربائية سالبة مقدارها (-1.602×10^{-19} C). أما البروتونات، فلها شحنة كهربائية موجبة مقدارها (1.602×10^{-19} C)، تسمّى **الشحنة الأوَّلية Elementary charge**، وتكون كتلة البروتون أكبر من كتلة الإلكترون بـ 1836 مرَّة.

كتلة النيوترون أكبر قليلًا من كتلة البروتون، ولكن ليس لـه شحنة كهربائية كما في **الشكل 7-3**. وتكون أي شحنة كهربائية من مضاعفات الشحنة الأوَّلية (e).



الشكل 7-2 تركيب الذرّة .

	الشحنة	الكتلة
بروتون	$+1.602 \times 10^{-19}$ C	1.673×10^{-27} kg
نيوترون	0	1.675×10^{-27} kg
إلكترون	-1.602×10^{-19} C	9.11×10^{-31} kg

الشكل 7-3 تركيب الذرّة .

تقع كل من البروتونات والنيوترونات داخل نواة الذرَّة. وتُرتّب العناصر في الجدول الدوري بحسب **عددها الذرّي Atomic number**، وهو عدد البروتونات في نواتها، ويُرمَز إليه بالرمز(Z)، كما هو موضَّح في **الشكل 7-4**.

تتضمّن كل نواة من أنوية ذرّات العنصر الواحد العدد نفسه من البروتونات، بينما يختلف عدد البروتونات في أنوية ذرَّات العناصر المختلفة.

جميع ذرَّات العنصر الواحد تحتوي على العدد نفسه من البروتونات.

العنصر	عدد البروتونات
الهيدروجين	1
الهيليوم	2
الليثيوم	3
البريليوم	4
البورن	5
الكربون	6
النيتروجين	7
الأكسجين	8

ترتيب أوَّل 18 عنصرًا في الجدول الدوري

العدد الذرّي

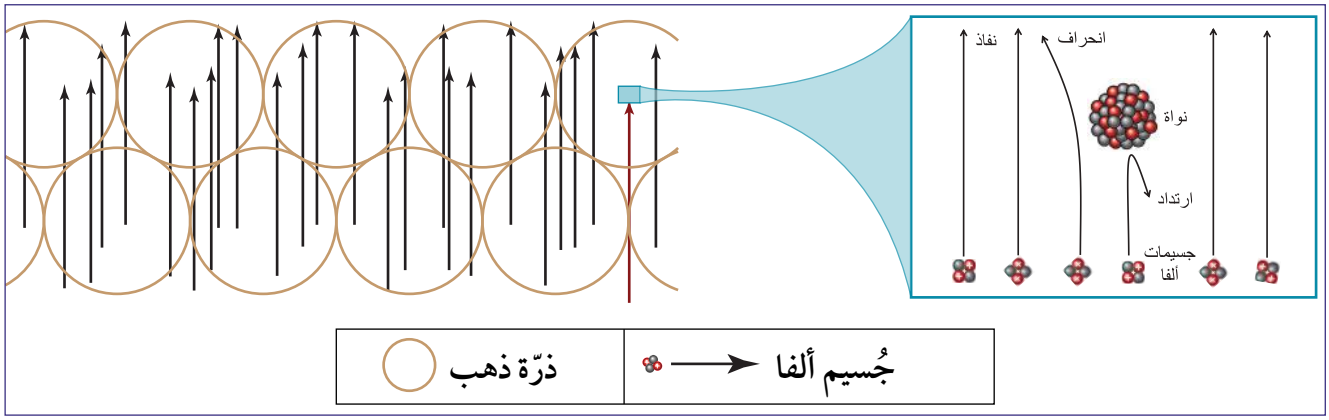
1 H hydrogen							2 He helium
3 Li lithium	4 Be beryllium						
11 Na sodium	12 Mg magnesium						
		5 B boron	6 C carbon	7 N nitrogen	8 O oxygen	9 F fluorine	10 Ne neon
		13 Al aluminum	14 Si silicon	15 P phosphorous	16 S sulfur	17 Cl chlorine	18 Ar argon

الشكل 7-4 ترتيب العناصر في الجدول الدوري بحسب عددها الذرّي.

اكتشاف النواة

تتيح لنا المجاهر القوية رؤية تفاصيل صغيرة قياسها 1 نانومتر (10^{-9} m). لكن لا يمكن رؤية الجُسَيمات دون الذرّية (10^{-15}m) حتى باستخدام هذه المجاهر. ومع ذلك، تتيح لنا التجارب المتطورة مراقبة سلوك الجُسيمات دون الذرّية واستكشاف بنية الذرّة. بحلول العام 1900 كان معروفًا أن الذرّة تحتوي على إلكترونات ذات شحنة سالبة. وبالنظر إلى أن الذرّة متعادلة كهربائيًّا، فقد عرف العلماء أن كل ذرَّة لا بُدّ من أن تحتوي على كمّية مماثلة من الشحنة الموجبة. ولكن السؤال هو حول كيفية ترتيب هذه الشحنات داخل الذرّة. كانت الفكرة الشائعة آنذاك أن الإلكترونات تتوزَّع عشوائيًّا داخل قرص موجب الشحنة، كتوزيع الزبيب على الفطيرة الإنجليزية. وفي العام 1909، قام العالم أرنيست رذرفورد مع هانز جيجر وأرنيست مارسدن بإجراء تجربة تتمثَّل بتسليط حزمة من **جُسيمات ألفا Alpha particles** على شريحة رقيقة من الذهب، حيث يحتوي جُسيم ألفا على بروتونين ونيوترونين أي إنه نواة ذرّة الهيليوم. توقَّع العُلماء أن تسهم طريقة تشتُّت جُسيمات ألفا، بعد اصطدامها بالشريحة الذهبية، في توضيح طريقة توزيع الشحنات الموجبة والسالبة داخل الذرَّة. وتوقَّع رذرفورد أن تنحرف الجُسيمات قليلًا عن مسارها الابتدائي بعد اصطدامها بالذرّات التي لها شكل فطيرة. إلّا أن النتائج جاءت عكس المتوقَّع. يوضِّح **الشكل 7-5** أهم نتائج التجربة:

1. الغالبية العُظمى من جُسيمات ألفا خرجت من الشريحة من دون أي انحراف واضح عن مسارها، وكأنها لم تصطدم بأيّ من ذرّات الشريحة.
2. عددٌ قليل من جُسيمات ألفا انحرف بزوايا كبيرة عن مساره.
3. بعض الجُسيمات ارتَّدت عن الشريحة في الاتِّجاه المُعاكِس.

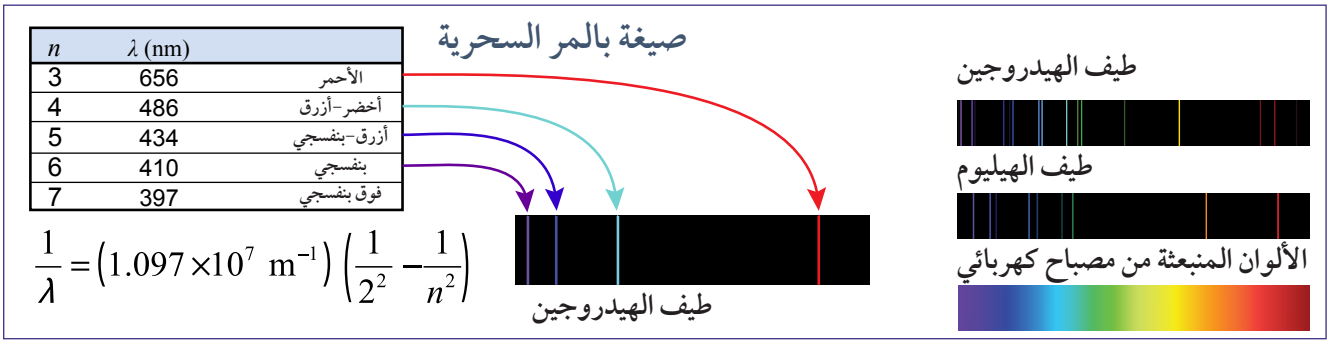


الشكل 7-5 مشاهدات رذرفورد.

وبما أن معظم الجُسيمات قد نفذت من دون أي انحراف، فقد استنتج رذرفورد أن معظم مناطق الذرَّة فارغة، وأن معظم كتلة الذرَّة وشحنتها الموجبة لا بُدّ أن تتركّز في حيّز صغير جدًّا في وسطها، الذي يُسمّى نواة الذرَّة.

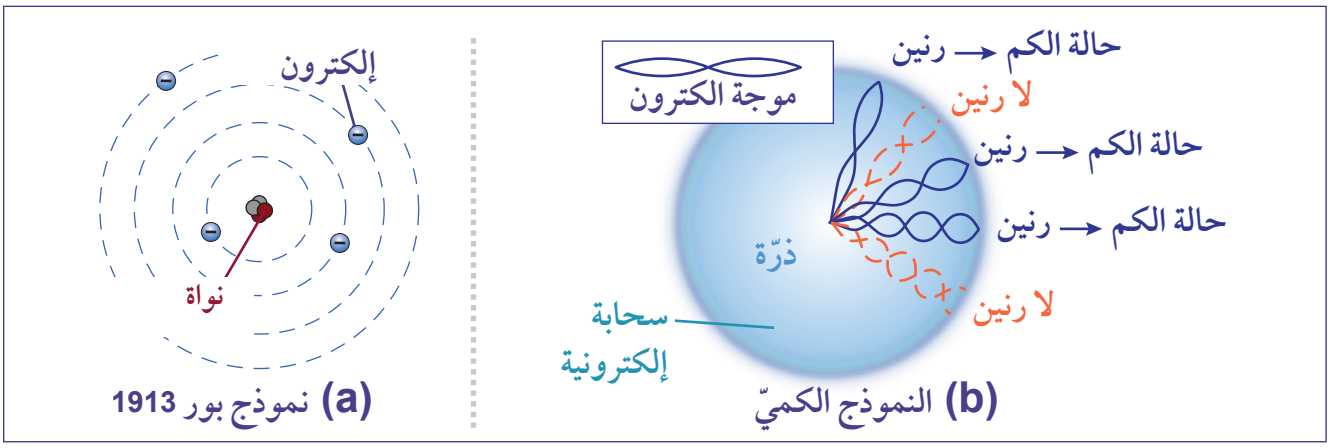
ذرَّة الكم

على عكس المصباح الكهربائي، يحتوي الضوء المنبعث من غاز الهيدروجين على ألوان قليلة جدًّا مُنفصِل بعضها عن بعض، وهو أمر لم يكن مفهومًا. وفي العام 1885، اكتشف مُدرِّس سويسري يدعى يوهان بالمر الأطوال الموجية، وأخضعها لمعادلة رياضية؛ لكنه لم يستطع تفسير ذلك.



الشكل 7-6 صيغة بالمر وطيف الهيدروجين.

استنتج الفيزيائي الدانمركي نيلز بور عام 1913تفسيرًا رائعًا لصيغة بالمر. فاقترح بور فكرة أن الإلكترونات تدور في مدارات دائرية حول النواة (**الشكل 7-7a**)، وتعتمد طاقة الإلكترون على نصف قطر المدار. وهناك إمكانية لأنتقال إلكترون مُثار من مدار أعلى طاقة إلى مدار أقل طاقة ما يؤدّي إلى انبعاث ضوء تكون طاقته مساوية لفرق الطاقة بين المدارَين.



الشكل 7-7 نموذج بور والنموذج الكمّي للذرَّة.

لم يفسِّر نموذج بور عدم فقد الإلكترونات لطاقتها ببطء في مداراتها. وأظهرت تجارب ديفسون وجيرمر بين العامين 1923 و 1927 أن الإلكترون يسلك سلوك الموجات أكثر من سلوك الجُسَيمات عند دراسته على المستوى الذرّي. وفي العام 1926 طرح العالم الفيزيائي النمساوي إروين شرودينجر فكرة أن إلكترون الكم المرتبط بالذرَّة يتصرَّف كموجة بحيث يكون طول محيط المدار الذي يوجد فيه الإلكترون مساويًا لعدد صحيح من الاطوال الموجية للإلكترون، فيُحدث الإلكترون رنينًا في مداره. (**الشكل 7-7b**). ويمثِّل كل من الأطوال الموجية التي يحدث عندها رنين للإلكترون **حالة كم Quantum state**. وتشكِّل الإلكترونات في ذرّة الكم سحابة إلكترونية من حالات كمّية مُتداخِلة حول نواة الذرَّة. وإن شكل حالة الكم وطاقتها يحدّدان الخصائص الكيميائية للعنصر.

نشاط 7-1 تطوُّر النموذج الذرّي

سؤال الاستقصاء	كيف تغيَّر مفهوم النموذج الذرّي عبر السنين؟
الموادّ المطلوبة	ملصق كبير الحجم، إنترنت، أقلام.

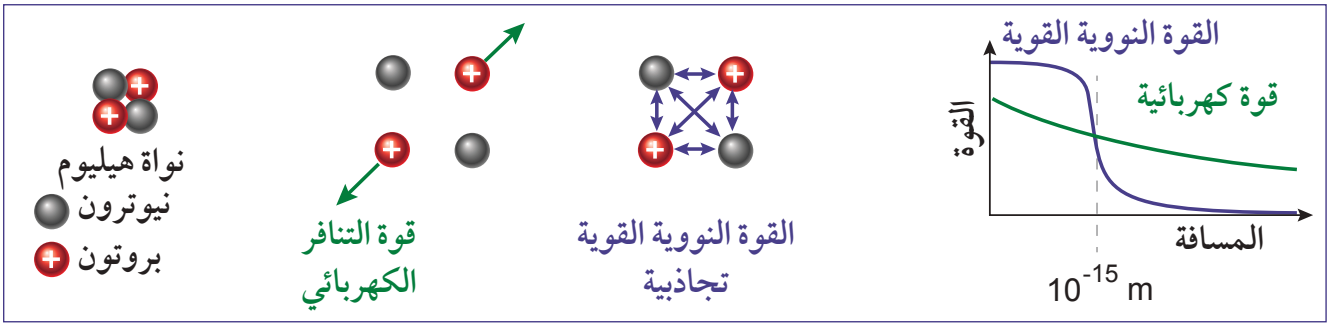
خطوات التجربة

1. ابحث في تاريخ تطوُّر نموذج الذرَّة
2. ما الوصف الذي وضعه الفلاسفة اليونانيون للذرة؟ متى كان ذلك؟ ما الشيء الذي أغفله هذا النموذج؟
3. ما الفكرة التي قدمها جون دالتون؟ متى كان ذلك؟ كيف توصَّل إلى تلك النتيجة؟ وما أوجه القصور في طرحه؟
4. ما الفكرة التي قدمها جي جي طومسون؟ متى كان ذلك؟ كيف توصَّل إلى تلك النتيجة؟ ما أوجه القصور في طرحه؟
5. ماذا استنتج رذرفورد؟ متى كان ذلك؟ ما الاسم الآخر لنموذجه؟
6. املأ الجدول لتنظيم أفكارك.
7. رتِّب النتائج التي توصَّلت إليها وفق إطار زمني، وارفق عملك برسم بياني. لخِّص النتائج بجدول خاص بك.

	الفلاسفة اليونانيون	جون دالتون	جي جي طومسون	إرنيست رذرفورد
الفترة الزمنية				
وصف النموذج الذرّي				
كيف توصَّل إلى الاستنتاج؟				
ما أوجه قصور النموذج؟				

القوى داخل النواة

تحتوي الذرَّة على البروتونات والنيوترونات. معلوم أنّ البروتونات لها شحنة كهربائية موجبة وأنّ النيوترونات ليست لها أي شحنة، فكيف تحافظ النواة على تماسكها ووحدتها، رغم أن قوة التنافر الكهربائي بين البروتونات قوية جدًّا وهي تحاول دائمًا تفتيت النواة؟ الجواب هو أن هناك قوة كبيرة تعمل على تجاذب مكوِّنات النواة؛ ولابد أن تكون أقوى من قوّة التنافر الكهربائي بين البروتونات. تلك القوة التجاذبية تُسمّى **القوّة النووية القوية Strong nuclear force**.

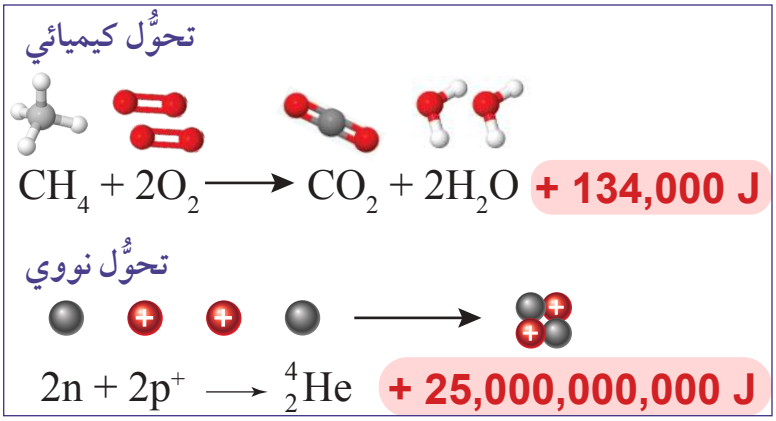


الشكل 7-8 القوى داخل النواة.

تجذب القوة النووية البروتونات والنيوترونات بعضها إلى بعض، بغضّ النظر عن شحنتها. وما دام هناك العدد الكافي من النيوترونات، فإن تلك القوة النووية تتغلَّب على قوة التنافر الكهربائية. وهذا هو سبب وجود نيوترون واحد على الأقل لكل بروتون في الأنوية التي تكون أكبر من ذرَّة الهيدروجين. فإذا ازداد عدد البروتونات في النواة، فلا بد من ازدياد عدد النيوترونات، لكي تبقى النواة مستقرَّة. فذرَّة الذهب مثلًا تحتوي على 79 بروتونًا و 118 نيوترونًا.

القوة النووية القوية هي قوة غريبة، لأنَّها تنخفض بسرعة عند مسافات تزيد على 10^{-15}m. وهذا هو سبب تسميتها بالقوة القصيرة المدى، لأنها تكون فعّالة فقط داخل النواة. وبما أنها قوة قصيرة المدى، فإنّها تكون معدومة وأضعف من القوة الكهربائية خارج النواة.

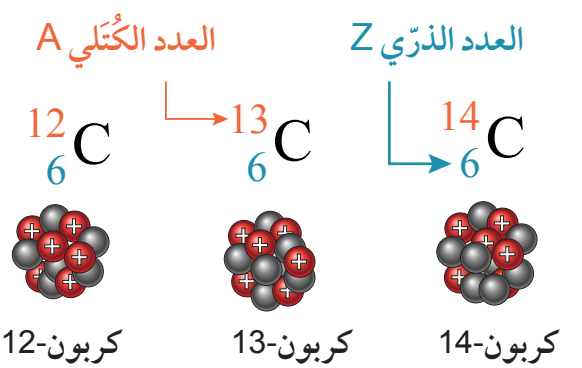
تكون القوى داخل النواة هائلة، حيث تنتج عنها طاقة كبيرة إذا ما تحوَّلت النواة إلى نواة أخرى. فالطاقة الناتجة عن تحوُّل جرام واحد من المادة في تفاعُل نووي تساوي 190,000 مرّة اكبر من الطاقة التي تنتج عن تفاعُل كيميائي لجرام واحد من المادة نفسها. يوضح **(الشكل 7-9)** فرق الطاقة بين تفاعل نووي و تفاعل كيميائي.



الشكل 7-9 مقارنة بين كمّية الطاقة الناتجة من تفاعل كيميائي، وآخر نووي.

النظائر

يكون لذرّات العنصر الواحد العدد نفسه من البروتونات، لكنَّ عدد النيوترونات قد يختلف بين ذرَّة وأخرى. **النظائر Isotopes** هي الذرَّات التي لها العدد نفسه من البروتونات وأعداد مختلفة من النيوترونات. فعيّنة عشوائية من عُنصر الكربون مثلًا تحتوي على عدّة نظائر من الكربون كل منها يحتوي على 6 بروتونات. ولكن واحدًا منها يحتوي على 6 نيوترونات والنظير الثاني على 7 نيوترونات والثالث على 8 نيوترونات (**الشكل 7-10**).



النظير	عدد البروتونات	عدد النيوترونات	المجموع
كربون-12	6	6	12
كربون-13	6	7	13
كربون-14	6	8	14

الشكل 7-10 أنوية ثلاثة نظائر لعُنصر الكربون.

العدد الكُتَلي A هو مجموع البروتونات والنيوترونات الموجودة داخل نواة الذرَّة.

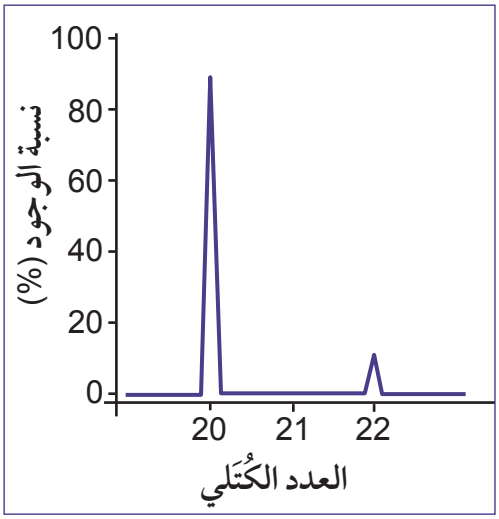
تتميَّز النظائر بأن لها أعدادًا كُتَلية مُختلفة. الكربون-12 هو واحد من نظائر عنصر الكربون، ويحتوي على 6 بروتونات و6 نيوترونات، ويكون العدد الكُتَلي له 12. في حين أن الكربون-13 يحتوي على 6 بروتونات و7 نيوترونات ويكون عدده الكُتَلي 13. يمكن كتابة النظير بكتابة رمز العنصر مع وضع العدد الكُتَلي أعلى يسار الرمز، فمثلًا C-13 أو كربون-13 هو نظير لعنصر كربون عدده الكُتَلي 13. توضِّح **المعادلة 7-1** العلاقة بين عدد النيوترونات N وعدد البروتونات Z والعدد الكُتَلي A للذرَّة.

1-7 العدد الكُتَلي

$$A = Z + N$$

A	العدد الكُتَلي (عدد النيوكليونات)
Z	العدد الذرّي (عدد البروتونات)
N	عدد النيوترونات

وإذا اخترنا أي عيّنة عشوائية من أي عنصر نجد أنها تحتوي على خليط من النظائر لذلك العنصر. يمكن قياس عدد النظائر في أي عيّنة باستخدام جهاز مطياف الكتلة، وهو يعتمد على تفاعُل النظائر مع مجالَيْن كهربائي ومغناطيسي. عند وضع عيّنة من عنصر النيون في هذا الجهاز، يتبيّن أن العدد الأكبر من النظائر لعُنصر النيون هو نيون-20 مع وجود لكمّية قليلة من نظير نيون-22. يوضِّح **الشكل 7-11** أن نسبة وجود نيون-20 إلى نيون-22 هي 9 إلى 1.



الشكل 7-11 الطيف الكُتَلي للنيون كما يظهره مطياف الكتلة..

تقويم الدرس 7-1

1. أي مما يأتي حجمه أقرب إلى حجم نواة الذرَّة؟
   a. بروتون
   b. إلكترون
   c. ذرَّة هيدروجين
   d. نظير كربون-12.

2. عنصر تحتوي نواته على 19 بروتونًا و 20 نيوترونًا. كم تبلغ كتلة ذرَّة هذا العنصر؟
   a. 6.528×10^{-29}kg
   b. 6.528×10^{-26}kg
   c. 6.528×10^{-27}kg
   d. 3.350×10^{-26}kg

3. وضّح الأدلة على أن النواة صغيرة الحجم وذات كتلة كبيرة وتحمل شحنة موجبة.

4. صف تاريخيًّا ثلاثة تغيُّرات طرأت على فهمنا لخصائص الذرَّة منذ العام 1850.

5. عَرِّف النيوكليون. ماذا يمثّل عدد النيوكليونات في الذرَّة؟

6. عنصر عدده الكُتلي A = 84 وعدد نيوتروناته N = 48. مستعينًا بالجدول الدوري الحديث، اذكر اسم العنصر.؟

7. كتلة البروتون تساوي 1836مرَّة كتلة الإلكترون. إذا تمّ حساب كتلة الذرَّة بحساب كتلة البروتونات والنيوترونات داخل النواة فقط، فما نسبة الخطأ في الحساب؟

8. ما عدد النيوترونات في نواة نظير الذهب ^{194}Au؟ (يمكنك استخدام الجدول الدوري).

9. في نموذج رذرفورد للذرَّة، لماذا لا تُطرَد إلكترونات الكربون إلى خارج الذرَّة بواسطة الإلكترونات الأخرى؟

10. اشرح كيف أدَّت تجربة التشتُّت لرذرفورد إلى أن الشحنة الموجبة للذرَّة يجب أن تكون مُركّزة في مكان مُحدَّد، وليست منتشرة على كامل حجم الذرَّة.

الدرس 7-2
النشاط الإشعاعي

قد تتساءل عن طريقة تصنيع الصفحات الورقيّة، واللفائف البلاستيكيّة، ورقائق الألومنيوم لتكون لها سماكة ثابتة. يتم استخدام مواد نشطة إشعاعيًّا للحفاظ على سماكة مُنتظمة، حيث يتم وضع مادة تُشعّ جُسيمات بيتّا أسفل الورقة التي تُصنَّع. بينما يوضع كاشف فوق الورقة نفسها ليقيس الإشعاع الذي يعبر الورقة.

الشكل 7-12 معمل تصنيع الورق.

إذا ازدادت كميّة الإشعاع المقيس، تكون الأوراق رقيقة جدًّا، ويتم ضبط الأسطوانات لجعل الورق أسمك. وإذا نقصت كميّة الإشعاع المقيس بواسطة العدّاد، تكون الأوراق سميكة جدًّا ويتم ضبط الأسطوانات وفقًا لذلك.

مخرجات التّعلُّم

P1115.1 يصف الطبيعة التلقائية والعشوائية لانحلال النواة وخصائص الإشعاع النووي ألفا (α) وبيتا (β) وجاما (γ).

P1115.2 يكتب معادلات التفاعُل النووي مع الأخذ في الاعتبار قوانين حفظ الكتلة والشحنة والطاقة.

P1115.3 يناقش بعض الاستخدامات الشائعة للنظائر المُشعّة ومصادر الخلفية الإشعاعية.

المفردات

Radioisotopes	نظائر مشعّة
Radioactive decay	انحلال إشعاعي
Alpha decay	انحلال ألفا
Beta decay	انحلال بيتا
Positron	بوزيترون
Neutrino	نيترينو
Gamma decay	انحلال جاما
Decay series	سلسلة الانحلال
Radioactive tracers	آثار النشاط الإشعاعي
Background radiation	خلفيّة إشعاعية

الاستقرار والنظائر

سؤال للمناقشة

لماذا تكون بعض النظائر مشعّة؟

تحتوي كلّ ذرّة من ذرّات الليثيوم على ثلاثة بروتونات. لكنّها لا تتماثل في عدد نيوتروناتها. تحتوي عيّنة ليثيوم من مصدر طبيعي من الأرض على:

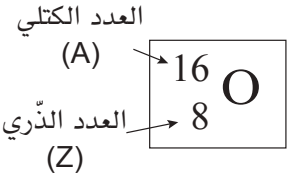
- 93 % من ذرّات نظير الليثيوم -7.
- 7 % من ذرّات نظير الليثيوم -6.
- لا شيء من نظيرَي الليثيوم -5 و -8.

لا نجد أيًّا من نظيرَي الليثيوم 5 أو 8، لأنهما غير مستقرَّين. ذلك أن احتواء النواة على عدد صغير جدًّا أو على عدد كبير جدًّا من النيوترونات يؤدّي إلى عدم استقرار النواة.

1. تكون النواة التي تحتوي على عدد قليل جدًّا من النيوترونات غير مستقرَّة، لأن قوة التجاذب بين النيوترونات والبروتونات لا تستطيع التغلّب على قوة التنافر بين البروتونات.
2. تكون النواة التي تحتوي على عدد كبير جدًّا من النيوترونات غير مستقرَّة أيضًا، لأنها قد تنتقل إلى طاقة أقلّ بتغيير النيوترون إلى بروتون وإلكترون، كما سنرى في حالة انحلال β في الصفحات القادمة.

يُظهر **الشكل 7-13** نظائر العناصر الثماني الأولى. تكون كل النظائر الملوّنة بالأحمر غير مستقرّة، في حين أن النظائر الملوّنة بالأخضر تكون مستقرّة.

جدول نظائر العناصر من 1 إلى 8.



نواة مستقرة

$^{16}_{8}O$

نواة غير مستقرة

$^{15}_{8}O$

عدد النيوترونات (N)	1	2	3	4	5	6	7	8
10				$^{14}_{4}Be$	$^{15}_{5}B$	$^{16}_{6}C$	$^{17}_{7}N$	$^{18}_{8}O$
9			$^{12}_{3}Li$	$^{13}_{4}Be$	$^{14}_{5}B$	$^{15}_{6}C$	$^{16}_{7}N$	$^{17}_{8}O$
8		$^{10}_{2}He$	$^{11}_{3}Li$	$^{12}_{4}Be$	$^{13}_{5}B$	$^{14}_{6}C$	$^{15}_{7}N$	$^{16}_{8}O$
7		$^{9}_{2}He$	$^{10}_{3}Li$	$^{11}_{4}Be$	$^{12}_{5}B$	$^{13}_{6}C$	$^{14}_{7}N$	$^{15}_{8}O$
6	$^{7}_{1}H$	$^{8}_{2}He$	$^{9}_{3}Li$	$^{10}_{4}Be$	$^{11}_{5}B$	$^{12}_{6}C$	$^{13}_{7}N$	$^{14}_{8}O$
5	$^{6}_{1}H$	$^{7}_{2}He$	$^{8}_{3}Li$	$^{9}_{4}Be$	$^{10}_{5}B$	$^{11}_{6}C$	$^{12}_{7}N$	$^{13}_{8}O$
4	$^{5}_{1}H$	$^{6}_{2}He$	$^{7}_{3}Li$	$^{8}_{4}Be$	$^{9}_{5}B$	$^{10}_{6}C$	$^{11}_{7}N$	$^{12}_{8}O$
3	$^{4}_{1}H$	$^{5}_{2}He$	$^{6}_{3}Li$	$^{7}_{4}Be$	$^{8}_{5}B$	$^{9}_{6}C$	$^{10}_{7}N$	
2	$^{3}_{1}H$	$^{4}_{2}He$	$^{5}_{3}Li$	$^{6}_{4}Be$	$^{7}_{5}B$	$^{8}_{6}C$		
1	$^{2}_{1}H$	$^{3}_{2}He$	$^{4}_{3}Li$	$^{5}_{4}Be$	$^{6}_{5}B$			
0	$^{1}_{1}H$	$^{2}_{2}He$						

عدد البروتونات (Z)

الشكل 7-13 نظائر العناصر الثماني الأولى. تكون النظائر الملوّنة بالأخضر مستقرة في حين أن النظائر الملونة بالأحمرتكون غير مستقرّة.

النشاط الإشعاعي

تتحوّل الأنوية غير المستقرَّة تلقائيًّا إلى أنوية أخرى منتجة طاقة خلال تلك العملية. تسمّى هذه العملية **النشاط الإشعاعي Radioactivity**. وتسمّى النظائر غير المستقرَّة **النظائر المشعّة Radioisotopes**.

سؤال للمناقشة

ما الفرق بين النظائر المستقرَّة والنظائر غير المستقرَّة؟

يحتوي اليورانيوم الطبيعي على 99.27 % من اليورانيوم -238 و 0.72 % من اليورانيوم -235. يوضِّح **الشكل 7-14** صخرة ذات قشرة صفراء من أكسيد اليورانيوم. تكون كل نظائر اليورانيوم غير مستقرَّة، لأن العدد الذرّي لليورانيوم هو $Z = 92$. ومع هذا العدد الكبير من البروتونات، لا يتوفَّر العدد اللازم من النيوترونات لجعل نواة اليورانيوم مستقرة. تتحوّل أنوية اليورانيوم ببطء إلى أنوية رصاص، منتجة طاقة تستخدم في محطات الطاقة النووية لتوليد الكهرباء.

الشكل 7-14 أكسيد اليورانيوم على سطح صخرة.

ولكي نحدِّد أن النواة غير مستقرة، علينا في الغالب معرفة عدد نيوتروناتها. نحصل على ذلك من خلال العدد الكُتلي (A) والعدد الذرّي (Z) باستخدام **المعادلة 7-1**. تُكتب قيمة كل من A و Z في ترميز نظير العنصر على الشكل ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$. يشير الرمز العلوي يسار العنصر إلى العدد الكتلي A، ويشير الرمز السفلي إلى العدد الذرّي Z. لاحظ أن البروتون يُكتب أحيانًا ${}^{1}_{1}\mathrm{p}$، لأن لديه نيكليونًا واحدًا وشحنة موجبة واحدة ($Z = 1$). كما أن النيوترون يُكتب ${}^{1}_{0}\mathrm{n}$، لأنه متعادل كهربائيًّا ($Z = 0$).

مثال 1

كم نيوترونًا في نواة نظير الكربون -14؟

المطلوب: عدد النيوترونات N.

المُعطيات: نظير الكربون -14.

العلاقات: $A = N + Z$

الحل: لنظير الكربون -14، $A = 14$ و $Z = 6$ وهو يُكتب على الصورة ${}^{14}_{6}\mathrm{C}$. لحساب عدد النيوترونات N، نستخدم المعادلة $A = N + Z$، فنحصل على:

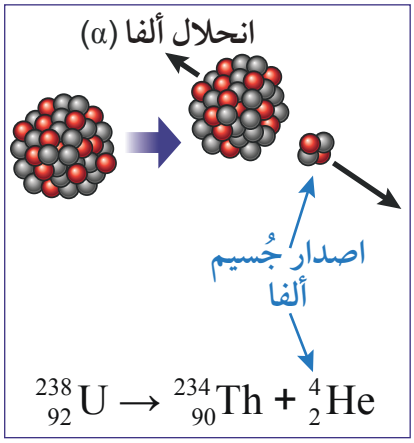
$$N = A - Z = (14 - 6) = 8$$

الانحلال الإشعاعي

الانحلال الإشعاعي Radioactive decay عمليّة طبيعيّة تتحوَّل فيها النواة تلقائيًّا إلى نواة أخرى. يصاحب هذا التغيّر تحرّر كميّة من الطاقة. وقد أطلقت هذا المصطلح عالمة الكيمياء الفرنسيّة ماري كوري. وأصبح يُرمز إلى الأشكال الثلاثة الأكثر شيوعًا للانحلال بالأحرف الثلاثة الأولى اليونانيّة: ألفا (α) وبيتّا (β) وجاما (γ). ينتج انحلال ألفا وبيتا من إصدار الجُسيمات من النواة. أمّا انحلال جاما، فهو تحرّر لفوتون ذي طاقة عالية. وبالتالي يغيّر انحلال ألفا وبيتا العدد الذرّي للذرَّة المُنحلّة، في حين أن انحلال جاما لا يغير العدد الذري أو الكتلي للذرة.

انحلال ألفا

معلوم أن جُسيم ألفا هو نواة ذرّة الهيليوم، وهو يتكون من بروتونين ونيوترونين من دون أي إلكترونات، ويُكتب على الشكل $^{4}_{2}\mathrm{He}$. وبالتالي تكون شحنة جُسيم ألفا في غياب الإلكترونات شحنة موجبة؛ فيختلف بذلك عن ذرَّة الهيليوم الطبيعيّة. عند حدوث **انحلال ألفا Alpha decay**، تُصدر النواة جُسيم ألفا الذي يحمل كميّة بسيطة من الطاقة الحركيّة الناتجة من تفاعل نووي. يُظهر **الشكل 7-15** ذرَّة يورانيوم-238 تنحَل إلى ذرَّة ثوريوم-234.



الشكل 7-15 انحلال اليورانيوم.

- في انحلال α، تفقدُ النواة المُشعّة بروتونين ونيوترونين.
- ينخفض العدد الذرّي بمقدار 2.
- ينخفض العدد الكُتَلي بمقدار 4.

نلاحظ نقطتين مهمتين في تفاعل الانحلال النووي في **الشكل 7-15**، هما:

1. أنّ العدد الذرّي (Z) في طرف المعادلة الأيسر يساوي مجموع العددين الذريين في طرفها الأيمن، أي: $92 = 90 + 2$
2. أن العدد الكُتَلي (A) في طرف المعادلة الأيسر يساوي مجموع عددي الكتلة في طرفها الأيمن: $238 = 234 + 4$

يجب أن تكون التفاعلات النووية موزونة لكي تحافظ على كل من الشحنة والعدد الذرّي. وفي ما يأتي مثالان آخران على انحلال α هما لنظير الراديوم-224 ونظير البولونيوم-212:

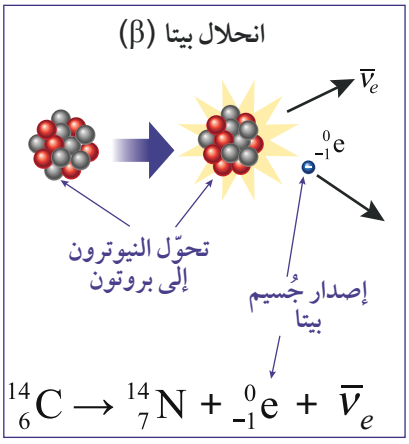
$$^{224}_{88}\mathrm{Ra} \rightarrow {}^{220}_{86}\mathrm{Rn} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \qquad ^{212}_{84}\mathrm{Po} \rightarrow {}^{208}_{82}\mathrm{Pb} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$$

انحلال بيتا السالب (β^-)

يحدث في بعض الأنوية النشطة إشعاعيًّا، أن يتحول النيوترون تلقائيًّا الى بروتون وإلكترون وجُسيم آخر، يُسمّى **نيوترينو مضاد Antineutrino**.

$$\underset{\text{نيوترون}}{{}^{1}_{0}n} \rightarrow \underset{\text{بروتون}}{{}^{1}_{1}p} + \underset{\text{إلكترون (جسيم بيتا)}}{{}^{0}_{-1}e} + \underset{\text{نيوترينو مضاد}}{{}^{0}_{0}\overline{\nu}_e}$$

يُسمّى هذا التحوُّل **انحلال بيتا** (β) **Beta decay**. فعندما تخضع النواة لانحلال بيتا، تصدر إلكترونًا ذا طاقة. جُسيم (β^-) هو تاريخيًّا اسم الإلكترون. وقد اكتُشف كل من إشعاعي α و β وسُمّي قبل أن تُعرف ماهيته.



الشكل 7-16 الكربون -14 مثال على انحلال β.

العدد الذرّي للإلكترون هو 1- (β^-)، لأن ذلك يسمح للمعادلات النوويّة التي تشتمل على إلكترون أن تحقِّق التوازن للأعداد الذرّية. لذلك يكون الرمز النووي للإلكترون (جُسيم بيتا) هو ${}^{0}_{-1}e$.

- خلال عملية انحلال بيتا، يتحوَّل نيوترون إلى بروتون وإلكترون.
- يزداد العدد الذرّي بمقدار واحد، لأن هناك بروتونًا إضافيًّا واحدًا.
- لا يتغيَّر العدد الكُتلي، لأن مجموع أعداد البروتونات والنيوترونات لا يتغيّر.

مثال 2

يتعرّض نظير الصوديوم -24 لانحلال بيتا. ما النظير الناتج؟

المطلوب: النظير الجديد.

المُعطيات: انحلال بيتا للصوديوم -24.

العلاقات: لانحلال بيتا، العدد الكتلي A لا يتغيّر بينما يزداد العدد الذري Z إلى Z + 1.

الحل:

1. العدد الذرّي للصوديوم Z = 11.
2. بعد انحلال بيتا Z = 11 + 1 = 12
3. العدد الذرّي 12 هو العدد الذرّي لعنصر المغنيسيوم.
4. العدد الكُتَلي لا يتغيّر، لذلك يكون الناتج نظير المغنيسيوم-24 ويرمز له ${}^{24}_{12}Mg$.

$$^{24}_{11}Na \longrightarrow {}^{24}_{12}Mg + {}^{0}_{-1}e + {}^{0}_{0}\overline{\nu}_e$$

مثال 3

عندما ينحل نظير الليثيوم-8 مصدرًا جسيمات بيتا، ما النظير الناتج؟

المطلوب: النظير الجديد.

المُعطيات: انحلال بيتا لليثيوم-8

العلاقات: في انحلال بيتا يتغير العدد الذري ويبقى العدد الكتلي ثابتًا.

الحل: العدد الذري لليثيوم Z=3

عند انحلال بيتا السالب يزداد العدد الذري ويصبح 4 وهذا العدد هو لعنصر البريليوم-8

$$^{8}_{3}Li \longrightarrow {}^{8}_{4}Be + {}^{0}_{-1}e + {}^{0}_{0}\overline{\nu}_e$$

مثال 4

عندما ينحل نظير الكوبلت-60 مصدرًا جسيمات بيتا، ما النظير الناتج؟

المطلوب: النظير الجديد.

المُعطيات: انحلال بيتا للكوبلت-60

العلاقات: في انحلال بيتا يتغير العدد الذري ويبقى العدد الكتلي ثابتًا.

الحل: العدد الذري للكوبلت Z=27

عند انحلال بيتا السالب يزداد العدد الذري ويصبح 28 وهذا العدد هو لعنصر النيكل-60

$$^{60}_{27}Co \longrightarrow {}^{60}_{28}Ni + {}^{0}_{-1}e + {}^{0}_{0}\overline{\nu}_e$$

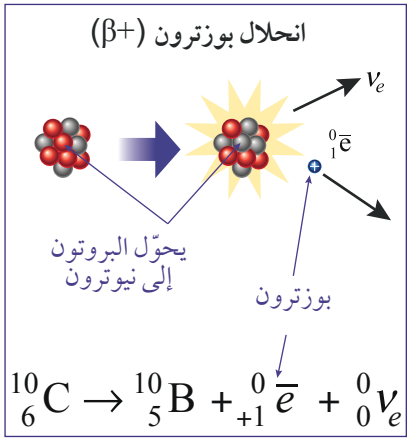
انحلال بيتا الموجب (البوزيترون) (β+) والنيوترينو والمادّة المضادّة

لاحظ العلماء أنه في عملية انحلال بيتا الموجب، هناك مصادر أخرى للطاقة غير تلك الناتجة من الإلكترونات. طرح العالم النمساوي باولي عام 1930 فكرة أن هناك جُسيمًا آخر ينتج خلال عملية انحلال بيتا لا شحنة له ولا كتلة (أو كتلة قليلة جدًّا). وسمّى الفيزيائي الإيطالي فيرمي هذا الجُسيم **بالنيوترينو Neutrino** عام 1934.

تقلّ كتلة النيوترينو 500 مرّة عن كتلة الإلكترون، وليس له أي شحنة. لذلك تكون عملية الكشف المخبري عن النيوترينو صعبة جدًّا، ولم يتم اكتشافه مخبريًّا حتى العام 1956. إلّا أن ما يزيد على 70 مليار نيوترينو تخترق مساحة مقدارها $1\ cm^2$ كل ثانية، بما فيها مساحة جسدك.

يُرمز إلى النيوترينو في عملية انحلال بيتا الموجب برمز النظير ${}^{0}_{0}\nu_e$ بصفرين يرمز أحدهما إلى العدد الكُتَلي ويرمز الثاني إلى العدد الذرّي. ويدل الرمز السفلي e على نيوترينو الإلكترون. وهناك ثلاثة أنواع من النيوترينو.

انحلال البوزترون



الشكل 7-17 الكربون -10 هو مثال على انحلال +β.

ينحلّ نظير الكربون -10 غير المستقر إلى البورون -10 المستقر في شكل آخر من انحلال بيتا، كما في **الشكل 7-17**. يتحوّل بروتون واحد إلى نيوترون وجُسيم مشحون موجب اسمه **البوزترون Positron**. يُرمز إلى البوزترون بـ ${}^{0}_{1}\bar{e}$ أو β^+، وهو إلكترون ذو شحنة موجبة.

البوزترون مثال على **المادة المضادة Antimatter**. للمادة المضادة شحنة معاكسة للمادة الطبيعية. يوضع خط فوق رمز المادة للدلالة على أنها مادة مضادة. و في انحلال بيتا السالب ينتج النيترينو المضاد و هو الجسيم المضاد للنيترينو في انحلال بوزترون، يتحول بروتون واحد إلى نيوترون وبوزترون.

- ينخفض العدد الذرّي بمقدار 1، وذلك لفقد بروتون واحد.
- لا يتغيّر العدد الكُتلي، لأن العدد الإجمالي للبروتونات والنيوترونات يبقى كما هو.

$$ {}^{1}_{1}p \longrightarrow {}^{1}_{0}n + {}^{0}_{+1}\bar{e} + {}^{0}_{0}\nu_e $$

مثالان على انحلال البوزترون (β+)

$$ {}^{15}_{8}O \rightarrow {}^{15}_{7}N + {}^{0}_{1}\bar{e} + {}^{0}_{0}\nu_e $$

$$ {}^{22}_{11}Na \rightarrow {}^{22}_{10}Ne + {}^{0}_{1}\bar{e} + {}^{0}_{0}\nu_e $$

مثال 5

عندما ينحل نظير الكربون-10 مصدرًا جسيمات بيتا الموجب (البوزيترون)، ما النظير الناتج؟

المطلوب: النظير الجديد.

المُعطيات: انحلال بيتا الموجب للكربون-10

العلاقات: في انحلال بيتا الموجب يتغير العدد الذري ويبقى العدد الكتلي ثابتًا.

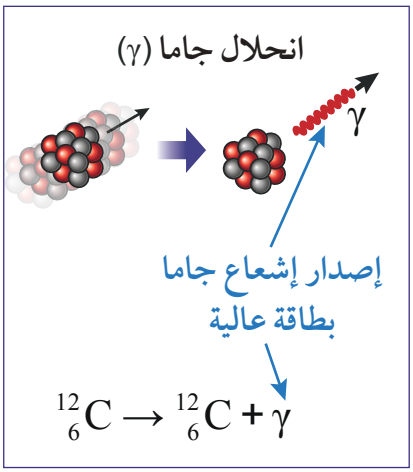
الحل: العدد الذري للكربون Z=6

عند انحلال بيتا الموجب يقل العدد الذري ويصبح 5 وهذا العدد هو لعنصر البورون-10

$$^{10}_{6}C \longrightarrow ^{10}_{5}B + \ ^{0}_{+1}\bar{e} + \ ^{0}_{0}\nu_e$$

انحلال جاما

تستطيع النواة أن تُصدر إشعاع جاما، وهو فوتون بتردُّد عالٍ لإشعاعات كهرومغناطيسيّة. يُسمّى تحرّر الفوتون هذا **انحلال جاما** (γ)، **Gama decay** ، وهو مبيّن في **الشكل 7-18**. عندما تصدر الأنوية إشعاع جاما، تنتقل النواة من طاقة نووية أعلى إلى طاقة نووية أدنى من دون أن يطرأ تغيُّر على العدد الذرّي أو العدد الكُتلي. فذرّة الكربون تبقى ذرّة كربون، حتى بعد أن تطلق إشعاع جاما.



الشكل 7-18 تحرّر إشعاع جاما من الكربون.

مثالان على انحلال جاما

$$^{238}_{92}U \rightarrow {}^{238}_{92}U + \gamma$$

$$^{60}_{28}Ni \rightarrow {}^{60}_{28}Ni + \gamma$$

غالبًا ما يحدث انحلال جاما، نتيجة لبقايا الطاقة من انحلال آخر، أو من تفاعُل نووي ما. عندما تتعرَّض النواة لانحلال ألفا أو بيتا، يظهر بعض التغيُّر في طاقة الربط إذ يتحول إلى طاقة حركيّة للجُسيم الناتج. وتضع الطاقة المتبقيّة النواة في حالة إثارة. تنتقل الذرّة المُثارة الى حالة طاقة أقلّ، عن طريق تحرير إشعاع جاما. تقع إشعاعات جاما في منطقة الطاقة المرتفعة والتردُّد العالي من الطيف الكهرومغناطيسي. تمتلك إشعاعات جاما قدرة اختراق قوية جدًّا، حتى أننا نحتاج لإيقافها إلى موادّ ذات عدد ذرّي مرتفع وكثافة مرتفعة، مثل الرصاص. يُلخِّص **الجدول 7-1** خصائص أنواع الإشعاعات المذكورة.

	جُسيم ألفا	جُسيم بيتا	إشعاع جاما
الطبيعة	نواة الهيليوم	إلكترون	فوتون
الشحنة	+2e	-e	0
الكتلة	6.64×10^{-27} kg	9.1×10^{-31} kg	0
المدى (القدرة على النفاذ)	بضعة سنتيمترات في الهواء	بضعة مليمترات في معدن	عدة سنتيمترات في الرصاص

الجدول 7-1 خصائص الأنواع المختلفة للإشعاع.

قياس الإشعاع

تُستخدَم طاقة الإشعاع للكشف عن الإشعاع. فعندما يتفاعُل الإشعاع مع المادة، فإنه ينتقل إليها طاقة، مسبِّبًا عددًا من التغيُّرات على المستويين الذرّي والجُزيئي. تقوم أجهزة كجهاز عدّاد جيجر بالكشف عن تلك التغيُّرات. ويستخدم الجهاز عمليات إلكترونيّة لعرض النتائج على شكل فرقعة صوتيّة مسموعة (**الشكل 7-19**). تُستخدم كواشف الإشعاع للحفاظ على بيئة عمل آمنة حول مصادر الإشعاع.

الشكل 7-19 مقياس الإشعاع.

كتابة المعادلات النووية

تُمثَّل التفاعُلات النووية بمعادلات تفاعُل نووي، تمامًا كما هو الأمر في التفاعُلات الكيميائيّة. تتكون كل معادلة تفاعُل نووي متفاعُلات ونواتج. لنفترض التفاعُل النووي الذي ينتج الكربون-14 في الغلاف الجوّي. في هذا التفاعُل النووي، يتفاعل النيوترون مع النيتروجين-14، لينتج الكربون-14 مع بروتون.

المتفاعلات $^{1}_{0}n + {}^{14}_{7}N \rightarrow {}^{14}_{6}C + {}^{1}_{1}p$ النواتج

موازنة العدد الكُتلي:

العدد الكُتلي الكلّي للمُتفاعلات = العدد الكُتلي الكُلّي للنواتج

$1 + 14 = 14 + 1$

موازنة العدد الذري (الشحنة):

الشحنة الكلّية للمتفاعلات = الشحنة الكلّية للنواتج

$1 + 6 = 7 + 0$

الشكل 7-20 كتابة التفاعُلات النووية.

يُظهر **الشكل 7-20** قاعدتَيْ كتابة التفاعُلات النووية.

- يجب أن يكون العدد الكتلي الكُلّي للمُتفاعُلات مساويًا للعدد الكُتلي الكلّي للنواتج.
- ويجب أن يكون العدد الذري الكُلّي (الشحنة) للمُتفاعُلات مساويًا للعدد الذري الكُلّي (الشحنة) للنواتج.

يُظهر **الجدول 7-2** الشكل العام لتفاعُلات كلّ من انحلالات ألفا وبيتا وجاما. تظهر إلى اليسار تغيُّرات العدد الكُتَلي وعدد النيوترونات والعدد الذرّي.

نوع الانحلال	المعادلة	العدد الذرّي Z	العدد الكُتلي A	عدد النيوترونات N
α	${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He$	$Z \rightarrow Z-2$	$A \rightarrow A-4$	$N \rightarrow N-2$
β^-	${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}e$	$Z \rightarrow Z+1$	لا تغيير	$N \rightarrow N-1$
β^+	${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + {}^{0}_{+1}\bar{e}$	$Z \rightarrow Z-1$	لا تغيير	$N \rightarrow N+1$
γ	${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z}Y + {}^{0}_{0}\gamma$	لا تغيير	لا تغيير	لا تغيير

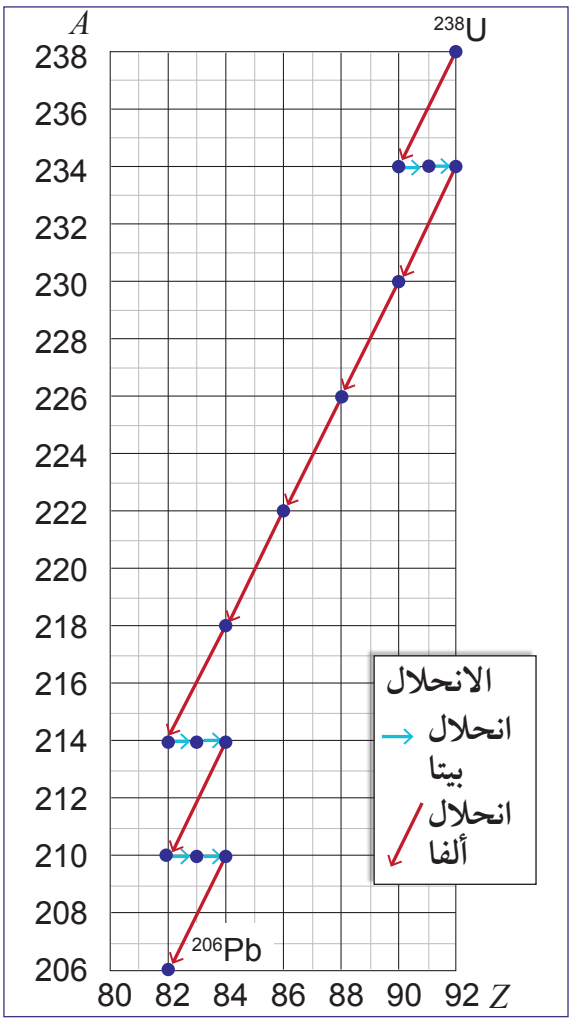
الجدول 7-2 تفاعُلات الانحلال الإشعاعي.

لاحظ أنّ العدد الكُتَلي لا يتغيَّر في كل من انحلاليّ بيتا وجاما.

يبقى كل من العدد الذرّي والعدد الكُتَلي وعدد النيوترونات، كما هو دون تغيير في انحلال جاما.

سلسلة الانحلال

تُصدر النواة غير المستقرّة جُسَيمات ألفا وبيتا إلى أن تصبح تلك النواة مستقرّة. تُمثِّل **سلسلة الانحلال Decay series** مجموعة من الانحلالات النووية التي تحدث قبل أن تصبح النواة مستقرّة. يُظهر **الشكل 7-21** المسار الذي تتبّعه نواة اليورانيوم-238 خلال تحوُّلها إلى ذرّة رصاص مستقرة. لاحظ أنّ الرصاص يتشكّل ثلاث مرّات خلال العملية لكي تصبح النواة مستقرّة. تظلّ النواة في المرتين الأولى والثانية لتشكُّل الرصاص غير مستقرَّة، وتكون قد تعرَّضت للمزيد من انحلال بيتا. ليس لكل النظائر النشطة إشعاعيًّا انحلالات متعدِّدة، فبعضها يتعرَّض لانحلال واحد ليصبح مستقرًّا. ^{60}Co هو نظير غير مستقرّ، وينحلّ إلى نظير آخر مستقر ^{60}Ni بخطوة واحدة.



الشكل 7-21 سلسلة انحلال اليورانيوم-238.

مثال 6

تنحلّ نواة البيزموث-210 فتُصدِر جُسيم بيتا ثمّ جُسيم ألفا. العدد الذرّي للبيزموث هو 83.

a. جد كلًّا من العدد الذرّي والعدد الكُتلي للنواة، بعد إصدار جُسَيم بيتا.

b. جد كلًّا من العدد الذرّي والعدد الكُتلي للنواة، بعد إصدار جُسَيم ألفا.

المطلوب: A بعد الانحلال، Z بعد الانحلال

المُعطيات: الكتلة الذرّيّة A = 210 العدد الذرّي Z = 83

الحل:

a. عندما يتحرَّر جُسَيم بيتا، لا تتغيَّر الكُتلة الذرّيّة؛ لكن يزداد العدد الذرّي بمقدار 1.

$$Z = 83 + 1 = 84 \qquad {}^{210}_{83}Bi \rightarrow {}^{210}_{84}X + {}^{0}_{-1}e$$

b. عندما يتحرَّر جُسَيم ألفا، تتناقص الكُتلة الذرّيّة بمقدار 4 وينقص العدد الذرّي بمقدار 2.

$$Z = 84 - 2 = 82 \qquad {}^{210}_{84}X \rightarrow {}^{206}_{82}Y + {}^{4}_{2}He$$

تطبيقات النظائـر المشـعة

تُصدر النظائر المُشعَّة إشعاعات. ويستطيع الكاشف أن يتتبَّع المسار الذي تسلكه النظائر المُشعة. يسمح إصدار الإشعاعات والكشف عنها باستخدام النظائر المُشعَّة في مختلف المجالات، بما فيها التشخيص والطب والصناعة والزراعة.

النظائر المُشعَّة في التصوير الطبّي

الشكل 7-22 ماسح PET/CT.

تُعطى المواد المُشعة للمريض عن طريق الفم، أو الحقن أو الاستنشاق. تنتقل المادة المُشعة عبر الجسم، ويتم تتبُّع المسار الذي تسلكه المادة عن طريق كاشف. تُعرف تلك المواد المُشعة بالأثر المُشع. يُصدِرُ الأثر إشعاعات جاما التي قد تخترق العظام والأنسجة، ما يُسهِّلُ الكشف عنها.

يمكن التقاط الصور عن طريق SPECT (التصوير المقطعي المُحَوْسَب بإصدار الفوتون) أو ماسح PET (التصوير المقطعي بإصدار البوزترون). يُظهِرُ **الشكل 7-22** ماسح PET .

النظائر المُشعّة في الزراعة

تُستخدم النظائر المُشعة لقتل البكتيريا التي تسبِّب إبطاء عملية إنضاج الفواكه. ويُستخدَم الأثر الإشعاعي في الزراعة، حيث يُضاف إلى السماد ليسمح لنا بدراسة عملية امتصاص السماد في النباتات وحركته. يُصدر الأثر جُسيمات بيتا التي تمّر عبر النبات بسهولة. ويكشف عدّاد جيجر مسار تلك الجُسيمات.

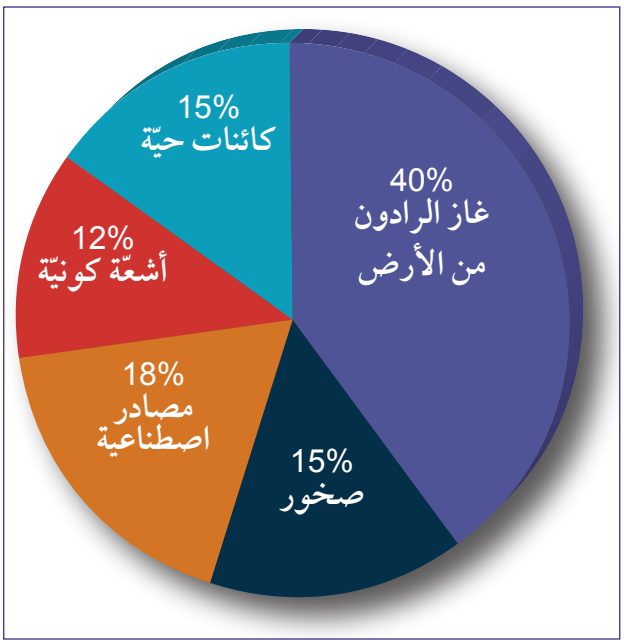
النظائر المُشعّة في الصناعة

الشكل 7-23 عدّاد جيجر يكشف عن تسرُّب في الأنبوب.

توجد صناعات كثيرة تستخدم النظائر المُشعّة. فالنظير المُشعّ الذي يُصدر جُسيمات بيتا يمكن أن يُستخدم للكشف عن التسرُّبات في خطوط الماء والغاز.يُذاب الملح المشع ويُدخَل في الأنبوبة، ثم يُستخدم عدّاد جيجر للكشف عن الإشعاع خارج الأنبوب. نحن نعلم أنّ جُسيمات بيتا تستطيع اختراق المعدن؛ فإذا كشف عدّاد جيجر العديد من الإشعاعات في مساحة ما، سنعلم أنّ هناك تسرُّبًا. (**الشكل 7-23**).

الخلفية الإشعاعية

يحدث الإشعاع من حولنا تلقائيًّا. إذا استخدمت كاشف الإشعاع في الغرفة، فسوف يلتقط أثرًا لإشعاع صادر، حتى لو لم يكن هناك مصدر فعلي للإشعاع. هذا الطيف المستمر لإصدار الإشعاع من البيئة المحيطة يُسمّى الخلفية الإشعاعية. قد تكون مصادر الخلفية الإشعاعية طبيعية أو اصطناعية. يُظهر **الشكل 7-24** النسبة المئوية للخلفية الإشعاعية من مصادر مختلفة. لاحظ أنّ 82% من الخلفية الإشعاعية تأتي فعليًّا من مصادر طبيعية.



الشكل 7-24 النسبة المئويّة للخلفية الإشعاعية من مصادر مختلفة.

المصادر الطبيعية للخلفية الإشعاعية

تتشكَّل المصادر الطبيعيّة من إشعاعات كونيّة مصدرها الشمس، ومن غاز الرادون الذي تصدره الصخور والأرض، ومن الإشعاعات الصادرة عن الكائنات الحية. تُطلق الكائنات الحية كمّيات صغيرة من الإشعاعات، لأنّ النباتات تمتصّ المواد المُشعّة (مثل غاز الرادون) من الأرض. وهي تنتقل إلى الحيوانات، عندما تستهلك النباتات.

المصادر الاصطناعية للخلفية الإشعاعية

على الرغم من عدم مساهمتنا في المصادر الطبيعية التي تسبِّب الخلفية الإشعاعية، فإن البشرية مسؤولة عن المصادر الاصطناعية. تتضمَّن تلك المصادر الأشعة السينية، واختبارات الأسلحة النووية، ومخلَّفات محطات الطاقة النووية.

هل الخلفية الإشعاعية مُضرّة؟

تأتي الخلفية الإشعاعية من مصادر طبيعية، نحن على تماسّ معها. لكن ما مقدار ضررها؟ تكون كمّية الخلفية الإشعاعية التي يتعرَّض لها الجسم، في معظم الحالات آمنة. يزداد التعرُّض للإشعاعات الكونية بازدياد الارتفاع، لكن التعرُّض لغاز الرادون والصخور يتناقص. ويكون النشاط الإشعاعي في الطوابق الأرضية أعلى عادةً من النشاط الإشعاعي في الطوابق المرتفعة. ويمكن تقليص التعرُّض للإشعاع باستخدام دروع من الرصاص، وبزيادة المسافة عن المصدر، وحتى الحدّ من زمن التعرُّض للإشعاع. تكون الاحتياطات ضرورية فقط عندما يصنّف الموقع على أنّه منطقة مرتفعة الإشعاع.

تقويم الدرس 2-7

1. يتعرَّض اليورانيوم-235 لانحلال بيتا بحساب معادلة التفاعُل النووي الآتية:

$$^{235}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{A}_{Z}\mathrm{X} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e}$$

ما العُنصر والنظير الناتج الذي يمثله الرمز X؟

2. يتعرَّض اليورانيوم-235 لانحلال إشعاعي، فينتج الثوريوم-231 وفق المعادلة الآتية:

$$^{235}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{231}_{90}\mathrm{Th} + {}^{A}_{Z}\mathrm{X}$$

   a. ما العدد الذرّي للجُسيم الناتج X؟
   b. ما اسم هذا الجُسيم؟ وما نوع الانحلال؟

3. تحدث عملية انحلال من مستويين، تبدأ بالأمريسيوم-240 وتنتهي بالبلوتونيوم-236، وهي موضَّحة بسهمين، مشار إليهما بالرمزين a و b.

ما نوع كل من هذين الانحلالين؟

$$^{240}_{95}\mathrm{Am} \xrightarrow{\text{(a)}} {}^{236}_{93}\mathrm{Np} \xrightarrow{\text{(b)}} {}^{236}_{94}\mathrm{Pu}$$

4. ينحلّ البيزموث-210 بانحلال بيتا، يليه إصدار جاما. اكتب علاقة التفاعُل مع العدد الذرّي والعدد الكُتَلي للأنوية الناتجة.

5. ينحلّ البلوتونيوم-239 بانحلال ألفا. اكتب معادلة هذا التفاعُل.

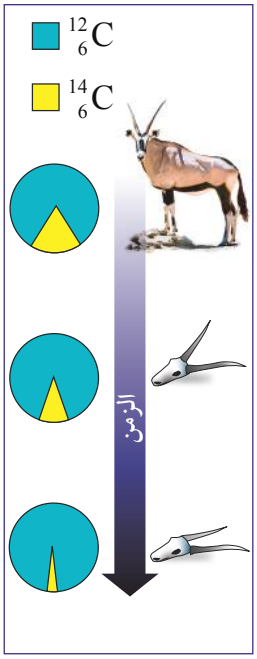
6. تبدأ سلسلة انحلال اليورانيوم – 238 وتنتهي بالرصاص – 206 وضح لماذا لا تكون نواة الرصاص – 214 نهاية هذه السلسلة

7. يمكن الكشف عن كميّة صغيرة من الخلفية الإشعاعية طوال الوقت، وفي كل الأماكن.

   a. أعطِ مصدرَين محدَّدين للخلفية الإشعاعية.
   b. اذكر طريقتين يمكن استخدامهما كدرع واقية من الإشعاعات المضرّة.

الدرس 7-3
عمر النصف

يُستخدم تأريخ الكربون كتقنية للمقارنة بين تركيز الكربون-14 والكربون-12 داخل العيّنات البيولوجية، ومعرفة عمرها. تعتبر نواتا النظيرين المعروفين الكربون-12 والكربون-13 نواتين مُستقرَّتين، في حين أن الكربون-14 نظير مُشعّ. يتشكَّل الكربون-14 في الطبقات العليا للغلاف الجوي، عن طريق التفاعُل بين نواة النيتروجين-14 والنيوترونات القادمة من الأشعة الكونية التي تدخل الغلاف الجوي. تتبادل الكائنات الحية الكربون-14 مع البيئة المُحيطة أما نسبة وجود هذا النظير إلى النظير الكربون-12 فتبلغ $1:10^{13}$. وعندما يموت الكائن الحي، يتوقّف تبادُل الكربون المشع مع البيئة المحيطة. ينحلّ الكربون-14 في الجسم بعمر نصف يصل إلى 5730 سنة.



الشكل 7-25 تأريخ الكربون

يُزوِّدنا هذا الانحلال بساعة طبيعية تبدأ بحساب الزمن من اللحظة التي مات فيها الكائن الحي. يُمكّننا تأريخ الكربون من قياس عمر عيّنة من ورق البردي المصري القديم والفحم المُحترِق في العصور القديمة. يمكننا أيضًا استخدام هذه التقنية لحساب عمر أي عينّة يزيد عمرها على 10 أضعاف عمر النصف، أي لغاية 57300 سنة. بعد هذه الفترة الزمنية، لا يبقى من الكربون-14 كمّية كافية لقياس الفترات الزمنية قياسًا دقيقًا.

مخرجات التّعلُّم

P1115.4 يوضح أهمية عمر النصف للنظائر المُشعّة، ويحسب النشاط الإشعاعي وعدد الأنوية المتبقية دون انحلال باستخدام المعادلات:

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \text{ و } N = N_0 e^{-\lambda t}$$

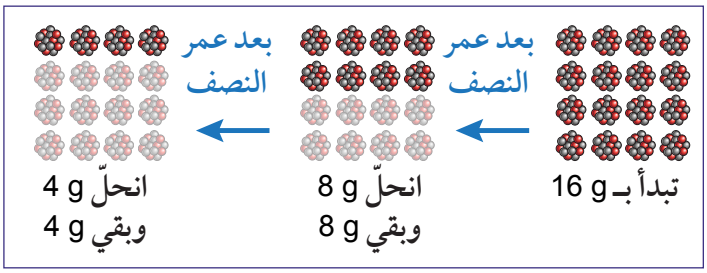
المفردات

Half-life	عمر النصف
Decay constant	ثابت الانحلال
Rate of decay	معدَّل الانحلال
Becquerel	بيكريل

عُمْر النصف

تنحلّ النظائر المُشعّة تلقائيًّا. ومع ذلك لا يمكن التنبُّؤ بانحلال نواة بمفردها، لأن النشاط الإشعاعي يختار الأنوية عشوائيًّا. تحتوي عيّنة نموذجية من المادة على 10^{20} نواة. وما يهمُّنا هو معدَّل سلوك هذا العدد من الأنوية. لذلك نقيس الزمن، الذي يستغرقه انحلال 50% من تلك الأنوية؛ هذا الوقت يُسمّى **عمر النصف Half-life**.

يوضِّح **الشكل 7-26** مفهوم عمر النصف. إذا بدأنا بعيّنة كتلتها 16 g، يبقى منها 50% بعد مرور عمر نصف واحد، أي 8 g. وخلال فترة عمر النصف الثانية ينحلّ 50% من المتبقّي، ويبقى 4 g فقط.



الشكل 7-26 عمر النصف.

يكون عمر النصف لبعض النظائر المُشعّة قصيرًا جدًّا، في حين أن عمر النصف لبعضها الآخر قد يصل إلى مليارات السنين (**الجدول 7-3**).

النظير	عمر النصف
$^{238}_{92}U$	4.5×10^{9} سنة
$^{14}_{6}C$	5,730 سنة
$^{137}_{55}Cs$	30.2 سنة
$^{131}_{953}I$	8.05 أيام
$^{220}_{86}Rn$	55.6 ثانية

الجدول 7- 3 عمر النصف.

يكون عمر النصف قصيرًا إذا كانت القوّة النووية داخل النواة ضعيفة، وطويلًا إذا كانت القوة النووية قوية.

يبلغ عمر النصف لليورانيوم-238 كما نرى 4.5 مليارات سنة، أي أنه موجود حولنا منذ نشوء النظام الشمسي. أما الفلور-18 الذي يُستخدَم في انبعاث البوزترون في التصوير الشعاعي المقطعي (PET)، فعمر النصف له حوالي 110 دقيقة، ولهذا لا يتوفّر بشكل طبيعي.

مثال 7

كم سنة تلزم كمّية من السيزيوم-137 لكي تنحلّ، وتصل إلى $\frac{1}{16}$ من الكمّية الأصلية إذا علمت أن عمر النصف للسيزيوم 30.2 سنة ؟

المطلوب: عدد السنوات

المعطيات: عمر النصف لنظير السيزيوم-137 هو 30.2 سنة (من الجدول 7 -3)

العلاقات: نصف الكمّية تنحل بعد مرور فترة عمر النصف

الحل:

$$1 \xrightarrow{t_{1/2}} \frac{1}{2} \xrightarrow{t_{1/2}} \frac{1}{4} \xrightarrow{t_{1/2}} \frac{1}{8} \xrightarrow{t_{1/2}} \frac{1}{16}$$

أي تأخذ أربعة أمثال عمر النصف، حتى تصل إلى $\frac{1}{16}$ من القيمة الأصلية حساب الزمن اللازم للتحلل. $t = 4 \times 30.2 = 120.8$ year

2-7	عمر النصف	n	عدد مرات الانحلال
	$t = t_{1/2} \times n$	$t_{1/2}$	عمر النصف (ثانية أو دقيقة أو ساعة.... أو سنة)
		t	زمن الانحلال (ثانية أو دقيقة أو ساعة.... أو سنة)

مثال 8

لديك كمية مقدارها 200 g من نظير اليود المشع، بعد مرور 40 يوم تبقى منها 6.25 g ما عمر النصف لنظير اليود المشع؟

المطلوب: $t_{1/2}$

المُعطيات: $m_1=200g,\ m_2=6.25g,\ t=40\ day$

العلاقات: $t = t_{1/2} \times n$

الحل:

$$200\ g \xrightarrow{t_{1/2}} 100\ g \xrightarrow{t_{1/2}} 50\ g \xrightarrow{t_{1/2}} 25\ g \xrightarrow{t_{1/2}} 12.5\ g \xrightarrow{t_{1/2}} 6.25\ g$$

نلاحظ من المخطط أن عدد مرات أعمار النصف n يساوي عدد مرات تنصيف الكمية 200 g حتى تصبح 6.25 g وهو 5 مرات $n = 5$.

$$t_{1/2} = \frac{t}{n} = \frac{40}{5} = 8\ \text{days}$$

نشاط 7-3 التحقُّق من عُمْر النصف

سؤال الاستقصاء	تحقَّق من عُمْر النصف باستخدام نقود معدنية.
الموادّ المطلوبة	نقود معدنية (20 قطعة لكل مجموعة)، وعاء صغير، صينية.

خطوات التجربة

1. اعتبر قطع النقود المعدنية هي الذرّات، وضعْها في وعاء.
2. لنفرض أن جهة الكتابة هي الذرّات التي تمّ انحلالها. اخلط النقود في الوعاء، ثم انثرها على الصينية.
3. أحصِ عدد النقود التي تُظهر جهة الكتابة، ثم دوِّن العدد في جدول. استبعد تلك النقود عن الصينية.
4. أعد النقود المتبقّية في الصينية إلى الوعاء واخلطها جيّدًا، ثم انثرها مرّة أخرى على الصينية. أحصِ عدد النقود التي تظهر جهة الكتابة ودَوّن العدد في الجدول، ثم استبعد تلك النقود عن الصينية.
5. أعد الخطوتين 3 و 4 حتى لا يبقى أي نقود.
6. أنشئ رسمًا بيانيًّا لعدد قطع النقود غير المنحلّة (التى تظهر جهة الصورة) على المحور y، وعدد الإعادات (عمر النصف) على المحور X.

الشكل 7-27 قطع نقود معدنية.

جدول البيانات

عدد المرّات (عُمر النصف)	عدد الذرّات غير المنحلّة
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	

أسئلة

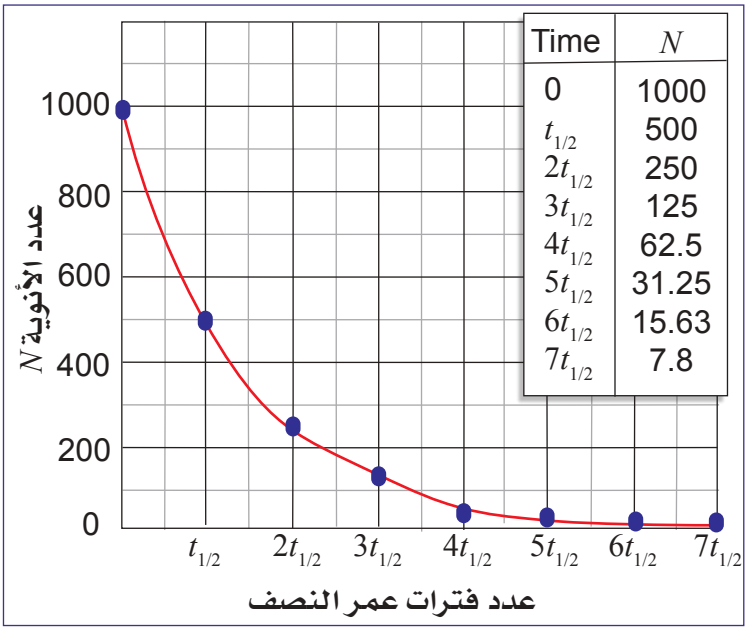
a. اشرح لماذا لم «ينحل» نصف عدد النقود بالضبط في أية عملية نثر.

b. إذا استخدمنا عشرة أمثال عدد النقود، فهل تعتقد أن الجزء الذي انحلّ باتجاه الكتابة في أي عملية نثر سيكون أقرب إلى 50%. علّل إجابتك.

c. اشرح لماذا يستحيل توقّع انحلال ذرّة معيَّنة ولكن يمكن توقُّع انحلال جزء من عيّنة حتى لو كانت كتلتها صغيرة جدًا 0.001 g، افترض أن جرامًا واحدًا من عنصر مشعّ كالراديوم يحتوي على 2.7×10^{21} ذرّة.

حساب الانحلال النووي

ينخفض عدد ذرّات/ أنوية النظائر المُشعّة إلى النصف بعد مرور عمر النصف. يوضِّح الرسم البياني في **الشكل 7-28** انحلال 1000 نواة من النظائر المُشعّة، مقابل فترات عمر النصف. يحدث الانحلال الإشعاعي بشكل أُسّي. ويعتمد مُعدَّل هذا الانحلال، أي عدد الأنوية التي تنحلّ في وحدة الزمن على عدد فترات عمر النصف المنقضية (n). إذا كان العدد الأصلي الأنوية المُشعّة (N_o)، فإن عدد الأنوية المشعّة المتبقّية (N) بعد عدة فترات (n) من عُمر النصف يُعطى **بالمعادلة 7-3**.



الشكل 7-28 الانحلال الإشعاعي.

3-7 معدل الانحلال

$$N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^n$$

N	عدد الأنوية المتبقية أو النشاط الاشعاعي
N_O	العدد الأصلي للأنوية المشعّة
n	عدد فترات عمر النصف

مثال 9

عينة من نظير مُشعّ تحتوي على 128 ذرّة، احسب عدد فترات عمر النصف التي تحتاج إليها هذه العينة لكي تبقى منها ذرّتان غير منحلتين فقط.

المطلوب: عدد فترات عمر النصف n

المعطيات: العدد الابتدائي للذرّات $N_o = 128$ عدد الذرّات المتبقّية $N = 2$

العلاقة: $N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^n$

الحل: نستخدم معادلة الانحلال

$$N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^n \Rightarrow 2 = 128 \left(\frac{1}{2}\right)^n$$

$$0.016 = \left(\frac{1}{2}\right)^n \Rightarrow \ln(0.016) = n \ln\left(\frac{1}{2}\right)$$

$$n = \frac{-4.14}{-0.69} = \boxed{6 \text{ فترات عُمر نصف}}$$

ثابت الانحلال الإشعاعي

تعتمد عملية الانحلال الإشعاعي على الاحتمال. هناك احتمال 50% لنواة مُشعّة أن تنحلّ خلال فترة زمنية تساوي عمر النصف. ويمثّل **ثابت الانحلال Decay constant λ** مقياسًا لاحتمال انحلال الأنوية المُشعّة خلال فترة عمر النصف. إذا كان عمر النصف لنظير مُشعّ قصيرًا، فإن ثابت الانحلال يكون كبيرًا. لكن إذا كان عمر النصف طويلًا، فإن ثابت الانحلال يكون صغيرًا. وإذا كان عمر النصف $t_{1/2}$ فإن ثابت الانحلال يُحسب من **المعادلة 4-7**.

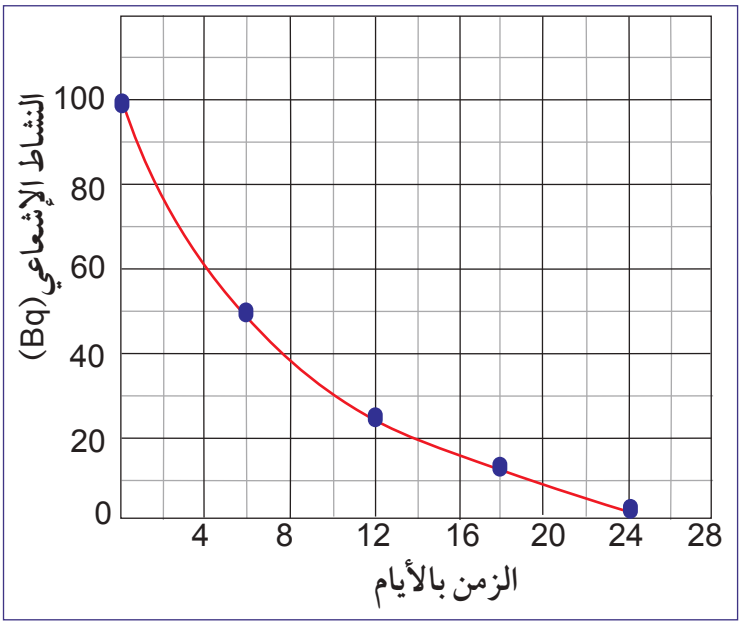
4-7	ثابت الانحلال		
$\lambda = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}}$	λ	ثابت الانحلال (1/s)	
	$\ln(2)$	0.693	
	$t_{1/2}$	عمر النصف (s)	

إذا كان كل من ثابت الانحلال λ والزمن المستغرق t معروفًا، فإن عدد الأنوية المتبقّية من دون انحلال يُعطى **بالمعادلة 5-7**.

5-7	معدَّل الانحلال		
$N = N_0 e^{-\lambda t}$	N	عدد الأنوية أو النشاط الإشعاعي	
	N_0	العدد الأصلي للأنوية أو النشاط الاشعاعي الابتدائي	
	λ	ثابت الانحلال (1/s)	
	t	الزمن المُستغرَق (s)	

مُعدَّل الانحلال

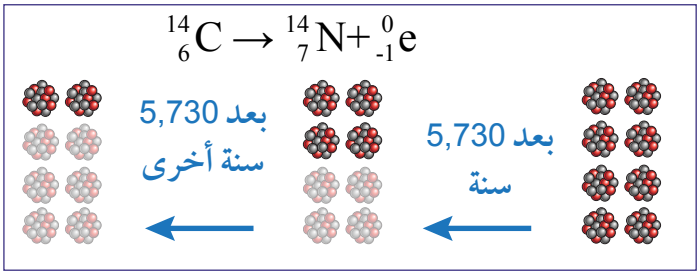
إذا كان المصدر مُشعًّا بشكل نشط، يكون مُعدَّل انحلاله مرتفعًا. **معدَّل الانحلال Rate of decay** هو عدد الأنوية التي تنحلّ بالنسبة إلى الزمن، وغالبًا ما يُسمّى بالنشاط الإشعاعي للنظير المُشعّ. وحدة قياس النشاط الإشعاعي هي البيكريل (Bq). وتعرف بأنها انحلال واحد خلال ثانية واحدة. قد يكون من الصعب حساب عدد الأنوية المتبقّية الموجودة في عيّنة من المادة. ولذلك من الأسهل إيجاد عدد الأنوية المُنحلَّة خلال ثانية. ينقص مقدار النشاط الإشعاعي إلى النصف خلال فترة عمر النصف. يوضِّح **الشكل 7-29** تناقص النشاط الإشعاعي لنظير مُشعّ بالنسبة إلى الزمن. ينقص النشاط الإشعاعي إلى النصف خلال 6 أيام، ما يعني أن عمر النصف لهذا النظير هو 6 أيام.



الشكل 7-29 النشاط الإشعاعي لنظير مُشعّ بدلالة الزمن.

عمر النصف لنظير الكربون -14

خلال فترة عمر النصف تنقص كمّية الأنوية المُشعّة إلى النصف.تنقص كمّية نظير الكربون-14 الموجود في عيّنة إلى النصف خلال 5730 سنة. ينحلّ الكربون-14، ويتحوّل إلى نيتروجين-14 عندما يطلق جُسَيم بيتا، كما في (**الشكل 7-30**).



الشكل 7-30 انحلال الكربون-14 إلى النيتروجين-14.

مثال 10

عيّنة سرخس قديمة تحتوي على $\frac{1}{8}$ ذرّات الكربون-14 لكل جرام، بالمقارنة مع الكائن الحي.

a. احسب ثابت الانحلال للكربون-14

b. كم يبلغ عُمر تلك العيّنة.

المطلوب:

a. ثابت الانحلال λ

b. الزمن المُستغرَق t منذ بدء الانحلال

المعطيات:

عدد الأنوية المتبقّية بالنسبة إلى الأنوية الابتدائية $\frac{N}{N_0} = \frac{1}{8}$

عمر النصف للكربون-14 هو $(t_{1/2} = 5730\ \text{year})$

العلاقات:

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}}$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

الحل:

a. نحسُب ثابت الانحلال أوّلًا

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}} = \frac{0.693}{5,730} = \boxed{1.2\times10^{-4}\ \text{سنة}^{-1}}$$

b. لحساب الزمن المنقضي

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \Rightarrow \frac{1}{8} = 1e^{-(1.2\times10^{-4})t}$$

$$\ln\left(\frac{1}{8}\right) = \ln(e^{-(1.2\times10^{-4})t})$$

$$-2.08 = -1.2\times10^{-4}t$$

$$t = \boxed{17,333\ \text{سنة}}$$

تقويم الدرس 3-7

1. يبلغ عمر النصف للسيزيوم-137 ثلاثين سنة، واليود-131 ثمانية أيام. كلاهما انبعثا من مُفاعِل شيرنوبل عندما انفجر عام 1986. أي من هذين النظيرين المُشعَّين لا يزال موجودًا في البيئة بكمّيات كبيرة؟ولماذا؟

2. لديك 1280 ذرّة من نظير غير مستقّر. كم عدد فترات عمر النصف يلزم هذا النظير لكي يبقى لديك 10 ذرّات أو أقلّ؟

3. صخرة عمرها 3 مليارات سنة، تحتوي على نظير اليورانيوم-238 فقط. يُتوَقَّع أن بعضًا من نظير اليورانيوم-238 لا يزال موجودًا فيها.وعندما حلّلناها وجدنا فيها أيضًا نظير الراديوم-226 ونظير الرادوم-222 ونظير البولونيوم-210. علِّل وجود هذه النظائر في الصخرة، بالإضافة إلى اليورانيوم-238.

4. هل يتناقص عدد الأنوية المُشعّة في مادة إلى نصف كمّية الأنوية الابتدائية تحديدًا خلال فترة عمر نصف واحدة؟ علِّل إجابتك.

5. قطعة فحم قديمة ناجمة عن احتراق غابة منذ زمن بعيد. إذا كانت العيّنة تحتوي على أقل من $\frac{1}{1000}$ من كمية الكربون-14 الطبيعية، احسب:
   a. ثابت الانحلال
   b. عمر تلك القطعة.

6. نظير مُشعّ عمر النصف له يساوي دقيقتين، وُجد منه في بداية التجربة 30mg. احسب الكمّية المتبقية بعد 18 دقيقة.

7. نظير مُشعّ عمر النصف له يساوي 20 دقيقة، وهو يحتوي على 1024 ذرّة ابتدائية. ما الزمن اللازم لهذا النظير كي يبقى منه 128 ذرّة؟

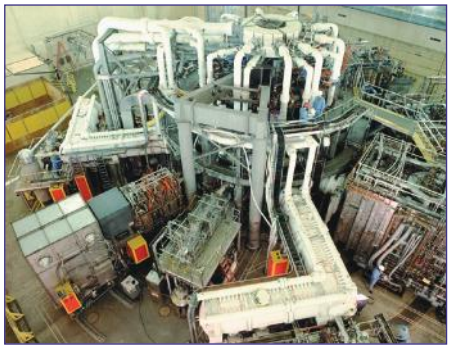
8. النشاط الإشعاعي لنظير هو 80 انحلالًا في كل دقيقة. احسب عمر النصف إذا تدنّى النشاط الإشعاعي إلى 5 انحلالات في دقيقة، بعد مرور 4 ساعات.

9. النشاط الإشعاعي لنظير هو 4600Bq. احسب عمر النصف، إذا أصبح النشاط 800Bq خلال 36 دقيقة.

الدرس 7-4
التفاعُلات النووية

تنشأ تفاعُلات الاندماج في الشمس والنجوم الاخرى بسبب الحرارة و الضغط العاليين في قلب النجم الكثيف جدًّا. عَمِلَ العُلماء والمهندسون منذ العام 1950 على تصميم مُفاعِل يجعل إنتاج طاقة الاندماج النووي الخاضعة للتحكُّم والسيطرة ممكنًا على الأرض. يتطلّب ذلك درجات حرارة تصل إلى 400 مليون كلفن، وهي درجات أمكن الحصول عليها في المختبر. يتمثَّل التحدي الحالي في حصر الغاز الساخن المتأيِّن لفترة كافية لتستمر تفاعُلات الاندماج النووي، وتولّد طاقة كافية وقابلة للاستخدام.

تُستخدَم في تصميم مُفاعِل توكاماك مجالات مغناطيسية قوية لحصر الغاز الساخن في حجرة على شكل كعكة دائرية. بالمقابل، يُطلِق تصميم الحصر الداخلي للغاز كريات صغيرة من الوقود بأشعّة ليزر قوية، ليتولّد منها العديد من الانفجارات الهيدروجينية النووية الحرارية الصغيرة. ستُظهر الأبحاث المستقبلية والتطوير إن كانت طريقة مُفاعِل توكاماك، أو الحصر الداخلي للغاز، طريقة عملية أم لا، من أجل بناء مُفاعِل اندماج نووي على نطاق واسع تجاريًّا.



الشكل 7-31 مُفاعِل الاندماج النووي توكاماك.

مخرجات التّعلُّم

P1116.1 يوضح عملية الانشطار النووي وعملية الاندماج النووي، ويصف كيف تتكوّن العناصر الثقيلة في النجوم الأكبر عمرًا بسبب الاندماج النووي.

P1116.2 يصف تكافؤ المادة والطاقة، ويستخدم المعادلة $E = mc^2$ في حل المسائل الحسابية.

P1116.3 يناقش القضايا ذات الأهمية الاجتماعية والسياسية والبيئية المتعلقة باستخدام الانشطار النووي.

المفردات

Mass-energy equivalence	تكافؤ الكتلة–الطاقة
Rest energy	الطاقة السكونية
Atomic mass unit	وحدة كتلة ذرّية
Electron volt	إلكترون فولت
Binding energy	طاقة الربط
Mass defect	نقص الكتلة
Nuclear reaction	تفاعُل نووي
Nuclear fission	انشطار نووي
Chain reaction	تفاعُل تسلسلي
Nuclear energy	طاقة نووية
Nuclear fusion	اندماج نووي

تكافُؤ الكتلة–الطاقة

ربما سمع الكثيرون بمعادلة أينشتاين التي توضّح العلاقة بين الكتلة والطاقة، أو نظرية أينشتاين في النسبية. ومع ذلك، فإن عددًا قليلًا جدًّا منهم يعرفون ما تعنيه. تتعلّق هذه المعادلة بالطاقة والكتلة وسرعة الضوء، وهي عبارة مختصرة لمفهوم واسع يتلخَّص في أن الطاقة والكتلة قابلتان للتبادُل. تصف **المعادلة 6-7** مقدار الكتلة المرتبطة بكمّية مُعيَّنة من الطاقة. وتصف أيضًا مقدار الطاقة اللازمة لإنتاج مقدار معيَّن من الكتلة، تلك العلاقة هي **تكافؤ الكتلة–الطاقة Mass-energy equivalence**.

6-7	تكافوء الكتلة – الطاقة	E	الطاقة (J)
	$E = mc^2$	m	الكتلة (kg)
		c	سرعة الضوء في الفراغ $= 3 \times 10^8$ m/s

تربط معادلة أينشتاين الطاقة بكتلة الجسم الساكن. وهذا يعني أن كلّ المواد لديها طاقة وإن لم يكن لها طاقة حركية، أو طاقة وضع، أو طاقة حرارية، أو أي نوع آخر من الطاقة. تُسمّى تلك الطاقة **طاقة السكون Rest energy**، وهي موجودة في المادة نفسها، سواء أكانت المادة ساكنة أم مُتحرِّكة، فالمادة هي طاقة، والطاقة هي مادة.

الطاقة المُخزَّنة في النواة

العامل c^2 هو رقم كبير يبلغ $c^2 = 9 \times 10^{16}$ m^2/s^2. تحتوي المادة على كمّيات هائلة من الطاقة السكونية تُحسَب من خلال معادلة الكتلة–طاقة. تحوِّل التفاعُلات النووية بعض الطاقة السكونية إلى أشكال أخرى من الطاقة مثل الحرارة. فعندما يتفاعل كيلوجرام واحد من اليورانيوم في محطّة طاقة نووية، يتحوَّل حوالي 0.7% من كتلته إلى طاقة. هذا الكسر الصغير من الطاقة أكبر بمليون مرة من الطاقة الناتجة من حرق كيلوجرام واحد من الفحم الحجري أو النفط.

يُقارِن **الشكل 7-32** بين أنواع مختلفة من الطاقة لأجسام ثلاثة كتلة كل منها 1 kg. فالثقل يمتلك 9.8 J من طاقة الوضع بسبب موقعه. وتمتلك قذيفة المدفع المقذوفة 5×10^3 J من الطاقة الحركية بسبب سرعتها، في حين تمتلك المادة النووية 9×10^{16} J من الطاقة السكونية.

مادة نووية كُتلتها 1 kg

$E_n = 9 \times 10^{16}$ J

قذيفة مدفع كُتلتها 1 kg مقذوفة بسرعة 100 m/s

$E_k = 5 \times 10^3$ J

ثقل كُتلته 1 kg مرفوع إلى علوّ 1 m

$E_p = 9.8$ J

الشكل 7-32 أنواع مختلفة من الطاقة.

تبدو كمّية الطاقة السكونية كبيرة جدًّا عند مقارنتها بأنواع الطاقة الأخرى. وقد وضّح أينشتاين أن الإشعاع النووي هو مثال على تلك الطاقة، وهو ناتج عن تفكُّك المادّة الذي يؤدّي إلى تحرير تلك الطاقة. وتكون كمّية المادة المُفكَّكة صغيرة جدًّا بحيث يصعب قياسها. يعدّ تحوّل المادة إلى طاقة مصدر طاقة الشمس.

تحوّل الكتلة والطاقة

تبدو قيمة c^2 في **المعادلة 7-6** كبيرة جدًّا، ذلك أن:

a. تحويل كمّية صغيرة جدًّا من الكتلة إلى طاقة ينتج كمّية هائلة من الطاقة.

b. نقص الكتلة الناتج من كميات قليلة من الطاقة، يكون قليل جدا بحيث يصعب قياسه.

الطاقة الناتجة عن تحول الكتلة وفق المعادلة 7-6 تكون كبيرة جدًا مقارنة مع الطاقة الناتجة عن التفاعلات الكيميائية، فاحتراق 1g من غاز الميثين ينتج 10,032 J من الطاقة، لكن عند تحول الكتلة إلى طاقة، فإن 10^{-10} g فقط، ينتج من تحولها نفس المقدار من الطاقة.

$$E = mc^2 \quad \rightarrow \quad m = \frac{E}{c^2} = \frac{10{,}032\ \text{J}}{9\times10^{16}\ \text{m}^2/\text{s}^2} \qquad 1.1\times10^{-13}\ \text{kg} = 1.1\times10^{-10}\ \text{g}$$

وهذا المقدار من الكتلة مهمل لصغره.

معادلات المادَّة المُضادَّة

عند تصادم المادَّة المُضادَّة بالمادَّة العادية، تتحوّل الكتلة إلى طاقة بنسبة 100 %. يُسمّى تفاعل المادَّة المُضادَّة مع المادَّة العادية **بالإلغاء Annihilaion**. إذا دُمجت 0.5 g من المادّة المُضادّة مع 0.5 g من المادة العادية، فكم يكون مقدار الطاقة الناتجة؟

$$E = mc^2 = 0.001\ \text{kg}\times9\times10^{16}\ \text{m}^2/\text{s}^2 = 9\times10^{13}\ \text{J}$$

مثال 11

يُنتِج 1 g من البنزين كمية 44,000 J من الطاقة عند حرقه. ما مقدار المادة اللازمة لتحرير كمّية الطاقة نفسها في تفاعل نسبته 100 %؟

المطلوب: المادة اللازمة لإنتاج 44,000 J من الطاقة، إذا كان التحوّل بنسبة 100 %

المُعطيات: $E = 44{,}000\ \text{J}$ سرعة الضوء $c = 3\times10^8\ \text{m/s}$.

العلاقات: $E = mc^2$

الحل:

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{44{,}000\ \text{J}}{9\times10^{16}\ \text{m}^2/\text{s}^2} = 4.9\times10^{-13}\ \text{kg} = 4.9\times10^{-10}\ \text{g}$$

وحدة الكتل الذرية

معلوم أن كتلة البروتونات والنيوترونات صغيرة جدًّا لذلك يستخدم علماء الطاقة النووية غالبًا وحدة الكتل الذرّية. تُعرّف وحدة **الكتل الذرّية (Atomic mass unit (amu** بواحد من إثني عشر $(\frac{1}{12})$ من كتلة ذرّة الكربون-12. وبالتالي فإن الكتلة الذرّية للكربون-12 هي تحديدًا 12 amu.

$$1\ \text{amu} = 1.661 \times 10^{-27}\ \text{kg}$$

الجسيم/ النواة	الكتلة (kg)	الكتلة (amu)
البروتون	1.6726×10^{-27}	1.0073
النيوترون	1.6749×10^{-27}	1.0087
نواة الهيليوم	6.6447×10^{-27}	4.0015

تبلغ كتلة النيوترون 1.6749×10^{-27} kg. لذلك تعادل كتلة النيوترون الواحد 1.0087 amu.

الطاقة السكونية في 1 amu

يمكن حساب الطاقة السكونية المكافئة لـ 1 amu باستخدام علاقة أينشتاين

$$E = mc^2 = 1.661 \times 10^{-27} \times (3 \times 10^8)^2 = 1.49 \times 10^{-10}\ \text{J}$$

يمكن أيضًا التعبير عن تلك الطاقة الساكنة بـ **الإلكترون الفولت (Electron volt (eV**، وهو مقدار الطاقة المكتسبة بواسطة إلكترون يتحرَّك عبر فرق جهد مقداره فولت واحد، أي: $1\ \text{eV} = 1.602 \times 10^{-19}\ \text{J}$. يعني ذلك أن كمّية الطاقة السكونية لـ 1 amu بوحدة الإلكترون فولت هي:

$$E = 1\ \text{eV} \times \frac{1.49 \times 10^{-10}\ \text{J}}{1.602 \times 10^{-19}\ \text{J}} = 9.315 \times 10^8\ \text{eV}$$

لذلك تكون كمّية الطاقة السكونية لكتلة تساوي 1 amu هي 9.315×10^8 eV أو 931.5 MeV.

مثال 12

تبلغ كتلة كل من النيوترون والبروتون $m_n = 1.675 \times 10^{-27}$ kg و $m_p = 1.673 \times 10^{-27}$ kg على التوالي. ما الفرق في الطاقة السكونية بين النيوترون والبروتون؟

المطلوب: الفرق في الطاقة السكونية

المُعطيات: كتلة النيوترون $m_n = 1.675 \times 10^{-27}$ kg

كتلة البروتون $m_p = 1.673 \times 10^{-27}$ kg

العلاقات: $E = mc^2$ وسرعة الضوء $c = 3 \times 10^8$ m/s

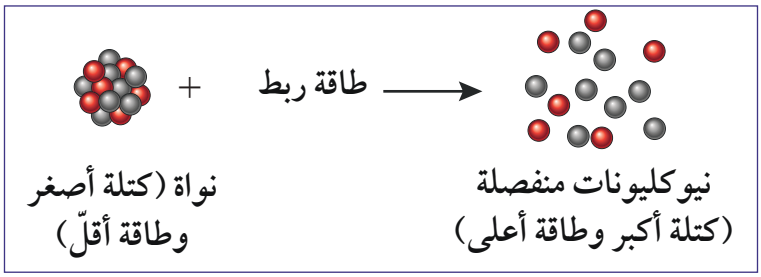
الحل: الفرق في طاقة السكون للجُسَيْمَيْن هو الفرق بين كتلتَيْهما مضروبًا في c^2:

$$\Delta E = \Delta m\ c^2 = (1.675 - 1.673) \times 10^{-27} \times (3 \times 10^8)^2 = 1.8 \times 10^{-13}\ \text{J}$$

طاقة الربط النووية

تُسمّى الطاقة E_b، التي يجب تزويد النواة بها لفصل مُكوِّناتها إلى بروتونات ونيوترونات، **طاقة الربط Binding energy**. تختلف كمّية طاقة الربط باختلاف العناصر وباختلاف النظائر. فعلى سبيل المثال، تختلف طاقة الربط اللازمة لتشكيل أربع أنوية من الهيليوم-4 (في كل منها نيوترونان وبروتونان) عن طاقة الربط اللازمة لجمع العدد نفسه من تلك الجُسيمات (8 نيوترونات و 8 بروتونات) في نواة واحدة من الاكسجين-16. فالفرق في طاقة الربط بين النظائر يوفِّر الطاقة اللازمة للتفاعُلات النووية.

عندما تندمج نيوكليونات حُرّة (أي بروتونات أو نيوترونات) معًا لتُشكّل نواة، تتحرَّر طاقة ربط. يعني ذلك أن للنواة طاقة سكونية أقلّ؛ وبالتالي كتلة أقلّ من مجموع كُتل الجُسيمات المنفصلة التي تكوّنت منها هذه النواة. يطلق على الفرق في الكتلة اسم **نقص الكتلة Mass defect**. يساوي نقص الكتلة تحديدًا طاقة الربط المطلوبة للإبقاء على النواة مُجمّعة. ترتبط طاقة الربط وفرق الكتلة من خلال معادلة أينشتاين لتكافؤ الكتلة والطاقة. يوضِّح **الشكل 7-33** كيف يكون للنواة المجمّعة كتلة أصغر؛ وبالتالي طاقة أقل. ويؤدّي تزويد النواة بطاقة تساوي طاقة الربط إلى فصل مُكوّناتها. يشكِّل مجموع كتل هذه النيوكليونات الفردية كتلة أكبر من النواة، وبالتالي طاقة أعلى.



الشكل 7-33 نقص الكتلة و طاقة الربط النووية.

للنواة طاقة سكونية أقلّ وكتلة أصغر من النيوترونات والبروتونات المنفردة.

مثال 13

تتكون نواة الهيليوم-4 من أربعة نيوكليونات؛ بروتونين ونيوترونين. بالرجوع إلى الجدول السابق ومعرفة كتلة نواة الهيليوم، وكتل مكوناتها، احسب نقص الكتلة لنواة الهيليوم-4 وطاقة الربط النووية

المطلوب: نقص الكتلة لنواة الهيليوم Δm ، طاقة الربط E_P

المُعطيات: $m_p=1.0073\ \text{amu}, m_n=1.0087\ \text{amu}, m_{He}=4.0015\ \text{amu}$

العلاقات: **نقص الكتلة (Δm) = مجموع كتل مكونات النواة – كتلة النواة مجتمعة**

$$E_p=\Delta m\times 931.5$$

الحل: مجموع كتل مكونات نواة الهيليوم:

$$m_{nucleons}=2m_p+2m_n=2(1.0073)+2(1.0087)=4.0320\ \text{amu}$$

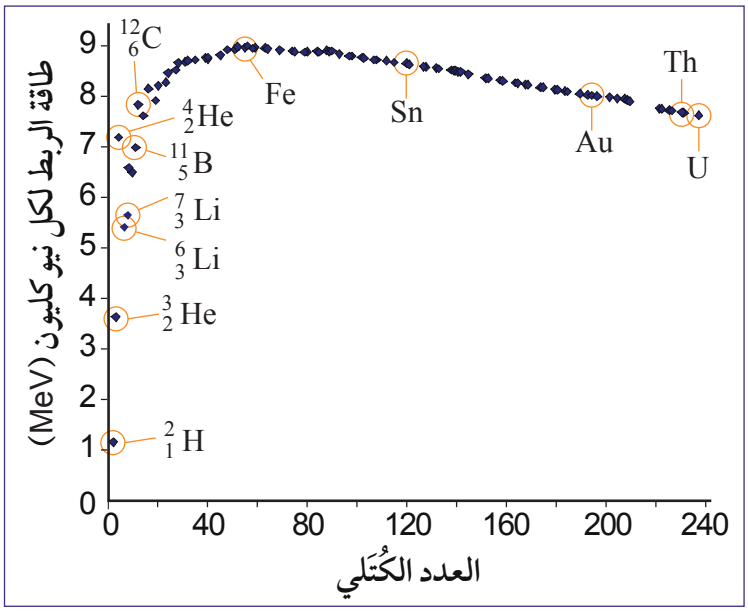
$$m_{He}=4.0015\ \text{amu}$$

$$\Delta m=m_{nucleons}-m_{He}=4.0320-4.0015=0.0305\ \text{amu}$$

$$E_P=\Delta m\ \text{amu}\times 931.5\frac{\text{MeV}}{\text{amu}}=0.0305\times 931.5=28.3\ \text{MeV}$$

طاقة الربط لكل نيوكليون

تعدّ طاقة الربط لكل نيوكليون كمّية مفيدة في الفيزياء النووية، وهي طاقة الربط النووية E_b مقسومة على عدد النيوكليونات A. ففي الهيليوم-4 تكون طاقة الربط لكل نيوكليون $\left(\frac{E_b}{A}\right)$ وتساوي: $\frac{(28.411\text{MeV})}{4} = 7.10275\ \text{MeV}$. يوضّح **الشكل 7-34** أن طاقة الربط لكل نيوكليون تزداد بازدياد العـــدد الكُتَلـــي، حتى تصل إلى عنصر الحديد Fe-56. بعد ذلك تقلّ طاقة ربط النيوكليون ببطء بزيادة العدد الكُتَلي للعناصر الأثقل من الحديد. يعكس شكل الرسم البياني لطاقة الربط توازنًا بين التنافُر في القوة الكهربائية (بين البروتونات) والتجاذُب في القوة القوية (بين النيوكليونات).



الشكل 7-34 طاقة الربط للنيوكليون.

ماذا يُمثِّل الرسم البياني لطاقة الربط؟

يعكس الرسم البياني لطاقة الربط الخاصة بكل نيوكليون مصدر الطاقة النهائي للكون الذي نعيش فيه. تُحرِّر النجوم الطاقة النووية بواسطة اندماج أنوية العناصر الخفيفة؛ وذلك بالانتقال من اليسار إلى اليمين في الرسم البياني أعلاه، أيّ من الهيدروجين نحو الحديد. أما المُفاعِلات النووية، فتُحرِّر الطاقة بواسطة انشطار الذرّات الثقيلة بالانتقال من اليمين إلى اليسار، أيّ من اليورانيوم نحو الحديد.

مثال 14

إذا علمت أن كتلة نواة الكربون-12 تساوي 11.997 amu، ورمزه الكربون $C\ ^{12}_{6}$ ، احسب كل من:
a) طاقة الربط للنواة. b) طاقة الربط لكل نيوكليون.

المطلوب: طاقة ربط النواة E_b ، طاقة الربط لكل نيوكليون :

المُعطيات: كتلة نواة الكربون-12، $m = 11.997\ \text{amu}$

الحل:

a) طاقة الربط للنواة هي نقص الكتلة نفسه. تحتوي نواة الكربون – 12 على 6 بروتونات و 6 نيوترونات. كتلة 6 بروتونات و6 نيوترونات هي:

$$m_{6p} + m_{6n} = (6 \times 1.0073) + (6 \times 1.0087) = 12.096\ \text{amu}$$

الفرق بين الكتلتين هو: $12.096 - 11.997 = 0.099\ \text{amu}$

وبالتالي فإن طاقة الربط هي: $0.099 \times 931.5 = 92.22\ \text{MeV}$

b) طاقة الربط لكل نيوكليون:

$$E_{(\text{نيوكليون})} = \frac{E_P}{A} = \frac{92.22}{12} = 7.685\ \text{MeV}$$

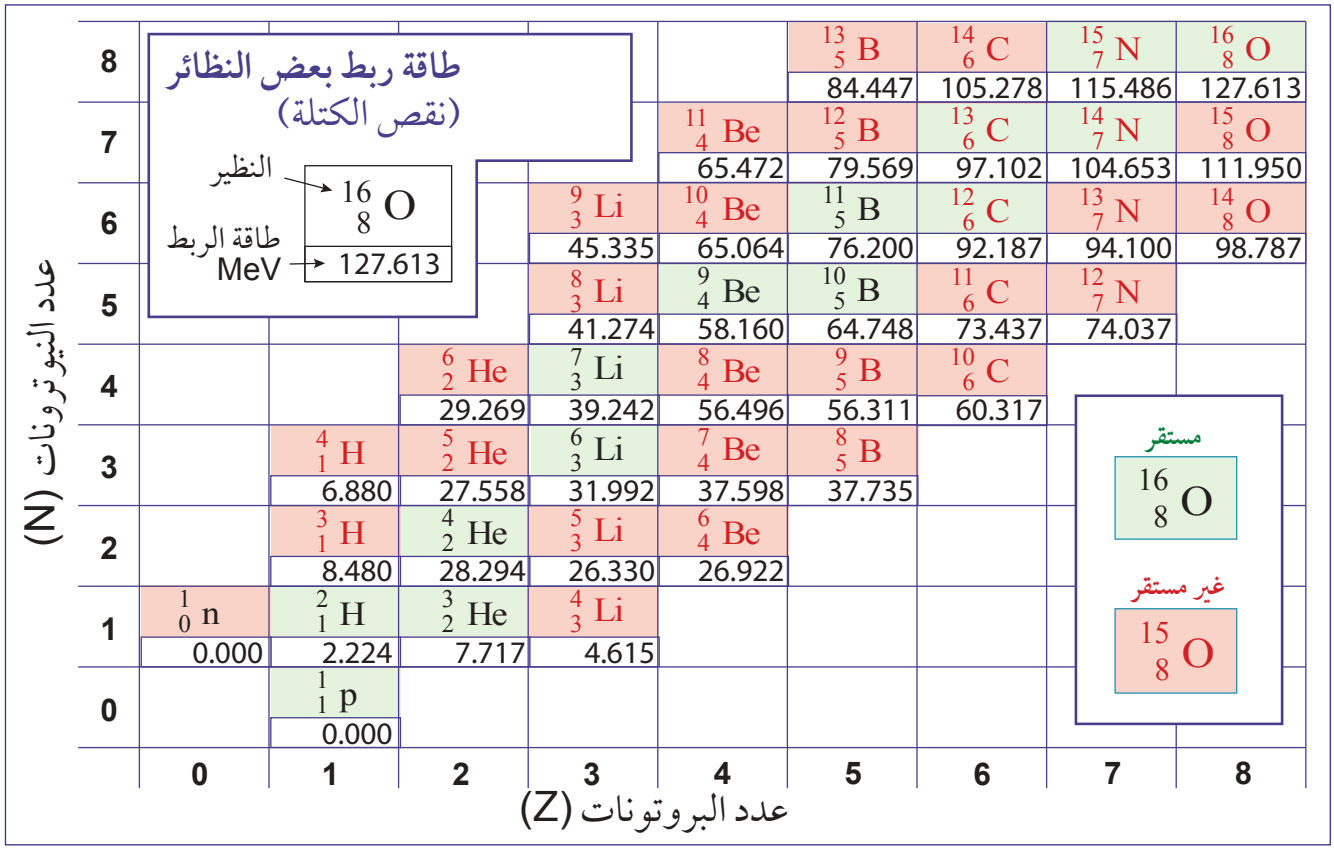
توازُن الطاقة في التفاعُلات النووية

تنتج الطاقة في التفاعلات النووية من الفرق بين كتل المتفاعلات وكتل النواتج. يوضِّح **الشكل 7-36** جدولًا لبعض النظائر مع طاقة الربط بوحدة MeV. افترض تفاعلًا نوويًا يتم فيه فحص طاقة الاندماج النووي. يتَّحد في هذا التفاعل نظيرَي هيدروجين لِيَنتج هيليوم ونيوترون.

	المُتفاعِلات			النواتج			فرق الطاقة الناتجة
	${}_1^3\mathrm{H}$	+	${}_1^2\mathrm{H}$	$\rightarrow$ ${}_2^4\mathrm{He}$	+	${}_0^1\mathrm{n}$	
طاقة الربط	8.480	+	2.224	28.294	+	0	↓
	10.704			= 28.294	–		17.590 MeV

الشكل 7-35 حساب الطاقة الناتجة في تفاعل نووي.

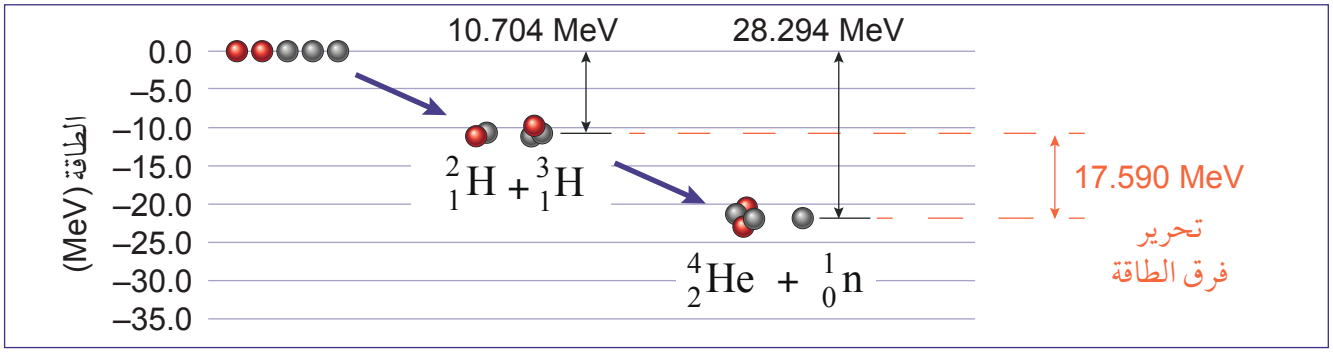
1. اجمع طاقات ربط المُتفاعِلات.
2. اجمع طاقات ربط النواتج.
3. الطاقة الناتجة من التفاعل هي الفرق بين طاقة ربط النواتج وطاقة ربط المتفاعلات. لقد أهملنا الإلكترونات في هذه الحالة، لأن هناك إلكترونين على طرفَي التفاعل. إلّا أن تأثير الإلكترونات يجب أن يؤخذ في الحسبان في بعض التفاعلات.



الشكل 7-36 طاقة الربط (نقص الكتلة) بوحدة MeV لبعض النظائر.

معنى طاقة الربط

تمثِّل طاقة الربط النووية الطاقة اللازمة لتفكّك النواة وتحويلها إلى بروتونات ونيوترونات متفرقة. وتكون طاقة الجُسيمات المتفرّقة صفرًا. افترض مثال التفاعل النووي في **الشكل 7-37**. عند تكوّن الهيليوم -4، تنتقل طاقة ربط النظام إلى المحيط، ويفقد النظام كامل طاقته (**الشكل 7-37**).



الشكل 7-37 يوضِّح الرسم البياني كيفية إنتاج الطاقة من تفاعُل نووي.

مثال 15

احسب تغيُّر الطاقة في التفاعل النووي الآتي، وحدِّد إن كان التفاعل يحتاج إلى هذه الطاقة أو أنه ينتجها؟

$$^{3}_{1}H + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{7}_{3}Li$$

المطلوب: التغيُّر في طاقة التفاعل.

المُعطيات: ثلاثة نظائر: هيدروجين -3، الهيليوم -4، الليثيوم -7.

العلاقات: الطاقة الناتجة عن التفاعل تساوي الفرق بين طاقة ربط النواتج وطاقة ربط المُتفاعِلات.

الحل: من الشكل **7-36** نجد أن طاقة الربط لكل نواة:

$$E_{(\text{متحررة})} = E_{(\text{نواتج})} - E_{(\text{متفاعلات})} = E_{P(Li)} - (E_{R(H)} + E_{R(He)})$$

$$E_{(\text{متحررة})} = 39.242 - (8.480 + 28.294) = 2.468 \text{ MeV}$$

فرق الطاقة موجب، يعني ذلك أن التفاعل ينتج الطاقة.

التفاعُلات النووية مُقابِل التفاعُلات الكيميائية

التفاعُل النووي Nuclear reaction أي عملية تؤدّي إلى تغيُّر في نواة الذرَّة. قد يتغيّر عنصر إلى آخر، أو يتغيّر نظير إلى نظير آخر مختلف للعنصر نفسه؛ ذلك أن التفاعُلات النووية تشتمل على القوة النووية القوية. تكون طاقة التفاعُلات النووية عادة أكبر بآلاف المرات من طاقة التفاعُلات الكيميائية.

سؤال للمناقشة

أعطِ مثالًا على تفاعُل كيميائي. لِمَ لا يعتبر هذا التفاعُل نوويًّا؟

تُغيّر التفاعُلات الكيميائية الطريقة التي تتَّحد بها ذرّات العناصر المختلفة في المُركَّبات؛ ولكنها لا تُغيِّر نواة أي ذرّة. تعيد التفاعُلات الكيميائية ترتيب الإلكترونات المُشتركة لإعادة ترابُط الذرّات، وتكون الطاقة في التفاعُل الكيميائي منخفضة للغاية، إلى درجة أنها لا تستطيع تحويل ذرّات عنصر إلى ذرّات عنصر آخر. ولا تحُول التفاعُلات الكيميائية النظائر إلى نظائر مختلفة.

التفاعُلات النووية تُنتج عناصر جديدة والتفاعُلات الكيميائية تُنتج مُركَّبات جديدة من العناصر.

أنواع التفاعُلات النووية

كل تغيير يحدث في نواة عنصر يكون من خلال تفاعُل نووي. قد يكون التغيير بسبب النشاط الإشعاعي عندما تتغيّر النواة تلقائيًّا، وقد يكون نتيجة تأثيرات خارجية. وفي كلتا الحالتين نستخدم معادلة نووية لتمثيل العملية. هناك عمومًا ثلاث أنواع للتفاعُلات النووية:

1. التفاعُلات النووية التلقائية.
2. تفاعُلات الانشطار النووي.
3. تفاعُلات الاندماج النووي.

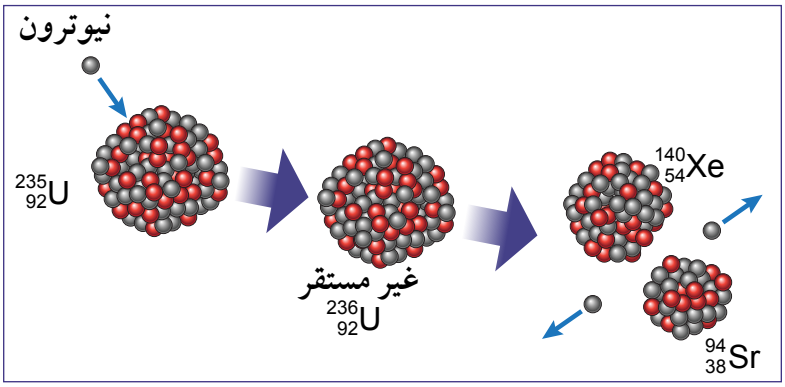
التفاعُلات النووية التلقائية

تتحلَّل النواة غير المستقرَّة تلقائيًّا، من دون أي تأثيرات خارجية. ويُميَّز هذا النوع بعمر نصف للعملية، ويوصف بمعادلة نووية. من الأمثلة على التفاعُل النووي التلقائي انحلال نظير الأميريسيوم-241، الذي ينحل مُطلِقًا جُسيم ألفا، وفقًا للمعادلة النووية: $^{241}_{95}\mathrm{Am} \rightarrow {}^{237}_{93}\mathrm{Np} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$.

يُستخدَم هذا التفاعُل كأساس لأنظمة كاشف الدخان. ففي حال وجود الدخان يتفاعُل جُسيم ألفا المنبعث من هذا الانحلال مع جُسيمات الدخان؛ فيعمل على تأيينها. تقوم الجُسيمات المتأيّنة بدورها بتوليد تيار كهربائي، يُكتشف بواسطة أجهزة إلكترونية؛ ما يؤدّي إلى إطلاق صفّارة إنذار.

الانشطار النووي

يستمد التفاعُل النووي طاقته من طاقة الربط في النواة. إذا تحطَّمت نواة كبيرة، مثل اليورانيوم، فإن الطاقة يمكن أن تتحرَّر. يُسمّى تقسيم النواة **الانشطار النووي Nuclear fission**. يمكن بدء تفاعُل الانشطار النووي بقذف ذرّات اليورانيوم بالنيوترونات.

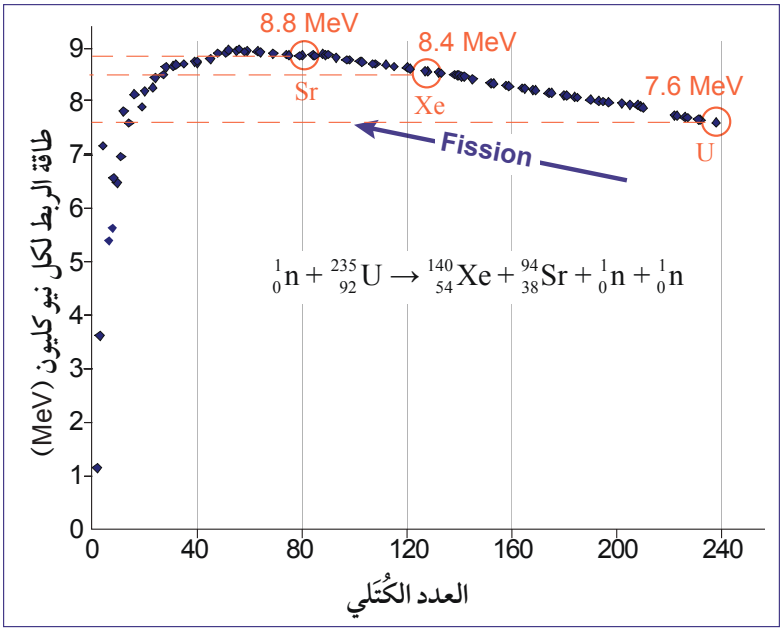


الشكل 7-38 تفاعُل انشطار نووي.

يعدّ **الشكل 7-38** مثالًا على تفاعُل انشطار نووي، حيث يتم امتصاص النيوترون في نواة $^{235}_{92}U$، ويُحوِّلها إلى نواة $^{236}_{92}U$ غير مستقرَّة، تنحلّ تلك النواة وينتج منها السترونشيوم-94 والزينون-140، ونيوترونان. يمكننا كتابة هذا التفاعُل على النحو الآتي:

$$^{1}_{0}n + ^{235}_{92}U \rightarrow ^{236}_{92}U \rightarrow ^{140}_{54}Xe + ^{94}_{38}Sr + 2\,^{1}_{0}n$$

هذه معادلة نووية موزونة؛ ذلك أن البروتونات والنيوترونات على الجانب الأيسر للمعادلة يساوي عدد البروتونات والنيوترونات على الجانب الأيمن.



الشكل 7-39 طاقة الربط لكل نيوكليون.

يمكن تقدير الطاقة المُتحرِّرة من هذا التفاعُل النووي، بحساب توازُن طاقة الربط من **الشكل 7-39**، حيث نرى أن طاقة الربط لكل نيوكليون لليورانيوم والزينون والسترونشيوم هي تقريبًا 7.6 و 8.4 و 8.8 MeV على التوالي.

فالطاقة المتحرِّرة تساوي تقريبًا:

$$^{1}_{0}n + ^{235}_{92}U \rightarrow ^{140}_{54}Xe + ^{94}_{38}Sr + ^{1}_{0}n + ^{1}_{0}n$$

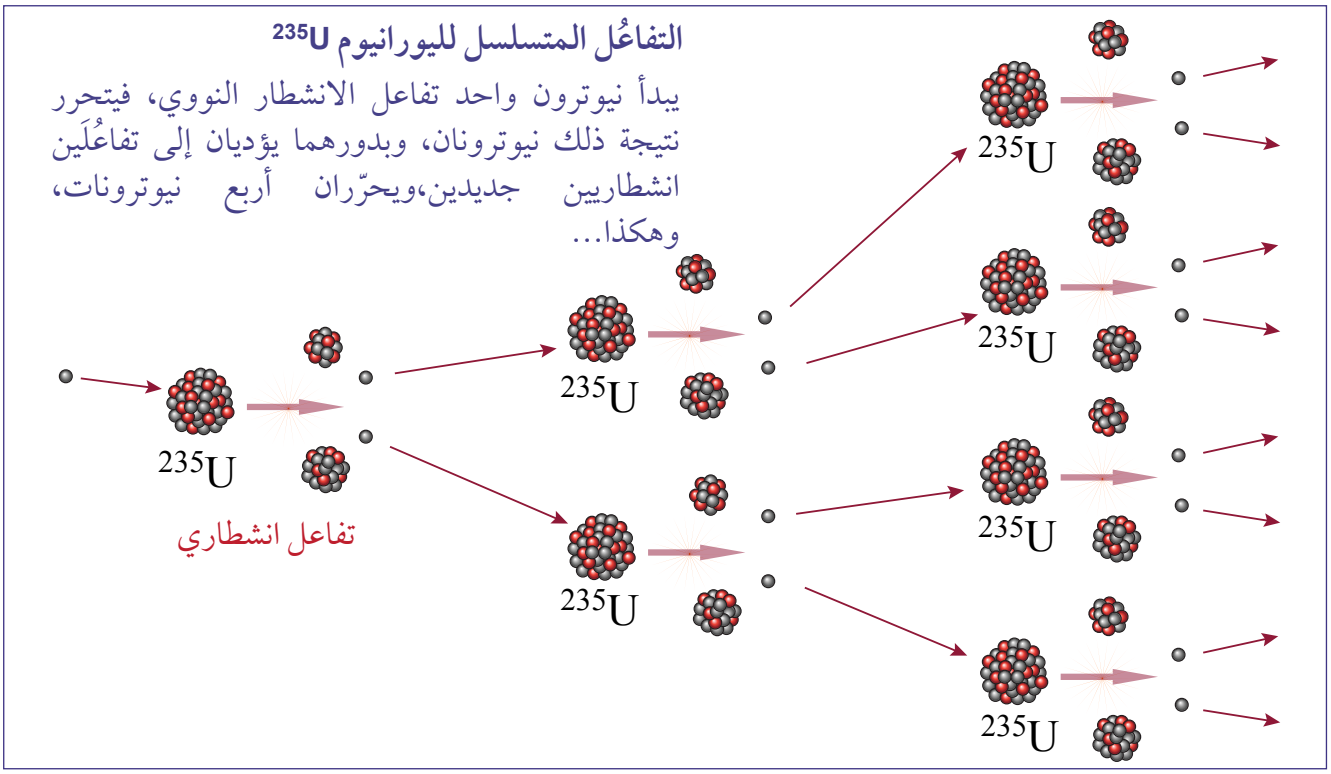
$$E_{(\text{متحررة})} = E_{(\text{نواتج})} - E_{(\text{متفاعلات})} = E_{P(Xe)} + E_{P(Sr)} - E_{R(U)}$$

$$E_{\text{متحررة}} = (8.4\ \text{MeV}) \times A_{Xe} + (8.8\ \text{MeV}) \times A_{Sr} - (7.6\ \text{MeV}) \times A_{U}$$
$$= (8.4\ \text{MeV}) \times 140 + (8.8\ \text{MeV}) \times 94 - (7.6\ \text{MeV}) \times 235 = 217\ \text{MeV}$$

وهذا قريب جدًّا من الطاقة الفعلية المُتحرِّرة، وهي 208 MeV.

التفاعُل النووي المتسلسل

قد يسبِّب قذف ذرّة $^{235}_{92}U$ بنيوترون واحد انشطارًا نوويًّا، وينتج منه نيوترونان. فإذا اصطدم النيوترونان الناتجان مع ذرَّتين أُخرتين من الـ $^{235}_{92}U$، فإن الانشطارين الجديدَين يؤدّيان إلى إنتاج أربعة نيوترونات. يمكن لتلك النيوترونات الأربعة أن تصطدم بأربع ذرّات يورانيوم أخرى، وهكذا. يؤدّي ذلك إلى تفاعُل نووي تلو الآخر، ويسمّى ما يحدث **التفاعُل المتسلسل Chain reaction** (**الشكل 7-40**). لكي يحدث التفاعُل المتسلسل يجب أن يكون هناك احتمال كبير أن يصل كل نيوترون إلى نواة أخرى قبل أن يحدث له الامتصاص أو التباطؤ. وهذا يتطلَّب كتلة حرجة من المادة الانشطارية. **الكتلة الحرجة** هي الحد الأدنى من المادة الانشطارية، التي تكون عادة اليورانيوم-235 في حجم صغير نسبيًّا، حيث يمكن للتفاعُل المتسلسل أن يحدث.



الشكل 7-40 تفاعُل نووي متسلسل.

تشير مفردة **الطاقة النووية Nuclear energy** عمومًا إلى تفاعُلات الانشطار النووي التي يُحافَظ على استمراريتها من خلال التفاعُل المتسلسل. ذلك أن كلّ تفاعُل انشطاري تنتج منه كمّية كبيرة من الطاقة يمكن أن تتحوّل إلى أشكال أخرى من الطاقة، مثل تسخين المياه، وتحويلها إلى بُخار، يُشغِّل توربينات بخارية لتوليد طاقة ميكانيكية تُشغِّل بدورها مولِّدًا كهربائيًّا لتحويل الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربائية (**الشكل 7-41**).

الشكل 7-41 محطة طاقة نووية.

إيجابيات الانشطار النووي وسلبياته

تسمح الانشطارات النووية والتفاعُلات النووية المتسلسلة بتحويل الكتلة إلى طاقة. فالطاقة النووية هي شكل نظيف ومتجدِّد من الطاقة أصبح متاحًا من خلال معادلة أينشتاين. ولكن هناك استخدامات غير سلمية لهذه الطاقة، إذ، أصبح ممكنًا عن طريق تكافؤ الكتلة – الطاقة إنتاج أسلحة نووية أيضًا، تنتج عنها طاقة ضخمة نتائجها كارثية. يُظهر **الشكل 7-42** آثار اختبار نووي تحت الماء، يُسمّى اختبار بيكر.

الشكل 7-42 اختبار بيكر.

تعرّض موضوع الانشطار النووي للنقد في مناسبات عديدة. فعلى الرغم من أن أكثر من 30 دولة في العالم تستخدم الطاقة النووية، فإن هناك بلدانًا أخرى لا تزال تناقش إن كانت الطاقة النووية خيارًا قابلاً للتطبيق.

إيجابيات الانشطار النووي

1. لا تنتج الطاقة النووية الغازات الدفيئة (الغازات المُسبِّبة للاحتباس الحراري)، باستثناء حالة تعدين اليورانيوم وتنقيته، حيث تكون كمّية الغازات الدفيئة الناتجة من ذلك صغيرة جدًا، مقارنة بما تنتجه الأشكال الأخرى من الطاقة.
2. يمكن أن توفر الطاقة النووية طاقة مستمرة ليل نهار، وفي جميع أحوال الطقس، مقارنة بالطاقة الشمسية أو طاقة الرياح.
3. يمكن القول إن تكلفة تشغيل محطّة الطاقة النووية منخفضة للغاية. ذلك أن معظم النفقات تكون مطلوبة للعاملين والمواد المُشعّة.

سلبيات الانشطار النووي

1. معلوم أن تكاليف بناء المحطّة مرتفعة جدًّا، ما يجعل تحمُّل تكاليف بناء محطّة للطاقة في بعض البلدان صعبًا جدًّا.
2. ينتج من الانشطار النووي نفايات نووية تحتاج إلى طمر آمن، وهي ضارّة بالكائنات الحيّة والنباتات إذا أُلقيت في البيئة المحيطة.
3. يُنتج الانشطار النووي إشعاعات تضرّ بالبشر، وهي تعرّض عمّال المحطّة للخطر، ما لم يتّبعوا تعليمات السلامة.
4. يمكن لأي حادث يقع في محطّة الطاقة النووية أن يسبِّب أضرارًا واسعة النطاق.
5. ينشأ خطر من تحوُّل المواد النووية المخصّصة للأغراض السلمية إلى أسلحة نووية.

نشاط 7-4 مخاطر الانحلال الإشعاعي

سؤال الاستقصاء	ما مخاطر الانحلال الإشعاعي على الحياة والصحة التي ظهرت إلى العلن بعد انفجار مُفاعِل تشيرنوبيل وكارثة فوكوشيما النووية؟
الموادّ المطلوبة	الاتصال بشبكة الإنترنت، وكتب وورق ملصقات

انفجار مُفاعِل تشيرنوبيل

تعتبر كارثة مُفاعِل تشيرنوبيل أسوأ كارثة نووية حتى الآن. ففي العام 1986، وأثناء اختبار للسلامة استهدف واحدًا من مُفاعِلات تشيرنوبيل في الاتحاد السوفيتي سابقا، لم يستجب المُفاعِل كما هو مخطَّط له. وبدأت تتوالى سلسلة من التفاعُلات النووية الخارجة عن السيطرة. وأدى التفاعُل المتسلسل إلى تحرير كمّية كبيرة من الطاقة عملت على تبخير ماء التبريد وتمزيق قلب المُفاعِل. وأطلق الانفجار ملوِّثات نووية، الأمر الذي زاد من مستوى الإشعاع في تشيرنوبيل والمناطق المحيطة به إلى مستويات غير آمنة. يوضح **الشكل 7-43** محطة تشيرنوبيل للطاقة النووية.

الشكل 7-43 محطة تشيرنوبيل للطاقة النووية.

كارثة فوكوشيما النووية

وقعت كارثة فوكوشيما دايتشي عام 2011 في مدينة أوكوما باليابان. نجم الحادث عن زلزال توهوكو المدّمر وأمواج التسونامي العاتية، حيث غمرت أمواج التسونامي الطابق السفلي من محطة توليد الكهرباء، ما تسبّب في خلل وفي تعطيل مولِّدات الطوارئ. وبالرغم من أن المُفاعِلات أوقفت تفاعُل الانشطار، كانت هناك حاجة إلى تشغيل نظام التبريد بالماء لتبريد قلب المُفاعِل. ولكن مضخّات المياه توقَّفت عن العمل في اليوم التالي بعد التسونامي، ما أدّى إلى صهر قلب المُفاعِل، مُسبِّبًا حدوث 3 انفجارات للهيدروجين في 4 أيام. وانطلقت إثر ذلك المُلوِّثات النووية في الجوّ. وما زالت آثار الكارثة قيد الدراسة. يوضح **الشكل 7-44** الفيضانات في فوكوشيما بعد كارثة التسونامي.

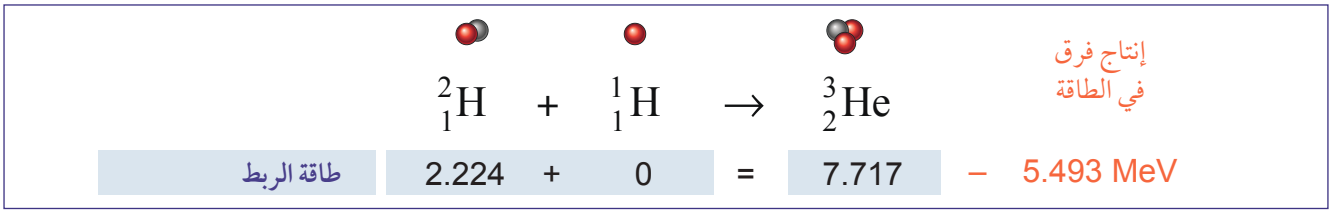
سؤال البحث

ابحث في آثار كل من الكارثتين، مركّزًا في سجلّات الوفيات والأمراض. ما الآثار التي حلّت على البيئة في كل من هذين الحادثين؟ ركّز في المياه والحياة البرية والغابات. كيف تمت معالجة النشاط الإشعاعي الناتج؟ متى تنتهي الآثار الناتجة منهما؟

الشكل 7-44 فوكوشيما بعد كارثة التسونامي.

الاندماج النووي

يجمع **الاندماج النووي nuclear fusion** نواتين خفيفتين لتكوِّنا نواة أكبر. وإذا كان للنواة الكبرى طاقة ربط أكبر، يطلق الاندماج طاقة نووية. ويعدّ الإندماج النووي أكثر ظاهرة مهمّة في الطبيعة، وهو مصدر الطاقة للشمس والنجوم. يؤدي الاندماج النووي داخل الشمس إلى تفاعل نظيري الهيدروجين - 1 والهيدروجين-2 (ديوتيريوم) للحصول على هيليوم-3 كما في **الشكل 7-45**.



الشكل 7-45 تفاعل اندماج نووي.

تبلغ الطاقة الناتجة عند اندماج نظيرَي الهيدروجين وإنتاج هيليوم-3 ما يعادل 5.493 MeV. هناك ثلاثة نيوكليونات في هذا التفاعل، لذلك تكون الطاقة الناتجة لكل نيوكليون هي:

$$\frac{1}{3} \times 5.493 \text{ MeV} = 1.831 \text{ MeV/نيوكليون}$$

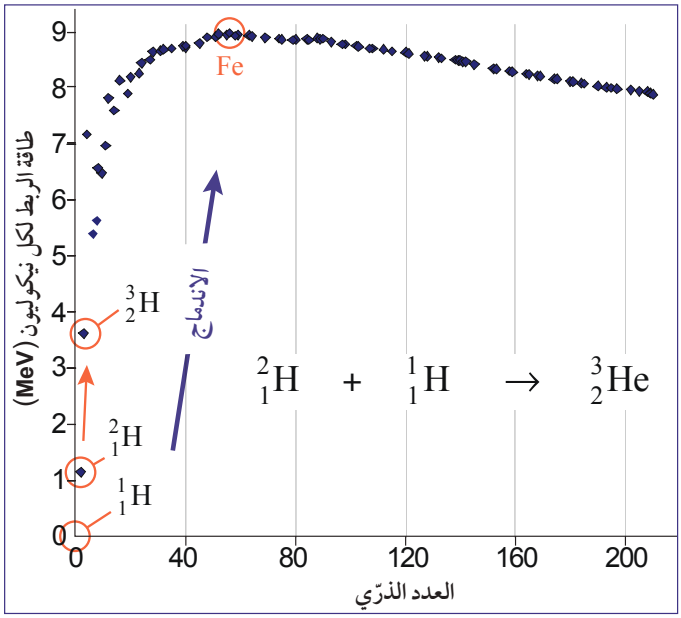
الطاقة الناتجة من الانشطار مقابل الاندماج

تبلغ الطاقة الناتجة من تفاعل الانشطار النووي لليورانيوم -235 ما يعادل 208 MeV. بما أن عدد النيوكليونات في اليورانيوم هو 235، فإن الطاقة المتحرِّرة لكل نيوكليون تكون:

$$\frac{208 \text{ MeV}}{235 \text{ نيوكليون}} = 0.885 \text{ MeV/نيوكليون}$$

الطاقة الناتجة من الاندماج النووي أكبر كثيرًا من طاقة الانشطار النووي.

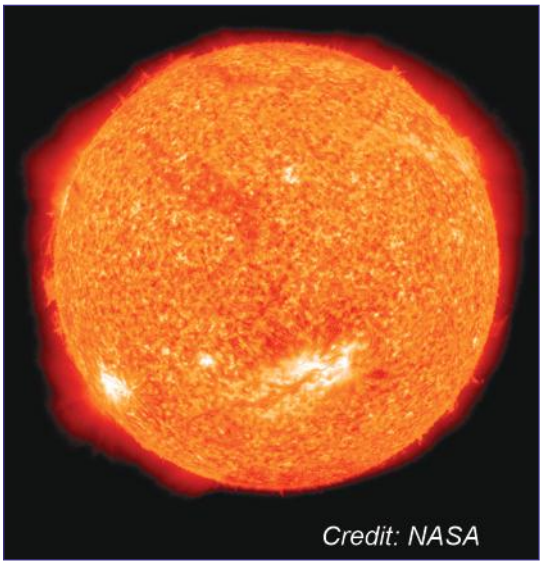
يظهر **الشكل 7-45** كيف يبدو تفاعل الاندماج في **الشكل 7-46** على الرسم البياني لطاقة الربط للنيوكليون. تنتج تفاعلات الاندماج النووي الطاقة ما دامت المُتفاعِلات والنواتج أخف من الحديد. تجمع تفاعلات الاندماج أنوية خفيفة لتشكِّل أنوية أثقل. وقد تحتاج تفاعلات الاندماج التي تعطي نواتج أثقل من الحديد الطاقة بدلًا من أن تُنتجها. وهذه عملية مهمّة تحدث في النجوم خلال مراحل موتها.



الشكل 7-46 الاندماج النووي وطاقة الربط لكل نيوكليون.

الاندماج يمدّ الشمس بالطاقة

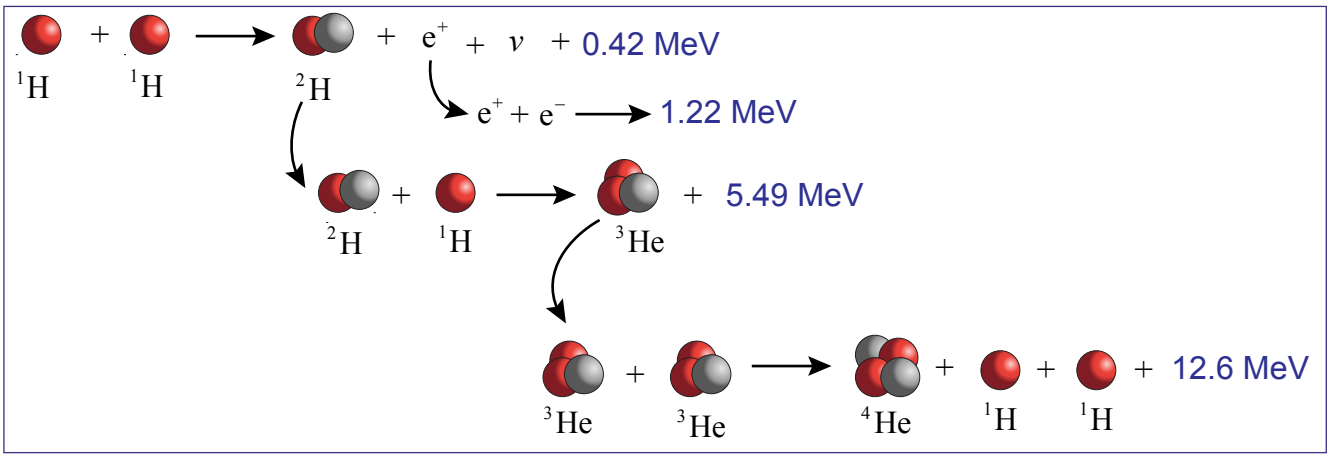
يعدّ الهيدروجين المادة الأكثر انتشارًا في الكون، وهو المادة الموجودة داخل النجوم. فدرجة الحرارة والضغط في قلب الشمس والنجوم الأخرى مرتفعان، إلى حد أن تفاعُلات الاندماج النووي فيها تحوّل كميات كبيرة من الهيدروجين إلى هيليوم، وتتحرّر الطاقة جرّاء هذه العملية. تنتج الشمس طاقة اندماج نووي في قلبها تتحوّل إلى طاقة حرارية (**الشكل 7-47**). تنتقل الطاقة الحرارية من قلب الشمس إلى الخارج نحو سطح الشمس ثم تشعّ في الفضاء.



الشكل 7-47 تنتج الشمس طاقة الاندماج النووي.

تفاعُلات الاندماج النووي داخل الشمس

يُسمّى التفاعُل الذي يزوّد الشمس بالطاقة دورة البروتون – البروتون (p–p) كما في **الشكل 7-48**. إذ تحوّل دورة الـ (p–p) أربع ذرّات من الهيدروجين إلى ذرّة هيليوم. تتكوّن الشمس في معظمها من الهيدروجين والهيليوم (91.2 % هيدروجين، و 8.7 % هيليوم). وتتكون عناصر أثقل من الهيدروجين داخل مراكز النجوم بواسطة تفاعُلات الاندماج. فمثلًا يمكن دمج نواتَي هيليوم-4 لتتكوّن نواة بيريليوم-8. وكلّما طال عُمر النجوم، تكونت فيها عناصر أثقل مثل الكربون والأكسجين.



الشكل 7-48 تفاعُل الاندماج النووي داخل الشمس.

لكي يحدث تفاعل الاندماج يجب أن يتم التغلب على قوة التنافر الهائلة بين نواتين موجبتَي الشحنة عند تقاربهما. لذلك يجب أن تكون درجة الحرارة مرتفعة جدًّا، حيث تنصهر الأنوية معًا وتلتحم قبل أن تتنافر وتتطاير. تبلغ درجة حرارة مركز الشمس حوالي 15 مليون درجة كلفن. لكنّ تفاعُلات الاندماج العملية على سطح الأرض تتطلّب درجة حرارة أعلى، وذلك لعدم توفّر تقنيات تمكنّنا من تحمُّل الضغط الهائل المتوفر على الشمس والناتج من جاذبية الشمس. تصل تفاعُلات الاندماج الحقيقية إلى درجة 85 مليون درجة كلفن أو أعلى، لكن عند ضغط أقلّ منه عند مركز الشمس بملايين المرّات.

تقويم الدرس 7-4

1. كيف يرتبط تكافوء الكتلة–الطاقة بكل من الانشطار النووي والاندماج النووي؟
2. قارن بين التفاعُلات الكيميائية والتفاعُلات النووية.
3. حدِّد اسم العنصر المجهول وكلًّا من العدد الذرّي Z ، والعدد الكُتلي A، في المعادلة النووية الآتية:

$$^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{141}_{56}Ba + {}^{A}_{Z}X + 3\,{}^{1}_{0}n$$

4. حدِّد اسم العنصر المجهول وكلًا من العدد الذرّي Z، والعدد الكُتلي A في المعادلة النووية الآتية:

$$^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{A}_{Z}X + {}^{87}_{35}Br + 3\,{}^{1}_{0}n$$

5. احسب نقص الكتلة لنواة الذهب $^{197}_{79}Au$، عندما تكون الكتلة الذرية 196.924 amu. علمًا أن كتلة البروتون 1.0073 amn وكتلة النيوترون 7800.1 uma
6. تبلغ الكتلة الذرّية للنيكل 61.93 amu. احسب طاقة الربط للنواة وطاقة الربط لكل نيوكليون في النواة $^{62}_{28}Ni$.
7. اعتبر أن ذرّة من اليورانيوم–236 ، قد انقسمت إلى نواتين من البلاديوم–117. تبلغ الكتلة الذرّية المعروفة لليورانيوم 236.1205 amu، وللبلاديوم 116.918 amu.
   a. اكتب معادلة التفاعُل النووي.
   b. اذكر أسماء الجُسيمات التي نتجت، غير البلاديوم.
   c. احسب الطاقة الناتجة.
8. أي من التفاعُلين الآتيين تفاعُل انشطار نووي؟ وأيّهما تفاعُل اندماج نووي؟ وضّح اختيارك.

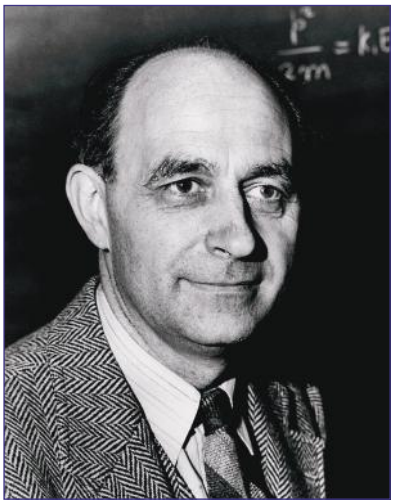
   a. $^{2}_{1}H + {}^{3}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{0}n$

   b. $^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{144}_{56}Ba + {}^{89}_{36}Kr + 3\,{}^{1}_{0}n$

9. تحتوي كاشفات الدخان على نظير مُشعّ للأميريسيوم–235 تنبعث منه جُسيمات ألفا. ومع ذلك يزعم المصنِّعون لها أن المُنتجات آمنة. اصدر حكمًا على هذا الادعاء، بالتأكيد أو النفي من خلال اطلاعك على قدرة جسيمات ألفا على اختراق أجسام الناس.

ضوء على العلماء

إنريكو فيرمي (1901-1951)



الشكل 7-49 إنريكو فيرمي (1901-1951)

يُعدّ الفيزيائي الإيطالي الأمريكي إنريكو فيرمي «مهندس العصر النووي»؛ وهو الذي ابتكر أول مُفاعِل نووي في العالم، شيكاغو بايل-1، وحصل على جائزة نوبل في الفيزياء.

ولد إنريكو فيرمي في روما بإيطاليا عام 1901. تطوّرت ميوله في الرياضيات والفيزياء في سنّ مبكِرة، واستخدم كثيرًا من الكتب المختلفة لتعليم نفسه. تقدَّم فيرمي عام 1918 للدراسة في جامعة سكولا نورمال سوبرويور بمدينة بيزا الإيطالية، وحصل على المرتبة الأولى في امتحان القبول، وتخرَّج فيها عام 1922 بدرجة دكتوراه في الفيزياء.

أدرك عام 1923، عندما كان يعمل على مُعادلات أينشتاين، أن هناك كمّية هائلة من الطاقة النووية الكامنة، فكتب: «لا يبدو ممكنًا في المدى القريب أن أحدًا سيجد طريقة لتحرير هذه الطاقة، وحتى إن تمكّن أحد الفيزيائيين من تصميم طريقة لذلك فإنه سوف يكون أول من يلقى حتفه بهذه الطاقة».

المُساهمات العلمية

طوّر إنريكو فيرمي عام 1934 نظرية انحلال بيتا، وقدّم فكرة الجُسيمات التي تُسمّى النيوترينو. وحاز عام 1938 جائزة نوبل في الفيزياء، لإثباته أن الجُسيمات المُشعّة تنتج بعد قذف النواة بالنيوترونات، وأن ذلك التفاعُل النووي سببه النيوترونات البطيئة. هاجر إنريكو فيرمي بعد الدراسة والتدريس في إيطاليا إلى أمريكا عام 1938، وبدأ التدريس هناك في جامعة كولومبيا.

كان فيرمي عام 1925 واحدًا من أعضاء الفريق الذي أجرى أول تجربة انشطار نووي في الولايات المتحدة. وعمل على تطوير أول مُفاعِل نووي في العالم هو شيكاغو بايل-1، وهو المكان الذي أُسِّس فيه أول تفاعُل نووي متسلسل. شارك فيرمي كواحد من كبار علماء الفيزياء في تطوير القنبلة الذرّية، وأدّى دورًا مهمًّا في تطوير الفيزياء النووية.لم يكن لفيرمي شغف بالاكتشافات الجديدة فحسب، بل كان شغوفًا أيضًا بتدريس تلك الاكتشافات.

الوحدة 7

مراجعة الوحدة

الدرس 7-1: الذرّة

- **الذرّة** هي أصغر جُسيم لعنصر يمكن أن يوجد بشكل منفرد، أو مركّب مع ذرّات أخرى. تتألف الذرَّة من نواة ثقيلة مُحاطة بإلكترون واحد أو أكثر.
- **الإلكترون** واحد من مُكوِّنات الذرّة (جُسيم دون ذرّي) له شُحنة سالبة مقدارها -1.602×10^{-19} C، وكتلة مقدارها 9.109×10^{-31} kg.
- **البروتون** جُسيم دون ذرّي له شحنة موجبة مقدارها $+1.602 \times 10^{-19}$ C، وكتلة مقدارها 1.673×10^{-27} kg.
- **النيوترون** جُسيم دون ذرّي ليس له شحنة كهربائية، وتبلغ كتلته 1.675×10^{-27} kg.
- **النواة** هي اللب الصغير والكثيف للذرَّة، الذي يحتوي على جميع البروتونات والنيوترونات، ويبلغ قطره $\frac{1}{10{,}000}$ من قطر الذرّة.
- **الشحنة الأوَّليّة** شحنة كهربائيّة غير قابلة للانقسام، يحملها البروتون (موجبة) أو الإلكترون (سالبة). ويُشار إليها عادةً بالرمز e وتساوي 1.602×10^{-19} C.
- **العدد الذرّي** هو عدد البروتونات داخل نواة الذرَّة.
- **جُسيم ألفا** يتكوَّن من بروتونين ونيوترونين، ويُشار إليه أحيانًا بنواة ذرة الهيليوم.
- **النظائر** ذرات لها العدد الذرّي نفسه (لأنها تحمل العدد نفسه من البروتونات) لكنّ كُتَلها الذرّية مختلفة (لأنها تختلف بعدد النيوترونات).
- **العدد الكتلي** هو العدد الكلّي للبروتونات والنيوترونات في النواة.

الدرس 7-2: النشاط الإشعاعي

- **النظائر المُشعة** هي نظائر غير مستقرَّة تتعرّض للانحلال الإشعاعي.
- **الانحلال الإشعاعي** تفكُّك جُزئي وتلقائي للنواة يصاحبه تحرّر لجُسيمات ذات طاقة أو إشعاعات.
- **انحلال ألفا** هو انحلال إشعاعي تُصدر فيه النواة جُسيم ألفا، فينقص العدد الذرّي للذرّة الأصليّة بمقدار 2 و ينقص العدد الكتلي بمقدار 4.

- **انحلال بيتا** انحلال إشعاعي يتحوّل فيه النيوترون في النواة تلقائيًّا إلى بروتون وإلكترون. يبقى البروتون داخل النواة، فيزداد العدد الذرّي للذرَّة بمقدار واحد ولا يتغير العدد الكلي بينما يَصدُر الإلكترون الحامل للطاقة من الذرّة كجُسيم بيتا.
- **البوزترون** جُسيم يمتلك كتلة الإلكترون نفسها، ولكن شحنته موجبة مقدارها $+1.602 \times 10^{-19}$ C.
- **النيوترينو المضاد** جُسيم عديم الشحنة كتلته أقلّ من 2.14×10^{-37} kg. ينتج هذا الجُسيم من انحلال بيتا.
- **انحلال جاما** عمليّة إشعاعيّة خلال انتقال النواة إلى مستوى طاقة مُنخفض، عن طريق إصدار فوتون له طاقة عالية، يُسمّى إشعاع جاما.
- **الانحلال المتسلسل** دورة الانحلالات التي تحدث خلال الانحلال الإشعاعي إلى أن يبلغ العنصر النواة المستقرّة.
- **أثر النشاط الإشعاعي** مواد تحتوي على نظائر مُشعّة يمكن أن تستخدم لإنتاج صورة.
- **الخلفية الإشعاعية** إشعاع دائم من حولنا ينتج من مصدر طبيعي أو صناعي.

الدرس 7-3: عُمْر النصف

- **عمر النصف** متوسِّط الزمن اللازم لانحلال نصف عدد الأنوية الموجودة في المادة المشعّة.
- **ثابت الانحلال** احتمال انحلال النواة في وحدة الزمن.
- **معدّل الانحلال** قياس لعدد الأنوية المُنحلّة في وحدة الزمن.
- **البيكريل** وحدة معياريّة للنشاط الإشعاعي تساوي انحلال نواة واحدة خلال ثانية.

الدرس 7-4: التفاعُلات النوويّة

- **تكافؤ الكتلة – الطاقة** المبدأ الذي ينصّ على أنّ الكتلة يمكن أن تتحوَّل إلى طاقة والعكس بالعكس، ويتمثّل بالعلاقة $E = mc^2$.
- **الطاقة السكونيّة** الطاقة المُكافئة لكتلة جُسيم، أو جسم في حالة السكون، أي عندما تكون السرعة صفرًا.
- **وحدة الكتل الذرّيّة** وحدة معياريّة للقياس تعبّر عن كتلة الذرَّة. وحدة كتلة ذرّيّة amu واحدة تعرّف على أنّها $\frac{1}{12}$ من كتلة ذرّة الكربون-12، وتساوي 1.661×10^{-27} kg

الوحدة 7

مراجعة الوحدة

- **الإلكترون فولت** وحدة الطاقة التي تمثِّل كمّية الطاقة التي يكتسبها الإلكترون المُتحرِّك خلال فرق للجهد مقداره فولت واحد (V). واحد إلكترون فولت (eV) يساوي 1.62×10^{-19} J.
- **طاقة الربط النووية** محصِّلة الطاقة التي يجب بذلها للتغلّب على القوة النووية الشديدة، وفصل النواة إلى الجُسَيمات المُكوِّنة لها.
- **نقص الكتلة** الفرق بين مجموع كتلة النيوكليونات المُكوِّنة للنواة والكتلة الكليّة للنواة.
- **التفاعُل النووي** عمليّة تتحوَّل فيها نواة عنصر إلى نظير مُختلف لذلك العنصر، أو إلى عنصر مختلف كليًّا.
- **الانشطار النووي** تفاعُل نووي تنشطر فيه النواة الكبيرة إلى عدد من أنوية أصغر، مُطلقةً كمّية كبيرة من الطاقة.
- **التفاعُل المتسلسل** تفاعُل نووي يمكن فيه للنواتج من تفاعُل واحد أن تولّد أكثر من تفاعُل إضافي.
- **الطاقة النوويّة** نوع من الطاقة المتولّدة من التفاعُلات في نواة الذرّة.
- **الاندماج النووي** تفاعُل نووي تندمج فيه نواتان خفيفتان معًا لتشكيل نواة أثقل و يتحول فرق الكتلة إلى طاقة هائلة.

الاختيار من مُتعدّد

1. أيُّ من الجُسَيمات الآتية تدور حول النواة؟
   a. البروتونات.
   b. النيوترونات.
   c. الإلكترونات.
   d. النيوكليونات.

2. تمتلك ذرّة معيّنة 29 نيوترونًا و 55 نيوكلونًا. ما العدد الذرّي لتلك النواة؟
   a. 26
   b. 29
   c. 55
   d. 84

3. ما الشرط الذي يجعل حدوث تفاعُلات الاندماج النووي على الأرض أمرًا صعبًا؟
   a. ضغط مُنخفض.
   b. وقود شديد النُدرة.
   c. درجة حرارة مرتفعة.
   d. درجة حرارة مُنخفضة.

4. يمتلك الرصاص-192 عمر النصف 3.5 دقيقة. إذا بدأت بعيِّنة كتلتها 8 kg من الرصاص-192، فكم سيتبقّى منها بعد 17.5 دقيقة؟
   a. 0.25 kg.
   b. 0.46 kg.
   c. 0.5 kg.
   d. 1.6 kg.

5. أي من الأدوات الآتية هي الخيار الأفضل للكشف عن وجود النشاط الإشعاعي؟

a. جلفانوميتر.

b. ثرمومتر.

c. عدّاد جيجر.

d. مصوّر الرنين المغناطيسي.

6. ما قيمة A في معادلة التفاعُل الآتي؟ $^{236}_{92}U \rightarrow {}^{140}_{54}Xe + {}^{A}_{38}Sr + 2\,{}^{1}_{0}n$

a. 86

b. 92

c. 94

d. 95

7. عندما يُصدر نظير مُشع جُسيم بيتا، ماذا يحدث للعدد الذرّي؟

a. يزداد بمقدار 1.

b. ينقص بمقدار 1.

c. ينقص بمقدار 2.

d. يبقى من دون تغيير.

8. في تفاعُل للانشطار، تمتلك المُتفاعِلات كتلة 3.902×10^{-25} kg، لكن كتلة النواتج تكون 3.917×10^{-25} kg. كم من طاقة الربط يكون قد تحرّر في هذا التفاعُل؟

a. 3×10^{-28} J

b. 9×10^{-20} J

c. 2.7×10^{-11} J

d. 4.2×10^{-6} J

9. أيُّ من الخيارات الآتية تطبيق لمعادلة أينشتاين في تكافؤ الطاقة والكتلة؟

a. عِلم الفلك.

b. الطاقة النوويّة.

c. التوربينات.

d. جهاز مطياف الكتلة.

10. ماذا يحدث للعدد الذرّي عندما يُصدر النظير جُسيم ألفا؟

a. يزداد بمقدار 2

b. يزداد بمقدار 4

c. يقل بمقدار 2

d. يقل بمقدار 4

11. أراد عالم أن يحلِّل g 200 من السيبورجيوم-266. وبعد 90 ثانية، تبقّى لديه g 25 منه. ما عمر نصف السيبورجيوم-266؟

a. 8 s

b. 30 s

c. 90 s

d. 270 s

12. أي كميّتين تتساويان في نظيرين للعنصر نفسه؟

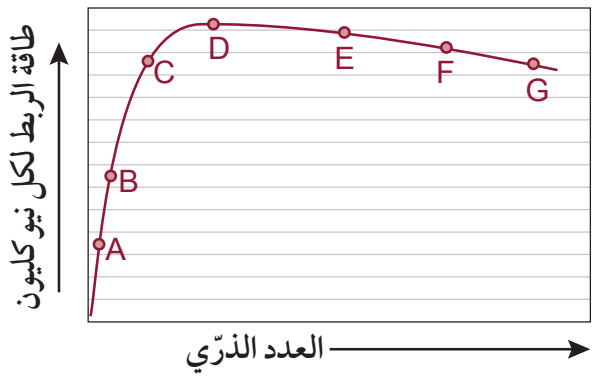
a. البروتونات والنيوترونات.

b. البروتونات والإلكترونات.

c. النيوترونات والإلكترونات.

d. النيوكليونات والإلكترونات.

الأسئلة من 13 إلى 16 تتناول طاقة الربط لكل نيوكليون في الرسم البياني الآتي:



13. أي مما يأتي هو تفاعل اندماج ينتج الطاقة؟

a. $A+B \rightarrow C$

b. $E+F \rightarrow G$

c. $C \rightarrow A+B$

d. $G \rightarrow E+F$

14. أي مما يأتي تفاعل اندماج يحتاج إلى الطاقة؟

a. $A+B \rightarrow C$

b. $E+F \rightarrow G$

c. $C \rightarrow A+B$

d. $G \rightarrow E+F$

15. أي مما يأتي يمثل تفاعل انشطار ينتج طاقة؟

a. $A+B \rightarrow C$

b. $E+F \rightarrow G$

c. $C \rightarrow A+B$

d. $G \rightarrow E+F$

16. أي مما يأتي يمثل تفاعل انشطار يحتاج إلى الطاقة؟

a. $A+B \rightarrow C$

b. $E+F \rightarrow G$

c. $C \rightarrow A+B$

d. $G \rightarrow E+F$

17. أي من النظائر الآتية يتعرّض لانحلال α واحد وانحلالَي β، لينتج $^{211}_{84}Po$؟

a. $^{215}_{84}Po$

b. $^{219}_{88}Ra$

c. $^{211}_{86}Rn$

d. $^{211}_{83}Bi$

الدرس 7-1: الذرّة

18. ما الاختلاف الرئيسي بين نموذج بور للذرَّة والنموذج الكمّي المقبول اليوم؟

19. وضِّح لماذا لا تنفصل النواة مباشرةً نتيجة لقوى التنافر بين بروتوناتها المتقاربة جدًّا.

20. ما الاختلاف بين العدد الكتلي والعدد الذرّي؟

21. استخدم مخطّطًا لإظهار تغيّر فهمنا لتركيب الذرّة على امتداد آلاف السنين.

22. في تجربة التشتُّت لرذرفورد، ما سبب عبور معظم جُسيمات ألفا لرقاقة الذهب من دون انحراف؟

23. في تجربة التشتُّت لرذرفورد، ما سبب ارتداد بعض جُسميات ألفا إلى الخلف؟

24. ما نسبة كتلة كل من الإلكترونات والنواة في ذرّة الكربون إلى كتلة الذرّة الكاملة؟

25. لماذا يمكن اعتبار كتلة الذرة تساوي كتلة نواتها تقريبًا؟

26. ما الفرق بين العُنصر والنظير؟

27. نفترض ثلاثة نظائر هي الأكسجين-16 والأكسجين-17 والأكسجين-18.

a. ما الاختلاف بين أنوية تلك النظائر؟

b. ما الاختلاف في عدد إلكترونات كل منها؟

28. الكربون-12 نظير شائع للكربون.

a. ما عدد كل من البروتونات والنيوترونات لهذا النظير؟

b. ما مجموع كتل تلك البروتونات والنيوترونات؟

الدرس 7-2: النشاط الإشعاعي

29. وضح لماذا يغيّر انحلال ألفا أو بيتا عنصرًا ما إلى عنصر آخر، بينما لا يغيّر انحلال جاما العنصر؟

30. عبر أيّ من عمليات الانحلال، ينحلّ اليورانيوم-238 إلى ثوريوم-234 ؟

31. يتعرّض السيزيوم-137 لانحلال بيتا. اكتب معادلة التفاعُل النووي، بما فيها المتفاعُلات والنواتج.

32. اكتب معادلة التفاعُل النووي التي تعبر عن تعرّض كل من النظائر المُشعّة الآتية لانحلال ألفا:

a. السيبورجيوم-271.

b. الراديوم-226.

c. الكاليفورنيوم-249.

d. البولونيوم-210.

33. اكتب معادلة التفاعُل النووي التي تعبّر عن تعرّض كل من النظائر الآتية لانحلال β^-:

a. الأستينيوم-279.

b. الكربون-14.

c. الفلورين-20.

d. الثوريوم-231.

34. تتعرَّض نواة لانحلال ألفا، فينتج من ذلك نواة البزموث-207. اكتب معادلة التفاعُل النووي التي تعبّر عن الانحلال.

35. يُعبَّر عن الانحلال الإشعاعي للبولونيوم-210 بالمعادلة الآتية:

$$^{210}_{84}\text{Po} \rightarrow {}^{?}_{?}\text{Pb} + {}^{4}_{2}\text{X}$$

حيث X هو جُسيم يصدر نتيجة للانحلال الذي حدث. حدّد النظير الصحيح للرصاص ونوع الانحلال.

36. تنحلّ نواة ${}^{A}_{Z}\text{X}$ بانحلال ألفا، ثمّ بانحلالَيّ بيتا. احسب العدد الذرّي والعدد الكتلي للنواة الناتجة.

37. غالبًا ما يرتدي العاملون في الظروف الإشعاعية سترات صفراء بلاستيكيّة.

a. ما نوع الإشعاعات التي تعتقد أن السترات تحمي العمال منها؟

b. ما الذي يمكن أن يفعلهُ العاملون إضافة إلى ذلك لحماية أنفسهم من التعرُّض للمزيد من تلك الإشعاعات؟

الدرس 3-7: عمر النصف

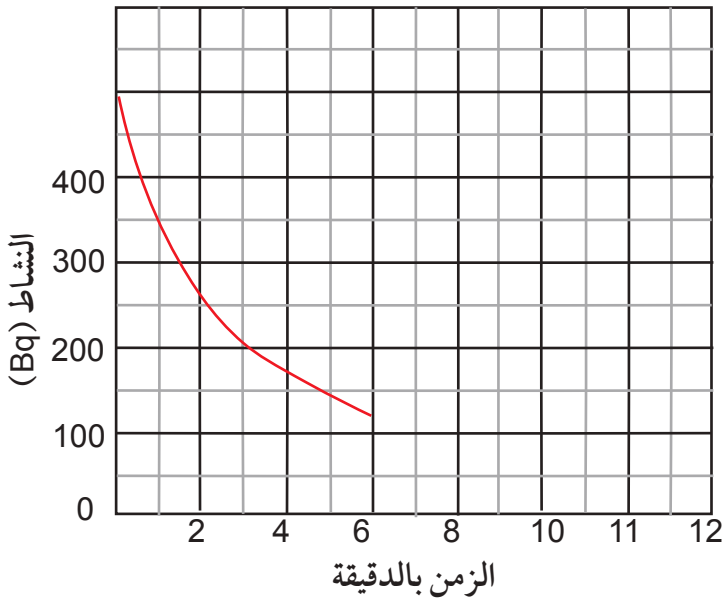
38. قام عالم آثار بقياس كتلة الكربون-14 الموجودة في أحفورة، فوجدها 1 g. ثمّ قام بحساب عُمر هذه العيِّنة، فكان 28,650 عامًا. كم كانت كتلة الكربون-14 الأصليّة في العيِّنة قبل 28,650 عامًا؟

39. بدأ فني مختبر العمل على كتلة 2.79 kg من البولونيوم-197 المُشعّ بعمر نصف 53.6 s. العيّنة موضوعة داخل صندوق من الرصاص كتلته 23.9 kg. كم يلزم البولونيوم-197 من الزمن لينحلّ إشعاعيًّا الى 0.78% من كمّيته الأصليّة؟

40. ينحلّ الكريبتون-85 بعمر نصف 10.8 سنوات. إذا بدأنا مع عيّنة من الكريبتون-85 كتلتها 50 g، فكم سيبقى منها بعد 30 عامًا؟

41. يقيس عدّاد إشعاع عيّنة من الحديد-59، ويسجّل حوالي 11 انحلالًا في الدقيقة. يتم قياس العيّنة بعد 20 يومًا، فتسجِّل 8 انحلالات في الدقيقة. احسب عمر نصف الحديد-59 بوحدة اليوم.

42. يُظهر الرسم البياني الآتي النشاط الإشعاعي لعيّنة مُشعّة بالنسبة إلى الزمن.



a. قدّرْ عمر نصف العيِّنة باستخدام الرسم البياني.

b. انسخ الرسم البياني، ثمّ أكمل عليه المنحنى لإظهار النشاط لغاية 12 دقيقة.

c. تحتوي العيّنة على عنصر نشط إشعاعيًّا X ينحلّ إلى عنصر مستقر Y. احسب الزمن الذي تصبح فيه نسبة الذرّات Y إلى الذرّات X هي 7 مرات ، إذا علمت بعدم وجود ذرّات Y في البداية.

الدرس 7-4: التفاعُلات النووية

43. ما الفرق بين الانشطار النووي والاندماج النووي؟

44. كم عدد وحدات الكتلة الذرّيّة الموجودة في الكيلوجرام الواحد من المادة؟

45. أي من التفاعُلين النوويين: الانشطار أم الاندماج، يحدث في الأنوية الصغيرة الكتلة؟ وأي منهما يحدث في الأنوية الكبيرة الكتلة؟ وضِّح إجابتك.

46. a. هل تبقى الكتلة الكلّية هي نفسها في التفاعُل النووي؟ وضِّح إجابتك.
b. هل الطاقة الكليّة تبقى نفسها؟ وضِّح إجابتك.

47. ما الطاقة السكونيّة للإلكترون؟ كتلة الإلكترون هي 9.11×10^{-31} kg.

48. النظير $^{16}_{8}O$ يمتلك كتلة 15.99491 amu. احسب طاقة الربط لنواة ذلك النظير.

49. احسب النقص في كتلة نواة التريتيوم $^{3}_{1}H$ ، وهو نظير الهيدروجين الذي تبلغ كتلته 3.0160 amu. كتلة البروتون هي 1.0073 amu، وكتلة النيوترون هي 1.0087 amu، وكتلة الإلكترون هي 0.0005 amu.

50. ما طاقة الربط لنواة ذرّة التريتيوم؟

51. الأسئلة الآتية حول الكربون-12:
a. تبلغ كتلة النواة 11.9967 amu. ما هو نقص الكتلة؟
b. حوّل نقص الكتلة إلى وحدة الكيلوجرام، ثمّ استخدم معادلة أينشتاين لحساب طاقة الربط بوحدة الجول.

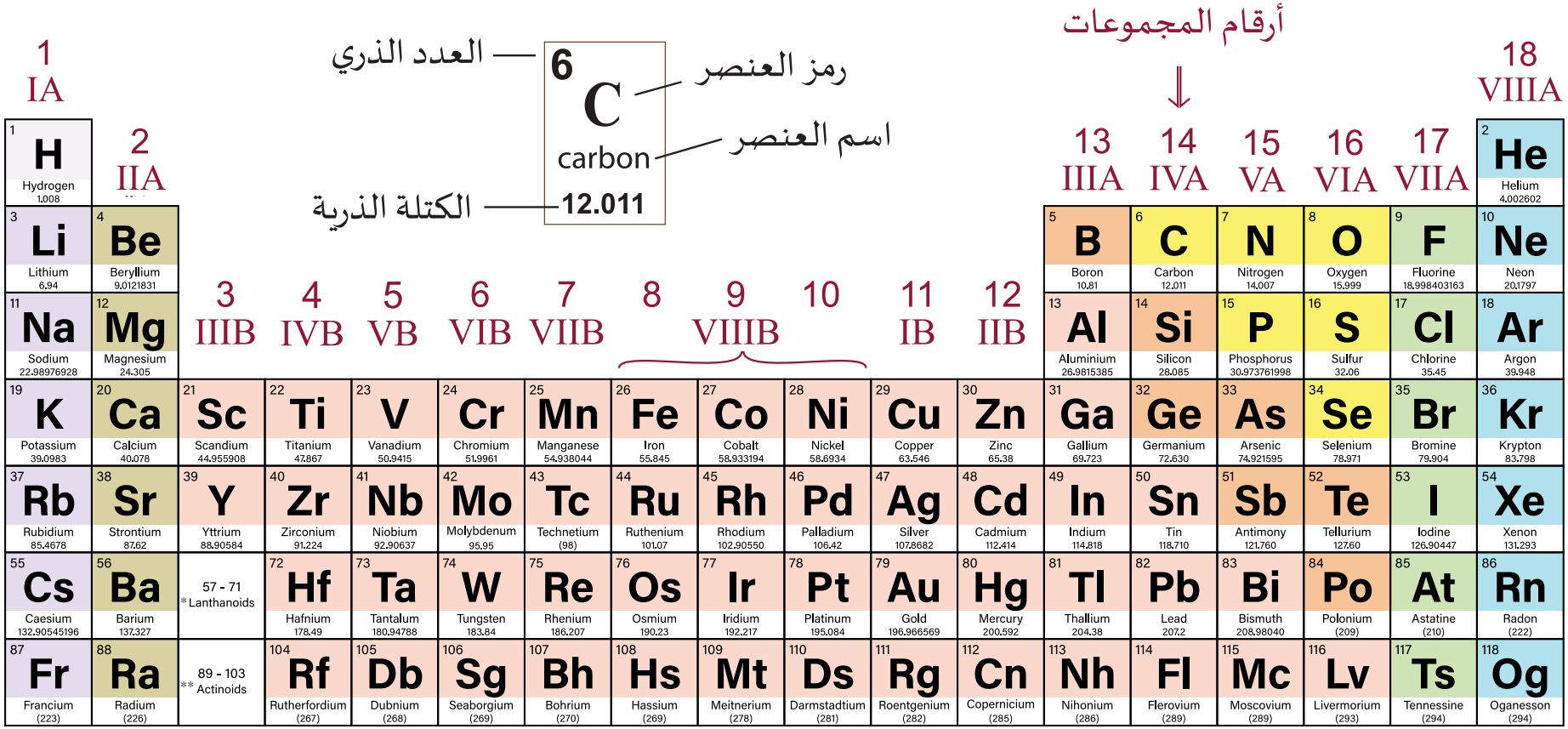
52. احسب الطاقة السكونيّة للبروتون والنيوترون والإلكترون بوحدة الجول. (كتلة البروتون هي 1.673×10^{-27} kg، كتلة النيوترون هي 1.6675×10^{-27} kg، كتلة الإلكترون هي 9.11×10^{-31} kg).

53. يُحرّر التفاعُل النوويّ:

$$^{1}_{0}n + ^{235}_{92}U \rightarrow ^{144}_{56}Ba + ^{89}_{36}Kr + 3\,^{1}_{0}n$$

طاقةً مقدارها 200 MeV. حوّل هذه الطاقة إلى وحدة الجول.

الجدول الدوري الحديث للعناصر



الشكر والتقدير

يشكر المؤلفون والناشرون المصادر الآتية على السماح لهم باستخدام ملكياتهم الفكرية كما أنهم ممتنون لهم لموافقتهم على نشر الصور.

Egoreichenkov Evgenii/Shutterstock; Doug McLean/Shutterstock; Alexander Gatsenko/Shutterstock; ARTSIOM ZAVADSKI/shutterstock; rumruay/Shutterstock; Fouad A. Saad/Shutterstock; Rugged Studio/Shutterstock; Rvector/Shutterstock; Menno van der Haven/Shutterstock; Maxim Gaigul/Shutterstock; Iri-s/Shutterstock; springsky/Shutterstock; Meggi/Shutterstock; Jo Theera/Shutterstock; Dmitry_Kosarev/Shutterstock; Shiyan Sergiy/Shutterstock; MicroOne/Shutterstock; Macrovector/Shutterstock; robuart/Shutterstock; Vector FX/Shutterstock; T VECTOR ICONS/Shutterstock; Krafted/Shutterstock; Serorion/Shutterstock; Prachaya Roekdeethaweesab/Shutterstock; vectorisland/Shutterstock; LWY Partnership/Shutterstock; Anatolir/Shutterstock; BigMouse/Shutterstock; yoojiwhan/Shutterstock; Ton Snoei/Shutterstock; CreateCamera/Shutterstock; Anton Starikov/Shutterstock; Liudmila Savushkina/Shutterstock; e X p o s e/Shutterstock; Ariyaporn chumkong/Shutterstock; Piart/Shutterstock; darsi/Shutterstock; RayPics/Shutterstock; Billion Photos/Shutterstock; Wstockstudio/Shutterstock; Sicco Hesselmans/Shutterstock; Tanakax3/Shutterstock; cobalt88/Shutterstock; Raman Shytsik/Shutterstock; John Mackintosh/Shutterstock; Timothy Hodgkinson/Shutterstock; Serorion/Shutterstock; Jan Babak/Shutterstock; Winai Tepsuttinun/Shutterstock; ParabolStudio/Shutterstock; Andrei Nekrassov/Shutterstock; Dmitry S. Gordienko/Shutterstock; Monika Wisniewska /Shutterstock; Joel Everard /Shutterstock, Monika Wisniewska /Shutterstock; Joel Everard /Shutterstock; Naeblys /Shutterstock; bicubic /Shutterstock; samray /Shutterstock; VectorMine /Shutterstock; OSweetNature /Shutterstock; Dietrich Leppert /Shutterstock; Fouad A. Saad /Shutterstock; BINK0NTAN /Shutterstock; mTaira /Shutterstock; ghost design /Shutterstock; Doroniuk Anastasiia /Shutterstock; corbac40 /Shutterstock; austinding /Shutterstock; Andrea Danti /Shutterstock; inigocia/Shutterstock; vchal/Shutterstock; tinkivinki/Shutterstock; Naypong Studio/Shutterstock; Lukasz Janyst /Shutterstock; John D Sirlin /Shutterstock; Walkabout Photo Guides /Shutterstock; Eugene R Thieszen /Shutterstock; Huntstyle /Shutterstock; Justin Hobson /Shutterstock; Vladiczech /Shutterstock; NASA images /Shutterstock; Arshad876 /Shutterstock; mapichai/Shutterstock; Minerva Studio/Shutterstock; Belish/Shutterstock; Christoph Burgstedt/Shutterstock; Mopic/Shutterstock; Peter Hermes Furian/Shutterstock; Nasky/Shutterstock; Draw Man/Shutterstock; Rainer Lesniewski/Shutterstock; Robert Adrian Hillman/Shutterstock; Designua/Shutterstock; Alexander Lukatskiy/Shutterstock; giedre vaitekune/Shutterstock; Fuss Sergey/Shutterstock; Pat_Hastings/Shutterstock; Jakkapan Sookjaroen/Shutterstock; ghost design/Shutterstock; Andrei Kuzmik/Shutterstock; Ras Abu Fontas A3 plant; Purple Anvil/Shutterstock; Eric Iselee/Shutterstock; Martin Voeller/Shutterstock; Sebastian Kaulitzki/Shutterstock; Michiel de Wit /Shutterstock; Flegiere/Shutterstock; Steve Bower/Shutterstock; terekov igor/Shutterstock; Kimberly Hall/Shutterstock; Oleksandr_Delyk/Shutterstock; grzym/Shutterstock; Anton Starikof/Shutterstock; marcinm111/Shutterstock; David Tonelson/Shutterstock; Ultrapek/Shutterstock; koosen/Shutterstock; Ebtikar/Shutterstock; royaltystockphoto.com/Shutterstock; juan gartnear/Shutterstock; Daojah/Shutterstock; Catherine Eckhart/Shutterstock; Sebastian Kaulitzki/Shutterstock; Burdun Illiya/Shutterstock; Kateryna Kon/Shutterstock; Maxx-studia/Shutterstock; lightboxx/Shutterstock; gorodenkoff/Shutterstock; okskaz/Shutterstock; Mike Workman/Shutterstock; Miss E Media/Shutterstock; Eric Agar/Shutterstock; IanRedding/Shutterstock; Aldona Griskeviciene/Shutterstock; Raland/Shutterstock; Okrasyuk/Shutterstock; Photomaster/Shutterstock; A7880S/Shutterstock; PhotocechCZ/Shutterstock; Rizik/Shutterstock; SunshineVector/Shutterstock; Lebendkulturen.de/Shutterstock; eranicle/Shutterstock; Bijanart/Shutterstock; JubalHarshaw/Shutterstock; Taiga/Shutterstock; /Shutterstock; /Shutterstock; / Shutterstock; /Shutterstock; /Shutterstock;