الفيزياء

كتاب الطالب

المستوى الحادي عشر

PHYSICS

STUDENT BOOK

GRADE 11

الفصل الدراسي الثاني
SECOND SEMESTER
2020 - 2021

(الطبعة الأولى - First edition)

© وزارة التعليم والتعليم العالي في دولة قطر

يخضع هذا الكتاب لقانون حقوق الطباعة والنشر، ويخضع للاستثناء التشريعي المسموح به قانونًا ولأحكام التراخيص ذات الصلة.

لا يجوز نسخ أي جزء من هذا الكتاب من دون الحصول على الإذن المكتوب من وزارة التعليم والتعليم العالي في دولة قطر.

تمّ إعداد الكتاب بالتّعاون مع شركة تكنولاب.

التأليف: فريق من الخبراء بقيادة الدكتور توم سو وبالتّعاون مع شركة باسكو العلميّة.

التّرجمة: مطبعة جامعة كامبريدج.

الطبعة الأولى 2020-2021 م

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

وَحَمَائِمٌ يَوْمَ السَّلاَمْ ... جَوَارِحٌ يَوْمَ الفِدَاءْ

المراجعة والتّدقيق العلميّ والتّربويّ

إدارة التّوجيه التّربويّ

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 تمكِّـن 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

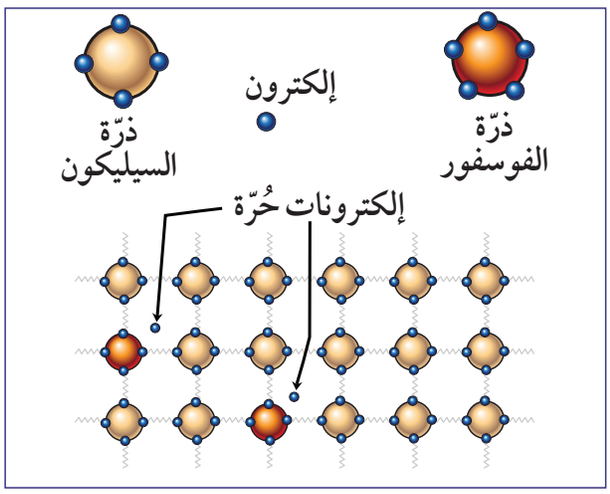
كم من الأشخاص من حولنا لديهم هاتف جوال؟ وكم منهم يعرف كيفية عمل ذلك الهاتف؟ يتناول هذا الكتاب المبادئ الأساسية لمختلف تقنيات الإلكترونيات والموجات، كالتي في الهواتف النقّالة وأجهزة الراديو والضوء.

تعلّمتَ من قَبْل المبادئ الأساسية للدوائر الكهربائية. تتوسّع الوحدة الأولى في تلك المبادئ لتشمل دوائر المُكثِّفات وأشباه المُوصلات. تُخزِّن المُكثِّفات الشحنة الكهربائية، وتزوِّدنا بدوائر 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 عصري قد يحتوي على مليار مفتاح صغير من أشباه الموصلات.

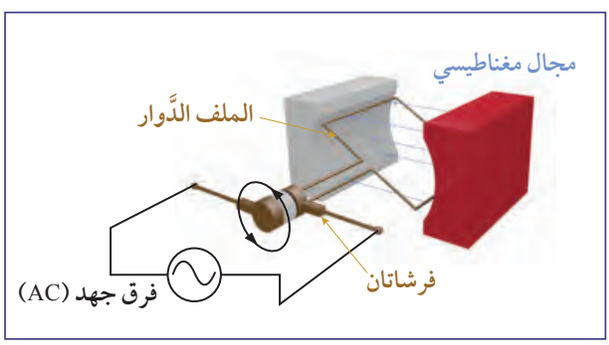
تقدِّم الوحدة الثانية من الفصل الدراسي الثاني مبادئ كهرباء التيّار المُتردِّد AC والحثّ الكهرومغناطيسي. ويربط التماثل اللافت في الفيزياء بين المجالين الكهربائي والمغناطيسي، ويشكّل أساس الأجهزة الفعّالة كالمولِّدات الكهربائية.

الوحدة الثالثة من الفصل الثاني 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 النقّالة.

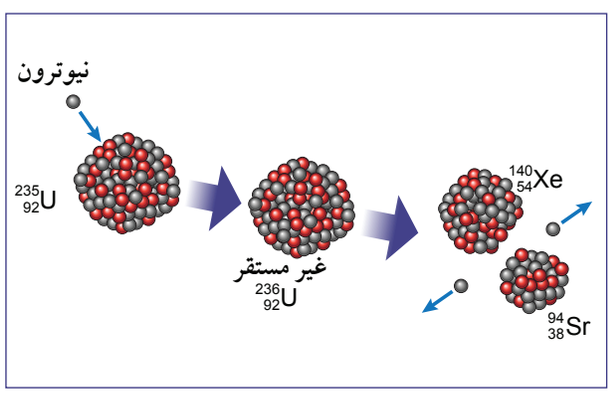
تغوص الوحدة الأخيرة من الفصل الثاني داخل الذرات وأنويتها. فالذرة تحتوي في داخلها على طاقة مخبّأة داخل نواة لا يزيد قطرها عن 10^{-15}m. سيتم شرح النشاط الإشعاعي والتقنيات الفعّالة لكل من الإنشطار والإندماج النوويين.



تستخدم أشباه الموصلات خصائص مواد كالسيليكون والفوسفور.



مبدأ عمل المُولِّد الكهربائي.

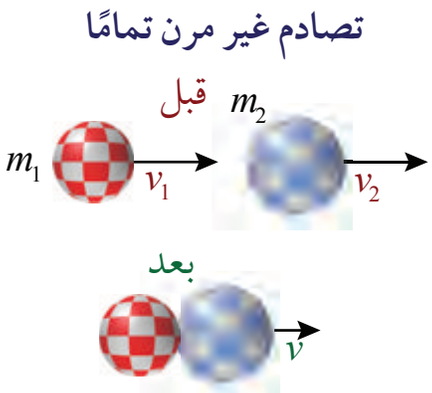


الإنشطار نووي.

بعض أقسام هذا الكتاب

الرّسوم التّوضيحيّة

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



أسئلة للمناقشة

سؤال للمناقشة

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

أسئلة المناقشة تزوّد الصّفّ بفرصة مناقشة المفاهيم والمعلومات الجديدة.

شريط الأفكار المهمّة

تنتشر جميع الموجات الكهرومغناطيسية بسرعة الضوء.

تحديد وتذكّر النّقاط الرّئيسة.

المسائل الرّياضيّة

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

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

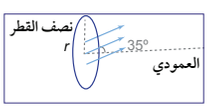
الأمثلة

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 الحثيّة حول الملفّ.

b. ما اتجاه التيّار الحثّي؟



تُظهر الأمثلة جميع خطوات الحلّ والتّبرير للحصول على حسابات صحيحة.

العلم والعلماء

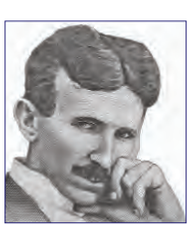
الدرس 5-3: المُحوِّلات الكهربائية

ضوء على العلماء

نيكولا تسلا (1856-1943)

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



الشكل 5-37 نيكولا تسلا.

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.

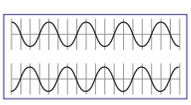
تقويم الوحدة

زوّدت كل وحدة بمجموعة من الأسئلة ذات الخيارات المتعددة 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 هو سبب عبور معظم جُسيمات ألفا لرقاقة الذهب من دون انحراف؟
23. في تجربة التشتُّت لرذرفورد، ما هو سبب ارتداد بعض جُسيمات ألفا إلى الوراء؟
24. ما هي 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 بدوائر تعتمد قيمتها على الزمن. الترانزستورات والدايودات هما 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 وقد تعطيها.

جدول المحتويات

الوحدة 4 الأجهزة الإلكترونية في دوائر التحكُّم العملية 2

الدرس 4-1 المُكثِّفات 4
الدرس 4-2 أشباه الموصلات 17
الدرس 4-3 مُجزِّئ الجهد 26
الدرس 4-4 البوّابات المنطقية 37

الوحدة 5 الحثّ الكهرومغناطيسي 54

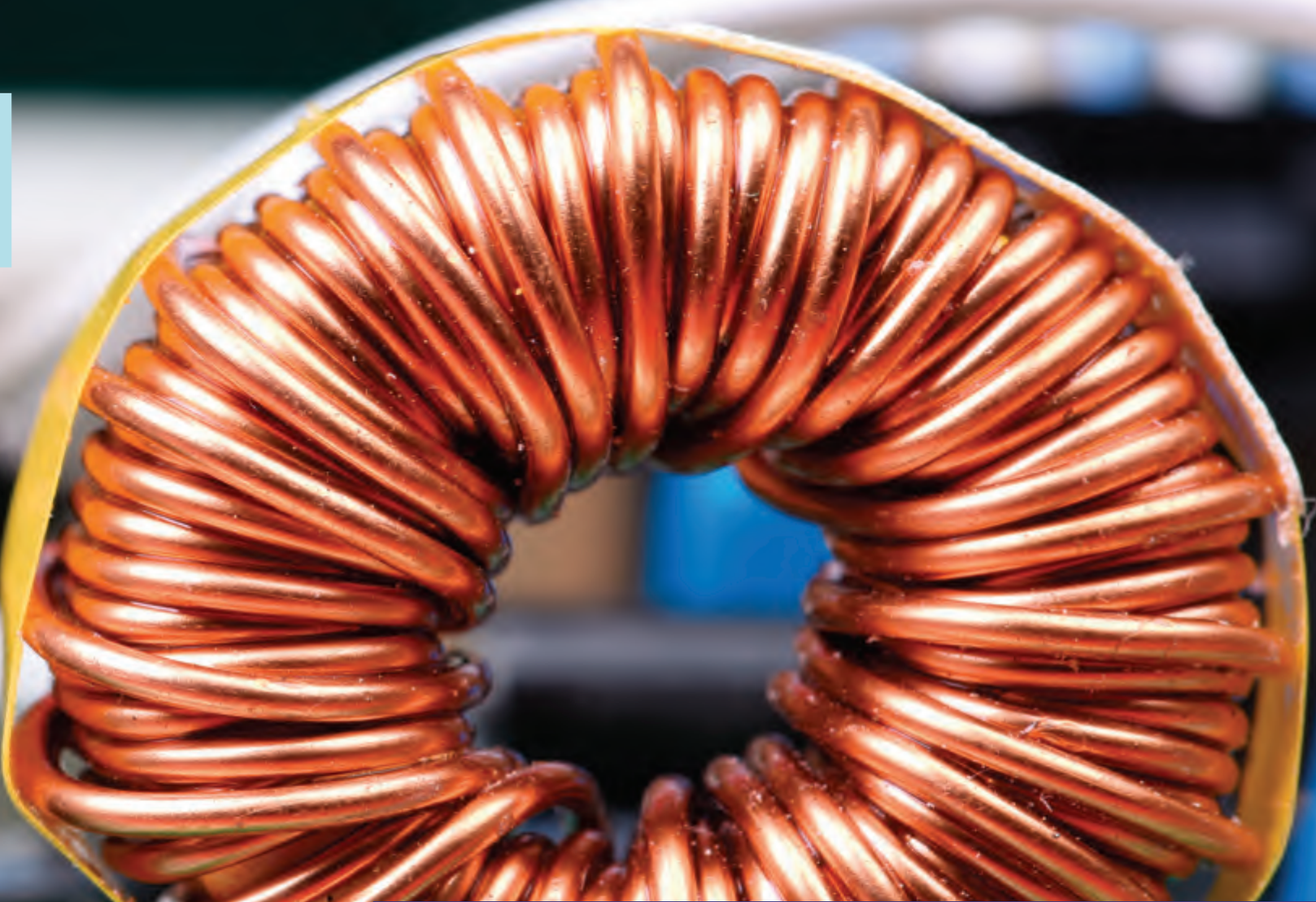
الدرس 5-1 الحثّ الكهرومغناطيسي 56
الدرس 5-2 مولِّدات التيّار المتردِّد (AC) 72
الدرس 5-3 المُحوِّلات الكهربائية 83

الوحدة 6 الخصائص المتقدمّة للموجات 100

الدرس 6-1 خصائص الموجات 102
الدرس 6-2 التداخل في الضوء 111
الدرس 6-3 الأشعة الكهرومغناطيسية 123
الدرس 6-4 الموجات الموقوفة 130

الوحدة 7 الفيزياء الذرّية والنووية الحديثة 156

الدرس 7-1 الذرّة 158
الدرس 7-2 النشاط الإشعاعي 166
الدرس 7-3 عمر النصف 178
الدرس 7-4 التفاعُلات النووية 185



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 أساسي في السيّارات الكهربائية والهجينة.

الشكل 4-1 سيّارة كهربائية أثناء شحنها.

تُستَعمل المُكثِّفات في عاكس 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 الوقت، 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، لتوظيف بطاريات الليثيوم الثقيلة والمُكلِفة مع المُكثِّفات الفائقة.

مخرجات التّعلُّم

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

P1109.2 يعرّف سعة المكثف ويحل مسائل حسابية باستخدام المعادلة: $Q = C.V$ ويشتق الصيغة ويستخدمها في حساب الطاقة المختزنة في المُكثِّف: $U = \frac{1}{2}QV$.

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

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

المفردات

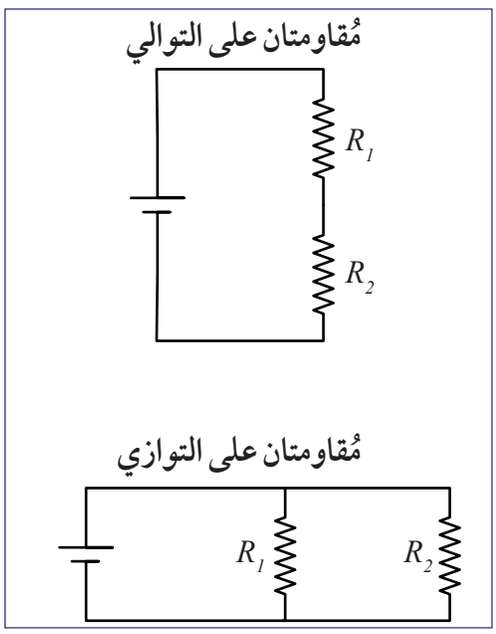
المُكثِّفات	Capacitors
السعة	Capacitance
الثابت الزمني	Time constant
حفظ الشحنات	Conservation of charges

مراجعة لما سبق دراسته في الدوائر الكهربائية

1. التيار الكهربائي هو تدفُّق الجُسيمات المشحونة، مثل حركة الإلكترونات داخل الموصلات. وحدة قياس التيار الكهربائي، هي الأمبير(A).
2. يُعزى تدفُّق التيار إلى فرق الجهد (الفولتية)، ووحدة قياس فرق الجهد هي الفولت (V). يقاس فرق الجهد بين نقطتين في الدائرة.
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 مُقاومات على التوالي وعلى التوازي.

صيغ مهمّة:

مُقاوِمات على التوالي

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3$$

مقاومات على التوازي

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

قانون أوم

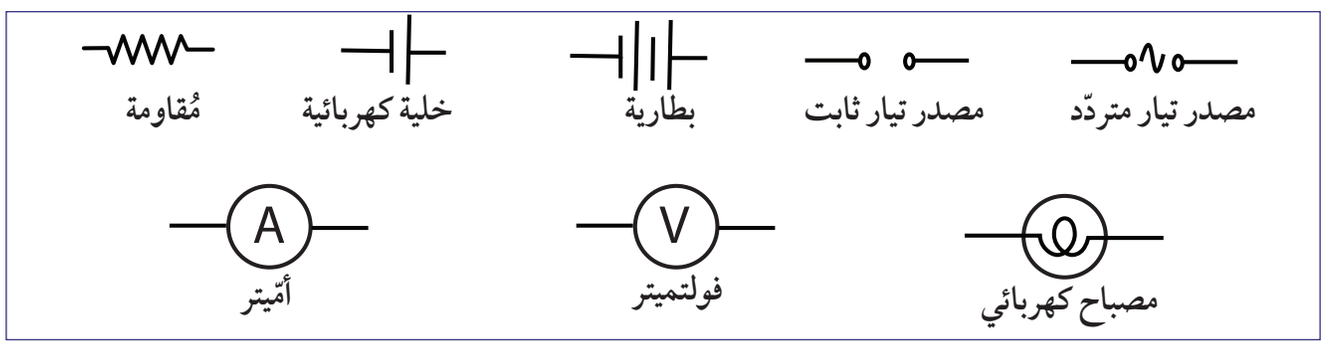
$$V = IR$$

القدرة الكهربائية

$$P = VI$$

الرموز الكهربائية

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



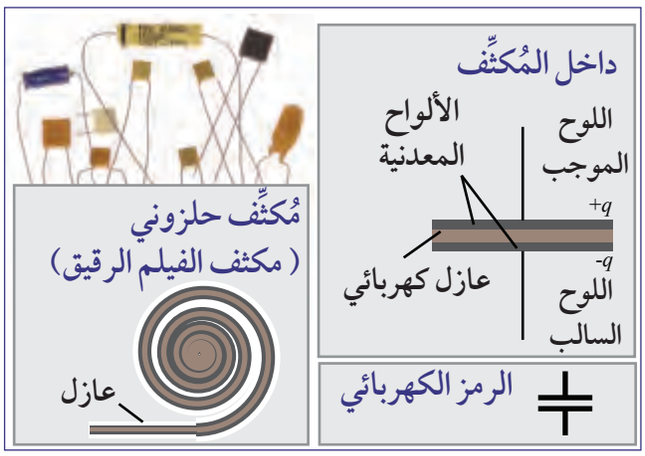
الشكل 4-3 أمثلة على الرموز في الدوائر الكهربائية

المُكثِّف

المُكثِّف Capacitor هو جهاز يخزّن الشحنات الكهربائية، ويولِّد حول طرَفيْه جهدًا يتناسب طرديًّا مع كمّية الشحنة المُختزنة. تُخزّن المُكثِّفات الطاقة الكهربائية، وهي تستعمل في كثير من الأدوات الإلكترونية.

مُكوِّنات المُكثِّف

يتألّف المُكثِّف من لوحين معدنيَّين موصِلين ومتوازيين، يفصل بينهما عازل كهربائي (**الشكل 4-4**).وعلى 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 يلجأ المصنِّعون إلى لف الألواح مع العازل بشكل لولبي.ويرمز للمُكثِّف الكهربائي في الدوائر الكهربائية بخطَّين متوازيين يمثّلان اللوحين المعدنيين المتوازيين للمُكثِّف.



الشكل 4-4 للمُكثِّفات مساحات مختلفة ولكل منها عازل كهربائي يفصل بين السطحين المعدنيين.

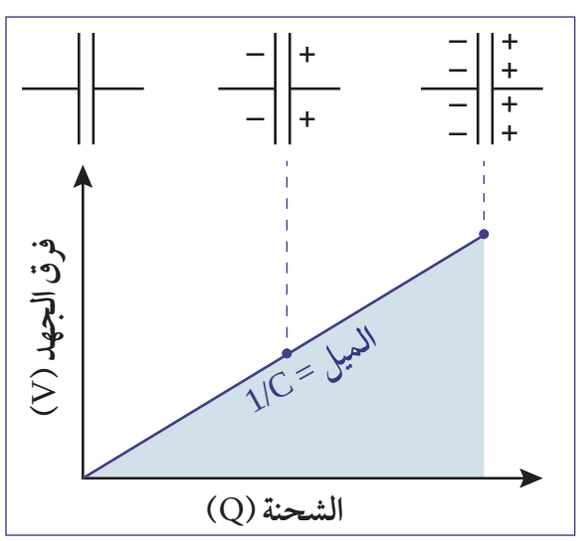
في بعض الدوائر الكهربائية، يمكننا توصيل المُكثِّف على التوالي مع مقاومة وبطّارية. عند إتمام الدائرة وإغلاق المفتاح الكهربائي، يبدأ المُكثِّف بشحن نفسه. تتراكم الشحنات الموجبة على أحد اللوحين، وتتراكم كمية مماثلة من الشحنات السالبة على اللوح الآخر. ينشأ من اختلاف الشحنات على اللوحين فرق جهد كهربائي.

1-4 السعة الكهربائية

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

C	السعة الكهربائية (F)
Q	الشحنة الكهربائية (C)
V	فرق الجهد الكهربائي (V)

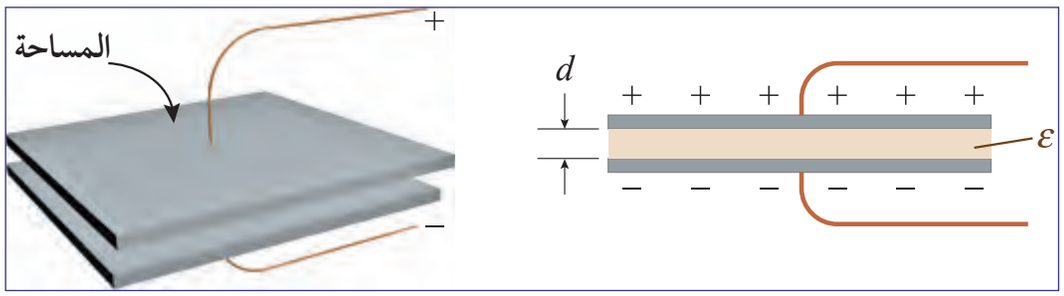
السعة الكهربائية Capacitance هي نسبة الشحنة الكهربائية المختزنة في مُكثِّف إلى فرق الجهد بين لوحيه. أما وحدة قياس السعة، فهي الفاراد (F) نسبة إلى مايكل فـاراداي. يستطيع مُكثِّف سعته 1 فاراد تخزين 1 كولوم من الشحنة وحفظه، إذا كان فرق الجهد بين طرفَيه هو 1 فولت. تمثّل المعادلة (4–1) العلاقة بين الشحنة الكهربائية والسعة وفرق الجهد. يعدّ 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 ($1pF = 10^{-12}F$) إلى بضع مئات من الميكروفاراد ($1\mu F = 10^{-6}F$).



الشكل 4-5 السعة الكهربائية هي معكوس ميل منحى V بدلالة Q.

المكثف المتوازي اللوحين

يتألّف 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 ε، وإذا كان الوسط العازل فراغًا تكون سماحيته $\varepsilon_o = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m.



الشكل 4-6 المكثف المتوازي اللوحين.

2-4 سعة المكثف

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

C	السعة الكهربائية (C)
A	مساحة اللوحين (m^2)
ε	السماحيّة (F/m)
d	المسافة بين اللوحين (m)

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

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

مثال 1

احسب السعة الكهربائية لمكثف مساحة لوحية 1 m^2 والمسافة بينهما 1 mm حيث العازل هو الفراغ .

الحل:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d} = \left(8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}\right)(1)\left(\frac{1 \text{ m}^2}{0.001 \text{ m}}\right) = \boxed{8.85 \times 10^{-9} \text{ F}}$$

مثال 2

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

الحل:

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

الطاقة المختزنة في المُكثِّف

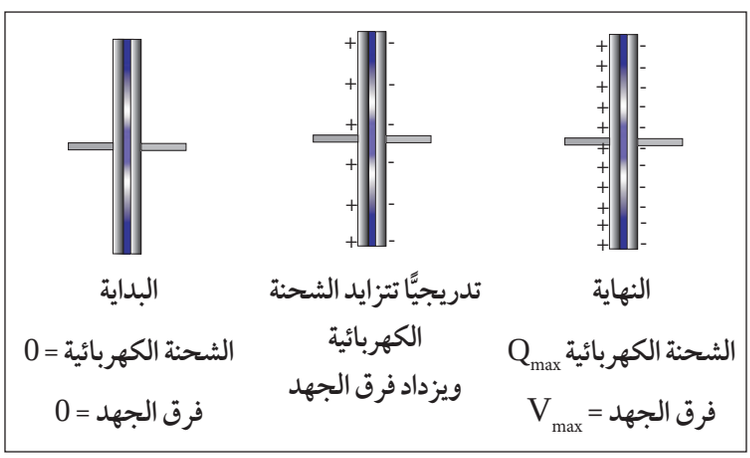
أحد لوحي المُكثِّف يُخزِّن شحنات موجبة، بينما يخزّن اللوح الآخر كمية مماثلة من الشحنات السالبة. يؤدي تجمّع شحنة موجبة مقدارها 1 C على أحد لوحي المكثف وأخرى سالبة 1 C– على لوحه الآخر وتسمى طاقة الوضع المختزنة لكل وحدة شحنات بسبب فرق الجهد بين اللوحين، ووحدة قياسها الفولت (volt). تعبّر المعادلة (3-4) عن 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	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.

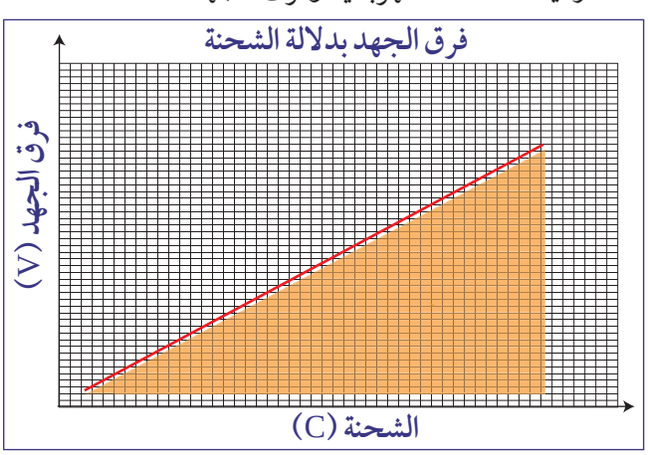
أمّا لتحريك شحنة مقدارها Q تحت فرق جهد V، فإن الشغل المبذول يتحول إلى طاقة مختزنة تكون E. الأمر الذي يمكننا من كتابة المعادلة: $V = \frac{E}{Q}$



الشكل 4-7 ازدياد الشحنة الكهربائية وفرق الجهد

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.

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 **الشكل 4-6**.



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

من المعادلة $E = QV$ و**الشكل 4-5**، نلاحظ أن متوسط فرق الجهد أثناء الشحن يساوي $\frac{V_f + V_i}{2}$ وبالتالي تصبح الطاقة المختزنة $E=\frac{1}{2}QV$. كما يمكن الحصول على الطاقة المختزنة نفسها من المساحة تحت منحنى فرق الجهد بدلالة الشحنة في الرسم البياني (**الشكل 4-8**): أي $E=\frac{1}{2}QV$.

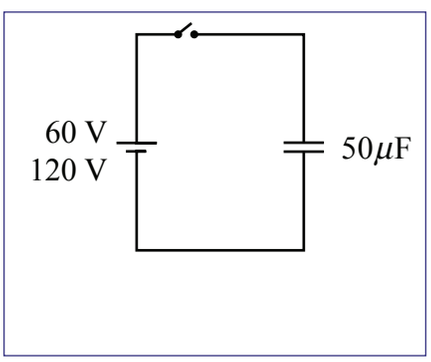
مثال 3

مُكثِّف سعته 50 µF يُراد شحنه ليكون فرق الجهد حول 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.

المُعطى: $C = 50\ \mu F$

$V = 60V$

$V = 120V$

العلاقات:

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

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

الحل:

1. الشحنة الكهربائية للمُكثِّف يُعبَّر عنها بـ:

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

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

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

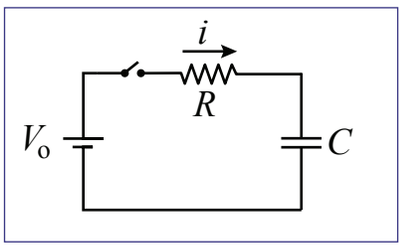
$$Q = CV = (50 \times 10^{-6}\ F)(120V) = 0.006\ C$$

الطاقة المُختزَنة في المُكثِّف تصبح عندها:

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

شحن المُكثِّف

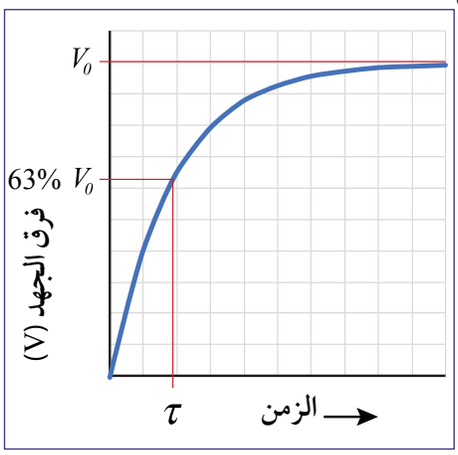
يُشحَن المُكثِّف بوصل طرفَيْه بمصدر فرق الجهد (**الشكل 4-10**).



الشكل 4-10 المُكثِّف في دائرة كهربائية

1. عند غلق الدائرة الكهربائية، يمرّ التيّار الكهربائي، حتى يتراكم ما يكفي من الشحنات على طرفَيِ المُكثِّف لتكوين أقصى فرق جهد V_o.
2. يتوقّف التيّار الكهربائي عن التدفُّق عندما يصل فرق جهد طرفَيِ 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. وتكون الثانية (s) وحدة قياس الثابت الزمني .



الشكل 4-11 فرق الجهد حول طرفي 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.

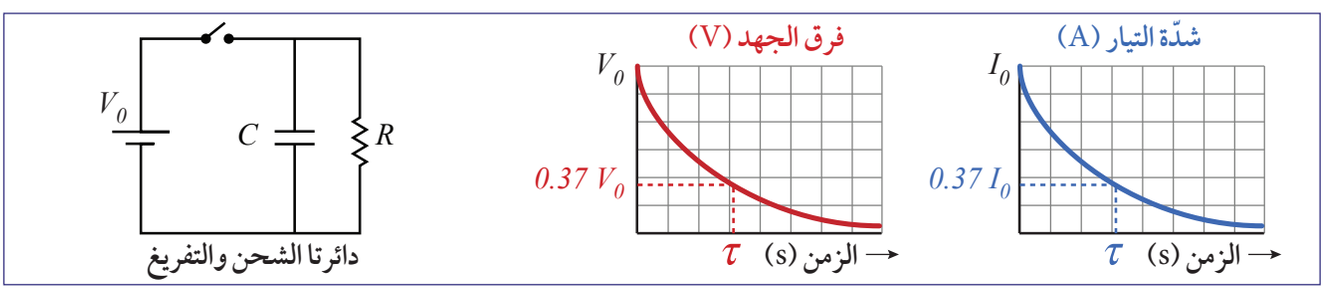
شحن المُكثِّف		تفريغ المُكثِّف	
الشحنة %	τ	الشحنة %	τ
63.2	1	36.8	1
86.5	2	13.5	2
95.0	3	5.0	3
98.2	4	1.8	4
99.3	5	0.7	5

الجدول 4-1 شحن وتفريغ المكثف.

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 4–4 و 4–5. يُظهر **الشكل 4-12** منحيي شدّة التيار وفرق الجهد عند تفريغ المكثّف.

6-4	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)
5-4	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 دائرتا الشحن والتفريغ لمكثف ومنحنيا فرق الجهد وشدّة التيار بالنسبة للزمن.

مثال 4

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

المُعطى: t = 5s، النسبة المئوية للتفريغ = 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 : $0.10 = e^{-\frac{5}{\tau}}$

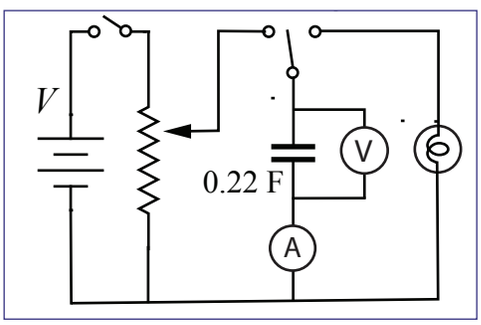
احسب لوغاريتم طرفَي المعادلة : $\ln 0.10 = -\frac{5}{\tau} \Rightarrow \tau = \frac{-5}{\ln 0.10} = 2.17\text{s}$

نشاط عمليّ

1-4 دوائر المُكثِّفات

سؤال الاستقصاء	ما العلاقة بين شدّة التيار وفرق الجهد حول 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 النشاط.

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.

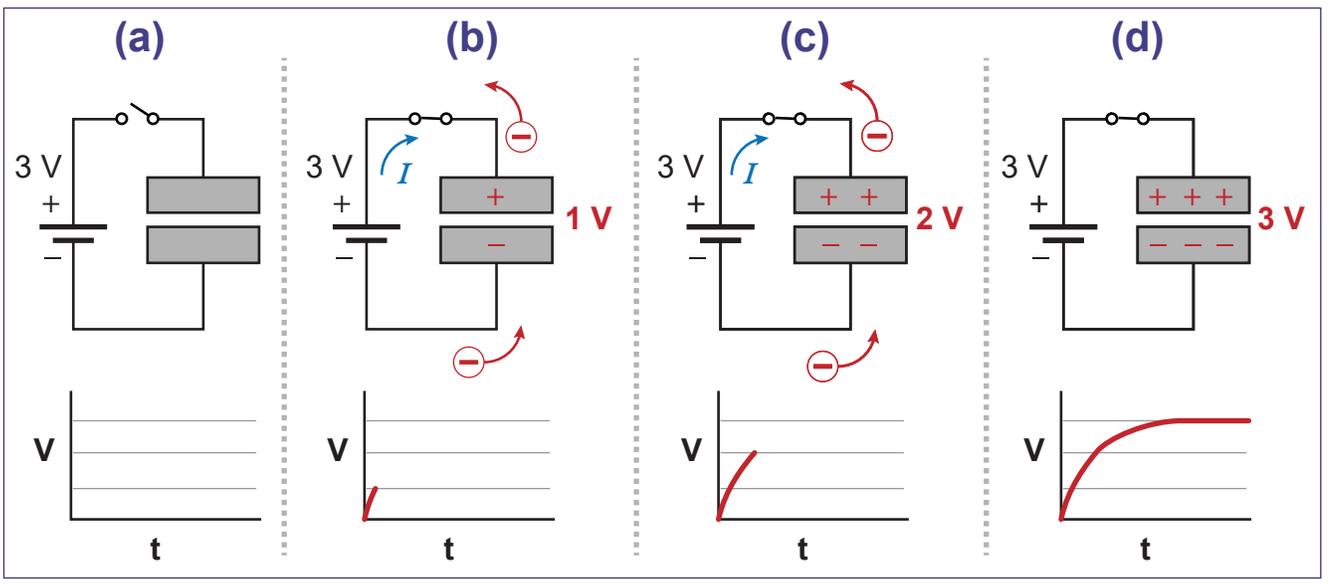
أسئلة

a. صف شدّة التيار وفرق الجهد أثناء شحن المُكثِّف مستعملًا بيانات شدة التيار وفرق الجهد بدلالة الزمن.
b. صف شدة التيار وفرق الجهد أثناء تفريغ المكثف في المصباح. ما هي 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، فالممر 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. البطارية 3V الدائرة مفتوحة. لا أثر لمرور التيار.

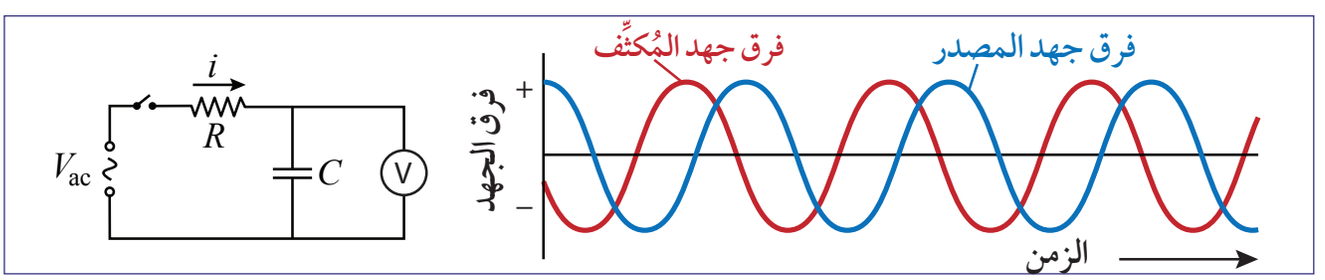
b. الدائرة مغلقة والتيار يسري. يجذب القطب الموجب للبطارية الإلكترونات من لوح المُكثِّف الموصول به، فيترك على اللوح شحنات موجبة. تقوم الشحنات الموجبة بجذب الإلكترونات من قطب البطارية السالب، لتتراكم شحنات سالبة على اللوح الآخر للمكثف

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.

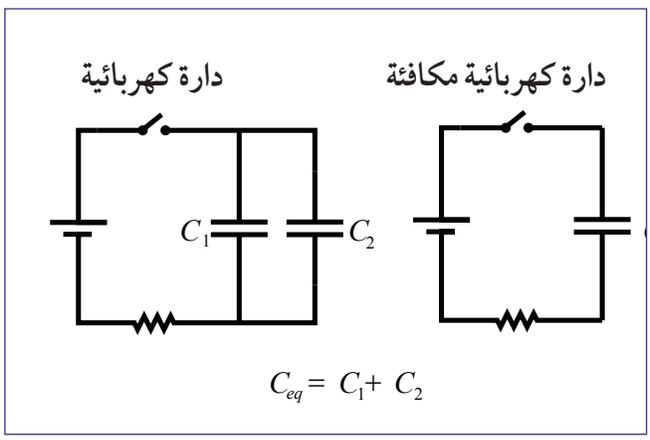
المُكثِّفات في دوائر التيار المُستمرّ

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 تتصرف بطريقة مختلفة.

المُكثِّفات المتّصلة على التوازي

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

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



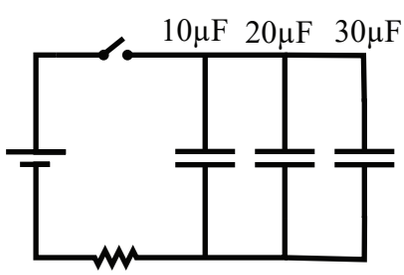
الشكل 4-16 مُكثِّفان متصلان على التوازي.

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

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

مثال 5

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



المطلوب: السعة المكافئة C_{eq}؟

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

العلاقات: $C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3$

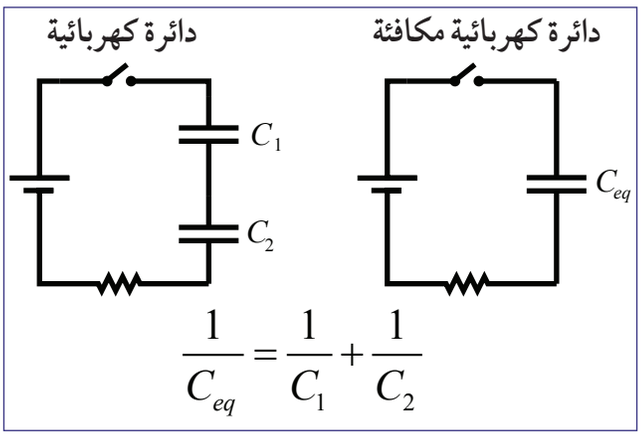
الحل: لحل هذه المسألة علينا استخدام العلاقة المعطاة:

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

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:

$$V = V_1 + V_2$$

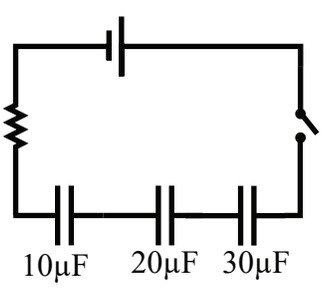
$$\frac{Q}{C_{eq}} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2}$$

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

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 6

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



المطلوب: السعة المكافئة C_{eq}؟

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

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

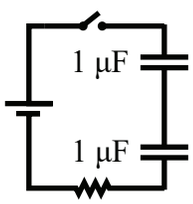
1. ما أقصى شحنة يمكن للمُكثِّف أن يختزنها؟ لا لزوم لإجراء عمليات حسابية لحل هذه المسألة.

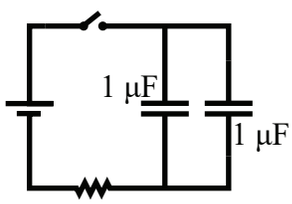
2. يبدأ المُكثِّف بتخزين شحنته بسرعة كبيرة، ولكن معدَّل التخزين يقل كلما ازداد تراكم الشحنات. اشرح بأسلوبك لماذا يحدث ذلك.

3. a. ما الثابت الزمني لمُكثِّف 400μF عند تفريغ شحنته في مُقاومة 60kΩ؟

b. إذا وصلنا المُكثِّف ببطارية 12 V، فما الشحنة القصوى التي يمكن تخزينها؟

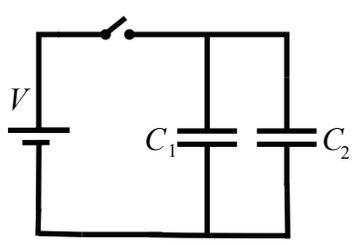
4. أنشأنا دائرتين كهربائيتين من عناصر متشابهة. في إحداهما وضعنا مُكثِّفين سعة كل منهما 1 μF على التوالي، بينما في الثانية المُكثِّفان على التوازي. أي المُكثِّفين المكافئين سيختزن شحنة أكبر؟





ادعم إجابتك بعمليات حسابية.

5. في الدائرة المعطاة $V = 600\ V$ ، $C_1 = 8.0\mu F$، $C_2 = 9.0\mu F$.



ما السعة المُكافِئة وما الشحنة الكهربائية في الدائرة؟

6. أثناء تفريغ مُكثِّف مثالي، تتغيَّر قيمة التيار بسرعة كبيرة. ارسم منحنى تغيُّر التيّار بدلالة الزمن للمُكثِّف أثناء التفريغ.

7. ما قيمتا السعة الكهربائية والمقاومة الكهربائية اللتان تتيحان الحصول على نظام بثابت زمني 1s؟ ادعم إجابتك بعمليات حسابية.

الدرس 2-4
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

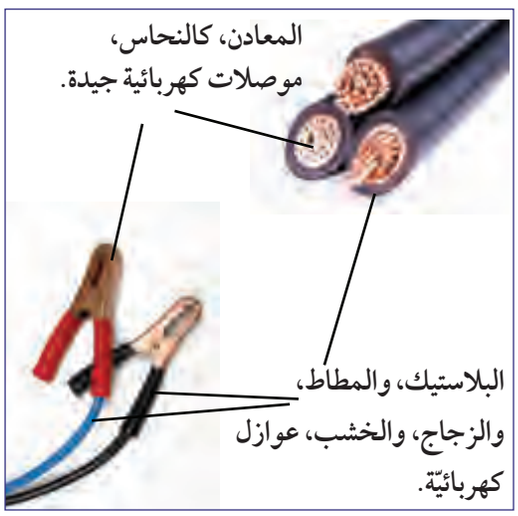
Electrical conductor	الموصل الكهربائي
Electrical insulator	العازل الكهربائي
Resistivity	المقاومة النوعيّة
Semiconductor	شبه موصل
Conductivity	الموصليّة
Siemens per meter	سيمنس لكل متر
N-type semiconductor	شبه موصل من النوع السالب
P-type semiconductor	شبه موصل من النوع الموجب
Transistors	الترانزستورات
p-n junction	وصلة ثنائية p-n
Diode	الدايود
Rectification	التقويم

الموصلات والعوازل الكهربائية

سؤال للمناقشة

اذكر أمثلة لبعض الموصلات والعوازل الشائعة؟

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

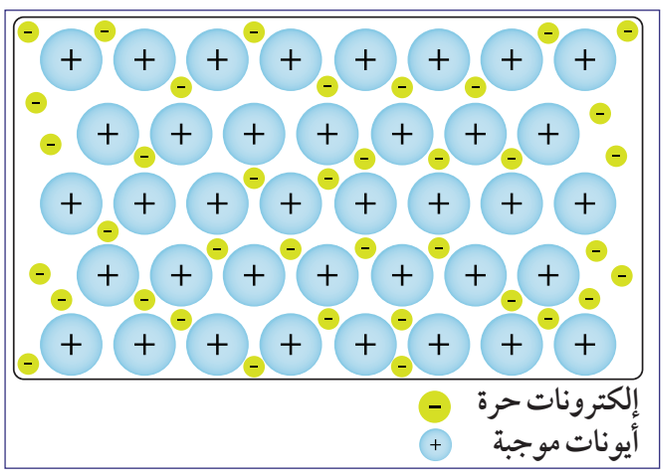


الشكل 4-19 الموصلات والعوازل

عند وجود فرق للجهد 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 بشكل أسرع، الأمر الذي يزيد من انتقال القُدرة بواسطة الإلكترونات المُتحرّكة إلى الجهاز القادر على الاستفادة من تلك القُدرة، مثل المُحرِّكات الكهربائيّة.

المواد ذات المُقاوَمة الكبيرة، هي **عوازل كهربائيّة Electric insulators**. فحتى الإلكترونات في المدارات الخارجية للذرّة تكون 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 $10^{15}\ \Omega\ m$، أي أكبر بمليار مليار مرة.

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 تكون فيها أعداد قليلة من الإلكترونات حرّة 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 عكس المقاومة النوعية. تعني الموصليّة العالية مقاومة مُنخفضة لتدفُّق التيار. وحدة الموصليّة الكهربائيّة هي **السيمنس لكل متر Siemens per meter (S/m)**. وبما أنّ الموصليّة هي عكس المقاومة النوعية، يكون 1 S 1 مقلوب Ω 1. 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}
	الجيرمينيوم	2×100
	زرنيخ الجاليوم	10^{-6}

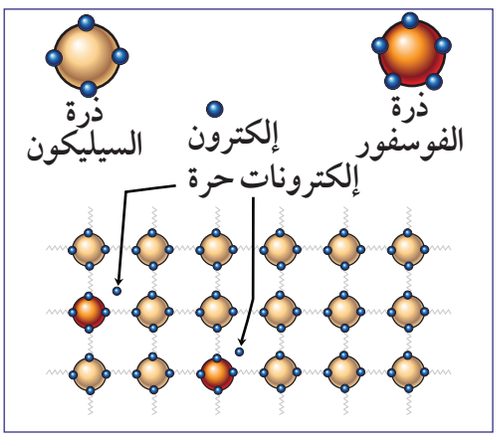
الجدول 4-2 الموصليّة لمواد مختلفة، عند درجة حرارة الغرفة.

التغيُّر في موصليّة السيليكون

تكمن فائدة أشباه الموصلات في الإمكانية الكبيرة لتغيُّر موصليتها بمعامل يفوق 10,000، وذلك عن طريق إضافة كميّة صغيرة من عنصر آخر، كالبورون أو الفوسفور. تقوم إضافة ذرّة واحدة من الفوسفور لكل 10 ملايين ذرّة سيليكون بزيادة الموصليّة بمقدار 20,000. أما إضافة مثل تلك الكمّيات الصغيرة إلى عناصر أخرى لا يكون لها أي تأثير في الموصلات والعوازل العادية.

أشباه الموصلات من النوع السالب

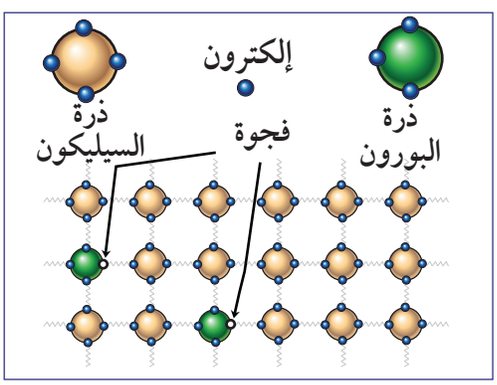
تمتلك ذرّات الفوسفور خمسة إلكترونات تكافؤ، مقارنة بذرّات السيليكون التي تمتلك أربعة منها. عندما ترتبط ذرّات الفوسفور بشبكة ذرّات السيليكون، فإن أربعة من أصل خمسة إلكترونات تكافؤ من ذرّة الفوسفور ترتبط بذرّات السيليكون المجاورة. أما الإلكترون الإضافي فلا يرتبط بأي ذرّة محدَّدة، ويكون حرًّا ليسبب التيار و تكون الالكترونات حاملات الشحنة الأغلبية التي تكوّن 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.



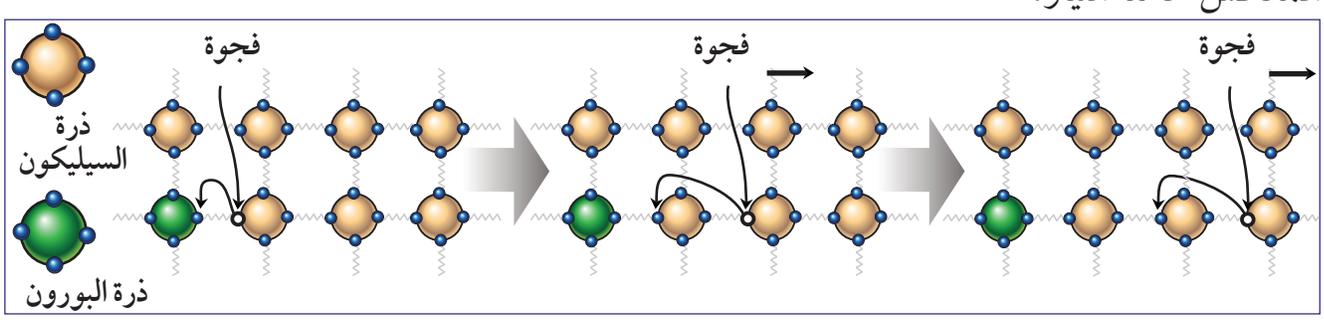
الشكل 4-22 أشباه الموصلات من النوع السالب.

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.



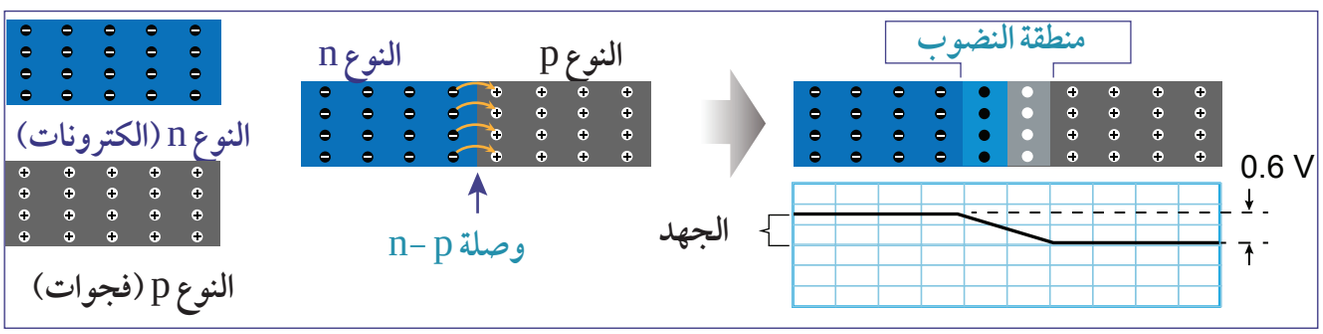
الشكل 4-23 أشباه الموصلات من النوع الموجب.



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

وصلة p-n

تَدمُج الوصلات الثنائية (الدايودات) والترانزستورات نوعَي أشباه الموصلات من النوع n والنوع p. لنرى ما يحدث عند الوصلة الثنائية التي يلتقي فيها كل من النوعين p وn لأشباه الموصلات، والتي تُسمى **وصلة p-n (p-n junction)**. في البداية، يمتلك الطرف n إلكترونات إضافية. أما الطرف p فيمتلك فجوات. 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.

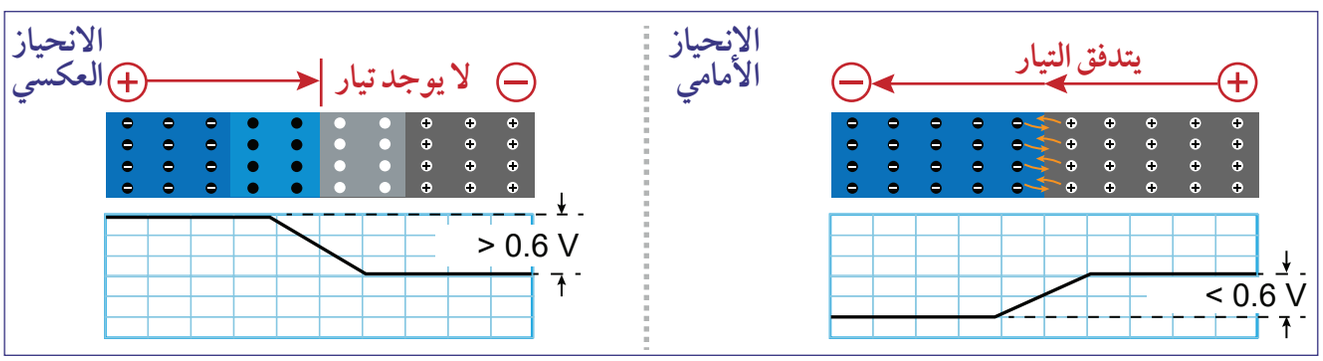


الشكل 4-25 وصلة p–n.

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.

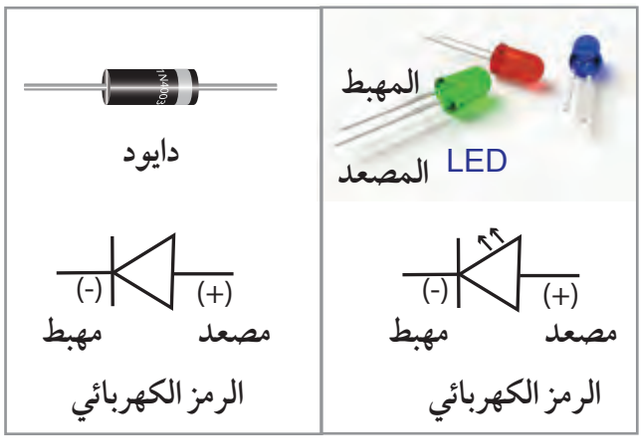
1. إنّ أي جهد مطبّق في الاتّجاه نفسه الذي يكون عليه الجهد 0.6 V سوف يسبّب نموًا في منطقة النضوب، لتصبح تلك المنطقة عازلاً أقوى. وهذا ما يُسمّى بالانحياز العكسي. حيث لا يمكن للتيار التدفّق في الاتجاه العكسي، لأنه سيتوقّف عند منطقة النضوب.
2. أما الجهد المُطبّق في عكس الاتّجاه الذي يكون عليه الجهد 0.6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

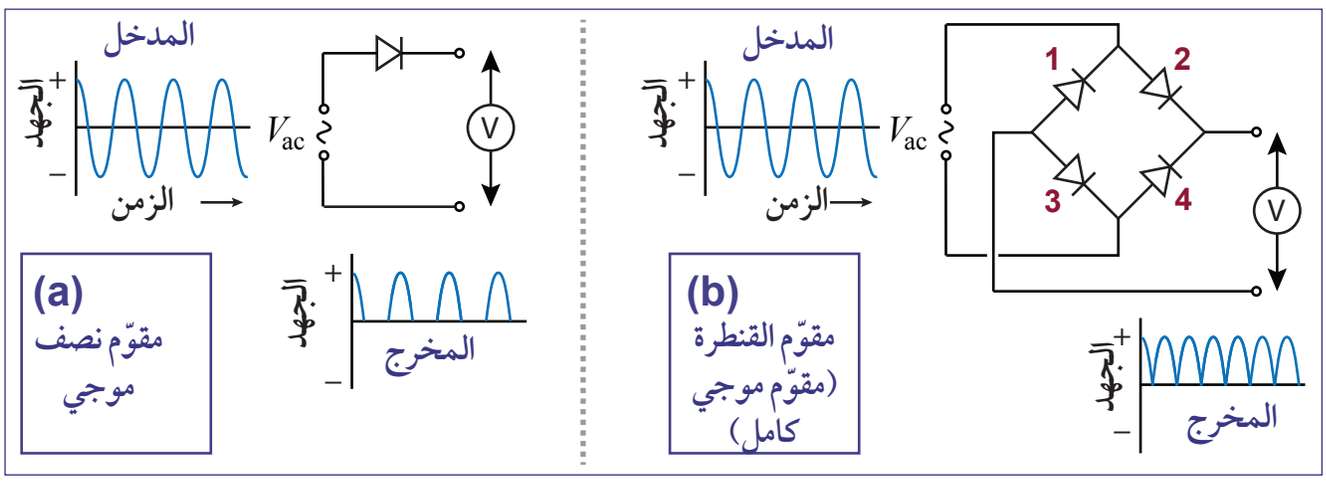
الدايود Diode أداة تصنع من مادة شبه موصلة، يسمح للتيار بالتدفُّق عبره في اتجاه واحد فقط. يمتلك الدايود وصلة p–n وحيدة داخله. للدايود طرفان: طرف موجب يُعرف باسم المصعد، وطرف سالب يسمّى المهبط. يستطيع التيار التدفُّق عبر المصعد باتجاه المهبط فقط. يُرمز إلى المهبط عادة بخط (كما هو مبيّن في **الشكل 4-27**).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



الشكل 4-27 الدايود والـ LED.

من المهم ملاحظة أن طرفَي الدايود يجب وصلهما بشكل صحيح، عندما تكون الدائرة في وضع DC كما هو مبيّن في **الشكل 4-27**، حيث يتم توصيل القطب الموجب للبطارية بمصعد الدايود وقطبها السالب بمهبطه. وإلّا لن يمر أي تيّار. يُستخدم الدايود عادة في دوائر التيار المتردّد AC، وذلك 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، وأقرب إلى التيار المستمر DC.

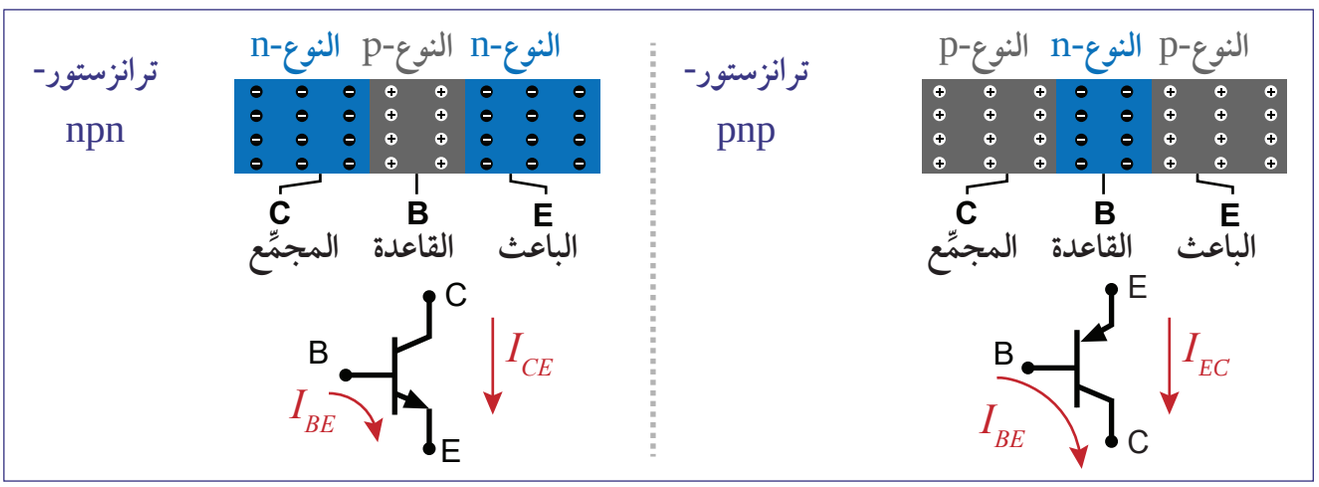
1. عندما يكون نصف الدورة AC الداخلة موجبًا، يتدفق التيار عبر الدايود 2، ليعود عبر الدايود 3.
2. عندما يكون نصف الدورة AC الداخلة سالبًا، يتدفق التيار عبر الدايود 4 ليعود عبر الدايود 1.



الشكل 4-28 دائرتا الدايود النصف موجي ومقوّم القنطرة.

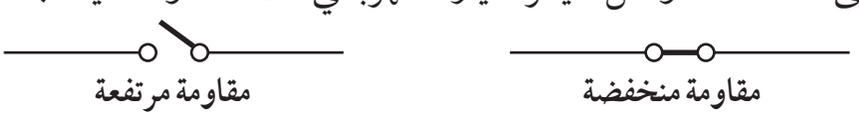
الترانزستور

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.

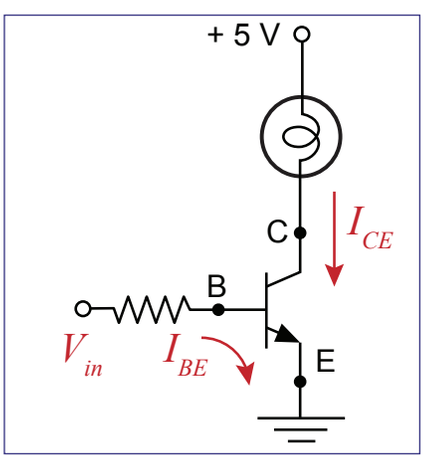
من أجل فهم طريقة عمل الترانزستور، افترض المفتاح الميكانيكي العادي. يكون للمفتاح الميكانيكي مقاومة عالية جدًا عندما يكون مفتوحًا، وعندها لا يمر أي تيار كهربائي. ولكن عند غلقه، تنخفض مقاومة المفتاح إلى 0.001 Ω أو أقل. فيمر التيار الكهربائي لأن المقاومة قليلة جدًا.



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 تشغيل الضوء. يظهر **الشكل 4-30** ترانزستور npn وظيفته تشغيل الضوء. يتوهج المصباح الكهربائي عندما تُصبِح 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.



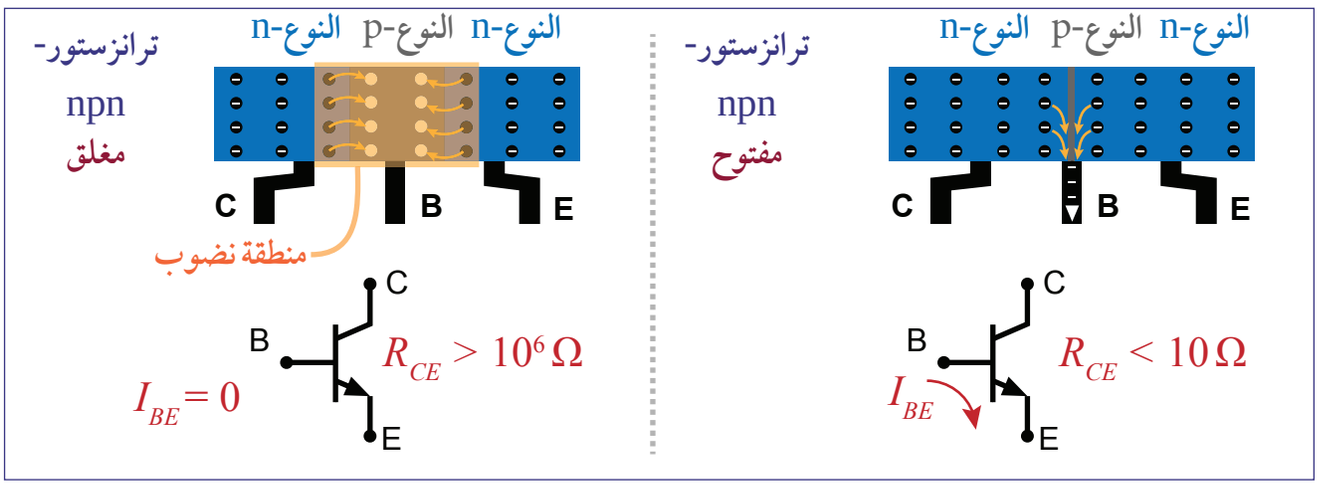
الشكل 4-30 دائرة ترانزستور لتشغيل ضوء.

الترانزستور pnp

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

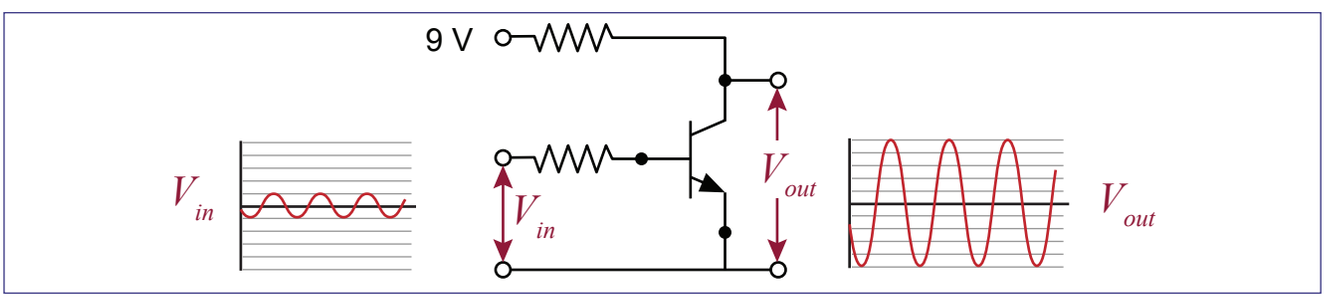
طريقة عمل الترانزستور

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 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 دائرة ترانزستور بسيط يعمل كمضخم.

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.

إحدى 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. يعدّ السيليكون أكثر أشباه الموصلات شيوعًا في الاستخدام. ما المواد الأخرى المعروفة أيضًا، كأشباه موصلات؟ (يمكنك البحث عن ذلك).
2. كم إلكترون تكافؤ تمتلك ذرّة السليكون؟
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 مقاومة الكهرباء. 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، فأبدل طرفَي جهاز LED. هل سيبقى جهاز LED مضيئًا؟ اشرح إجابتك.

الدرس 4-3
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. لتغيير شدّة الصوت في أي جهاز، نحتاج إلى مقياس الجهد الإنزلاقي الذي يطلق عليه المهندسون الكهربائيون اسم «وعاء». مقياس الجهد الإنزلاقي هو تقنية بسيطة وموثوق بها.

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.

الشكل 4-33 مقياس الجهد الإنزلاقي

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.

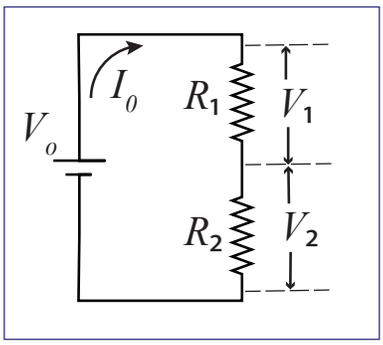
P1111.2 يرسم ويجمع دوائر لمجزِّئ الجهد لاستقصاء خصائص مكوِّنات كهربائية، مثل مقياس الجهد والوصلة الثنائية (الدايود) والمقاومة الضوئية (RDL) والترانزستور والمقاومة الحرارية (الثرمستور).

المفردات

مُجزِّئ الجهد	Potential divider
مقياس الجهد الإنزلاقي	Potentiometer
مقاومة ضوئية	Light dependent resistor
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.



الشكل 4-34 دائرة بسيطة لمُجزِّئ الجهد

افترض **الشكل 4-34**. نحن نعلم أن شدّة التيار في الدائرة الموصولة 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، أو مجزئ الفولتية.

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

9-4	**الجهد 1 للمقاوِمة الأولى**	V_1	جهد المُقاوِمة الأولى (V)
$V_1 = \frac{V_o R_1}{R_1 + R_2}$		V_o	جهد البطّارية (V)
		R_1	المقاوِمة الأولى (Ω)
		R_2	المقاوِمة الثانية (Ω)
10-4	**الجهد 2 للمقاوِمة الثانية**	V_2	جهد المقاوِمة الثانية (V)
$V_2 = \frac{V_o R_2}{R_1 + R_2}$		R_1	المقاوِمة الأولى (Ω)
		V_o	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 موصولة على التوالي، فإن مقاومتها الكلية تساوي $R = R_1 + R_2$

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

وبما أن التيار المارّ بكلتا المقاومتين هو نفسه، فإن

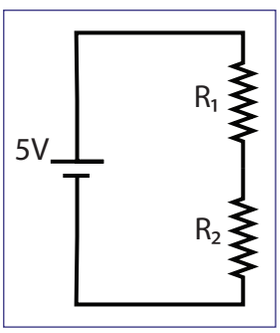
$$V_1 = I_o R_1 = \frac{V_o R_1}{\left(R_1 + R_2\right)} \qquad V_2 = I_o R_2 = \frac{V_o R_2}{\left(R_1 + R_2\right)}$$

نشاط عمليّ

a3-4 دائرة مُجزِّئ الجهد

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

الخطوات



الشكل 4-35

1. ضع كلًّا من المقاومتين في حاملة مقاومة، ثم قم بتوصيلهما، باستخدام الأسلاك الكهربائية، على التوالي، بمصدر الطاقة.
2. توقّع القيمة النظرية لجهد 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 جهد مصدر الطاقة.
4. قِس الجهد حول 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

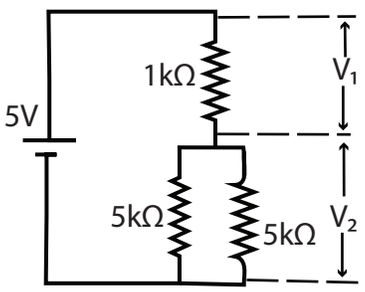
المقاومة(KΩ)	$R_1 =$	$R_2 =$	$R_1 + R_2 =$
الجهد(V)	$V_1 =$	$V_2 =$	$V_0 =$

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 7

أوجد قيمة الجهد V_1 والجهد V_2 في دائرة مُجزِّئ الجهد في الشكل المجاور.



المطلوب: الجهد V_1 والجهد V_2

المعطى: $V_o = 5\ V$، $R_1 = 1\ k\Omega$، $R_a = 5\ k\Omega$،

$Rb=5\ k\Omega$

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 الجهدَيْن يساوي جهد مصدر الطاقة.

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

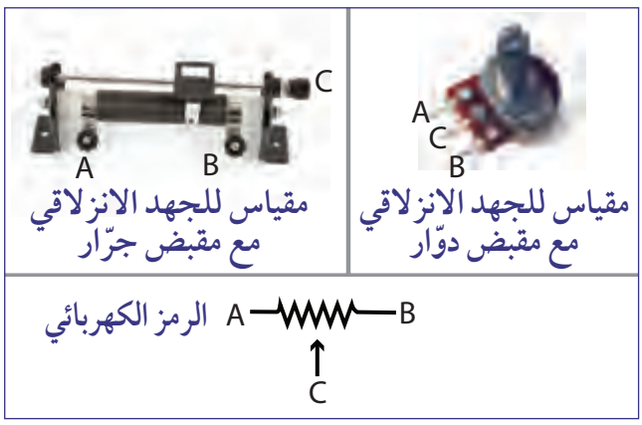
(ملحوظة: ماذا عن مقاومة الأسلاك الكهربائية؟)

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.

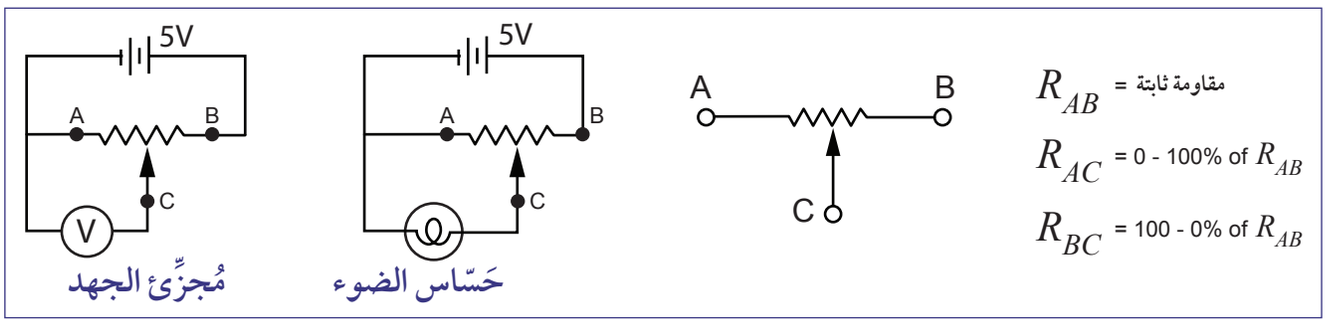
مقياس الجهد الانزلاقي

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 طرفَيِ 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 الجهد المخرج عند النقطة C.

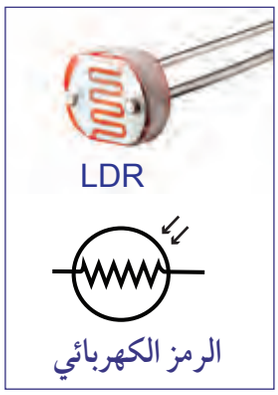


الشكل 4-37 مقياس الجهد الانزلاقي في الدوائر.

في دائرة مُجزِّئ الجهد يكون فرق الجهد بين النقطتين A و B مساويًا لجهد البطارية. يمكن تعديل قياس جهد المخرج باستخدام الفولتميتر وذلك بضبط مقياس الجهد الانزلاقي، عبر تحريك المقبض. إذا كان توصيل المقبض C قريبًا من لأقرب نقطة من الطرف A، فإن الفولتميتر يقيس أدنى قيمة للجهد الناتج. لكن إذا حرّكنا المقبض باتجاه النقطة B، فإن قيمة الجهد ستزداد. وعند الوصول إلى النقطة B فإن الفولتميتر سيقيس أعلى قيمة للجهد 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.

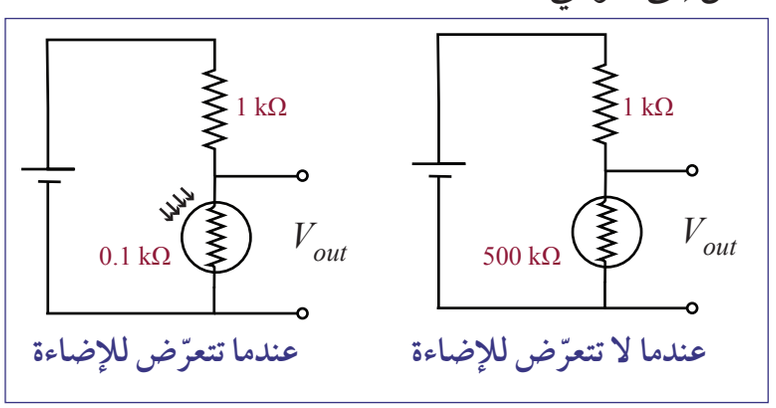
المُقاوِمات الضوئية (LDRs)

المقاوِمة الضوئية Light Dependent resistor (LDR)، تقوم بما يعبِّر عنها اسمها (**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 مقاوَمة المقاومة الضوئية في غياب الضوء بالميجا أوم (MΩ). عندما تتعرّض هذه المقاومة لأشعة الشمس، فإن مقاوَمتها تنخفض إلى حوالي 100 Ω.



الشكل 4-38 مقاوِمة ضوئية

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 مقاوَمة المقاوِمة الضوئية ستنخفض، ما يؤدي إلى انخفاض جهدها.



الشكل 4-39 مجزيء الجهد باستخدام المقاوِمة الضوئية

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

مقاوَمة المقاومة الضوئية تنخفض 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 الإغلاق 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)

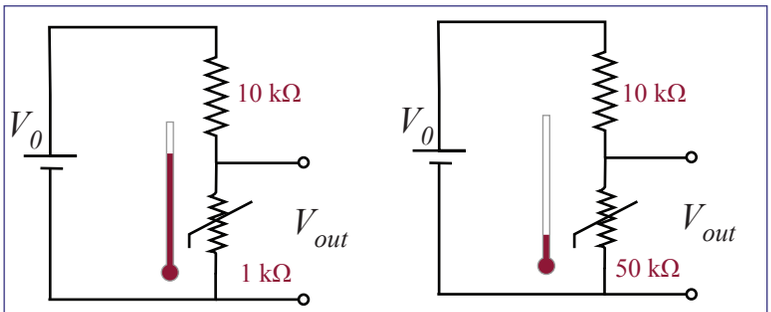
المقاوَمة الحرارية Thermistor مقاوَمة تتغيَّر قيمتُها بتغيُّر درجة الحرارة كما في **الشكل 4-41**. هناك نوعان من المقاوَمة الحرارية: مقاومَة معامل درجة الحرارة السالب (NTC) ومعامل درجة الحرارة الموجب (PTC). تنخفض مقاوَمة (NTC) مع ارتفاع درجة الحرارة، بينما ترتفع مقاوَمة (PTC) مع ارتفاع درجة الحرارة. كلا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

ثرمستور

الرمز الكهربائي

الشكل 4-41 الثرمستور.

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



الشكل 4-42 مجزِّئ جهد يستخدم مقاوِمة حرارية.

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

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

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

تطبيقات المُقاوِمات الحرارية

توجد المقاوِمة الحرارية في فرن المايكروويف 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.

فرن المايكروويف

إنذار الحريق

مكيّف الهواء

الشكل 4-43 أجهزة تستخدم المقاوِمة الحرارية.

مثال 8

صمّم دائرة كهربائية:

a. تضيء مصباحًا في الظلام.

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

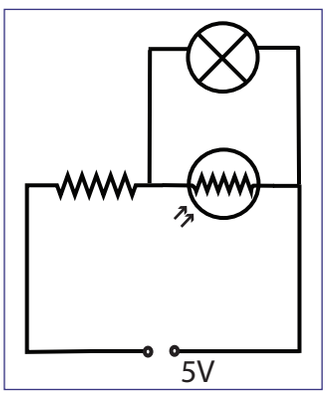
المطلوب: تصميم دائرة

المُعطى: مصباح وصافرة

الحل

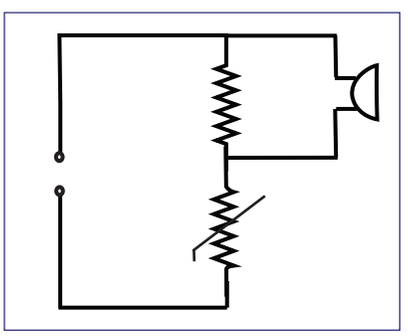
a. بما أننا نريد تصميم دائرة تعمل في الظلام، فإننا نحتاج إلى مقاوِمة ضوئية. نتذكَّر بأن الجهد يتناسب طرديًّا مع المقاوَمة لذلك يكون الجهد مرتفعًا عندما تكون المقاوَمة مرتفعة حول طرفَي مقاوِمة متغيِّرة. علينا تحضير دائرة مجزِّئ جهد مكوَّنة من مقاوِمة ثابتة، بالإضافة إلى مقاوِمة ضوئية متَّصلة بمصدر طاقة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

في حالة الظلام، تكون قيمة المقاوَمة الضوئية عالية جدًّا. وهذا يعني أن معظم الجهد أيضًا سيكون حول طرفي المقاوِمة الضوئية ما يسمح للمصباح بالإضاءة. لكن إذا نقلنا الدائرة إلى مكان مضيء، فإن المصباح سينطفيء لأن قيمة المقاوَمة الضوئية تنخفض، الأمر الذي يؤدي إلى انخفاض الجهد أيضًا. سيكون معظم الجهد حول 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 جهدها سينخفض، وبالتالي يرتفع جهد المقاومة الثابتة، الأمر الذي يسمح للصافرة بأن تصدر الصوت (**الشكل 4-45**).

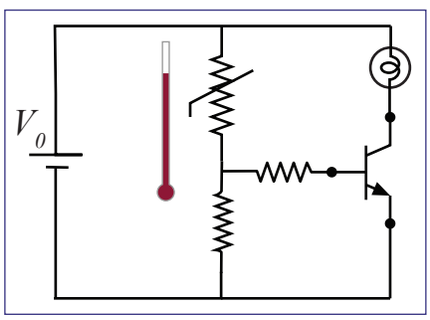


الشكل 4-45 مجزِّئ الجهد مع المقاومة الحرارية.

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

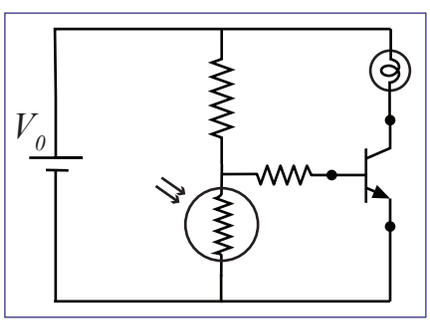


الشكل 4-46 مجزِّئ الجهد مع الترانزستور والمقاوِمة الحرارية.

لنفترض الدائرة في **الشكل 4-46**. عندما ترتفع درجة الحرارة، تتناقص مقاومة المقاومة الحرارية، مسبّبة انخفاض جهدها، ويؤدِّي ذلك إلى زيادة 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 الجهد مع ترانزستور أو من دونه، حيث تعمل الدائرة بطريقتين متشابهتين. فلماذا نستخدم الترانزستور إذاً؟

يحتاج الترانزستور إلى جهد ضعيف ليعمل (0.6 V بالضبط). وبما أن كثيرًا من أجهزة الحاسوب تعطي جهدًا منخفضًا 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 حول طرفَيْ مصدر الطاقة.

1. وصِّل المصباح أو الصافرة على التوازي مع المقاومة الحرارية.
2. وصِّل الملتيميتر أو (الفولتميتر) حول 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 لجهد 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) حول طرفَي المقاوِمة الضوئية.
4. أضيء المصباح، وقرّبهُ من المقاوِمة الضوئيّة. لاحظ تغيُّر قراءات الفولتميتر.

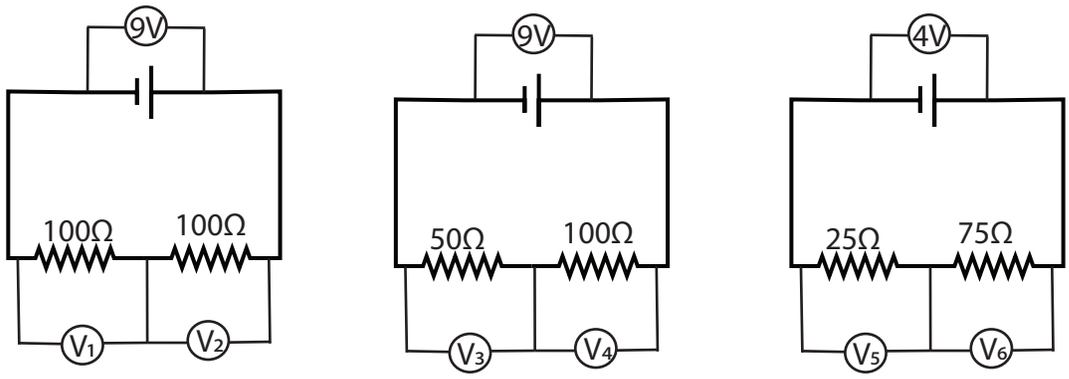
أعد الخطوات 3 و 4 باحلال مقاومة ثانية 100k Ω محل المقاومة الثابتة .

الأسئلة

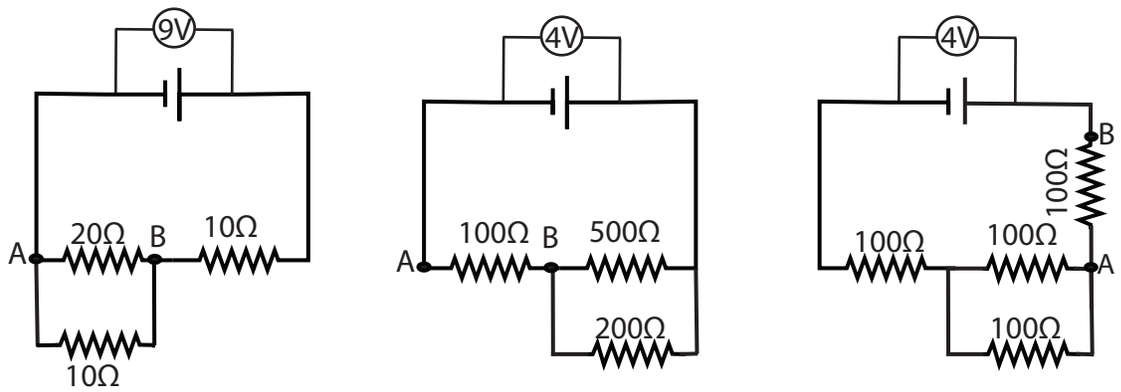
a. اشرح لماذا يؤدي تغيُّر المقاوِمة إلى تغيُّر قراءة الفولتميتر.
b. صف ماذا يحدث للمصباح أو الصافرة عند تغير درجة حرارة المقاومة الحرارية.
c. ماذا سيحدث لجهد المقاوِمة إذا حرَّكنا الدائرة إلى مكان أشدّ إضاءة؟

تقويم الدرس 4-3

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



2. يمكن استخدام الدوائر الآتية كمجزِّئ للجهد. احسب 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 مقاوَمة المقاوِمة الحرارية مع درجة الحرارة.

b. كيف تتغيَّر مقاوَمة المقاوِمة الضوئية مع شدة الضوء.

5. صمِّم دائرة تحتوي على ترانزستور، تصدر إنذارًا صوتيًّا عندما يصبح زيت 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 صحيحتين 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.

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.

الشكل 4-48 شريط مخرّم قديم لبرنامج حاسوب.

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

البوابات المنطقية	Logic gates
بوابة NOT	NOT Gate
جدول الحقيقة	Truth table
البوابة AND	AND Gate
البوابة 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.

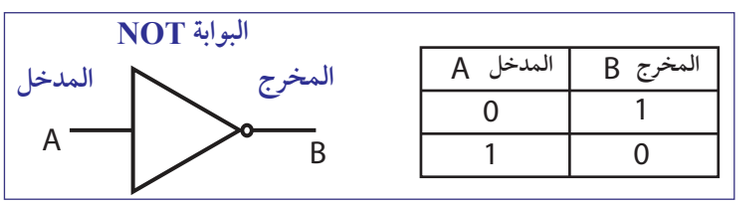
الشكل 4-49 الدوائر المتكاملة للبوابات المنطقية.

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.



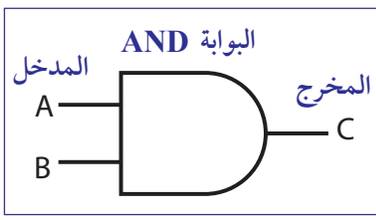
المدخل A	المخرج B
0	1
1	0

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**).

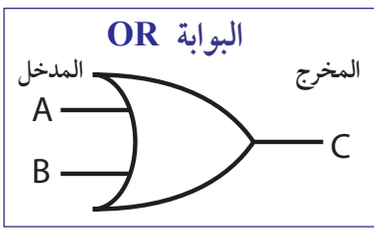


المدخل A	المدخل B	المخرج C
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

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**).

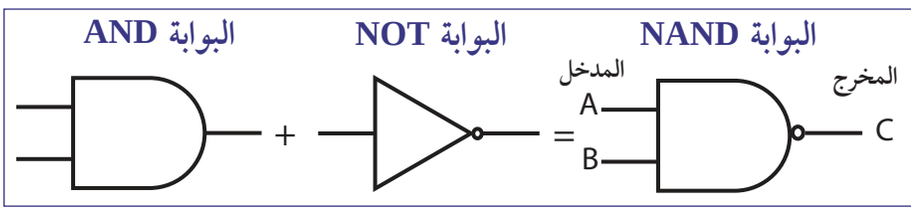


المدخل A	المدخل B	المخرج C
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

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.

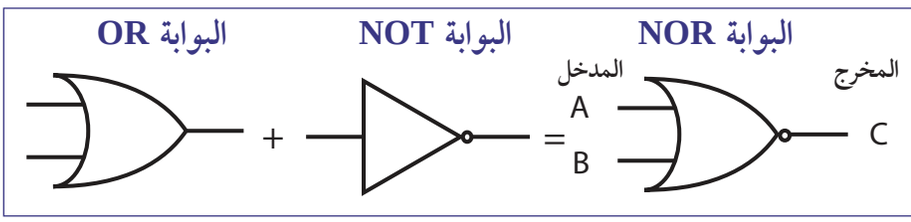


المدخل A	المدخل B	المخرج C
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

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.

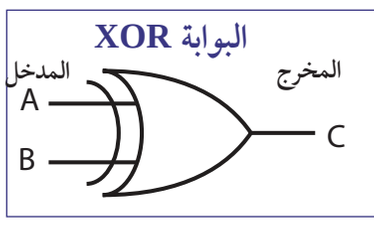


المدخل A	المدخل B	المخرج C
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

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 الخرج 1. يكون مخرج المدخَلين المتماثلين 0.



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

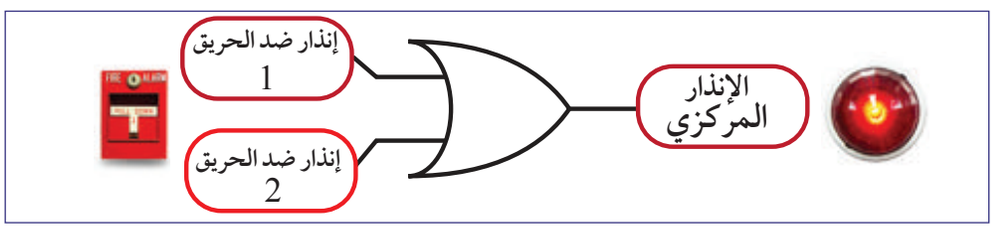
الشكل 4-55 رمز البوابة XOR وجدول الحقيقة الخاص بها.

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

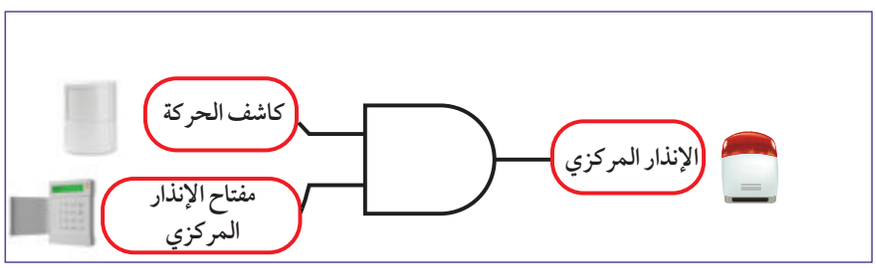
افترض وجود جهازي إنذار ضد الحريق (أو أكثر) في مبنى ما، وكل منهما مرتبط بجهاز الإنذار ضد الحريق المركزي. إذا سُحِب أيٌّ من جهازي الإنذار ضد الحريق، ينطلق نظام الإنذار المركزي، الأمر الذي يؤدي إلى إرسال إشارة بصوت عال، وتشغيل ضوء الطوارئ. في هذه الحالة، البوابة OR وحدها تفي بالغرض. ينبغي أن يكون أحد المدخلين 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

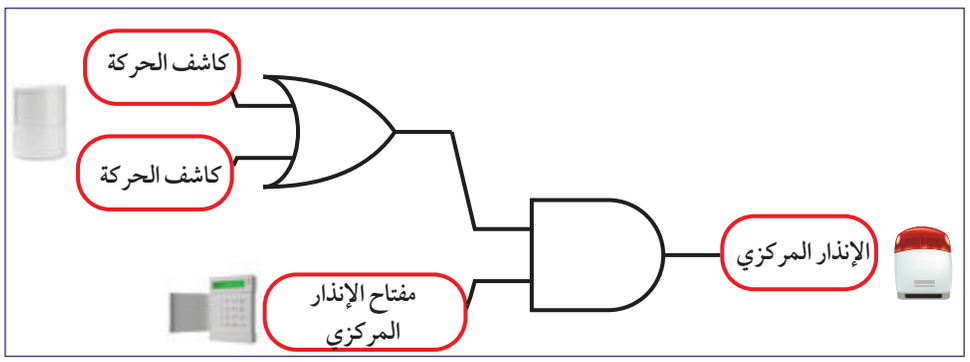
يتكوَّن الإنذار النموذجي ضد السرقة من مفتاح مركزي. يُشغَّل الإنذار عادة أثناء الليل، وليس خلال عندما يكون الكل مستيقظًا. يشتمل النظام على كاشف للحركة، ويعمل الإنذار المركزي عند تشغيل المفتاح ومرور أي شخص أمام كاشف الحركة (**الشكل 4-57**).



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.

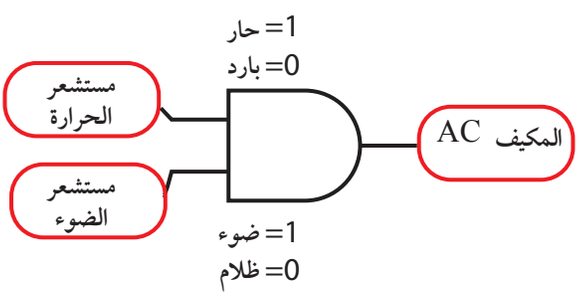
مثال 9

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

المطلوب: تصميم الدائرة

الحل:

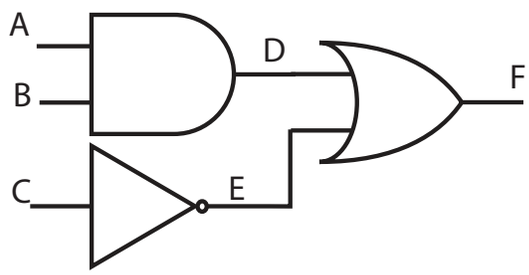
1. لتصميم دائرة، يجب علينا أولاً تحديد المستشعرات التي نحتاج إليها، وما يجب أن تكون عليه المداخل والمخارج. تحتاج الدائرة إلى استكشاف الحرارة والضوء، لذلك نحن بحاجة إلى مستشعر للحرارة، ومستشعر للضوء.
2. وبما أن لدينا مدخلين اثنين ومخرَجًا واحدًا، يمكننا بسهولة كتابة جدول الحقيقة.
3. عندما يرسل مستشعر 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 10

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

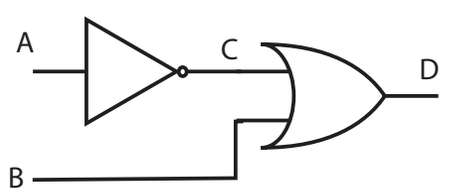
4-4 الدوائر المنطقية

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.

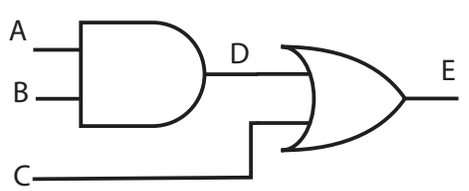
خطوات التّجربة

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.

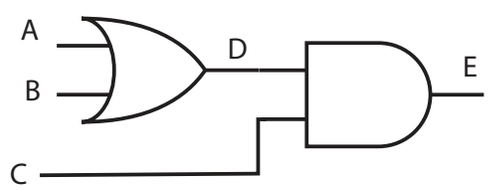
الدائرة 1



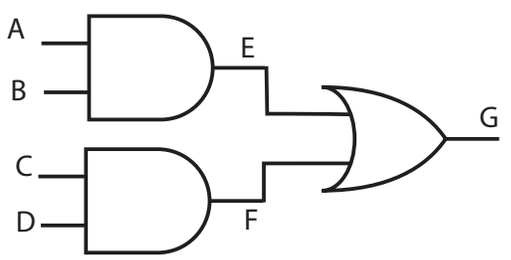
الدائرة 2



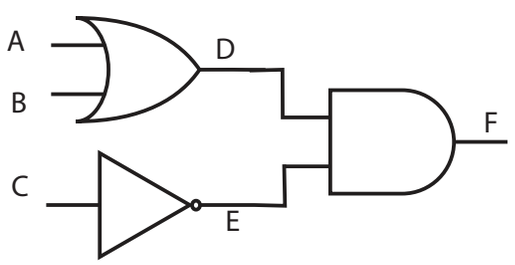
الدائرة 3



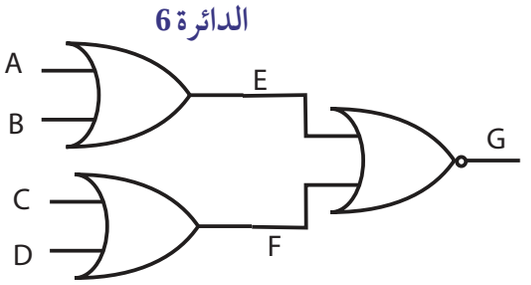
الدائرة 4



الدائرة 5

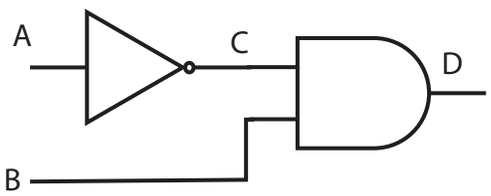


الدائرة 6



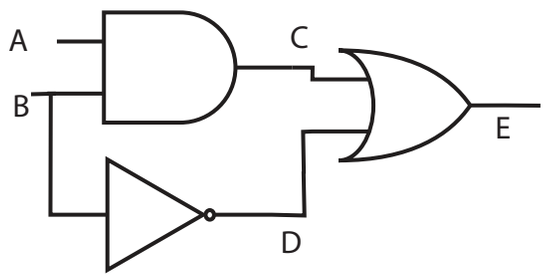
تقويم الدرس 4-4

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:

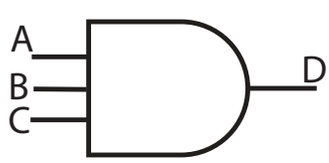
a. أيّ مدخل عالٍ يضمن مخرجًا منخفضًا.

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 مع 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 تطيع 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 الذي يستغرقه لشحن المُكثِّف بنسبة 63%.

الدرس 4-2: أشباه الموصلات

الموصل الكهربائي: مادّة تسمح للتيار الكهربائي بالتدفُّق من خلالها بسهولة.

العازل الكهربائي: مادة لا تسمح للتيار الكهربائي أن يتدفَّق من 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. ما قيمة مقدارها 1 µF 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

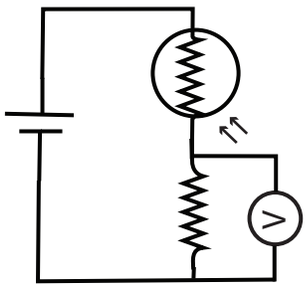
b. صغيرة **d.** لانهائية

11. كم تكون الطاقة المختزنة في مكثِّف سعته 2000 µF 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 تزداد على المقاومة الضوئية (LDR)، 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

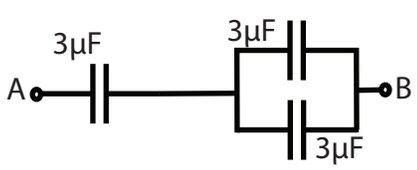
الدرس 4-1: المكثفات

14. مُكثِّف سعته 1,000μF، جرى توصيله على التوالي بمقاوِمة.

a. ما الثابت الزمني للمكثِّف، عند تفريغه في مقاوَمة 100kΩ؟

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

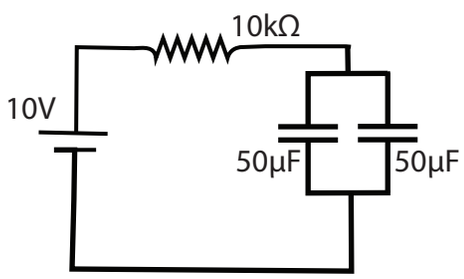
15. ثلاثة مكثِّفات متماثلة ومتصلة، كما هو مبيَّن في الشكل.



احسب السعة المكافئة بين النقطتين A و B.

16. أنشىء رسمًا تخطيطيًا، يمكِّنك من الحصول على سعة مكافئة مقدارها 2.0 μF، باستخدام أربعة مكثفات، سعة كل منها 2.0 μF.

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 هي الشحنة المختزنة، وV هو فرق الجهد عبر المكثّف. بيّن أن هناك تعبيرًا آخر مناسبًا للطاقة المختزنة، هو:

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

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. اذكر التركيب الذرّي للسيليكون.

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 طبقة النضوب.

a. عرّف طبقة النضوب.

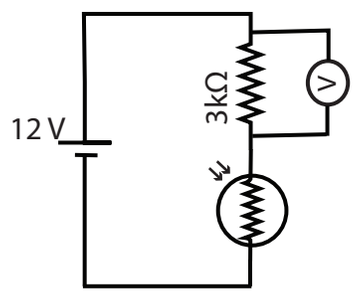
b. اشرح كيف تكوَّنت طبقة النضوب تلك.

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

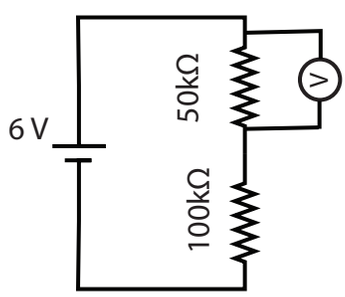
الدرس 3-4 مجزّئ الجهد

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. تتَّصل مقاوِمة 50 kΩ ومقاوِمة 100 kΩ، على التوالي، ببطارية قوّتها الدافعة الكهربائية 6.0 V، ويتَّصل الفولتميتر حول طرفَيِ المقاوِمة 50 kΩ. احسب قراءة الفولتميتر.

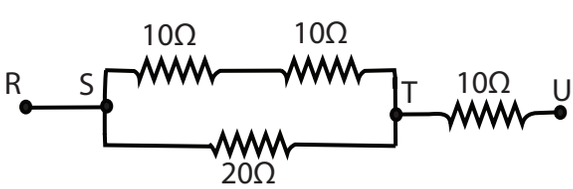


28. ما الفائدة من استخدام المقاوِمة الضوئية (LDR) والمقاوِمات الحرارية (الثرمستورات) والمقاوِمات المتغيّرة في هذه الأيام. اذكر كل واحدة منها مع فوائدها وقدِّم تحليلًا عامًا لسبب توجُّه العالَم نحو التشغيل الآلي أيضًا.

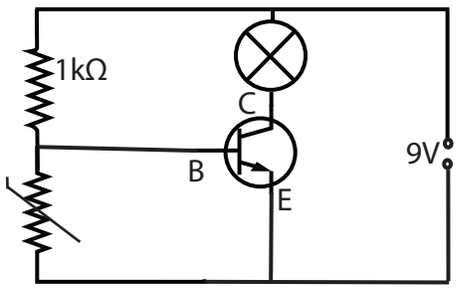
29. ادرس الدائرة الكهربائية المجاورة. إذا كان فرق الجهد بين النقطتين S و T يساوي 9 V، جد فرق الجهد:

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 الجهد حول طرفي الثرمستور، عندما تتغيّر درجة الحرارة من 20°C إلى 100°C. اقترح أيضًا استخدامًا عمليًّا لهذه الدائرة.



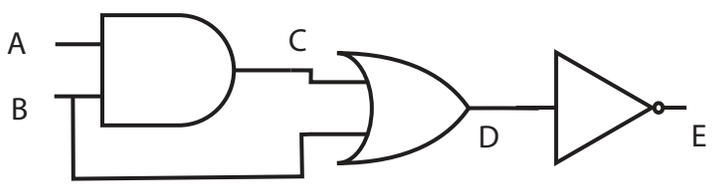
الدرس 4-4: البوّابات المنطقية

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.

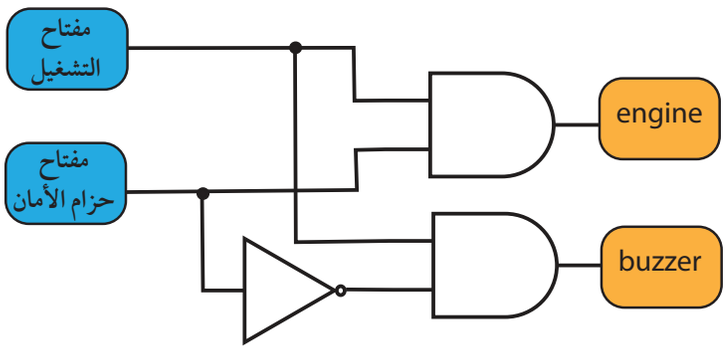
b. أنشيء جدول الحقيقة للبوابة NAND ذات ثلاثة مداخل.

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 الصفارة 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 ميزان 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 بميزان حرارة ومجسّ رطوبة. 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، وتعتبر أساسًا في 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 لخسارة جزء منها أثناء نقلها. فعندما تتحرّك الإلكترونات بسرعة في أسلاك التوصيل تنتج حرارة. ومن أجل خفض هذه الحرارة والخسارة 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 ملفّ واحد

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 مؤخَّرًا في الأسواق هواتف جوّالة قابلة للشحن لاسلكيًّا. وتوافرت أيضًا فرشاة أسنان كهربائيّة تستخدم الشحن اللاسلكي لتدوم بشكل أطول. لكن كيف تعمل الشواحن اللاسلكيّة؟ تعمل بوضع ملف سلكي على مغناطيس. وعند مرور تيّار في الملف، ينشأ مجال مغناطيسي. يستخدم هذا المجال لشحن الأجسام القريبة منه. هل ستتمكَّن 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.

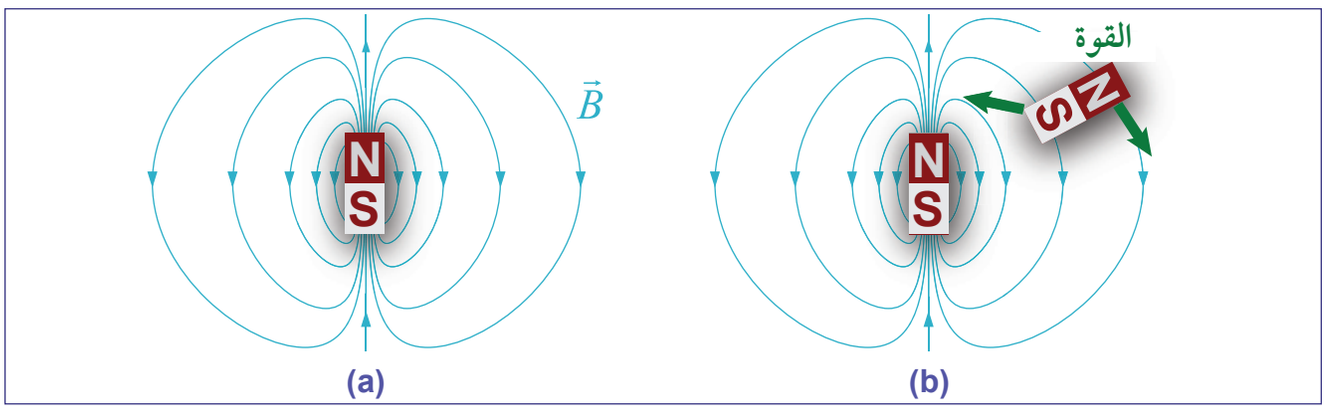
P1112.4 يصف بشكل نوعي كيفية تولد التيّارات الدوّامية ويذكر بعض تطبيقاتها.

المفردات

الحثّ الكهرومغناطيسي	Electromagnetic induction
التيار الحثّي	Induced current
الفيض المغناطيسي	Magnetic flux
ويبر	Weber
الحثّ المغناطيسي	Magnetic induction
قانون فاراداي للحث	Faraday’s law of induction
الحثّ	Induction
قانون لنز	Lenz’s law
قوة دافعة كهربائية حركيّة	Motional emf
التيّارات الدوّاميّة	Eddy currents

المجال المغناطيسي

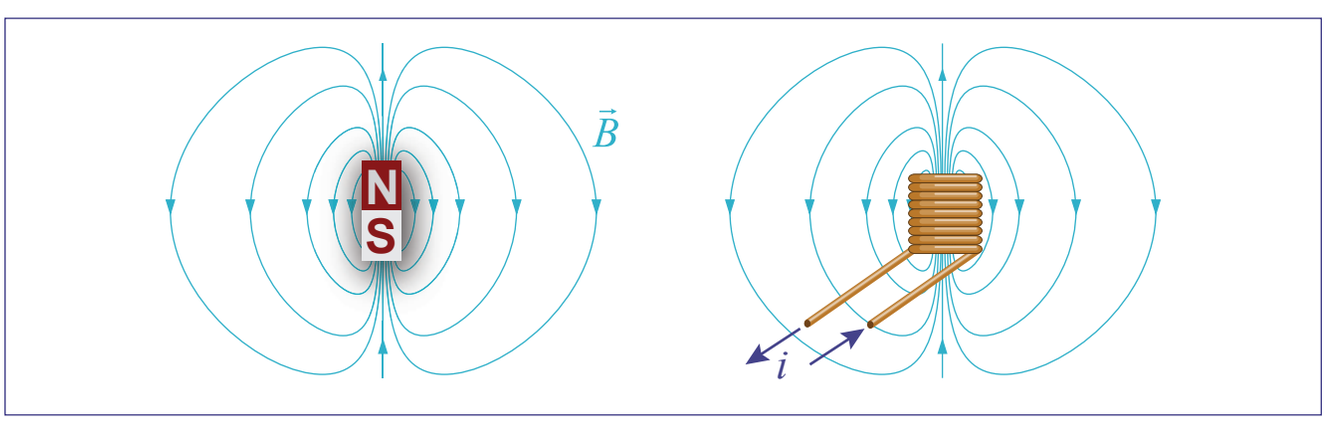
لا تؤثّر القوة الناشئة بين مغناطيسين اثنين تأثيرًا مباشرًا في كل منهما. فبدلًا من ذلك، يُنشئ المغناطيس الأول مجالًا مغناطيسيًّا (**الشكل 5-2a**)، يؤثّر في المغناطيس الثاني (**الشكل 5-2b**). يوفّر المجال المغناطيسي طاقة يمكن أن تُستخدم لتوليد الكهرباء. وهو يُمثَّل بخطوط تكون باتِّجاه القوة المؤثِّرة في قطب شمالي تخيّلي مفرد. يكون اتجاه خطوط المجال من القطب الشمالي إلى القطب الجنوبي.



الشكل 5-2 تفاعل المغانط من خلال المجال المغناطيسي.

وحدة شدّة المجال المغناطيسي B في النظام الدولي للوحدات هي التسلا (T). فمجالٌ شدته 1 T هو مجال قويٌّ جدًّا. يبلغ المجال المغناطيسي قرب خط الاستواء حوالي 3×10^{-5} T أو 30 μT. وللحصول على مجال بشدة 1 T نحتاج إلى استخدام مغانط قويّة جدًّا، كما هي حال آلة التصوير بالرنين المغناطيسي.

تنشأ المجالات المغناطيسيّة بشكل أساسي من التيّارات الكهربائيّة. فملف سلكي ينقل تيّارًا كهربائيًا ينشأ عنه مجالٌ مغناطيسيٌّ كالذي نحصل عليه من خلال المغانط الدائمة. فالمجال الناشئ من المغانط الدائمة يتولد بشكل أساسي من الحركة المغزلية للألكترنات في الذرات. وكما تنشأ المغناطيسية من الكهرباء، تتولّد الكهرباء من المغناطيسية. وبذلك تشكّل كل منهما نصف حالة التناظر المهمّ الموجود في الفيزياء.



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. تتولّد هذه التيّارات نتيجة للحركة المداريّة للأرض، عبر المجال المغناطيسي للشمس.

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 5-4**.

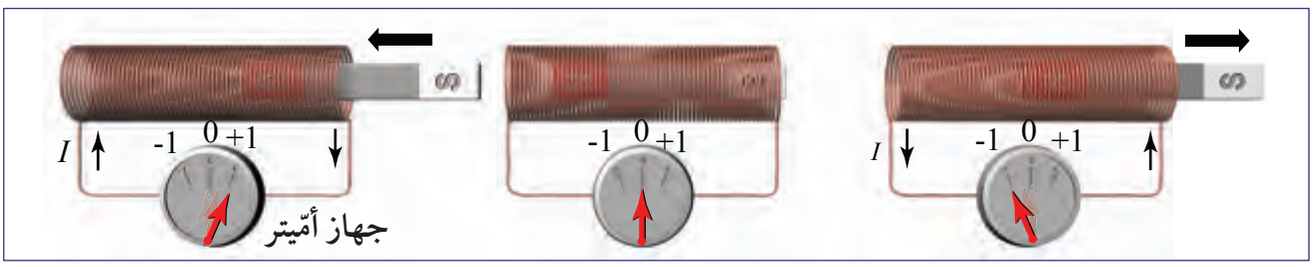
a. عند دخول المغناطيس، يتدفّق التيّار في اتّجاه مُعيَّن.

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 5-4 الحثّ الكهرومغناطيسي

يُطلق على ظاهرة المجال المغناطيسي المتحرّك، التي تحثّ تيارًا يُسمّى التيار الكهربائي الحثّي، تسمية **الحثّ الكهرومغناطيسي Electromagnetic Induction**. عندما يجري تحريك مغناطيس داخل الملف، يُظهر جهاز الأمّيتر الموصول بالدائرة تيارًا كهربائيًا يُسمّى **التيّار الحثّي Induced current**، لأن المغناطيس يحثّ التيّار في السلك. ولكن هذا يحدث فقط من خلال حركة المغناطيس بالنسبة إلى السلك.

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

يتغيّر اتجاه التيار الحثّي، عندما يتغيّر اتّجاه حركة المغناطيس.

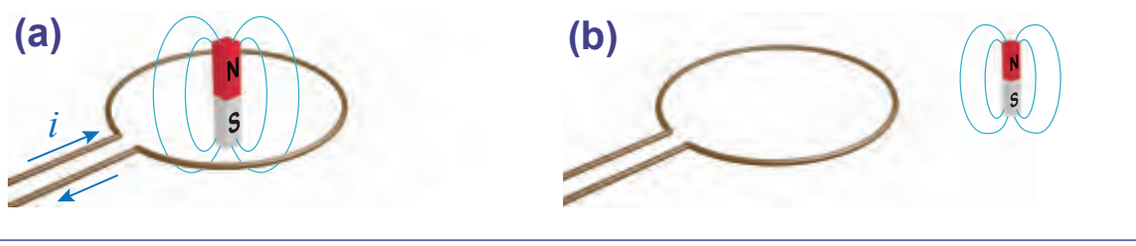
نلاحظ ازدياد كمّية التيار المتدفّق في الملف بإحدى الطرق الآتية:

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

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

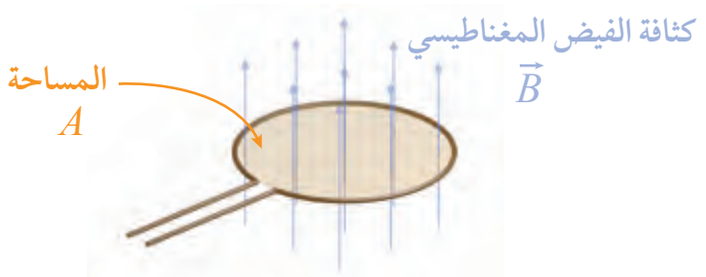
الفيض المغناطيسي

يُظهر **الشكل 5-5** وضعين لمغناطيس مُتحرّك وملف سلكي. الوضع الأول (a) يولّد تيّارًا كبيرًا في الملف، والوضع الثاني (b) لا يولّد تيّارًا. لماذا؟ الخطوة الأولى لربط الكهرباء بالمغناطيسيّة تكون من خلال تعريف الكمّية التي تصف الاختلاف بين الوضعين (a) و (b).



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

الاختلاف بين الوضعين (a) و (b) يكمن في عدد خطوط المجال التي تجتاز سطح الملفّ فعليًّا. فجزء المجال المغناطيسي الذي يمر عبر الملفّ فقط، يستطيع أن يحثّ التيار فيه. لنعتبر أنّ لدينا ملفًّا موجودًا داخل مجال مغناطيسي متعامد مع سطح الملفّ (**الشكل 5-6**). يُعرَّف **الفيض المغناطيسي**، **Magnetic flux** Φ_B على 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.



الفيض المغناطيسي، Φ_B	الوحدة
$\Phi_B = AB$	ويبر (Wb)

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

الشكل 5-6 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 وحدات قياس كثافة الفيض المغناطيسي والفيض المغناطيسي.

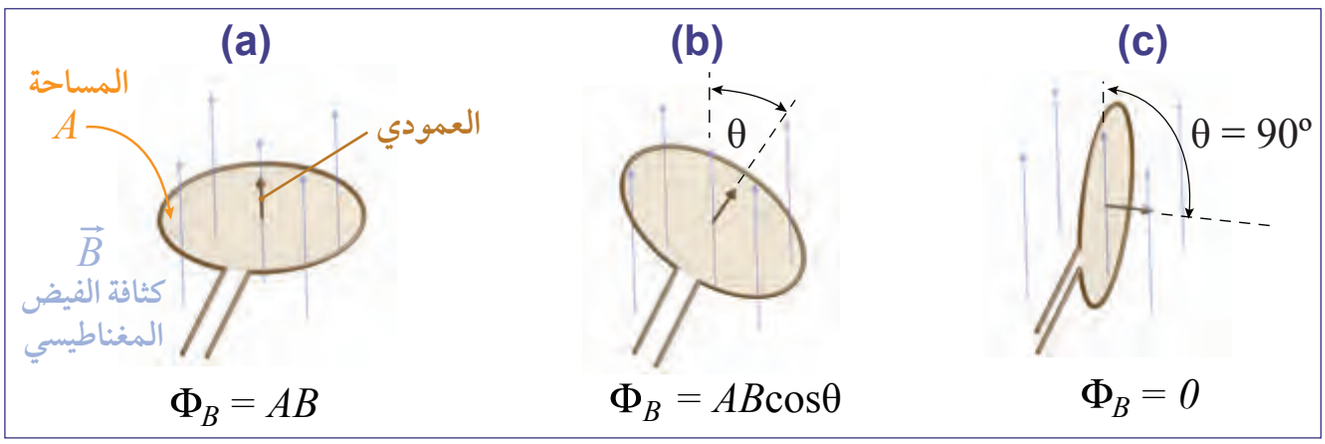
الجدول 5-1 الفيض المغناطيسي وكثافة الفيض المغناطيسي.

الفيض المغناطيسي	كثافة الفيض المغناطيسي
شدة المجال المغناطيسي خلال مساحة معيّنة	شدة المجال المغناطيسي خلال وحدة المساحة
الرمز: Φ_B	الرمز: B
وحدة القياس: Wb	وحدة القياس: Wb/m^2
كمّية قياسيّة	كمية مُتّجهة

تأثير اتِّجاه المجال وعدد اللفّات على الفيض المغناطيسي

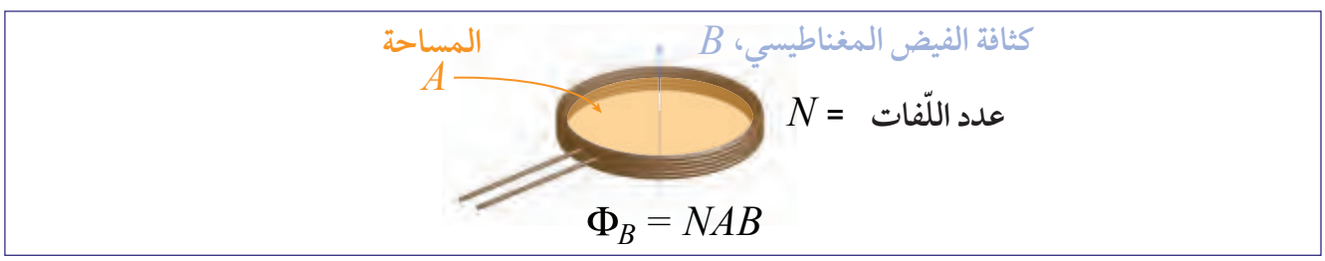
يعتمد الفيض المغناطيسي على ثلاثة عوامل، هي:

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



الشكل 5-7 يعتمد الفيض المغناطيسي على الزاوية بين المجال المغناطيسي والعمودي على سطح الملف.

يُظهر **الشكل 5-7** أنّ مُركَّبة المجال المغناطيسي المتعامدة مع سطح الملف هي فقط التي تُسهم في الفيض المغناطيسي. يُعرَّف المستوى الذي يقع فيه الملف بواسطة العمودي على السطح (**الشكل 5-7a**). إذا كانت هناك زاوية بين العمودي والمجال، فإن الفيض سينخفض بمقدار جيب تمام تلك الزاوية، كما في **الشكل 5-7b**. ويكون الفيض صفرًا، عندما تكون الزاوية 90° (**الشكل 5-7c**).

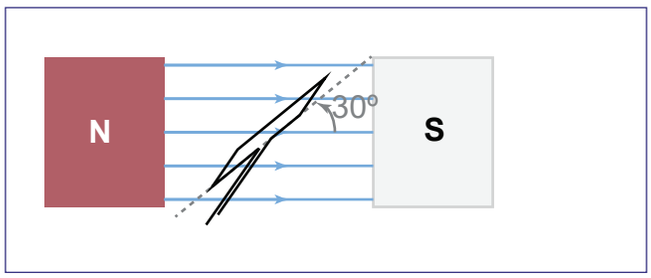


الشكل 5-8 يعتمد الفيض المغناطيسي على عدد اللفات N.

يمر عبر كل لفّة من لفّات الملفّ الفيض المغناطيسي نفسه. يُظهر **الشكل 5-8** أنّ الفيض الكلّي في ملّف مؤلّف من N لَفّة، هو حاصل ضرب N في الفيض عبر لفّة واحدة. تُستنتَجُ العلاقة الكاملة للفيض عبر ملفّ مؤلّف من N لفّة من **المعادلة 5-1**. تفترض هذه المعادلة أن المجال المغناطيسي ثابت عبر مساحة سطح الملف، وأنّ الزاوية بين العمودي على الملف والمجال المغناطيسي هي θ.

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

مثال 1



الشكل 5-9 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 5-9**. 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_B

المعطى: أبعاد الملف $l = 0.5\ \text{cm}$ ، $w = 0.5\ \text{cm}$

شدة المجال المغناطيسي $B = 0.1\ T$

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

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

$$\theta = 90° - 30° = 60°$$

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

$$= (1)(0.1)(0.005)(0.005)\cos 60°$$

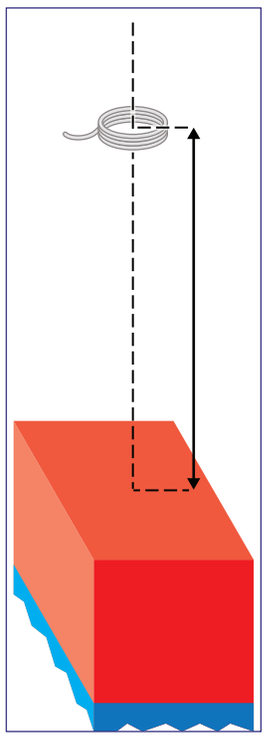
$$\Phi_B = 1.25 \times 10^{-6}\ \text{Tm}^2 = 1.25 \times 10^{-6}\ \text{Wb}$$

مثال 2

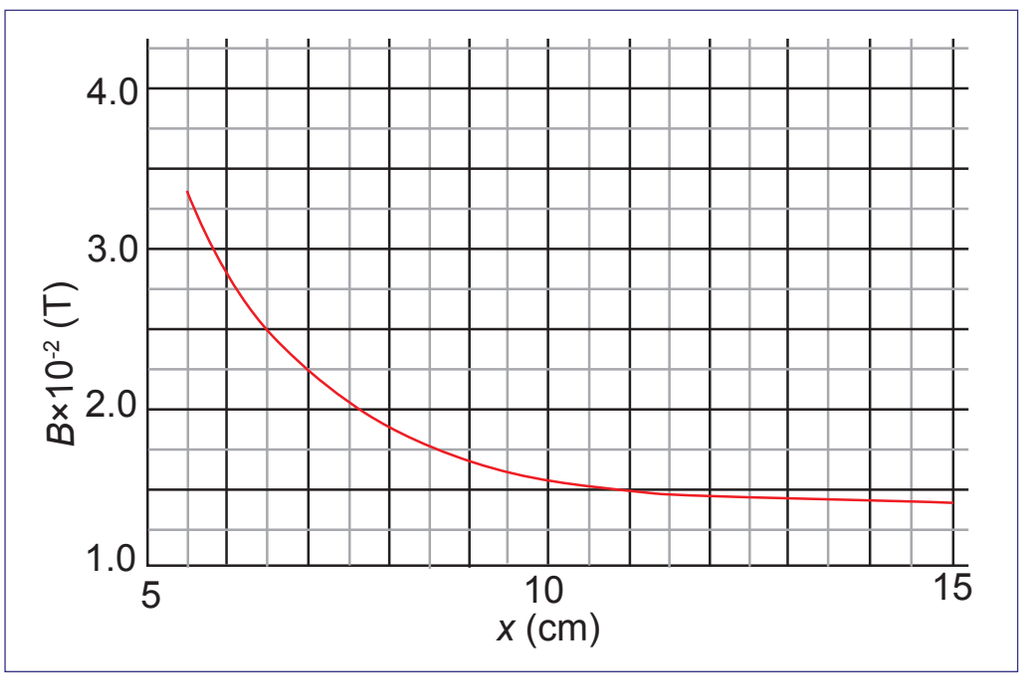
ملفّ دائري صغير، مساحة مقطعه $2.3\times10^{-4}m^2$ يحتوي على 270 لفّة. وُضع الملفّ على مسافة 7 cm بشكل متوازٍ مع قطب مغناطيسي، كما هو مبيّن في **الشكل 5-10**.

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

b. احسب الفيض المغناطيسي الكلّي عبر الملف.



الشكل 5-10 الفيض المغناطيسي عبر ملف.



الشكل 5-11 كثافة الفيض المغناطيسي عند نقاط مختلفة.

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

b. الفيض المغناطيسي، Φ_B

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

عدد اللفّات، لفّة $N = 270$

المسافة بين الملف والمغناطيس، $x = 7\ cm$

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

العلاقات: $\Phi_B = NBA\cos\theta$

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

b. الفيض المغناطيسي الكلّي عبر الملفّ هو:

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

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

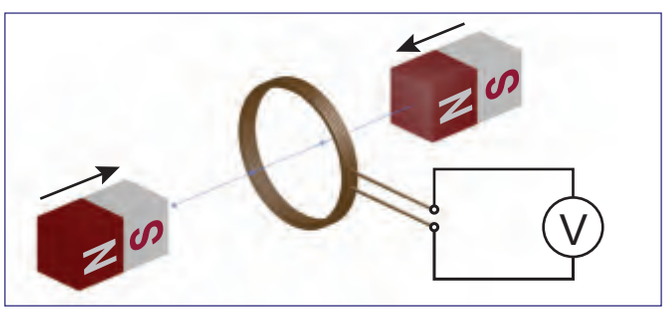
قانون فارادي للحثّ

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، لن يكون هناك تيار حثي عبره، ويكون فرق الجهد الحثي (أو القوة الدافعة الكهربائية) مساويًا لمعدّل تغيّر الفيض المغناطيسي بالنسبة إلى الزمن، كما تعطيه **المعادلة 5-2**.

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

مثال 3

ملف من النحاس 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 5-12 الملفّ والمغانط.

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

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

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

العلاقات: $\Phi_B = NAB\cos\theta$ ، $V = \frac{-\Delta\Phi_B}{\Delta t}$

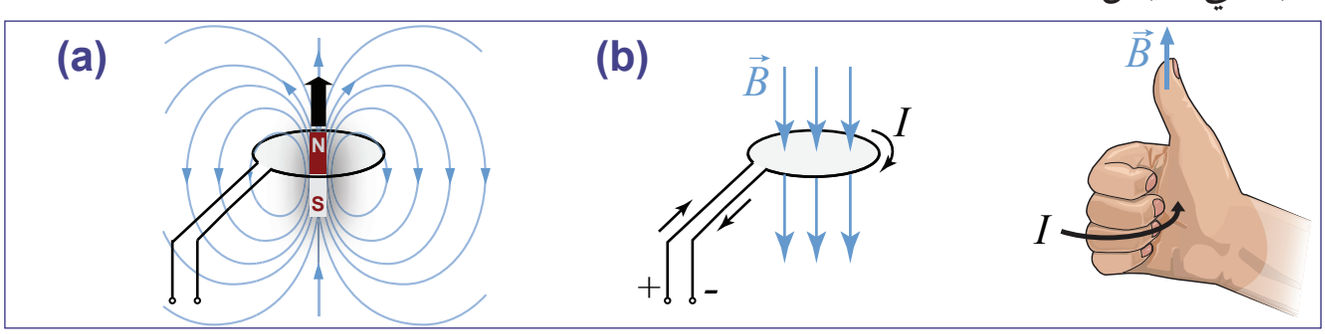
الحل: نقوم أولًا بحساب الفيض، مع ملاحظة أنّ معدّل التغيُّر في الفيض يتناسب طرديًّا مع معدّل التغيّر في شدّة المجال المغناطيسي. بما أنّ المساحة A، وعدد اللفّات N، والزاوية θ، هي ثوابت:

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

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

قانون لنز

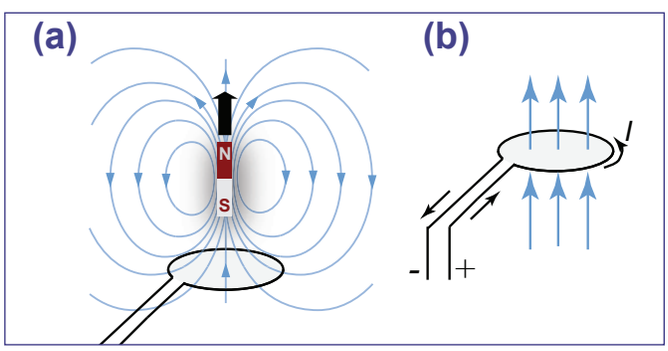
لماذا توجد إشارة سالبة في قانون فارادي؟ ينص **قانون لنز Lenz's law** على أنّ المجال المغناطيسي الحثّي الناتج من التيار الحثّي يقاوم التغيّر في الفيض المغناطيسي الذي أنشأ هذا التيار. يقوم التيار الحثّي بمقاومة التغيّر في الفيض المغناطيسي، في صورة مشابهة لمقاومة القصور الذاتي لجسم، لأي تغيّر في سرعته. 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 5-13 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.

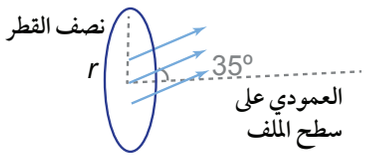
لنفترض أنّ المغناطيس يغادر الملفّ السلكي كما هو مبيّن في **الشكل 5-14**. عندها يتناقص الفيض المغناطيسي داخل الملف. يؤدّي ذلك إلى تولّد مجال مغناطيسي يقاوم هذا التناقص.



الشكل 5-14 عند تناقص الفيض المغناطيسي.

يتحقّق ذلك من خلال مجال مغناطيسي متولّد يكون فيضه في اتِّجاه الفيض الابتدائي المتناقص. والآن، كيف سيكون اتّجاه التيار الحثي؟ نستخدم قاعدة اليد اليُمنى. إذا كان المجال المغناطيسي موجّهًا نحو الأعلى، يكون التيار الحثّي في اتِّجاه معاكس لحركة عقارب الساعة.

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 الحثيّة المتولدة بين طرفي الملف.

b. ما اتجاه التيّار الحثّي؟

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

b. اتّجاه التيار الحثّي

المُعطى: عدد اللفّات $N = 10$

نصف القطر $r = 15\ \text{cm}$

الزاوية بين المجال والعمودي $\theta = 35°$

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

التغيُّر في الزمن $\Delta t = 15s$

العلاقات: $A=\pi r^2$

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

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

$$A=\pi r^2$$

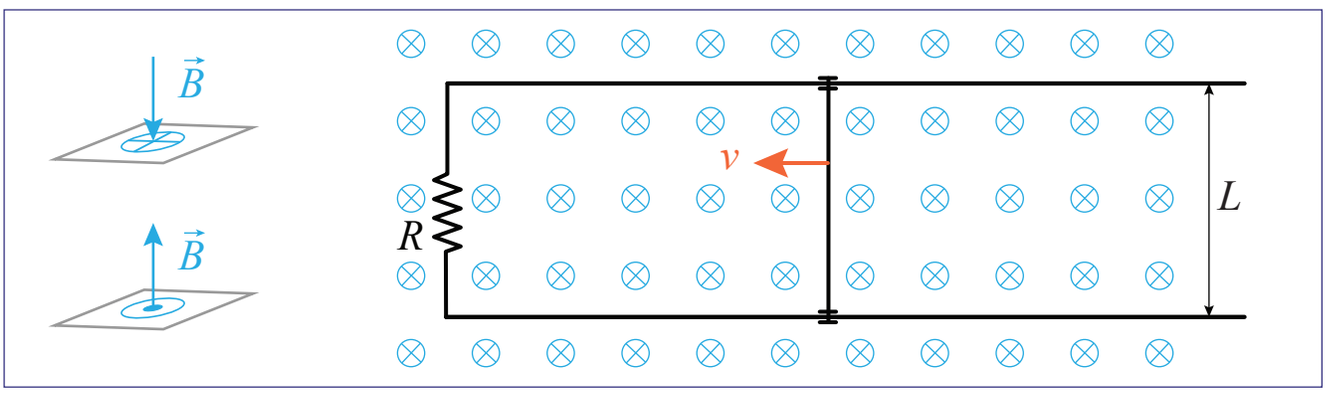
$$= \pi r^2 = \pi(0.15)^2 = 0.07\ m^2$$

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

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

القوّة الدافعة الكهربائية الحثية الحركيّة

يمكن الحصول على فيض مغناطيسي متغيّر بتحريك موصِّل في منطقة مجال مغناطيسي ثابت. يُسمّى هذا التأثير أحيانًا باسم القوة الدافعة الكهربائية (e.m.f) **الحركيّة Motional e.m.f**. لنفترض دائرة مؤلفَّة من مقاومة وسلكين متوازيين طويلين. يتقاطع سلك صلب موصِّل مع السلكين ليغلق الدائرة، ويُشكّل ملفًّا يكون فيه اتجاه الفيض المغناطيسي إلى داخل الصفحة. عندما يتحرَّك السلك يتغيّر الفيض، لأن مساحة السطح تتغيَّر. هذا التغيُّر يولِّد تيارًا حثّيًّا (**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:

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

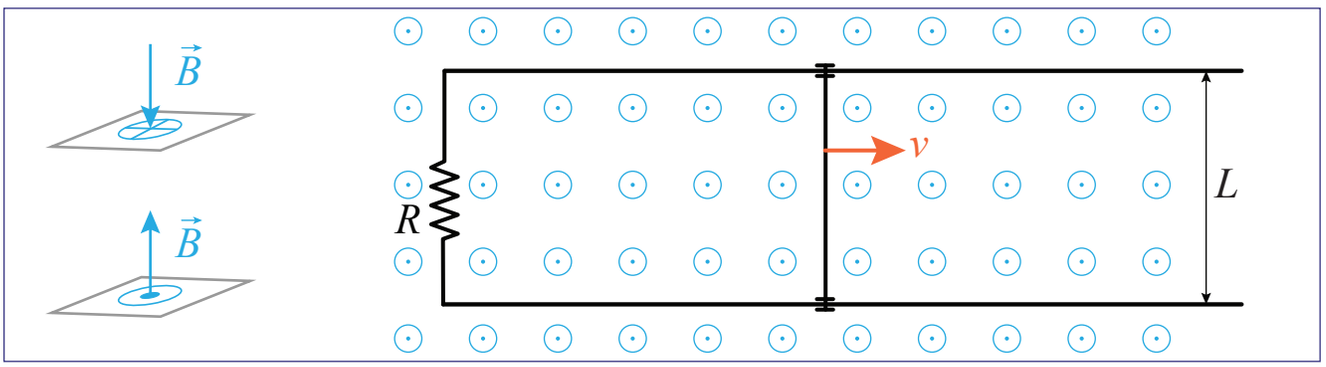
ينتج هذا الجهد، حتى لو لم يكن السلك موصولًا بطرفي الدائرة! والسبب يعود إلى أنّ السلك الموصل والإلكترونات بداخلة يتحركان بالسرعة نفسها. وتتعرَّض هذه الإلكترونات لقوة عموديّة على كل من المجال المغناطيسي وسرعة السلك. النتيجة في **المعادلة 5-3**.

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

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

المُعطى: شدّة المجال المغناطيسي B= 0.3 T

عرض الملف L = 0.25 m

سرعة السلك $v = 0.6$ m/s

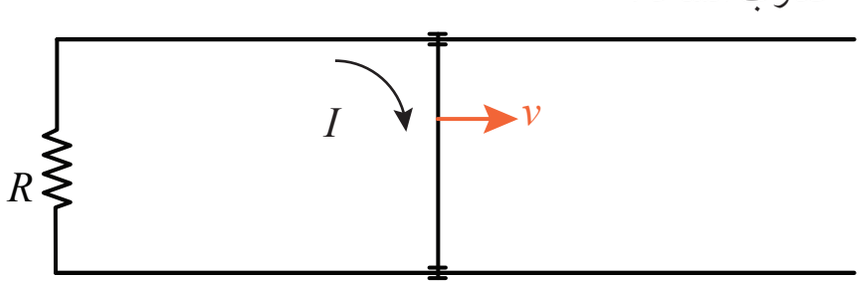
$\theta = 0$

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

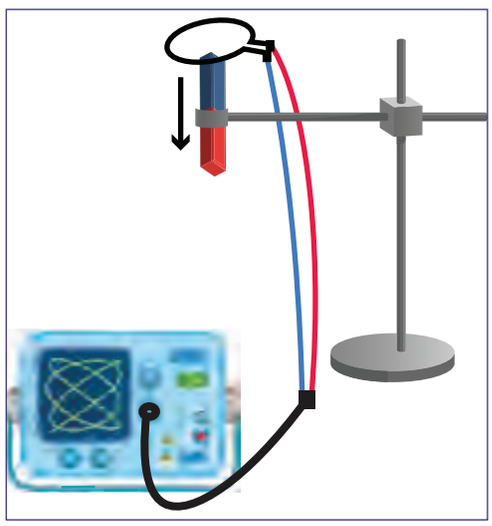
a1-5

القوة الدافعة الكهربائية الحثيّة في ملفّ حلقي دائري

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

خطوات التجربة

1. ضع المغناطيس على حامل التعليق، كما هو مبيّن في **الشكل 5-17**.
2. جهّز ملفًّا حلقيًا مع سلك موصِّل، ثم قم بتوصيل طرفَي السلك بملاقط التمساح لراسم الذبذبات. صل شريط راسم الذبذبات بالقناة 1 للراسم، ثم اضغط زر التشغيل.
3. احمل الملفّ بزوج من الملاقط البلاستيكيّة، وحرّك الملف إلى الأعلى والأسفل ببطء. شاهد منحنى الجهد الظاهر على شاشة راسم الذبذبات.
4. أعد الخطوة 3، لكن بتحريك الملفّ بشكل أسرع. ارسم منحنى الجهد الظاهر على شاشة راسم الذبذبات.



الشكل 5-17 القوة الدافعة الحثيّة في ملف حلقي

الأسئلة

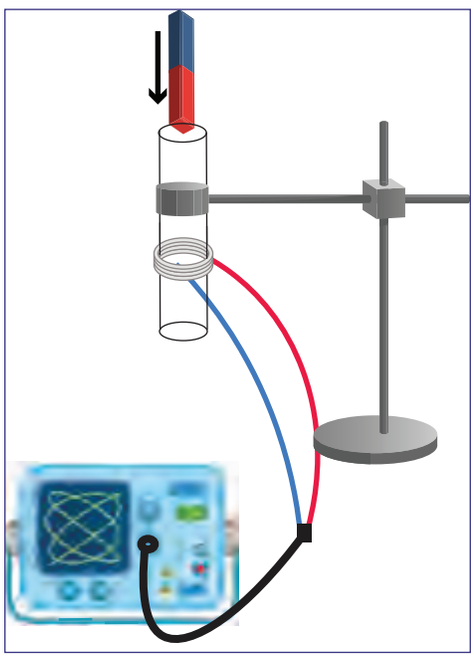
a. ما الفرق بين المنحنيين في الخطوة 3 والخطوة 4؟
b. لماذا يظهر جهد سالب وآخر موجب عند مرور المغناطيس عبر الملف؟
c. لماذا تكون *e.m.f* صفرًا عند مرور الملف عبر مركز المغناطيس؟
d. سجّل طريقتين تجعلان القوة الدافعة الكهربائية الحثيّة أكبر.
e. المجال المغناطيسي في هذا الاستقصاء ثابت، والملف متحرّك. كيف يمكن لهذا الاستقصاء أن يتغيّر إذا كان الملف ثابتًا والمجال المغناطيسي مُتحرّكًا.

نشاط عملي

b1-5 القوة الدافعة الكهربائية الحثيّة في ملف لولبي

سؤال الاستقصاء	مُشاهدة قوة دافعة كهربائية حثيّة في ملف لولبي أثناء تغيير المجال المغناطيسي.
الموادّ المطلوبة	موصِّل سلكي 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. جهّز ملفًّا لولبيًّا مؤلفا من 20 لفّة على الأقل، ومصنوعًا من سلك موصِّل، ثمّ ضعه في أنبوب بلاستيكي. 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 الموجة التي تشاهدها على شاشة راسم الذبذبات.
5. أعد الخطوات 1–4 عن طريق إنشاء ملفّ مؤلف من 40 لفة، ثم 60 لفة.

الأسئلة

a. سجّل طريقتين تستطيع من خلالهما الحصول على قوة دافعة كهربائية حثيّة أكبر.

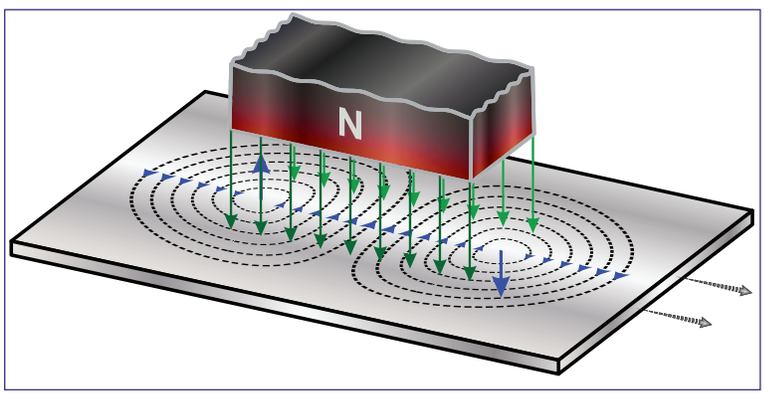
b. في هذا الاستقصاء، المجال المغناطيسي ثابت والملفّ متحرّك. كيف تتغيّر نتيجة الاستقصاء إذا كان المغناطيس ثابتًا والملفّ مُتحرّكًا.

c. كيف تتغيّر قوة دافعة كهربائية حثيّة إذا جعلنا مساحة سطح الملفّ ضعفي 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

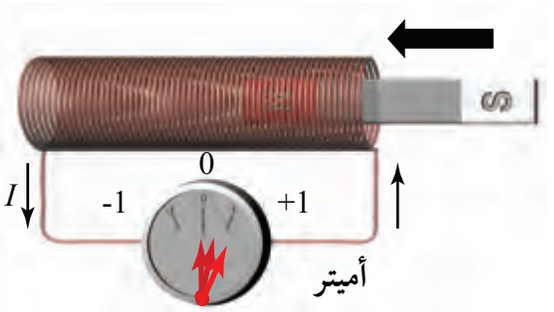
1. تُستخدم التيّارات الدّوامية كمكابح للقطارات المغناطيسية المعلقة. يتحرّك مغناطيس فوق قضبان موصّلة. تُنتج هذه الحركة تيارًا حثيًّا في قضبان القطار يُنشئ مجالًا مغناطيسيًّا وفق قانون لنز؛ فيؤدي إلى إبطاء القطار.

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 في المعدن. فهي لا تتشكَّل في منطقة العيب. ويفيد ذلك خصوصًا في التحقُّق من العيوب والخلل في متن 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:

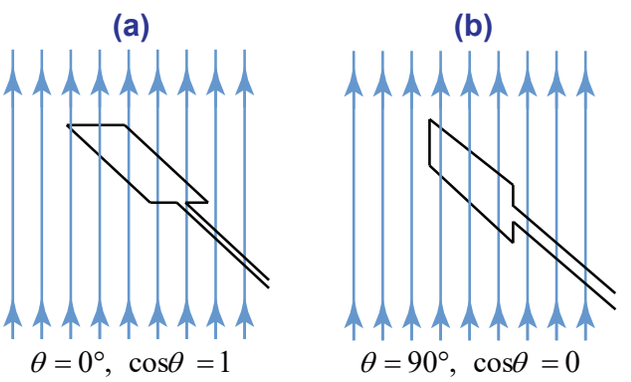


a. توقّفت حركة المغناطيس وبقي قطبه N داخل الملف؟

b. سُحب المغناطيس بالسرعة نفسها التي أُدخِلَ بها؟

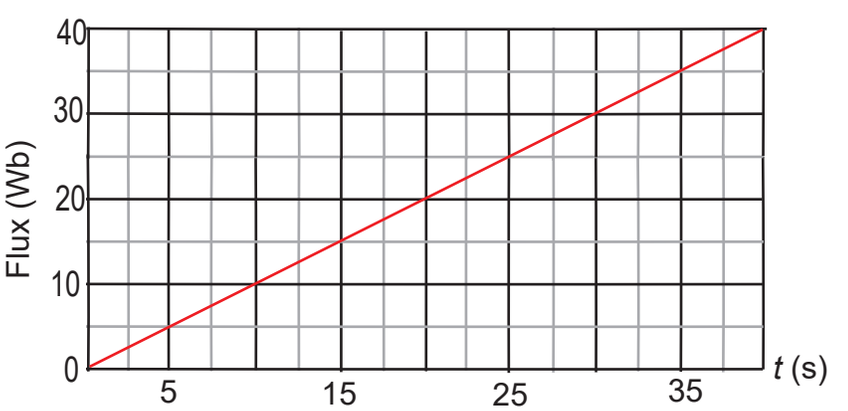
c. أُدخِلَ قطب S للمغناطيس من الطرف نفسه، وبالسرعة عينها؟

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).

الدرس 5-2
مولِّدات التيّار المتردِّد (AC)

تُستخدَم المولِّدات في محطّات توليد الكهرباء لإنتاج الكهرباء. ويُستخدَم في السيّارات التي تعمل على وقود البنزين جهاز مماثل يُسمّى المبدّل (الدينامو) لتوليد الكهرباء. يعمل الدينامو بشكل مشابه للمولِّد الكهربائي، حيث يقوم بشحن بطّارية السيّارة، ويُوفِّر الطاقة للأنظمة التي تعمل بالكهرباء، مثل أنظمة الصوت والإضاءة.

الشكل 5-20 الدينامو

يحتوي كل من المولِّد الكهربائي والدينامو على ملفّات عدّة من الأسلاك الكهربائية حول قلب حديدي، لأن الحديد يُضخّم المجالات المغناطيسية؛ فيؤدّي إلى تحسين 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.

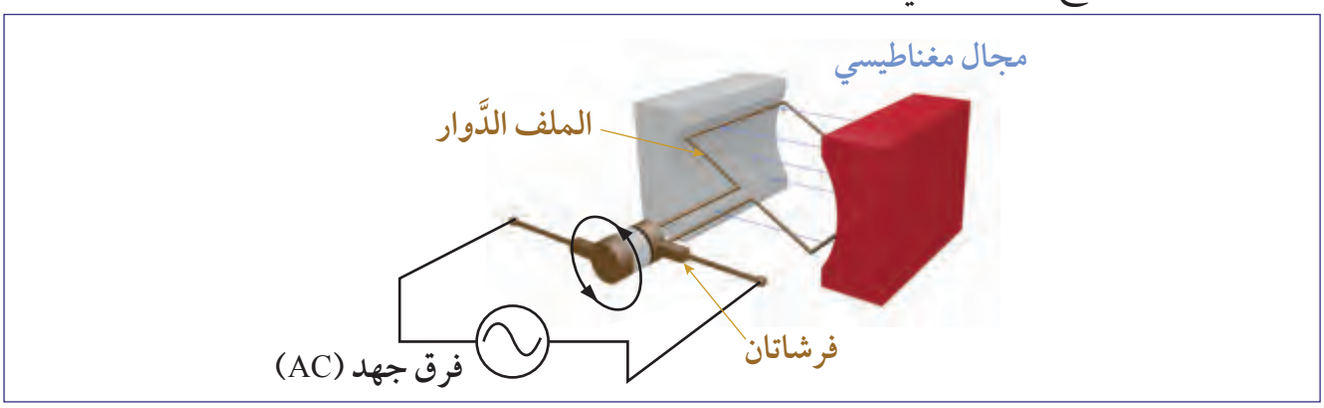
P1113.2 يصف مفاهيم القيمة الفعالة لشدة التيار، والقيمة الفعالة لفرق الجهد، والزمن الدوري، والتردد، والقيمة العظمى لشدة التيار المتردد، ويحل مسائل حسابية حول كل من هذه المفاهيم.

المفردات

مولّد التيار المتردّد (AC)	AC Generator
جهد متردِّد	Alternating voltage
التيار المستمرّ (DC)	Direct current
التيار المتردِّد (AC)	Alternating current
دائرة تيار متردِّد	AC circuit
القيمة الفعَّالة	Root mean square value (Effective value)

مولِّد التيّار المتردِّد (AC)

مولِّد التيّار المتردِّد هو آلة تستخدم قانون الحث لفارادي 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 حول طرفَي الملف. فالارتفاع والانخفاض 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 . من البديهي أن مولِّدات الكهرباء (AC) لا تولِّد الكهرباء من لا شيء. 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.

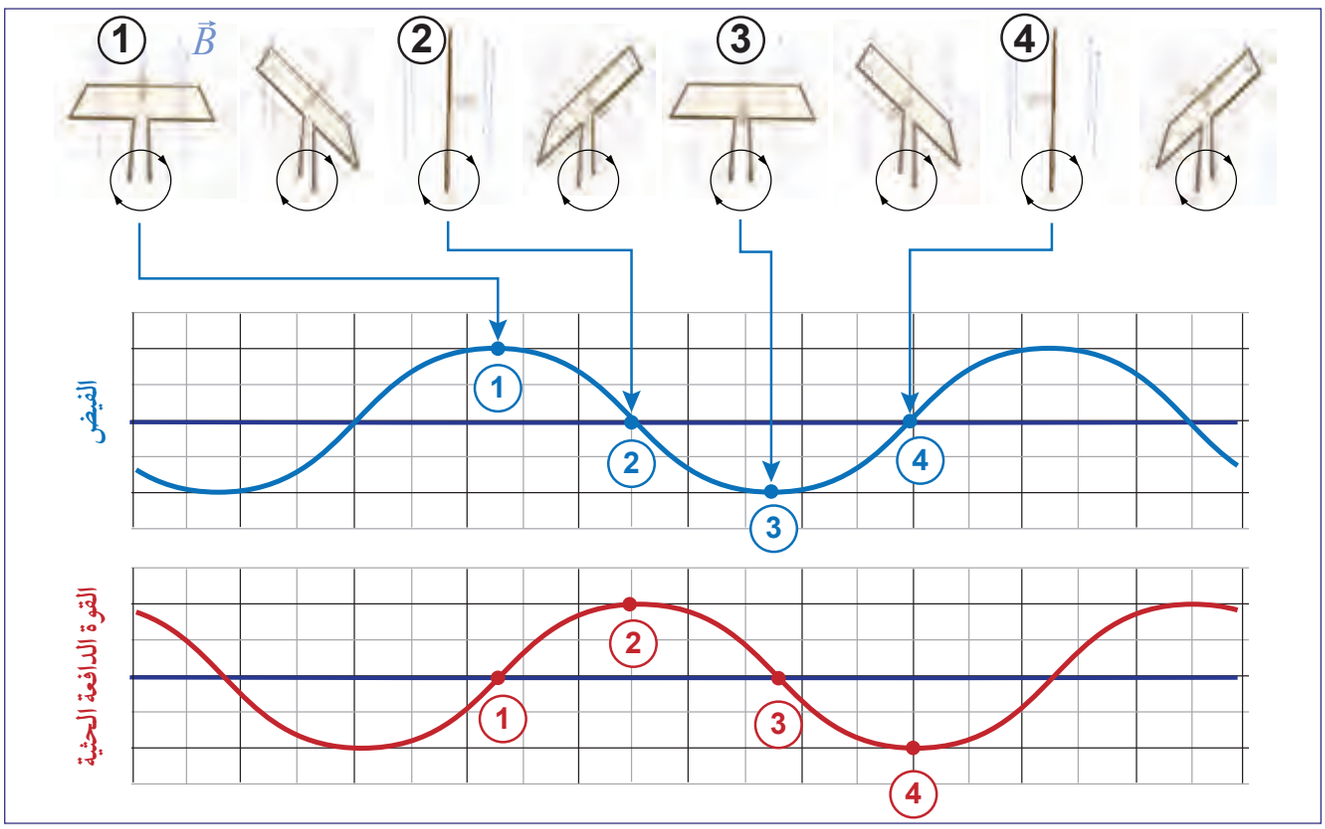
يُظهِر **الشكل 5-22** الأجزاء التي تعمل داخل المولِّد الكهربائي (AC). ولكي نحصل على أعلى كفاءة ممكنة، لابد أن يكون هناك ثلاثة أو أكثر من الملفات المزدوجة.

الشكل 5-22 مولِّد كهربائي صناعي مفكَّك للصيانة.

تأتي الطاقة الميكانيكية اللازمة لدوران الملف وتشغيل المولِّد من احتراق الغاز أو البنزين أو الديزل أو الفحم. ويمكن أن يكون مصدرها القدرة النووية أو سقوط الماء أو حركة الرياح.

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 $\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t}$ 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.

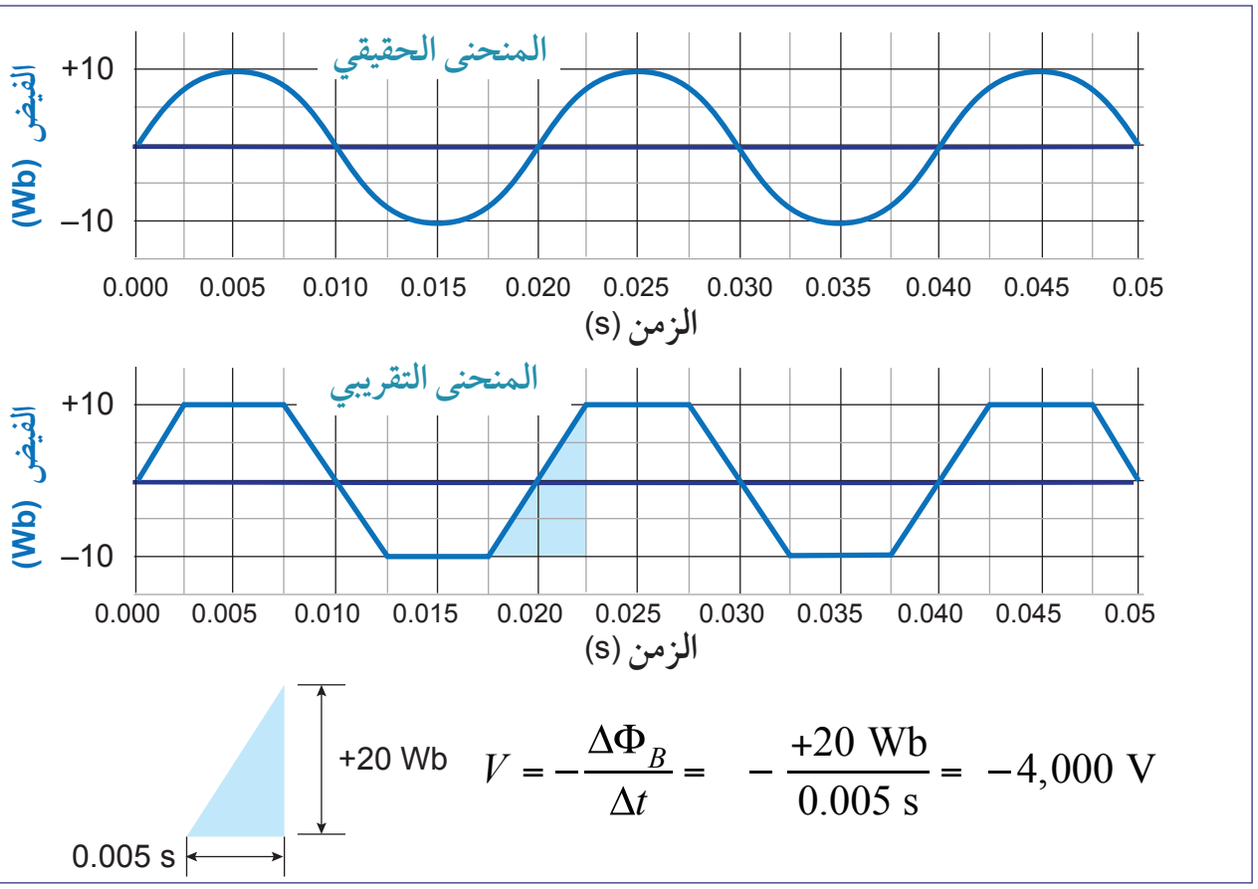
لكي نفهم كيف يعمل مولد التيار المتردِّد، ننظر إلى الفترات الزمنية الأربع الموجودة في **الشكل 5-23** خلال دوران الملف في المجال المغناطيسي. ينشأ الجهد الحثّي نتيجة تغيُّر معدَّل الفيض (الميل)، وليس كمية الفيض نفسها.

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 الفيض 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 المعطى في **الشكل 5-24**.

a. عند اللحظة 0.015 s.

b. عند اللحظة 0.030 s.

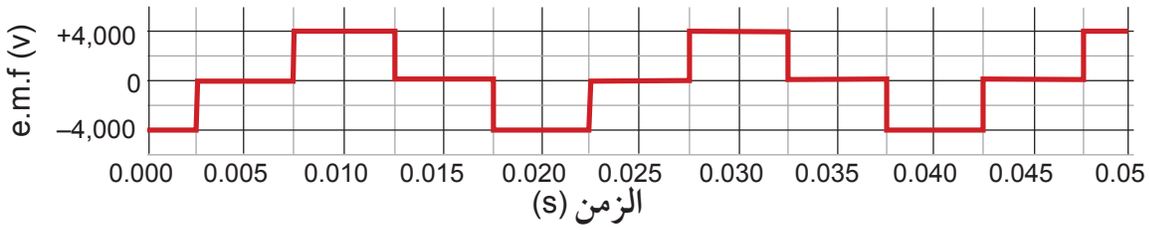
c. ارسم منحنى القوة الدافعة الكهربائية الحثّية بدلالة الزمن.

الحل:

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

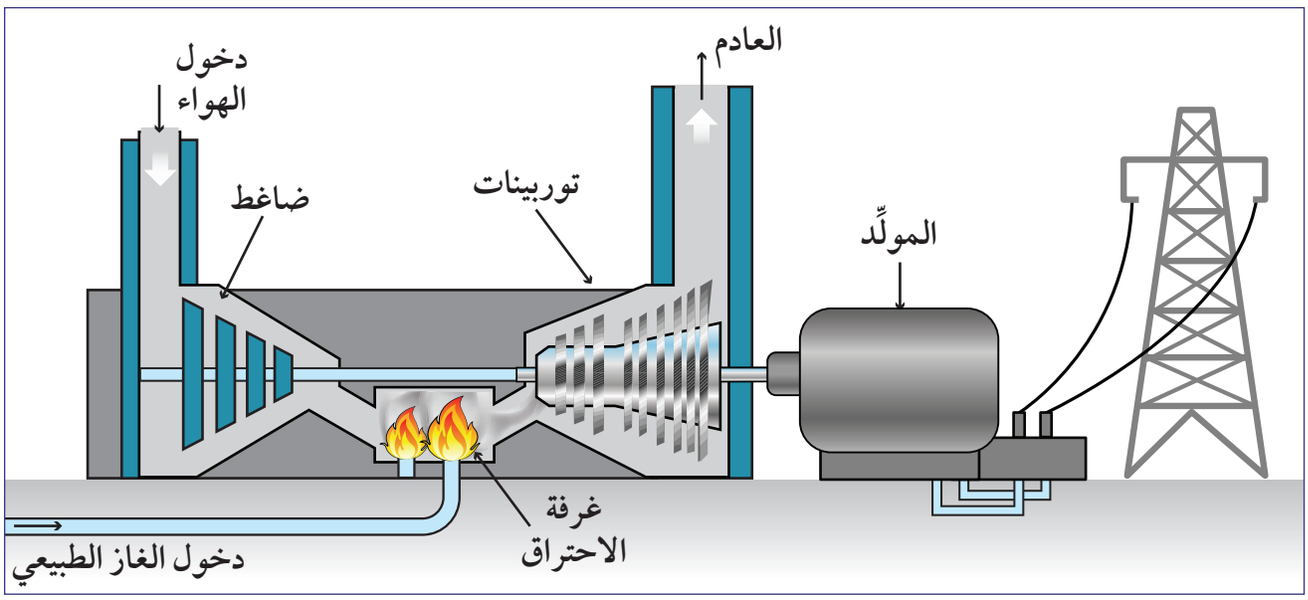
b. $e.m.f = -\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t} = -\frac{-20\ \text{Wb}}{0.005\ \text{s}} = \boxed{+4{,}000\ \text{V}}$

c.



محطّات توليد الكهرباء

تُستَخدَم المولِّدات الكهربائية لتوليد الكهرباء من الرياح، ومن السدود الكهرومائية، وفي المفاعلات النووية، وفي محرّكات السيّارات وفي محطّات الغاز والفحم. لمحطّات الطاقة آلات دوران تسمى التوربينات، تولِّد الحركات الدورانية، وتُشغّل المولّدات الكهربائية. تولِّد المولِّدات الكهربائية تيّارًا كهربائيًّا متردِّدًا يُستخدَم في المنازل والشركات.



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 الملفّات 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 الجاذبية لتدفُّق الماء والتي بدورها تحرِّك التوربينات.

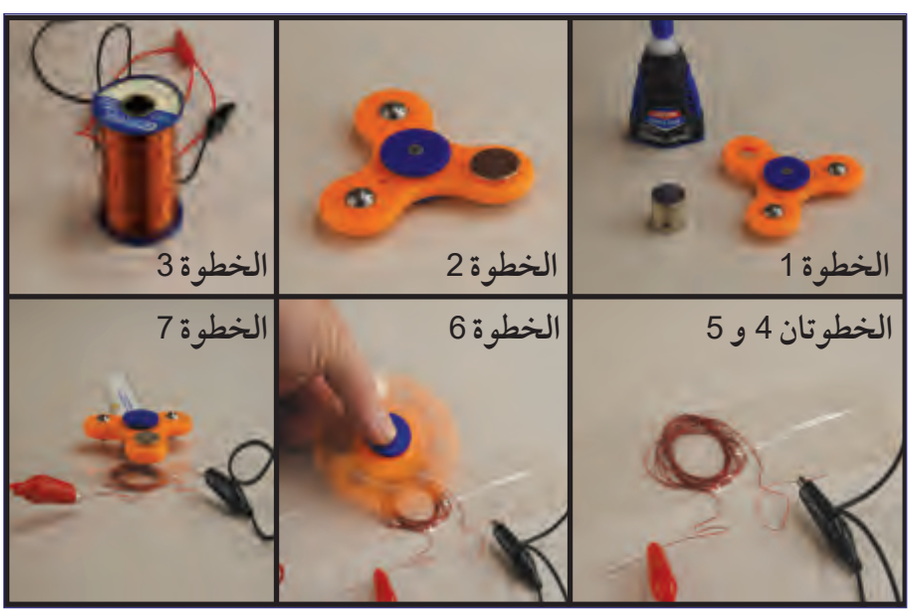
نشاط عملي

2-5 صنع مولِّد كهربائي

سؤال الاستقصاء	كيفية صنع مولِّد كهربائي بسيط.
الموادّ المطلوبة	لعبة الدّوار، مغناطيس قوي دائري الشكل، أسلاك كهربائية مزوَّدة بملاقط تمساح، أسلاك نحاسية رفيعة، راسم الذبذبات

خطوات التجربة

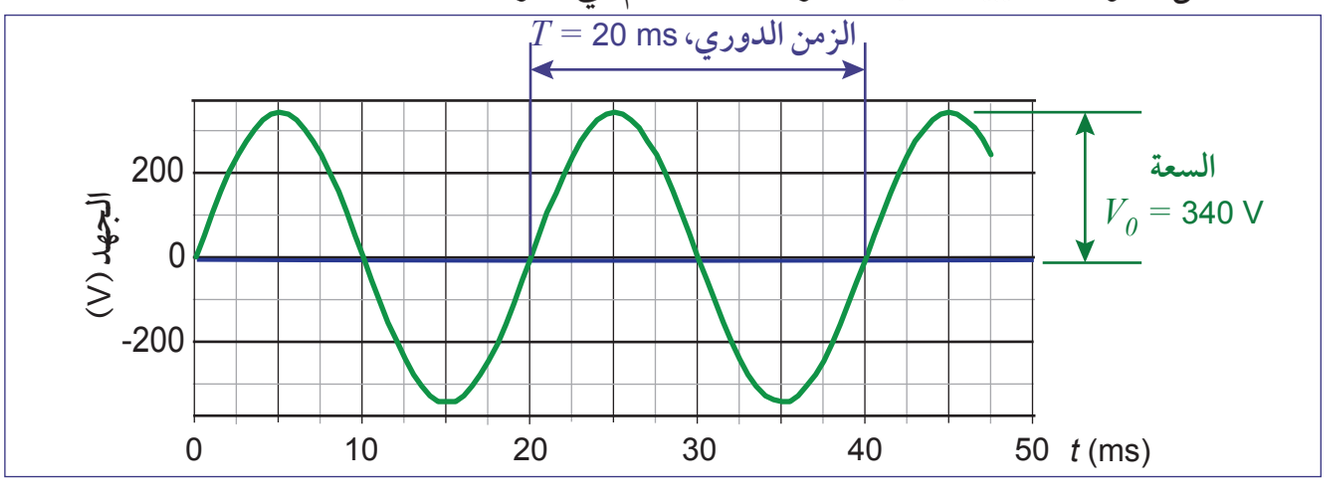
1. أزل واحدًا من الأوزان الموجودة عند أطراف الدوّار، كما في **الشكل 5-27**.
2. ضع المغناطيس مكان الوزن المُزال، ألصقه جيدًا. مع أن المغناطيس سيلتصق نتيجة لقوة التجاذب، فربّما أفلت أثناء الدوران.
3. استخدم الورق الزجاجي (السنفرة) لإزالة المادة العازلة (الورنيش) الموجودة على السلك النحاسي، لكي يظهر الجزء الموصِّل منه.
4. اصنع ملفًّا عن طريق الأسلاك الكهربائية، حيث يكون الملف رفيعًا، ثم ألصقه بالطاولة. حاول أن يكون الملف مسطّحًا قدر الإمكان.
5. صِل طرفي الملف براسم الذبذبات، عن طريق استخدام الأسلاك الكهربائية المزوَّدة بملاقط تمساح. ثم شغّل راسم الذبذبات.
6. اغزل 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 بين أقصى قيمة موجبة وأقصى قيمة سالبة في كل دورة من دورات الملف. يُمثَّل شكل الجهد المتردِّد والتيار المتردِّد على شكل موجة جيبية. يوضح **الشكل 28-5** شكل الموجة الجيبيّة للجهد المتردِّد المستخدم في قَطر.



الشكل 28-5 تغيُّر 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 = 20ms.
2. التردُّد f هو مقلوب الزمن الدوري، أي عدد الدورات في الثانية الواحدة.
وحدة قياس التردُّد هي الهيرتز 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

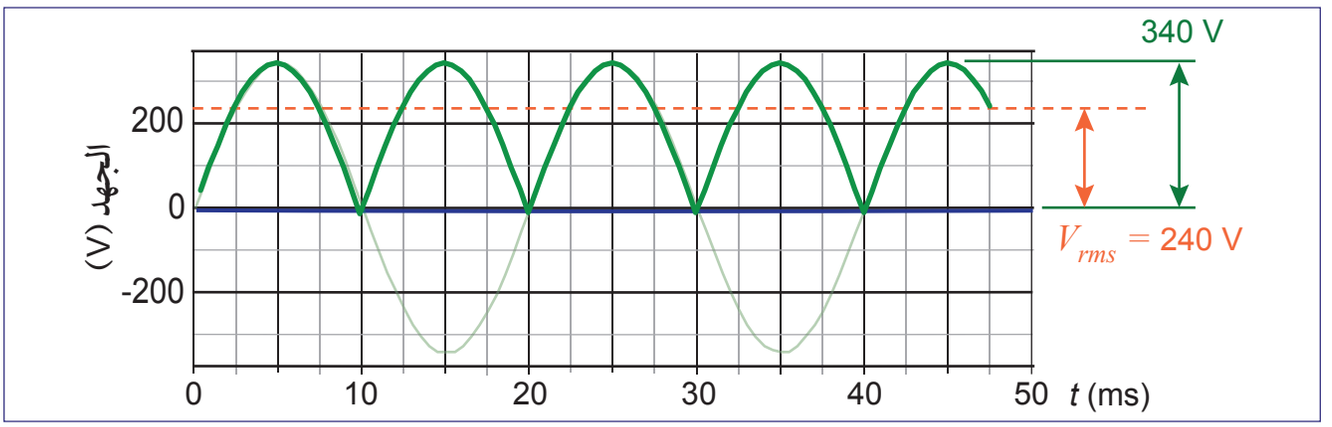
الحل:

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

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

القيمة الفعّالة للجهد (RMS)

يمكن وصف جهد البطارية برقم واحد، 1.5V على سبيل المثال. هل يمكنك أن تعبّر عن جهد متردّد برقم واحد؟ الجهد المتردّد 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 المتردّد.

بالنظر إلى أن الأجزاء الموجبة والسالبة للجهد المتردّد متناظرة، يكون متوسط الجهد لدورة واحدة مساويًا للصفر. ولحساب متوسّط الجهد المفيد، نقوم بتربيع قيم الجهد حتى تصبح كلها موجبة؛ ثم نحسب متوسّط هذه القيم المربّعة والموجبة، ثم نحسب جذرها التربيعي. يُسمّى الناتج القيمة الفعّالة للجهد V_{rms} أو $V_{\text{الفعالة}}$. يمثِّل **الشكل 5-29**، القيمة الفعّالة للجهد وهي تساوي 240V، وتكون أقلّ من القيمة العظمى للجهد التي تبلغ 340V. ونحن نستخدم القيمة الفعّالة، وليس القيمة القصوى، للتعبيرعن الجهد المتردّد.

يمكن حساب القيمة الفعالة للجهد، بقسمة القيمة العظمى للجهد على الجذر التربيعي للعدد 2. نستنبط من **المعادلة 5-4** العلاقة بين القيمة العظمى للجهد (V_o) والقيمة الفعّالة للجهد($V_{\text{فعالة}}$).

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

مثال 8

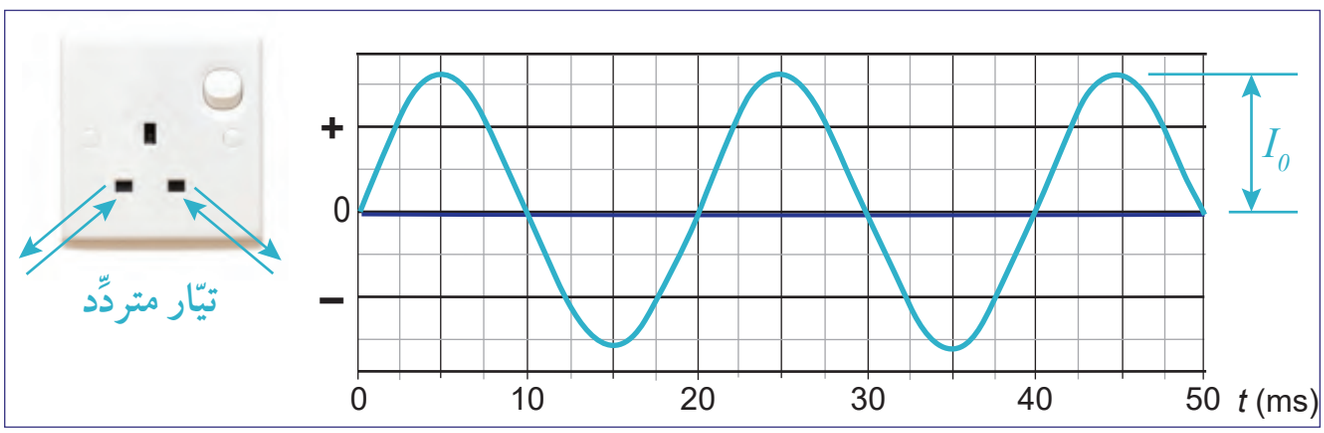
احسب القيمة العظمى لجهد قيمته الفعالة 120V.

الحل:

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

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 نفسه 50 مرة في الثانية. (**الشكل 5-30**).



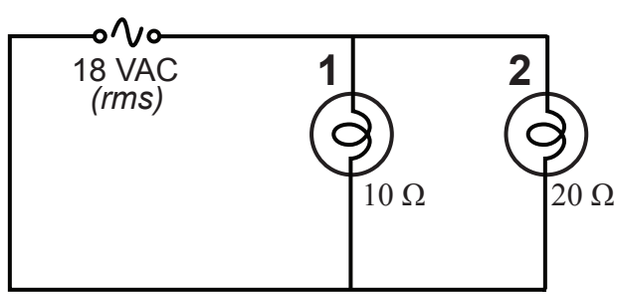
الشكل 5-30 التيار المتردِّد في قطر.

1. تردُّد التيّار المتردِّد يساوي تردُّد الجهد المتردِّد الصادر عنه.

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.

الحل:

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

$$I_1 = \frac{V}{R_1} = \frac{25.5\ \text{V}}{10\ \Omega} = \boxed{2.55\ \text{A}} \qquad I_2 = \frac{V}{R_2} = \frac{25.5\ \text{V}}{20\ \Omega} = \boxed{1.28\ \text{A}}$$

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

القدرة في دوائر التيار المتردِّد

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

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

تُطبَّق المعادلة 5-5 في الدوائر التي تحتوي على مقاومات فحسب، أو أجهزة تشتمل على مقاومات فحسب، 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

مولِّد كهربائي متردِّد صغير قيمة جهده العظمى V_o = 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}، متوسّط القدرة P_{av}.

المُعطى: $R = 10\Omega$ ؛ $V_o = 314$ V

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

الحل:

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

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

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

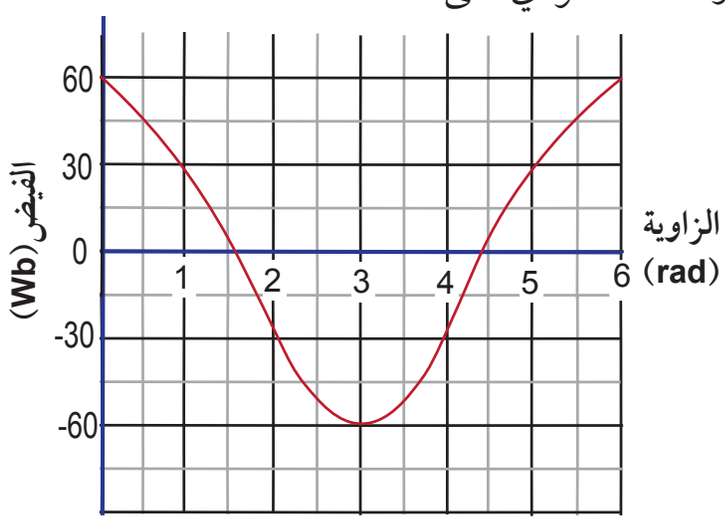
تقويم الدرس 5-2

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.

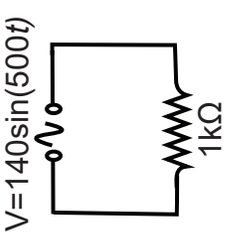


a. أنشىء رسمًا بيانيًّا يوضح تغيُّر القوة الدافعة الكهربائية الحثّية بالنسبة إلى الزاوية.

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 المفقودة.

d. متوسِّط القدرة المفقودة.

الدرس 5-3
المحوِّلات الكهربائية

جعلت المُحوِّلات نقل الكهرباء يجري بفاعلية فائقة. وقبل المحوِّلات، كانت الأنظمة المبكرة 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. كان أورستد عالمًا ومتحدّثًا شعبيًا معروفًا. وقد 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.

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

الشكل 5-31 محول جهد عالي للتيار المتردِّد.

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

المحوّل الكهربائي	Transformer
الحث المتبادل	Mutual induction
المحوّل الرافع للجهد	Step up transformer
المحوّل الخافض للجهد	Step-down transformer

نقل الطاقة الكهربائية

تُشاد محطّات توليد الكهرباء في العادة بعيدًا عن المنازل التي يستخدم الناس فيها الطاقة الكهربائية. تمتلك الأسلاك الكهربائية مقاومة منخفضة جدًا؛ لكنها ليست صفرًا. يتدفق التيار الكهربائي عبر خطوط التوصيل، فتتبدّد بعض الطاقة كحرارة نتيجة لمقاومة أسلاك خطوط النقل. 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 منازلنا؟

7-5	القدرة المفقودة		
	$P_{\text{مبدّدة}} = I^2R$	$P_{\text{مبدّدة}}$	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	$\frac{P_{\text{مبدّدة}}}{240kW}$	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 معادلة القدرة الكهربائية أن القدرة الكهربائية التي يحملها تيار 1000 A وجهد 240 V هي نفسها التي يحملها تيار 100 A وجهد 2400 V.

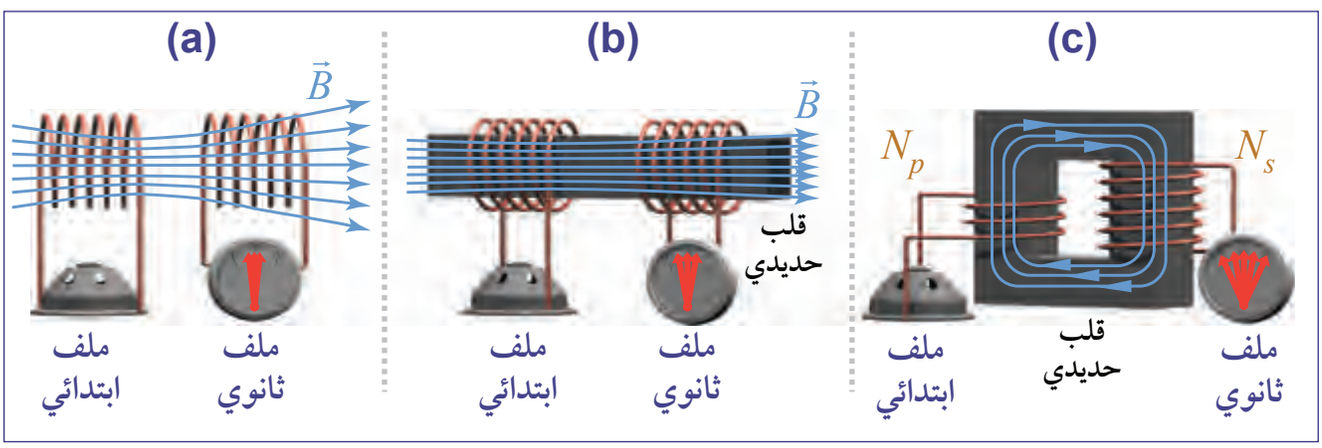
$$P_1 = V_{rms}\, I_{rms} = (240\ V)(1000\ A) = 240{,}000\ W$$
$$P_2 = V_{rms}\, I_{rms} = (2{,}400\ V)(100\ A) = 240{,}000\ W$$

يكون فقد القدرة في خط 240 V مقداره 100 kW كما هو مبيّن في الجدول 1.5، أي بنسبة (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. لذلك يتمتّع استخدام خطوط نقل ذات جهد عال بميزة كبيرة. 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 إليها 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، مع انعدام فقد القدرة الكهربائية الناتجة. تُستخدم مُحوِّلات كهربائية عديدة لتغيير 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).

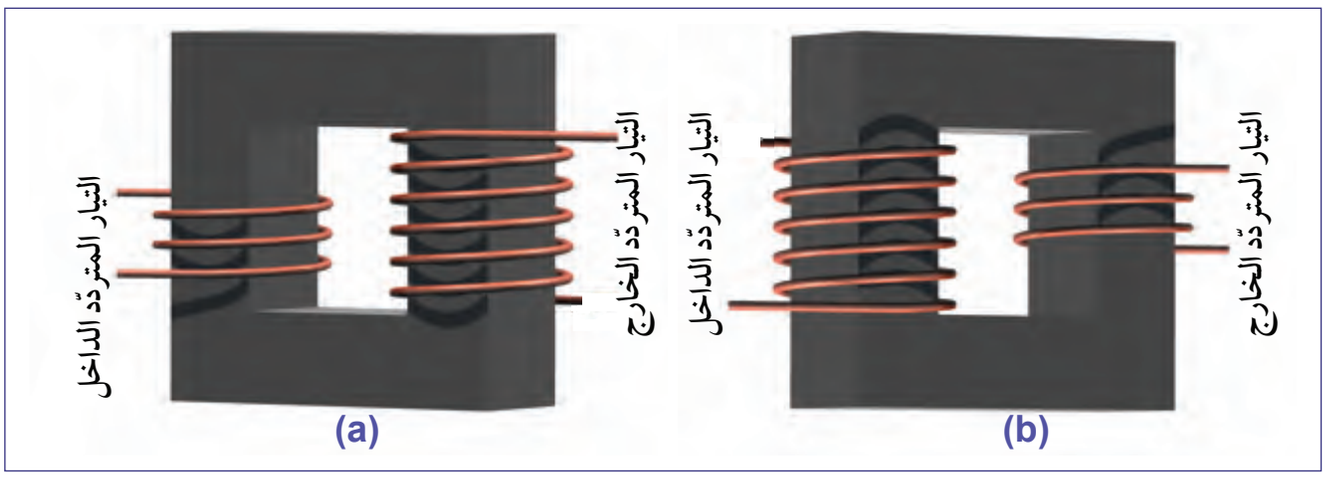
b. أُجريَ تحسين باستخدام قلب حديدي بين الملفين، حيث يتصف الحديد بأنه مادة مغناطيسية تركِّز المجال المغناطيسي وتضخّمه. وبناء على ذلك، أصبح كل الفيض الناتج من الملف الابتدائي تقريبًا يدخل الملف الثانوي من خلال القلب الحديدي.

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 وتضخيمها. يرتبط فرق الجهد في كل من الملفَّين الابتدائي والثانوي، وعدد اللفات في كل منهما، بالمعادلة 5-8.

8-5	فرق جهد المحوِّل 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

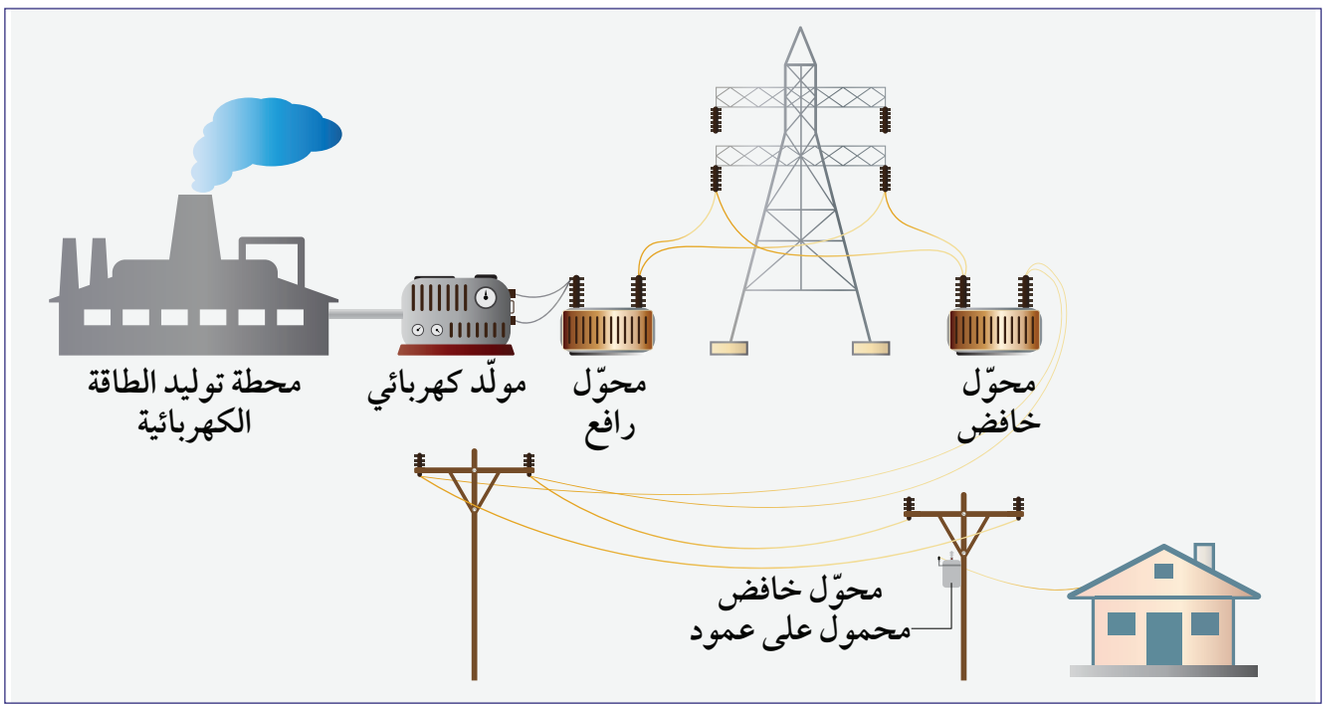
المُحوِّلات الكهربائية الرافعة للجهد والمُحوِّلات الخافضة للجهد

هناك نوعان من المُحوِّلات الكهربائية، هما: **المحوِّل الرافع للجهد Step-up transformer** وعدد لفّاته في 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 الابتدائي أكبر من عددها في ملفّه الثانوي؛ وبالتالي فإن فرق الجهد في ملفّه الابتدائي أكبر مقارنة بفرق الجهد في ملفّه الثانوي (**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 المُحوِّل الرافع لزيادة فرق الجهد إلى 240,000V من أجل نقله. ويُستخدَم المُحوِّل الخافض لتقليل فرق الجهد إلى 2,400V في محطة الحيّ الفرعية. 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**.

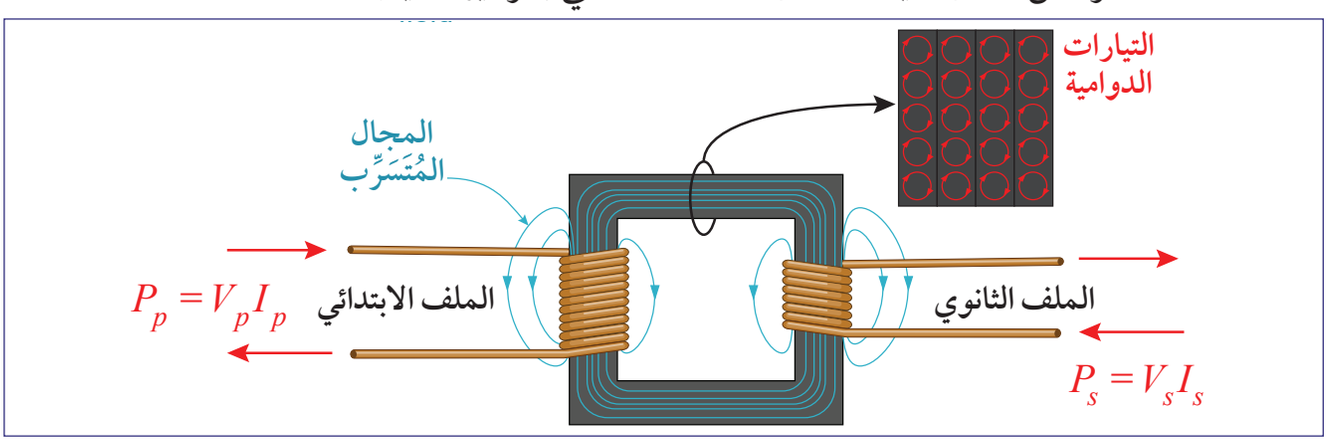


الشكل 5-34 استخدام أنواع مختلفة من المُحوِّلات لتوصيل القدرة الكهربائية إلى المنازل.

كفاءة نقل الطاقة

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 وتكوين قدرة في الملف الثانوي أقل منها في الملف الابتدائي (المعادلة 5-9)

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



الشكل 5-35 بعض عوامل خفض كفاءة المحوّل.

9-5	كفاءة المحوّل		
	$\eta = \frac{P_s}{P_p}$	η	الكفاءة (0-100%)
		P_p	القدرة في الملف الابتدائي (W)
		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 حول طرفي الملف الابتدائي حيث شدّة التيار 100 A. ما قيمة فرق الجهد وشدة التيار في الملف الثانوي؟

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:
$$P_s = \eta P_i = (0.90)(192{,}000\text{w}) = 172{,}800\ \text{w}$$

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 240 V = V_{rms} 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_{rms})في ملفّه الابتدائي 0.25 mA، فما القيمة الفعّالة لشدة التيار في الملف الثانوي.

المطلوب: **a.** عدد لفّات الملف الثانوي.

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

المعطى:

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

العلاقات:

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

$$\overline{P} = V_{rms} I_{rms}$$

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

الحل:

a. لحساب عدد اللفات في الملف الثانوي يجب أولًا حساب القيمة الفعالة لفرق الجهد في الملف الثانوي. $V_{rms} = \frac{5}{\sqrt{2}} = 3.5\text{V}$

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. $\overline{P}_p = (240)\left(0.25\times10^{-3}\right) = 60\times10^{-3}\,\text{W}$

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

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

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

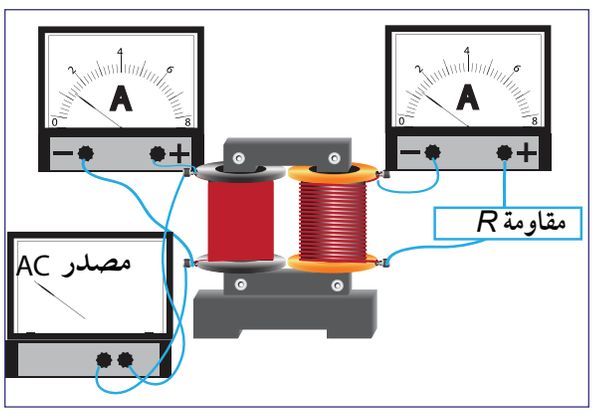
وهكذا تكون القيمة الفعّالة للتيّار في الملف الثانوي I_{rms} = 13.7 mA

نشاط عملي

3-5 المحوِّل الرافع للجهد والمحوِّل الخافض للجهد

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

خطوات التجربة



الشكل 5-36 قلب حديدي وملفات قابلة للتركيب.

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.
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 بوساطة ضبط 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 المحوّل محوِّل مثالي؟ (هل كفاءته 100%؟) إذا كان الجواب لا، احسب كفاءته.

تقويم الدرس 5-3

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. ماهر لديه روبوت يحتاج إلى فرق جهد 30 V. يقوم ماهر بصناعة محوِّل يشتمل على 1,200 لفّة في ملفّه الابتدائي الذي يتغذّى بفرق جهد 240 V. كم لفة يحتاج ماهر 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 لتيّار متردِّد، ويوصَّل الملف الثانوي بمصباح يعمل على جهد 12 V وقدرته 36 W. فإذا كان هناك 4,000 لفّة على الملف الابتدائي، و 200 لفّة على الملف الثانوي. احسب:

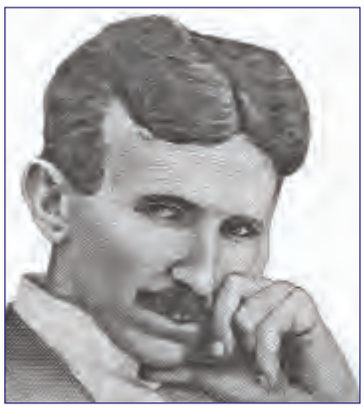
a. جهد المصدر.

b. القدرة الناتجة من المصدر، إذا كانت كفاءة المحوِّل 100 %.

c. التيار في الملف الابتدائي.

ضوء على العلماء

نيكولا تسلا (1856-1943)

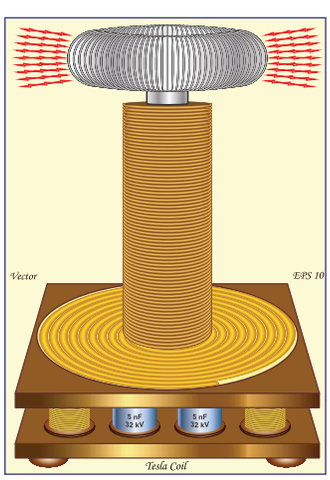


الشكل 5-37 نيكولا تسلا.

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 أن يكتبها. 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 بين العامين 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 المحَسنة، 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، باستخدام الحث الكهروستاتيكي أيضًا؛ لكنه لم يتمكَّن من تحويله إلى منتج تجاري ناجح. وعمومًا يُعتقد أن نيكولا تسلا كان لديه ما يقارب 300 براءة اختراع لاختراعاته. 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** هو ظاهرة تولد تيار كهربائي حثي في موصل عند تغير الفيض المغناطيسي الذي يقطعه الموصل بالنسبة للزمن.
- **التيار الكهربائي الحثّي** هو التيار الذي يتولد في الموصِّلات، نتيجة لتغيُّر الفيض المغناطيسي.
- **الفيض المغناطيسي** هو شدة المجال المغناطيسي خلال مساحة ما.
- **الوِيبر**، Wb هو وحدة الفيض المغناطيسي 1 Wb يساوي $1Tm^2$.
- **قانون فارادي للحث** ينّص على أن لقوة 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 التيارات الدوّامية في الموصلات التي تختلف 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.
- **الجهد المتردِّد** هو الجهد الذي يتغيَّر اتجاهه وقيمته مع الزمن.
- **التيّار المستمر** هو التيّار الذي يتدفَّق في اتجاه واحد فقط، وله مقدار ثابت.
- **التيّار المتردد** هو التيّار الذي يتغيّر اتجاهه وقيمته مع الزمن.
- **دوائر التيّار المتردِّد** هي الدوائر التي يمر فيها التيار المتردِّد.
- **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

مراجعة الوحدة

اختيار من مُتعدّد

1. أي التيارات التي تتدفَّق في دوائر داخل قرص؟

a. التيارات الدّوامية.
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. جزء من قلب حديدي لُف بثلاثة أسلاك دائرية، بينما لُف جزء آخر من القلب الحديدي نفسه بملف من ستة أسلاك دائرية. مرّرنا تيارًا كهربائيًّا في الملف الأول مع مصباح كهربائي. أضيفُ 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.

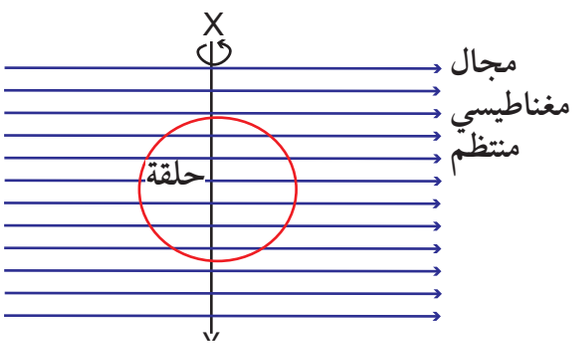
5. ما قيمة الفيض المغناطيسي عندما يكون المجال المغناطيسي موازيًا لسطح الملف؟

a. صفر
b. BA
c. $BA\cos\theta$
d. غير متناهٍ.

6. مصباح كهربائي قدرته 60 W صُمِّم ليعمل تحت 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. لفّة معدنية تدور حول محور رأسي في مجال مغناطيسي منتظم. عندما تصبح اللفّة موازية لاتجاه المجال المغناطيسي كما في الصورة، فأي من العبارات عن الفيض والتيّار الحثّي تكون صحيحة؟



	شدة التيار الحثّي في اللّفة	التدفُّق الكلّي في اللفّة
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 (ق.د.ك) الناتجة؟

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

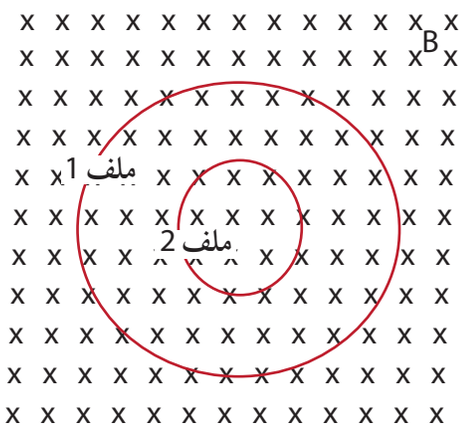
9. جرى توصيل مصدر للتيار المتردِّد بمقاومة R . إذا ضاعفنا الجهد الفعّال الخارج من المصدر، فكم يكون معامل ازدياد القدرة المفقودة في المقاومة؟

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:



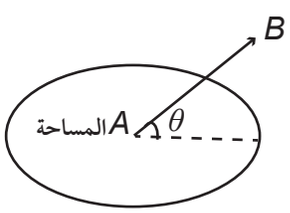
a. الجهد الحثّي هو نفسه في الملفَّين.

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. BAcosθ

c. BAsinθ

d. BAtanθ

الدرس 5-1: الحث الكهرومغناطيسي

13. يحرِّك علي 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.

زميله أحمد في المختبر، يقيس القيمة القصوى للتيار الذي يمر في الملف.

a. ما قيمة التيار الذي يقيسه أحمد؟

b. سمِّ شيئًا يمكن لعلي أن يفعله ليغيّر قيمة التيار.

14. مجال مغناطيسي يشير إلى أسفل طاولة وتتناقص شدّته. اذكر 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 يتدفّق التيار الحثّي باتّجاه دوران عقارب الساعة أم عكسه؟

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

a. تكون اللفّة متعامدة مع خطوط المجال المغناطيسي.

b. تكون اللفّة موازية لخطوط المجال المغناطيسي.

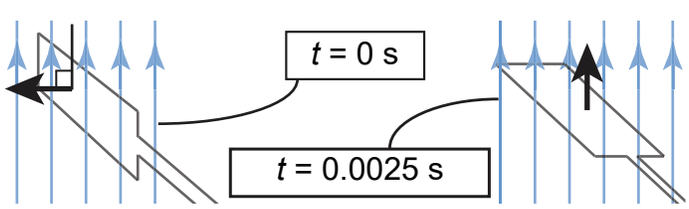
c. تميل اللفّة بزاوية 60° مع خطوط المجال.

17. تتَّجه خطوط مجال مغناطيسي من أرض الغرفة إلى السقف في جميع أنحاء الغرفة. هناك سلك من ثلاث لفات: A و B و C. اللفة A موضوعة على الطاولة، وB عمودية على مستوى الطاولة، و C تميل بزاوية 45° مع الطاولة.

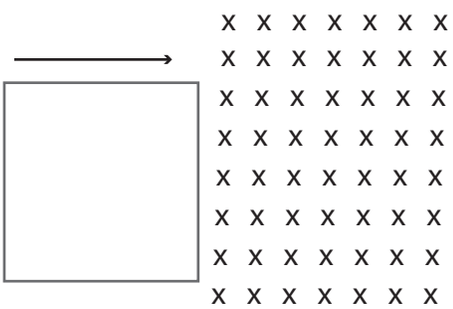
a. عدِّد اللفّات مرتَّبة وفق الفيض المغناطيسي المار بها من الأصغر إلى الأكبر.

b. في أي من اللفّات، إن وُجدت، يتولّد التيار الكهربائي الحثّي؟

18. يتشكّل 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.

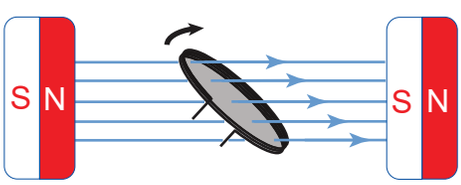
20. سمع هاشم أنك تستطيع توليد الكهرباء بغزل حَبلٍ كحبلِ القفز. افترض أنك تستطيع تدوير لفّة حول نفسها مرة واحدة في الثانية في المجال المغناطيسي للأرض $B = 3\times10^{-5}T$ قرب خط الاستواء.

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

b. إذا تغيَّر الفيض من صفر الى هذه القيمة القصوى في ربع ثانية ($\Delta t=0.25s$)، 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، وأنك لا تستطيع تعديل خصائص المولِّد نفسه.

أذكر ثلاث طرق لزيادة الجهد الناتج.

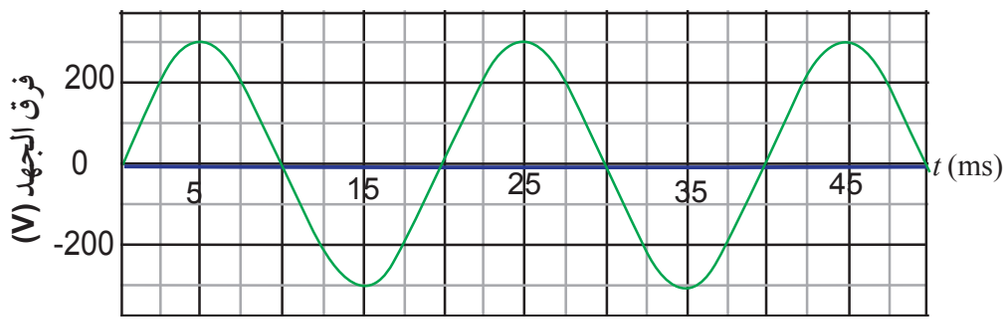
22. القيمة الفعّالة للجهد الناتج من مولِّد تبلغ 240 V. الملف مربّع الشكل طول ضلعه 30 cm وعدد لفّاته 200 لفة من الأسلاك، وهو يدور بسرعة 55 دورة في الثانية. احسب شدّة المجال المغناطيسي الذي وُضع فيه الملف.

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

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

a. ما قيمة الجهد الفعّال؟

b. إذا كان متوسِّط القدرة المفقودة في الآلة 17 kW، احسب القيمة القصوى للتيّار المار فيها.



25. 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 المفقودة في المصباح؟

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

الدرس 5-3: المُحوِّلات الكهربائية

26. 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؟

27. يصنع طالب محوّله بِلَفّ 10 دوائر سلك حول أحد طرفَيْ ساق حديدية و20 دائرة 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؟

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

تقويم الوحدة

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

30. 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 بناءً على عدم كفاءة المحوّل؟

31. 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%.

32. 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 ؟

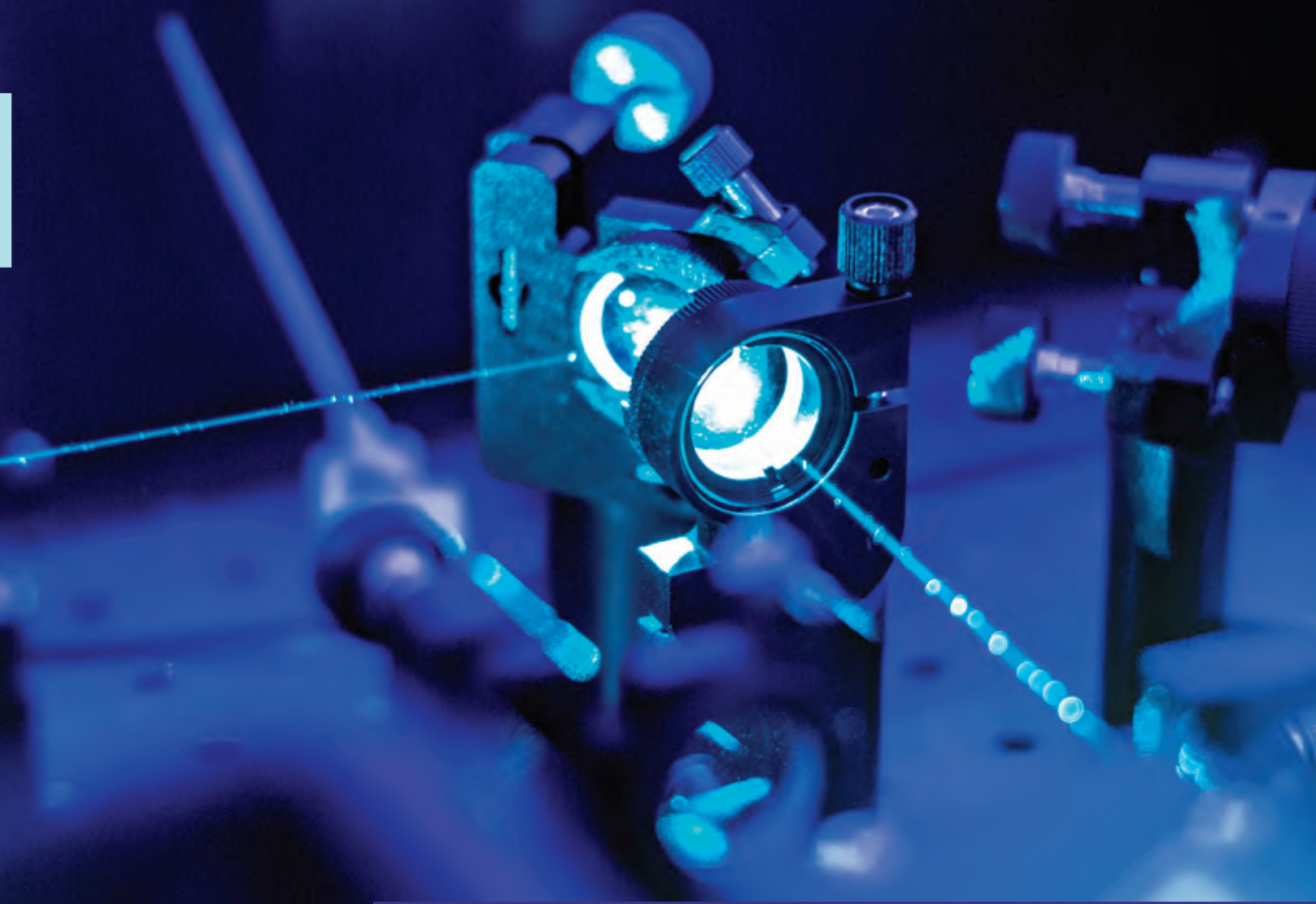
الاستقصاء والبحث

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 كهنغاريا وإنكلترا، 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 P1117
الدرس 6-2: التداخل في الضوء P1118
الدرس 6-3: الأشعة الكهرومغناطيسية P1119
الدرس 6-4: الموجات الموقوفة 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 مُحبطًا 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.

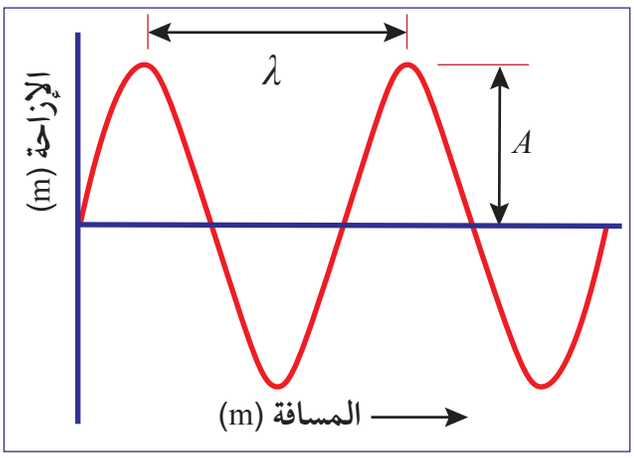
P1117.2 يناقش شروط الحصول على تداخُل ملحوظ للموجات، ويربط التداخُل البناء والهدام بفرق الطور.

المفردات

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

خصائص الموجات

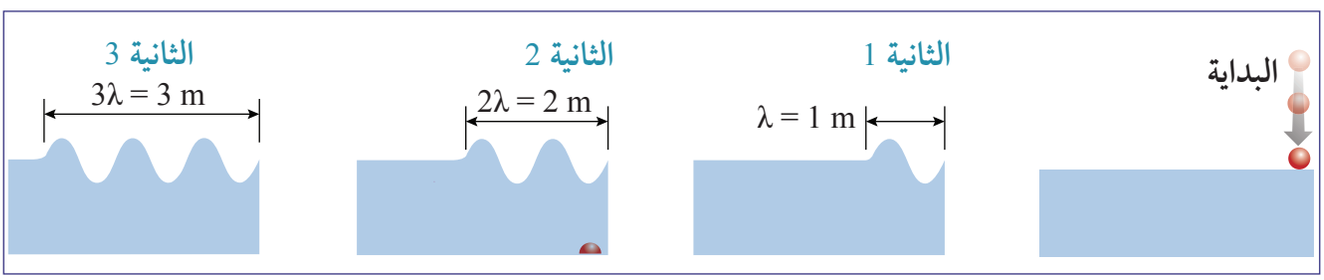
تنتج الموجة من اهتزاز ينتقل في وسط ما، ولها خصائص معيَّنة كالطول الموجي والتردُّد والسعة. الطول الموجي λ هو المسافة التي تقطعها الموجة المنتقلة خلال دورة كاملة، والسعة A هي أقصى إزاحة للاهتزاز، (**الشكل 6-2**). أما التردُّد f فهو عدد الاهتزازات في وحدة الزمن، ووحدة قياسها الهرتز Hz، وهي عدد الاهتزازات خلال ثانية واحدة.



الشكل 6-2 سرعة الموجة.

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 أصغر. وكذلك عند ثبات التردُّد، تملك الموجة التي لها سعة أعلى، طاقة أكبر.

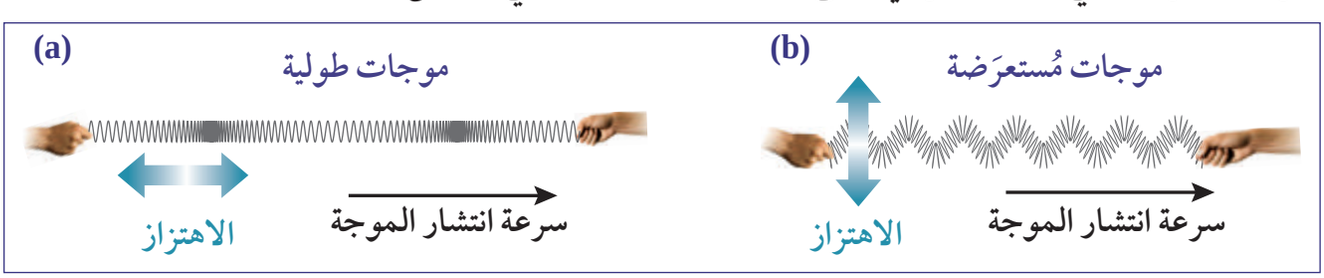
سرعة الموجة v هي حاصل ضرب التردُّد في الطول الموجي (**المعادلة 6-1**). فالموجة ذات التردد 1 Hz والتي تنتشر في وسط معيّن بسرعة 1 m/s يكون طولها الموجي 1 m. ويبيّن **الشكل 6-3** حركة موجية طولها 1 m وسرعتها 1 m/s.



الشكل 6-3 سرعة الموجة.

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

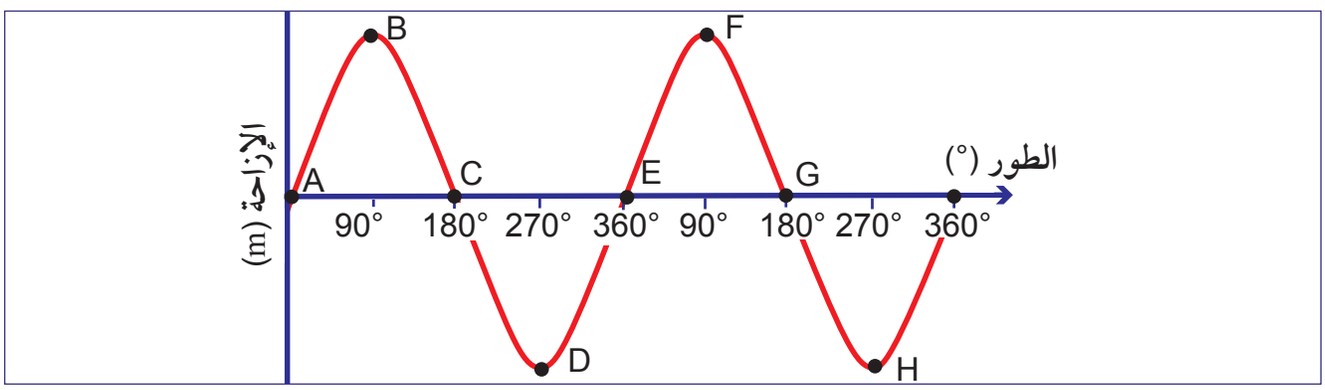
تُقسَّم الموجات وفق اتِّجاه اهتزازِها، إلى قسمين: موجات طولية كالموجات الصوتية، تهتز جزيئات الوسط في اتّجاه انتشارها كما في **الشكل 6-4 (a)**، وموجات مُستعرَضة كالموجات المائية، عندما تهتز جزيئات الوسط في اتّجاه عمودي على اتّجاه انتشارها، كما في **الشكل 6-4 (b)**.



الشكل 6-4 الموجات الطولية والموجات المُستعرَضة.

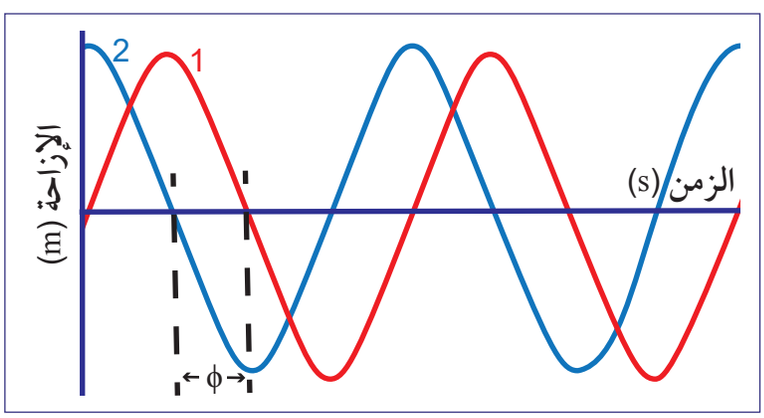
طور الموجة

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 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



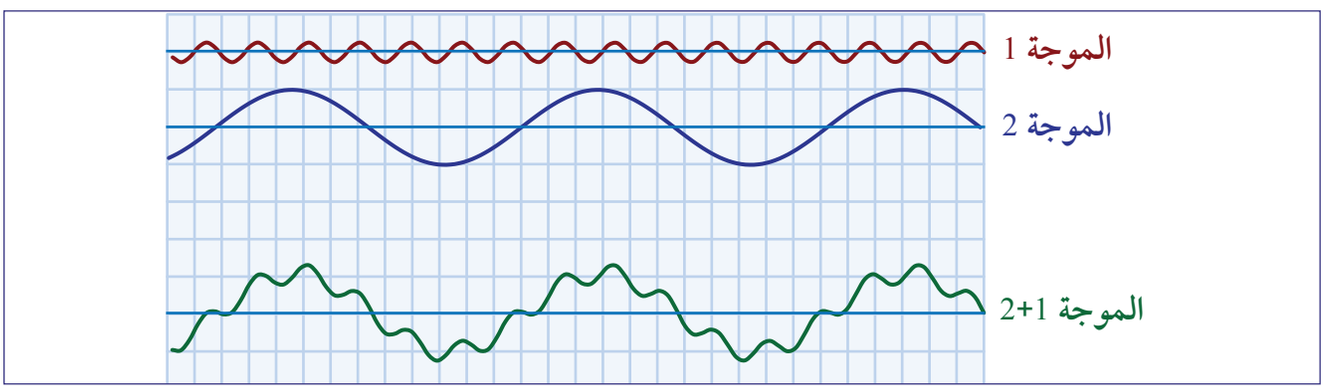
الشكل 6-6 فرق الطور بين موجتين.

افترض أن موجتين متماثلتين، من حيث الطول الموجي والتردُّد والسعة، تنطلقان في لحظتين زمنيتين مختلفتين. نقول عندئذ إن هناك فرقًا في **الطور Phase difference** بين الموجتين. يمكن قياس فرق الطور بالدرجات أو بالراديان. يمثِّل **الشكل 6-6** فرق الطور بين موجتين لهما نفس التردُّد والسعة والطول الموجي. 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 إحدى الموجتين تتقدم على الأخرى بمقدار $\frac{\pi}{2}$ rad أو 90°. ومن هنا نقول إن فرق الطور بينهما 90°.

مبدأ التراكُب

إذا أسقطنا حجر صغير في بركة ماء، تنشئ اهتزازات صغيرة أو موجات حولها. 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.

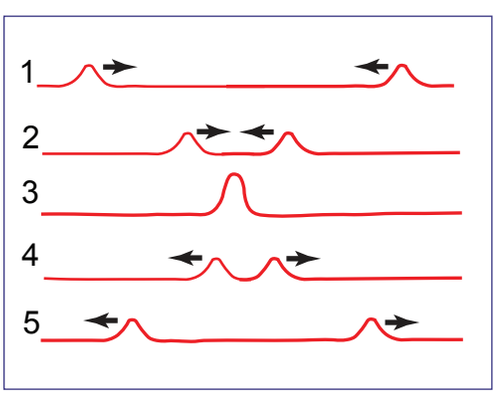


الشكل 6-7 تراكُب موجتين.

التداخُل المؤقَّت للموجات

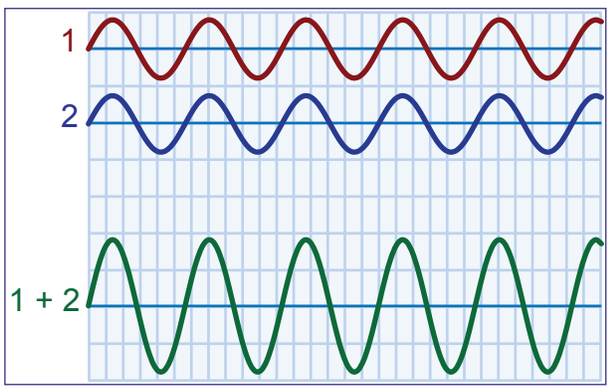
عندما تسير موجتان إحداهما نحو الأخرى، فإنهما تتداخلان وتنشئان اضطرابًا كبيرًا.

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.

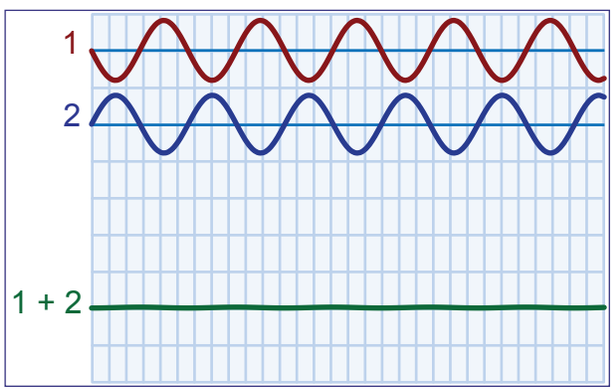
التداخُل البنّاء



الشكل 6-9 تداخُل بنّاء.

يؤدّي وجود موجة أو أكثر لها التردُّد نفسه في نقطة واحدة إلى موجة محصِّلة تكون سعتها أكبر أو أصغر من الموجات المُتداخلة. إذا كان لتلك الموجات 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 ضعفي سعة إحدى الموجتين، في حين يبقى تردُّدها وطولها الموجي كأيٍّ من الموجتين.

التداخُل الهدّام

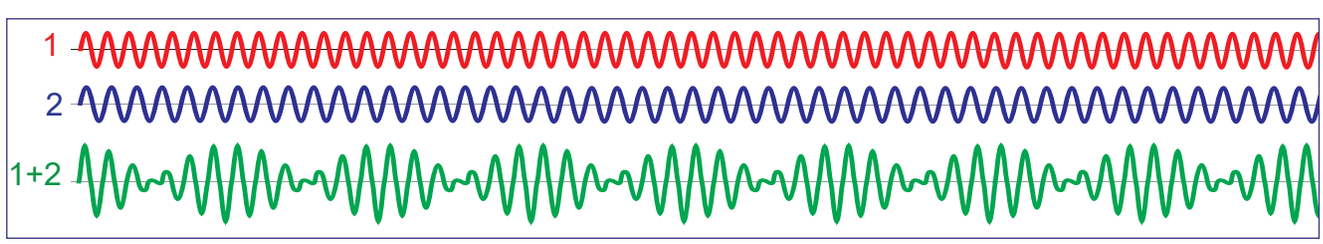


الشكل 6-10 تداخُل هدّام.

ليست كل التداخُلات بنّاءة. فإذا كان الفرق في الطور بين موجتين، لهما نفس التردّد والسِّعة متداخلتين عند نقطة معيّنة، 180° (π rad)، تلتقي قمة إحداهما مع قاع الأخرى، ويكون **التداخُل هدَّامًا Destructive interference**. يوضح **الشكل 6-10** 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.

الضربات

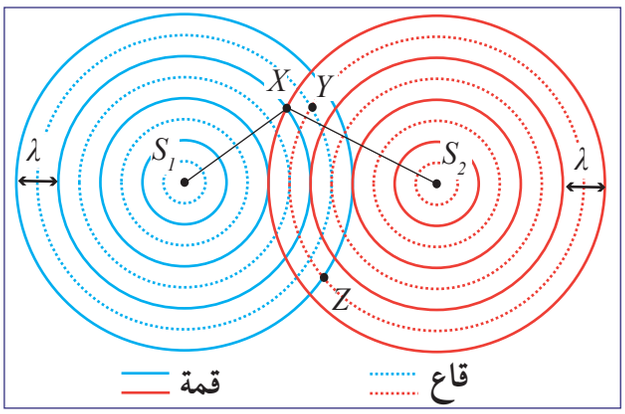
في كثير من الحالات، يحدث تراكُب بين موجتين ليس لهما التردُّد نفسه **الشكل 6-11**. عند جمع موجتين صوتيتين بتردُّدين مختلفَيْن قليلًا، تكون المحصِّلة عبارة عن تراكباتٍ بنّاءة وهدّامة بشكل منتظم ومتوالٍ، ينتج منها صوت نابض ومزعج بعض الشيء يُسمّى بالضربات.



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).

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

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.

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:

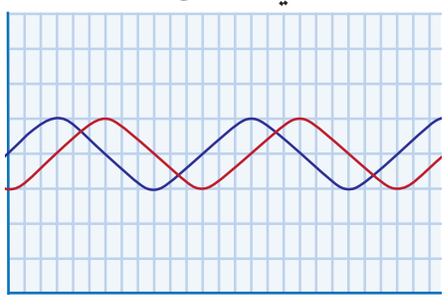
$$\Delta l = \left| 4\lambda - 3\frac{1}{2}\lambda \right| = \frac{1}{2}\lambda$$

التداخُل البنّاء يحدث عند نقطة يكون فرق المسار فيها يساوي $n\lambda$، حيث n عدد صحيح.

التداخُل الهدّام يحدث عند نقطة يكون فرق المسار فيها يساوي أعدادًا فردية من نصف الطول الموجي.

مثال 1

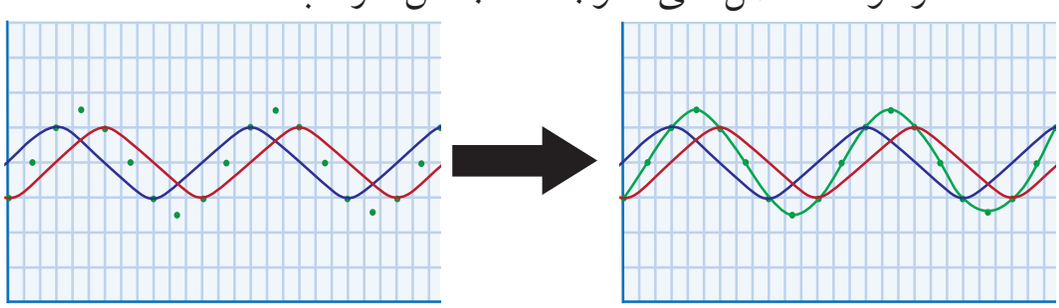
ارسم نموذج التراكب للموجتين الموضحتين في الشكل.



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 2

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 ،

المُعطى: 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 $\Delta l = n\ \lambda$ ؛ $n = 1.5$ ؛ $\lambda = 2\ m \Rightarrow \Delta l = 3\ m$

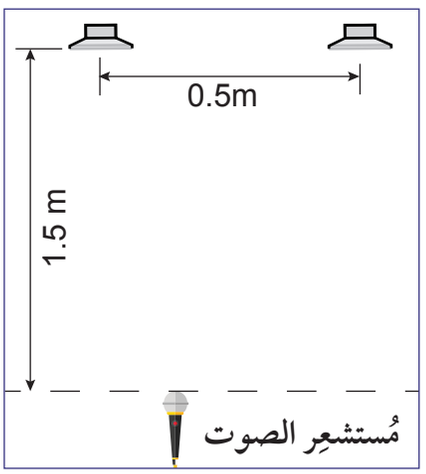
وهو مضاعف فردي لنصف الطول الموجي، لذلك يكون التداخُل هدّامًا.

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



الشكل 6-13 قياس تداخُل الصوت.

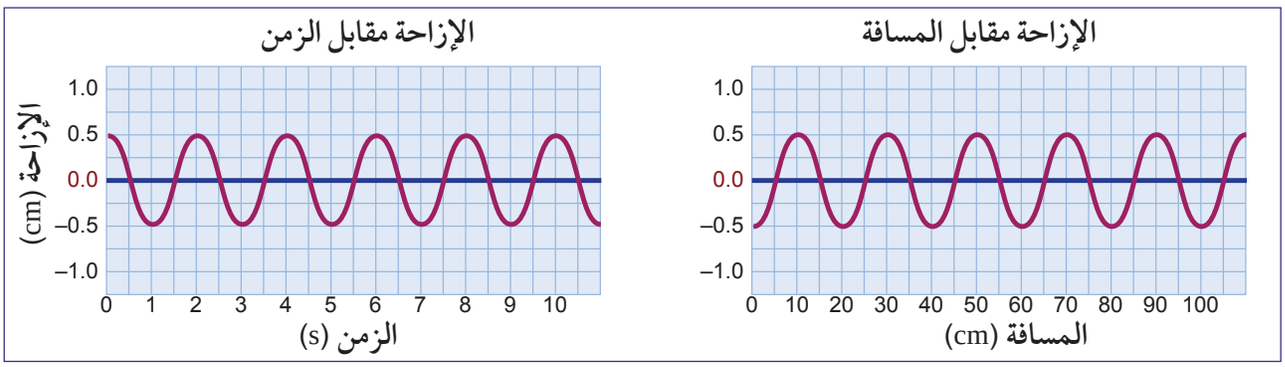
1. سيقوم معلِّمك بتجهيز الغرفة بمكبِّري صوت ومولِّد إشارة.
2. قم بتجهيز نظام الكشف عن الصوت.
3. على خط يبعد 1.5m، تحرك ومعك جهاز مُستشعِر الصوت، حتى تحصل على أدنى مستوى للصوت.
4. سيقوم معلِّمك بإيقاف أحد مُكبِّري الصوت.
5. سيعيد معلِّمك تشغيل المكبِّر مرة أخرى. قِس فرق المسار بين هذه النقطة وكل من المكبّرين.
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 أقصى ما يمكن، ثم احسب فرق المسار لكل موقع.

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 6-1

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.

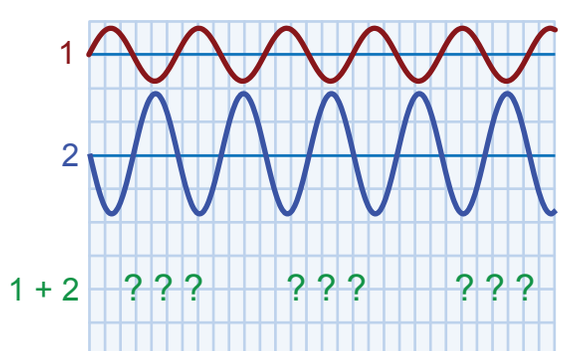
d. سرعة الموجة.

2. هل يمكن إيجاد 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، فهل تستخدم تداخُلًا بنّاء أم هدّامًا؟

4. ارسم موجتين لهما الطول الموجي نفسه والسعة نفسها لتتداخلا تداخُلًا بنّاء، وكذلك تداخُلًا هدّامًا.

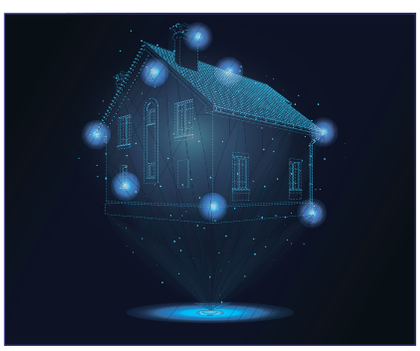
5. تتراكب الموجتان 1 و 2 الموضَّحتان في الشكل أدناه. كيف يمكن مقارنة السعة والطول الموجي وطور الموجة المحصَّلة للموجتين 1 و 2؟



الدرس 6-2
التداخُل في الضوء

أثارت الهولوجرامات (الصور المُجسَّمة) 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 صور الهولوجرام نتيجة التداخُلات البنّاءة والهدّامة التي تحدث نتيجة التقاء موجات الضوء.

تَستخدِم الصور المُجسَّمة ضوء ليزر يسقط على جسم يُسمّى نصف مرآة، وهو عبارة عن لوح زجاجي مطليّ بطبقة رقيقة من الفضّة. يسمح نصف المرآة لجُزء من ضوء الليزر بعبوره، ويسبِّب انعكاس بقية موجات الضوء، ويحرِّكها 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

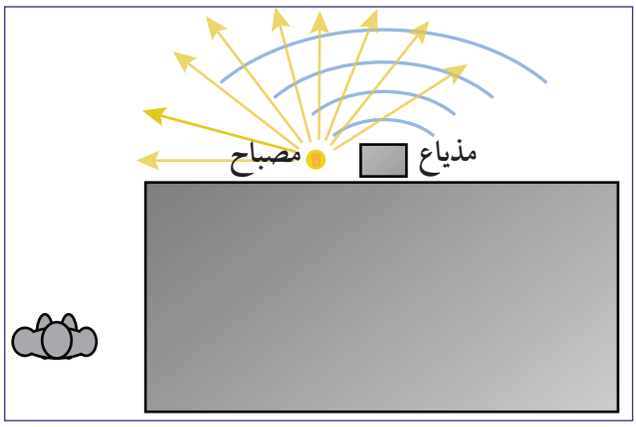
P1118.1 يعرض كيف تبين تجربة الشق المزدوج «تجربة يونج» السلوك الموجي للضوء، ويحل مسائل حسابية باستخدام المعادلة: $\lambda = dx/D$.

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 الأوّلى
Second Maximum fringe	الهدبة المُضيئة الثانية

الحيود

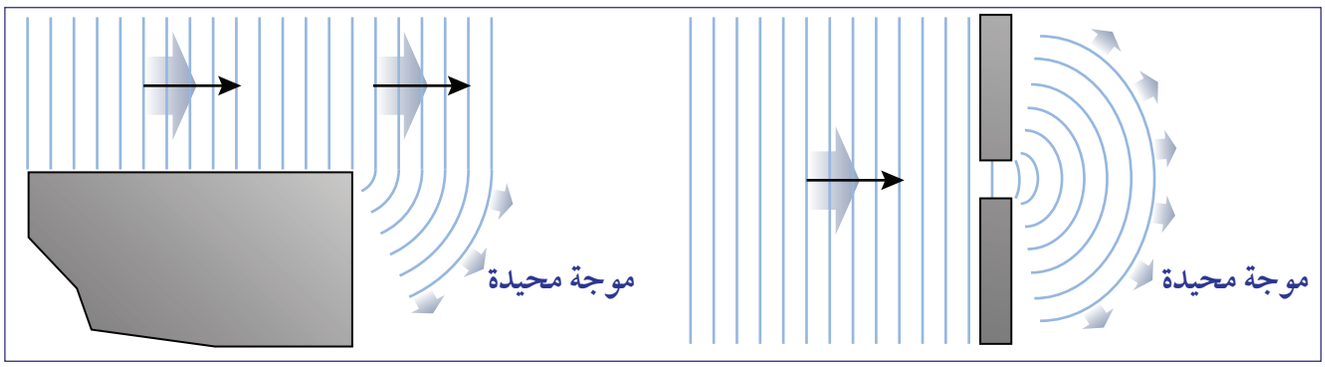


الشكل 6-15 يمكن سماع صوت المذياع، ولكن لا يمكن رؤية المصباح.

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 **الحيود Diffraction** الذي هو خاصية الموجات التي تسمح للموجة بالانحراف لدى اصطدامها بحافة أو زاوية، أو المرور من فتحة ضيّقة عرضها أقل أو يساوي الطول الموجي.

تحيد الموجات الصوتية حول الحواف، لأن الطول الموجي للموجات الصوتية يكون في حدود بضعة سنتيمترات، وهي تقارن بمقياس أبعاد الحافة. لكن الطول الموجي النموذجي 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 بها الموجة، فإنها تمر من دون تغيُّر تقريبًا.

يتناسب مقدار الحيود مع النسبة بين الطول الموجي ومقياس الجسم المسبِّب للحيود.



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. تحدث الظاهرة نفسها للموجات الضوئية، ولكن في هذه الحالة علينا النظر إلى أجسام صغيرة جدًّا أو تفاصيل دقيقة للغاية لمعرفة آثار حيود الضوء.

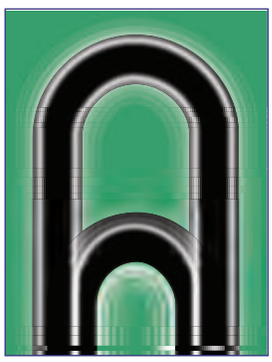
حيود الضوء

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.

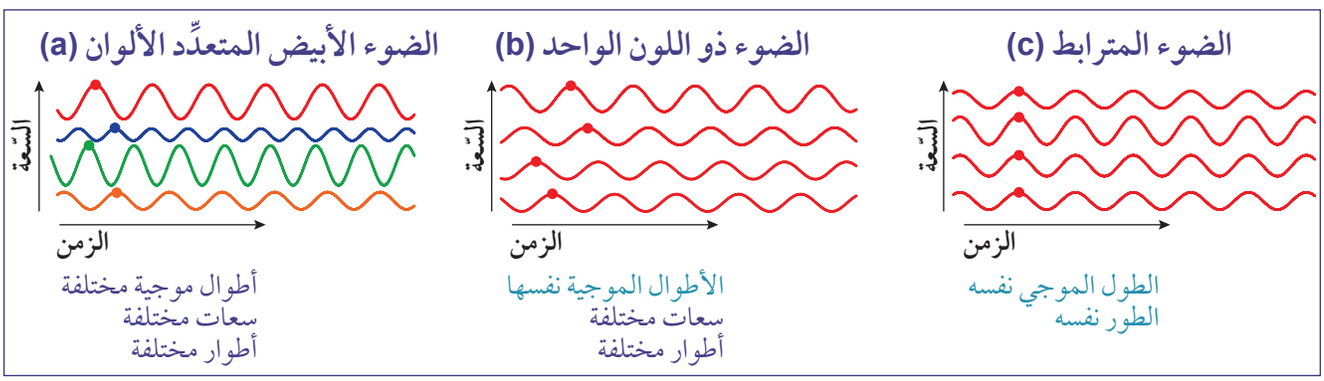
سؤال للمناقشة

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.

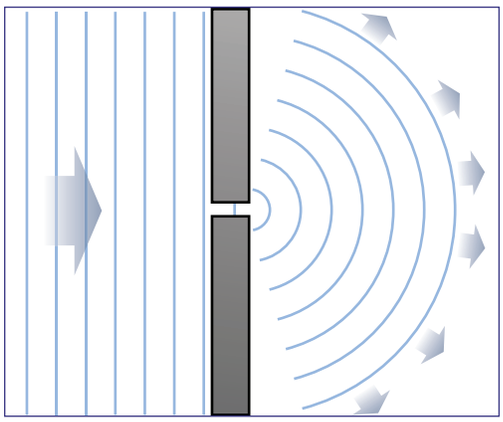


الشكل 6-18 أنواع مختلفة من الضوء.

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-a18**). 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-b18**). ويكون **الضوء مُترابطًا Coherent** عندما يكون له نفس الطول الموجي والطور (**الشكل 6-c18**)، 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.

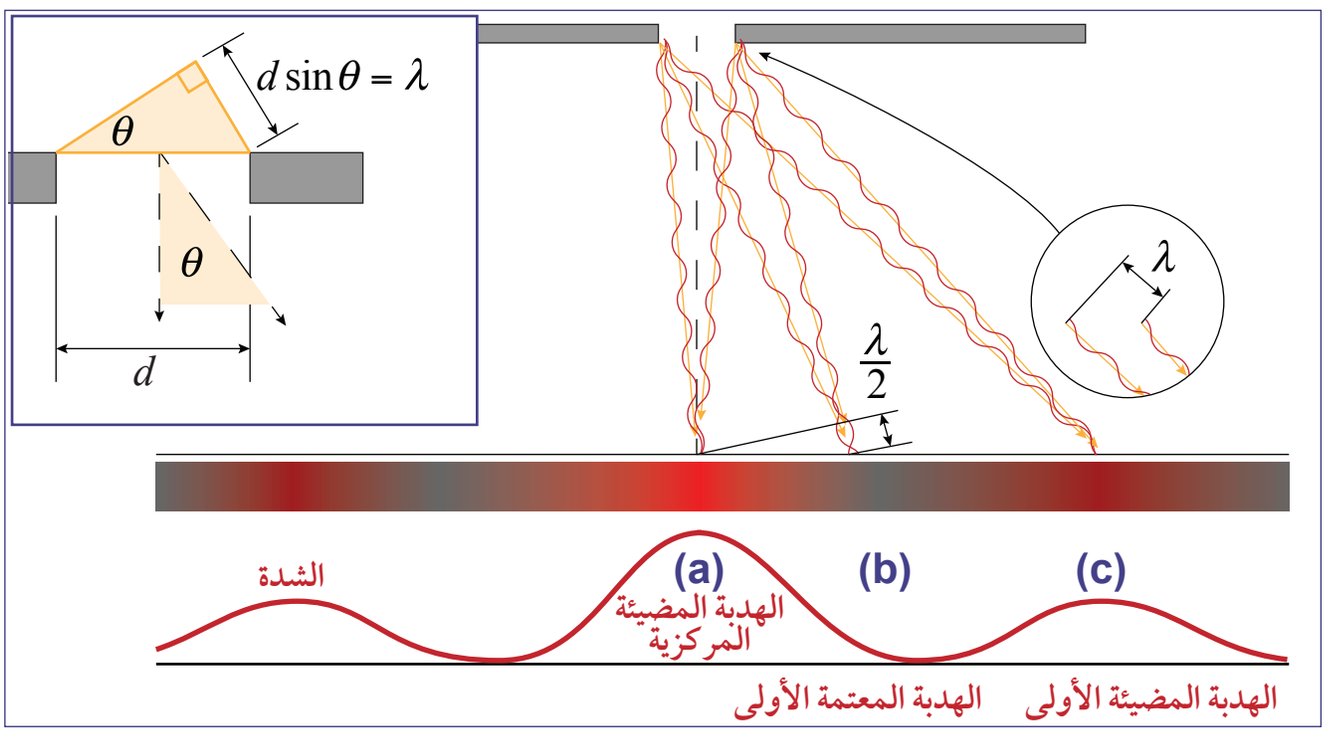
حيود الضوء عبر شقّ



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.

يشكّل الضوء المار عبر شق رفيع النموذج الموضَّح في **الشكل 6-20**. يسبِّب الهدبَ المضيئة والهدبَ المعتمة التداخُلُ الناتج من الضوء الذي يعبر الجانبين المتواجهين للشق. في **الشكل 6-20 (a)**، يتراكب الضوء الذي يمرّ مباشرة عبر الفتحة بشكلٍ بَنّاء لإنشاء بقعة مركزية مضيئة على الشاشة تُعرف بالهدبة المركزية المُضيئة.

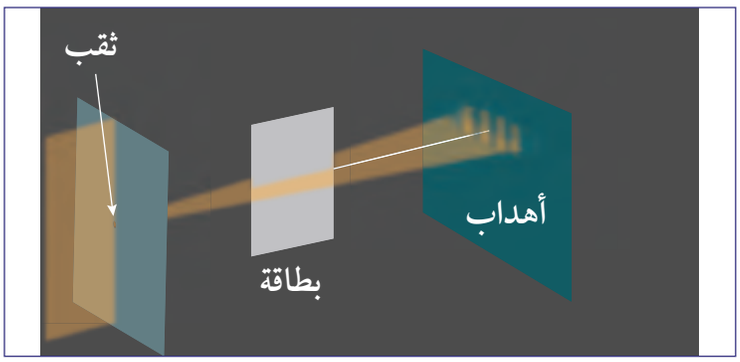


الشكل 6-20 الحيود خلال شق مفرد.

ينتقل الضوء من أجزاء الفتحة المختلفة مسافات مختلفة للوصول إلى الشاشة (**الشكل 6-20**). عندما يكون الفرق في المسار $\lambda/2$، تتداخل الموجات من الحواف المقابلة للشق بشكل هدّام. تُظهِر الشاشة منطقة مظلمة تسمّى الهدبة المعتمة الأولى **(b)**. وعندما يكون الفرق في المسافة λ، تتداخل الموجات من الحواف المقابلة للشق بشكل بنّاء. تظهر الشاشة منطقة مضيئة تسمّى الهدبة المضيئة الأولى **(c)**. تتشكّل الهدبة المضيئة الأولى ($n = 1$) عندما يكون $d\sin\theta = \lambda$، حيث d هو عرض الشق و θ هي الزاوية إلى الهدبة المضيئة الأولى.

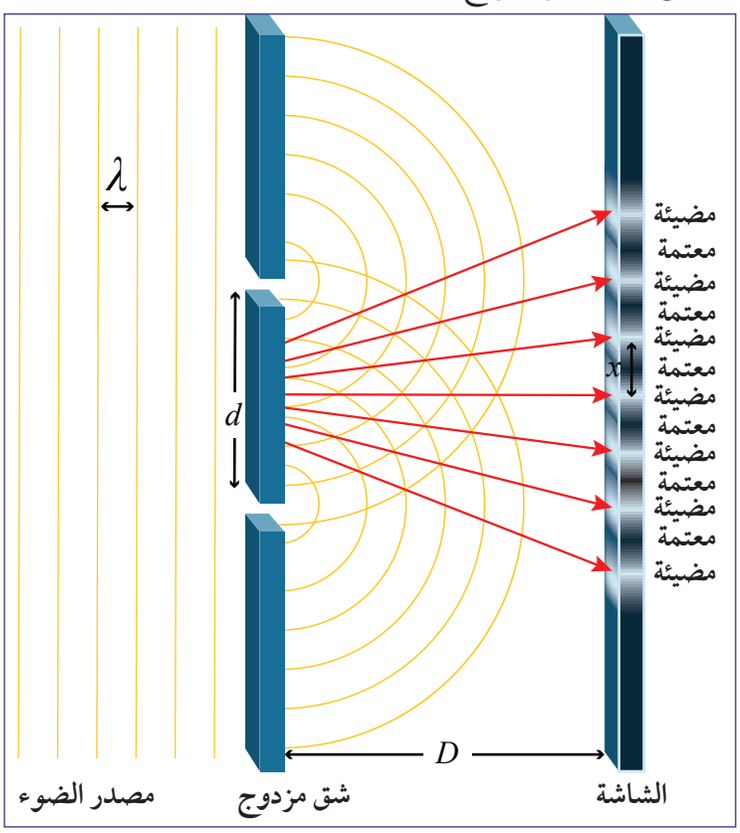
تجربة يونج للشق المزدوج

أجرى توماس يونج عام 1801، تجربة لإظهار أنماط التداخُل الضوئي. استخدم يونج ثقباً للحصول على حزمة ضيقة من أشعّة الشمس، ثم قسّم الحزمة ببطاقة رقيقة. لاحظ يونج ضوءًا قادمًا من الشقَّين لينتج 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.

أمّا 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 الضوء، باستخدام **المعادلة 6–2**.

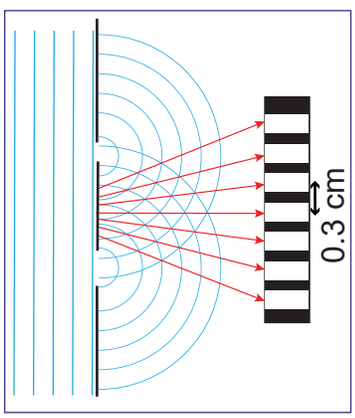
2-6	الطول الموجي من تجربة يونج		
$\lambda = \frac{dx}{D}$		λ	الطول الموجي (m)
		d	المسافة بين الشقين (m)
		x	التباعُد الهدبي (m)
		D	المسافة بين الشق المزدوج والشاشة (m)

مثال 3

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، a.

المعطى:

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:

الحل:

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

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

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:

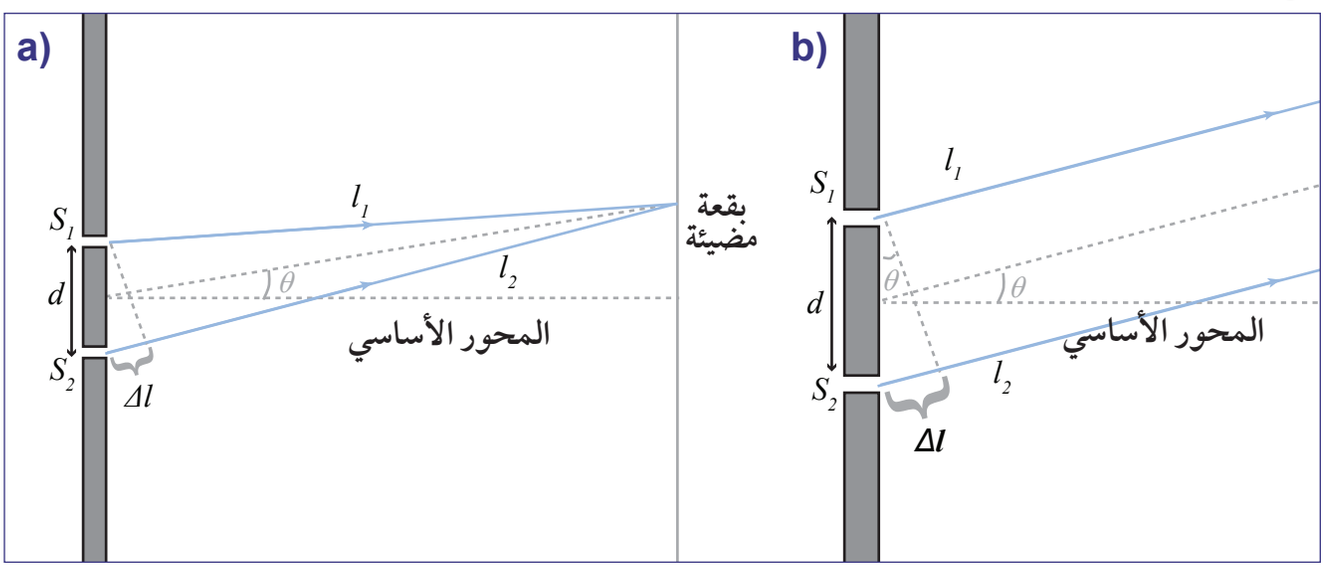
$$d = \frac{\lambda D}{x} = \frac{5.52\times10^{-7}(2.5)}{0.004} = \boxed{3.45\times10^{-4}\,\text{m}}$$

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 6-3**)، حيث n رتبة التداخُل، أي رتبة الهدبة المضيئة من مركز الشاشة.



الشكل 6-24 فرق المسار عند نقطة معيّنة.

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

مثال 4

يمر ضوء الليزر عبر شقّين تفصل بينهما مسافة 0.01 mm، ويشكِّل موقع الهدبة المضيئة الثانية زاوية تبلغ 7.27^{o} مع المحور الأساسي.

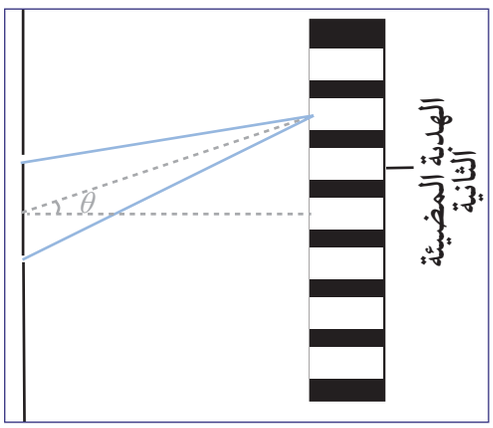
a. ما الطول الموجي للضوء؟

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

المعطى:

المسافة بين الشقَّين $d = 0.01\ mm$؛

زاوية الهدبة الثانية مع المحور الأساسي $\theta = 7.27^{o}$؛

رتبة التداخُل $n = 2$.

العلاقات: $d\sin\theta = n\lambda$

الحل:

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

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

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

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

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

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:

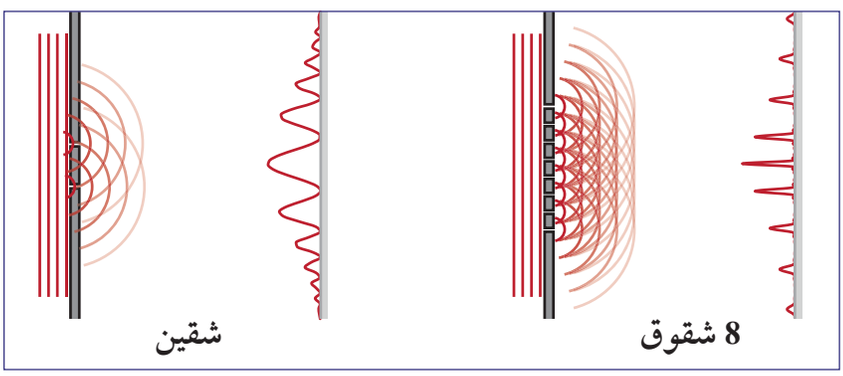
$$n = \frac{d\sin\theta}{\lambda} = \frac{1\times10^{-5}\left(1\right)}{633\times10^{-9}\ m} = 15.8$$

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

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** جهاز ذو 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.

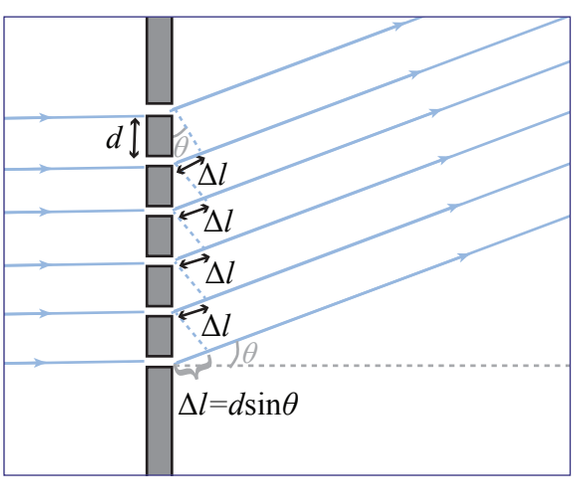
يوضِّح **الشكل 6-26** الفرق بين نموذج التداخُل الناتج من شقّين وآخر ناتج من ثمانية شقوق. النمط الناتج من محزوز الشقوق الثمانية هو أكثر دقة وأسهل في عمليات القياس.



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.



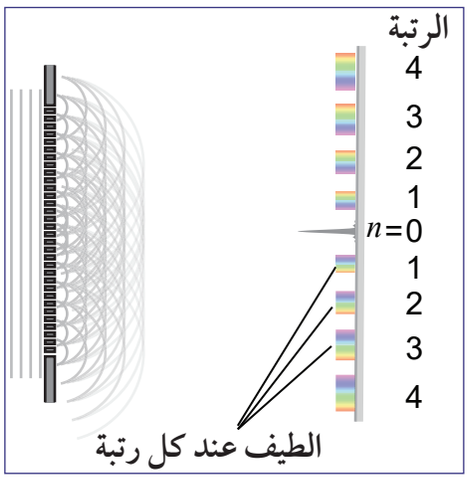
الشكل 6-27 الفرق بين مَسارَي شعاعين متتاليين هو dsinθ.

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 معكوس عدد الخطوط في المليمتر. إن شبكة ذات 600 خط في كل mm، مثلًا، تكون فيها 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 الهدب 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 5

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.

المعطى:

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

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

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{n\lambda}{d}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{1\left(760\times10^{-9}\right)}{1\times10^{-6}}\right) = \boxed{49.46^\circ}$$

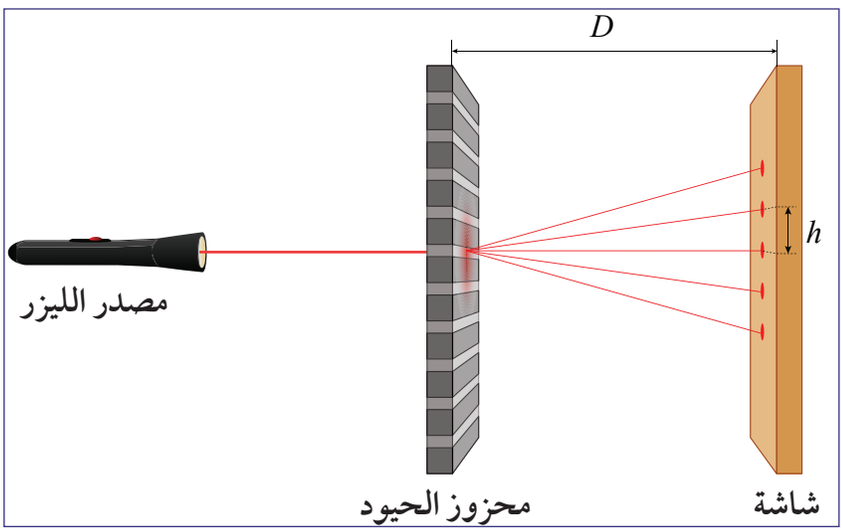
b. إذا اخترنا n = 2، تصبح $\sin\theta = 2 \times 0.76 = 1.52 > 1$، وبالتالي لا يمكن حساب θ، لذلك يكون الحد الأقصى n هو 1.

نشاط

2-6 حساب الطول الموجي للضوء

سؤال الاستقصاء	احسب 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. قسِ المسافة بين الهدبة المضيئة المركزية والهدبة المضيئة الأولى ثم احسب قياس الزاوية θ، باستخدام القياسات وعلم المثلثات. ($\theta = \tan^{-1}(h/D)$).
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 mm. 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.

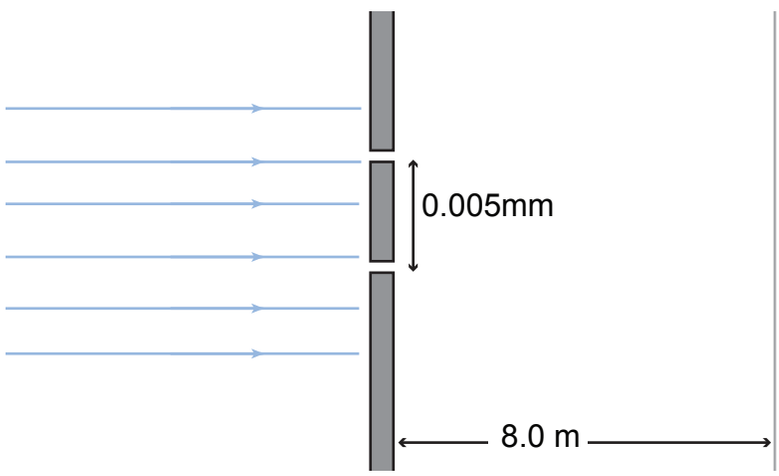
c. ارسم شكلًا مكبّرًا للريشة وأشر إلى أجزائها التي أدّت إى نمط الحيود الذي لاحظته.

تقويم الدرس 6-2

1. تُستخدم تجربة يونج للشق المزدوج بغية 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 أعلاه. 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 هو قياس زاوية الهدبة المُضيئة ذات الرتبة الأوّلى؟

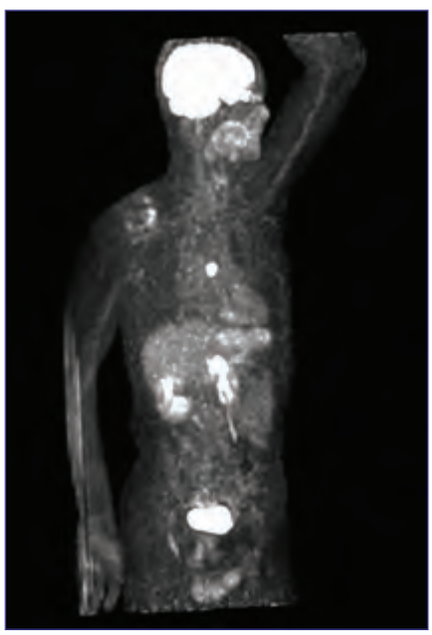
5. يمر ضوء مترابط طوله الموجي 700 nm عبر شقّ مزدوج، وينتج هدبة مضيئة من الرتبة الثانية. ما هي أصغر مسافة ممكنة بين الشقوق؟

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؟

الدرس 6-3
الأشعّة الكهرومغناطيسية

لأشعّة جاما استخدامات كثيرة 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 فيه 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 تتحرك بالسرعة نفسها في الفراغ.

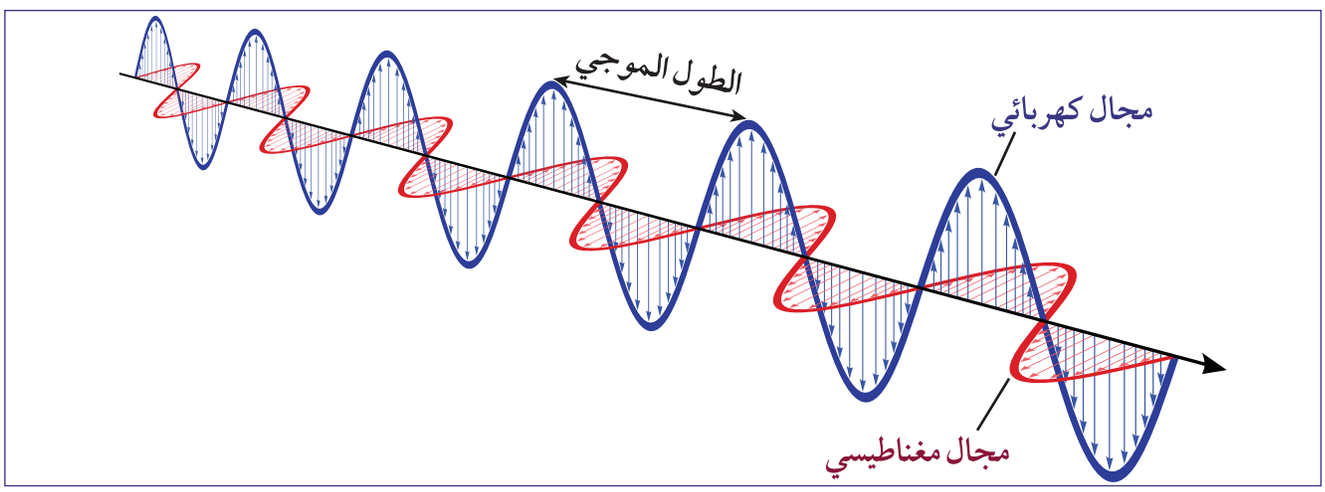
المفردات

Electromagnetic wave	الموجة الكهرومغناطيسية
Electromagnetic radiation	الأشعّة الكهرومغناطيسية
Electromagnetic spectrum	الطيف الكهرومغناطيسي
Gamma rays	أشعّة جاما
X-rays	الأشعّة السينية
Ultraviolet rays	الأشعّة فوق البنفسجية
Infrared radiation	الأشعّة تحت الحمراء
Microwaves	أشعَّة 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 الموجبة 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.

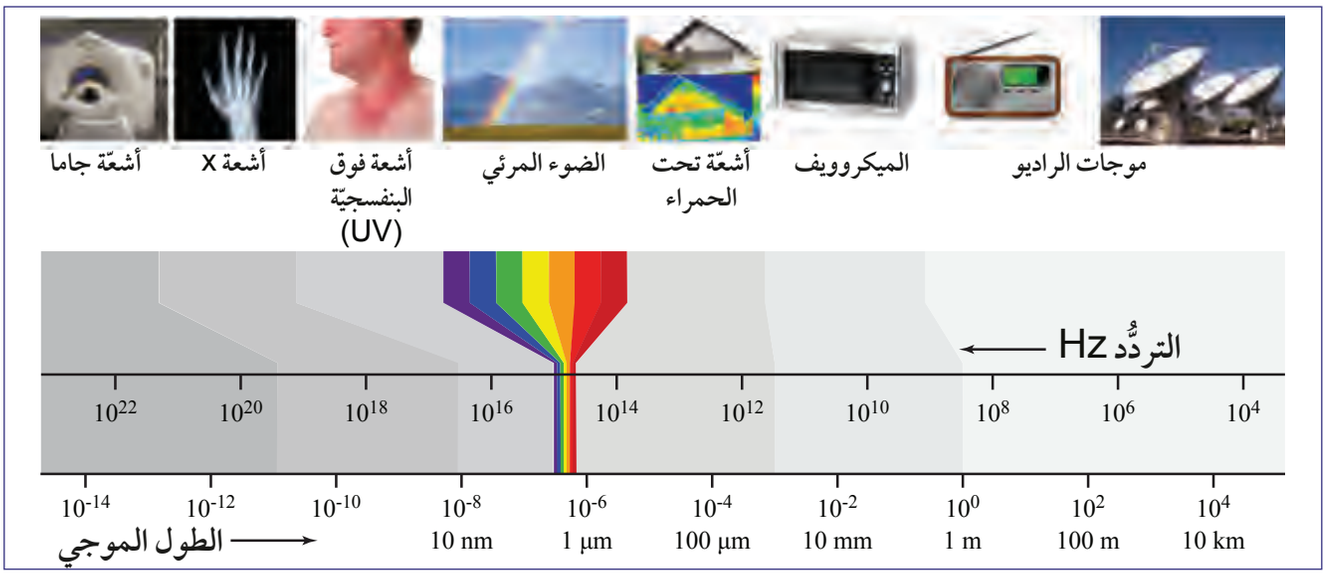
لا تقتصر الموجات الكهرومغناطيسية على الضوء المرئي . فهناك كثير من الموجات غير المرئية ذات الأطوال الموجية المختلفة، مثل أشعّة جاما، والأشعّة تحت الحمراء، وموجات الراديو. تشكِّل كل تلك الموجات طيفًا من الموجات الكهرومغناطيسية، وتحمل طاقة إشعاعية. لذلك يشار إليها **بالأشعّة الكهرومغناطيسية Electromagnetic radiation**.

يشتمل الطيف الكامل للموجات الكهرومغناطيسية على نطاق واسع من الترددُّات 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.

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 ($\lambda < 10^{-13}$ m) والأشعّة السينية (10^{-13} 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 أدنى جراحة (**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^{-8} m $< \lambda <$ 10^{-10} m)

تعد الأشعة **فوق البنفسجيّة Ultraviolet light** أكثر طاقة من الضوء المرئي، إلا أنه يُحجَب 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 حَيّزاً ضيّقاً من الضوء UV يستخدم لمُعالجة مشكلات جلدية، مثل الأكزيما أو الصدفية. (**الشكل 6-34**).

الشكل 6-34 معالجة الجلد باستخدام الأشعّة فوق البنفسجيّة UV.

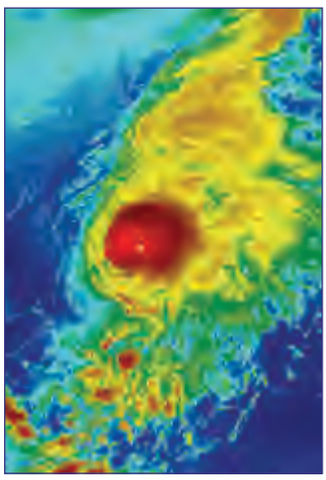
الضوء المرئي

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.

الميكروويف Microwaves تُستعمل موجات 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 المحمولة 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.

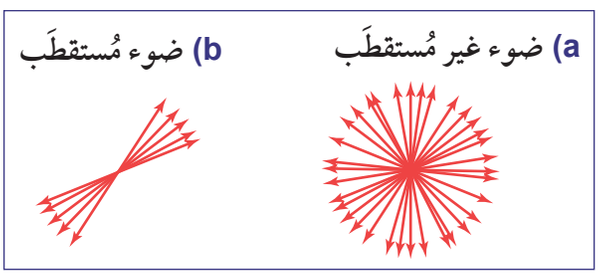
استقطاب الضوء

يتكوّن الضوء، كموجة كهرومغناطيسية، من مجالين كهربائي ومغناطيسي، يهتزان في اتِّجاهين مُتعامدين. وبما أن الضوء موجة مُستعرَضة، فإن اتِّجاه اهتزاز كل من هذين المجالين يتعامد مع اتِّجاه انتشارالضوء. قد يتّخذ اهتزاز المجال الكهربائي المستوى الأفقي، أو المستوى الرأسي أو أي اتِّجاه آخر.

عندما يهتز المجال الكهربائي في اتِّجاهات عشوائية (**الشكل 39-6a**) يكون الضوء **غير مُستقطَب**. لكن إذا كانت غالبية الاهتزازات في اتِّجاه واحد (**الشكل 39.6b**) فيكون الضوء **مُستقطبًا**. **الاستقطاب Polarization** هو خاصّية اهتزاز المجال الكهربائي (وبالتالي المجال المغناطيسي) في اتِّجاه ثابت وعمودي على اتّجاه انتشار الموجة.

سؤال للمناقشة

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



الشكل 39-6 اتِّجاه اهتزازات المجال الكهربائي.

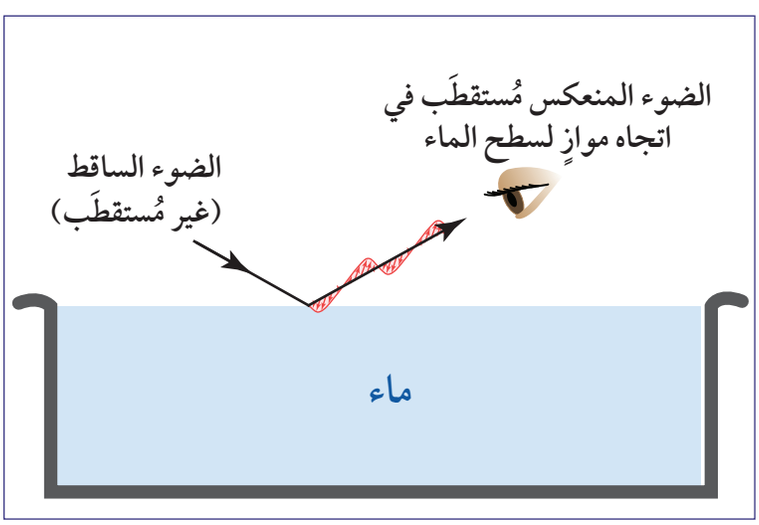
الانعكاس يستقطب الضوء

معظم أشكال الضوء المحيطة بنا، بما فيها ضوء المصابيح وضوء الشمس، إنَّما هي أشكال غير مستقطبة. عندما ينعكس هذا الضوء عن سطح، كالماء أو الثلج أو الرمل النظيف، يصبح مُستقطَبًا في اتِّجاه واحد. يسبِّب الضوء المُستقطَب وهجًا؛ فلا تكون الرؤية عندها مريحة. يظهر **الشكل 40-6** كيف أن الضوء المنعكس عن سطح الماء يصبح مُستقطَبًا أفقيًّا (متوازيًا مع السطح الذي انعكس عنه).

عند مشاهدة الضوء المُنعكِس من خلال مرشِّح بولاروید عمودي، نلحظ انخفاضًا في الوهج، وتكون الرؤية أكثر وضوحًا تحت الماء.

يسمح مرشِّح الاستقطاب العمودي فقط بمرور الضوء المستقطب عموديًّا، ويحجب الضوء المستقطب أفقيًّا. وهذا يجعل الرؤية في الخارج واضحة.

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.



الشكل 40-6 الضوء المُنعكِس يصبح أكثر استقطابًا.

نشاط

3-6 استقطاب الضوء

سؤال الاستقصاء	كيف يؤثِّر مرشِّح بولاروید في شدّة الإضاءة؟
الموادّ المطلوبة	مُرشِّحا بولاروید، حوض ماء ، مقياس شدّة الضوء (لوكس ميتر)

الخطوات

1. انظر إلى السماء بالعين المجرَّدة، وأنت في فضاء مكشوف.
2. ضع مرشِّح بولاروید على عينك، وانظر من خلاله. سجِّل أي متغيِّرات.
3. أدِر مرشِّح البولاروید الثاني فوق الأوَّل بزاوية 90°، بحيث يتعامد محوراهما. انظر من خلال المُرشِّحين المجتمِعَيْن. سجِّل أي مُتغيِّرات.
4. سجِّل شدّة الإضاءة من دون مرشِّحَي بولاروید، مستخدمًا اللوكس ميتر.
5. سجِّل شدّة الإضاءة، عند استخدام مرشِّح بولاروید واحد.
6. سجِّل شدّة الإضاءة عند استخدام مرشِّحَي بولاروید، عندما يكون محوراهما متعامدَين.

الشكل 6-41 لوكس ميتر مع مُرشِّح بولاروید.

الجدول

	شدَّة الإضاءة (lux)
من دون مرشِّحات	
مع مرشِّح بولاروید واحد	
مع مرشِّحَي بولاروید	

أسئلة

a. لِمَ انخفضت شدّة الإضاءة عند إضافة مُرشِّح بولاروید؟
b. لِمَ تم تدوير المرشِّح الثاني 90°؟ توقّع ما كان ليحدث، لو لم نقم بتدوير المرشِّح الثاني 90°.
c. ما كنت لتلاحظ لو أضفنا مرشِّح بولاروید 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؟ في أي من مناطق الطيف، هي؟

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 مرشِّحات بولاروید؟ اشرح ذلك.

7. اذكر طريقتين لاستقطاب الضوء.

8. سرعة الضوء هي $c = 3.00\times10^{8}$ m/s. حيث تدعو الحاجة، ابحث عن المسافة الفاصلة بين الأرض ومصادر الضوء المحدَّدة في الجدول الآتي، ثم احسب الزمن الذي يستغرقه وصول الضوء إلينا على الأرض.

المصادر	المسافة(m)	الزمن المُستغرَق (s)	الزمن المُستغرَق (سنوات)
التلفزيون	2		
مصباح الشارع	5		
القمر	3.83×10^{8}		
الشمس	1.5×10^{11}		
المجرَّة أندروماذا	2.40×10^{24}		
النجم بروكسيما سنتوري 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 يتألف الناي الفارسي من 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 للآلة.

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.

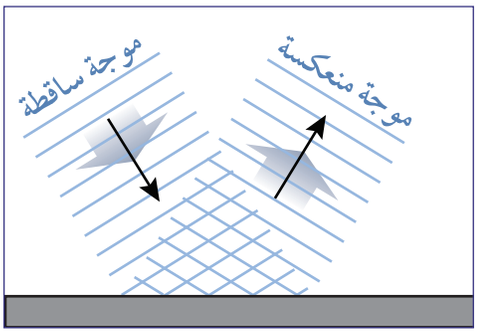
P1120.3 يمثّل ظاهرة الرنين اعتمادًا على اهتزاز الأوتار المشدودة والأعمدة الهوائيّة بالتحديد.

المفردات

Boundary	الحَدّ
Open boundary	الحدّ المفتوح
Closed boundary	الحدّ المغلق
Reflection	إنعكاس
Boundary condition	الشرط الحَدّي
Standing wave	الموجة الموقوفة
Node	عقدة
Anti-node	بطن
Fundamental frequency	التردُّد الأساسي
First harmonic	النغمة التوافقية الأولى
Resonance	الرنين

الحدود والانعكاس

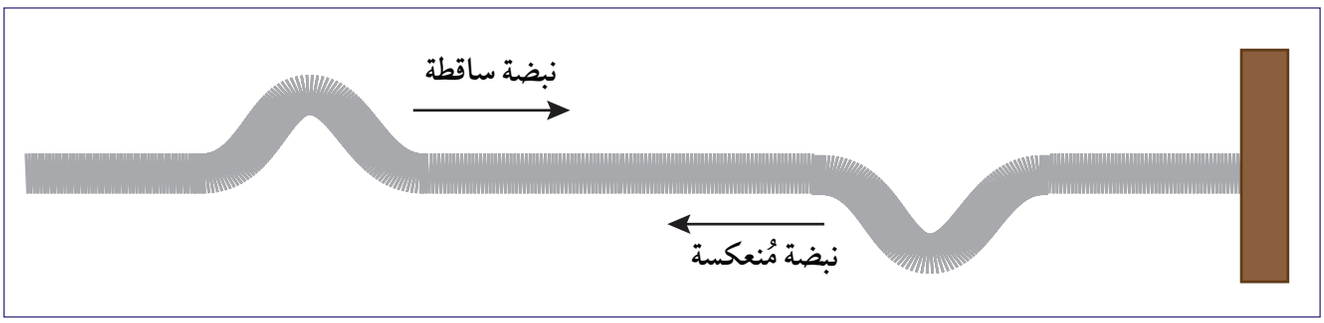
الحدّ Boundary هو فاصلٌ بين وَسطَين مختلفين لهما شروط مختلفة. وأحد أمثلة الحدود هو حائط الغرفة. فهو فاصل بين الهواء ووسط آخر كالخرسانة أو الخشب. ويمكن اعتبار طرف زنبرك طويل حدًّا فاصلًا للموجات على الزنبرك، لأنه يفصلها عن وَسَطٍ آخر.



الشكل 6-43 الانعكاس عن حَدٍّ ثابت.

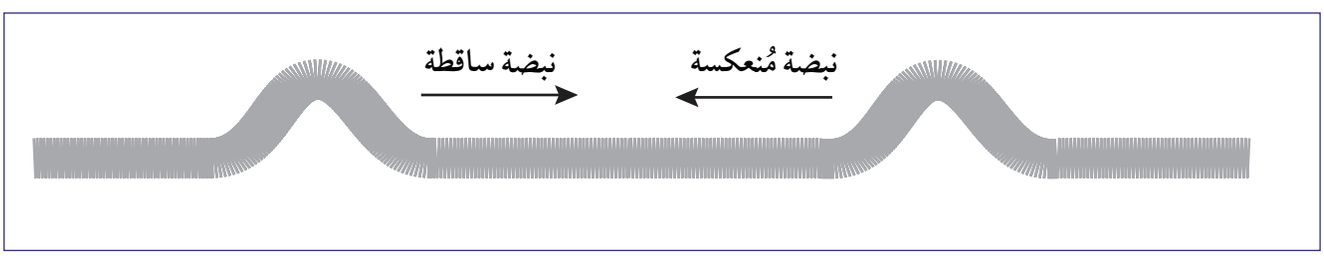
يمكن للموجة أن تنعكس عند وصولها إلى حدٍّ ما. و**الانعكاس Reflection** هو تغيُّر في اتِّجاه انتقال الموجة يصاحب تغيُّرًا في شكل جبهتها واتِّجاه انتشارها. يوضِّح **الشكل 6-43** انعكاس موجة عن حَدٍّ يفصل بين الهواء وجدار صُلب. تنعكس الموجة المستوية كموجة مستوية أخرى تنتشر في اتجاه آخر.

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 المربوط بجذع شجرة، 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 من حد ثابت.

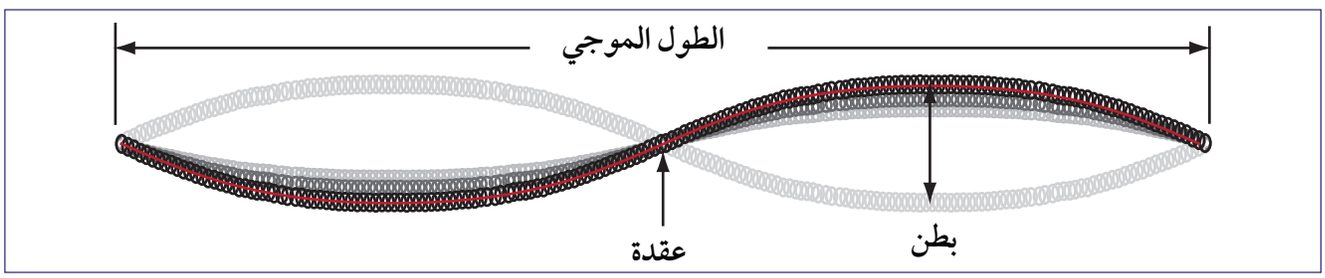
يُعتَبر الطرف الحُر للنابض **حدًّا مفتوحًا Open boundary**. حيث يتحرَّك الطرف الحر عند وصول الموجة المنتقلة إليه. يختلف الانعكاس عند حد مفتوح عن الانعكاس عند حَد مغلق. حيث تنعكس النبضة الموجية كما هي (معتدلة) عندما تواجه حّدًا مفتوحًا، كما هو مبيّن في **الشكل 6-45**، من دون أي تغيُّر في الطور.



الشكل 6-45 انعكاس نبضة عند حد مفتوح.

الموجات الموقوفة

عند انعكاس الموجة المُنتقلة من 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 مختلفين.

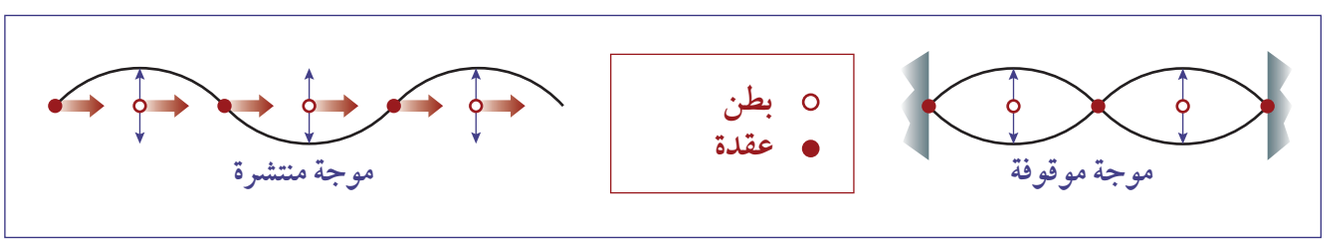


الشكل 6-46 موجة موقوفة لزنبرك.

يُظهر **الشكل 6-46** موجة موقوفة على 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 المنتشرة.

الأمواج الموقوفة	الأمواج 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.

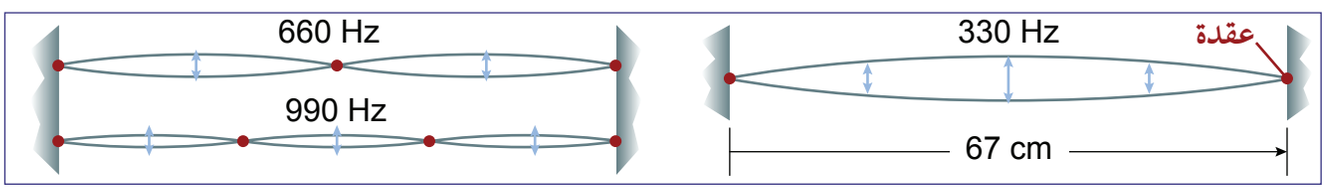
هناك العديد من الأمثلة على الموجات الموقوفة في الطبيعة والتكنولوجيا. وعلينا أن نفهم فكرتين أساسيتين حول الموجات الموقوفة:

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

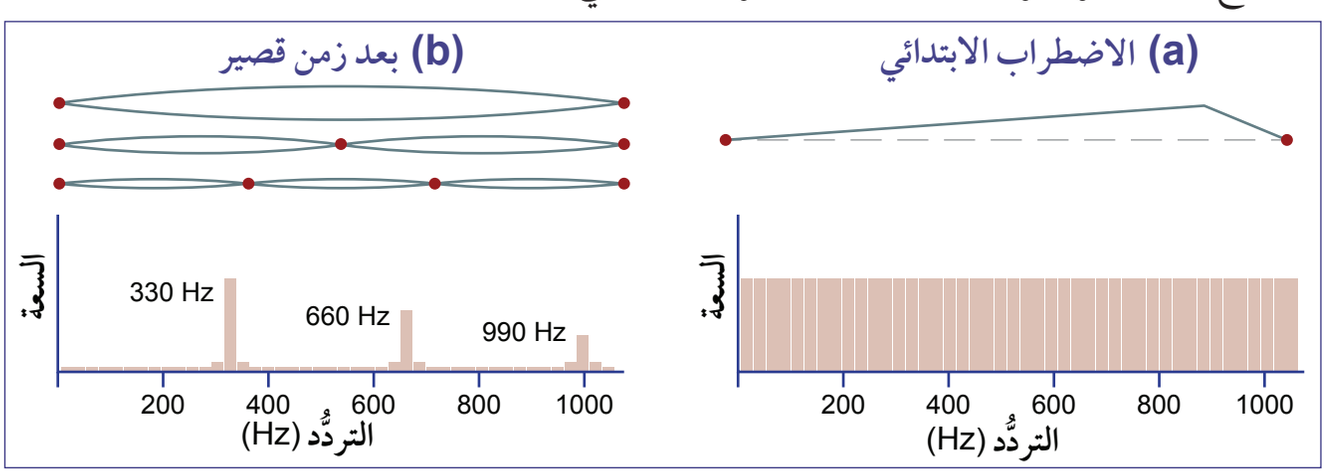
توضّح الموجات الموقوفة فكرة مهمّة، وهي أن لكل نظام تردُّدًا معيّنًا يميل إلى الاهتزاز تحت تأثيره. يُسمّى التردُّد الذي يميل النظام إلى الاهتزاز وفقه، **بالتردُّد الطبيعي Natural frequency**. إذا أُحْدَثتَ اضطرابًا في خيط، فإنه سيهتز اهتزازًا سريعًا بتردُّده الطبيعي. يتحدّد التردُّد الطبيعي بواسطة الجسم 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 التردُّدات 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. يسُمّى أقلّ هذه التردُّدات **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 أضعاف التردُّد الأساسي.

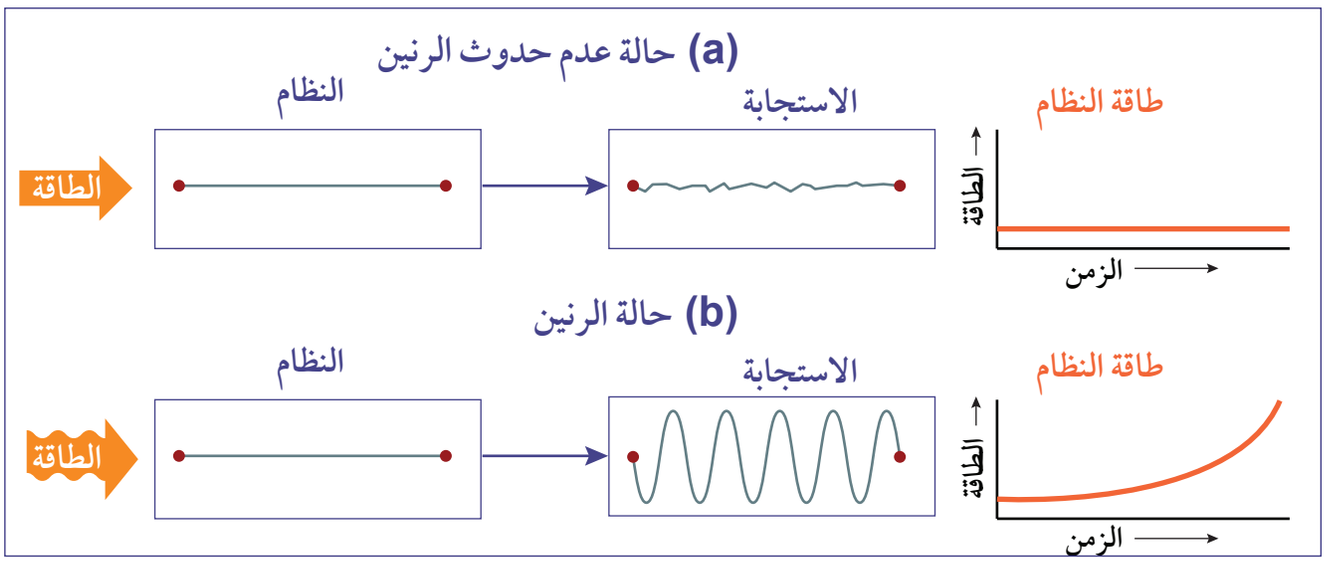


الشكل 6-49 التردُّدات غير التردُّد الأساسي تتضاءل بسرعة.

نلاحظ من خلال التجربة أن السلك يهتز بتردُّداته الطبيعية، بغض النظر عن الطريقة التي نُحدث فيها الاهتزاز الابتدائي. ولفهم ذلك، افترض اهتزازًا ابتدائيًا يشتمل على عدّة تردُّدات كما في **الشكل 6-49a**. يؤدّي الاحتكاك وحركة السلك إلى تلاشٍ سريع لكلّ التردُّدات ما عدا التردُّدات الطبيعية. وبعد وقت قصير لا يبقى سوى اهتزازات التردُّد الطبيعي، كما في الشكل **الشكل 6-49b**.

الرنين

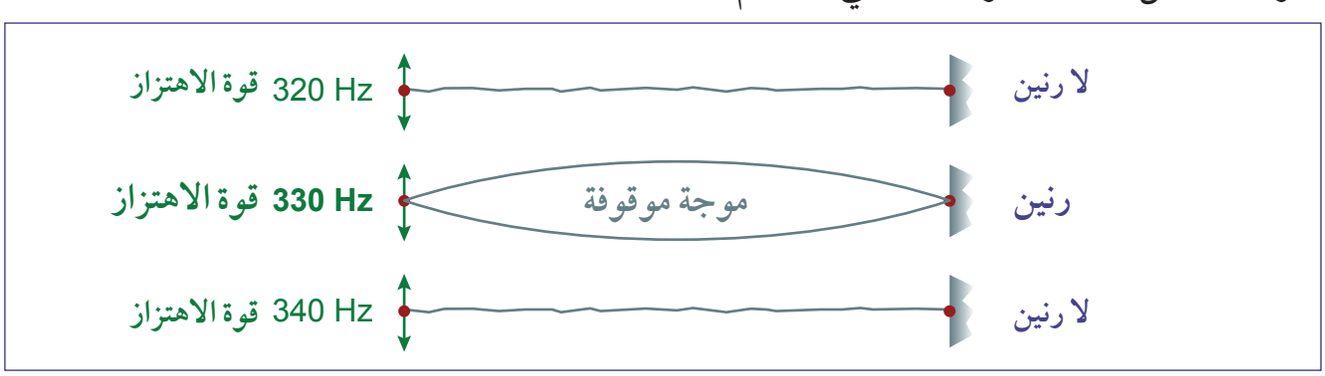
الموجات الموقوفة نوع من أنواع الرنين. والرنين **Resonance** هو تضخيم طبيعي لسعة الاهتزاز يحدث لدى تزويد النظام بطاقةٍ عند تردُّد يساوي تردُّده الطبيعي. تزداد كفاءة النظام الخاضع للرنين في امتصاص الطاقة، وتزداد سعة اهتزازه بسرعة (**الشكل 6-50**).



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.

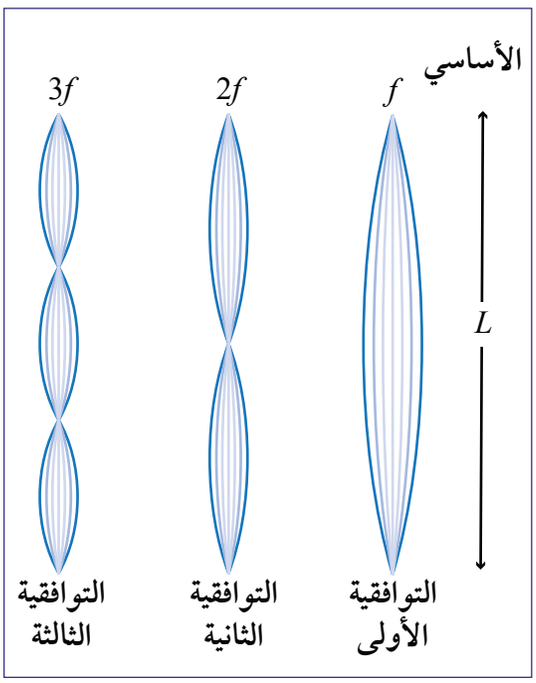


الشكل 6-51 ملاحظة الرنين في الخيط المشدود.

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 التوافقية الأساسية أي $2f$.
- للنغمات التوافقية الأعلى تردُّدات nf حيث n عدد صحيح. فتردُّد النغمة التوافقية الثالثة، على سبيل المثال، يساوي $3f$.



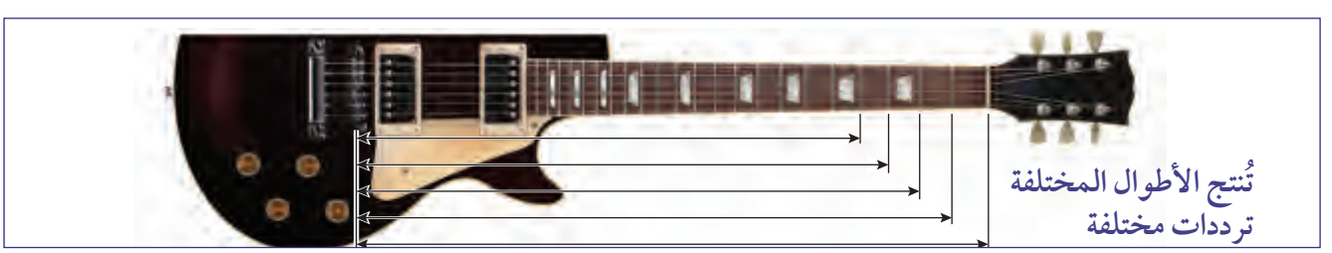
الشكل 6-52 الموجات الموقوفة على وتر.

افترض وترًا طوله L، بتردُّد النغمة التوافقية الأولى (**الشكل 6-52**). طول نموذج الاهتزاز في هذه الحالة يساوي نصف الطول الموجي 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 4-6**.

4-6	الطول الموجي للموجة الموقوفة	λ_n	الطول الموجي (m)
$\lambda_n = \frac{2L}{n}$		L	طول الوتر (m)
		n	رتبة النغمات التوافقية

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.

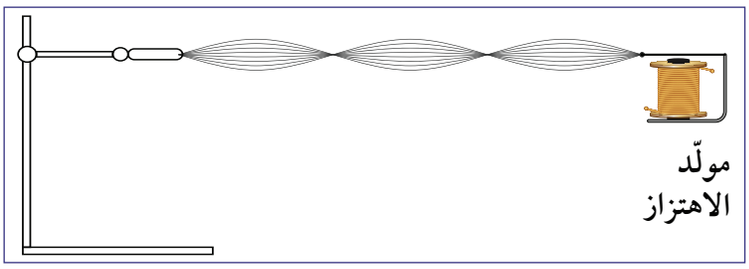
نشاط

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، كابلا توصيل، حامل بملاقط

الخطوات

1. اربط مولّد الإشارة بمولّد الاهتزاز مُستخدمًا كابلات التوصيل. قم بتغذية أحد طَرَفي الوتر المطاطي عن طريق مولّد الاهتزاز.
2. قم بشدّ الوتر المطاطي، حيث يصبح طوله 1 m، ثمّ علّق نهايته بملقط الحامل (قد تحتاج إلى تثبيت الحامل بالطاولة بواسطة ملقط).
3. زدْ ترددُات 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

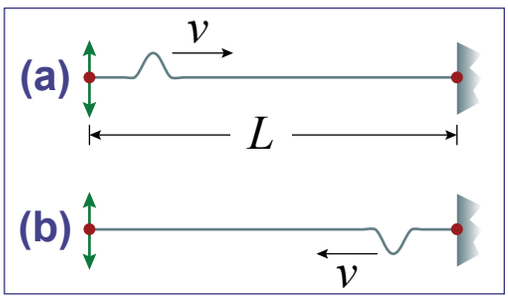
التردُّد (Hz)	الطول الموجي (λ)	السرعة (m/s)

أسئلة

a. أكمل الحسابات لملء الجدول السابق.
b. احسب التردُّد الأساسي إذا كان طول الوتر ضعفي ما هو عليه.

العلاقة مع السرعة

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:

$$\lambda = 2L$$

وهو الطول الموجي الأساسي للرنين.

مثال 6

يتم تجهيز موجة موقوفة على وتر ذي نهايتين مثبتتين، حيث تردُّد النغمة التوافقية الأولى هو 140 Hz. تبلغ سرعة انتقال الموجات على 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

المُعطى: 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 للتوافقية الأولى:

$$v = f\lambda \Rightarrow \lambda = \frac{v}{f} = \frac{230}{140} \quad 1.64 \text{ m}$$

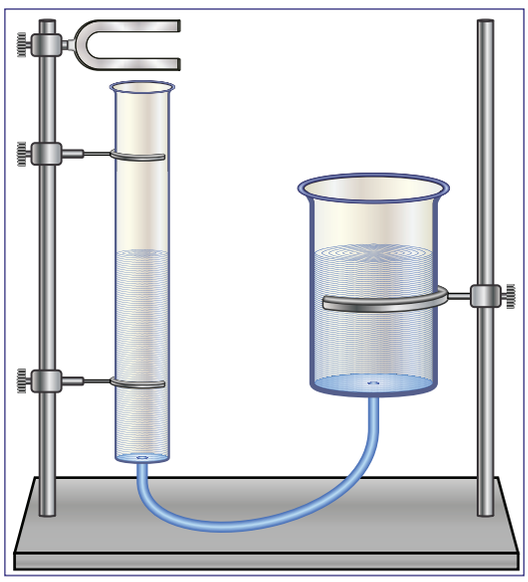
باستخدام الطول الموجي المحسوب، نجد الطول:

$$\lambda_1 = 2L \Rightarrow L = \frac{\lambda_1}{2} = \frac{1.64}{2} \quad \boxed{0.82 \text{ m}}$$

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

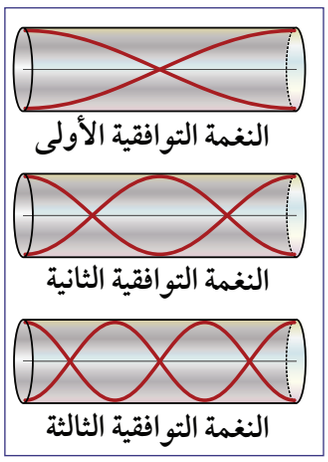


الشكل 6-56 رنين الأنبوب.

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 للأنبوب. على الرغم من ذلك، يمكن تغيير التردُّد الطبيعي للأنبوب. إذا ارتفع مستوى الماء داخل حجرة الرنين، ينخفض طول الأنبوب، وبالتالي ينخفض 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 داخل أنبوبِهِ، 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.

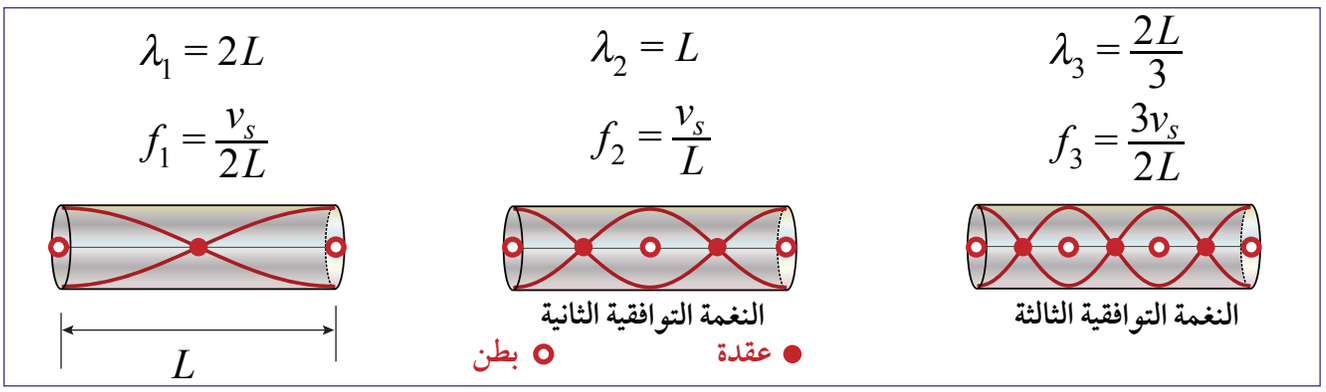
تُظهر النغمة التوافقية الأولى، طولًا موجيًّا يساوي 2L. ويحدث ذلك حين تهتز الموجة داخل العمود عند التردُّد الأساسي. ويتشكّل نصف الموجة فقط على طول العمود.

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.

5-6 الموجات الموقوفة لعمود مفتوح الطرفين

$$f_n = \frac{nv_s}{2L} \qquad \lambda_n = \frac{2L}{n}$$

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 7

احسب التردُّدات الأربعة الأولى لعمود هوائي طوله 0.5 m مفتوح الطرفين، عندما يكون المزمار في حالة رنين.

المطلوب: التردُّدات الأربعة

العلاقات:

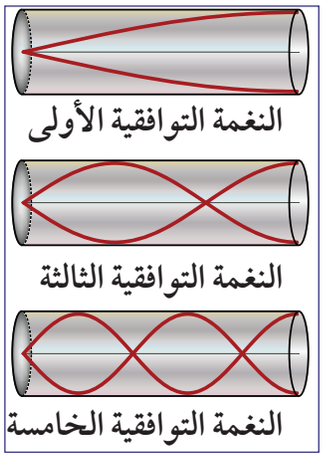
$$f_n = \frac{nv_s}{2L}$$

الحل: باستخدام العلاقة:

$$f_1 = \frac{(343\ \text{m/s})}{2(0.5\ \text{m})} = 343\ \text{Hz} \qquad f_2 = \frac{(2)(343\ \text{m/s})}{2(0.5\ \text{m})} = 686\ \text{Hz}$$

$$f_3 = \frac{(3)(343\ \text{m/s})}{2(0.5\ \text{m})} = 1029\ \text{Hz} \qquad f_4 = \frac{(4)(343\ \text{m/s})}{2(0.5\ \text{m})} = 1372\ \text{Hz}$$

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 توافقيات ممكنة، عندما يكون أحد طرفي العمود مغلقًا. وبما أنّ التوافقية الأولى لها عُقدة عند أحد الطرفين وبطن عند الطرف الآخر، يكون طول العمود ربع الطول الموجي أي: $L = \lambda_1/4$.

لاحظ أن لا وجود للنغمتين التوافقيتين الثانية والرابعة، بل توافقيات فردية في العمود ذي الطرف المُغلق الواحد. يكون طول التوافقية الثالثة 3/4 الطول الموجي، أي: $L = 3\lambda_3/4$.

وبشكل مشابه، يكون عند التوافقية الخامسة $L = 5\lambda_5/4$، وهو ملخّص من خلال **المعادلة 6-6**.

6-6 الموجات الموقوفة لعمود هوائي مغلق

$$\lambda_n = \frac{4L}{n} \qquad f_n = \frac{nv_s}{4L}$$

$n = 1 ، 3 ، 5 ، \ldots$

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 8

ما هي نسبة الطول الموجي للنغمة التوافقية الأولى على الطول الموجي للنغمة التوافقية التالية لعمود هوائي ذي طرف مغلق.

المطلوب نسبة الطول الموجي، λ_1/λ_3

العلاقات $\lambda_n = \frac{4L}{n}$;

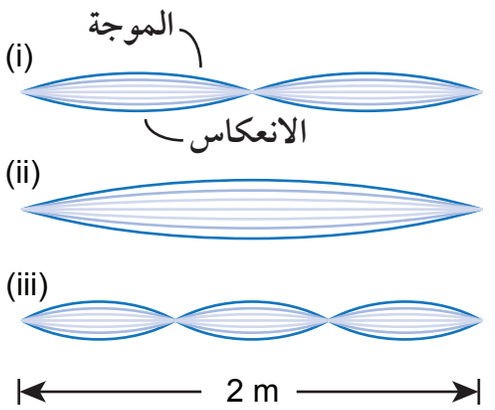
الحل باستخدام العلاقة:

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_3} = \frac{4L}{1} \times \frac{3}{4L} = 3/1$$

الطول الموجي للنغمة التوافقية الأولى هو 3 أضعاف الطول الموجي للنغمة التوافقية الثالثة.

تقويم الدرس 4-6

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 هو الزمن الدوري لتلك الموجة وتردُّدها 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؟

2. كم عدد العُقد والبطون الظاهرة في كل نمط من أنماط الموجة الموقوفة المبيّنة في الشكل السابق؟

3. ما العلاقة بين عدد العُقد وعدد البطون في موجة موقوفة على وتر مشدود وثابت الطرفين؟

4. 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.

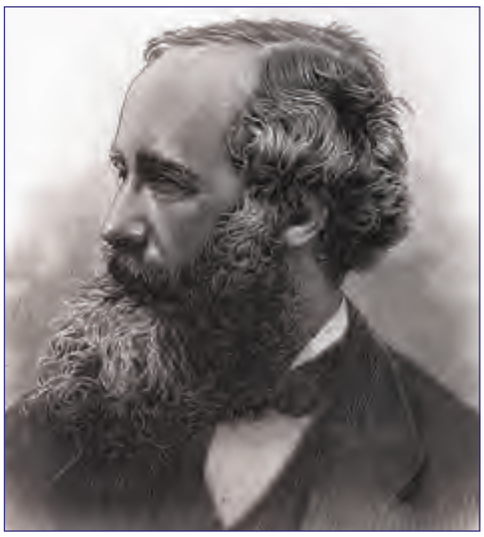
a. احسب الطول الموجي للموجة الناتجة.

b. احسب سرعة الصوت.

5. احسب التردُّد الأساسي لمزمار مفتوح الطرفين، إذا كان طول المزمار 85 cm.

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 أيدنبرغ كطالب جامعي لدراسة البصريات. وانتقل بعد ثلاث سنوات إلى كلية ترنيتي بجامعة كامبريدج. وتخرّج فيها 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.

تنبّأ 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 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 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. 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 جانبيِ 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** هي الموجات الأعلى تردُّدًا في طيف الإشعاع الكهرومغناطيسي.
- **الأشعّة السينية** هي موجات ذات تردُّد مرتفع في طيف الإشعاع الكهرومغناطيسي، تستخدم عادة لتصوير العظام.
- **الأشعّة فوق البنفسجية** هي موجات إشعاع كهرومغناطيسي ذات تردُّد أعلى من تردُّد الضوء المرئي.
- **الأشعّة تحت الحمراء** هي موجات إشعاع كهرومغناطيسي ذات تردُّد أدنى من تردُّد الضوء المرئي.
- **موجات الميكروويف** شكل من الإشعاع الكهرومغناطيسي تردُّده أعلى قليلًا من تردُّد موجات الراديو.

الوحدة 6

مراجعة الوحدة

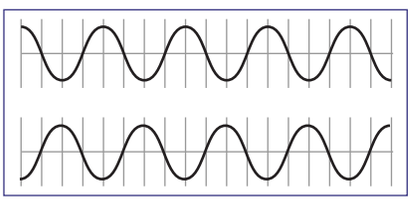
- **موجات الراديو** منطقة من الطيف الكهرومغناطيسي لها أطول طول موجي، وأقل تردُّد.
- **الضوء غير المُستقطَب** هو الضوء الذي يهتزّ فيه المجال الكهربائي في اتّجاهات عشوائية.
- **الضوء المُستقطَب** هو الضوء الذي يهتز فيه المجال الكهربائي في اتّجاه واحد.

الدرس 6-4: الموجات الموقوفة

- **الانعكاس** هو عملية ارتداد الموجات (بما في ذلك الضوء) عند سقوطها على حَدٍّ أو فاصلٍ بين مادَّتين مختلفتين.
- **الموجة الموقوفة** هي نمط موجي مستقرّ ينشأ نتيجة لتراكب موجتين متماثلتين إحداهما ساقطة والأخرى منعكسة، كما يحدث في الوتر المهتز.
- **العقدة** هي النقطة المستقرّة على الموجة الموقوفة، وهي النقطة التي لها أدنى سعة أو سعتها صفر.
- **البطن** هو النقطة التي لها أقصى سعة على الموجة الموقوفة.
- **التردُّد الأساسي** هو أدنى تردُّد لجسم مهتز.
- **النغمة التوافقية الأوّلى** هي الموجة التي تتشكَّل من اهتزاز جسم ما عند تردُّده الأساسي.
- **الرنين** يحدث عندما يُجبر جسم ما على الاهتزاز، وفقًا لتردُّده الطبيعي تحت تأثير قوة خارجية.

اختيار من مُتعدّد

1. ما فرق الطور بين الموجتين في الرسم التخطيطي؟



a. 0º
b. 90º
c. 180º
d. 360º

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 ثقيل 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. تتراكب 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 هي 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 هو الخيار الأفضل لتضخيم الصوت؟

a. الشوكة الرنّانة
b. أنبوبة الرنين
c. العزل الصوتي
d. آلية الصدى الصوتي تحت الماء

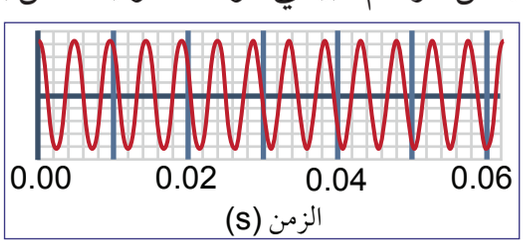
11. يعزف مُكبِّرا صوت نغمتين مختلفتين، إحداهما على تردُّد 440 Hz، وأخرى على تردُّد 430 Hz. ماذا سيسمع المستمع عند تداخُل هاتين النغمتين؟

a. ضربات
b. انكسارًا
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 بالبوزيترون 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؟

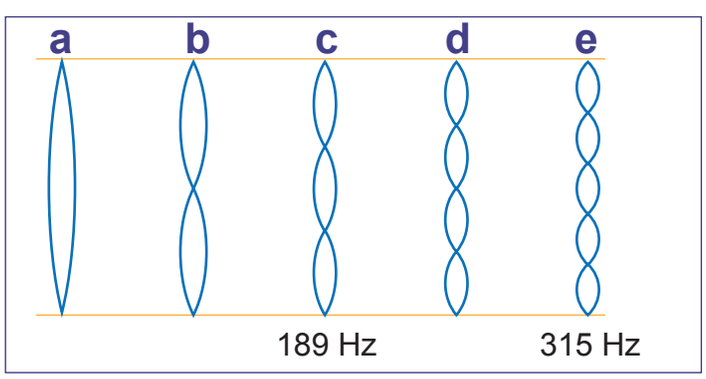
20. موجة كبيرة ذات سعة 40 cm وطول موجي 2.0 m، خضعت لتداخُل مع موجة ثانية ذات سعة 15 cm وطول موجي 2.0 m.

a. إذا كان فرق الطور بين الموجتين 180^{o}، 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.

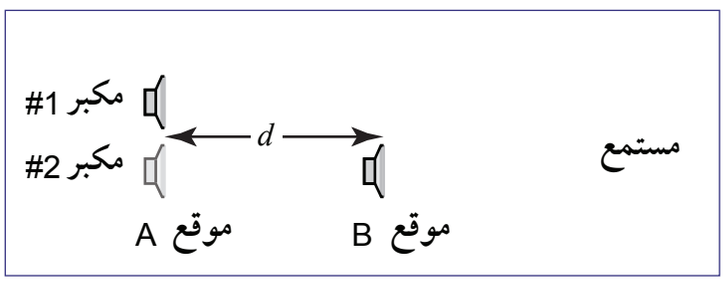
22. املأ التردُّدات المفقودة لأنماط الموجات الموقوفة في الرسم التخطيطي أدناه.



23. يستمع عثمان 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 سليم (زميل عثمان في المختبر) بتحريك أحد مُكبِّرَي الصوت ببطء نحوهُ إلى الموقع B، لكن عثمان بالكاد سمع الصوت من مُكبِّرَي الصوت. علِّلْ ذلك؟

b. احسب المسافة d بين الموقعين A وB.



الدرس 6-2: 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.

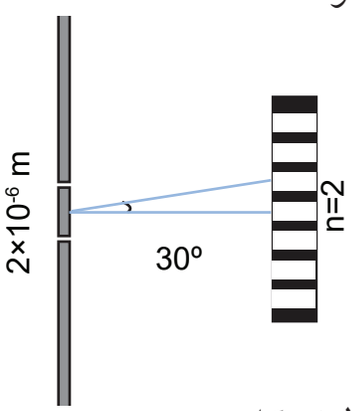
28. ما هي إيجابية استخدام الشقوق المتعدِّدة في محزوز الحيود مقارنة بالشق المزدوج في تحليل الضوء إلى طيف؟

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 3-6: الأشعة الكهرومغناطيسية

33. ما هي 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 هو 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 شريف إلى زميله أشرف 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^{o}.

38. افحص جدول 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 هي 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؟

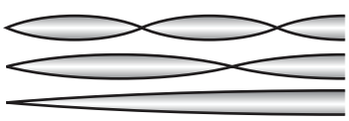
d. هل يمكن للغوّاصات بث هذه الأطوال الموجية؟

الدرس 6-4: الموجات الموقوفة

40. لِمَ 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 هي 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 هي 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).

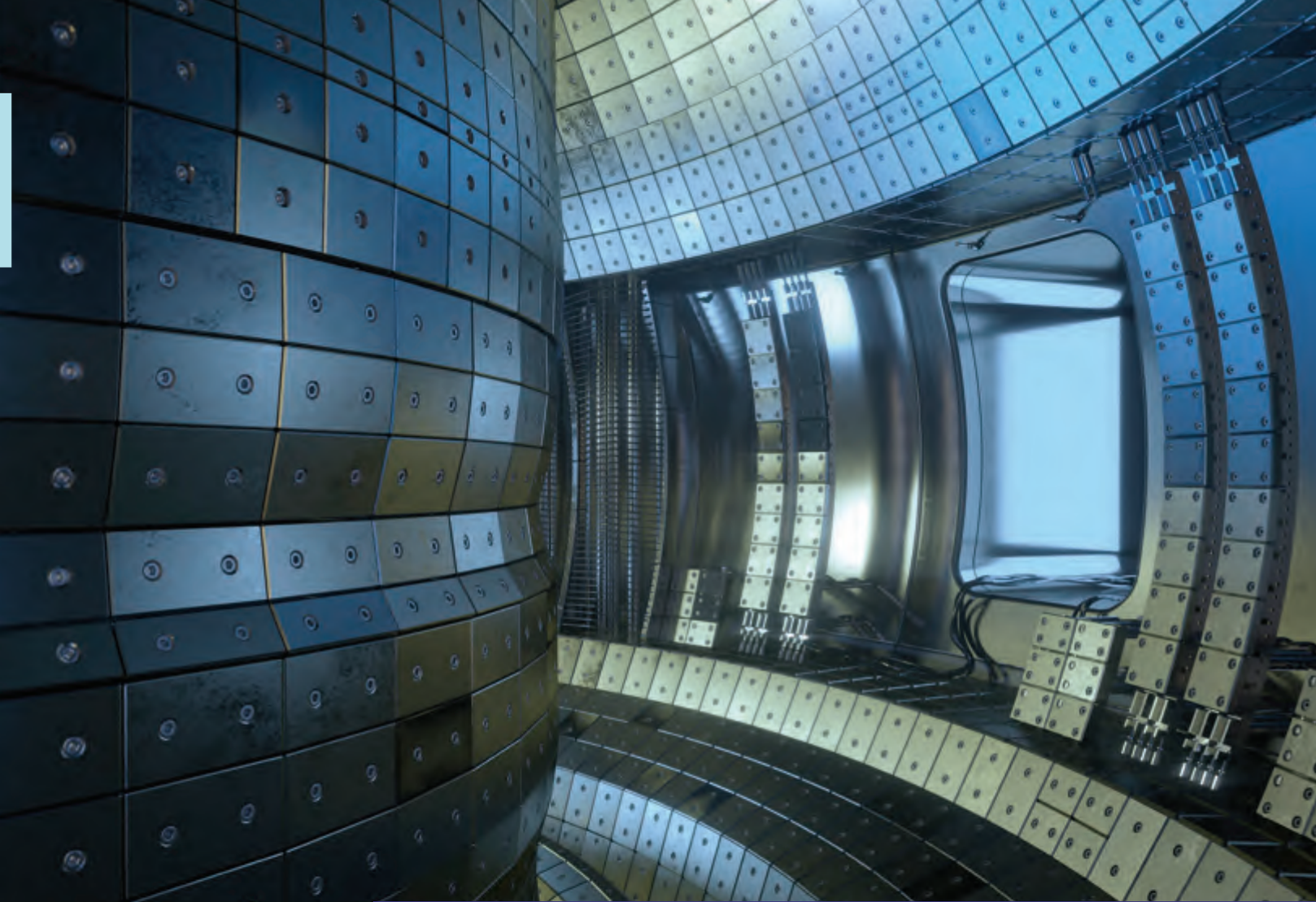
48. شُدّ وتر حتى صار طوله 0.4 m، وثُبّت من كلا طرفيه.

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 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 هي 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

يتكوَّن لدينا اليوم فهم واضح لوجود الذرّات والجُسيمات التي في داخلها، 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، وتتحلَّل 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 يسُتخدَم 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 كي تنحلّ.

الأنشطة والتجارب

1-7 تطوُّر النموذج الذرّي

3-7 التحقُّق من عُمر النصف

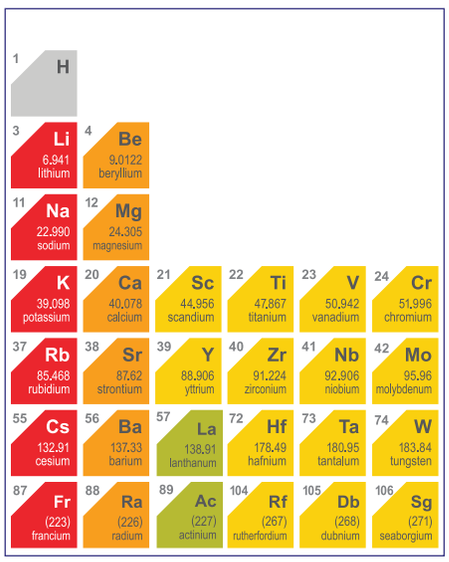
4-7 مخاطر الانحلال الإشعاعي

الدرس 7-1

الذرّة

كل الموادّ من حولك مصنوعة من 92 عنصرًا طبيعيًّا. وكلّ عنصر يتكوَّن من ذرّات، والذرّة هي أصغر جُسَيم في أي عُنصر. وقد رُتِّبت جميع العناصر في جدول دوريّ.

الشكل 7-1 يوضِّح عناصر الجدول الدوري الذي صمّمه العالم الروسي الكيميائي ديمتري ماندليف. نظَّم ماندليف البيانات المعروفة عن العناصر، على أساس كُتلها، ثم نظَّم العناصر في مجموعات، بحسب خصائصها المشتركة. توقَّع ماندليف اكتشاف المزيد من العناصر. لذلك ترك لها أماكن فارغة في الجدول. استغرق العمل على تطوير الجدول الدوري 80 عامًا، حتى جرى التوصُّل إلى النسخة التي نتداولها اليوم.



الشكل 7-1 نسخة قديمة من الجدول الدوري.

ظلَّ سبب اختلاف العناصر بعضها عن بعض مجهولًا حتى الأعوام المئة الأخيرة. ففي العام 1914، أضاف العالِم الإنكليزي هنري موسلي العدد الذرّي للعناصر، وأعاد ترتيبها. النيوترون هو آخر الجُسيمات المُكتَشفة داخل الذرّة؛ وكان ذلك عام 1932 على يد العالم جيمس شدويك. لم يكن مفهوم القوى التي تُجمّع النواة واضحًا، حتى تمّ اكتشاف الكواركات داخل النيوترونات والبروتونات عام 1970.

مخرجات التّعلُّم

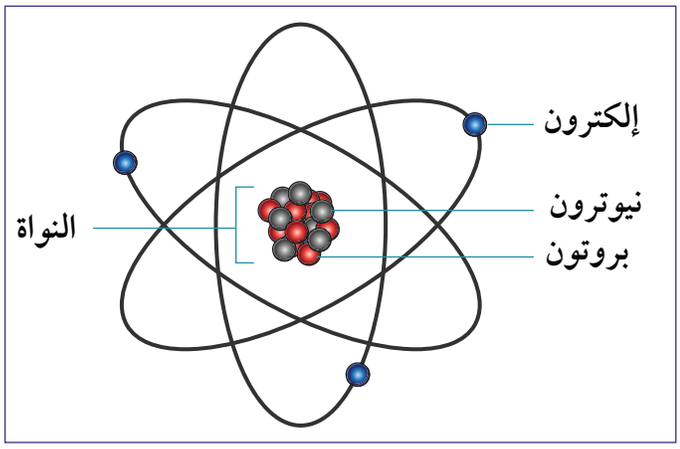
P1114.1 يفسر نتائج تجربة التشتت لرذرفورد ويصف كيف أدت إلى نماذج التركيب الذرّي الحديثة.

المفردات

Atom	الذرّة
Electrons	إلكترونات
Protons	بروتونات
Neutrons	نيوترونات
Elementary charge	الشحنة الأوَّلية
Atomic number	العدد الذرّي
Alpha particles	جُسيمات ألفا
Isotopes	النظائر
Atomic mass number	العدد الكُتلي

تركيب الذرَّة

تحتوي الذرَّة على ثلاثة أنواع 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 كتلتها أكبر من كتلة الإلكترون بـ 1836 مرَّة.



الشكل 7-2 تركيب الذرّة .

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).

	الكتلة	الشحنة
بروتون	1.673×10^{-27} kg	$+1.602 \times 10^{-19}$ C
نيوترون	1.675×10^{-27} kg	0
إلكترون	9.11×10^{-31} kg	-1.602×10^{-19} C

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 نوى ذرّات العنصر الواحد العدد نفسه من البروتونات، بينما يختلف عدد البروتونات في نوى ذرَّات العناصر المختلفة.

جميع ذرَّات العنصر الواحد تحتوي على العدد نفسه من البروتونات.

العنصر	البروتون
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

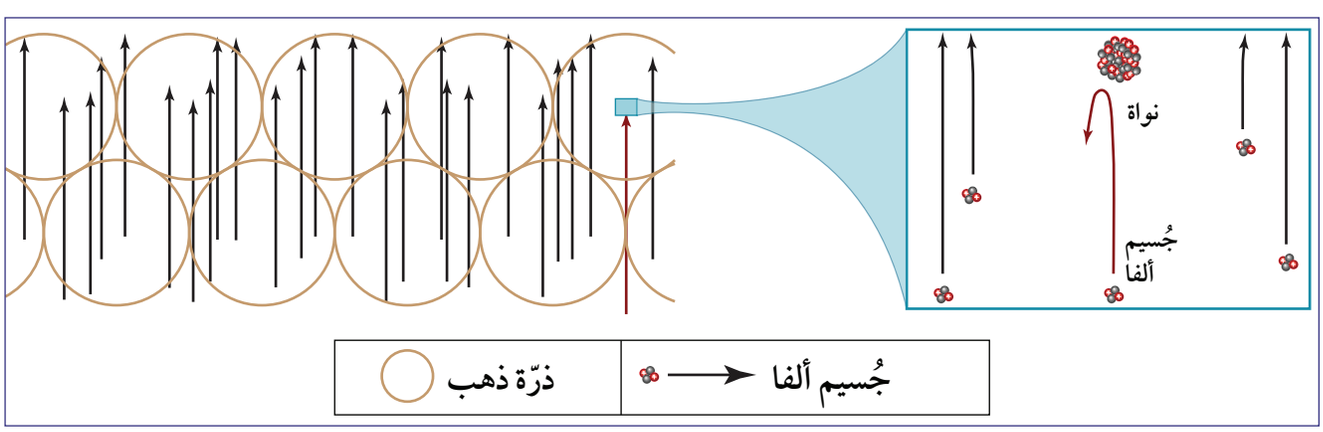
1 H hydrogen																	2 He helium
3 Li lithium	4 Be beryllium											5 B boron	6 C carbon	7 N nitrogen	8 O oxygen	9 F fluorine	10 Ne neon
11 Na sodium	12 Mg magnesium											13 Al aluminum	14 Si silicon	15 P phosphorous	16 S sulfur	17 Cl chlorine	18 Ar argon

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، تسمح لنا التجارب الذكية 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 محيط 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، حتى أن بعض الجُسيمات ارتَّدت عن الشريحة في الاتِّجاه المُعاكِس.

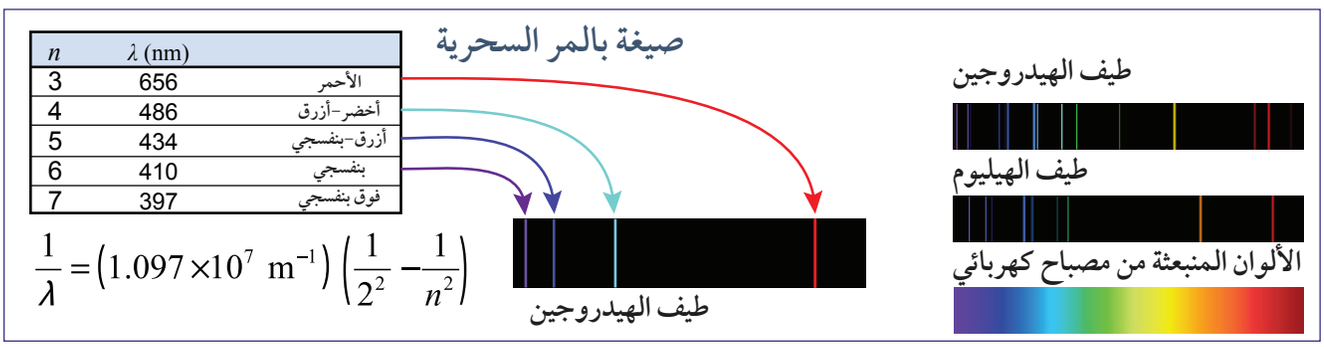


الشكل 7-5 مشاهدات رذرفورد.

وبما أن معظم الجُسيمات قد نفذت من دون أي انحراف، فقد استُنتِج أن معظم مناطق الذرَّة هي فارغة، وأن معظم كتلة الذرَّة وشحنتها الموجبة لا بُدّ أن تتركّز في حيّز صغير جدًّا في وسطها، الذي يُسمّى نواة الذرَّة.

ذرَّة الكم

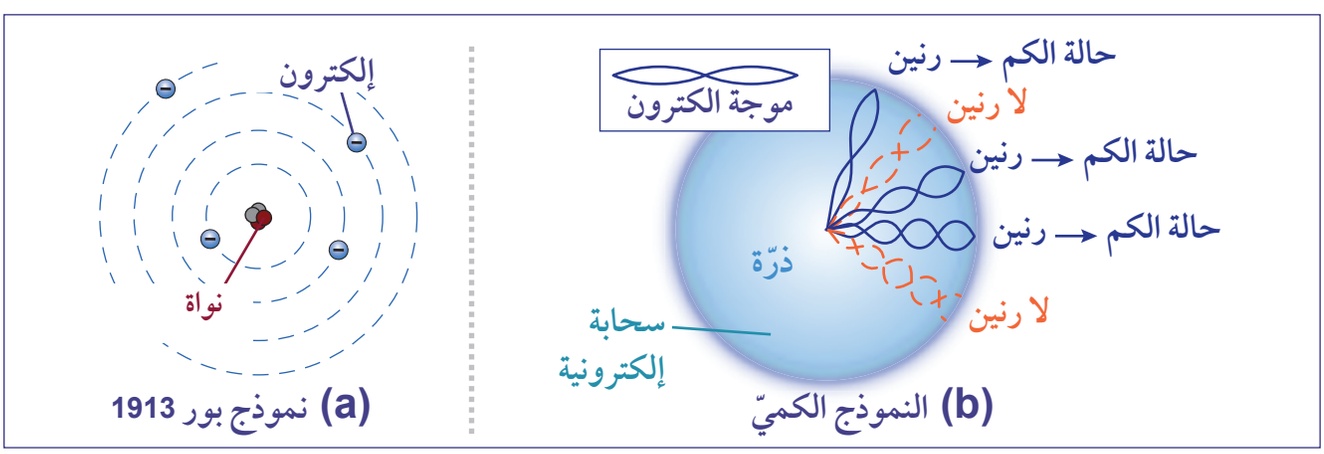
على عكس المصباح الكهربائي، يحتوي الضوء المنبعث من غاز الهيدروجين على ألوان قليلة جدًّا مُنفصِل بعضها عن بعض، وهو أمر لم يكن مفهومًا. وفي العام 1885، اكتشف مُدرِّس سويسري يدعى يوهان بالمر الأطوال الموجية، وأخضعها لمعادلة رياضية؛ لكنه لم يستطع تعليل ذلك.



n	λ (nm)	
3	656	الأحمر
4	486	أخضر-أزرق
5	434	أزرق-بنفسجي
6	410	بنفسجي
7	397	فوق بنفسجي

الشكل 7-6 صيغة بالمر وطيف الهيدروجين.

استنتج الفيزيائي الدانمركي نيلز بور عام 1913تفسيرًا رائعًا لصيغة بالمر. فطرح بور فكرة أن الإلكترونات تدور في مدارات دائرية حول النواة (**الشكل 7-a7**)، وتعتمد طاقة الإلكترون على نصف قطر المدار. وهناك إمكانية لنزول إلكترون من مدار إلى مدار آخر 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 المربوط بالذرَّة يتصرَّف كموجة محصورة بين حدَّين ينعكس الإلكترون عند كل منهما. يشكِّل هذا الانعكاس موجات موقوفة تكون لها أطوال موجية مُحدَّدة القيَم (**الشكل 7-b7**). ويمثِّل كل من الأطوال الموجية الرنّانة للإلكترون **حالة كم Quantum state**. وتشكِّل الإلكترونات في ذرّة الكم سحابة إلكترونية من حالات كمّية مُتداخِلة حول نواة الذرَّة. ويحدِّد شكل حالة الكم وطاقتها 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.

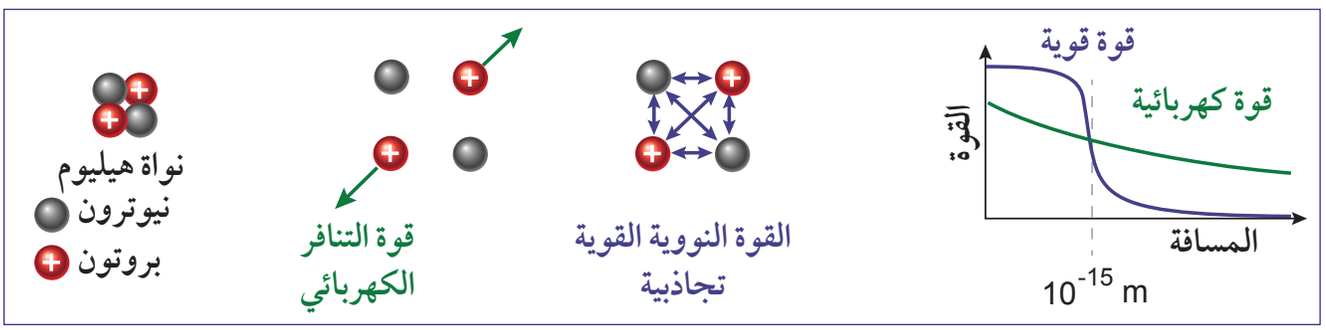
خطوات التجربة

1. ابحث في تاريخ تطوُّر نموذج الذرَّة
2. ما الذي طرحه الفلاسفة اليونانيون؟ متى كان ذلك؟ ما الشيء الذي لم يلحظه النموذج؟
3. ما كانت فكرة جون دالتون؟ متى كان ذلك؟ كيف توصَّل إلى تلك النتيجة؟ وما هي أوجه القصور في طرحه؟
4. ما كانت فكرة جي جي طومسون؟ متى كان ذلك؟ كيف توصَّل إلى تلك النتيجة؟ ما هي 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 في 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 هو 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**.

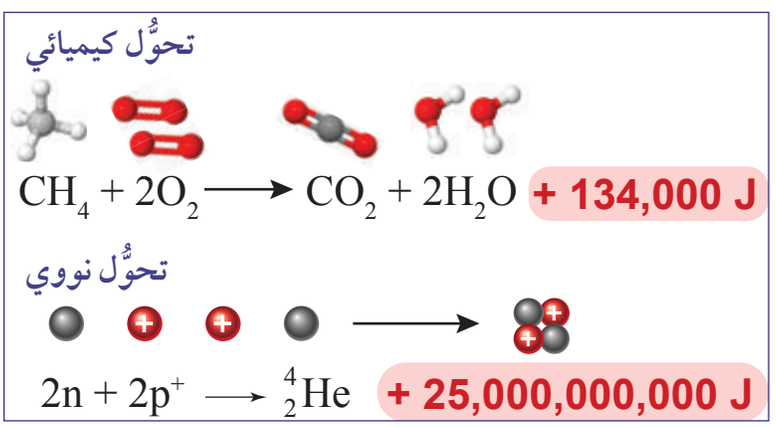


الشكل 7-8 القوى داخل النواة.

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 النوى 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 على 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.

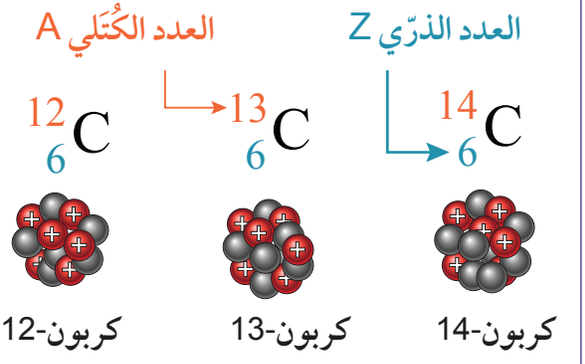
تكون القوى داخل النواة هائلة، حيث تنتج عنها طاقة كبيرة إذا ما تحوَّلت النواة إلى نواة أخرى. فالطاقة الناجمة عن تحوُّل جرام واحد من المادة في تفاعُل نووي تساوي 190,000 من الطاقة التي تنجم عن تفاعُل كيميائي لجرام واحد من المادة نفسها (**الشكل 7-9**).



الشكل 7-9 مقارنة بين كمّية الطاقة الناتجة من تحوُّل 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. ولكنَّ 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 نوى ثلاثة نظائر لعُنصر الكربون.

العدد الكُتَلي A هو مجموع البروتونات والنيوترونات الموجودة داخل نواة الذرَّة.

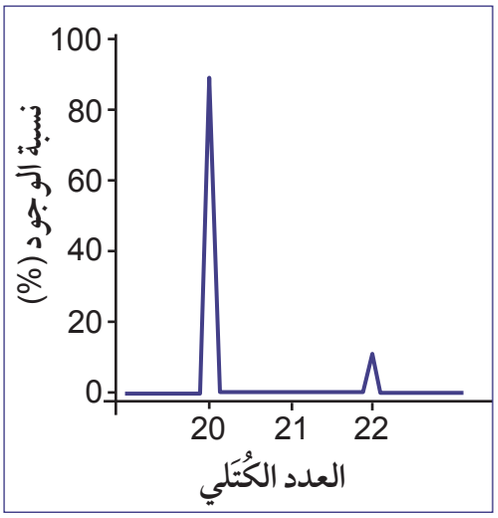
تتميَّز النظائر بأن لها أعدادًا كُتَلية مُختلفة. كربون 12 هو واحد من نظائر عنصر الكربون، ويحتوي على 6 بروتونات و6 نيوترونات، ويكون العدد الكُتَلي له 12. في حين أن الكربون 13 يحتوي على 6 بروتونات و7 نيوترونات ويكون عدده الكُتَلي 13. يمكن كتابة النظير بكتابة رمز العنصر مع وضع العدد الكُتَلي أعلى يسار الرمز، 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 الأكبرمن 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.

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. $6.528 \times 10^{-29}\text{kg}$
   b. $6.528 \times 10^{-26}\text{kg}$
   c. $6.528 \times 10^{-27}\text{kg}$
   d. $3.350 \times 10^{-26}\text{kg}$

3. وضّح الأدّلة 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. عرِّف النيوكليون. ماذا يمثّل عدد النيوكليونات في الذرَّة؟

6. عنصر عدده الكُتلي A = 84 وعدد نيوتروناته N = 48. ما هذا العنصر؟

7. كتلة البروتون تساوي 1836مرَّة كتلة الإلكترون. إذا تمّ حساب كتلة الذرَّة بحساب كتلة البروتونات والنيوترونات داخل النواة فقط، فما هي 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	النظائر المشعّة
Radioactive decay	الانحلال الإشعاعي
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	الخلفيّة الإشعاعية

الاستقرار والنظائر

سؤال للمناقشة

لماذا تكون بعض النظائر مشعّة؟

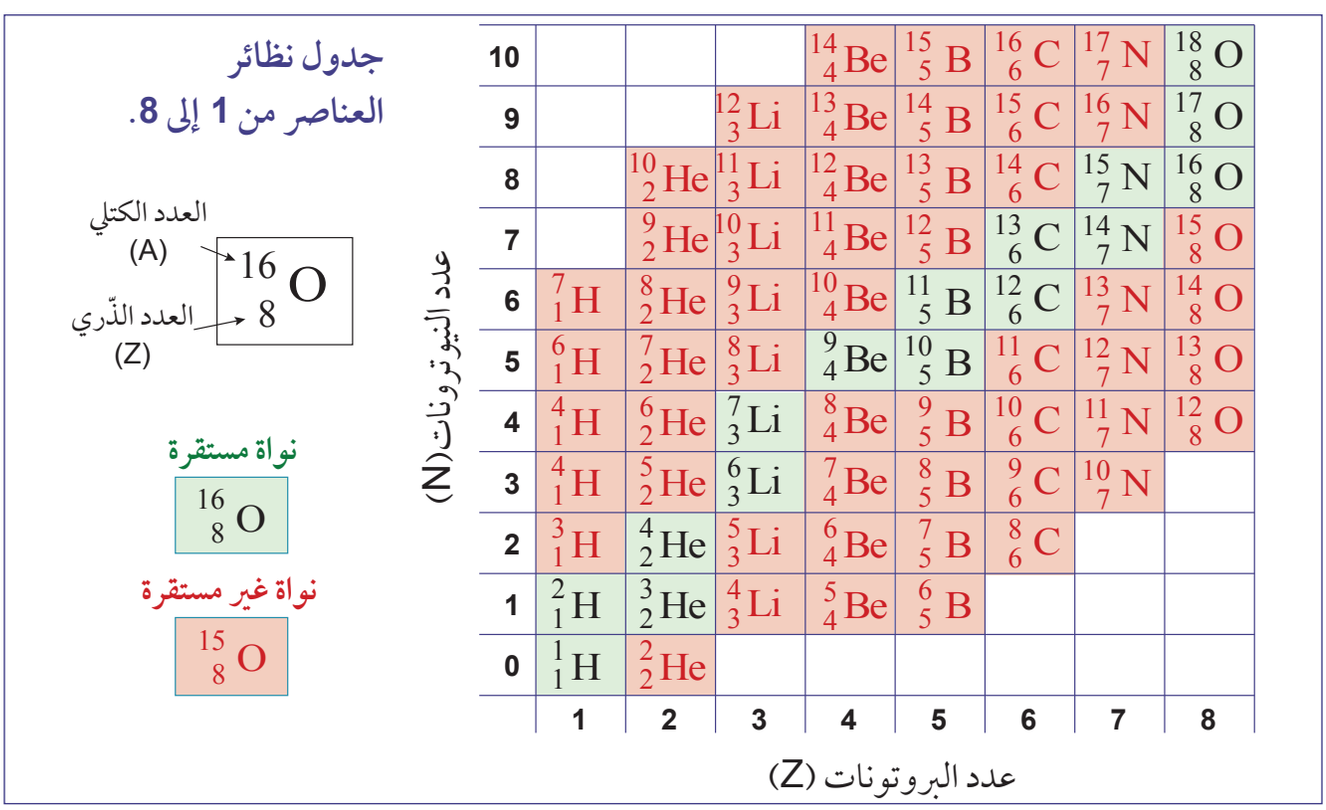
تحتوي كلّ ذرّة من ذرّات الليثيوم على ثلاثة بروتونات. لكنّها لا تتماثل في عدد نيوتروناتها. تحتوي عيّنة مصدر طبيعي من الأرض على:

- 93 % من ذرّات نظير الليثيوم -7.
- 7 % من ذرّات نظير الليثيوم -6.
- لا شيء من نظيرَيِ الليثيوم -5 و -8.

لا نجد أيًّا من نظيرَيِ 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. وتكون النواة التي تشتمل 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.



	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	$^{4}_{1}H$	$^{6}_{2}He$	$^{7}_{3}Li$	$^{8}_{4}Be$	$^{9}_{5}B$	$^{10}_{6}C$	$^{11}_{7}N$	$^{12}_{8}O$
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	$^{1}_{1}H$	$^{2}_{2}He$						

الشكل 7-13 نظائر العناصر الثماني الأولى. تكون النظائر الملوّنة بالأخضر مستقرة في حين أن النظائر الملونة بالأحمرتكون غير مستقرّة.

النشاط الإشعاعي

تتحوّل النوى غير المستقرَّة تلقائيًّا إلى نوى 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 نوى اليورانيوم ببطء إلى نوى 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.

المُعطى: نظير الكربون -14.

العلاقات: المعادلة 7-1: $A = N + Z$

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:

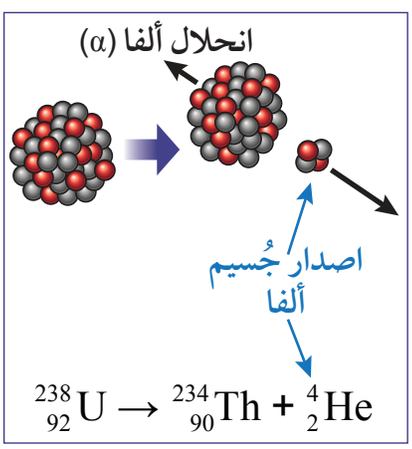
$$N = A - Z = (14 - 6) = 8$$

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 عن 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 يؤدّي إلى تغيّر كهذا.

انحلال ألفا

معلوم أن جُسيم ألفا هو نواة ذرّة الهيليوم، وهو يتألّف من بروتونين ونيوترونين من دون أي إلكترونات، ويُكتب على الشكل $^{4}_{2}He$. 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-239.



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) إلى اليسار يساوي مجموع العددين الذريين إلى اليمين، أي: 92 = 90 + 2
2. أن العدد الكُتَلي (A) إلى اليسار يساوي مجموع عددي الكتلة إلى اليمين: 238 = 234 + 4

يجب أن تكون التفاعلات النووية مُتَّزنة لكي تحافظ على كل من الشحنة والعدد الذرّي. وفي ما يأتي مثالان آخران على انحلال α هما لنظير الراديوم-224 ونظير البولونيوم-212:

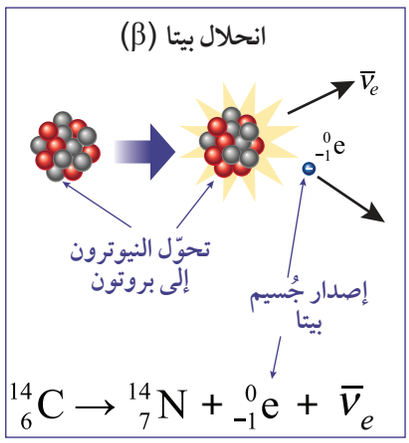
$$^{224}_{88}Ra \rightarrow ^{220}_{86}Rn + ^{4}_{2}He \qquad ^{212}_{84}Po \rightarrow ^{208}_{82}Pb + ^{4}_{2}He$$

انحلال بيتا (β^-)

يحدث في بعض النوى النشطة إشعاعيًّا، أن يتحول النيوترون تلقائيًّا الى بروتون وإلكترون وجُسيم آخر، يُسمّى **نيوترينو مضاد Neutrino**.

$$\underset{\text{نيوترون}}{{}^{1}_{0}n} \rightarrow \underset{\text{بروتون}}{{}^{1}_{1}p} + \underset{\text{إلكترون}}{{}^{0}_{-1}e} + \underset{\text{نيوترينو مضاد}}{{}^{0}_{0}\overline{\nu}_e}$$

يُسمّى هذا التحوُّل **انحلال بيتا Beta decay** (β). 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 هو النظير الناتج؟

المطلوب: النظير الجديد.

المُعطى: انحلال بيتا للصوديوم -24.

العلاقات: لانحلال بيتا، A لا تتغيّر بينما تزداد 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 الماغنيسيوم.
4. العدد الكُتَلي لا يتغيّر، لذلك يكون نظير الماغنيسيوم-24 الناتج هو ${}^{24}_{12}Mg$.

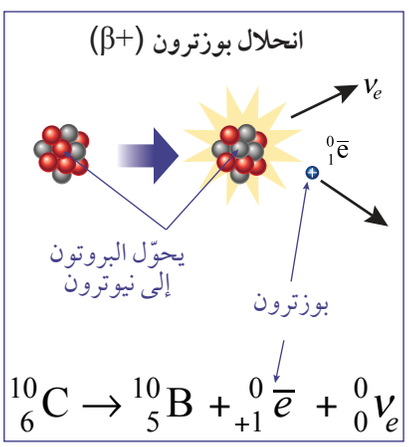
انحلال البوزترون (β+) والنيوترينو والمادّة المضادّة

لاحظ العلماء أنه في عملية انحلال بيتا، هناك مصادر أخرى للطاقة غير تلك الناتجة من الإلكترونات. طرح العالم النمساوي ولفجانج 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 إنريكو 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 كل مساحة مقدارها $1\ cm^2$ كل ثانية، بما فيها مساحة جسدك.

يُرمز إلى النيوترينو في عملية انحلال بيتا برمز النظير ${}^{0}_{0}\nu_e$ بصفرين يرمز أحدهما إلى العدد الكُتَلي ويرمز الثاني إلى العدد الذرّي. ويدل الرمز السفلي e على الإلكترون النيوترينو. 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 ${}^{0}_{1}\overline{e}$ 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. وحقيقة الأمر أن النيوترينو في عملية انحلال بيتا ما هو إلّا نيوترينو مضاد.

- 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.

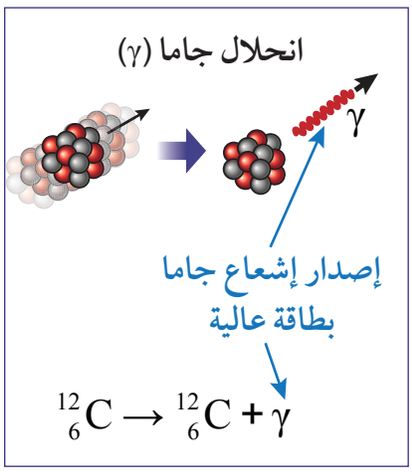
مثالان على انحلال البوزترون (β+)

$${}^{15}_{8}O \rightarrow {}^{15}_{7}N + {}^{0}_{1}\overline{e} + {}^{0}_{0}\nu_e$$

$${}^{22}_{11}Na \rightarrow {}^{22}_{10}Ne + {}^{0}_{1}\overline{e} + {}^{0}_{0}\nu_e$$

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 النوى إشعاع جاما، تتحرّك 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 على شكل طاقة حركيّة للجُسيم الناتج. وتضع الطاقة المتبقيّة النواة في حالة إثارة. تنخفض الذرّة المُثارة الى حالة طاقة أقلّ، عن طريق تحرير إشعاع جاما. تقع إشعاعات جاما في منطقة الطاقة المرتفعة والتردُّد المرتفع 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 يودع طاقة فيها، 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، حيث تمثَّل بمعادلات تفاعُل كيميائي. تمتلك 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 $^{1}_{0}\mathrm{n} + {}^{14}_{7}\mathrm{N}$ $\rightarrow$ النواتج $^{14}_{6}\mathrm{C} + {}^{1}_{1}\mathrm{p}$

موازنة العدد الكُتلي:

العدد الكُتلي الكلّي للمُتفاعلات = العدد الكُتلي الكُلّي للنواتج

$1 + 14 = 14 + 1$

موازنة 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 عدد الشحنة الكُلّي للمُتفاعُلات مساويًا لعدد الشحنة الكلّي 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^+	${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + {}^{0}_{+1}e$	$Z \rightarrow Z-1$	لا تغيير	$N \rightarrow N+1$
γ	${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z}Y + {}^{0}_{0}\gamma$	لا تغيير	لا تغيير	لا تغيير

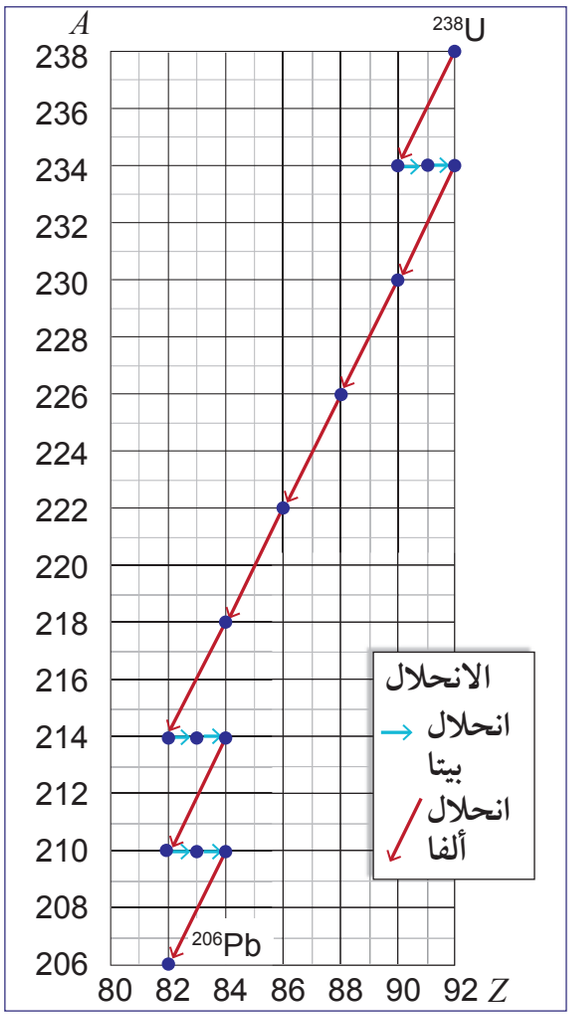
الجدول 7-2 تفاعُلات الانحلال الإشعاعي.

لاحظ أنّ العدد الكُتَلي لا يتغيَّر في كل من انحلاليّ بيتا وجاما.

يبقى كل من العدد الذرّي والعدد الكُتَلي وعدد النيوترونات، على حاله 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 التي تصبح فيها 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 3

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.

المُعطى: الكتلة الذرّيّة A = 210

العدد الذرّي Z = 83

الحل:

a. عندما يتحرَّر جُسَيم بيتا، لا تتغيَّر الكُتلة الذرّيّة؛ لكن يزداد العدد الذرّي بمقدار 1.

$$^{210}_{83}Bi \rightarrow {}^{210}_{84}X + {}^{0}_{-1}e$$

b. عندما يتحرَّر جُسَيم ألفا، تتناقص الكُتلة الذرّيّة بمقدار 4 وينقص العدد الذرّي بمقدار 2.

$$^{210}_{84}X \rightarrow {}^{206}_{82}Y + {}^{4}_{2}\alpha$$

تطبيقات المواد النشطة إشعاعيًّا

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 البوزيترون). 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.

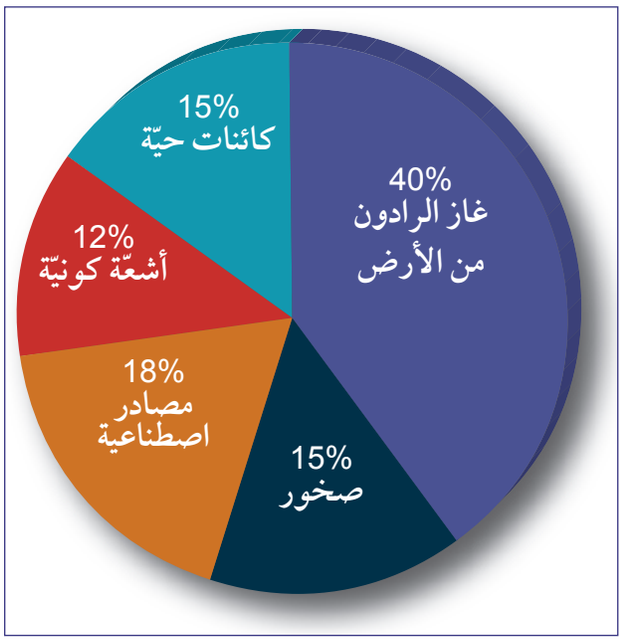
النظائر المُشعّة في الصناعة

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 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 استُخدم 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 أشعة إكس، واختبارات الأسلحة النووية، ومخلَّفات محطات الطاقة النووية.

هل الخلفية الإشعاعية مُضرّة؟

تأتي الخلفية الإشعاعية من مصادر طبيعية، نحن على تماسّ معها. لكن ما هو 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 7-2

1. يتعرَّض اليورانيوم-235 لانحلال بيتا بحساب معادلة التفاعُل النووي الآتية:

$$^{235}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{A}_{Z}?+ {}^{0}_{-1}\mathrm{e}$$

ما هو العُنصر والنظير الناتج؟

2. يتعرَّض اليورانيوم-235 لانحلال إشعاعي، فينتج الثوريوم-231 وفق المعادلة الآتية:

$$^{235}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{231}_{90}\mathrm{Th} + {}^{A}_{Z}?$$

   a. ما هو العدد الذرّي للجُسيم الناتج؟
   b. ما اسم هذا الجُسيم؟ وما نوع الانحلال؟

3. تحدث عملية انحلال من مستويين، تبدأ بالأمريسيوم-240 وتنتهي بالبلوتونيوم-236، وهي موضَّحة بأسهم على القسم المرتبط بمخطَّط النيوكلونات. أشيرَ إلى المستويين بأسهم وهُما مُعلّمان بالرمزَيْن 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 للنوى الناتجة.

5. ينحلّ البلوتونيوم-239 بانحلال ألفا. اكتب معادلة هذا التفاعُل.

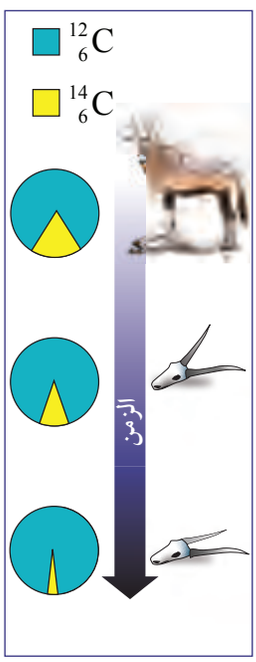
6. قم ببحث، واكتب حول استخدام لنظيرٍ مُشعّ لم يتمّ ذكره في الكتاب.

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 الحي 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 الجسم. 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 النوى المتبقية دون انحلال باستخدام المعادلات:

$$A = A_0 e^{-\delta t} \text{ و } N = N_0 e^{-\delta t}$$

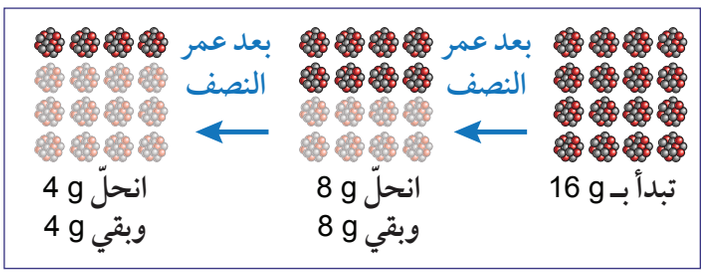
المفردات

عمر النصف	Half-life
ثابت الانحلال	Decay constant
معدَّل الانحلال	Rate of decay
البيكريل	Becquerel

عُمْر النصف

تنحلّ النظائر المُشعّة تلقائيًّا. ومع ذلك لا يمكن التنبُّؤ بانحلال نواة بمفردها، لأن النشاط الإشعاعي يختار النوى عشوائيًّا. ولحسن الحظ لا يتوجّب التنبُّؤ بالانحلالات كل على حدة. تحتوي عيّنة نموذجية من المادة على 10^{20}نواة. وما يهمُّنا هو معدَّل سلوك هذا العدد من النوى. لذلك نقيس الزمن المفيد، وهو الذي يستغرقه انحلال 50% من تلك النوى؛ هذا الوقت يُسمّى **عمر النصف Half-life**.

يوضِّح **الشكل 7-26** مفهوم عمر النصف. إذا بدأنا بعيّنة كتلتها 16 g، يبقى منها50% بعد عمر النصف، 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 4

كم سنة تلزم كمّية من السيزيوم-137 لكي تنحلّ، وتصل إلى 1/16 من الكمّية الأصلية؟

السؤال: عدد السنوات

المعطيات: عمر النصف لنظير السيزيوم-137 هو 30.2 سنة (من الجدول 7 -3)

العلاقة: 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 إلى1/16من القيمة الأصلية.

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. أبعد 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 أبعد تلك النقود عن الصينية.
5. أعد الخطوتين 3 و 4 حتى لا يبقى أي نقود.
6. أنشئ رسمًا بيانيًّا لعدد قطع النقود غير المنحلّة على المحور y، وعدد الإعادات (عمر النصف) على المحور X.

الشكل 7-27 قطع نقود معدنية.

الجدول

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.

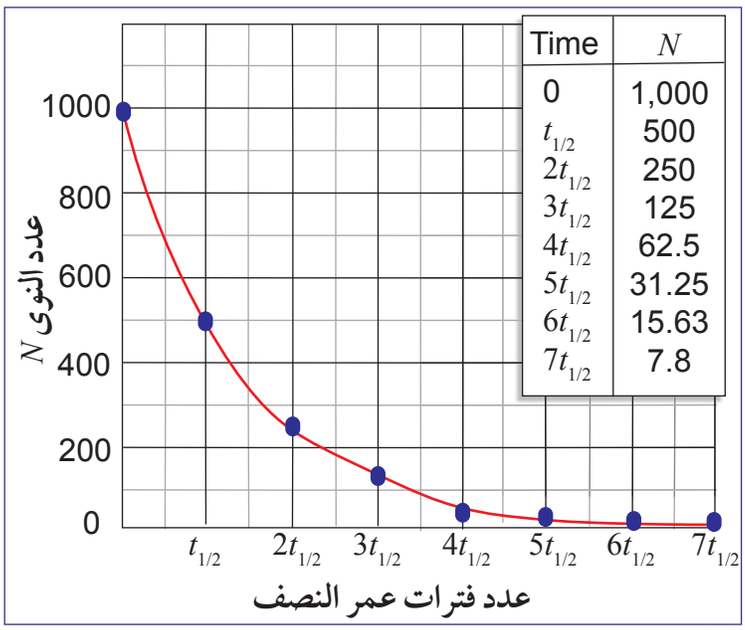
b. إذا استخدمنا عشرة أمثال عدد النقود، فهل تعتقد أن الجزء الذي انحلّ باتجاه الكتابة في أي عملية نثر سيكون أقرب إلى 50%. علّل إجابتك.

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/ نوى 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 النوى التي تنحلّ في وحدة الزمن، على عدد فترات عمر النصف المنقضية (n). إذا كان العدد الأصلي للنوى المُشعّة (N_o)، فإن عدد النوى المشعّة المتبقّية (N) بعد عدة فترات (n) من عُمر النصف يُعطى **بالمعادلة 7-2**.



الشكل 7-28 الانحلال الإشعاعي.

2-7 معدل الانحلال

$$N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^n$$

N	عدد النوى المشعة المتبقّية
N_O	العدد الأصلي للنوى المشعّة
n	عدد فترات عمر النصف

مثال 5

نظير مُشعّ يحتوي على 128 ذرّة، احسب عدد فترات عمر النصف التي يحتاج إليها هذا النظير لكي تبقى منه ذرّتان غير منحلتين فقط.

السؤال: 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 النوى 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 3-7**.

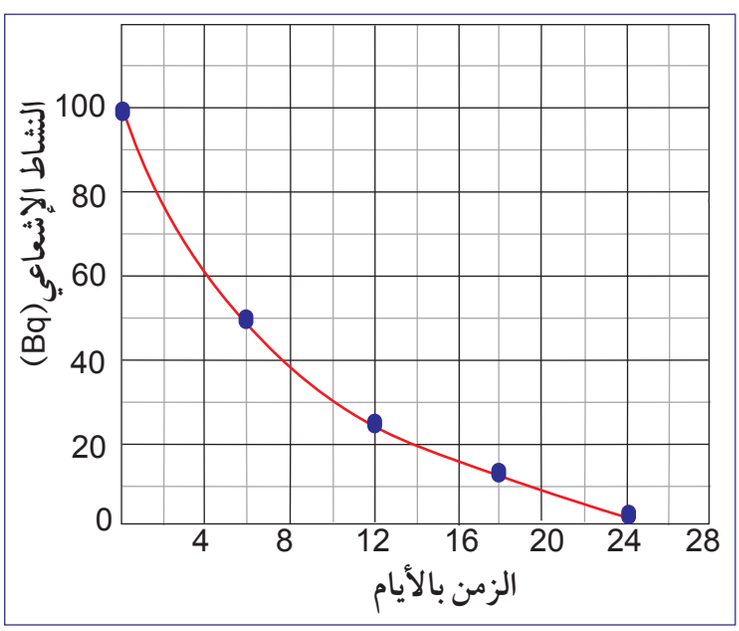
3-7	ثابت الانحلال		
	$\lambda = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}}$	λ	ثابت الانحلال (1/s)
		$\ln(2)$	0.693
		$t_{1/2}$	عمر النصف (s)

إذا كان كل من ثابت الانحلال λ والزمن المستغرق t معروفًا، فإن عدد النوى المتبقّية من دون انحلال يُعطى **بالمعادلة 4-7**.

4-7	معدَّل الانحلال		
	$N = N_0 e^{-\lambda t}$	N	عدد النوى أو النشاط الإشعاعي
		N_0	العدد الأصلي للنوى أو النشاط الاشعاعي الابتدائي
		λ	ثابت الانحلال (1/s)
		t	الزمن المُستغرَق (s)

مُعدَّل الانحلال

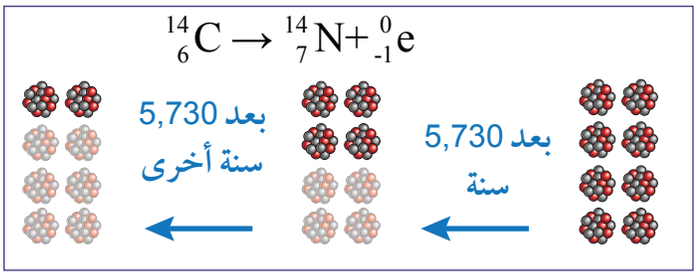
إذا كان المصدر مُشعًّا بشكل نشط، يكون مُعدَّل انحلاله مرتفعًا. **معدَّل الانحلال Rate of decay** هو عدد النوى التي تنحلّ بالنسبة إلى الزمن، وغالبًا ما يُسمّى بالنشاط الإشعاعي للنظير المُشعّ. وحدة قياس النشاط الإشعاعي هي البيكريل (Bq). وتعرف بأنها انحلال واحد خلال ثانية واحدة. قد يكون من الصعب حساب عدد النوى المتبقّية الموجودة في عيّنة من المادة. ولذلك من الأسهل إيجاد عدد النوى 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 النوى 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 6

عيّنة سرخس قديمة تحتوي على 1/8 ذرّات الكربون-14 لكل جرام، بالمقارنة مع الكائن الحي.

a. احسب ثابت الانحلال للكربون-14

b. كم يبلغ عُمر تلك العيّنة.

السؤال:

a. احسب ثابت الانحلال λ

b. الزمن المُستغرَق t منذ بدء الانحلال

المعطيات:

عدد النوى المتبقّية بالنسبة إلى النوى الابتدائية $\frac{N}{N_0} = 1/8$

عمر النصف للكربون-14 هو (سنة 5730 $= t_{1/2}$)

العلاقة:

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}}$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

الحل:

a. نحسُب ثابت الانحلال أوّلًا

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}} = \frac{0.693}{5,730} = \boxed{1.2\times10^{-4} \text{ سنة}}$$

b. لحساب الزمن المنقضي، نستخدم المعادلة 4.7

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \Rightarrow \frac{1}{8} = 1e^{-(1.2\times10^{-4})t}$$

$$\ln\left(\frac{1}{8}\right) = \ln(e^{-(1.2\times10^{-4})t})$$

$$-2.08 = -1.2\times10^{-4} t$$

$$t = \boxed{17,333 \text{ سنة}}$$

تقويم الدرس 7-3

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؟

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 فقط على نظير اليورانيوم-238. 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 النوى المُشعّة في مادة إلى نصف كمّية النوى 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 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 بواسطة الطاقة المضغوطة المتوفرة 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 يمكن 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 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 القديمة 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	التفاعُل النووي
Nuclear fission	الانشطار النووي
Chain reaction	التفاعُل التسلسلي
Nuclear energy	الطاقة النووية
Nuclear fusion	الاندماج النووي

تكافُؤ الكتلة–الطاقة

لا شكَّ أن معظم الناس على دراية 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 موجزة لمفهوم قوي يتلخَّص في أن الطاقة والكتلة قابلتان للتبادُل. تصف **المعادلة 7-5** 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**.

5-7	تكافوء الكتلة – الطاقة	E	الطاقة (J)
	$E = mc^2$	m	الكتلة (kg)
		c	سرعة الضوء = 3×10^8 m/s

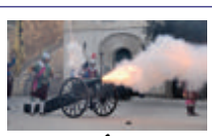
تربط معادلة أينشتاين الطاقة بكتلة الجسم الساكن. وهذا يعني أن كلّ المواد لديها طاقة وإن لم يكن لها طاقة حركية، أو طاقة وضع، أو طاقة حرارية، أو أي نوع آخر من الطاقة. تُسمّى تلك الطاقة **طاقة السكون Rest energy**، وهي موجودة في المادة نفسها، سواء أكانت المادة ساكنة أم مُتحرِّكة، فالمادة هي طاقة، والطاقة هي مادة.

الطاقة المُخزَّنة في النواة

العامل c^2 هو رقم هائل 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 الناجمة 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 طلقة المدفع المقذوفة 5×10^3 J من الطاقة بسبب سرعتها، في حين تمتلك المادة النووية 9×10^{16} J من الطاقة السكونية.

ثقل كُتلته 1 kg مرفوع إلى علوّ 1 m
$E_p = 9.8$ J



قنبلة مدفع كُتلتها 1 kg مقذوفة بسرعة 100 m/s
$E_k = 5 \times 10^3$ J

مادة نووية كُتلتها 1 kg
$E_n = 9 \times 10^{16}$ J

الشكل 7-32 أنواع مختلفة من الطاقة.

تبدو كمّية الطاقة السكونية كبيرة جدًّا لدى 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 7-5** 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.

افترض تفاعلًا كيميائيًّا يحترق فيه الميثين مع الأكسجين لينتج ثاني أكسيد الكربون وماء. ينتج عن 1 g من الميثين والأكسجين 10,032 J من الطاقة، وهي كمّية كبيرة في حساب الكيمياء. لكن إذا حَوّلنا هذه الكمية من الطاقة إلى كتلة، نحصل على 10^{-10} g فقط، وهي كمية صغيرة جدًّا يصعب قياسها.

$$E = mc^2 \quad \rightarrow \quad m = \frac{E}{c^2} = \frac{10{,}032\ \text{J}}{9\times10^{16}\ \text{m}^2/\text{s}^2} \qquad 1.1\times10^{-13}\ \text{kg} = (1.1\times10^{-10}\ \text{g})$$

تكون كتلة النواتج أقلّ من كتلة المتفاعلات، لكنّ هذا الفرق صغير جدًّا إلى درجة يمكننا معها اعتبار الكتلة محفوظة في التفاعلات الكيميائية.

معادلات المادَّة المُضادَّة

عندما تتَّصل 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؟

$$E = mc^2 = (0.001\ \text{kg})(9\times10^{16}\ \text{m}^2/\text{s}^2) = 9\times10^{13}\ \text{J}$$

الطاقة الناتجة عن تفاعل 1 g من المادّة المُضادّة مع 1 g من المادّة العادية تساوي 9 مليارات مرّة من الطاقة الناتجة عن حرق 1 g من الميثين مع 1 g من الأكسجين.

مثال 7

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 %

المُعطى: $E = 44{,}000\ \text{J}$

العلاقات: $E = mc^2$، سرعة الضوء $c = 3\times10^8\ \text{m/s}$.

الحل:

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{44{,}000\ \text{J}}{9\times10^{16}\ \text{m}^2/\text{s}^2} = 4.9\times10^{-13} = 4.9\times10^{-10}\ \text{g}$$

وحدة الكتل الذرية

معلوم أن كتلة البروتونات والنيوترونات صغيرة جدًّا إلـى درجة أن علماء الطاقة النووية يستخدمون غالبًا وحدة الكتل الذرّية. تُعرّف وحدة **الكتل الذرّية Atomic mass unit (amu)** بواحد من إثني عشر (1/12) من كتلة ذرّة الكربون–12. وبالتالي فإن الكتلة الذرّية للكربون–12 هي تحديدًا 12 amu.

وحدة الكتل الذّرّيّة (amu) = 1.661×10^{-27} kg.

تبلغ كتلة البروتون 1.6726×10^{-27} kg (أكبر قليلًا من 1 amu). لذلك يمكننا القول إن وحدة كتلة البروتون تعادل 1.0073 amu؛ وبالمثل 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

$$E = mc^2 = \left(1.661 \times 10^{-27}\right) \times \left(3 \times 10^8\right)^2 = 1.49 \times 10^{-10}\,\text{J}$$

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: $1\ \text{eV} = 1.602 \times 10^{-19}$ 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 8

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

المعطى: 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

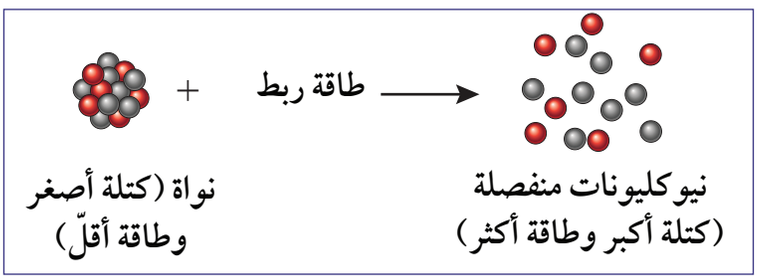
الحل: الفرق في طاقة السكون للجُسَيْمَيْن هو الفرق بين كتلتَيْهما مضروبًا في c^2:

$$\Delta E = (\Delta m)c^2 = (1.675 - 1.673)\left(\times 10^{-27}\right) \times \left(3 \times 10^8\right)^2 = 1.8 \times 10^{-13}\,\text{J}$$

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 نوىً 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. 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 7-32** كيف يكون للنواة المدمجة كتلة أصغر؛ وبالتالي طاقة أقل. ويؤدّي تزويدها بطاقة تساوي طاقة الربط إلى فصل مُكوِّنات النواة. يشكِّل مجموع كتل هذه النيوكليونات الفردية كتلة أكبر من النواة، وبالتالي طاقة أكثر.



الشكل 7-33 نقص الكتلة.

للنواة طاقة سكونية أقلّ وكتلة أصغر من النيوترونات والبروتونات المنفردة.

نواة الهيليوم-4

عند النظر في حالة نواة الهيليوم-4 التي تحتوي على بروتونين ونيوترونين، نجد أنّ كتلة كل من البروتونات والنيوترونات الفردية تبلغ 4.0319 amu. فكل بروتون له كتلة 1.0073 amu، وكل نيوترون له كتلة 1.0087 amu.

البروتونان: $m_{2p} = 2\times(1.6726\times10^{-27}\ \text{kg}) = 2\times1.0073\ \text{amu} = 2.0146\ \text{amu}$

النيوترونان: $m_{2n} = 2\times(1.6749\times10^{-27}\ \text{kg}) = 2\times1.0087\ \text{amu} = 2.0174\ \text{amu}$

مجموع كتلة النيوكليونات: $m_{2p} + m_{2n} = 4.0320\ \text{amu}$.

لكنَّ الكتلة المعروفة لنواة الهيليوم-4 هي 4.0015 amu. وهذا أصغر من مجموع كتلة كل من البروتونين والنيوترونين الفردية بمقدار 0.0305 amu. يُمثِّل الفرق في الكتلة الذي يبلغ 0.0305 amu نقص الكتلة للهيليوم-4، ويساوي 28.3 MeV بوحدات الطاقة. ويمكن حساب هذا بضرب نقص الكتلة في 931.5 MeV.

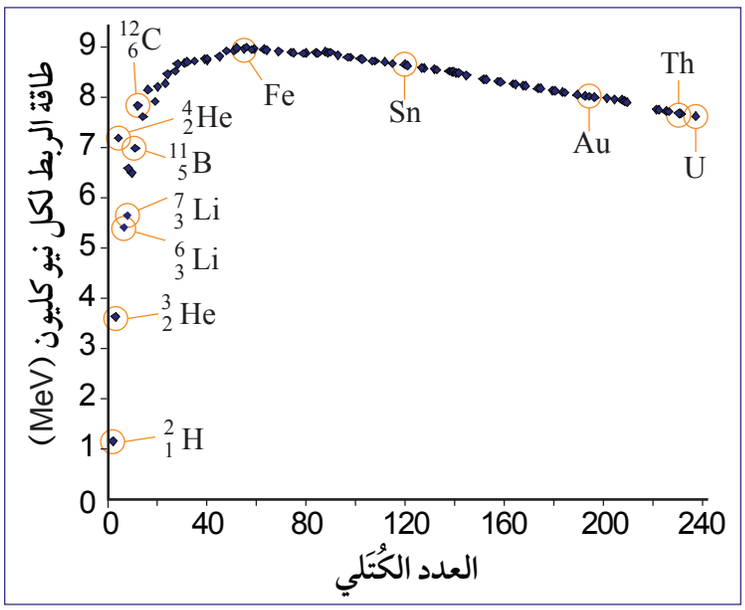
$$E_b = (0.0305\text{amu}) \times (931.5\text{MeV/amu}) = 28.411\ \text{MeV}$$

طاقة الربط لكل نيوكليون

تعدّ طاقة الربط لكل نيوكليون كمّية مفيدة في الفيزياء النووية، وهي طاقة الربط E_b مقسومة على عدد النيوكليونات A. ففي الهيليوم-4 تكون طاقة الربط لكل نيوكليون (E_b/A) وتساوي:

$(28.411\ \text{MeV}) / 4 = 7.10275\ \text{MeV}$.

يوضّح **الشكل 7-34** أن طاقة الربط لكل نيوكليون تزداد بازدياد العدد الكُتَلي الذرّي، حتى تصل إلى عنصر الحديد 56-Fe. بعد ذلك تقلّ طاقة ربط النيوكليون ببطء بزيادة العدد الكُتَلي الذرّي 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 نوى 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 9

احسب طاقة الربط لنواة الكربون–12، إذا كانت كتلة النواة 11.997 amu .

المطلوب: طاقة ربط النواة E_b.

المعطى: كتلة نواة الكربون–12، $m = 11.997\ \text{amu}$

الحل: طاقة الربط للنواة هي نقص الكتلة نفسه. تحتوي نواة الكربون – 12 على 6 بروتونات و 6 نيوترونات. كتلة 6 بروتونات و6 نيوترونات هي:

$$m_{6p} + m_{6n} = (6 \times 1.0073) + (6 \times 1.0087) = 12.096$$

الفرق بين الكتلتين هو: $12.096 - 11.997 = 0.099\ \text{amu}$

وبالتالي فإن طاقة الربط هي: $0.099 \times 931.5 = 92.22\ \text{MeV}$

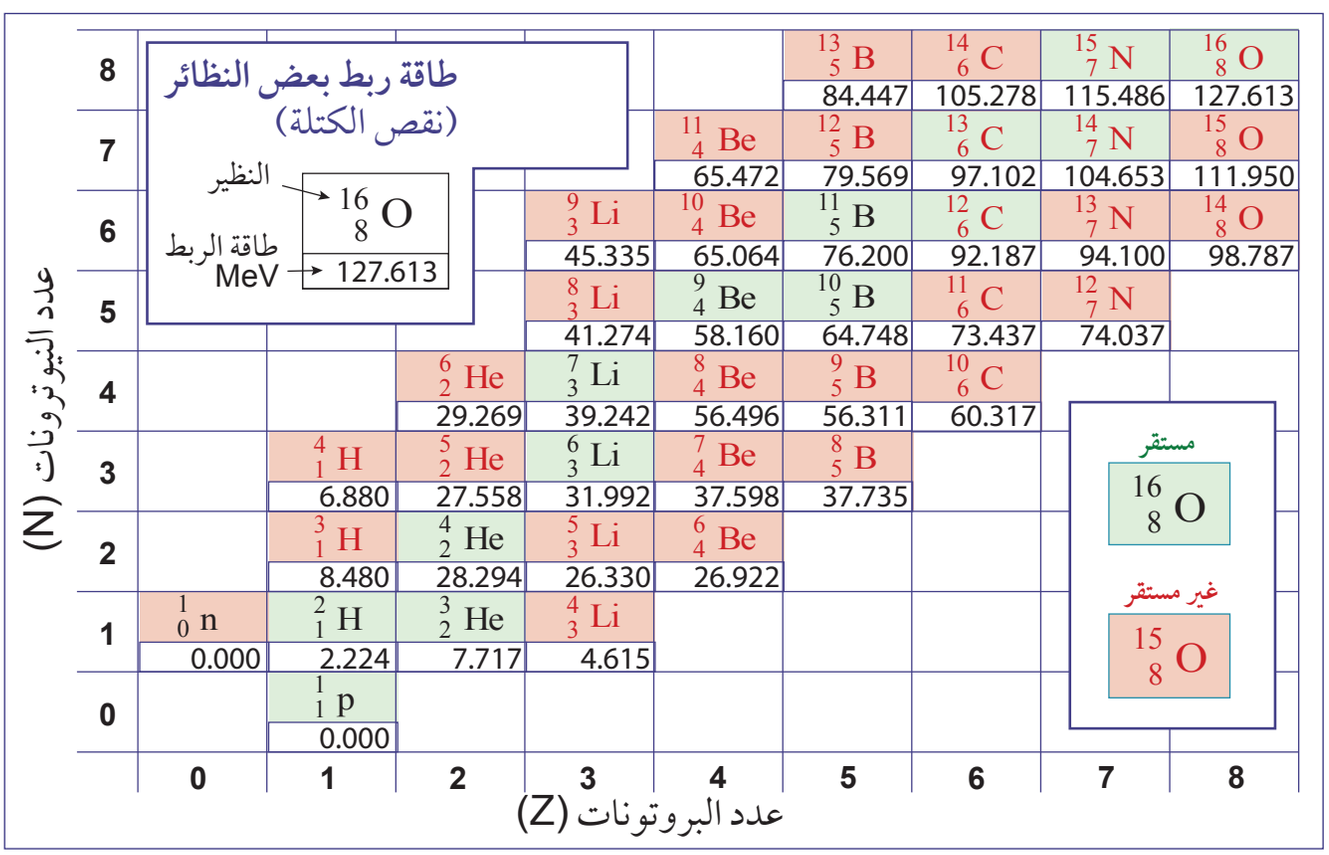
توازُن الطاقة في التفاعُلات النووية

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
	$^{3}_{1}H$	+	$^{2}_{1}H$	$\rightarrow$ $^{4}_{2}He$	+	$^{1}_{0}n$	
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.

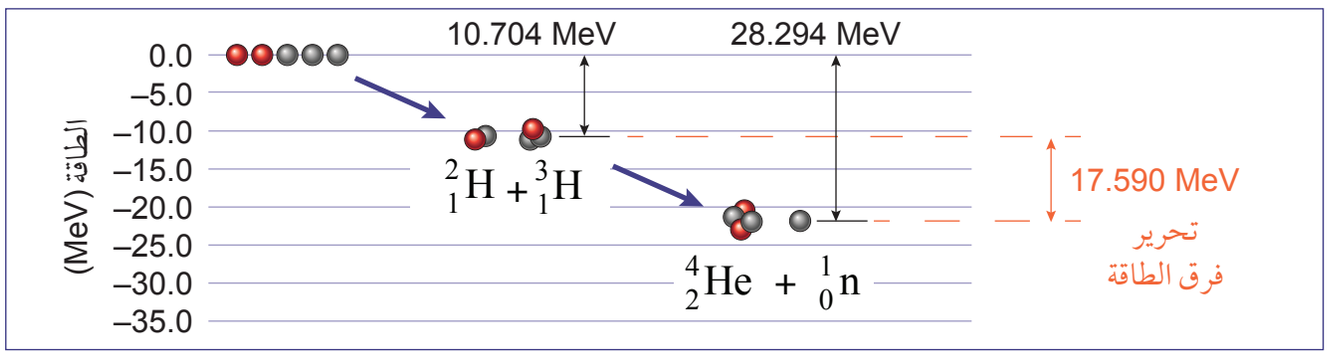
1. اجمع طاقات ربط المُتفاعِلات.
2. اجمع طاقات ربط النواتج.
3. الطاقة الناتجة من التفاعل هي الفرق بين طاقة ربط النواتج وطاقة ربط المتفاعلات. لقد أهملنا الإلكترونات في هذه الحالة، لأن هناك إلكترونين على طرفَي التفاعل. إلّا أن تأثير الإلكترونات يجب أن يؤخذ في الحسبان في بعض التفاعلات.



الشكل 7-36 طاقة الربط (نقص الكتلة) بوحدة MeV لبعض النظائر.

معنى طاقة الربط

تعلَّمتَ في الكيمياء أن لمجموعة من الذرّات طاقة كليَّة مختلفة إذا تم استخدامها للحصول على مُركّبات كيميائية مختلفة. يصح الأمر نفسه في البروتونات والنيوترونات داخل النواة. تمثِّل طاقة الربط 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 10

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 تفاعل.

المُعطى: 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 ربط المتفاعلات هي:

$$8.480 + 28.294 = 36.774 \text{ MeV}$$

وطاقة ربط النواتج هي 39.242 MeV.

الطاقة الناتجة من التفاعل هي:

$$39.242 - 36.774 = \boxed{2.468 \text{ MeV}}$$

فرق الطاقة موجب، يعني ذلك أن التفاعل ينتج الطاقة.

التفاعُلات النووية مُقابِل التفاعُلات الكيميائية

التفاعُل النووي Nuclear reaction هو 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 تغيير ذرّات عنصر إلى ذرّات عنصر آخر. ولا تغيّر التفاعُلات الكيميائية النظائر إلى نظائر مختلفة.

التفاعُلات النووية تُنشئ عناصر جديدة والتفاعُلات الكيميائية تُنشئ 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 فئات للتفاعُلات النووية:

1. التفاعُلات النووية التلقائية.
2. تفاعُلات الانشطار النووي.
3. تفاعُلات الاندماج النووي.

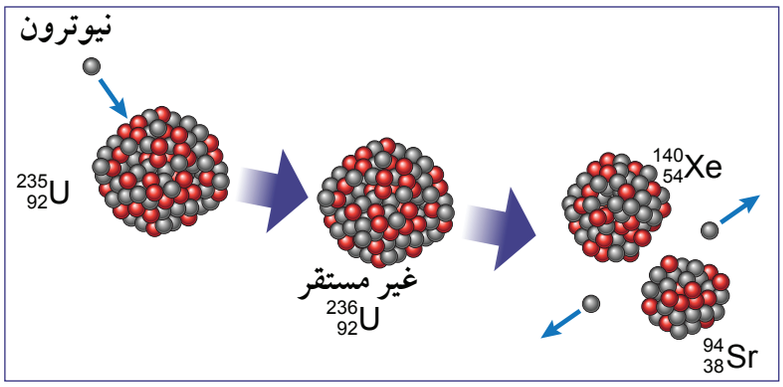
التفاعُلات النووية التلقائية

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.

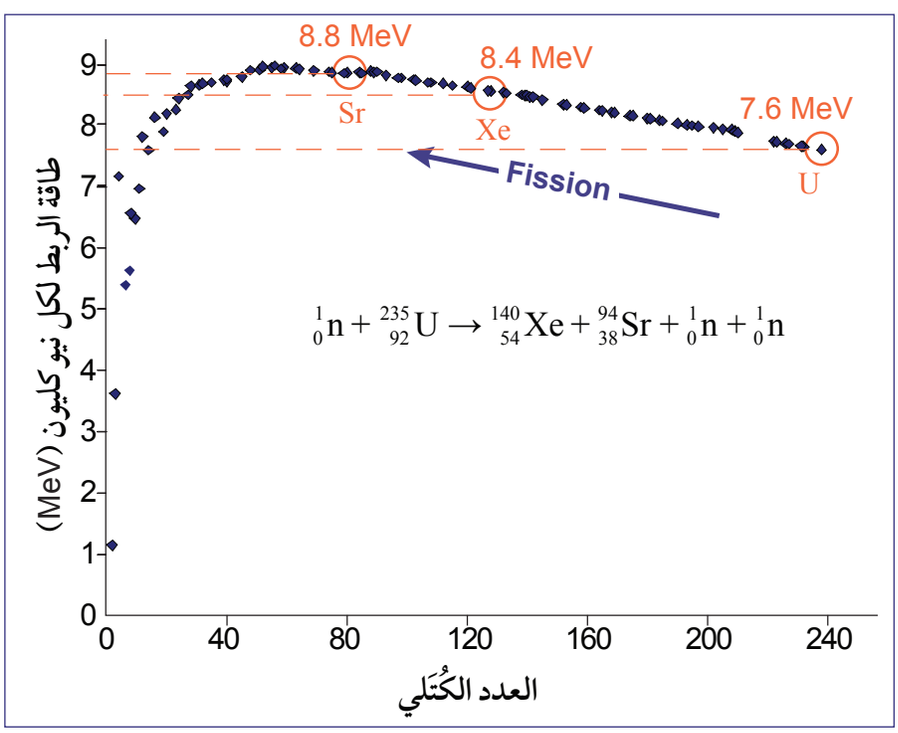


الشكل 7-38 تفاعُل انشطار نووي.

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.

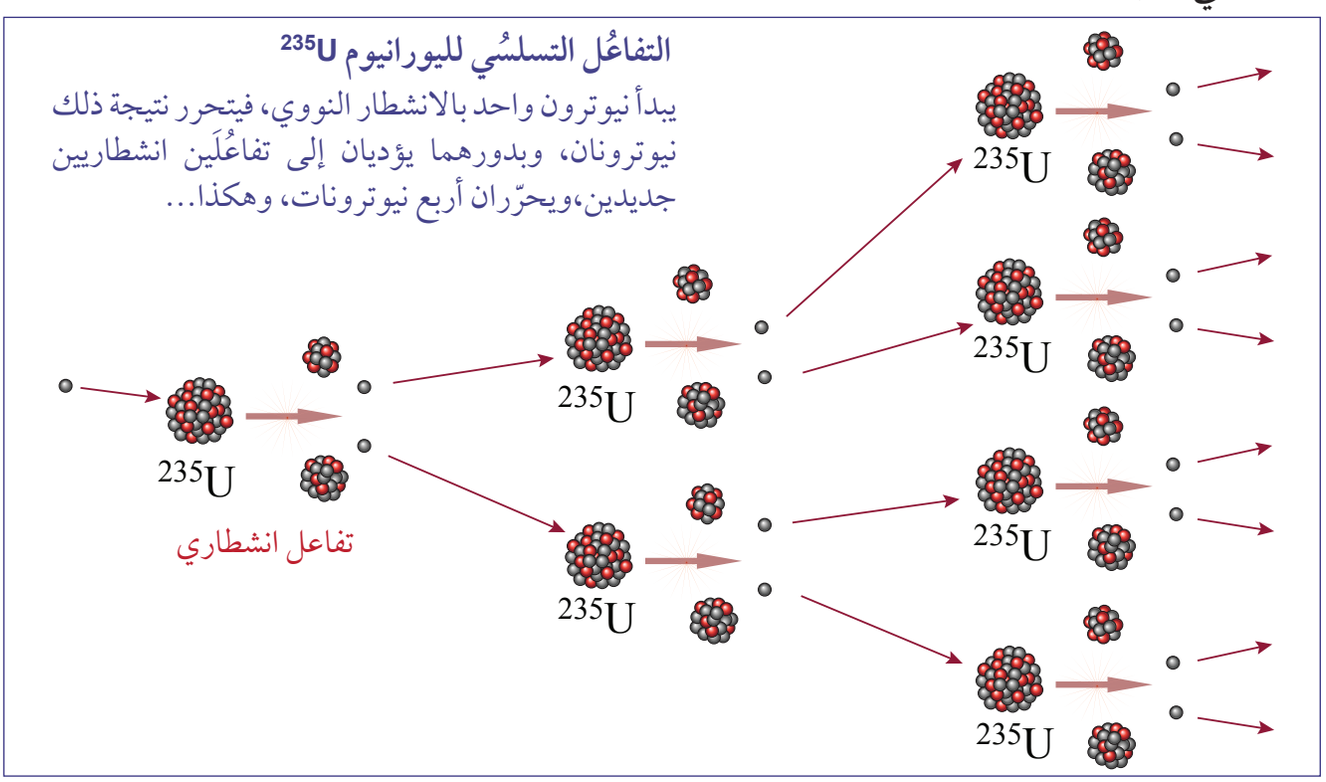
يمكن تقدير الطاقة المُتحرِّرة من هذا التفاعُل النووي، بحساب توازُن طاقة الربط من **الشكل 7-39**، حيث نرى أن طاقة الربط لكل نيوكليون لليورانيوم والزينون والسترونشيوم هي تقريبًا 7.6 و 8.4 و 8.8 MeV على التوالي. فالطاقة المتحرِّرة تساوي تقريبًا:

$$E_{\text{متحررة}} = (8.4\ \text{MeV}) \times A_{Xe} + (8.8\ \text{MeV}) \times A_{Sr} - (7.6\ \text{MeV}) \times A_{U}$$
$$= (8.4\ \text{MeV}) \times 140 + (8.8\ \text{MeV}) \times 94 - (7.6\ \text{MeV}) \times 235 = 217\ \text{MeV}$$

وهذا قريب جدًّا من الطاقة الفعلية المُتحرِّرة، وهي 208 MeV.

التفاعُل التسلسُلي

قد يسبِّب قذف ذرّة $^{235}_{92}U$ بنيوترون واحد انشطارًا نوويًّا، وينتج منه نيوترونان. فإذا اصطدم النيترونان الناتجان مع ذرَّتين أُخريين 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 التسلسلي Chain reaction** (**الشكل 7-40**). لكي يحدث التفاعُل التسلسُلي يجب أن يكون هناك احتمال كبير أن يصل كل نيوترون إلى نواة أخرى قبل 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 التسلسلي أن يحدث.



الشكل 7-40 تفاعُل تسلسُلي.

تشير مفردة **الطاقة النووية Nuclear energy** عمومًا إلى تفاعُلات الانشطار النووي التي يُحافَظ على استمراريتها من خلال التفاعُل التسلسلي. 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 التسلسُلية بتحويل الكتلة إلى طاقة. فالطاقة النووية هي شكل نظيف ومتجدِّد من الطاقة أصبح متاحًا من خلال معادلة أينشتاين. ولكن لسوء الحظ، 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.

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.

الشكل 7-42 اختبار بيكر.

الإيجابيات

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 للموظفين والمواد المُشعّة.

السلبيات

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 هي مخاطر الانحلال الإشعاعي على الحياة والصحة التي ظهرت إلى العلن بعد انفجار مُفاعِل تشيرنوبيل وكارثة فوكوشيما النووية؟
الموادّ المطلوبة	الاتصال بشبكة الإنترنت، وكتب بحث وورق ملصقات

انفجار مُفاعِل تشيرنوبيل

الشكل 7-43 محطة تشيرنوبيل للطاقة النووية.

تعتبر كارثة مُفاعِل تشيرنوبيل أسوأ كارثة نووية حتى الآن. ففي العام 1986، وأثناء اختبار للسلامة استهدف واحدًا من مُفاعِلات تشيرنوبيل في الاتحاد السوفياتي الأسبق، لم يستجب المُفاعِل كما هو مخطَّط له. وبدأت تتوالى سلسلة من التفاعُلات النووية الخارجة عن السيطرة. وأدى التفاعُل التسلسُلي ذاك 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.

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.

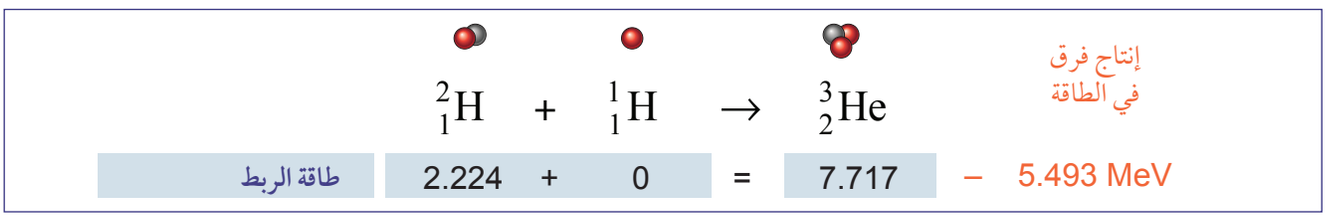
سؤال البحث

الشكل 7-44 فوكوشيما بعد كارثة التسونامي.

ابحث في آثار كل من الكارثتين، مركّزًا في سجلّات الوفيات والأمـراض. ما هي 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؟

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، ومختلف العمليات البيولوجية والفيزيائية على الأرض. يؤدي الاندماج النووي داخل الشمس إلى تفاعل هيدروجين-1 وهيدروجين-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:

$$\left(\frac{1}{3}\right) \times 5.493 \text{ MeV} = 1.831 \text{ MeV/نيوكليون}$$

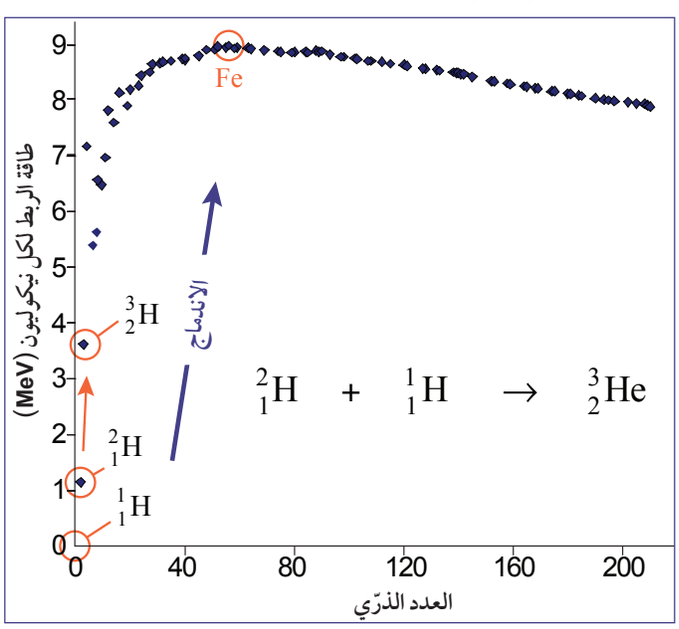
الطاقة الناتجة من الانشطار مقابل الاندماج

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.

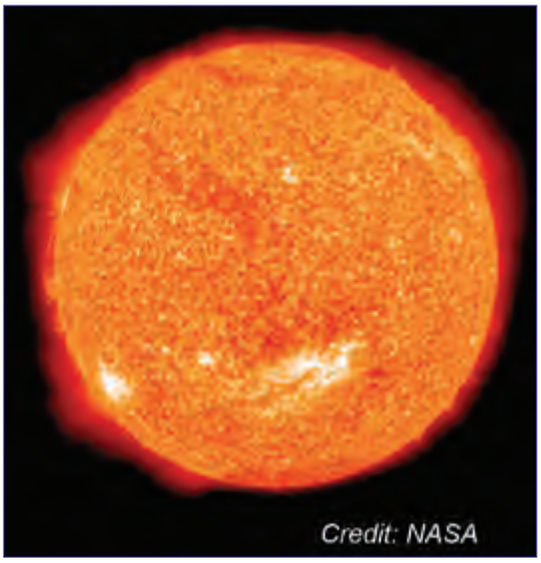
يظهر **الشكل 7-46** كيف يبدو تفاعل الاندماج في **الشكل 7-45** على الرسم البياني لطاقة الربط للنيوكليون. تنتج تفاعلات الاندماج النووي الطاقة ما دامت المُتفاعِلات والنواتج أخف من الحديد. تجمع تفاعلات الاندماج هذه نوى خفيفة لتشكِّل نوى أثقل. وقد تحتاج تفاعلات الاندماج التي تعطي نواتج أثقل من الحديد الطاقة بدلًا من أن تُنتجها. وهذه عملية مهمّة تحدث خلال موت النجوم.



الشكل 7-46 الاندماج النووي على الرسم البياني لطاقة الربط لكل نيوكليون.

الاندماج يمدّ الشمس بالطاقة

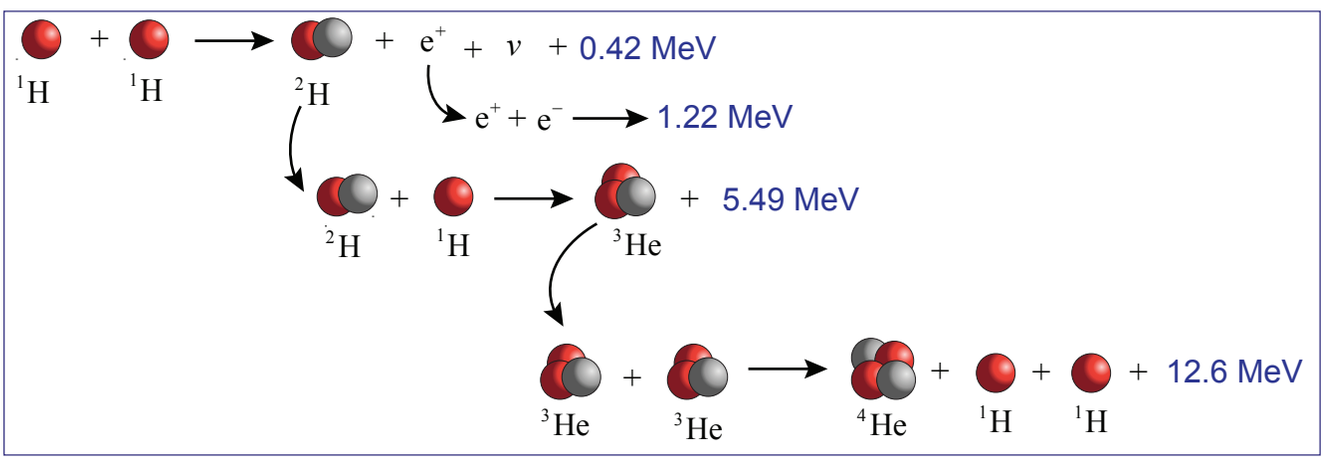
يعدّ الهيدروجين المادة الأكثر انتشارًا في الكون، وهو المادة الموجودة داخل النجوم. فدرجة الحرارة والضغط في قلب الشمس والنجوم الأخرى مرتفعان، إلى حد أن تفاعُلات الاندماج النووي فيها تحوّل كميات كبيرة من الهيدروجين إلى هيليوم، وتتحرّر الطاقة جرّاء هذه العملية. تنتج الشمس طاقة اندماج نووي في قلبها تتحوّل 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. تتكوَّن 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، تُجَمّع عناصر أثقل مثل الكربون والأكسجين.



الشكل 7-48 تفاعُل الاندماج النووي داخل الشمس.

يتعيّن على تفاعل الاندماج أن يتغلّب على قوة التنافر الهائلة بين نواتين موجبتَي الشحنة. لذلك يجب أن تكون درجة الحرارة مرتفعة جدًّا، حيث تنصهر النوى 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 الناتج 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 4-7

1. كيف يرتبط تكافوء الكتلة–الطاقة بكل من الانشطار النووي والاندماج النووي؟
2. ميِّز بين التفاعُلات الكيميائية والتفاعُلات النووية.
3. حدِّد اسم العنصر المجهول وكلًّا من العدد الذرّي Z ، والعدد الكُتلي A، في المعادلة النووية الآتية:

$$^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{141}_{56}Ba + {}^{A}_{Z}?+ 3\,{}^{1}_{0}n$$

4. حدِّد اسم العنصر المجهول وكلًا من العدد الذرّي Z، والعدد الكُتلي A في المعادلة النووية الآتية:

$$^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{A}_{Z}?+ {}^{87}_{35}Br + 3\,{}^{1}_{0}n$$

5. احسب نقص الكتلة لنواة الذهب $^{197}_{79}Au$، عندما تكون الكتلة النووية 196.924 amu.
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 2326.0456 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 هو تفاعُل انشطار نووي؟ وأيّهما هو 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. قيّم صحة هذا الزعم من خلال البحث في مستويات التعرّض الطبيعي للاشعاع، أو الحدود الموصى بها طبيًا، أو التعرُّض للتصوير الطبّي.

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 مبُكِرة، واستخدم كثيرًا من الكتب المختلفة لتعليم نفسه. تقدَّم فيرمي عام 1918 للدراسة في جامعة سكولا نورمال سوبرويير 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، على الأقل في المستقبل القريب، إيجاد طريقة لتحرير تلك الكميات الهائلة من الطاقة، وهذا أمر يصبّ في مصلحة الجميع؛ لأن أول تأثير لانفجار تلك الكمّية الهائلة من الطاقة سيكون إبادة الفيزيائي السيّئ الطالع في إيجاده طريقة للحصول عليها».

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 تسلسلي نووي. 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 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** هي ذرّات لها العدد نفسه من البروتونات لكنّها تختلف بعدد النيوترونات. تمتلك النظائر 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 اثنين.

الوحدة 7

مراجعة الوحدة

- **انحلال بيتا** هو انحلال إشعاعي يتحوّل فيه النيوترون في النواة تلقائيًّا إلى بروتون وإلكترون. يبقى البروتون داخل النواة، فيزداد العدد الذرّي للذرَّة بمقدار واحد، بينما يَصدُر الإلكترون الحامل للطاقة من الذرّة كجُسيم بيتا.
- **البوزترون** جُسيم يمتلك كتلة الإلكترون نفسها، ولكن بشحنة $+1.602 \times 10^{-19}$ 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 التسلسلي** هو دورة الانحلالات التي تحدث خلال الانحلال الإشعاعي إلى أن يبلغ العنصر النواة المستقرّة.
- **أثر النشاط الإشعاعي** هو 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** هو متوسِّط الزمن اللازم لانحلال نصف عدد النوى الموجودة في المادة المشعّة.
- **ثابت الانحلال** هو احتمال انحلال النواة في وحدة الزمن.
- **معدّل الانحلال** هو قياس لعدد النوى المُنحلّة في وحدة الزمن.
- **البيكريل** وحدة معياريّة للنشاط الإشعاعي تساوي انحلال نواة واحدة خلال ثانية.

الدرس 7-4: التفاعُلات النوويّة

- **تكافؤ الكتلة – الطاقة** هو المبدأ الذي ينصّ على أنّ الكتلة يمكن أن تتحوَّل إلى طاقة والعكس بالعكس، ويتمثّل بالعلاقة $E = mc^2$.
- **الطاقة السكونيّة** هي الطاقة المُكافئة لكتلة جُسيم، أو جسم في حالة السكون، أي عندما تكون السرعة صفرًا.
- **وحدة الكتل الذرّيّة** هي وحدة معياريّة للقياس تعبّر عن كتلة الذرَّة. وحدة كتلة ذرّيّة amu واحدة تعرّف على أنّها 1/12 من كتلة ذرّة الكربون-12، أو 1.661×10^{-27} kg

الوحدة 7

مراجعة الوحدة

- **الإلكترون فولت** هو 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** هي محصِّلة الطاقة التي يجب بذلها للتغلّب على القوة النووية الشديدة، وفصل النواة إلى الجُسَيمات المُكوِّنة لها.
- **نقص الكتلة** هو 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** هو تفاعُل نووي تنشطر فيه النواة الكبيرة إلى عدد من نوى أصغر، مُطلقةً كمّية كبيرة من الطاقة.
- **التفاعُل التسلسُلي** هو تفاعُل نووي يمكن فيه للنواتج من تفاعُل واحد أن تولّد أكثر من تفاعُل إضافي.
- **الطاقة النوويّة** نوع من الطاقة المتولّدة من التفاعُلات في النواة الذرّية.
- **الاندماج النووي** تفاعُل نووي تندمج فيه نواتان خفيفتان معًا لتشكيل نواة أثقل.

الاختيار من مُتعدّد

1. أيُّ من الجُسَيمات الآتية تدور حول النواة؟

a. البروتونات.

b. النيوترونات.

c. الإلكترونات.

d. المُركَّبات.

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 يصعّب حدوث تفاعُلات الاندماج النووي على الأرض؟

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: $^{236}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{140}_{54}\mathrm{Xe} + {}^{A}_{38}\mathrm{Sr} + 2\,{}^{1}_{0}\mathrm{n}$ ؟

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 المُتفاعُلات 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. ينقص بمقدار 2

d. ينقص بمقدار 4

11. أراد عالم أن يحلِّل 200 g من السيبورجيوم-266. وبعد 90 ثانية، تبقّى لديه 25 g منه. ما هو عمر نصف السيبورجيوم-266؟

a. 8 s

b. 30 s

c. 90 s

d. 270 s

12. أي كميّتين تتساويان في نظيرين مُتعادِلين للعنصر نفسه؟

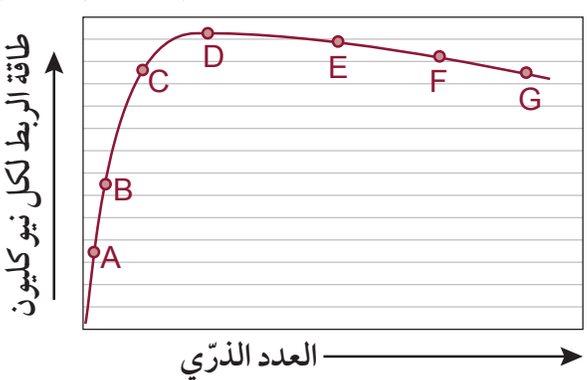
a. البروتونات والنيوترونات.

b. البروتونات والإلكترونات.

c. النيوترونات والإلكترونات.

d. البروتونات والنيوترونات 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 هو 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 هو 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 هو 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 هو 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 هو الاختلاف بين العدد الكتلي والعدد الذرّي؟

21. استخدم مخطّطًا لإظهار تغيّر فهمنا لتركيب الذرّة على امتداد آلاف السنين الغابرة.

22. في تجربة التشتُّت لرذرفورد، ما هو سبب عبور معظم جُسيمات ألفا لرقاقة الذهب من دون انحراف؟

23. في تجربة التشتُّت لرذرفورد، ما هو سبب ارتداد بعض جُسميات ألفا إلى الوراء؟

24. ما هي 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 نوى 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. لِمَ 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 بعد أن تتعرَّض النظائر المُشعّة الآتية لانحلال ألفا:

a. السيبورجيوم-271.

b. الراديوم-226.

c. الكاليفورنيوم-249.

d. البولونيوم-210.

33. اكتب معادلة التفاعُل النووي عند تعرُّض النظائر الآتية لانحلال β^-:

a. الأستينيوم-279.

b. الكربون-14.

c. الفلورين-20.

d. الثوريوم-231.

34. تتعرَّض ذرّة لانحلال ألفا، فينتج من ذلك البزموث-207. اكتب معادلة التفاعُل النووي.

35. يُعبَّر عن الانحلال الإشعاعي للبولونيوم-210 بالمعادلة الآتية:

$$^{210}_{84}\mathrm{Po} \rightarrow {}^{?}_{?}\mathrm{Pb} + {}^{4}_{2}\mathrm{X}$$

حيث X هو جُسيم يصدر نتيجة للانحلال الذي حدث. حدّد النظير الصحيح للرصاص ونوع الانحلال.

36. تنحلّ نواة ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$ 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

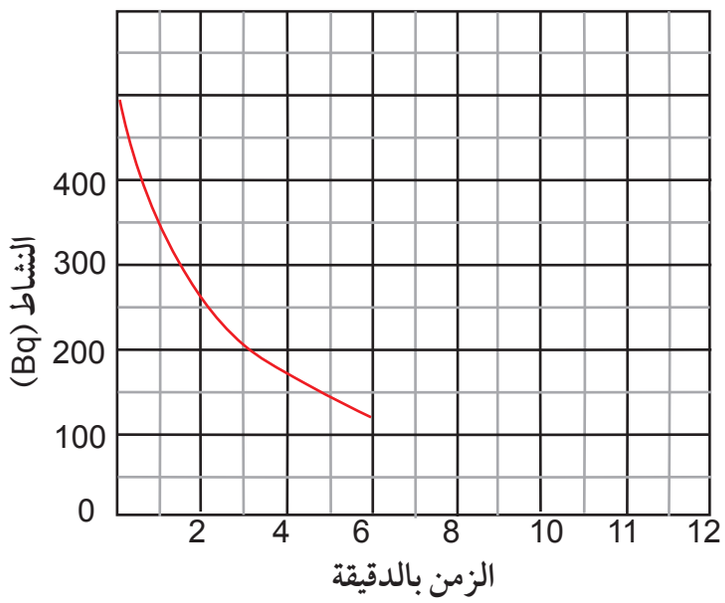
38. قام عالم آثار بقياس كتلة الكربون-14 الموجودة في أحفورة، فوجدها 1 g. ثمّ قام بحساب عُمر هذه العيِّنة، فكان 28,650 عامًا. كم كانت كتلة الكربون-14 الأصليّة في العيِّنة قبل 28,650 عامًا؟

39. بدأ تقني مخبري 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 ، 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 النوى الصغيرة الكتلة؟ وأي منهما يحدث في النوى الكبيرة الكتلة؟ وضِّح إجابتك.

تقويم الوحدة

46. a. هل تبقى الكتلة الكلّية هي نفسها في التفاعُل النووي؟ وضِّح إجابتك.
b. هل الطاقة الكليّة تبقى نفسها؟ وضِّح إجابتك.

47. ما هي 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 هي طاقة الربط لنواة ذرّة التريتيوم؟

51. الأسئلة الآتية هي 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.

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;