وزارة التربية

الفيزياء 11

الصف الحادي عشر

الجزء الثاني

كتاب الطالب

المرحلة الثانوية

الطبعة الثانية

وزارة التربية

الفيزياء

كتاب الطالب

الصفّ الحادي عشر 11

الجزء الثاني

المرحلة الثانويّة

اللجنة الإشرافية لدراسة ومواءمة سلسلة كتب العلوم

أ. برّاك مهدي برّاك (رئيسا)

أ. مصطفى محمد مصطفى علي

أ. فتوح عبد الله طاهر الشمالي

أ. سعاد عبد العزيز الرشود

أ. تهاني ذعار المطيري

الطبعة الثانية

1438 - 1439 هـ

2017 - 2018 م

فريق عمل دراسة ومواءمة كتب الفيزياء للصف الحادي عشر الثانوي

أ. أسامة مصطفى خليل العجوز

أ. أمل محمد أحمد داوود
أ. منى خالد مطلق المطيري
أ. محمد حسان محمد الكردي
أ. كلثوم عبد الرحمن أحمد ملك

دار التَّربَويّون House of Education **ش.م.م. وبيرسون إديوكيشن 2013**

© **جَميع الحقوق مَحفوظة: لا يَجوز نشْر أيّ جُزء من هذا الكِتاب أو تَصويره أو تَخزينه أو تَسجيله بأيّ وَسيلَة دُون مُوَافقَة خطّيَّة مِنَ النّاشِر.**

الطبعة الأولى 2014/2013 م
الطبعة الثانية 2016/2015 م
2018/2017 م

صاحب السمو الشيخ صباح الأحمد الجابر الصباح

أمير دولة الكويت

سمو الشيخ نواف الأحمد الجابر الصباح

ولي عهد دولة الكويت

مقدمـــة

الحمدلله رب العالمين، والصلاة والسلام على سيد المرسلين، محمد بن عبدالله وصحبه أجمعين.

عندما شرعت وزارة التربية في عملية تطوير المناهج، استندت في ذلك إلى جملة من الأسس والمرتكزات العلمية والفنية والمهنية، حيث راعت متطلبات الدولة وارتباط ذلك بسوق العمل، وحاجات المتعلمين والتطور المعرفي والعلمي، بالإضافة إلى جملة من التحديات التي تمثلت بالتحدي القيمي والاجتماعي والاقتصادي والتكنولوجي وغيرها، وإن كنا ندرك أن هذه الجوانب لها صلة وثيقة بالنظام التعليمي بشكل عام وليس المناهج بشكل خاص.

ومما يجب التأكيد عليه، أن المنهج عبارة عن كم الخبرات التربوية والتعليمية التي تُقدم للمتعلم، وهذا يرتبط أيضًا بعمليات التخطط والتنفيذ، والتي في محصلتها النهائية تأتي لتحقيق الأهداف التربوية، وعليه أصبحت عملية بناء المناهج الدراسية من أهم مكونات النظام التعليمي، لأنها تأتي في جانبين مهمين لقياس كفاءة النظام التعليمي، فهي من جهة تمثل أحد المدخلات الأساسية ومقياسًا أو معيارًا من معايير كفاءته من جهة أخرى، عدا أن المناهج تدخل في عملية إنماء شخصية المتعلم في جميع جوانبها الجسمية والعقلية والوجدانية والروحية والاجتماعية.

من جانب آخر، فنحن في قطاع البحوث التربوية والمناهج، عندما نبدأ في عملية تطوير المناهج الدراسية، ننطلق من كل الأسس والمرتكزات التي سبق ذكرها، بل إننا نراها محفزات واقعية تدفعنا لبذل قصارى جهدنا والمضي قدمًا في البحث في المستجدات التربوية سواء في شكل المناهج أم في مضامينها، وهذا ما قام به القطاع خلال السنوات الماضية، حيث البحث عن أفضل ما توصلت إليه عملية صناعة المناهج الدراسية، ومن ثم إعدادها وتأليفها وفق معايير عالمية استعدادًا لتطبيقها في البيئة التعليمية.

ولقد كانت مناهج العلوم والرياضيات من أول المناهج التي بدأنا بها عملية التطوير، إيمانًا بأهميتها وانطلاقًا من أنها ذات صفة عالمية، مع الأخذ بالحسبان خصوصية المجتمع الكويتي وبيئته المحلية، وعندما أدركنا أنها تتضمن جوانب عملية التعلم ونعني بذلك المعرفة والقيم والمهارات، قمنا بدراستها وجعلها تتوافق مع نظام التعليم في دولة الكويت، مركزين ليس فقط على الكتاب المقرر ولكن شمل ذلك طرائق وأساليب التدريس والبيئة التعليمية ودور المتعلم، مؤكدين على أهمية التكامل بين الجوانب العلمية والتطبيقية حتى تكون ذات طبيعة وظيفية مرتبطة بحياة المتعلم.

وفي ضوء ما سبق من معطيات وغيرها من الجوانب ذات الصفة التعليمية والتربوية تم اختيار سلسلة مناهج العلوم والرياضيات التي أكملناها بشكل ووقت مناسبين، ولنحقق نقلة نوعية في مناهج تلك المواد، وهذا كله تزامن مع عملية التقويم والقياس للأثر الذي تركته تلك المناهج، ومن ثم عمليات التعديل التي طرأت أثناء وبعد تنفيذها، مع التأكيد على الاستمرار في القياس المستمر والمتابعة الدائمة حتى تكون مناهجنا أكثر تفاعلية.

د. سعود هلال الحربي

الوكيل المساعد لقطاع البحوث التربوية والمناهج

المحتويات

الجزء الأوّل

الوحدة الأولى: الحركة

الجزء الثاني

الوحدة الثانية: المادّة والحرارة

الوحدة الثالثة: الكهرباء والمغناطيسية

الوحدة الرابعة: الضوء

محتويات الجزء الثاني

الوحدة الثانية: المادّة والحرارة	**12**
الفصل الأوّل: الحرارة	**13**
الدرس 1–1: الحرارة والاتّزان الحراري	**14**
الدرس 1–2: القياسات الحرارية	**20**
الدرس 1–3: التمدُّد الحراري	**29**
الفصل الثاني: الحرارة وتغيُّر الحالة	**41**
الدرس 2–1: التبخُّر والتكثُّف	**42**
الدرس 2–2: الغليان والتجمُّد	**46**
الدرس 2–3: الطاقة وتغيّرات الحالة	**51**
الفصل الثالث: انتقال الحرارة والديناميكا الحرارية	**58**
الدرس 3–1: التوصيل والحمل والإشعاع	**59**
الدرس 3–2: الديناميكا الحرارية	**74**
مراجعة الوحدة الثانية	**87**

الوحدة الثالثة: الكهرباء والمغناطيسية	**92**
الفصل الأوّل: الكهرباء	**93**
الدرس 1–1: المجالات الكهربائية وخطوط المجالات الكهربائية	**94**
الدرس 1–2: المكثّفات	**103**
الفصل الثاني: المغناطيسية	**114**
الدرس 2–1: المغناطيس والمجال المغناطيسي	**115**
الدرس 2–2: التيّارات الكهربائية والمجالات المغناطيسية	**123**
مراجعة الوحدة الثالثة	**130**
الوحدة الرابعة: الضوء	**137**
الفصل الأوّل: الضوء وخواصّه	**138**
الدرس 1–1: خواصّ الضوء	**139**
الدرس 1–2: الانعكاس والانكسار عند السطوح المستوية	**150**
الدرس 1–3: الانكسار عند السطوح الكروية – العدسات	**166**
مراجعة الوحدة الرابعة	**173**

لا بدّ أن لاحظ بعضكم أنّ الأرض المكسوّة بالعشب تكون أكثر دفئًا من الأرض المغطّاة بالإسفلت في الصباح الباكر. هذا يعني أنك إذا وضعت قدمك اليمنى مثلًا على الإسفلت واليسرى على العشب، ستلاحظ أنّ الحرارة التي تفقدها قدمك اليمنى أكبر من تلك التي تفقدها قدمك اليسرى. نستنتج من ذلك أنّ درجة حرارة الإسفلت أقلّ من درجة حرارة العشب. أمّا إذا كرّرت ذلك عند الظهيرة، يمكن أن تشعر أنّ حرارة العشب أقلّ من حرارة الإسفلت. هل هذا صحيح؟ نحن بحاجة إلى مفهوم فيزيائي جديد يوضّح هذه الملاحظات وغيرها.

في هذه الوحدة سنتعرّف مفهوم الحرارة وقياسها ونميّزه عن مفهوم درجة الحرارة، وسنتناول مفهوم السعة الحرارية للموادّ ودورها في جعل الموادّ تُختزَن أو تُطلق الحرارة وبمعدّلات مختلفة. وسنناقش أيضًا انتقال الطاقة وتحوّلها ودورها في الديناميكا الحرارية.

اكتشف بنفسك

تسمح لنا حاسّة اللمس باختبار الشعور بالدفء أو البرد، لذلك ربطنا هذا الشعور بما يُسمّى درجة الحرارة. ولتحديد درجة الحرارة بشكل صحيح، أوجد العلماء جهاز الترمومتر الذي سمح لهم بقياس درجة حرارة الأجسام بدقّة. لاحظ العلماء تغيُّر في درجات الحرارة وبحثوا عن السبب، فتوصّلوا إلى أنّ السبب مرتبط بحركة الجزيئات المكوّنة للمادّة. ولاحظوا أيضًا أنّ اختلاف درجات الحرارة بين جسم وآخر يؤدّي إلى انتقال الطاقة الحرارية من الجسم ذو درجة الحرارة المرتفعة إلى الجسم ذو درجة الحرارة المنخفضة. وتوصّلوا إلى تحديد مفهوم الحرارة على أنّها الطاقة المنتقِلة بين أجسام تختلف في درجة حرارتها. ووضعوا قوانين هذا الانتقال ودرسوا كيفية تحويل الطاقة المنتقِلة إلى شغل يمكن الاستفادة منه، فكان علم الديناميكا الحرارية الذي ساهم في تطوير عدد كبير من الأجهزة التي نستخدمها اليوم كالثلّاجة والسيّارات والمكيّفات.

بعد قراءة النص أعلاه، أجب عن الأسئلة التالية:

1. ما هي الحرارة؟
2. ما أهمّية انتقال الحرارة في حياتنا اليومية؟
3. ما هو مصدر درجة حرارة الأجسام؟

فصول الوحدة

الفصل الأوّل
- الحرارة

الفصل الثاني
- الحرارة وتغيّر الحالة

الفصل الثالث
- انتقال الحرارة والديناميكا الحرارية

أهداف الوحدة

- يعرّف الحرارة وعلاقتها بالطاقة الحركية
- يعرّف الاتّزان الحراري
- يعرّف الطاقة الداخلية
- يميّز بين الطاقة الداخلية والحرارة
- يحسب الطاقة المفقودة والمكتسَبة
- يقارن بين السعة الحرارية النوعية لموادّ مختلفة
- يصف تأثير الحرارة على حالات الموادّ
- يقارن بين التجمّد والانصهار وبين التكثّف والغليان
- يصف تأثّر السعة الحرارية النوعية العالية للماء على الطقس
- يعرّف التحوّل الثرموديناميكي
- يعرّف الآلات الحرارية
- يعرّف مردود الآلة الحرارية
- يستنتج قانون المردود
- يطبّق قوانين الديناميكا الحرارية في حياته العملية
- يحترم الموارد البيئية ويتعامل معها بترشيد

معالم الوحدة

الفيزياء في المختبر: هل الإحساس مقياس صادق لدرجة الحرارة؟

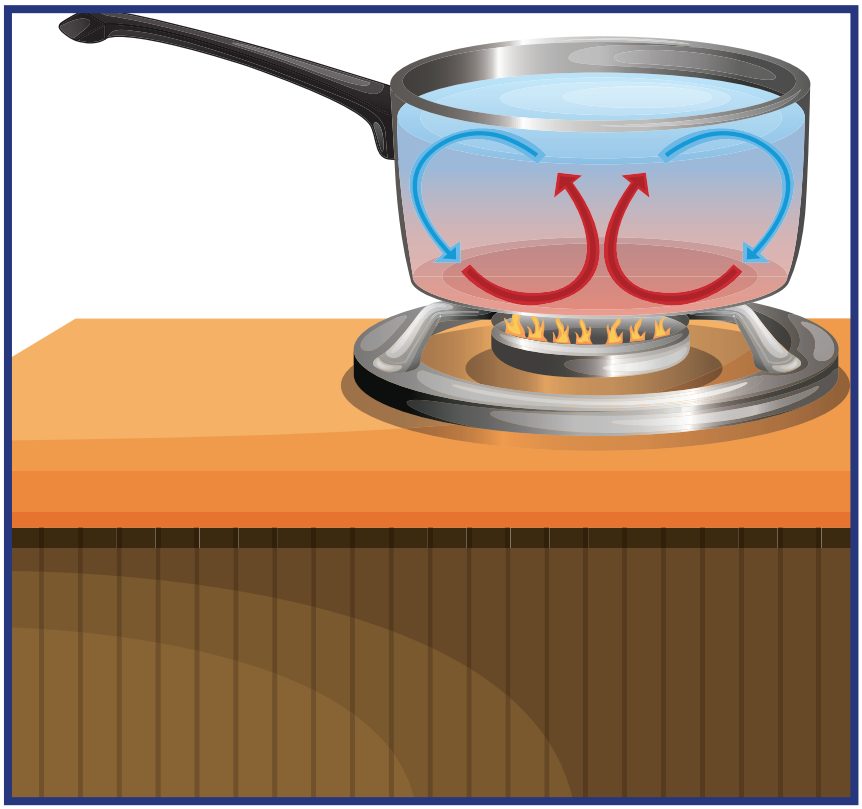
الفيزياء وعلم الحشرات: النمل الصحراوي

توظيف علم الفيزياء: مقاومة الحرائق

الفيزياء في المختبر: حجب الأشعّة تحت الحمراء

الفيزياء في المختبر: أُبذل شغلا براحتي يديك

دروس الفصل
الدرس الأوّل
الحرارة والاتّزان الحراري
الدرس الثاني
القياسات الحرارية
الدرس الثالث
التمدُّد الحراري



الحرارة في الأجسام

تعتمد نشاطاتنا اليومية على تحوّلات عديدة للطاقة. فجسمنا على سبيل المثال، خير دليل على ذلك لأنّه يحتاج إلى الطاقة الحرارية التي تنتج عن تحوُّل الطاقة الكيميائية الموجودة في الأطعمة للقيام بأعماله المختلفة. ونذكر بعض الأمثلة الأخرى كتسخين الماء بغاز الميثان الذي من خلاله تتحوّل الطاقة الكيميائية إلى حرارة تُستخدَم في الطهي، ومحرّك السيارة الذي يحوّل الطاقة الحرارية الناتجة عن اشتعال الوقود إلى طاقة ميكانيكية تُحرّك السيارة. إذًا ما هي الطاقة الحرارية؟ وهل نستطيع قياسها؟ كيف تنتقل؟ هل لها تأثير على المادة وحالاتها؟

في هذا الفصل سنتعرّف الحرارة كأحد أشكال الطاقة وسندرس ارتباطها بدرجة حرارة الأجسام، وسنناقش أيضًا أسباب انتقالها بين الأجسام وتأثيرها على حالات المادة التي تنقلها.

الدرس 1-1

الحرارة والاتّزان الحراري
Heat and Thermal Equilibrium

الأهداف العامة

- يعرّف درجة الحرارة.
- يقارن بين الأنواع المختلفة للتدريجات الحرارية.
- يستنتج العلاقة بين درجة الحرارة والطاقة الحركية للجزيئات.
- يربط بين الحرارة والطاقة الحركية.
- يعرّف الاتّزان الحراري.
- يميّز بين الطاقة الداخلية والحرارة.

(شكل 1)

من الخطوات التي يُنصَح اتّخاذها عند الإصابة بحرق خارجي طفيف هو وضع موضع الحرق تحت ماءٍ باردٍ جارٍ أو وضع الثلج عليه، فهذا يخفّف من حدّة الألم ويبرّد مكان الحرق. يعود ذلك إلى انتقال الحرارة من الجسم الساخن إلى الماء البارد الجاري ما يخفّف الشعور بحرارة موضع الحرق. إذًا ما هي الحرارة؟ وكيف تنتقل؟ كم يستمرّ انتقال الحرارة بين جسمين؟ وهل هناك اتّزان حراري؟ ما العلاقة بين الحرارة ودرجة الحرارة؟

هذه الأسئلة هي محور هذا الدرس.

1. تعريف درجة الحرارة

Definition of Temperature

تحصل الحروق عادةً عندما تلامس البشرة جسمًا شديد السخونة. **درجة الحرارة Temperature هي الكمّية الفيزيائية التي يمكن من خلالها تحديد مدى سخونة جسم ما أو برودته عند مقارنته بمقياس معياري.** ويُعبَّر عن درجة الحرارة برقم على مقياس تدريج محدّد بـ (°C) و (°F) و (K).

2. العلاقة بين درجة الحرارة والطاقة الحركية
The Relation Between Temperature and Kinetic Energy

تتكوّن جميع الموادّ، سواء أكانت غازية أم سائلة أم صلبة، من جزيئات أو ذرّات في حركة عشوائية دائمة، ما يعني أنّ جميع الموادّ تحتوي على طاقة حركية. يولّد متوسّط الطاقة الحركية لهذه الجزيئات إحساسًا بالدفء، أي يحدّد درجة حرارة الجسم. بالتالي، ترتبط درجة حرارة الجسم بحركة جزيئاته العشوائية. ففي جزيئات الغازات المثالية، تتناسب درجة الحرارة مع متوسّط الطاقة الحركية للجزيء الواحد منه، سواء أكانت الحركة في خطّ مستقيم أم في خطّ منحنٍ. أمّا في الموادّ السائلة والصلبة يصبح الوضع أكثر تعقيدًا، حيث تملك الجزيئات طاقة كامنة ولكن تبقى درجة الحرارة متناسبة مع الطاقة الحركية.

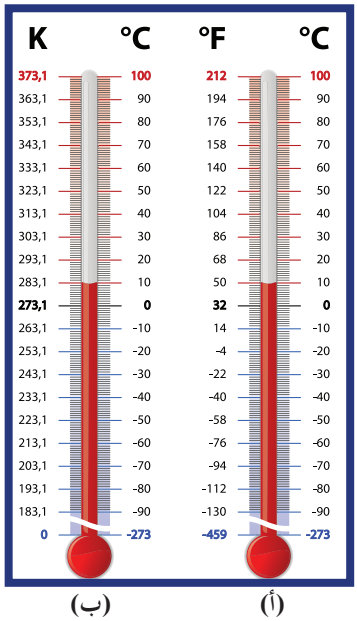
تجدر الإشارة إلى أنّ درجة الحرارة لا تُعتبَر مقياسًا لمجموع طاقات الحركة لجميع جزيئات المادّة. فالإناء الذي يحتوي على (2) لتر من الماء المغلي فيه كمّية من الطاقة تساوي ضعف تلك الموجودة في إناء يحتوي على (1) لتر من الماء المغلي، ولكن درجة الحرارة واحدة في الإناءين وتساوي متوسّط طاقة حركة الجزيء الواحد في أيّ من الإناءين (شكل 2).

(شكل 2)
يحتوي الدلو على طاقة حركية أكثر ممّا يحتوي عليه القدح على الرغم من أنّهما عند درجة الحرارة نفسها.

3. قياس درجة الحرارة
Measuring Temperature

يُستخدَم جهاز الترمومتر لقياس درجة الحرارة (K، °F، °C) (شكل 3). يقيس الترمومتر درجة الحرارة عن طريق تحرّك خيط سائل (غالبًا زئبق أو كحول ملوّن) داخل أنبوب شعري مدرّج، بحيث يتحرّك للأعلى عند ارتفاع درجة حرارته أو للأسفل عند انخفاضها. ويُعتبَر «التدريج الدولي» أشهر تدريج يُستخدَم الآن لقياس درجات الحرارة، حيث يمثّل الرقم «صفر» درجة الحرارة التي يتجمّد عندها الماء، والرقم «100» درجة غليانه عند الظروف المعيارية من الضغط ودرجة الحرارة، ثمّ قُسمت المسافة بين العلامتين إلى مئة قسم يُسمّى كلّ منها «درجة».

يُسمّى هذا التدريج تدريج **سلسيوس** Celsius Scale.



(شكل 3)
(أ) تدريج سلسيوس (°C) وفهرنهايت (°F) على جانبي الترمومتر نفسه.
(ب) تدريج سلسيوس (°C) وكلفن (K) على جانبي الترمومتر نفسه.

فقرة إثرائية
الفيزياء في المختبر

هل الإحساس مقياس صادق لدرجة الحرارة؟

أحضِر ثلاثة أوانٍ متشابهة. ضع في الإناء الأوّل كمّية معيّنة من الماء الدافئ وفي الثاني كمّية مساوية من الماء البارد وفي الثالث كمّية أخرى من ماء الصنبور. ضع إحدى يديك في الماء الدافئ والأخرى في الماء البارد واتركهما لثوانٍ عديدة، ثمّ انقلهما معًا إلى ماء الصنبور. ما إحساسك الآن؟ هل علمت الآن فائدة الترمومتر كمقياس لدرجة الحرارة؟

يوجد تدريج آخر يُسمّى **تدريج فهرنهايت Fahrenheit Scale** وهو يُستخدَم في بريطانيا والولايات المتّحدة وعدد قليل من الدول الأخرى. في هذا التدريج، يمثّل الرقم «32» درجة تجمد الماء، فيما يمثّل الرقم «212» درجة غليانه.

ومن الممكن التحويل من تدريج سلسيوس إلى تدريج فهرنهايت باستخدام المعادلة التالية:

$$T(^{o}F) = \frac{9}{5} T(^{o}C) + 32$$

التدريج الثالث هو «التدريج الدولي» الذي يُستخدَم في الأبحاث العلمية ويُسمّى **تدريج كلفن Kelvin Scale**. وتساوي المسافة الفاصلة بين درجاته تلك التي تفصل بين درجات تدريج سلسيوس، وتسمّى كلّ درجة «درجة كلفنية». وفي هذا التدريج، خُصِّص الرقم «صفر» لتمثيل أقلّ درجة وتُسمّى «الصفر المطلق». عند هذه الدرجة، تنعدم نظريًّا الطاقة الحركية لجزيئات المادّة وتعادل درجة الصفر على مقياس كلفن درجة تبلغ ($-273^{o}C$) على مقياس سلسيوس. وعليه تكون المعادلة التي تربط الدرجة الكلفنية بالدرجة سلسيوس:

$$T(K) = T(^{o}C) + 273$$

(شكل 4)
استُخدم اسم سلسيوس تخليدًا لذكرى العالم السويدي أندريه سلسيوس (1707–1744)، وقد سُمِّي كلّ من تدريجي كلفن وفهرنهايت تخليدًا لاسم العالم الذي وضعه.

مثال (1)

تساوي درجة حرارة طفل مريض $T = (39)^{\circ}C$.
أُحسب درجة حرارة هذا الطفل بحسب تدريج كلفن وتدريج فهرنهايت .

طريقة التفكير في الحلّ

1. حلِّل: أذكر المعلوم وغير المعلوم .

المعلوم: درجة حرارة الطفل بحسب تدريج سلسيوس: $T = (39)^{\circ}C$

غير المعلوم:

(أ) درجة حرارة الطفل بحسب تدريج كلفن ؟ $= T(K)$

(ب) درجة حرارة الطفل بحسب تدريج فهرنهايت ؟ $= T(^{\circ}F)$

2. أُحسب غير المعلوم.

(أ) $T(K) = T(^{\circ}C) + 273 = (312)\,K$

(ب) $T(^{\circ}F) = \frac{9}{5} \times 39 + 32 = (102.2)^{\circ}F$

3. قيِّم: هل النتيجة مقبولة؟

النتيجة مقبولة ويمكن التأكّد منها بواسطة قياسها بترمومتر مدرَّج .

4. الحرارة Heat

عندما تلمس سطحًا ساخنًا، تنتقل الطاقة إلى يدك لأنّ السطح أكثر دفئًا من يدك . وعندما تلمس قطعة من الثلج، تنتقل الطاقة من يدك إليها لأنّ يدك هي الأكثر دفئًا . هذا يعني أنّ الطاقة تنتقل تلقائيًّا من الجسم الدافئ إلى الجسم البارد . تُسمّى الطاقة المنتقلة بين جسمين نتيجة اختلافهما في درجة الحرارة «الحرارة» . يُرمَز إلى الحرارة بحرف Q ووحدتها في النظام الدولي للوحدات هي الـ Joule (J).

يقول البعض أنّ الأجسام تحتوي على حرارة لكنّه خطأ شائع، فالصحيح هو أنّها تحتوي على أشكال متعدّدة من الطاقة وليس على حرارة .

الحرارة Heat هي سريان الطاقة من جسم له درجة حرارة مرتفعة إلى آخر له درجة حرارة أقلّ. عند توقّف هذا السريان ينعدم انتقال الطاقة الحرارية . وعند سريان الطاقة بين مادّتين متلامستين، يُقال إنّ الجسمين في حالة «تلامس حراري» . وفي حالة التلامس الحراري، تسري الحرارة من المادّة التي لها درجة حرارة أعلى إلى المادّة التي درجة حرارتها أقلّ . تجدر الإشارة إلى أنّ سريان الحرارة لا يكون من جسم طاقته الحركية الكلّية كبيرة إلى جسم طاقته الحركية الكلّية أقلّ . فالطاقة الحركية الكلّية لجزيئات الماء في حوض سباحة أكبر بكثير من الطاقة الحركية الكلّية لجزيئات مسمار

حديدي ساخن لدرجة الاحمرار. على الرغم من ذلك، لا تسري الحرارة من ماء الحوض إلى المسمار عند غمس المسمار في حوض السباحة، بل تسري من المسمار الساخن إلى الماء البارد. إذًا الطاقة الحرارية تسري تبعًا لفرق درجتي الحرارة، أي تبعًا للفرق في متوسّط طاقة حركة كلّ جزيء من المادّة. وكقاعدة عامة، لا تسري الحرارة تلقائيًّا من جسم بارد إلى آخر أكثر منه سخونة (شكل 5).

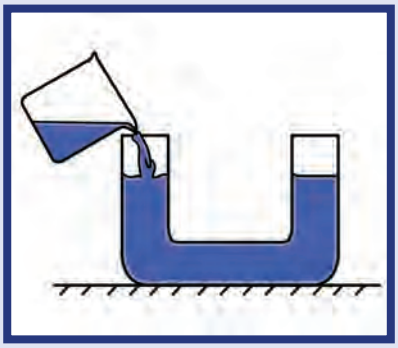
(شكل 5)
الحرارة لا يمكنها السريان تلقائيًّا من جسم بارد إلى آخر ساخن، تمامًا كالماء الذي لا يمكنه صعود قمّة التلّ من دون مساعدة.

5. العلاقة بين الحرارة والطاقة الحركية
The Relation Between Heat and Kinetic Energy

يترافق انتقال الطاقة بين الأجسام مع ارتفاع درجة حرارة الجسم البارد أو تغيُّر حالته، ومع انخفاض درجة حرارة الجسم الساخن. وعلى المستوى المجهري، نلاحظ أنّ هذا الانتقال يترافق مع تغيُّر في سرعة تحرّك جزيئات المادّتين المتلامستين، أي أنّه يترافق مع تغيُّر في الطاقة الحركية للجزيئات. الحرارة إذًا هي مجموع تغيُّر الطاقة الحركية لكلّ جزيئات المادّة، وهي تختلف عن درجة الحرارة التي تتناسب مع متوسّط الطاقة الحركية لجزيء واحد.

6. الاتّزان الحراري Thermal Equilibrium

عند وصول الأجسام التي تكون في حالة تلامس حراري إلى درجة الحرارة نفسها، يتوقّف سريان الحرارة بينها. عندها توصف هذه الأجسام بأنّها في حالة **اتّزان حراري Thermal Equilibrium حيث يكون متوسّط سرعة كلّ جزيء هو نفسه في الأجسام المتلامسة.** فنحن عندما نستخدم الترمومتر لقياس درجة حرارة مادّة معيّنة، ننتظر حتى يصل إلى حالة اتّزان حراري مع المادّة، لنتمكّن من قراءة درجة حرارة المادّة على الترمومتر. وذلك لأنّه عند التلامس الحراري، تسري الحرارة بينهما وتتوقّف عند تساوي درجتي حرارتهما، فتكون درجة حرارة المادّة هي درجة حرارة الترمومتر. ويجب أن يكون حجم الترمومتر أصغر بكثير من حجم المادّة التي تُقاس درجة حرارتها بواسطته حتى لا تؤثّر الحرارة التي يمتصّها الترمومتر على درجة حرارة الجسم. فعند استخدامك الترمومتر لقياس درجة حرارة الهواء، لن تؤثّر كمّية الحرارة التي يمتصّها الترمومتر على درجة حرارة الهواء. أمّا إذا كانت المادّة سائلة، فإنّ درجة حرارة قطرة منها عند الاتّزان الحراري ستختلف كثيرًا عن درجة حرارتها الأصلية المُراد قياسها.



(شكل 6)
عند سكب الماء في أنبوب ذات شعبتين، يتساوى ارتفاع الماء في الشعبتين لتساوي الضغط عليهما، وتتساوى درجة حرارة الترمومتر مع درجة حرارة المادّة المحيطة به (أي تساوي متوسّط الطاقة الحركية لكلّ جزيء فيهما).

7. الطاقة الداخلية Internal Energy

بالإضافة إلى الطاقة الحركية الانتقالية لجزيئات المادّة، توجد أنواع أخرى من الطاقة للجزيء نفسه. فهناك طاقة حركية دورانية وأخرى ناتجة عن الحركة الداخلية للذرّات المكوِّنة للجزيء. وهناك طاقة وضع للجزيئات ناتجة عن قوى التجاذب المتبادل بينها وتُسمّى الطاقة الداخلية. **الطاقة الداخلية Internal Energy هي مجموعة من الطاقات تشمل الطاقة الحركية الدورانية، والطاقة الناتجة عن الحركة الداخلية للذرّات المكوِّنة للجزيء، وطاقة وضع للجزيئات تنتج عن قوى التجاذب المتبادَلة بينها.** وبالتالي، يمكن القول إنّ المادّة تحتوي على طاقة داخلية وليس على حرارة، فعندما تكتسب مادّة ما حرارة تزيد واحدة من هذه الطاقات أو أكثر. على سبيل المثال، عندما تمتصّ مادّة ما كمّية من الحرارة، قد تزيد الحركة الاهتزازية (الحركة الانتقالية) فترتفع درجة حرارتها، أو يمكن أن تُستنفَد الطاقة المُكتسبة في تغيير حالة المادّة. ففي حالة الانصهار الجليد مثلًا، لا تُسبِّب الطاقة المُكتسبة زيادة في الطاقة الحركية الانتقالية للجزيئات، أي لا ترتفع درجة الحرارة، ولكن تُستخدَم هذه الطاقة في تحويل المادّة إلى الحالة السائلة (الانصهار). (سنطرح هذا الموضوع بشكل مفصّل في دروس الوحدة).

مراجعة الدرس 1-1

أوّلًا – ما عدد الدرجات التي تفصل بين درجة تجمّد الماء ودرجة غليانه على كلّ من مقياسي سلسيوس وفهرنهايت؟

ثانيًا – ما الفرق بين درجة الحرارة والحرارة؟

ثالثًا – حوّل درجات الحرارة التالية إلى الدرجة الكلفنية (تدريج كلفن): $27^{\circ}C$، $200^{\circ}F$.

رابعًا – (أ) ما هي درجة تجمّد الماء بحسب تدريج فهرنهايت؟

(ب) ما هي درجة غليان الماء بحسب تدريج فهرنهايت؟

خامسًا – تمكّن علماء عصرنا من إنتاج أجسام تقترب درجة حرارتها من الصفر المطلق. ماذا يمكنك القول حول الطاقة الحركية لهذه الأجسام؟

سادسًا – أفرَغ ولد كوب ماء مغلي في وعاء يحوي لترًا من الماء درجة حرارته $212^{\circ}F$. هل ستتغيّر درجة حرارة الماء في الوعاء؟ ولماذا؟

سابعًا – متى نشعر ببرودة الأجسام أو سخونتها؟

ثامنًا – هل صحيح أنّ الترمومتر يقيس درجة حرارته بنفسه؟

تاسعًا – ما المقصود بالإتّزان الحراري؟

فقرة إثرائية

الفيزياء وعلم الحشرات

النمل الصحراوي

تصل درجة حرارة الرمال في بعض مناطق الصحراء الإفريقية إلى $60^{\circ}C$. وعلى الرغم من درجة الحرارة المرتفعة، استطاعت فصيلة من النمل التأقلم مع هذا الحرّ اللافح، والسعي وراء غذائها في درجات الحرارة المرتفعة التي لا تتحمّلها الزواحف التي تتغذّى على هذا النوع من النمل. وقدرة هذه الفصيلة من النمل على التعايش مع درجات الحرارة المرتفعة جعلتها من أنجح المخلوقات في البيئة الصحراوية، فأثناء تحرّكها تلامس الرمال بأربعة قوائم فقط وتُبقي قائمتين مرتفعتين في الهواء لتخفيض مساحة تلامسها مع الرمال الملتهبة، كما أنها تتحرّك بسرعة كبيرة بحيث تتمكّن من قطع مسافة تبلغ مئة ضعف طولها في ثانية واحدة.

الدرس 1-2

القياسات الحرارية
Thermal Measurements

الأهداف العامة

- يحسب الطاقة المفقودة أو المُكتسبة .
- يعرّف السعة الحرارية النوعية .
- يميّز بين السعة الحرارية والسعة الحرارية النوعية .
- يعرّف المُسعِرات الحرارية ودورها في عزل النظام عن المحيط .
- يقارن بين السعة الحرارية النوعية للموادّ المختلفة .
- يصف تأثير السعة الحرارية النوعية المرتفعة للماء على الطقس وعلى بعض التطبيقات الحياتية .

لقد تعلّمت في الدرس السابق أنّ الحرارة هي طاقة تنتقل من جسم إلى آخر إذا توفّر شرطان هما : تلامس الأجسام حراريًّا واختلاف درجة حرارة هذه الأجسام . وقد تعلّمت أيضًا أنّ الحرارة تنتقل من الجسم الساخن إلى الجسم البارد وأنّ هذا الانتقال يستمرّ حتى تصل إلى الاتّزان الحراري . في هذا الدرس ، ستتعلّم كيفية حساب الطاقة المنقولة وستتعرّف خصائص المادّة التي تحدّد قدرتها على امتصاص الحرارة أو فقدانها ، ثمّ ستدرس الخصائص الحرارية للماء وتأثيرها على الحياة .

1. وحدات الحرارة Units of Heats

لكي نتمكّن من تحديد وحدة لقياس الطاقة الحرارية ، يجب تحديد كمّية الحرارة اللازمة لإحداث تغيُّر جديد في درجة الحرارة ، على تدريج معتمد ، لكتلة محدّدة من مادّة محدّدة . يُعتبَر **السعر الحراري Calorie أكثر الوحدات استخدامًا ، وهو كمّية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة جرام واحد من الماء درجة واحدة سلسيوس . أمّا وحدة الكيلوسعر التي تساوي (1000)cal ، فهي كمّية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة كيلوجرام واحد من الماء درجة واحدة سلسيوس** ، وهي الوحدة التي تُستخدَم في تقدير المكافئ الحراري للأغذية (شكل 7) .

من المهم أن نتذكّر أنّ السعر الحراري والكيلوسعر هي وحدات قياس للطاقة ، ولكن الوحدة التي تُقاس بها الطاقة هي الجول (J) وفقًا للنظام الدولي للوحدات (SI) . والعلاقة التي تربط الجول بالسعر الحراري هي:

$$(1)\text{cal} = (4.184)\text{J}$$

علمًا أنّ (4.184)J ترفع درجة حرارة جرام واحد من الماء درجة واحدة سلسيوس .

(شكل 7)
لمن يهمّه مراقبة وزنه!
تحتوي حبّة واحدة من الفول السوداني على 10 سعرات حرارية كبيرة ،أي أنّ حبّة الفول السوداني تُطلِق (10)cal عند حرقها أو هضمها .

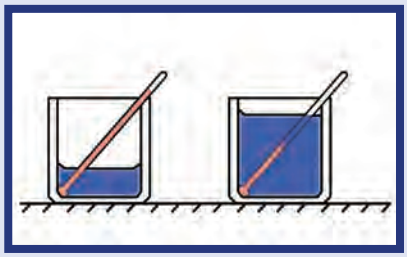
وبالنسبة إلى الأغذية والوقود، يتمّ تحديد المردود (المكافئ) الحراري لها بحرق كمّيات محدّدة منه وقياس كمّية الحرارة الناتجة.

2. السعة الحرارية النوعية Specific Heat Capacity

لا بدّ أن لاحظ بعضكم أنّ بعض أنواع الغذاء تبقى ساخنة لمدّة أطول من غيرها. فالبصل المطهو والمهروس، على سبيل المثال، لا يمكن أكله فورًا لسخونته الشديدة، في حين أنّ البطاطا المطهوّة والمهروسة يمكن أكلها فور طهوها. وتكون حشوة فطيرة التفّاح ساخنةً جدًّا فيما تكون قشرتها الخارجية غير ذلك لحظة خروجها من الفرن. يمكن إزالة غطاء الألومنيوم الذي يوضع فوق وجبة غذاء بأصابع اليد فور خروجها من الفرن ولكن احذر أن تفعل الشيء نفسه مع الطعام الموجود داخل الوعاء (شكل 9). تدلّ الأمثلة السابقة على اختلاف قدرة الموادّ على اختزان الحرارة.

من ناحية أخرى، نلاحظ أيضًا أنّ الطاقة الحرارية التي نحتاجها لرفع درجة حرارة مادّة معيّنة درجة واحدة فقط تختلف مع اختلاف المادّة. فرفع درجة حرارة كيلوجرامًا من الماء درجة واحدة فقط بواسطة موقد يحتاج إلى 15 دقيقة، فيما يحتاج رفع درجة حرارة كيلوجرامًا من الحديد درجة واحدة بواسطة الموقد نفسه إلى أقلّ من دقيقة واحدة. نستنتج من كلّ هذه الأمثلة أنّ للمادّة خاصّية تسبّب تغيّر درجة حرارتها بكمّيات مختلفة عندما تمتصّ كمّية الحرارة نفسها أو تخسرها. ويمكن ربط هذه الخاصّية بالطريقة التي تؤثّر فيها الطاقة المُكتسَبة على جزيئات المادّة بحيث يسبّب جزء منها فحسب زيادة الحركة الانتقالية المسبّبة لارتفاع درجة الحرارة، علمًا أنّ مقدار الزيادة في الطاقة الحركية للماء تحدّده سهولة تنقّل الجزيئات داخل المادّة.

في مثال الماء والحديد، يحتاج جرام واحد من الماء إلى سعر حراري واحد لرفع درجة حرارته درجة واحدة (سلسيوس)، فيما يحتاج جرام من الحديد إلى ثمن $\left(\frac{1}{8}\right)$ هذه الكمّية. السبب هو أنّ حركة ذرّات الحديد الاهتزازية تكون ذهابًا وإيابًا، في حين جزيئات الماء تستهلك قدرًا لا بأس به من الطاقة في الحركة الدورانية وفي الحركة الاهتزازية للذرّات داخل الجزيء، وقدرًا آخر في استطالة الروابط. لذلك، تمتصّ كتلة معيّنة من الماء كمّية من الطاقة أكبر من تلك التي تمتصّها كتلة مساوية من الحديد لترتفع العدد نفسه من الدرجات، ويُعبَّر عن هذه الحقيقة بالقول إنّ الماء له سعة حرارية نوعية أكبر.



(شكل 8)
على الرغم من أنّ كلًّا من الإناءين يكتسبان القدر نفسه من الحرارة، إلّا أنّ درجة حرارة الإناء الذي يحتوي على كمّية أقل ترتفع أكثر.

(شكل 9)
تستطيع إزالة غطاء الألومينيوم عن صينية الطعام بإصبعك، ولكن إحذر لمس الطعام الموجود فيها، فهو يختزن طاقة حرارية أكبر بكثير من غطاء الألومينيوم.

وتُعرَّف السعة الحرارية النوعية Specific Heat Capacity c بأنّها كمّية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة كيلوجرامًا واحدًا من مادّة ما درجة حرارية واحدة على تدريج سلسيوس، وتكون وحدتها بحسب النظام الدولي للوحدات J/kg.K .

ويمكننا اعتبار أنّ السعة الحرارية النوعية هي قصور ذاتي حراري . فإذا استرجعنا مفهوم القصور الذاتي (على أنه مقياس لمقاومة الجسم للتغيُّر في حالته الحركية) وقارنّاه بمفهوم السعة الحرارية النوعية، نجد أنّ هذا الأخير يُعبِّر عن مقاومة الجسم للتغيّر في درجة حرارته .

3. السعة الحرارية Heat Capacity

تُبيّن لنا الفقرة السابقة أنّ السعة الحرارية النوعية خاصّية تتغيّر مع تغيّر نوع المادّة ومع تغيّر حالتها ولكنّها مستقلّة عن الكتلة . ولحساب الطاقة الحرارية المنتقِلة من مادّة إلى أخرى نستخدم أيضًا ما يسمّى بالسعة الحرارية . **السعة الحرارية Heat Capacity هي كمّية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة مادّة كتلتها m درجة واحدة على تدريج سلسيوس، وتكون وحدتها بحسب النظام الدولي للوحدات J/K .** وترتبط السعة الحرارية النوعية بالسعة الحرارية بحسب المعادلة التالية:

$$C = mc$$

ونلاحظ أنّه على عكس السعة الحرارية النوعية، تتغيّر السعة الحرارية مع تغيّر كتلة المادّة ونوعها .

4. المُسعِرات الحرارية Calorimeters

لقياس الحرارة أو السعة الحرارية النوعية نستخدم المُسعِر الحراري .

المُسعِر الحراري Calorimeter هو جهاز يعزل الداخل عن المحيط الخارجي ويسمح بتبادل الحرارة وانتقالها بين مادّتين أو أكثر داخله من دون أيّ تأثير من المحيط الخارجي، أي أنّه يشكّل نظامًا معزولًا .

فإذا مزجنا كمّية من الماء البارد وكمّية من الماء الساخن داخل مُسعِر حراري، يحدث التبادل الحراري بين كمّيات الماء فحسب ولا يؤثّر الهواء المحيط بالمُسعِر على هذا التبادل . هذا يعني أنّ الحرارة التي يخسرها الماء الساخن يكتسبها الماء البارد فحسب، أي أنّ هذا النظام لا يكتسب طاقة خارجية أخرى كالحرارة الصادرة من الشمس . يتضمّن المُسعِر الحراري ترمومترًا يمكّننا من مراقبة تغيُّر درجة حرارة النظام إلى أن يصل إلى الاتّزان الحراري، وخلّاطًا يساعد على خلط السوائل للحصول على نظام متجانس .

المادّة	c (J/kg.K)
ألومنيوم	8.99×10^2
نحاس	3.87×10^2
زجاج	8.37×10^2
ذهب	1.29×10^2
ثلج	2.09×10^2
حديد	4.48×10^2
فضّة	2.34×10^2
بخار	2.01×10^2
ماء	4.180×10^3

(جدول 1)
السعة الحرارية النوعية لموادّ عديدة

5. حساب الطاقة المكتسَبة والمفقودة

Calculating Gained and Lost Energy

لقد عرّفنا سابقًا السعة الحرارية النوعية بأنّها كمّية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة كيلوجرامًا واحدًا من مادّة ما درجة حرارية واحدة على مقياس سلسيوس والتي يمكن تمثيلها بالمعادلة التالية:

$$c = \frac{Q}{m\,\Delta T}$$

وعليه نستنتج أنّ معادلة حساب الطاقة المكتسَبة أو المفقودة تساوي:

$$Q = m\,c\,\Delta T$$

حيث Q هي الحرارة المكتسَبة أو المفقودة وتُقاس بوحدة الجول (J)، و m هي كتلة الجسم وتُقاس بحسب النظام الدولي بوحدة (kg)، و ΔT تساوي تغيُّر درجة الحرارة نتيجة الحرارة المكتسَبة أو المفقودة وتقاس بحسب النظام الدولي بوحدة (K).

$$\Delta T = T_f - T_i$$

علمًا أنّه يمكننا استخدام ΔT بوحدة (°C) من دون أن نضطرّ إلى تحويلها إلى وحدة (K) لأنّ الفارق بين درجتي الحرارة الابتدائية والنهائية هو نفسه وفق التدريجين. ويمكن حساب الحرارة باستخدام السعة الحرارية C بحسب المعادلة التالية:

$$Q = C\,\Delta T$$

حيث وحدة Q هي الـ Joule ووحدة C الـ J/K ووحدة ΔT هي °C أو K.

مثال (1)

أثناء تحضير القهوة، ترتفع درجة حرارة (250)g من الماء من (20)°C إلى (100)°C. علمًا أنّ السعة الحرارية النوعية للماء هي c = (4186)J/kg.K، أُحسب الطاقة التي نحتاج إليها لإجراء هذا التسخين.

طريقة التفكير في الحلّ

1. حلِّل: أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: كتلة الماء: m = (250)g = (0.25)kg

درجة الحرارة الابتدائية: T_i = (20)°C

درجة الحرارة النهائية: T_f = (100)°C

السعة الحرارية النوعية للماء: c = (4186)J/kg.K

غير المعلوم: الطاقة اللازمة للتسخين: Q = ?

مثال (1) (تابع)

2. أُحسب غير المعلوم.

باستخدام المعادلة الرياضية $Q = m\,c\,\Delta T$، وبالتعويض عن المقادير المعلومة، علمًا أنّ:

$$\Delta T = T_f - T_i = 100 - 20 = (80)^\circ C$$

وهي تساوي:

$$\Delta T = (80)K$$

ولأنّ الفارق هو نفسه وفق التدريجين، نجد:

$$Q = 0.25 \times 4186 \times 80$$

$$Q = (83720)J$$

3. قيِّم: هل النتيجة مقبولة؟

إنّ النتيجة مقبولة وتتناسب مع المقادير المُعطاة في المسألة.

6. قانون التبادل الحراري

Law of Exchange of Thermal Energy

يحصل التبادل الحراري عندما نمزج مادّتين أو أكثر ذات درجات حرارة مختلفة. تشكِّل هذه الموادّ نظامًا تنتقل الحرارة في داخله من مادّة إلى أخرى حتّى يصل النظام إلى الاتّزان الحراري. ويمكن حساب الحرارة التي تكتسبها أو تخسرها كلّ مادّة من الموادّ التي تشكّل النظام بالطريقة التالية:

$$Q_i = m\,c\,(T_f - T_i)$$

عندما تكون $T_f > T_i$ تكون $Q_i > 0$، أي أنّ المادّة تكتسب حرارة مقدارها $|Q_i|$.

أمّا إذا كانت $T_f < T_i$ فتكون $Q_i < 0$، أيّ أنّ المادّة تفقد حرارة مقدارها $|Q_i|$.

وعندما يكون النظام معزولًا كما هو الحال عندما يحصل التبادل الحراري داخل مُسعِر حراري، يكون مجموع الحرارة المتبادَلة بين مختلف مكوِّنات المزيج صفرًا، أي أنّ:

$$\Sigma Q_i = 0$$

هذا يعني أنّ الحرارة التي تخسرها المادّة الساخنة تكتسبها المادّة الباردة من دون أيّ تفاعل مع المحيط.

مثال (2)

نضع (400)g من الماء عند درجة حرارة (40)°C داخل مُسعِر . نضيف على هذه الكمّية قطعة من الزجاج درجة حرارتها (25)°C وكتلتها (300)g ، ثمّ نضيف (500)g من الألومنيوم درجة حرارته (37)°C .
أُحسب درجة حرارة الماء عندما يصل النظام (ماء + زجاج + ألومنيوم) إلى الاتّزان الحراري ، علمًا أنّ:
$c_{Al} = (900)J/kg.K$ و $c_w = (4190)J/kg.K$ و $c_g = (837)J/kg.K$

طريقة التفكير في الحلّ

1. حلِّل: أُذكر المعلوم وغير المعلوم .

المعلوم: كتلة الماء: $m_w = (0.4)kg$

درجة حرارة الماء الابتدائية: $T_{iw} = (40)°C$

السعة الحرارية النوعية للماء: $c_w = (4190)J/kg.K$

كتلة الزجاج: $m_g = (0.3)kg$

درجة حرارة الزجاج الابتدائية: $T_{ig} = (25)°C$

السعة الحرارية النوعية للزجاج: $c_g = (837)J/kg.K$

كتلة الألومنيوم: $m_{Al} = (0.5)kg$

درجة حرارة الألومنيوم الابتدائية: $T_{iAl} = (37)°C$

السعة الحرارية النوعية للألومنيوم: $c_{Al} = (900)J/kg.K$

غير المعلوم: الحرارة النهائية عند الاتّزان الحراري: $T_f = ?$

2. أُحسب غير المعلوم.

بما أنّ النظام معزول داخل المُسعِر الحراري نستخدم المعادلة التالية:

$$\Sigma Q_i = O$$

أي أنّ: $Q_{Al} + Q_g + Q_{Al} = 0$

ما يعني $m_w c_w (T_f - T_{i\,w}) + m_g c_g (T_f - T_{ig}) + m_{Al} c_{Al} (T_f - T_{i\,Al}) = 0$

$$(m_w c_w + m_g c_g + m_{Al} c_{Al}) T_f - m_w c_w T_{iw} - m_g c_g T_{i\,g} - m_{Al} c_{Al} T_{i\,Al} = 0$$

$$(m_w c_w + m_g c_g + m_{Al} c_{Al}) T_f = m_w c_w T_{iw} + m_g c_g T_{i\,g} + m_{Al} c_{Al} T_{i\,Al}$$

وعليه:

$$T_f = \frac{0.4 \times 4190 \times 40 + 0.3 \times 837 \times 25 + 0.5 \times 900 \times 37}{0.4 \times 4190 + 0.3 \times 837 + 0.5 \times 900}$$

$$T_f = (37.9)°C$$

3. قيِّم: هل النتيجة مقبولة؟

إنّ درجة الحرارة النهائية مقبولة لأنّ مقدارها يتراوح بين أصغر وأكبر درجة حرارة لمكوّنات هذا النظام المعزول عن المحيط .

7. السعة الحرارية النوعية العالية للماء

High Specific Heat of Water

للماء سعة حرارية نوعية عالية جدًّا تُعتبَر من أكبر السعات الحرارية النوعية ، ما يجعل الماء قادرًا على اختزان الحرارة والحفاظ عليها لفترة طويلة . فدرجة حرارة الماء تتغيّر ببطء ، أي أنّه يسخن ببطء ويبرد ببطء . هذه الخاصّية

مهمّة جدًّا إذ أنّها تجعل من الماء سائلًا مثاليًّا للتبريد والتسخين. ففي المحرّكات، مثلًا، يُستخدَم الماء للتبريد لأنّه يمتصّ كمّية كبيرة من الحرارة قبل أن ترتفع درجة حرارته، على عكس غيره من الموادّ أو السوائل. أمّا أجدادنا، فكانوا يستفيدون من السعة الحرارية النوعية العالية للماء باستخدام زجاجات الماء الحارّة لتدفئة أقدامهم في أيّام الشتاء القارس.

من ناحية أخرى، تساوي السعة الحرارية النوعية للماء حوالى خمسة أضعاف السعة الحرارية النوعية لليابسة. لذا، نستنتج أنّ الماء يتطلّب وقتًا أطول من اليابسة ليبرد أو ليسخن. ففي النهار، تسخن اليابسة بسرعة أكبر من ماء البحر، فيرتفع الهواء الساخن فوق اليابسة ويحلّ مكانه هواء بارد آتٍ من البحر فتبرد اليابسة. أمّا في الليل، تبرد اليابسة بسرعة أكبر من ماء البحر فيرتفع الهواء الساخن فوق البحر ويحلّ مكانه هواء بارد قادم من اليابسة فيُدفئ هواء البحر اليابسة. بالتالي، يصبح الفرق بين درجة حرارة اليابسة في النهار ودرجة حرارتها في الليل قليلًا. هذا ما يفسّر لماذا لا تعاني المدن القريبة من المساحات المائية الكبيرة من فرق كبير في درجات الحرارة بين الليل والنهار، على عكس المدن البعيدة عن المساحات المائية الكبيرة كالصحاري.

فقرة إثرائية

تأثير تيّارات المحيطات البحرية على المناخ

للمحيطات تأثير كبير على المناخ، إذ تغطّي 70% من مساحة الكرة الأرضية. فالتيّارات المائية في المحيط تنقل الحرارة من قارّة إلى أخرى مؤثّرة بذلك على الطقس. فعندما تنظر إلى خريطة العالم، ستلاحظ أنّ قارّة أوروبا تقع على العرض نفسه الذي تقع عليه المناطق الشمالية الشرقية من دولة كندا. ومع ذلك، فإنّ متوسّط درجة الحرارة في أوروبا أعلى من متوسّط درجة الحرارة في كندا على الرغم من تلقّيهما الكمّية نفسها من الطاقة الشمسية لكلّ كيلومتر مربّع. ويعود الفرق في متوسّط درجة الحرارة إلى السعة الحرارية النوعية العالية للماء، حيث يحمل التيّار البحري الذي يحدث في المحيط الأطلسي، والذي يسمّى «تيّار الخليج»، ماءً دافئًا من البحر الكاريبي. يتحرّك هذا التيّار باتّجاه الشمال الشرقي حاملًا معه كمّية كبيرة من الطاقة الحرارية وصولًا إلى شواطئ أوروبا الشمالية المطلّة على المحيط الأطلسي، حيث تبدأ الماء بفقدان الحرارة التي تحملها الرياح الغربية المنطلِقة فوق القارّة الأوروبية.

وبالطريقة نفسها، يختلف طقس السواحل الشرقية في قارّة أميركا الشمالية عن طقس السواحل الغربية. فالرياح التي تهبّ على هذه القارّة تكون رياحًا غربية، أي أنّ الرياح التي تهبّ على السواحل الغربية تتحرّك من المحيط الهادئ إلى اليابسة.

فقرة إثرائية (تابع)

وتسبّب السعة الحرارية النوعية العالية للماء عدم اختلاف درجة حرارته كثيرًا بين الصيف والشتاء، بحيث يكون الماء أكثر دفئًا من الهواء في فصل الشتاء وأقلّ منه في فصل الصيف. ففي الشتاء، يسبّب الماء تدفئة الهواء الذي يلامسه والذي يتحرّك باتّجاه السواحل الغربية، وفي الصيف يبرد الهواء فوق اليابسة الذي يتحرّك باتّجاه المحيط الأطلسي.

وبما أنّ اليابسة لها سعة حرارية نوعية أقلّ، فإنّها تسخن بسرعة في الصيف وتبرد بسرعة أيضًا في الشتاء. هذا يعني أنّه نتيجة للسعة الحرارية النوعية العالية للماء ولاتّجاه الرياح، تصبح المدن على الساحل الغربي أكثر دفئًا في الشتاء من مدن الساحل الشرقي، وأقلّ منها حرارة في الصيف على الرغم من وقوعهما على خطّ العرض نفسه. بالتالي، تشهد المناطق الداخلية في القارّات الكبيرة فروقًا كبيرة في درجات الحرارة بين فصلي الشتاء والصيف لعدم قربها من المساحات المائية الكبيرة، والتي يمكن أن تمدّها بالحرارة شتاءً وتخلّصها منها صيفًا.

مراجعة الدرس 1-2

أوّلًا – عرّف السعة الحرارية النوعية.

ثانيًا – هل الموادّ التي ترتفع درجة حرارتها بسرعة لها سعة حرارية نوعية كبيرة أم صغيرة؟

ثالثًا – لماذا لا تعاني المدن القريبة من مساحات الماء فرقًا كبيرًا في درجات الحرارة بين الليل والنهار؟

رابعًا – ما الفرق بين السعر والكيلوسعر؟

خامسًا – اكتسب (1) لتر من الماء كمّية معيّنة من الطاقة الحرارية فارتفعت حرارته إلى (2)°C. كم يكون الارتفاع في درجة (2) لتر من الماء عندما يكتسب الكمّية نفسها من الحرارة؟

سادسًا – ما هي كمّية الحرارة التي نحتاجها لرفع درجة (1) لتر من الماء بمقدار (15)°C؟ إذا اكتسب الماء هذه الطاقة بواسطة ملفّ تسخين قدرته (1000)W، ما الوقت اللازم لرفع درجة حرارة الماء (15)°C؟ علمًا أنّ السعة الحرارية النوعية للماء تساوي $c = (4180)J/kg.K$.

مسائل مع إجابات

1. ما هي كمّية الطاقة الحرارية التي يجب أن يكتسبها (4.11)g من النحاس لترتفع درجة حرارته (3.8)°C؟
علمًا أنّ السعة الحرارية النوعية للنحاس تساوي (390)J/kg.K.
الإجابة: (6.1)J

2. يُسخَّن قضيب من الألومنيوم كتلته (28.4)g حتّى تصل درجة حرارته إلى (39.4)°C، ثمّ يوضع داخل مُسعِر حراري يحتوي على (50)g من الماء فترتفع حرارة الماء من (21)°C إلى (23)°C. ما هي حرارة القضيب النهائية؟
(علمًا أنّ السعة الحرارية النوعية للألومنيوم c_{Al} تساوي $c_{Al} = (8.99 \times 10^2)J/kg.K$).
الإجابة: (23)°C

3. تُسخَّن قطعة من النحاس كتلتها (2.5)g، ثمّ توضع في مُسعِر حراري يحتوي على (65)g من الماء. ترتفع حرارة الماء من (20)°C إلى (22.5)°C. أُحسب درجة الحرارة الابتدائية لقطعة النحاس قبل إدخالها المُسعِر الحراري علمًا أنّ السعة النوعية للماء تساوي (4186)J/kg.K والسعة النوعية للنحاس هي (390)J/kg.K.
الإجابة: (720.2)°C

مراجعة الدرس 1-2

سابعًا – أُحسب السعة الحرارية النوعية لقضيب من الألومنيوم كتلته (28.4)g علمًا أنّه يحتاج إلى (207)J لترتفع درجة حرارته (8.1)°C.

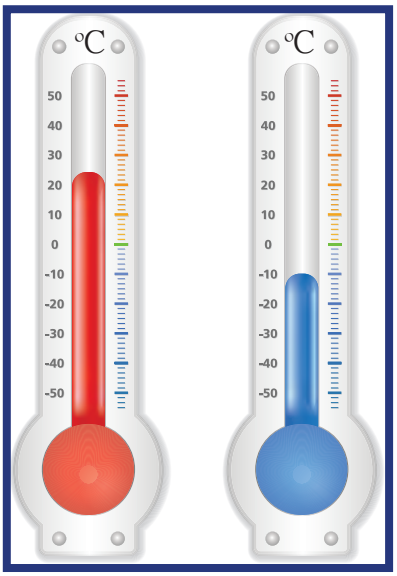
ثامنًا – نضع (250)g من الماء درجة حرارته (10)°C في مُسعِر حراري، ثمّ نضيف إليه قطعة من النحاس كتلتها (50)g ودرجة حرارتها (80)°C وقطعة من معدنٍ غير معروف كتلتها (70)g ودرجة حرارتها (100)°C. يصل النظام كلّه إلى الاتّزان الحراري فتكون درجة حرارته (20)°C. أُحسب السعة الحرارية النوعية للمعدن غير المعروف، بشرط أن تهمل السعة الحرارية النوعية للمُسعِر الحراري وتعتبره لا يتبادل حرارة مع النظام، وعلمًا أنّ السعة الحرارية النوعية للماء هي (4180)J/kg.K وأنّ السعة الحرارية النوعية للنحاس هي (386)J/kg.K.

الدرس 1-3

التمدُّد الحراري
Thermal Expansion

الأهداف العامة

- يفسّر التمدُّد والانكماش باستخدام مفهوم الطاقة الحركية .
- يعرّف التمدُّد الطولي للأجسام الصلبة .
- يعرّف معامل التمدُّد الطولي للأجسام الصلبة .
- يستنتج قانون التمدُّد الطولي عن طريق التجربة .
- يستنتج قانون التمدُّد الحجمي .
- يعطي أمثلة وتطبيقات لتمدُّد الموادّ الصلبة .
- يصف تمدُّد السوائل .
- يصف سلوك الماء عند تسخينه من 0°C إلى 100°C .
- يحلّ مسائل تطبيقية ويعطي أمثلة حياتية (الازدواج الحراري) .



(شكل 10)

تؤثّر درجة الحرارة على حجم الموادّ، فنلاحظ أنّ حجم جميع الأجسام عامّة يزداد مع ارتفاع درجة الحرارة ويتقلّص مع تدنّيها . ولهذه الظاهرة فوائد وتطبيقات كثيرة في حياتنا اليومية . فهذا التمدُّد هو أساس عمل الترمومتر (شكل 10) المُستخدَم لقياس درجة الحرارة . في هذا الدرس سنتعرّف سبب هذا التمدُّد وسنحسب مقداره في الموادّ الصلبة والسوائل . وسنكتشف أيضًا أنّ للماء سلوك استثنائي أثناء تسخينه ، وسنكتشف أهمّية التمدُّد الحراري وطرق الاستفادة منه في الحياة اليومية من خلال دراسة الازدواج الحراري .

1. التمدُّد والانكماش Expansion and Shrinkage

عند ارتفاع درجة حرارة مادّة ما، تزداد الحركة الاهتزازية لجزيئاتها. يؤدي ذلك إلى تباعد الجزيئات أثناء هذا الاهتزاز، وينتج عنه تمدُّد المادّة ككلّ. وبصفة عامّة، تتمدّد جميع الموادّ، سواء أكانت موادّ صلبة أو سائلة أو غازية، عند رفع درجات حرارتها، وتنكمش عند انخفاضها (حالات الاستثناء موجودة وإن كانت قليلة). تسبّب التغيّرات في ضغط الغازات أو درجة حرارتها تغيُّرًا في الحجم (زيادة أو نقصان) بمقدار أكبر مقارنة بالزيادة التي تحدث للسوائل، وتكون هذه الزيادة أكبر من الموادّ الصلبة.

عند رصف الطرق السريعة أو إنشائها، يجب أن تُترَك بين أجزاء الإسفلت فواصل كلّ مسافة معيّنة. وتُملأ هذه الفواصل بمادّة قابلة للانضغاط، مثل القار، حتى لا تنثني هذه الطبقات أو تتكسّر نتيجة التمدُّد والانكماش الحاصلين عند ارتفاع درجة الحرارة أو انخفاضها بين الليل والنهار أو بين الصيف والشتاء. لذلك يجب أن يراعى ذلك عند التشييد والبناء.

أطبّاء الأسنان أيضًا يراعون استخدام موادّ لها مقدار تمدُّد مادّة «مينا الأسنان» عند حشو الأسنان، ومحرّكات السيارات المصنوعة من الألومنيوم يكون لها قطر داخلي أقلّ من قطر المحرّكات المصنوعة من الحديد للسماح بالتمدُّد الكبير للألومنيوم. أمّا المهندسون المدنيّون فإنّهم يراعون أن يكون معدّل تمدُّد حديد التسليح المُستخدَم في الإسمنت المسلَّح مساويًا لمعدّل تمدُّد الإسمنت. وعند إنشاء الجسور الطويلة والمصنوعة من الصلب، يُثبَّت أحد طرفيها في حين يرتكز الطرف الآخر على ركائز دوّارة تسمح بتمدُّد الصلب وانكماشه بين فصلي الشتاء والصيف. وهناك فواصل متداخلة فوق سطحها حيث تتحرّك السيارات فوقها تُسمّى فواصل التمدُّد (شكل 11).

(شكل 11)
يُسمّى هذا الفراغ فاصلة التمدُّد وهو يسمح بالتمدُّد في الصيف وبالانكماش في الشتاء.

2. التمدُّد الطولي في الأجسام الصلبة Linear Expansion in Solids

عند بناء الجسور، يحرص المهندسون على اتّخاذ احتياطات لتفادي ما يطرأ من تغيُّرات نتيجة تبادل الحرارة. فيتركون فراغات وفواصل صغيرة تسمح بتمدُّد أقسام الجسر في فصل الصيف. وإنّ هذا التمدُّد في اتّجاه واحد هو ما يُعرَف بالتمدُّد الطولي للأجسام الصلبة. وقد صُمِّمت وصُنعت بعض الموادّ لكي لا يكون لها تمدُّد طولي كزجاج الأفران ومرايا التلسكوبات الكبيرة. ولفهم تمدُّد الأجسام الصلبة بصورة أعمق، تذكّر أنّ جزيئات المادّة الصلبة ترتبط بواسطة روابط كيميائية تُمثَّل بنوابض. وعند ارتفاع درجة حرارة الجسم الصلب تهتزّ جزيئاته بسرعة كبيرة فتتباعد عن بعضها ويتمدّد الجسم الصلب.

3. قانون التمدُّد الطولي في الأجسام الصلبة ومعامل التمدُّد الطولي

Law of Linear Expansion in Solids and Coefficient of Linear Expansion

تُظهر التجارب أنّ تغيُّر طول جسم صلب بمقدار ΔL يتناسب طرديًّا مع تغيُّر درجات حرارة الجسم، والطول الأولي للجسم L_0، أي أنّ:

$$\Delta L = kL_0\Delta T$$

فطول جسم صلب، على سبيل المثال، يزداد بمقدار ΔL إذا ما ارتفعت درجة حرارته بمقدار ΔT. أمّا إذا ارتفعت درجة حرارته بنصف المقدار السابق (أي $\frac{\Delta T}{2}$)، فإنّ طوله سيزداد بنصف ما ازداد عليه (أي $\frac{\Delta L}{2}$). كذلك إنّ ساقًا طوله مترين يزداد ضعف ساق طوله متر مصنوع من المادّة نفسها إذا ما تغيّرت درجة حرارتهما بالمقدار نفسه.

وأظهرت التجارب أنّ ثابت التناسب (k) بين تغيُّر الطول (ΔL) والطول الأصلي ودرجة الحرارة يتوقّف على نوع المادّة ويسمّى معامل التمدُّد الطولي حيث إنّ لكلّ مادّة معامل تمدُّد طولي خاصّ بها يُرمَز له بالحرف اللاتيني "α". يمكننا أن نستنتج من هذه التجارب أنّ مقدار التغيُّر الطولي لساق ما يتناسب طرديًّا مع الطول الأصلي والتغيّر في درجة الحرارة، كما أنّه يتوقّف على نوع مادّة الساق. بالتالي، يمكننا صياغة قانون التمدُّد الطولي بالمعادلة التالية:

$$\Delta L = L_0\ \alpha\ \Delta T$$

حيث α هي ثابت التناسب ويُسمّى معامل التمدُّد الطولي وتُقاس بحسب النظام الدولي للوحدات بوحدة $\frac{1}{^\circ C}$ أو $(^\circ C)^{-1}$، بينما ΔT تُمثِّل التغيُّر في درجة الحرارة.

مثال (1)

يُصنَع السخّان الكهربائي بواسطة قضيب من نحاس طوله (5)m.
أُحسب طول هذا القضيب عندما ترتفع درجة حرارته (5)°C، علمًا أنّ معامل التمدُّد الطولي للنحاس يساوي $(17 \times 10^{-6})(^\circ C)^{-1}$.

1. حلّ: أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: طول القضيب: $L_1 = (5)m$

معامل التمدُّد الطولي للنحاس: $\alpha = (17 \times 10^{-6})(^\circ C)^{-1}$

فرق درجات الحرارة: $\Delta T = (5)^\circ C$

مثال (1) (تابع)

غير المعلوم: الطول النهائي للقضيب $L_2 = ?$

2. أُحسب غير المعلوم.

$$L_2 = L_1 + \alpha L_1 \Delta T$$

أي $L_2 = 5 + 17 \times 10^{-6} \times 5 \times 5$

$$L_2 = 5 + 425 \times 10^{-6}$$

$$= (5.000425)\text{m}$$

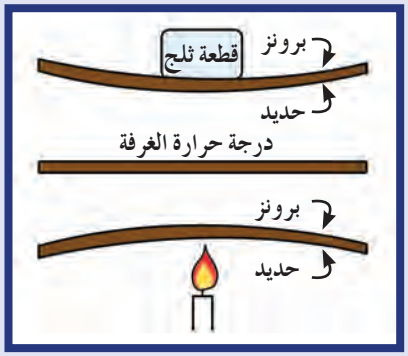
1. قيّم: هل النتيجة مقبولة؟

لن يتأثر طول هذا القضيب عندما ترتفع درجة حرارته 5°C لأنّ معامل التمدُّد الطولي للنحاس صغير جدًا.

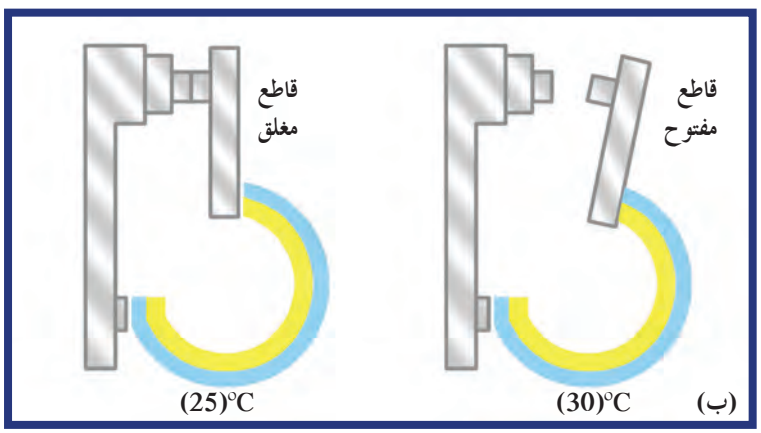
1.3 تطبيقات على التمدُّد الطولي: المزدوجة الحرارية

Applications on Thermal Expansion: Thermocouple

تتمدّد الموادّ المختلفة بمعدّلات مختلفة، ففي المزدوجة الحرارية Thermocouple يتمّ لحام شريطين متساويين في الأبعاد من مادّتين مختلفتين كالبرونز (سبيكة من النحاس والقصدير) والحديد (شكل 12). ويظهر الفرق في تمدُّد البرونز والحديد عند تسخين المزدوجة الحرارية إذ تؤدّي زيادة تمدُّد أحد الشريطين عن الآخر إلى انحناء المزدوجة، والعكس صحيح. فعند تبريد المزدوجة تنثني هذه الأخيرة أيضًا ولكن بعكس الاتّجاه السابق لأنّ الشريط الذي يتمدّد أكثر عند التسخين ينكمش أكثر عند التبريد. ويمكن الاستفادة من الحركة المزدوجة هذه في صناعة أنواع معيّنة من الصمّامات أو في تشغيل مفتاح كهربائي.



(شكل 12)
يتمدّد (ينكمش) البرونز عندما يسخن (يبرد) أكثر من الحديد، ويؤدي ذلك إلى انحناء المزدوجة الحرارية.



(شكل 13)
عمل الثرموستات
(أ) شريحة ذات معدنين تنحني عندما تتغيّر درجة الحرارة نتيجة اختلاف معامل التمدّد لهما حيث أنّ البرونز يتمدّد أكثر من الحديد.
(ب) شريحة ذات معدنين تستخدم في المنظّم الحراري لفتح الدائرة الكهربائية أو إغلاقها فعندما ترتفع درجة الحرارة يتمدّد البرونز فيدفع القاطع لفصل التيار الكهربائي عن الدائرة الكهربائية.

يُعتبَر الثرموستات (منظِّم الحرارة) تطبيقًا عمليًّا للمزدوجة الحرارية (شكل 13). إنّ انثناء المزدوجة الحرارية إلى الأمام أو إلى الخلف يفتح أو يغلق الدائرة الكهربائية. وعندما يكون جوّ الغرفة شديد البرودة، تنحني المزدوجة الحرارية باتّجاه شريط البرونز، ما يؤدّي إلى غلق الدائرة الكهربائية للسخّان فتنطلق الحرارة. وعندما تصبح حرارة الغرفة مرتفعة، تنحني باتّجاه الحديد، فتفتح الدائرة ويتوقّف السخّان عن العمل.

ويُستخدَم الثرموستات أيضًا للتحكّم في درجة التبريد في الثلاجات بحيث لا تصبح باردة أو حارّة أكثر من اللازم. وتُستخدَم أنواع خاصة من المزدوجة الحرارية في أفران تسخين الخبز وفي الأفران الأوتوماتيكية وفي العديد من الأجهزة الأخرى.

منظّم الحرارة في السخان الكهربائي يقوم بتوصيل التيّار الكهربائي إلى عنصر التسخين لترتفع درجة حرارته، وتنتقل الحرارة بالتالي إلى الماء بواسطة تيارات الحمل. وعندما تصل درجة الحرارة إلى الحرارة المطلوبة، يفصل منظّم الحرارة التيّار الكهربائي وتتوقّف عملية التسخين.

يعتمد مقدار التمدُّد الحادث لمادّة معيّنة على التغيُّر في درجة حرارتها، فإذا سخن أو برد أحد أجزاء قطعة من الزجاج بمعدّل أكبر من جزء آخر مجاور له، يؤدّي هذا التغيّر في التمدُّد أو الانكماش إلى تكسُّر الزجاج، بحيث يظهر هذا التكسُّر بوضوح في أنواع الزجاج السميك. أمّا نوع الزجاج المقاوم لتغيُّرات درجة الحرارة، فهو زجاج له معامل تمدُّد حراري صغير جدًّا لذا لا تؤثّر عليه هذه التغيُّرات بشكل كبير.

4. التمدُّد الحجمي في الأجسام الصلبة

Volumetric Expansion in Solids

لإظهار التمدُّد الحجمي في الأجسام الصلبة، نستخدم تجربة الحلقة والكرة (شكل 14). قبل تسخين الكرة، وعند درجة حرارة الغرفة، تدخل الكرة في الحلقة بسهولة. عند تسخين الكرة بواسطة رأس مسخِّن نلاحظ أنّ عملية إدخال الكرة في الحلقة تصبح صعبةً جدًّا، لا بل مستحيلة. فقد أصبح حجم الكرة أكبر من قطر الحلقة، لذا نستنتج أنّ الكرة تمدّدت في جميع الاتّجاهات لأنّها حافظت على شكلها الكروي ولم تدخل في الحلقة.

للأجسام الصلبة ثلاث أبعاد هي الطول والعرض والارتفاع. وعندما ترتفع درجة حرارتها، تزداد الطاقة الحركية لكلّ الجزيئات وفي كلّ الاتّجاهات. لذا يترافق ارتفاع درجة حرارة جسم صلب مع تمدُّد طول هذا الجسم وعرضه وارتفاعه. ويتناسب تغيُّر الحجم مع حجم الجسم ودرجة حرارته. فإذا كان حجم الجسم V_0 عندما تكون درجة حرارته T_0 و V_1 عندما تصبح درجة حرارته T_1، يمكننا أن نكتب معادلة التغيُّر الحجمي بالشكل التالي:

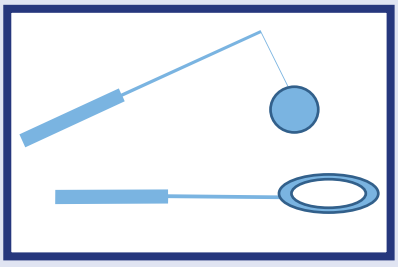
$$V_1 = V_0 + \beta V_0 (T_1 - T_0) \Rightarrow \Delta V = \beta V_0 \Delta T$$

فقرة إثرائية

العقل فوق القوّة

إذا صعُب عليك فتح الغطاء المعدني لإناء زجاجي، هل يمكن أن يساعدك التمدُّد الحراري الذي درسته؟ ضَع الغطاء المعدني أسفل تيّار ماء ساخن لفترة صغيرة، ثمّ حاول فتحه مجدّدًا.

هل لاحظت سهولة فتح الغطاء بعد التسخين؟ هل يمكنك تفسير ما حدث؟ ما المفهوم الفيزيائي هنا؟



(شكل 14)
تجربة الكرة والحلقة

حيث β ثابت التناسب ويُسمّى معامل التمدّد الحجمي $\beta = \frac{\Delta V}{V_0 \Delta T}$ وتُقاس بوحدة $(^oC)^{-1}$ ، يمكن تعريف معامل التمدُّد الحجمي بأنه التغيُّر في وحدة الأحجام عندما تتغيّر درجة حرارته درجة مئوية واحدة ، أي أنّ:

$$\Delta V = \beta V_0 \Delta T$$

نلاحظ هنا أنّ وحدة β هي نفسها وحدة α وبما أن معامل التمدُّد الطولي α هو نفسه في جميع الاتّجاهات ، يرتبط معامل التمدُّد α و β بالمعادلة $\beta = 3\alpha$ وتصبح $\Delta V = 3\alpha V_0 \Delta T$.

المادّة	$\alpha\ (10^{-6}(^oC)^{-1})$	$\beta\ (10^{-6}(^oC)^{-1})$
الألومنيوم	23.1	69
النحاس	17	51
الزجاج	8.5	25.5
الذهب	14	42
البرونز	20	60
الحديد	11.8	33.3
الرصاص	29	87

(جدول 2)
معامل التمدُّد الطولي والحجمي لعدد من الموادّ

مثال (2)

يسخّن مكعّب من الحديد فترتفع درجة حرارته من $(20)^oC$ إلى $(1000)^oC$.

(أ) أُحسب معامل التمدُّد الحجميّ للحديد علمًا أنّ حجمه يساوي $(100)cm^3$ عند درجة $(20)^oC$ و $\Delta V = (3.3)cm^3$

(ب) استنتج معامل التمدُّد الطولي للحديد .

1. حلّل: أُذكر المعلوم وغير المعلوم .

المعلوم: حجم الحديد عند درجة $(20)^oC$: $V_0 = (100)cm^3$

تغيُّر حجم مكعّب الحديد: $\Delta V = (3.3)cm^3$

درجة الحرارة النهائية: $T_f = (1000)^oC$

غير المعلوم: **(أ)** $\Delta T = T_f - T_i$ ، أي ارتفاع درجة الحرارة

(ب) معامل التمدُّد الحجمي $\beta = \frac{\Delta V}{V_0 \Delta T}$

(جـ) معامل التمدُّد الطولي للحديد $\alpha = \frac{\beta}{3}$

مثال (2) (تابع)

2. أُحسب غير المعلوم.

(أ) $\Delta T = 1000 - 20 = (980)^{\circ}C$

(ب) $\beta = \frac{\Delta V}{V_0 \Delta T} = \frac{3.3}{100 \times 980}$

$= (3.36 \times 10^{-5})(^{\circ}C)^{-1}$

(جـ) $\alpha = \frac{\beta}{3} = (1.12 \times 10^{-5})(^{\circ}C)^{-1}$

3. **قيّم:** هل النتيجة مقبولة؟

تقترب هذه النتائج من معامل التمدُّد الطولي للحديد المعطاة في الجدول (2)، ما يؤكّد صحّة العلاقة بين معامل التمدُّد الطولي ومعامل التمدُّد الحجمي.

5. تمدُّد السوائل Expansion of Liquids

كما سبق أن ذكرنا في هذا الدرس، لارتفاع درجة الحرارة وانخفاضها تأثير على حجم الموادّ سواء أكانت صلبة أم سائلة أم غازية. وقد ناقشنا في الفقرات السابقة تمدُّد الموادّ الصلبة وانكماشها مع تغيُّر درجات الحرارة. وفي هذه الفقرة، سنتناول تأثير تغيّر درجات الحرارة على الموادّ السائلة. كما في حال الموادّ الصلبة، يترافق ارتفاع درجة حرارة السوائل مع ارتفاع الطاقة الحركية لجزيئات السائل فتتباعد عن بعضها بعضًا ويتمدّد السائل. ونظرًا لأنّ لجزيئات السائل حرّية في التحرُّك أكبر من حرّية تحرُّك جزيئات الموادّ الصلبة، تتباعد هذه الجزيئات عن بعضها مسافات أكبر من المسافات التي تتباعدها جزيئات الموادّ الصلبة. ونتيجة لذلك، تتمدّد السوائل بمقدار أكبر من مقدار تمدُّد الأجسام الصلبة. فالسوائل تتمدّد على الأقلّ عشر مرّات أكثر من الموادّ الصلبة عندما تتعرّض لفرق درجات الحرارة نفسها. والجدير بالذكر أيضًا هو أنّ معدّل تمدُّد السوائل يتغيّر بحسب مجال درجة الحرارة.

6. التمدُّد الحقيقي والتمدُّد الظاهري Real and Apparent Expansion

لا تملك السوائل شكلًا محدّدًا، فهي تتّخذ شكل الإناء الذي يحويها، لذا لا ترتفع درجة حرارتها قبل أن ترتفع درجة حرارة هذا الإناء. ونتيجة لذلك، يتمدّد الإناء قبل أن يتمدّد السائل، فنلاحظ أنّ مستوى السائل يهبط قليلًا قبل أن يرتفع مجدّدًا مع تمدُّد السائل. فإذا سكبنا كمّية من الماء في دورق مدرَّج ورفعنا درجة حرارتها، نلاحظ أنّ مستوى الماء يرتفع في الدورق لكن الحجم الإضافي لا يعبّر عن التمدُّد الحقيقي للماء لأنّه لا يأخذ في عين الاعتبار تمدُّد الدورق. لذلك، سنعرّف التمدُّد الحقيقي والتمدُّد الظاهري للسوائل.

مسائل مع إجابات

1. إنّ طول ساق نحاسيّ عند درجة $20^{\circ}C$ يساوي $3m$. أُحسب تغيُّر الطول عندما ترتفع درجة حرارته إلى $40^{\circ}C$. علمًا أنّ معامل التمدُّد الطولي لهذا الساق يساوي $17 \times (10^{-6})(^{\circ}C)^{-1}$.
الإجابة: $1.02mm$

2. تتكوّن سكّة حديد من قضبان فولاذية، طول كلّ واحد منها $12.2m$. يتمدّد كلّ قضيب بمقدار $2.379mm$ عندما ترتفع درجة حرارة الفولاذ بمقدار $15^{\circ}C$. أُحسب معامل التمدُّد الطولي للفولاذ.
الإجابة: $13 \times 10^{-6}(^{\circ}C)^{-1}$

3. يبلغ طول نصف قطر كرة حديدية $3cm$ عند درجة حرارة $20^{\circ}C$. معامل التمدُّد الحجمي للحديد هو $33.3 \times 10^{-6}(^{\circ}C)^{-1}$. أُحسب الحجم النهائي لهذه الكرة عندما تصل درجة حرارتها $15^{\circ}C$.
الإجابة: $113.05cm^3$

4. ترتفع درجة حرارة مكعّب من الألومنيوم مقدار ΔT يساوي $20^{\circ}C$ فيصبح حجمه $1001.38cm^3$. أُحسب الحجم الأساسي لهذا المكعّب علمًا أنّ معامل التمدُّد الحجمي للألومينيوم يساوي $69 \times 10^{-6}(^{\circ}C)^{-1}$.
الإجابة: $1000cm^3$

فالتمدُّد الظاهري Apparent Expansion ΔV_a هو تمدُّد السائل عندما نعتبر أنّ الإناء الذي يحويه لم يتمدّد . أمّا التمدُّد الحقيقي Real Expansion ΔV_r فهو مجموع التمدُّد الظاهري وتمدُّد الإناء ΔV_c .

$$\Delta V_r = \Delta V_a + \Delta V_c$$

7. معامل التمدُّد في السوائل

Coefficient of Expansion in Liquids

إذا سكبْت كمّية من أحد السوائل داخل إناء، يكون حجمه V_0 عند درجة حرارة T_0 . ترتفع درجة حرارة النظام المكوَّن من الماء والإناء إلى درجة حرارة T_1 فيصبح الحجم الظاهري للسائل V_1 وحجمه الحقيقي V_2 .
وتكون العلاقة بين الحجم الظاهري V_1 والحجم الأساسي V_0:

$$V_1 - V_0 = \gamma_a V_0 (T_1 - T_0)$$

أي $$\Delta V_a = \gamma_a V_0 \Delta T$$

ويكون $\gamma_a = \dfrac{\Delta V_a}{V_0 \Delta T}$ معامل التمدُّد الظاهري للسائل ووحدته $(^oC)^{-1}$.
أمّا العلاقة بين الحجم الحقيقي V_2 والحجم الأساسي V_0 هو:

$$V_2 - V_0 = \gamma_r V_0 (T_1 - T_0)$$

أي $$\Delta V_r = \gamma_r V_0 \Delta T$$

ويكون $\gamma_r = \dfrac{\Delta V_r}{V_0 \Delta T}$ معامل التمدُّد الحقيقي للسائل ووحدته $(^oC)^{-1}$.
أمّا العلاقة التي تربط γ_a و γ_r فيمكن استنتاجها من خلال المعادلة:

$$\Delta V_r = \Delta V_a + \Delta V_c$$

ويكون مقدار تمدُّد الإناء مساويًا $\Delta V_c = \beta V_0 \Delta T$ حيث β هو معامل تمدُّد الإناء. بالتالي، نستنتج أنّ:

$$\gamma_r = \gamma_a + \beta$$

ويكون معامل التمدُّد الحقيقي للسائل خاصّية من خصائص السائل. يظهر الجدول (3) معامل التمدّد الحقيقي لعدد من السوائل.

السائل	$\gamma_r\ (10^{-5})$ $(^oC)^{-1}$
الزئبق	18.18
البنزين	121
الكحول	110
حمض الكبريت	57
الكلوروفورم	126
زيت الزيتون	70
الماء (5 – 10°C)	5.3
الماء (20 – 40°C)	30.2

(جدول 3)
معامل التمدّد الحقيقي لعدد من السوائل

مثال (3)

يستخدم الترمومتر لقياس درجة الحرارة ويرتكز في ذلك على تمدُّد حجم الزئبق داخل أنبوب شعري. نلاحظ أنّ حجم الزئبق الحقيقي يرتفع داخل الأنبوب الشعري من $(3)mm^3$ إلى $(3.0017)mm^3$ حين ترتفع درجة حرارة الترمومتر من $(36)^oC$ إلى $(39)^oC$. أُحسب معامل التمدُّد الحقيقي للزئبق (بإهمال تمدد الأنبوب الشعري).

1. حلِّل: أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: الحجم الأساسي للزئبق: $V_0 = (3)mm^3$.

الحجم الحقيقي النهائي للزئبق: $V_2 = (3.0017)mm^3$

درجة الحرارة الابتدائية: $T_0 = (36)^oC$

درجة الحرارة النهائية: $T_1 = (39)^oC$

غير المعلوم: **(أ)** فرق درجة الحرارة: $\Delta T = ?$

(ب) معامل التمدُّد الحقيقي للزئبق $\gamma = \frac{\Delta V}{V_0 \Delta T}$

2. أُحسب غير المعلوم.

(أ) $\Delta T = T_1 - T_0 = (3)^oC$

(ب) $\gamma = \frac{V_2 - V_0}{V_0 \Delta T} = \frac{3.0017 - 3}{3 \times 3} = (18.8 \times 10^{-5})(^oC)^{-1}$

3. قيِّم: هل النتيجة مقبولة؟

إنّ معامل التمدُّد الحجمي الحقيقي للزئبق قريب من المعامل المعطى في الجدول (3).

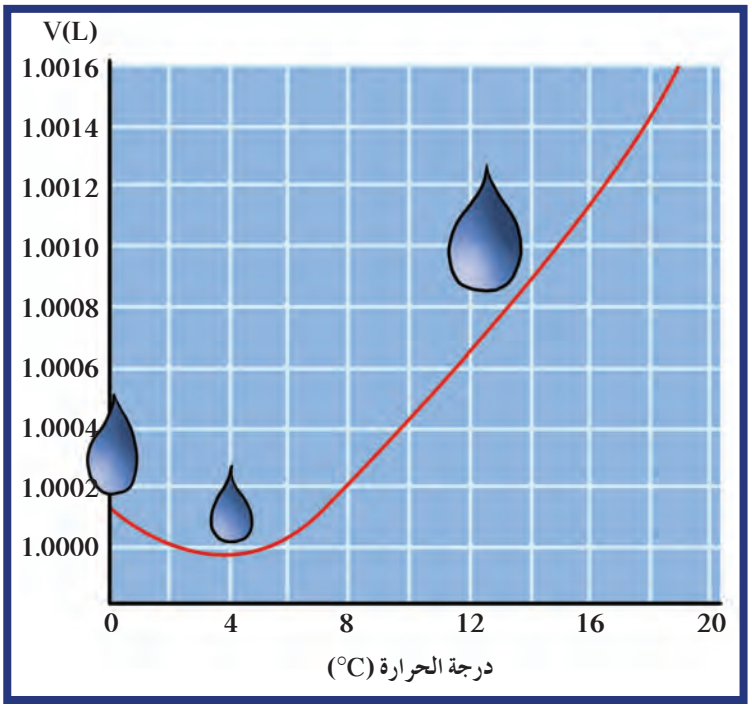
8. شذوذ الماء Anomalous Expansion of Water

تتمدّد جميع السوائل عندما ترتفع درجة حرارتها ما عدا الماء فهو يشذّ عن هذه القاعدة، إذ ينكمش عندما ترتفع درجة حرارته عن الصفر ويستمرّ بالانكماش حتّى تصل درجة حرارته إلى $(4)^oC$. ويبدأ الماء بالتمدُّد مع ارتفاع درجات الحرارة حتّى تصل هذه الدرجة إلى درجة الغليان $(100)^oC$. يوضّح الشكل (15) تصرّف الماء الذي يشذّ عن القاعدة بين $(0)^oC$ و $(4)^oC$.

مسائل مع إجابات

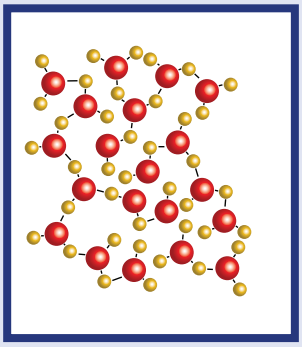
1. إذا كانت كثافة الزئبق عند درجة حرارة $(15)^oC$ هي $(13.56)g/cm^3$. أُحسب حجم $(600)g$ من الزئبق حين تكون درجة حرارته $(115)^oC$.

الإجابة: $V_f = (45.05)cm^3$

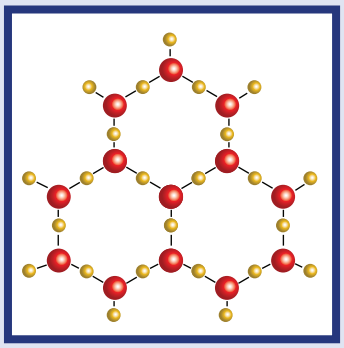


(شكل 15)
يتغيّر حجم الماء مع زيادة درجة الحرارة.

تُظهر دراسة المنحنى البياني أنّ حجم كمّية من الماء يصل إلى حدّه الأدنى عندما تصل درجة حرارته إلى 4°C(4) . نتيجة لذلك، تصل كثافة الماء إلى حدّها الأقصى عندما تكون درجة حرارة الماء 4°C(4)، إذ تتناسب الكثافة عكسيًّا مع الحجم. ونستنتج أيضًا أنّ كثافة الماء عند درجة 0°C(0) أقلّ من كثافتها عند درجة 4°C(4)، لذلك يطفو الثلج على سطح الماء. ولخاصّية الماء هذه أهمّية كبيرة في الطبيعة إذ أنّها تشرح سبب بقاء الثلج على سطح البحار والمحيطات وسبب استقرار الماء في القاع، ما يحافظ على أشكال الحياة البحرية في فصل الشتاء. يرتبط تفسير هذا السلوك الغريب للماء بالتركيب الفريد لبلّورات الثلج. فمن المعتاد أن تنتظم جزيئات المادّة بحيث يكون الحجم الذي تشغله وهي في الحالة الصلبة أقلّ من الحجم الذي تشغله وهي في الحالة السائلة. أمّا بلّورات الثلج، فلها تركيب بلّوري مفتوح (شكل 16) وقد نشأ هذا التركيب البلوري الفريد من التركيب الزاوي لجزيئات الماء ومن روابط الهيدروجين التي تهيمن على القوى الرابطة بين الجزيئات. فيكون بذلك



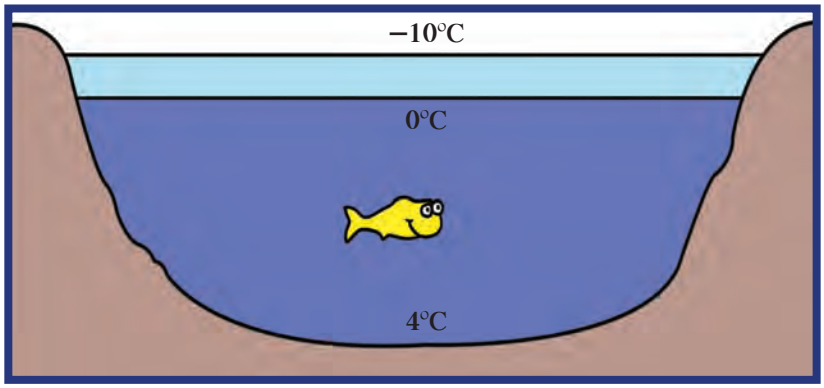
ماء في الحالة السائلة



ماء في الحالة الصلبة

(شكل 16)
تترتّب جزيئات الماء في تركيب بلّوري مفتوح سداسي الأضلاع، وبالتالي يتمدّد الماء عند تجمُّده وتصبح كثافة الثلج أقلّ من كثافة الماء.

تركيب الثلج أقلّ تراصًّا من تركيب الماء عند درجة 4)°C)، وتكون كثافة الثلج أصغر من كثافة الماء عند درجة 4)°C).



(شكل 17)

عندما يبرد ماء البحيرة عند السطح، يتحرّك الماء نحو القاع حتى تصبح درجة حرارة ماء البحيرة 4)°C).
عندئذٍ يمكن أن يبرد ماء السطح ليصل إلى درجة الصفر من دون أن يتحرّك نحو القاع.

مراجعة الدرس 1-3

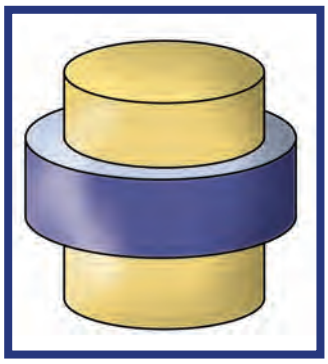
ملاحظة: إستخدِم الثوابت الواردة في الجدول (2) ص 34 حيث يلزم الأمر.

أوّلًا – ما سبب انحناء المزدوجة الحرارية عند تسخينها أو تبريدها؟

ثانيًا – ما سبب تجمُّد ماء البحيرات من أعلى إلى أسفل؟

ثالثًا – ما سبب تركيب أسلاك الهاتف بشكل غير مشدود في فصل الصيف؟

رابعًا – عندما تُدخِل حلقة من الحديد الصلب الساخن حول أسطوانة من البرونز (شكل 18) يُقال إنّها التحمت معها في موضع تثبيتها، ولا يمكن نزعها ولو بالتسخين. تُسمّى هذه الطريقة التثبيت بالتقلُّص Shrink Fitting. اشرح كيفية حدوث هذه العملية. ماذا تستنتج منها فيما يخصّ تمدُّد الحديد والبرونز؟



(شكل 18)

خامسًا – ساق معدنية طولها مترًا تتمدّد بمقدار 0.5)cm) عند تسخينها عند درجة حرارة معيّنة. ما مقدار تمدُّد ساق أخرى من المعدن نفسه طولها 100)m) عند تسخينها عند درجة الحرارة نفسها؟

مراجعة الدرس 1-3

سادسًا – يتمدّد الصلب طوليًّا بمعدّل جزء لكلّ 100 000 جزء من طوله عند رفع درجة حرارته درجة واحدة. كم تبلغ الزيادة في طول جسر من الصلب (كوبري) طوله (1.5)km عند رفع درجة حرارته (20)°C؟

سابعًا – يرتفع برج إيفل في باريس إلى (300)m في يوم درجة حرارته (22)°C. كم يزيد طول البرج إذا علمت أنّه مصنوع من الحديد في يوم مشمس درجة حرارته (40)°C؟ يجب أن تكون إجابتك بوحدة السنتيمتر.

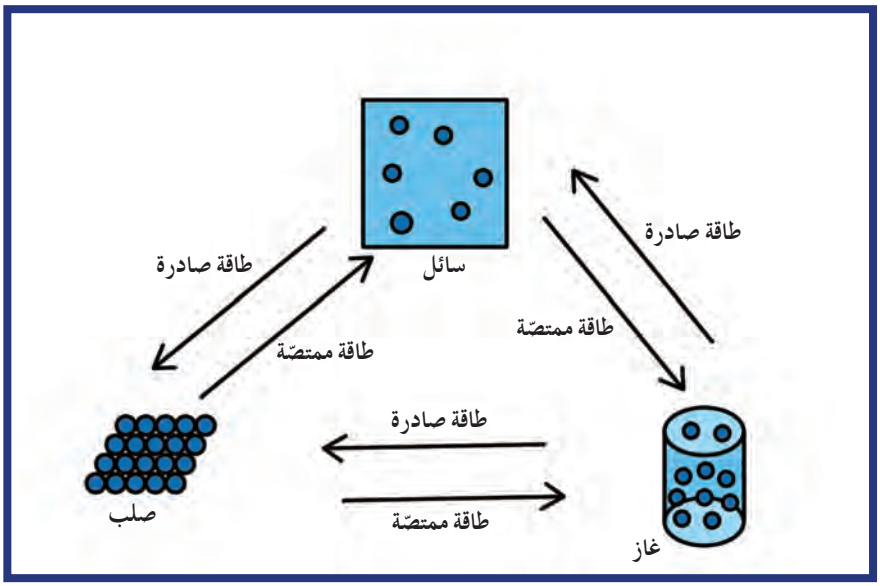
ثامنًا – يزيد طول ساق من الألومنيوم بمقدار (0.0033)m عند رفع درجة حرارتها من (20)°C إلى (100)°C. ما الطول الأصلي للساق قبل تسخينها؟

تاسعًا – سخّن شريطين متساويين في الطول أحدهما ألومنيوم والآخر حديد إلى درجة الحرارة نفسها. أيّ الفلزّين يتمدّد أكثر؟ ما نسبة تمدُّد أحدهما بالمقارنة مع الآخر؟

عاشرًا – شريطان أحدهما ألومنيوم والآخر حديد طول كلّ منهما (5)m عند (20)°C. كم يصبح الفرق بين طولي الشريطين عند تسخينهما إلى (200)°C؟

الحادي عشرَ – تمّت تعبئة خزّان من الألومنيوم سعته (10)L من البنزين عند درجة حرارة (5)°C. ثمّ تمّ تسخين هذا الخزان حتّى وصلت درجة حرارته إلى (80)°C. أُحسب كمّية البنزين التي ستفيض علمًا أنّ:
معامل التمدُّد الحجمي الحقيقي للبنزين يساوي $\gamma_r = (121 \times 10^{-5})(^{\circ}C)^{-1}$، ومعامل التمدُّد الحجمي للألومنيوم يساوي: $\beta = (69 \times 10^{-6})(^{\circ}C)^{-1}$.

دروس الفصل
الدرس الأوّل
التبخّر والتكثُّف
الدرس الثاني
الغليان والتجمّد
الدرس الثالث
الطاقة وتغيّرات الحالة



تخضع جميع الموادّ لتغيُّر في حالتها عند اكتسابها أو فقدانها كمّية محدّدة من الطاقة. فالشمعة، على سبيل المثال، عند درجة حرارة محدّدة تتحوّل من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة، والسوائل عند درجة حرارة الغليان تتحوّل إلى غازات، والثياب المغسولة والمعلَّقة في الهواء الطلق تنشف بعد تحوُّل الرطوبة فيها إلى غازات.

تختلف درجات الحرارة التي تغيِّر حالة الموادّ باختلاف المادّة، فدرجة غليان الماء، على سبيل المثال، تختلف عن درجة غليان الإيثانول أو الهيليوم. ويعود ذلك إلى العلاقة بين جزيئات المادّة وترابطها كما درسنا في الفصل السابق.

في هذا الفصل سندرس تفصيليًّا تأثير الحرارة على تغيُّر الحالة وسنكتشف ارتباط هذا التغيُّر بخواصّ الموادّ. ويمكن باستخدام المعادلات الرياضية المناسبة حساب كمّيات الحرارة اللازمة لتغيير حالة المادّة، وكمّيات الحرارة المتبادَلة في نظام معزول مغلق للوصول إلى اتّزان حراري بين موادّ مختلفة الحالة تُغيَّر حالتها ودرجة حرارتها بحسب كمّية الحرارة التي تكتسبها أو تفقدها.

الدرس 2-1

التبخُّر والتكثُّف
Evaporation and Condensation

الأهداف العامة

- يعرّف التبخُّر والتكثُّف.
- يستنتج لماذا يُعتبَر التكثُّف عملية تسخين.
- يستنتج لماذا يُعتبَر التبخُّر عملية تبريد.

(شكل 19)

خلال ممارسة الرياضة، تولِّد أجسامنا طاقة داخلية زائدة يتمّ إخراجها من خلال عملية التعرُّق، ويرافق التعرُّق تبخّر السائل على سطح الجسم. سنفهم في سياق الدرس مفهوم التبخُّر ومتى تشهده المادّة، وسنتعرّف علاقته بعملية تبريد الجسم وشعوره بالانتعاش. إنّ جزيئات السائل التي تبخّرت في الهواء، بإمكانها العودة إلى الحالة السائلة عند تغيّر حرارتها. مثلًا، تشكُّل الغيوم هو نتيجة عملية التكثُّف التي سنتعرّفها ونحدّد خصائصها في هذا الدرس.

1. التبخّر Evaporation

التبخّر هو عملية تغيّر من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية عند ارتفاع درجة الحرارة. يحدث التبخُّر دائمًا عند سطح أيّ سائل. تختلف درجة الحرارة التي تتبخّر عليها السوائل باختلاف نوعها. مثلًا، الكحول يتبخّر أسرع من الماء، أو لا يتطلّب درجة حرارة تبخُّر الماء. فالجزيئات الموجودة في الحالة السائلة تتحرّك باستمرار في جميع الاتّجاهات. التبخّر له تأثير التبريد. في الواقع، في كلّ مرّة ترتفع فيها طاقة الجزيئات الموجودة على السطح عن متوسّط الطاقة الحركية داخل السائل تتمكّن الطاقة من الهروب. يؤدّي ذلك إلى نقص في الطاقة الحركية للجسيمات المتبقّية وبالتالي إلى انخفاض درجة حرارتها. بإمكانك اختبار تأثير التبريد عن طريق وضْع كمّية صغيرة من الكحول على كفّ يدك، فجزيئات الكحول تتبخّر بسرعة لأنّها تملك قوى جذب ضعيفة. لذلك، ستشعر بتأثير التبريد خلال حدوث التبخّر.

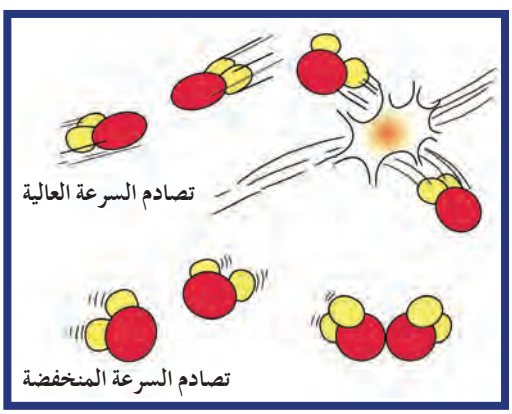
هل تساءلت يومًا لماذا يشعر شخص جسمه متعرِّق بالانتعاش في جوّ جافّ أكثر منه في جوّ رطب؟ في الواقع، حين يكون الجوّ رطبًا يكون معدّل بخار الماء في الهواء مرتفعًا. وبسبب وجود الكثير من جزيئات الماء في الهواء، تواجه جزيئات الماء على سطح الجسم المتعرِّق صعوبة في التبخّر. بالتالي، لا تنخفض درجة حرارة الجسم إثر التبريد الذي يرافق عملية التبخُّر. بالتالي، لا يتمكّن الجسم من تبريد نفسه بشكل فعّال في يوم رطب.

2. التكثُّف Condensation

ماذا نلاحظ عندما تضع كوبًا باردًا في جوّ رطب وحارّ؟ نلاحظ تكوُّن قطرات الماء بشكل سريع على جدار الكوب الخارجي. تُسمّى هذه الظاهرة التكثُّف وهي تحوُّل المادّة من غاز إلى سائل وهي عملية عكسية للتبخُّر. ينتج التكثُّف عن اصطدام جزيئات بخار الماء مع جزيئات بطيئة الحركة موجودة على سطح الكوب، فتفقد ما يكفي من الطاقة الحركية وتعمل قوى الجذب التي تؤثّر عليها بواسطة السائل على منعها من الهروب. وبهذه الطريقة، تتحوّل جزيئات الغاز إلى جزيئات سائل. يُعتبَر التكثُّف عملية تدفئة لأنّ الطاقة الحركية المفقودة خلال تكثُّف جزيئات الغاز تتحوّل إلى طاقة حرارية تقوم بتدفئة السطح الذي تصطدم به. فالحرق بالبخار، على سبيل المثال، أكثر ضررًا من الحرق بالماء المغلي الذي له درجة حرارة البخار نفسها. ويعود ذلك إلى أنّ البخار يفقد الطاقة عندما يتكثّف إلى الماء الذي يبلِّل الجلد.

1.2 التكثُّف في الهواء Condensation in the Air

حين يرتفع بخار الماء من المحيطات والأنهار المتبخِّرة في الجوّ نشعر بالبرد. عند انخفاض درجة حرارة البخار، ينخفض متوسّط الطاقة الحركية. بالتالي، عندما تتصادم الجزيئات تلتصق ببعضها البعض وتتكثّف. تكون فرصة التكثُّف في الهواء عند درجات حرارة منخفضة أفضل لأنّه في حال تحرّكت جزيئات البخار بشكل سريع في الهواء الحارّ، ترتدّ مبتعدة عن بعضها بعضًا فتبقى في الحالة الغازية (شكل 20).



(شكل 20)
إنّ فرصة التصاق جزيئات بخار الماء بطيئة السرعة لتكوّن سائلًا أفضل من فرصة الجزيئات ذات السرعة العالية.

على الرغم من ذلك، إلّا أنّه يحدث التكثُّف أيضًا عند درجات حرارة مرتفعة. تذكّر دائمًا أنّ درجة الحرارة تُعتبَر مقياسًا لمتوسّط الطاقة الحركية، وكما أنّ هناك جزيئات تتحرّك بشكل أسرع من المتوسّط، فهناك أيضًا جزيئات تتحرّك بشكل أبطأ حتى عند درجات حرارة مرتفعة، حيث توجد جزيئات كافية لحدوث التكثُّف في حال وجود بخار ماء كافٍ في الهواء. ومهما كانت درجة الحرارة، تكون الجزيئات البطيئة هي المسؤولة عن التصاقها ببعضها بعضًا.

2.2 الضباب والسُحُب Fog and Clouds

عندما يبرد الهواء الساخن المتصاعد إلى الأعلى، تتكثّف جزيئات البخار على جسيمات الغبار الموجودة في الجوّ فتتكوّن السُحُب. أمّا الضباب، فهو سحاب يتكوّن بالقرب من الأرض ويظهر في المناطق الرطبة ويبرّد الهواء الرطب القريب من الأرض. وغالبًا ما نشاهد هذه الظاهرة في ساعات الليل التي تترافق مع انخفاض درجة حرارة الأرض.

3. معدّلات التبخُّر والتكثُّف

Evaporation and Condensation Rates

عندما تنتهي من الاستحمام، غالبًا ما تشعر بقشعريرة. ما سبب شعورك بذلك؟ وكيف يمكن تفسيره بالاعتماد على العلاقة بين التبخُّر والتكثُّف؟ إنّ حدوث عملية التبخُّر بسرعة هو سبب شعورك بالقشعريرة، لكن إذا بقيت داخل الحمّام فلن تشعر بالقشعريرة نفسها حتى لو كان ماء الصنبور مغلَق.

عندما تكون في بيئة رطبة، تتكثف رطوبة الهواء على الجلد فتكون النتيجة وجود عامل تدفئة يتمكّن من مواجهة عامل البرودة الناجم عن عملية التبخُّر. وإذا تساوت الرطوبة المتكثّفة على الجلد مع الرطوبة المتبخِّرة، فلن تشعر بأيّ تغيُّر في درجة حرارة جسمك. لذا، تجفيف جسمك بالمنشفة مريح أكثر في نطاق مكان الاستحمام.

قد تترك إناء مملوءًا بالماء على منضدة، وقد يخطر ببالك أنّ شيئًا لن يحدث للماء. لكن هذا ليس صحيحًا، فهناك نشاط موجود على مستوى الجزيئات يؤدّي إلى حدوث التبخُّر. إنّ الجزيئات والطاقة التي تتحرّر من سطح السائل عن طريق التبخُّر يتمّ معادلتها عن طريق الجزيئات والطاقة العائدة في عمليتي التكثُّف. ويكون السائل في حالة اتّزان لأنّ لكلّ من عمليتي التبخُّر والتكثُّف تأثيرًا متعارضًا حيث يحدث التبخُّر والتكثُّف دائمًا بمعدّلات متساوية.

فقرة إثرائية

إنّك لا ترى البخار

راقب فوّهة مغلاة شاي تحوي بداخلها ماء يغلي. لاحظ أنّك لا ترى البخار من الفوّهة مباشرةً. أمّا السحابة التي تراها بعيدًا عن الفوّهة فهي قطرات ماء متكثّفة وليست بخارًا. يُعتبَر البخار مادّة غير مرئية. والآن احمل شمعة مشتعلة بالقرب من سحابة البخار الظاهر. اشرح ماذا تلاحظ.

من الطبيعي حدوث عمليتي التبخُّر والتكثُّف في الوقت نفسه. فإذا زاد التبخُّر عن التكثُّف يبرد السائل، وإذا زاد التكثُّف عن التبخُّر يسخن السائل. وبصفة عامّة، تنتقل الحرارة دائمًا من الأشياء المحيطة وإليها، لذلك، نحن لا نلاحظ عملية التبريد أو التدفئة الناجمة عن التبخُّر أو التكثُّف عند حالة الاتّزان بينهما.

مراجعة الدرس 2-1

أوّلًا – ما هو التبخُّر، ولماذا يُعتبَر عملية تبريد؟

ثانيًا – ما هو التكثُّف؟ ولماذا يُعتبَر عملية تدفئة؟

ثالثًا – لماذا يُعتبَر الحرق بالبخار أكثر ضررًا من الحرق بالماء المغلي الذي له درجة حرارة البخار نفسها؟

رابعًا – لماذا يتكوّن السحاب عند ارتفاع الهواء الدافئ الرطب إلى أعلى؟

خامسًا – بعد الانتهاء من الاستحمام، لماذا لا تشعر بقشعريرة إذا قمت بتجفيف جسمك داخل الحمّام؟

سادسًا – ماذا تقول عن تعادل معدّل التبخُّر ومعدّل التكثُّف؟

سابعًا – كيف تتمّ عملية التكثُّف، وكيف يجب أن تكون سرعة الجزيئات داخل البخار ليحدث التكثُّف؟

ثامنًا – هل الجزيئات في السائل لها الطاقة الحركية نفسها أم أنّها تختلف؟

الدرس 2-2

الغليان والتجمّد
Boiling and Freezing

الأهداف العامة

- يقارن بين التبخُّر والغليان.
- يشرح لماذا الطعام المطهي بالماء يحتاج إلى وقت أطول منه عند الطهي على درجات حرارة مرتفعة.
- يفسّر لماذا يتجمّد الماء النقي عند درجة حرارة أقلّ من درجة تجمُّده حين يحتوي على مادّة مذابة.
- يصف كيف يمكن لمادّة ما أن تغلي وتتجمّد في الوقت نفسه.

(شكل 21)

في الدرس السابق، درسنا عملية تحوّل السائل إلى غاز نتيجة اكتساب السائل كمّية حرارة كافية، وأكّدنا أنّ هذا التحوّل يحدث على سطح السائل. في هذا الدرس سنكتشف أنّ عملية التغيّر من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية، تحت سطح السائل وعند توافر ظروف ملائمة، تحدث نتيجة الغليان. وسنتناول أيضًا عملية التجمُّد وأسبابها والعوامل المؤثِّرة في تغيُّر درجتي الغليان والتجمُّد لموادّ مختلفة.

1. الغليان Boiling

الغليان هو التغيّر من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية تحت سطح السائل. يظهر الغليان على شكل فقّاعات تطفو على السطح وتهرب إلى الهواء المحيط. ما الذي يجعل الغاز يتكوّن داخل السائل على شكل فقّاعات؟ يعود ذلك إلى أنّ الحرارة المضافة إلى نظام ما تغيِّر في الطاقة الداخلية من دون أن تُحدِث تغييرًا في درجة الحرارة. يؤدّي ذلك إلى ارتفاع طاقة الجزيئات الداخلية فتتكسّر الروابط فيما بينها جاعلة الجزيئات تتحرّك بحرّية أكبر. وبالتالي، يتمّ التحوّل من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية.

هناك فرق كبير بين التبخُّر والغليان، فعلى الرغم من أنّ الاثنين لهما التعريف نفسه، وهو انتقال حالة المادّة من السائل إلى الغاز، إلّا أنّ التبخُّر يحدث عندما تتزوّد بعض الجزيئات بطاقة إضافية تمكِّنها من الهروب من السطح. تحدث الظاهرة للجزيئات السطحية لكونها الأقلّ ارتباطًا. وتكون عملية التبخُّر بطيئة وتحدث عند أيّ درجة حرارة أقلّ من نقطة الغليان كتبخُّر الماء عن الثياب الرطبة في يوم حارّ. أمّا الغليان، فهو عملية سريعة لا تحدث إلّا عند بلوغ السائل نقطة الغليان وهي تحدث تحت سطح السائل.

1.1 علاقة الضغط بنقطة غليان السائل

Relation Between Pressure and the Boiling Point of a Liquid

إنّ درجة غليان الماء ترتفع مع ارتفاع الضغط. مثلًا، إذا اختلف الضغط الجوّي على السائل، تختلف نقطة الغليان التي هي في حالة الماء $100^{\circ}C$. هناك تفسير بسيط لهذه الظاهرة. في الواقع، كما تعلّمنا سابقًا، إنّ حركة الجزيئات تزداد مع الحرارة فتبتعد عن بعضها البعض. لكن عندما تتعرّض هذه الجزيئات إلى الضغط الزائد، يتطلّب طاقة حرارية أكبر لبعثرتها بعيدًا عن بعضها البعض لتتحوّل الحالة السائلة إلى حالة غازية. إنّ الضغط يزيد من كثافة السائل ما يجعل جزيئات الماء أقرب إلى بعضها البعض. بالتالي، تتخطّى درجة غليان الماء $100^{\circ}C$.

يتمّ تطبيق مبدأ زيادة درجة الغليان من خلال زيادة الضغط في صناعة أواني الطهي. إنّ طنجرة الضغط، المغلقة بإحكام والمصنوعة من الألومنيوم أو ستاينلس ستيل، لا تسمح للبخار بالتسرُّب إلى الخارج ما يؤدّي إلى ارتفاع الضغط داخلها حتى يصبح أعلى من الضغط الجوّي المعتاد. كما سبق أن شرحنا، إنّ ارتفاع الضغط يؤدّي إلى ارتفاع درجة غليان الماء.

إنّ الغليان يُعتبَر عملية تبريد تمامًا كالتبخُّر. يوضّح الشكل أنّه كلّما تعرّض الماء لمصدر حرارة أقوى، تتمّ عملية تبريد الماء عن طريق الغليان أسرع. أمّا في حال تأخّر الغليان وهي حالة أواني الضغط، ترتفع درجة حرارة الماء باستمرار ما يؤدّي إلى طهي الطعام بشكل أسرع من دون حدوث الغليان.

فقرة إثرائية

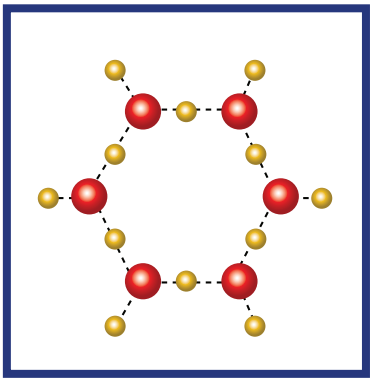
البيضة

للتأكّد أنّ البيضة نيئة قبل وضعها في الماء، قم بلفّها بحركة رأسية على منضدة. إذا تمايلت، فاعلم أنّها غير مطهية. يشير هذا التمايل إلى تحرُّك الصفار لتغيير مركز ثقل البيضة وتحقيق توازنها. بعد ذلك، ضَع البيضة في الماء. إذا تصدّعت، أُثقب الطرف العريض لبيضة أخرى مستخدِمًا إبرة رفيعة لتحصل على بيضة سليمة. في الواقع، يخفِّف الثقب الضغط داخل الأكياس الهوائية الموجودة في البيضة.

(شكل 22)
التسخين والغليان عمليتان محدّدتان. التسخين يدفئ الماء، والغليان يبرده.

2. التجمُّد Freezing

عند انخفاض درجة الحرارة، تقلّ حركة الجزيئات فيصبح تأثير قوى التجاذب بينها مهمّ. عند تقاربها، تتّخذ الجزيئات وضعيّات معيّنة ثابتة تكوِّن المادّة الصلبة. يُعتبَر الماء مثالًا جيّدًا على هذه العملية، فعندما تنخفض درجة الحرارة إلى صفر سلسيوس وعند الضغط الجوّي العادي، يفقد الماء الطاقة ويتكوّن الثلج. أمّا عند إضافة مادّة مذابة في السائل كالملح أو السكر، تنخفض درجة تجمُّده. في الواقع، تعترض جزيئات المادّة المُضافة طريق جزيئات الماء التي تحاول الاتّحاد مع بعضها البعض لبناء بلّورة الثلج سداسية الجوانب، فيصبح الاتّحاد أكثر صعوبة ويتطلّب انخفاض زائد في درجة الحرارة لتحقيق التجمُّد.

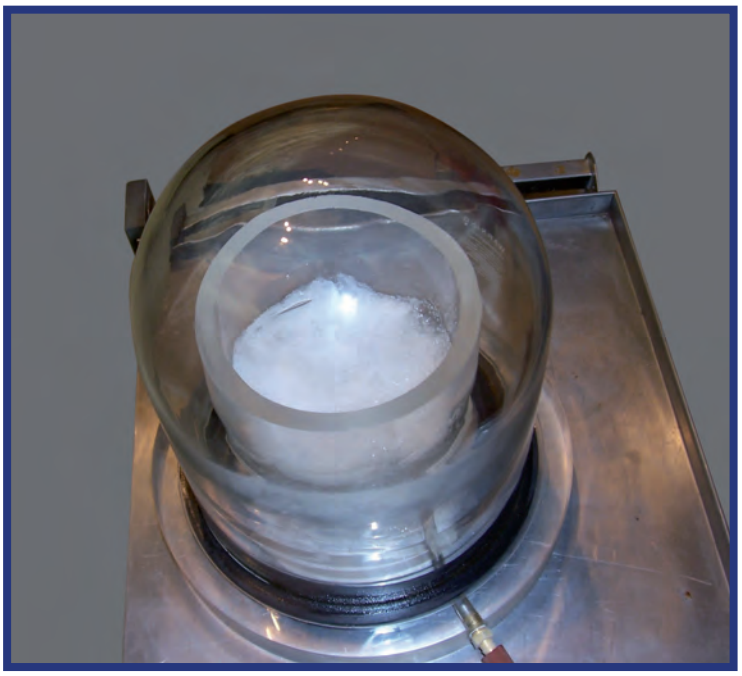


(شكل 23)
التركيب المفتوح لبلّورات الثلج التي تنصهر عادة عند 0°C.
عند إضافة جزيئات من نوع آخر أو أيونات، يضطرب تكوُّن البلّورة وتنخفض درجة التجمُّد.

3. الغليان والتجمُّد في الوقت نفسه
Simultaneous Boiling and Freezing

نشاهد ظاهرة غريبة عندما نضع كمّية من الماء داخل جهاز تفريغ الهواء (شكل 24). في الواقع، عندما يتمّ خفض الضغط بواسطة مضخّة التفريغ يبدأ الماء بالغليان، إذ أنّ الجزيئات تستطيع الفرار بسهولة أكبر عند انخفاض ضغط الهواء الذي يُبقيها داخل السائل. غير أنّ الغليان يرافقه عملية تبريد (كما ذكرنا في السابق)، إذ أنّ طاقة الجزيئات الفرعية التي تكون في الحالة الغازية تُستمَدّ من الجزيئات التي بقيت في الحالة السائلة. بالتالي، خلال الغليان، يتمّ خسارة مستمرّة للطاقة الحرارية للنظام فيتجمّد السائل ويتكوّن الثلج. ويعود ذلك إلى عدم وجود طاقة كافية لتتحرّك الجزيئات بحرّية فتتقارب من بعضها البعض لتشكّل الحالة الصلبة. ولذلك فإنّ عمليّتي الغليان والتجمُّد تحدثان في الوقت نفسه كما أنّ الفقّاعات المتجمّدة للماء المغلي تُعطي منظرًا رائعًا. ويمكن مشاهدة هذه الظاهرة على سطح القمر حيث ينعدم الضغط الجوّي، وهذا ما يفسّر سبب وجود المادّة في الفضاء كما في الحالة الغازية أو الصلبة.

وإذا تمّ رشّ بعض قطرات من مشروب القهوة في غرفة مُفرغة من الهواء، فسوف تغلي أيضًا إلى أن تتجمّد، وحتى بعد تجمُّدها ستستمرّ جزيئات الماء في التبخُّر في الفراغ إلى أن تتكوّن بلّورات صغيرة من القهوة الصلبة. وبهذه الطريقة تُصنَع القهوة الجافة، حيث تساعد درجة الحرارة المنخفضة على حفظ التركيب الكيميائي لمكوّنات القهوة الصلبة من التغيُّر، وعند إضافة الماء الساخن نحصل على المذاق الأصلي للقهوة.



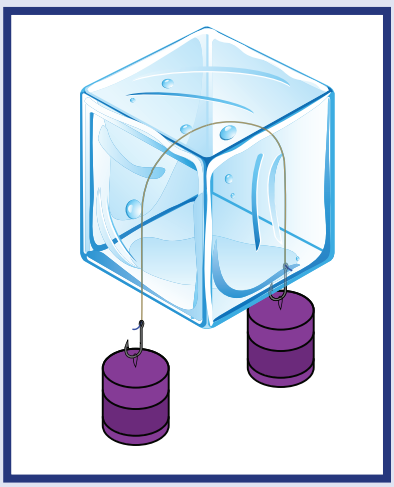
(شكل 24)
جهاز يوضّح أنّ الماء في الفراغ يغلي ويتجمّد في الوقت نفسه بوضع جرام أو جرامين من الماء في طبق معزول عن القاعدة بواسطة كوب من البوليسترين.

4. إعادة تجمُّد الماء Water Regelation

هل حاولت يومًا سحق كرة ثلج بيديك؟ ستُحدِث حينها انصهارًا ضعيفًا يساعد على تماسك الثلج وخروجه في شكل كرة. إنّ ارتفاع الضغط يُخفض نقطة الذوبان. وعندما يزول الضغط، يعود السائل إلى حالة التجمُّد. إنّ ظاهرة الانصهار تحت تأثير الضغط ثمّ العودة إلى التجمُّد بعد انخفاضه تُسمّى إعادة تجمُّد الماء Regelation.

لمشاهدة هذه الظاهرة، ضَع سلكًا يحمل بطرفيه أثقال على قطعة من الثلج كما هو موضّح في الشكل (25). إنّ الضغط على السلك سيجعله يخترق قطعة الثلج فيسقط مع الأثقال على الأرض في حين يبقى الثلج قطعةً واحدة صلبة.

أصبح بإمكانك الآن تفسير كيف تتشكّل كرات الثلج عبر الضغط عليها بيديك ولكن عليك الانتباه من أنّه في الأجواء شديدة البرودة قد لا يكون الضغط التي تُحدِثه يديك كافيًا لانصهار الثلج.



(شكل 25)
إعادة تجمُّد الماء

مراجعة الدرس 2-2

أوّلًا – ما الفرق بين التبخُّر والغليان؟

ثانيًا – لماذا تعتمد درجة حرارة غليان السائل على الضغط الجوّي؟

ثالثًا – لماذا تُعتبَر أواني الطهي بالضغط أكثر فاعلية في طهي الطعام في الجبال عنها عند طهيه عند مستوى سطح البحر؟

رابعًا – إذا أخذت في عين الاعتبار أنّ الغليان هو عملية تبريد، فهل تُعتبَر فكرة صائبة أن تقوم بتبريد الموادّ الساخنة عن طريق وضعها في ماء مغلي؟

خامسًا – في بعض الدول التي تتميّز بالشتاء القارس، يضع الناس أثناء الشتاء في مشْعاع السيارات (الراديتر) مادّة مضادّة للتجمُّد (جلايكول الإثيلين) تبلغ درجة تجمّدها $-13(^{\circ}C)$، ويقومون أيضًا برشّ الطرقات بالملح ليذوب في مياه الأمطار المتساقطة. علِّل أسباب هذه النشاطات موضِّحًا تأثيرها على درجة التجمّد.

سادسًا – كيف يستطيع الماء أن يغلي ويتجمّد في الوقت نفسه؟

سابعًا – عرِّف إعادة تجمُّد الماء. ما مدى تأثيرها على بلّورات الثلج ذات التركيب المفتوح؟

الدرس 2-3

الطاقة وتغيّرات الحالة
Energy and Changes of State

الأهداف العامة

- يصف فقدان المادّة أو اكتسابها للطاقة عند درجة حرارة ثابتة.
- يعرّف الحرارة الكامنة للتصعيد.
- يعرّف الحرارة الكامنة للانصهار.
- يحسب كمّية الحرارة اللازمة لإحداث تغيير في حالة المادّة.
- يحلّ تطبيقات رياضية على مفهوم التبادل الحراري.

في الدروس السابقة، درست تحوّلات المادّة من حالة إلى أخرى دراسة وصفية، واستنتجت أنّه إذا قمت بتسخين أيّ مادّة صلبة بقدرٍ كافٍ، فسوف تنصهر وتصبح سائلًا. واستنتجت أيضًا أنّه إذا سخّنت السائل، سيتبخّر ثمّ يتحوّل إلى الحالة الغازية. وتعلّمت أيضًا ضرورة إكساب المادّة قدرًا من الطاقة لتتغيّر حالتها من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة إلى الحالة الغازية، أو فقدان المادّة للطاقة لتتغيّر حالتها من الحالة الغازية إلى الحالة السائلة إلى الحالة الصلبة.

في هذا الدرس ستتناول دراسة تغيّرات الحالة بدراسة كمّية، أي حساب كمّية الحرارة اللازمة لإحداث تغيير في حالة المادّة والتمييز بين مقدار الطاقة التي يمتصّها الجسم ليغيّر حالته وبين الطاقة التي يطلقها ليغيّر حالته واستخدام ذلك في حلّ تطبيقات رياضية.

1. تغيُّر الحالة Change of State

هل في كلّ مرّة تسخن فيها المادّة بإضافة كمّية حرارة ترتفع درجة حرارتها؟ وهل في كلّ مرّة تبرد فيها المادّة تنخفض درجة حرارتها؟ لاحظت في الدروس السابقة أنّ إضافة كمّية من الحرارة تغيّر درجة حرارة المادّة. ولكن تُظهر بعض التجارب أنّه في بعض الأحيان تكتسب المادّة حرارة أو تفقدها ولا يحدث أيّ تغيّر في درجة الحرارة. وإذا راقبت بدقّة ما يحدث للمادّة، لاستنتجت وجود تغيُّر في حالتها.

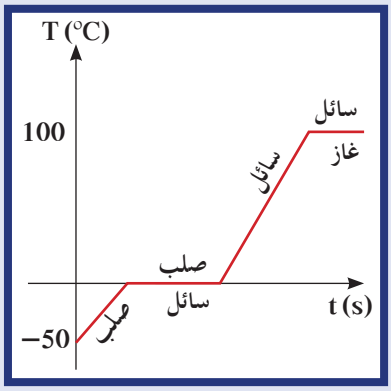
يمكن توضيح السلوك العامّ للعديد من الموادّ أثناء اكتسابها الحرارة وتغيُّر الحالة عن طريق وصف تغيُّرات الحالة التي تطرأ على قطعة من الجليد.

لنفترض أنّ هناك قطعة من الجليد وزنها (1)g موضوعة في وعاء مغلق عند درجة حرارة (50−)°C. سخِّنها وراقِب قياسات درجة الحرارة التي يشير إليها الترمومتر الموجود في قطعة الثلج. ستلاحظ أنّ الترمومتر يشير

إلى ارتفاع بطيء في درجة الحرارة حتى تصل إلى (0)°C . وعند درجة حرارة الصفر (0)°C ، تثبت درجة الحرارة ولا ترتفع على الرغم من استمرار إضافة الحرارة التي تظهر بعملية انصهار الثلج . وبعد انصهار قطعة الجليد بالكامل ، ستلاحظ معاودة ارتفاع درجة الحرارة من جديد إلى أن تصل إلى درجة الغليان لتثبت من جديد عندما يبدأ الماء بالتحوُّل إلى بخار .

يوضِّح الشكل (26) هذه العملية . ستعمل على حسابها في الفقرة التالية من الدرس وتستنتج من خلاله أنّ اكتساب المادّة لكمّية من الحرارة تعمل إمّا على تغيُّر درجة حرارة الماء أو على تغيُّر حالتها الفيزيائية . ونستنتج أيضًا أنّه أثناء تغيُّر الحالة الفيزيائية للمادّة تكون درجة الحرارة ثابتة .

فالحرارة المكتسبة عملت على كسر الروابط بين جزيئات المادّة وأبعدتها عن بعضها البعض فحوّلتها من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة ومن الحالة السائلة إلى الحالة الغازية . وإذ قمنا بسحب الحرارة من المادّة ، لتغيّرت حالتها من الحالة الغازية إلى الحالة السائلة إلى الحالة الصلبة (شكل 27) .



(شكل 26)
يظهر ثبات درجة الحرارة عند (0)°C عند تغيُّر الحالة .

(شكل 27)

مسائل مع إجابات

1. ما هي كمّية البخار اللازمة عند حرارة (130)°C لرفع درجة حرارة (200)g من الماء من (20)°C إلى (50)°C داخل وعاء عازل؟

الإجابة: m = (10.9)g

2. كمّية الحرارة اللازمة لإحداث تغيُّر في الحالة

Heat Needed For Change of State

كما تعلم إنّ ترتيب جزيئات المادّة تختلف بين مادّة وأخرى وبالتالي كمّية الطاقة التي تمتصها المادّة أو تطلقها تختلف باختلاف نوع المادّة . كما أنها تختلف باختلاف كمّية المادّة المعينة . فإذابة قطعة حديد تحتاج كمّية حرارة أكبر بكثير من إذابة قطعة ثلج لها الحجم والكتلة نفسه ، فكمّية الحرارة Q اللازمة لتغيّر حالة مادّة تتناسب طرديًا مع كتلة المادّة أي أن ($Q \alpha m$) . وبما أنها تختلف باختلاف خاصية المادّة ، تحسب كمّية الحرارة اللازمة لتغيير حالة المادّة Q بالمعادلة:

$$Q = mL \text{ ، حيث } L = \frac{Q}{m}$$

هي كمّية الحرارة اللازمة لتغيير حالة وحدة الكتل وتقاس بحسب النظام الدولي للوحدات بوحدة J/kg وهي من خصائص المادّة وتمثّل الحرارة الكامنة للمادّة .

تجدر الإشارة إلى أن كمّية الحرارة اللازمة لتغير الحالة تكون موجبة أي

$$Q = +mL$$

في حال اكتساب المادّة للطاقة وتحدث في حال تحوّل الماء من صلب إلى سائل (الانصهار) أو من سائل إلى غاز (الغليان). أما في الحالات التي تنطلق الطاقة من المادّة، تكون كمّية الحرارة لتغيّر الحالة سالبة أي:

$$Q = -mL$$

الحرارة الكامنة للتصعيد وللانصهار
Latent Heat of Evaporation and Fusion

لنبدأ أوّلًا بتغيُّر الحالة من السائل إلى الغاز. إنّ الجزيئات داخل السائل قريبة من بعضها البعض وقوى التجاذب فيما بينها أقوى من تلك الموجودة بين جزيئات الغاز. وكما نعلم، إنّ الجزيئات داخل المادّة في الحالة الصلبة متلاصقة جدًّا ومتماسكة، وإنّ مقدار قوى التجاذب بين جزيئاتها كبير جدًّا. بينما الجزيئات داخل المادّة في الحالة السائلة قريبة من بعضها البعض أكثر من تلك الجزيئات المتباعدة داخل الغاز، ما يجعل من قوى التجاذب بين جزيئات السائل أكبر من تلك الموجودة بين جزيئات الغاز.

إنّ تغيّر حالة السائل إلى الحالة الغازية يتطلّب إعطاء السائل كمّية كافية من الطاقة لتعمل على فصل الجزيئات وإبعادها عن بعضها البعض.

إنّ كمية الطاقة Q التي تُعطى إلى وحدة الكتل m من السائل وتؤدّي إلى تحوّل وحدة الكتلة هذه إلى الحالة الغازية تُسمّى الحرارة الكامنة للتصعيد، ويُرمز لها بالحرف اللاتيني L_V، ويمكن حساب مقدارها بالمعادلة التالية:

$$L_V = \frac{Q_V}{m}$$

وتُقاس بحسب النظام الدولي للوحدات بوحدة J/kg.

كذلك إنّ تغيير الحالة الصلبة للمادّة إلى الحالة السائلة (الانصهار) يتطلّب طاقة كافية لكسر الروابط بين الجزيئات والسماح لها باتّخاذ مواقع جديدة لتشكّل الحالة السائلة. إنّ كمّية الطاقة Q التي تُعطى إلى وحدة الكتل من المادّة الصلبة m وتؤدّي إلى تحوّلها إلى الحالة السائلة تُسمّى الحرارة الكامنة للانصهار ويُرمز لها بالحرف اللاتيني L_f ويمكن حساب مقدارها بالمعادلة التالية:

$$L_f = \frac{Q_f}{m}$$

وتُقاس بحسب النظام الدولي للوحدات بوحدة J/kg .

يمكنك الملاحظة من خلال الجدول التالي أنّ الحرارة الكامنة للتصعيد لمادّة معيّنة تكون عادةً أعلى من الحرارة الكامنة للانصهار للمادّة نفسها. إنّها نتيجة متوقّعة إذ يتطلّب الأمر طاقة أكبر لكسر كلّ الروابط وإبعاد الجزيئات عن بعضها البعض وتحويل المادّة إلى الحالة الغازية.

المادّة	نقطة الذوبان (°C)	الحرارة الكامنة للانصهار L_f (J/kg)	نقطة الغليان (°C)	الحرارة الكامنة للتصعيد L_v (J/kg)
Helium الهيليوم	− 269.65	5.23×10^3	− 268.93	2.09×10^4
Nitrogen النيتروجين	− 209.97	2.55×10^4	− 195.81	2.01×10^5
Oxygen الأكسجين	− 218.73	1.38×10^4	− 182.97	2.13×10^5
Water الماء	0.00	3.33×10^5	100.00	2.26×10^6
Lead الرصاص	327.3	2.45×10^4	1750	8.7×10^5
Aluminum الألومنيوم	660	3.97×10^5	2450	1.14×10^7
Silver الفضّة	960.80	8.82×10^4	2193	2.33×10^6
Gold الذهب	1063.00	6.44×10^4	2660	1.58×10^6
Copper النحاس	1083	1.34×10^5	1083	5.06×10^6

(جدول 4)

مثال (1)

أُحسب الطاقة اللازمة لتحويل قطعة (100)g من الثلج، درجة حرارتها (−30)°C إلى بخار ماء درجة حرارته (100)°C.

$L_f = (3.33 \times 10^5)J/kg$ $\quad c_{ice} = (2090)J/kg.K$

$L_v = (2.26 \times 10^6)J/kg$ $\quad c_{water} = (4.19 \times 10^3)J/kg.K$

$c_{steam} = (2.01 \times 10^3)J/kg.K$

طريقة التفكير في الحلّ

1. حلِّل: أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: كتلة قطعة الثلج: $m = (100)g$

درجة حرارة قطعة الثلج: $T_i = (-30)°C$

حرارة البخار النهائية: $T_f = (100)°C$

غير المعلوم: الحرارة اللازمة لتحويل قطعة الثلج إلى بخار ماء: $Q = ?$

2. أُحسب غير المعلوم.

كمّية الحرارة اللازمة لتغيير درجة حرارة قطعة الثلج من (−30)°C إلى (0)°C نجدها باستخدام المعادلة التالية:

$$Q_1 = m\, c_{ice}\, \Delta T = (100 \times 10^{-3})\,(2090)\,(0 - (-30))$$

$$Q_1 = (6270)J$$

علمًا أن ΔT بوحدة كلفن تساوي نفس المقدار بوحدة °C.

الحرارة اللازمة لتحويل قطعة الثلج من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة تحسب المعادلة التالية:

$$Q_2 = mL_f$$

وبالتعويض عن المقادير المعلومة نحصل على:

$$Q_2 = (100 \times 10^{-3})(3.33 \times 10^5) = (33300)J$$

الحرارة اللازمة Q_3 لرفع درجة حرارة الماء من الصفر إلى (100)°C نجدها بتعويض المقادير المعلومة بالمعادلة التالية:

$$Q_3 = m\, c_{water}\, \Delta T$$

$$= (100 \times 10^{-3})\,(4.19 \times 10^3) \times (100 - 0) = (41900)J$$

الحرارة اللازمة Q_4 تحويل الماء إلى بخار ماء نجدها بتعويض المقادير المعلومة بالمعادلة التالية:

$$Q_4 = m\, L_v = (100 \times 10^{-3})(2.26 \times 10^6)$$

$$Q_4 = (226 \times 10^3)J$$

وبهذا تكون كمّية الحرارة اللازمة لتحويل قطعة الثلج إلى بخار ماء تساوي

$$\Sigma\, Q_i = (307470)J$$

3. قيّم: هل النتيجة مقبولة

إن النتيجة مقبولة وتتناسب مع المقادير المعطاة ويمكن التحقق منها بالتجربة.

فقرة إثرائية

توظيف علم الفيزياء

مقاومة الحرائق

عادة ما يدخل رجال الإطفاء المباني المحترقة لإنقاذ الأرواح وحماية الممتلكات. وحتى يتمكنوا من أداء مهماتهم بشكل فعّال وآمن، يجب أن يكونوا على دراية بطبيعة الحرارة. يعتبر رش اللهب بالماء من أكثر الطرق شيوعًا للتحكّم في النيران، وفي بعض الأحيان يصبح استخدام الرذاذ الدقيق أكثر فعالية في التغلب على النيران. لماذا؟ لأن الرذاذ الدقيق سريعًا ما يتحوّل إلى بخار، فيمتصّ الطاقة ويبرد المادّة المحترقة. إنّ التعامل مع اللهب بشكل مناسب وصحيح يحمي الأرواح بما فيها أرواح رجال الإطفاء.

مثال (2)

أضيفت قطعة جليد كتلتها (20)g ودرجة حرارتها (−20)°C إلى مُسعِر حراري مهمل الحرارة النوعية يحتوي على (300)g من الماء عند درجة حرارة (70)°C. أُحسب درجة الحرارة النهائية للنظام بعد أن يصبح في حالة اتّزان حراري.

طريقة التفكير في الحلّ

1. حلِّل: أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: كتلة قطعة الجليد: $m_1 = (20)g$

درجة حرارته: $T_1 = (-20)^\circ C$

كتلة الماء الساخن: $m_2 = (300)g$

درجة حرارته: $T_2 = (70)^\circ C$

غير المعلوم: درجة الماء النهائية: $T_f = ?$

2. أُحسب غير المعلوم.

بما أنّ النظام في حالة اتّزان حراري:

$$\Sigma Q_i = 0$$

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 0$$

Q_1 كمّية الطاقة اللازمة لتحويل حرارة قطعة الثلج من (−20)°C إلى (0)°C:

$$Q_1 = m_1 C_{ice} (0 - T_1) = 20 \times 10^{-3} \times (2\,090) \times (0 + 20)$$

$$Q_1 = (836)J$$

Q_2 كمّية الطاقة اللازمة لتحويل حرارة الماء الساخنة من (70)°C إلى حرارة الماء النهائية T_f:

$$Q_2 = m_2 c_{water} (T_f - T_1) = 300 \times 10^{-3} \times 4.19 \times 10^3 (T_f - 70)$$

Q_3 هي كمّية الطاقة اللازمة لتحويل قطعة الثلج إلى ماء من دون تغيّر في الحرارة:

$$Q_3 = +m_1 L = 20 \times 10^{-3} \times 3.33 \times 10^5 = (6660)J$$

Q_4 هي كمّية الطاقة اللازمة لتحويل الماء عند حرارة (0)°C إلى الحرارة النهائية T_f:

$$Q_4 = +m_1 c_{water} (T_f - 0) = 20 \times 10^{-3} \times 4.19 \times 10^3 \times T_f$$

بالتعويض عن المقادير في المعادلة (1)، نحصل على:

$$836 + 1257(T_f - 70) + 6660 + 83.8T_f = 0$$

$$1340.8T_f = 80949$$

$$T_f = (60)^\circ C$$

3. قيِّم: هل النتيجة معقولة؟

نلاحظ أنّ T_f أصغر من حرارة الماء الساخن كما هي أعلى من (0)°C. إنّها نتيجة مقبولة إذ إنّ الماء الساخن سيفقد كمّية من طاقته الحرارية ليعطيها لقطع الثلج كي تتحوّل إلى ماء.

مراجعة الدرس 2-3

أوّلًا – هل يفقد البخار الطاقة عندما يتحوّل إلى سائل أم العكس؟

ثانيًا – عرّف كلّ من الحرارة الكامنة للتصعيد والحرارة الكامنة للانصهار.

ثالثًا – أُحسب مقدار الطاقة التي يمتصّها (20)g من الماء في (100)°C ليتحوّل إلى بخار عند (100)°C. (علمًا أنّ الحرارة الكامنة للتصعيد تساوي $(L_v = (2.26 \times 10^6) J/kg)$

رابعًا – أُحسب مقدار الطاقة المنطلِقة عن تكثُّف (20)g من البخار درجة حرارته (100)°C ليبرَّد إلى (0)°C.

(علمًا أنّ $L_v = (2.26 \times 10^6) J/kg$ و $c_w = (4180) J/kg.K$)

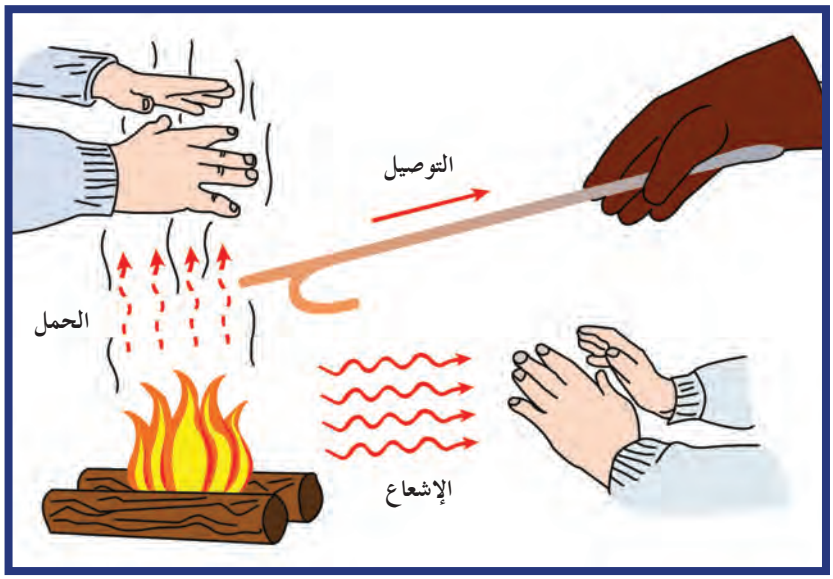
خامسًا – أُحسب كمّية الحرارة التي تنطلق عند تبريد (1)g من الماء درجة حرارته (100)°C حتى يصبح ثلجًا عند (0)°C، ثمّ يستمر في التبريد حتى يصل للصفر المطلق. (علمًا أنّ متوسّط السعة الحرارية النوعية للثلج $c_{ice} = (2090) J/kg.K$)

سادسًا – أُحسب كمّية الحرارة المنطلِقة من (1)g من بخار الماء درجة حرارته (100)°C عندما يتكثّف إلى ماء عند درجة الحرارة نفسها. قارِن هذه الكمّية من الحرارة بالكمّية التي حصلت عليها في المسألة السابقة.

(علمًا أنّ $L_f = (3.33 \times 10^5) J/kg$ و $c_w = (4180) J/kg.K$)

سابعًا – أُحسب كمّية البخار عند درجة حرارة (100)°C الذي يجب أن يُضاف إلى (150)g من الثلج عند (0)°C داخل وعاء معزول للحصول على ماء درجة حرارتها (50)°C.

(علمًا أنّ $L_f = (3.33 \times 10^5) J/kg$ و $L_v = (2.26 \times 10^6) J/kg$ و $c_w = (4180) J/kg.K$)



نحن نعلم بعد أن درسنا قانون الاتّزان الحراري أنّه لا يمكن المحافظة على حرارة جسم ما تختلف حرارته عن البيئة المحيطة به، بل يصل إلى درجة حرارة واحدة مشتركة مع ما يحيط به. فالحرارة تنتقل من الجسم الساخن إلى الجسم البارد بثلاث طرق هي الحمل والتوصيل والإشعاع والتي سنتناولها بشكل مفصّل في دروس الفصل ونتعرّف الفرق بينها.

من خلال التجارب والمشاهدات اليومية، لاحظنا أن معدّل انتقال الحرارة يختلف باختلاف درجة الحرارة بين الجسم والبيئة المحيطة. على سبيل المثال، سيكون معدّل انخفاض درجة حرارة فطيرة تفاح أكبر عند وضعها في الثلّاجة ممّا لو تُرِكت على منضدة في المطبخ. ويفقد المنزل الدافئ أيضًا حرارة بمعدّل أكبر عندما يكون هناك فرق كبير بين درجتي حرارة الداخل والخارج، أي أنّ معدّل تبريد الجسم يعتمد على مدى سخونة هذا الجسم عن ما يحيط به.

وقد استنتج نيوتن ذلك منذ زمن بعيد فوضع قانون يُعرَف بقانون نيوتن للتبريد. نص هذا القانون على أنّ معدّل التبريد يتناسب طرديًّا مع اختلاف درجة حرارة الجسم ودرجة حرارة البيئة المحيطة. وسنكتشف في سياق الدروس لاحقًا أنّ هذا القانون يصلح أيضًا لحالة التسخين، فالجسم الأكثر برودة من الوسط المحيط به يسخن بمعدّل يتناسب مع اختلاف درجة حرارته عن الوسط المحيط به. وسنكتشف أيضًا أهمّية تناول انتقال الحرارة ومعدّل حركتها في علم الديناميكا الحرارية والذي أدّى إلى إنتاج الآلات الحرارية والتي ساهمت في التطوّر الكبير الذي وصلنا إليه اليوم.

دروس الفصل

الدرس الأوّل
- التوصيل والحمل والإشعاع

الدرس الثاني
- الديناميكا الحرارية

الدرس 3-1

التوصيل والحمل والإشعاع
Conduction, Convection and Radiation

الأهداف العامة

- يفسِّر التوصيل وتأثيراته.
- يميّز بين التوصيل وتيّارات الحمل.
- يفسِّر كيف تنتقل الحرارة في الفراغ.
- يتوقّع أيًّا من الجسمين يمتصّ طاقة إشعاعية بسهولة أكثر اعتمادًا على لون الجسمين ولمعانهما.
- يقارن بين قدرة جسم على بعث طاقة إشعاعية وقدرته على إمتصاص طاقة إشعاعية.
- يصف الاحتباس الحراري للأرض وظاهرة البيوت الزجاجية.

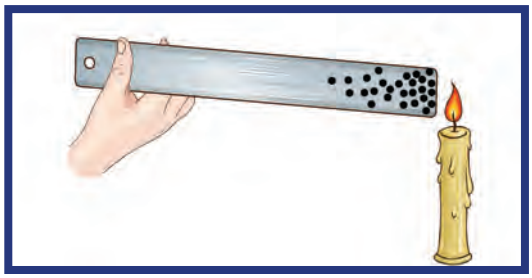
(شكل 28)
جدران سميكة من الطين اللين تبطئ انتقال الحرارة.

يتمّ الانتقال التلقائي للحرارة دائمًا من الأجسام الأكثر دفئًا إلى الأجسام الأكثر برودة. فإذا وُجدَت أجسام عديدة بالقرب من بعضها البعض وعلى درجات حرارة مختلفة، ستبرد الأجسام الدافئة وستصبح الأجسام الباردة أكثر دفئًا إلى أن تصبح الأجسام كلّها عند درجة الحرارة نفسها.
تنتقل الحرارة بين الأجسام المختلفة لتتساوى درجات حرارتها بثلاث طرق وهي التوصيل والحمل والإشعاع. سنتناول بشكل مفصّل كلّ منها في هذا الدرس.

1. التوصيل Conduction

إذا أمسكت بأحد طرفي قضيب من الحديد موضوع فوق لهب، سيصبح هذا الطرف شديد السخونة لدرجة لا يمكن مسكه. هذا يعني أنّ الحرارة انتقلت خلال المعدن بواسطة التوصيل. **يحدث التوصيل Conduction داخل المادّة الواحدة وبين الموادّ المختلفة التي تكون في تلامس تامّ.** تُسمّى الموادّ التي توصل الحرارة بطريقة جيّدة الموصّلات، وتُعتبَر الفلزّات

من أجود الموصّلات، ومنها الفضّة وهو الأكثر توصيلًا يليها النحاس ثمّ الألومنيوم ثمّ الحديد.



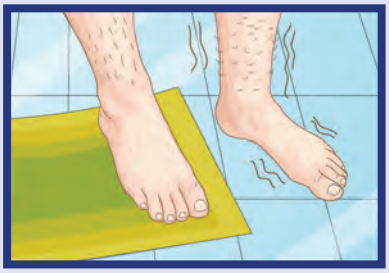
(شكل 29)
تتسبّب الحرارة الصادرة من اللهب في زيادة سرعة الحركة الاهتزازية للإلكترونات الحرّة عند طرف المعدن، وتصادم الإلكترونات مع غيرها التي بدورها تعمل على زيادة طاقة الذرّات المهتزّة على طول القضيب.

يُفسَّر التوصيل بالتصادمات الحاصلة بين الذرّات أو الجزيئات وبحركة الإلكترونات الحرّة في ذرّاتها. في قضيب الحديد، يتسبّب اللهب عند الطرف الذي يتمّ تسخينه في زيادة سرعة تذبذب الذرّات (شكل 29). هذه الذرّات تنقل هذه الاهتزازات إلى الذرّات المجاورة، والتي بدورها تؤدّي الدور نفسه. والأهمّ من ذلك هو الإلكترونات الحرّة التي يمكنها أن تندفع خلال المعدن، فهي تتزاحم وتنقل الطاقة باصطدامها بالذرّات الأخرى والإلكترونات الحرّة الأخرى داخل القضيب.

الموادّ التي تتكوّن من ذرّات لها إلكترونات خارجية حرّة تكون جيّدة التوصيل للحرارة (والكهرباء أيضًا)، والفلزّات هي الأجود توصيلًا للحرارة والكهرباء بسبب وجود الإلكترونات الخارجية الأكثر حرّية.

اِلمس قطعة معدن وقطعة خشب متجاورتين. أيّ القطعتين تشعر بأنّها أبرد؟ يجب أن تختلف إجاباتك. إذا كانت الموادّ متجاورة، يجب أن تكون لها درجة الحرارة نفسها (درجة حرارة الغرفة). وبالتالي لا تكون أيّ منهما أبرد من الأخرى. ومع ذلك، يعطي المعدن إحساسًا بأنّه أبرد لأنّه أجود توصيلًا، حيث تسري الحرارة بسهولة (أسرع) من يدك الأدفأ إلى المعدن الأبرد. أمّا الخشب فهو أقلّ جودة في التوصيل الحراري، حيث تسري الحرارة من يدك إلى الخشب ببطء، وبذلك لا تشعر يدك بأنّها تلمس شيئًا باردًا. الخشب والصوف والقشّ والورق والفلّين والبلاستيك كلّها رديئة التوصيل للحرارة، فتُسمّى العوازل الجيّدة لأنّها تعطّل (تؤخّر) انتقال الحرارة، إذًا، الموصّل الرديء هو عازل جيّد.

بشكل عامّ، السوائل والغازات هي عوازل جيّدة. فالهواء هو خليط من الغازات وهو رديء التوصيل الحراري، والموادّ المسامية التي تحتوي على فراغات هوائية صغيرة عديدة تُعتبَر عوازل جيّدة. وتعود خصائص العزل الجيّد للموادّ، مثل الصوف والفراء والريش، إلى الفراغات الهوائية التي تحتويها (شكل 31).



(شكل 30)
تُشعِر أرضية البلاط القدمين العاريتين بالبرودة، في حين السجّاد (عند درجة الحرارة نفسها) يُشعِر بالدفء، ذلك لأنّ البلاط أجود توصيلًا للحرارة من السجّاد.

(شكل 31)
البطّانية التي تُشعِرك بالدفء لا تمدّك بحرارة، بل تبطئ انتقال حرارة جسمك إلى الأجسام المحيطة.

تُغير الطيور في خاصّية عزلها للحرارة بنفش ريشها لإيجاد فراغات هوائية. الهواء أيضًا رديء التوصيل للحرارة، لأنّه لو لم يكن كذلك لشعَرت بلسعة البرد في يوم درجة حرارته 25°C.

يختزن الثلج المتساقط الكثير من الهواء داخل بلّوراته، ويكون عازلًا قويًّا، فهو يُبطئ من هروب الحرارة من سطح الأرض، ويحجب البرودة لفترات طويلة عن سكّان القطب الشمالي، ويحمي الحيوانات من البرد في ليالي الشتاء القارسة. البَرَد، إذًا، مثل أيّ بطّانية ليس مصدرًا للحرارة، بل هو ببساطة يمنع هروب الحرارة بسرعة.

(شكل 32)
يبقى الجليد لفترات أطول فوق سقف منزل شديد العزل، وبالتالي، تدلّ أشكال الجليد على التوصيل أو على قلّة التوصيل خلال السقف. هل تستطيع أن تلاحظ تباين العزل الحراري لهذه المنازل؟

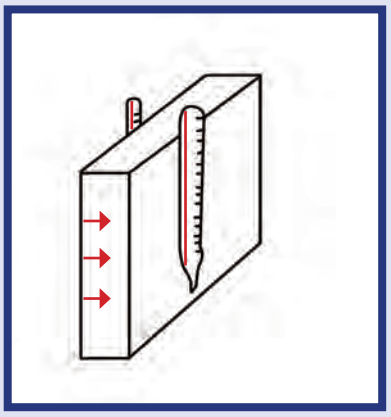
الطاقة الحرارية شيء واضح ومحسوس، ولكن البرودة ليست كذلك. فهي ببساطة غياب الحرارة. ولتوضيح ما سبق، لا يوجد سريان للبرودة خلال موصِّل أو عازل، فالحرارة هي التي تنتقل فحسب. نحن لا نعزل المنزل لنحفظ البرودة خارجه، وإنّما نعزله لنحفظ الحرارة داخله. لا يوجد عازل يستطيع منع الحرارة كليًّا من المرور خلاله، فالعازل يقلّل معدّل سريان الحرارة، والبيوت الدافئة في الشتاء مهما كانت جيّدة العزل ستبرد تدريجيًّا. العزل، إذًا، يُبطئ انتقال الحرارة.

2. معادلة التوصيل الحراري

Equation of Heat Conduction

يمكن وصف التوصيل الحراري كمّيًا بمعدّل انتقال الحرارة في المادّة عند اختلاف درجة الحرارة. وكما أشرنا سابقًا في مقدّمة الفصل، أظهرت التجارب أنّ معدّل انتقال الحرارة في مادّة ما يعتمد على اختلاف درجة الحرارة بين طرفي المادّة، ويعتمد على شكل الجسم الناقل وحجمه.

وأظهرت التجارب أنّ معدّل انتقال الحرارة في لوح منتظم متوازي السطوح (شكل 33) يتناسب طرديًّا مع مساحة السطح A وعكسيًّا مع سماكته d، ويمكن تمثيله باستخدام المعادلة التالية:



(شكل 33)
معدّل التوصيل الحراري $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$ يتناسب طرديًّا مع مساحة السطح A وعكسيًّا مع سماكة اللوح.

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = k\, A\, \frac{\Delta T}{d}$$

حيث تمثّل k قدرة المادّة على النقل الحراري، وتسمّى معامل التوصيل الحراري. فالموادّ التي لها مقدار k كبير تنقل الحرارة بسرعة كبيرة. ويُقاس معامل التوصيل الحراري بوحدة J/m.s.°C.

ويظهر الجدول (5) قيم معامل التوصيل الحراري لبعض الموادّ.

المادّة	معامل التوصيل الحراري k (J/m.s .°C)
المعادن	
الألومنيوم	240
النحاس	390
الحديد	46
الفضّة	420
السوائل	
زيت صناعي	0.18
الماء	0.57
الغازات	
الهيدروجين	0.17
الأكسجين	0.024
موادّ أخرى	
البلاط – القرميد	0.71
الإسمنت	1.3
الجليد	2.2
الخشب	0.14

(جدول 5)

مثال (1)

استُخدِم لوح خشبي طوله (5)m وعرضه (5)m وسماكته (1)cm لعزل حائط غرفة (شكل 34). تساوي درجة الحرارة داخل الغرفة (22)°C ودرجة الحرارة بين الحائط واللوح الخشبي (10)°C. علمًا أنّ معامل التوصيل الحراري للخشب المستعمل يساوي (0.15)J/m.s.°C، أُحسب:

(أ) معدّل انتقال الحرارة بالتوصيل في العازل الخشبي.

(ب) كمّية الحرارة التي تنتقل بالتوصيل في اللوح الخشبي بعد مرور ساعتين.

طريقة التفكير في الحلّ

1. حلِّل: أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: مساحة العازل: $A = 5 \times 5 = (25)m^2$

السماكة: $d = (1)cm$

اختلاف درجة الحرارة: $\Delta T = (22 - 10) = (12)°C$

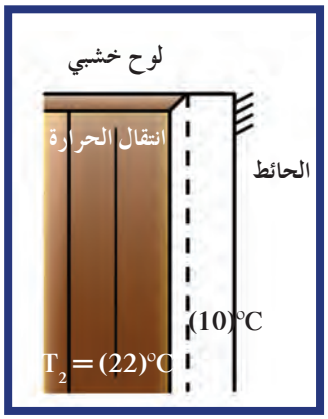
معامل التوصيل الحراري للوح الخشبي العازل:

$k = (0.15)J/m.s.°C$

مثال (1) (تابع)

غير المعلوم: **(أ)** معدّل انتقال الحرارة بالتوصيل: $\frac{\Delta Q}{\Delta t} = ?$

(ب) كمّية الحرارة المنتقلة بالتوصيل بعد مرور $t = (2)h$؟



(شكل 34)

2. أُحسب غير المعلوم.

(أ) باستخدام المعادلة الرياضية التالية:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = k\,A\,\frac{\Delta T}{d}$$

وبالتعويض عن المقادير المعلومة نحصل على:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = k\,A\,\frac{\Delta T}{d} = 0.15 \times 25 \times \frac{12}{0.01} = (4\,500)J/s$$

(ب) كمّية الحرارة المنتقلة بالتوصيل خلال ساعتين تساوي:

$$\Delta Q = \Delta t(\frac{\Delta Q}{\Delta t}) = 4500 \times 2 \times 3600 = (32.4 \times 10^6)J$$

3. قيّم: هل النتيجة معقولة؟

إنّ مقدار كمّية الحرارة المنتقِلة باللوح الخشبي كبيرة نسبيًّا. لذا، نلاحظ في مشاهداتنا اليومية وضع موادّ عازلة أخرى بين اللوح الخشبي والحائط مثل ألواح الفيبر (Fiber Board)، أو الستيروفوم (Styrofoam) أو الصوف الزجاجي (Glass Wool) وغيرها من الموادّ التي تتميّز بصغر مقدار معامل التوصيل الحراري k.

2. الحمل Convection

تذكّر أنّ انتقال الحرارة بالتوصيل يتعلّق بانتقال الطاقة من جزيء إلى آخر. تسري الطاقة من جزيء إلى آخر من دون انتقال الجزيئات. هناك طريقة أخرى لانتقال الحرارة وتتمّ بانتقال المادّة الأكثر سخونة، حيث يتصاعد الهواء الملامس للموقد ويدفئ المنطقة الأعلى. الماء الذي يُسخَّن في غلّاية في الطابق السفلي يصعد ليُدفئ أجهزة الإشعاع الحراري في الطوابق العليا. **تُسمّى هذه العملية الحمل Convection، حيث يحدث التسخين بتيّارات في المائع (السائل أو الغاز).**

هناك برهان بسيط يوضّح الفرق بين التوصيل والحمل. باستخدام قطعة صغيرة من الصوف الفولاذي Steel wool، اِحبس بواسطة الصوف الفولاذي قطعة من الثلج عند قاع أنبوب اختبار مملوء بالماء تقريبًا. اِحمل الأنبوب من القاع بيدك العارية وَضَع أعلى الأنبوب على لهب موقد بنزن (شكل 35). نلاحظ أنّ الماء يغلي عند أعلى الأنبوب في حين يبقى الثلج في الأسفل غير منصهر، حيث يكون الماء الساخن في الأعلى أقلّ كثافة ويبقى عند أعلى الأنبوب. لكي تصل الحرارة إلى الثلج ينبغي أن تنتقل بالتوصيل، لكنّ الماء موصِّل رديء للحرارة. إذا كرّرت التجربة، حاملًا الأنبوب هذه المرّة من أعلاه بواسطة حامل الأنابيب وسخَّنت الماء من أسفل في حين يطفو الثلج عند السطح بعد إزالة الصوف الفولاذي من الأنبوب، فإنّ الثلج سينصهر سريعًا، أي أنّ الحرارة تصل إلى الأعلى عن طريق الحمل، لأنّ الماء الساخن يصعد إلى السطح، حاملًا طاقته معه للثلج.

(شكل 35)

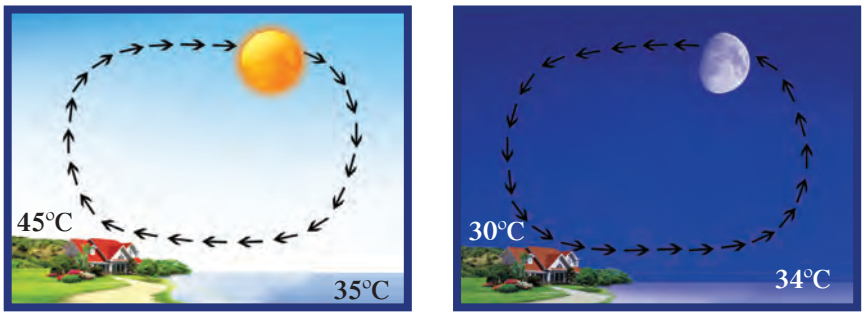
عند تسخين أنبوب اختبار من أعلاه، لا توجد تيّارات حمل داخل الجزء السفلي للأنبوب، فيبقى احتمال انتقال الحرارة إلى الثلج بالتوصيل فحسب. وبما أنّ الماء موصّل رديء، فإنّ الماء عند الأعلى سيغلي من دون انصهار الثلج.

يحدث الحمل في جميع الموائع، سوائل أو غازات، سواء سخّنّا الماء في وعاء أو سخّنّا الهواء في غرفة، تبقى العملية نفسها. فعندما يُسخَّن المائع، يتمدّد ويصبح أقلّ كثافة ويصعد إلى أعلى. الهواء الدافئ أو الماء الدافئ يصعد للسبب نفسه لطفو كتلة من الخشب في الماء وصعود بالون مملوء الهليوم في الهواء.

الحمل هو أحد تطبيقات مبدأ «أرشميدس»، فالمائع الدافئ يطفو لأعلى بواسطة دفع المائع المحيط الأكبر كثافة. ثمّ يتحرّك المائع البارد لأسفل، وتستمرّ العملية. وبهذه الطريقة تحافظ تيّارات الحمل على حركة المائع لأعلى عند تسخينه.

1.2 الرياح Winds

تولِّد تيّارات الحمل التي تنشط في الجوّ الرياح. تكون بعض أجزاء سطح الأرض على استعداد لتمتصّ حرارة الشمس أكثر من غيرها. يسبّب هذا الامتصاص المتفاوت تسخينًا متفاوتًا للهواء القريب من السطح مولِّدًا تيّارات الحمل. تتّضح هذه الظاهرة عند شاطئ البحر. في النهار، تسخن رمال الشاطئ بسهولة أكثر من الماء فيرتفع الهواء فوق الشاطئ، ويحلّ الهواء البارد فوق البحر مكانه، فينتج ما يُسمّى «نسيم البحر» (شكل 37). في المساء تنعكس العملية حيث تبرد رمال الشاطئ أكثر من الماء. الهواء الأدفأ يقع الآن فوق البحر. إذا أوقدت نارًا بجوار الشاطئ ستلاحظ الدخان يزاح نهارًا نحو الداخل وليلًا نحو البحر.



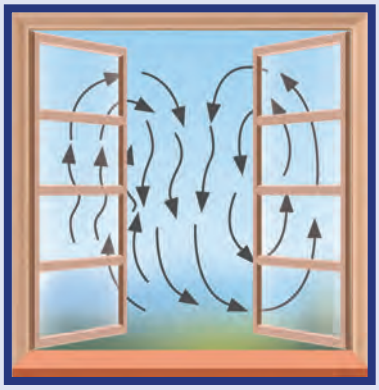
(شكل 37)
تتولّد تيّارات الحمل بالتسخين المتفاوت. تكون اليابسة أدفأ من الماء في النهار، لذلك، ينعكس اتّجاه سريان الهواء بين النهار والليل.

فقرة إثرائية
استخدام الفيزياء في المختبر

ملاحظة تيّارات الحمل

بعد أن يتمّ غلي الماء الذي يملأ كأسًا، أسقِط قليلًا من صبغة داكنة اللون أو ملوّنات الأطعمة في الماء. ستشاهد انتشارها بشكل سريع جدًّا. راقب بعناية سريان الصبغة. هل تستطيع ملاحظة تتبُّعها لحركة تيّارات الحمل؟

أشعِل عود ثقاب ثمّ اطفِئه. أمسِك العود من دون أن تحرِّكه ولاحِظ سُحُب الدخان. في أيّ اتّجاه ينتقل الدخان؟ هل سُحُب الدخان مثل تيّارات الحمل؟ فسِّر. أين يمكنك رؤية تيّارات الحمل أيضًا؟ كيف يكون حال الهواء فوق فرن ساخن؟



(شكل 36)
توضّح الصورة إلى أعلى تيّارات الحمل في الهواء، توضّح الصورة إلى أسفل تيّارات الحمل في السوائل.

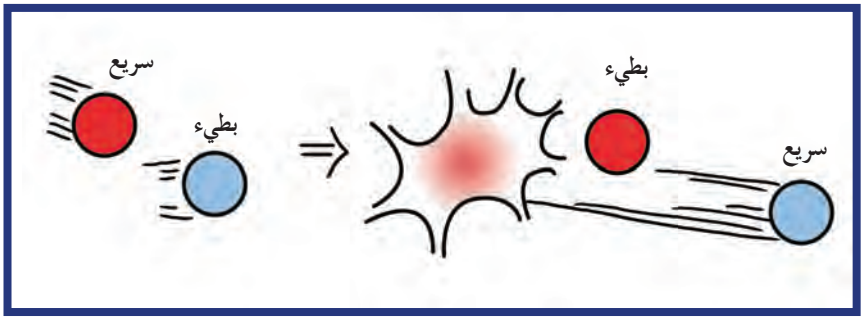
2.2 لماذا يبرد الهواء الساخن عند صعوده؟

Why Does Warm Air Cool When Rising?

عند صعود الهواء الساخن لأعلى يتمدّد كصعود البالون. لماذا؟ لأنّه يتعرّض لضغط هواء أقلّ عند الارتفاعات العالية. عندما يتمدّد الهواء فإنّه يبرد، ويحدث العكس تمامًا عندما يتمّ ضغط الهواء. إذا قمت بضغط هواء من منفاخ إطار درّاجة، فمن المحتمل أن تكون قد لاحظت أنّ كلًّا من الهواء والمنفاخ أصبحا ساخنين، ويحدث العكس عند تمدُّد الهواء، حيث يبرد الهواء عند تمدُّده.

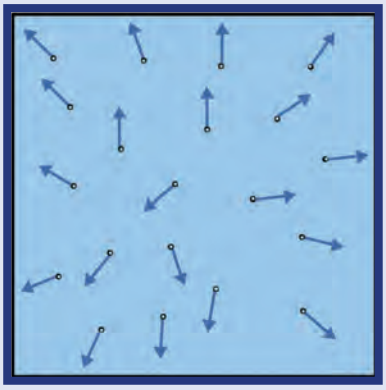
نستطيع أن نفهم التبريد الحاصل من تمدُّد الهواء، الذي يمكن تصوُّر جزيئاته مثل كرات متناهية الصغر تقفز متصادمة ببعضها بعضًا، حيث تكتسب الكرة سرعة عندما تصطدم بأخرى عند اقترابها منها بسرعة أكبر. ولكن عند تصادم كرة بأخرى أبطأ، تقلّ سرعة الارتداد (شكل 38). وبطريقة مماثلة، عندما تتحرّك الكرة المُستخدَمة في لعبة كرة الطاولة باتّجاه المضرب، قد ترتدّ بسرعة كبيرة إن كان المضرب يتحرّك باتّجاهها وبسرعة كبيرة، أمّا إذا كانت حركته مبتعدة عن الكرة، تكون سرعة ارتدادها صغيرة.

تنطبق الفكرة نفسها على الهواء الذي يتمدّد حيث تتصادم الجزيئات، وفي الوسط، يكون عدد الجزيئات التي تتراجع أكثر من تلك التي تتقارب (شكل 39). وبالتالي عند تمدُّد الهواء، تتناقص سرعة الجزيئات ويبرد الهواء، بحيث تتحوّل الطاقة لشغل مبذول على الهواء المحيط فيندفع الهواء متمدِّدًا للخارج.



(شكل 38)

عندما يتصادم جزيء مع آخر أبطأ، تكون سرعة الارتداد بعد التصادم أقلّ ممّا كانت عليه قبل التصادم.



(شكل 39)

تتصادم جزيئات الهواء الذي يتمدّد مع الجزيئات المتراجعة أكثر من التصادم مع تلك المقتربة. ولهذا السبب تميل سرعات الارتداد إلى التناقص فيبرد الهواء المتمدِّد.

فقرة إثرائية

تبريد اليد

ضَع يدك بمواجهة فمك. أُنفخ في يدك بفمك المفتوح واسعًا. لاحِظ أنّ نفَسَك دافئ. الآن اِجعل شفتيك مزمومتين لتضيق فتحة فمك وانفخ في يدك. هل تولّد الإحساس نفسه؟ في أيّ حالة يتمدّد هواء الزفير أكثر، النفخ مع اتساع فتحة الفم أو النفخ مع زمّ الشفتين؟ متى يسبّب الهواء الإحساس بيدك أبرد؟ ولماذا؟

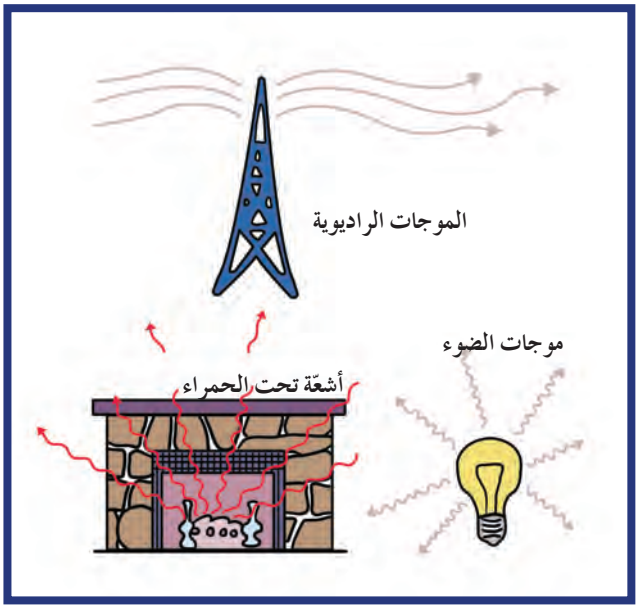
3. الإشعاع Radiation

إنّ الحرارة الصادرة عن الشمس تمر بالغلاف الجوّي لتدفئ سطح الأرض. كيف تصل هذه الحرارة إلى سطح الأرض؟

هل تصل إلينا بالتوصيل؟ أو بالحمل؟

لا تستطيع حرارة الشمس أن تمرّ عبر الغلاف الجوّي بالتوصيل لأنّ الهواء موصِّل رديء للحرارة، كما أنّها لا تمرّ بواسطة تيّارات الحمل لأنّ الحمل لا يبدأ إلّا بعد تسخين الأرض. ونحن نعلم أنه لا يتمّ التوصيل ولا الحمل في الفضاء الفارغ بين الأرض والشمس، فالتوصيل والحمل كما ذكرنا سابقًا يحتاجان إلى مادّة تكون محيط ناقل للحرارة. إذًا، تنتقل حرارة الشمس بطريقة ثالثة وهي الإشعاع.

الطاقة، بما فيها الحرارة، والتي تنتشر بالإشعاع تُسمّى الطاقة الإشعاعية. تكون الطاقة الإشعاعية في شكل موجات كهرومغناطيسية وتشمل الموجات الراديوية والموجات الدقيقة، والأشعّة تحت الحمراء، والضوء المرئي، والأشعّة فوق البنفسجية والأشعّة السينية وأشعّة جاما (شكل 40).



(شكل 40)

الموجات الكهرومغناطيسية وموجات الراديو والموجات تحت الحمراء هي من أنواع الطاقة الإشعاعية.

تختلف الأطوال الموجية للطاقة الإشعاعية المنبعِثة من الجسم باختلاف درجة حرارة الجسم. فالأجسام ذات درجات الحرارة المنخفضة تبعث موجات لها طول موجي أكبر من الأجسام ذات درجات الحرارة الأعلى والتي تبعث موجات طولها الموجي يقع في نهاية منطقة الأشعّة تحت الحمراء بين الموجات الراديوية والضوء المرئي. أمّا الأجسام التي تصل درجة حرارتها إلى (500)°C، فتصدر أطول الموجات المرئية ذات اللون الأحمر، ولكن إذا وصلت حرارة الجسم إلى (1200)°C فيصدر الضوء الأبيض الذي تميّزه العين.

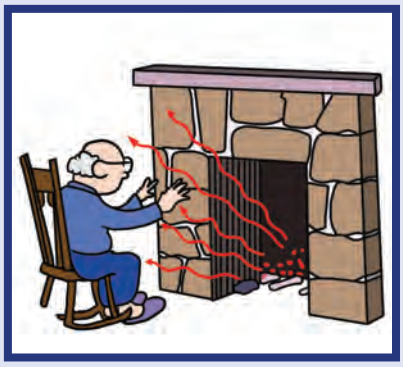
تأتي معظم الطاقة الإشعاعية التي نشعر بها من موجات الأشعّة تحت الحمراء غير المرئية والتي تُمتَصّ بواسطة الجلد. فالجمرات المحترِقة في المدفأة وفتيل المصباح والشمس هي من المصادر الشائعة التي تعطي الإحساس بالحرارة لأنّها تصدر أشعّة تحت حمراء وضوء مرئي. وعندما تسقط هذه الطاقة الإشعاعية على أجسام أخرى يُمتَصّ جزء منها ليزيد الطاقة الداخلية للأجسام وينعكس الجزء الآخر.

1.3 امتصاص الطاقة الإشعاعية

Absorption of Radiant Energy

إنّ امتصاص الجسم للطاقة الإشعاعية هي عملية معاكِسة لعملية انعكاسها. إنّ الجسم جيّد الامتصاص للطاقة الإشعاعية هو الجسم الذي يعكس القليل من الطاقة الإشعاعية ولهذا يبدو داكن اللون. أمّا الجسم الذي يمتصّ الطاقة بشكل كلّي فلا يعكس أيّ طاقة إشعاعية ويبدو أسود تمامًا. إذا نظرنا من بعيد إلى مداخل المباني المفتوحة خلال النهار ستبدو سوداء، وذلك لأنّ الطاقة الإشعاعية التي تدخل تنعكس مرّات عديدة على الجدران الداخلية ويرافقها امتصاص جزئي عند كلّ انعكاس إلى أن يبقى القليل أو لا يبقى شيء ينعكس إلى الخارج (شكل 42). أمّا العواكس الجيّدة للحرارة والضوء فهي أجسام رديئة الامتصاص وفاتحة اللون، لذلك ارتداء الملابس فاتحة اللون في الصيف يخفِّف من حدّة الحرارة على جسم الإنسان.

(شكل 42)
على الرغم من أنّ السطح الداخلي للصندوق أبيض إلا أنّه يبدو أسودًا لأنّ الطاقة الإشعاعية التي تدخل الفتحة أمامها فرصة قليلة للخروج قبل امتصاصها.



(شكل 41)
معظم الحرارة الصادرة من المدفأة يذهب عاليًا في المدخنة بتيّارات الحمل. أمّا الحرارة التي تدفئنا فتأتي إلينا بالإشعاع.

فقرة إثرائية

الفيزياء في المختبر

حجب الأشعّة تحت الحمراء

حاول الاقتراب من مدفأة واشعر بالحرارة على جفني عينيك أثناء غلقهما. الحرارة التي تشعر بها مصدرها الأشعّة تحت الحمراء، ومعظم الهواء الذي تمّ تسخينه يذهب إلى أعلى المدخنة. إنّ جفنيك شديدا الحساسية للأشعّة تحت الحمراء. الآن ضَع على عينيك نظّارة شمسية، ستشعر فورًا براحة عينيك، لماذا؟ لأنّ العدسات تمتصّ الأشعّة تحت الحمراء وتنفذ الضوء المرئي.

2.3 انبعاث الطاقة الإشعاعية

Emission of Radiant Energy

إنّ الأجسام جيّدة الامتصاص للطاقة الإشعاعية هي أيضًا أجسام تبعث الطاقة الإشعاعية بطريقة جيّدة والعكس صحيح. فإن لم يكن الجسم جيّد الامتصاص للطاقة الإشعاعية باعثًا جيّدًا، لن يحدث أيّ اتّزان حراري عند تلامس الأجسام. فكلّ جسم يبعث بقدر ما امتصّه من طاقة. لذلك، فإنّ الجسم داكن اللون والذي يمتصّ الكثير عليه أن يبعث الكثير من الطاقة الحرارية.

لتختبر ذلك، اَحضر وعائين معدنيين بالحجم والشكل نفسهما، إحداهما بسطح أبيض وآخر بسطح أسود (شكل 43). اِملأ الوعائين بماء ساخن وَضَع في كلّ منهما ترمومترًا لقياس درجة الحرارة ولاحِظ تغيُّر درجة الحرارة في كلّ من الوعائين. ستلاحظ أنّ الماء في الوعاء الأسود يبرد أوّلًا، وذلك لأنّ السطح الأسود باعث جيّد للطاقة الإشعاعية وهو أيضًا ماصّ جيّد. كرّر الاختبار ولكن اِملأ الوعائين بالماء والثلج وَضَعهما قرب مصدر جيّد للطاقة الإشعاعية. لاحِظ، أيّ وعاء يصبح دافئًا أوّلًا؟ لا شكّ أنّك لاحظت أنّ الوعاء الأسود يصبح دافئًا أسرع. وعليه، يمكنك أن تستلخص النتيجة التالية: **إنّ الأجسام السوداء ليست جيّدة الامتصاص للطاقة الإشعاعية فحسب ولكنّها أيضًا باعثة جيّدة للطاقة الحرارية.**

(شكل 43)
عند ملء الوعاءين بالماء الساخن، يبرد الوعاء الأسود أسرع.

3.3 القدرة الإشعاعية (معدّل الطاقة الإشعاعية)

Radiant Power

تُظهِر التجارب أنّ معدّل إشعاع الجسم للطاقة الإشعاعية $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$ يتناسب طرديًّا مع T^4، ويمكن تمثيل ذلك بمعادلة قانون ستيفان (Stefan's Law) التالية:

$$P = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = k_B \, A \, e \, T^4$$

علمًا أنّ $k_B = (5.67 \times 10^{-8}) W/(m^2K^4)$ وتُسمّى ثابت ستيفان بولتزمان (Stefan–Boltzmann Constant)، كما أنّ معدّل إشعاع الجسم والذي يُسمّى أيضًا القدرة الإشعاعية للجسم يتناسب طرديًّا مع مساحة سطح الجسم (A). أمّا e فتمثّل انبعاثية الجسم وهي مقدار يتراوح بين 0 و1 ويمثّل خاصّية من خواصّ الجسم، فالأجسام الداكنة لها مقدار انبعاثية قريب إلى 1، أمّا الأجسام العاكسة اللامعة فمقدار انبعاثيتها قريب من 0. عندما يكون الجسم في حالة اتّزان حراري مع الوسط المحيط به تكون درجة حرارته T ثابتة، وهذا يحتّم عليه أن يمتصّ ويبعث طاقة إشعاعية بالمعدّل نفسه. أمّا إذا اختلفت درجة حرارة الجسم عن الوسط المحيط به فلا بدّ أن يكون هنالك محصّلة لمعدّل انتقال الطاقة الإشعاعية والتي يمكن أن تكون طاقة يكتسبها الجسم أو يفقدها وتُحسَب باستخدام المعادلة التالية:

$$P_{net} = \left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_{net} = k_B \, A \, e(T_s^4 - T^4)$$

حيث إنّ (T) تساوي درجة حرارة الجسم، (T_s) تساوي درجة حرارة المحيط ويقاسان بوحدة الكلفن (K).
عندما تكون $T_s < T$ فإنّ القدرة الإشعاعية للجسم تكون سالبة وهذا يدلّ على فقدان الطاقة الإشعاعية.

مثال (2)

من المعلوم أنّ مقدار انبعاثية جلد الإنسان يساوي $e = (0.7)$.
أُحسب معدّل الطاقة الإشعاعية المنبعِثة من جلد الإنسان خلال ثانية واحدة من مساحة $(0.54)m^2$ عندما تساوي درجة حرارة الهواء المحيط $(20)^oC$ ودرجة حرارة الجلد تساوي درجة حرارة الجسم الطبيعية ألا وهي $(37)^oC$.

طريقة التفكير في الحلّ

1. حلِّل: أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: مساحة الجلد: $A = (0.54)m^2$

درجة حرارة المحيط: $T_s = 20 + 273 = (293)K$

درجة حرارة الجسم: $T = 37 + 273 = (310)K$

انباعثية الجلد: $e = (0.7)$

ثابت ستيفان بولتزمان: $k_B = (5.67 \times 10^{-8})W/m^2.K^4$

غير المعلوم: المعدّل الصافي لانتقال الطاقة الإشعاعية أو القدرة الإشعاعية الصافية: $\frac{\Delta Q}{\Delta t} = ?$

2. أُحسب غير المعلوم.

باستخدام المعادلة الرياضية التالية:

$$P_{net} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = k_B\, A\, e(T_S^{\,4} - T^4)$$

وبالتعويض عن المقادير المعلومة، نحصل على:

$$P_{net} = 5.67 \times 10^{-8} \times 0.54 \times 0.7 \times (293^4 - 310^4)$$

$$P_{net} = (-40)W$$

3. قيِّم: هل النتيجة مقبولة؟

إنّ الإشارة السالبة تعني أنّ الجسم قد بعث طاقة إشعاعية إلى المحيط وهذا صحيح لأنّ درجة حرارة الجسم أكبر من درجة حرارة الهواء المحيط.

فقرة إثرائية

الربط بالفيزياء الحيوية

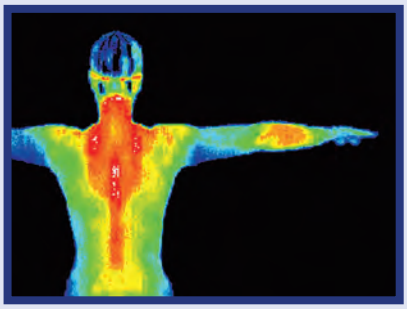
تعتمد كثافة الماء عند درجة الحرارة. وبالمثل فإن كثافة 2 إلى 3 طنّ من الزيت الموجود في رأس حوت العنبر (Sperm Whale) تعتمد أيضًا على درجة الحرارة، ولذلك يستطيع حوت العنبر أن يغيّر درجة حرارة هذا الزيت، ما يغيّر من كثافته. بهذه الطريقة يستطيع التحكّم في طفوه، ويكون قادرًا على مواجهة تقلّبات الكثافة في الماء المحيط به. ما رأيك في ذلك؟!

4.3 التصوير الحراري Thermography

كما ذكرنا سابقًا، إنّ جميع الأجسام تبعث بشكل طبيعي طاقة إشعاعية تحت الحمراء، كما أنّ الأجسام الأكثر سخونة تُطلِق أشعّة أكثر من الأجسام الأقلّ حرارة.

وقد استفاد العلماء من هذا المفهوم لتصميم آلة تصوير تستخدم الأشعّة تحت الحمراء التي تُطلِقها الأجسام والتي يقوم الجهاز بتحسُّسها وتحويلها إلى إشارات كهربائية. تظهر هذه الأخيرة على شكل صور تتفاوت في لونها ولمعتها على شاشة خاصّة نتيجة اختلاف درجة الحرارة بين أجزاء الجسم الباعث للطاقة الحرارية (شكل 44).

يُستخدَم التصوير الحراري في الطبّ لاكتشاف بعض الالتهابات والأورام، ويُستخدَم عسكريًّا للرؤية في الظلام، ويُستخدَم صناعيًّا في الكشف على ارتفاع درجة حرارة أجهزة المصانع وفي الكشف على أنظمة التوزيع الكهربائي وغيرها.

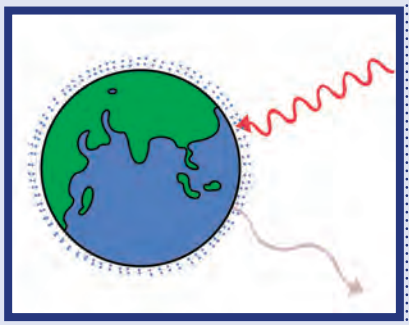


(شكل 44)
يُظهر اختلاف ألوان الصورة اختلاف درجة حرارة الجلد باختلاف كمّية الأوعية الدموية تحت الجلد.

5.3 الاحتباس الحراري للأرض وتأثير البيوت الزجاجية Global Warming and Greenhouse Effect

السيارة الموجودة في جوّ مشمس ومغلقة النوافذ تسخن بشدّة من الداخل، أي أنّها تصبح أسخن بالمقارنة مع الهواء الموجود في الخارج. هذا مثال على تأثير البيوت الزجاجية، وقد سُمِّيت كذلك للتشابه بينها وبين ارتفاع درجة حرارة البيوت الزجاجية لدى بائع الزهور.

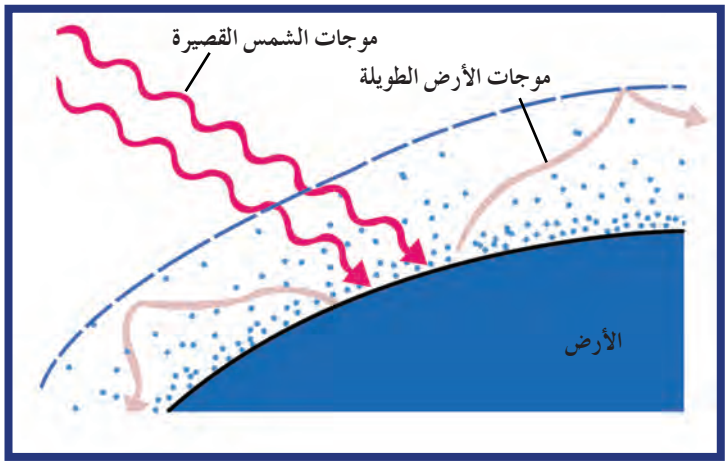
يتطلّب فهم تأثير البيوت الزجاجية معرفة مفهومين: المفهوم الأوّل، والذي تناولناه سابقًا، حيث إنّ كلّ الأجسام تشعّ، وأنّ الطول الموجي للإشعاع يعتمد على درجة حرارة الجسم الذي يبعث الإشعاع، والأجسام ذات درجات الحرارة المرتفعة تصدر إشعاعًا بطول موجي قصير، والأجسام ذات درجات الحرارة المنخفضة تصدر إشعاعًا له طول موجي طويل. والمفهوم الثاني الذي يجب معرفته هو أنّ الهواء يُعتبَر وسط شفّاف للموجات الطويلة (الأشعّة تحت الحمراء) والموجات القصيرة (المرئية) ما لم يحتوي على نسبة عالية من ثاني أكسيد الكربون وبخار الماء. وفي هذه الحالة يصبح مُعتِمًا للأشعّة تحت الحمراء. الزجاج مُنفِذ لموجات الضوء المرئي، ولكنّه مُعتِم للأشعّة تحت الحمراء.



(شكل 45)
تعتمد درجة حرارة الأرض على الاتّزان بين الطاقة الواردة من الإشعاع الشمسي والطاقة المنبعثة بالإشعاع الأرضي.

ونعود إلى السؤال السابق: لماذا تصبح السيارة الموجودة في جوّ مشمس ومغلقة النوافذ شديدة السخونة من الداخل أكثر من الهواء الموجود في الخارج؟ لأنّ درجة حرارة الشمس تكون عالية جدًّا، ما يعني أنّ الموجات التي تشعّها تكون ذات طول موجيّ قصير جدًّا. هذه الموجات القصيرة تستطيع النفاذ خلال الغلاف الجوّي للأرض وزجاج نوافذ السيارة، أي أنّ الطاقة الواردة من الشمس تنفذ لداخل السيارة، حيث يُمتَصّ الجزء الذي لم ينعكس فيصبح داخل السيارة مرتفع الحرارة. وتمامًا مثل الشمس، يبعث داخل السيارة موجاته الخاصّة، ولكن على عكس الموجات الصادرة من الشمس فهي موجات لها طول موجيّ أكبر لأنّ درجة الحرارة داخل السيارة أكثر انخفاضًا. تصطدم هذه الموجات الطويلة المُعاد إشعاعها بزجاج النوافذ غير المُنفِذ (المُعتِم) لها، وبذلك فالطاقة المُعاد إشعاعها تبقى داخل السيارة ما يجعل داخل السيارة أدفأ. ومهما ارتفعت درجة الحرارة داخل السيارة، لن تكون كافية لجعل داخلها يبعث موجات تستطيع المرور داخل الزجاج.

يحدث التأثير نفسه في الغلاف الجوّي للأرض، والذي يُعتبَر مُنفِذًا للإشعاع الشمسي. يمتصّ سطح الأرض هذه الطاقة، ويعيد إشعاع جزءٍ منها بموجات طولها الموجي أكبر. تُسمّى الطاقة التي تشعّها الأرض الإشعاع الأرضي. تمتصه غازات الغلاف الجوّي، الذي يتكوّن من غاز ومعظمه هو ثاني أكسيد الكربون وبخار الماء، وتعيد بعث الكثير من هذا الإشعاع الأرضي ذي الطول الموجي الطويل وتُرجِعه للأرض.



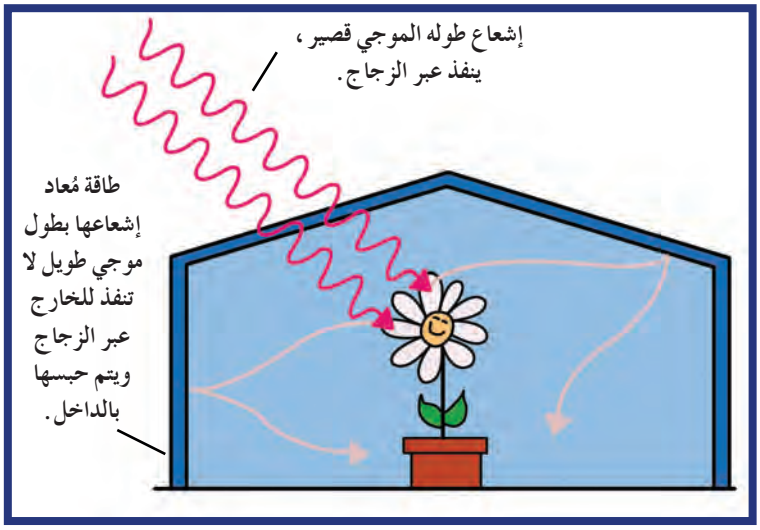
(شكل 46)

يعمل الغلاف الجوّي للأرض كصمّام من نوع أحادي الاتّجاه يسمح بمرور ضوء الشمس المرئي للداخل، ولكنّه يمنع الإشعاع الأرضي من المغادرة بسبب وجود ثاني أكسيد الكربون.

فقرة إثرائية

عند إنتاج موجة كهرومغناطيسية فإنّ تغيّرًا في الحقل الكهربائي والمغناطيسي ينتشر وينتقل إلى الوسط. تقلّ شدّة هذه الموجة مع المزيد من مساحة الانتشار. وأثناء انتشار الموجة في الوسط، قد يحصل تصادمًا يتفاعل مع ذرّات الوسط. يحدث هذا التفاعل بامتصاص ذرّات الوسط للموجات الكهرومغناطيسية المناسبة والتي تُحدث إثارة في ذرّاته تظهر بشكل انتقال إلكترونات الذّرات إلى مستويات طاقة أعلى داخلها. وهذا يفسّر سبب امتصاص ذرّات الماء لموجات الميكروويف وامتصاص الأجسام الصلبة الموجات تحت الحمراء وامتصاص طبقة الأوزون للموجات فوق البنفسجية. وتتميّز الذرّات المثارة بعدم استقرار حالتها نتيجة وجود إلكتروناتها في مستويات الطاقة العليا ولهذا تقوم بإعادة إشعاع وإطلاق موجات لتعود إلى حالتها المستقرّة السابقة.

لذلك فإنّ الإشعاع ذو الطول الموجي الطويل الذي لا يستطيع الهروب من الغلاف الجوّي للأرض يدفئ الأرض. وإنّ ظاهرة الاحتباس الحراري في الماضي لم تتقلّص بل حافظت عند درجة حرارة الأرض في الـ 500 ألف عام الماضي على متوسّط درجة حرارة يتراوح بين 19°C و 27°C. ولكن في هذه الأيّام، وبعد أن أصبح متوسّط درجة حرارة الأرض يساوي 27°C، أصبحت ظاهرة الاحتباس الحراري تشكّل تهديدًا. لهذا أصبح همّنا البيئي يرتكز على الزيادة في مستويات ثاني أكسيد الكربون (وغيره من الغازات الجوّية) في الغلاف الجوّي الذي يزيد درجة حرارة الأرض زيادة إضافية، والذي يُنتِج اتّزان حراري جديد غير مرغوب فيه للمحيط الحيوي.



(شكل 47)

الطاقة الإشعاعية ذات الطول الموجي القصير من الشمس تدخل خلال السقف الزجاجي للبيت الزجاجي. تبعث التربة طاقة إشعاعية ذات طول موجي طويل، وهي لا تستطيع على النفاذ من الزجاج. الطاقة الواردة تفوق الطاقة المنبعثة، وبالتالي يدفأ الداخل.

في البيت الزجاجي لبائع الزهور، يعود معظم التسخين إلى قدرة الزجاج على منع تيّارات الحمل من خلط الهواء الخارجي الأبرد مع الهواء الداخلي الأدفأ. لذلك، يؤدّي تأثير البيوت الزجاجية دورًا في تدفئة كوكب الأرض (الاحتباس الحراري) أكبر ممّا يحدث في تدفئة البيوت الزجاجية (المحتوية على نباتات). حتّى وقت قريب، إنّ متوسّط الإشعاع الشمسي الذي يصيب الأرض يتوازن مع الإشعاع الأرضي باتّجاه الفضاء. وهذا الاتّزان ينتج درجة حرارة مناسبة تساعدنا على الحياة. ولكن من المتوقّع خلال السنوات القادمة ارتفاع درجة حرارة الأرض وذلك لأسباب طبيعية أو لأسباب متعلّقة بأنشطة الإنسان من زيادة الجزيئات والموادّ على الغلاف الجوّي التي تغيّر مقدار امتصاص الأشعّة الشمسية وانعكاسها والطلب المتزايد على استهلاك الطاقة، لأنّ هذه الأنشطة تغيّر الاتّزان الإشعاعي وتزيد معدّل درجة حرارة الأرض.

فقرة إثرائية

عالم البيئة

ظاهرة البيوت الزجاجية لها اهتمام خاصّ لدى عالِم البيئة، فعلماء البيئة يدرسون العلاقة بين العوامل التي تساعد على الحياة واللاحياة. وفي أيّ منظومة بيئية، يحتاج علماء البيئة إلى استخدام الفيزياء عندما يحلّلون التغيّرات في درجات حرارة الغلاف الجوّي مع مرور الزمن. ومن الضروري لعلماء البيئة أن يقرّوا بأنّ الطاقة تُشعّ إلى ومن الأرض، وأنّ غازات معيّنة في الغلاف الجوّي تمتصّ وتعيد بعث الطاقة إلى الأرض. فهم العلاقات بين الطاقة ودرجة الحرارة وبين الطاقة وغازات البيوت الزجاجية (الاحتباس الحراري) يُمكِّن علماء البيئة من تحديد العمليات التي تتداخل مع العمليات الطبيعية للأرض.

مراجعة الدرس 3-1

أولًا– اشرح دور الإلكترونات الحرّة في توصيل الحرارة.

ثانيًا– لماذا تشعر عند لمسك قطعة معدن موجودة عند درجة حرارة الغرفة ببرودة أكثر من لمس ورقة أو قطعة خشب موجودة على درجة الحرارة نفسها؟

ثالثًا– لماذا يُعتبَر الخشب والفراء والريش والثلج عوازل جيّدة؟

رابعًا– إذا أمسكت بطرف قضيب معدني وغمّست طرفه الآخر بوعاء ثلج ستشعر أنّ الطرف في يدك أصبح باردًا. هل تسري البرودة من الثلج إلى يدك؟ اِشرح.

خامسًا– اِشرح سبب تغيُّر اتّجاه الرياح الشاطئية ما بين الليل والنهار.

سادسًا– عرِّف الطاقة الإشعاعية.

سابعًا– هل الجسم الذي يمتصّ الطاقة بشكل جيّد يمكن أن يكون باعثًا جيّدًا للطاقة أم رديئًا؟

ثامنًا– ما الفرق بين الإشعاع الشمسي والإشعاع الأرضي؟ وما سبب هذا الفرق؟

تاسعًا– اِستخدم حائط من القرميد له معامل توصيل حراري يساوي $(0.71)J/m.s.^oC$ ومساحته $(16)m^2$ وسماكته $(5)cm$ لعزل الحرارة داخل المطعم. إذا كانت درجة الحرارة داخل المطعم $(20)^oC$ ودرجة الحرارة خارج المطعم $(2)^oC$، أُحسب:

(أ) معدّل انتقال الحرارة بالتوصيل في الحائط القرميدي.

(ب) كمّية الحرارة التي تنتقل في الحائط خلال 8 ساعات.

عاشرًا– إذا كان مقدار انبعاثية جسم $(0.75) = e$ ومساحته (0.2) m^2، ما معدّل الطاقة الإشعاعية التي يبعثها خلال ثانية واحدة عند درجة حرارة $(20)^oC$؟

علمًا أنّ درجة حرارة الهواء المحيط تساوي $(10)^oC$ وثابت ستيفان بولتزمان يساوي $(5.67 \times 10^{-8})W/m^2.K^4$.

الدرس 3-2

الديناميكا الحرارية
Thermodynamics

الأهداف العامة

- يعرّف القانون الأوّل للديناميكا الحرارية (حفظ الطاقة).
- يكتب الصيغة الرياضية للقانون الأوّل للديناميكا الحرارية.
- يعرّف القانون الثاني للديناميكا الحرارية.
- يعرّف الآلات الحرارية.
- يعدّد استخدامات الآلات الحرارية.
- يستنتج قانون مردود الآلة الحرارية.
- يطبّق قوانين الديناميكا الحرارية في حلّ مسائل حياتية.

(شكل 48)
قطار يعمل على مولّد حراري.

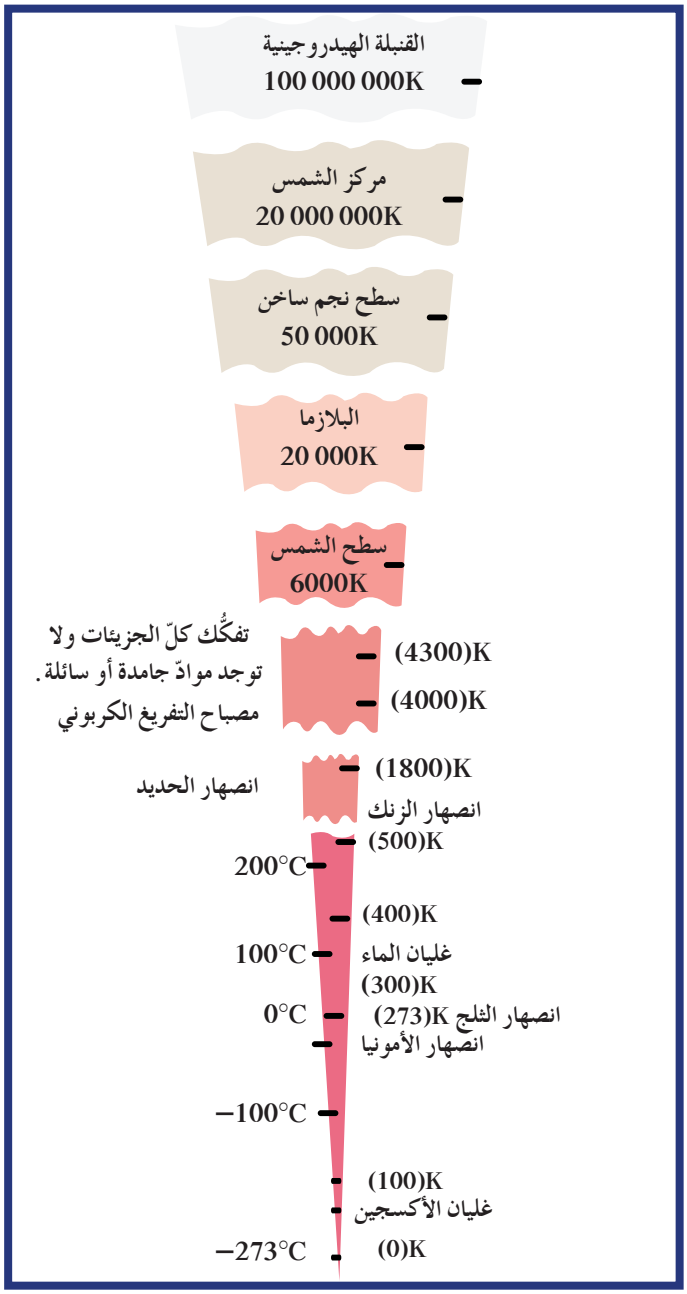
ظهر علم الديناميكا الحرارية في القرن التاسع قبل فهم العلماء للطبيعة الذرّية للموادّ، وهو يهتمّ بدراسة تحويل الحرارة إلى طاقة ميكانيكية. إنّ كلمتي ديناميكا الحرارية مشتقة من الكلمتين اليونانيتين: «ثرمو thermo» و«ديناميك dynamics» واللتان تعنيان انتقال الحرارة.

تخطّى علم الديناميكا الحرارية دراسة أثر الحرارة على السلوك المجهري للذرّات والجزيئات للنظم الحرارية والتي تناولناها في الدروس السابقة، وركّز على المستوى المحسوس المنظور ليتناول الميكانيكا والشغل والضغط ودرجة الحرارة في نقل الطاقة. يعود وجود الديناميكا الحرارية إلى مبدأ حفظ الطاقة وإلى المبدأ القائم على انتقال الحرارة من الجسم الساخن إلى البارد وليس العكس كما تعلّمت سابقًا. تقدّم الديناميكا الحرارية المفهوم الأساسي لعمل المولّدات الحرارية من التوربينات البخارية إلى المفاعلات النووية، وتقدّم المفهوم الأساسي لعمل البرّادات والمضخّات الحرارية. سنبدأ دراستنا للديناميكا الحرارية بتعرُّف أحد مفاهيمها القديمة وهو الحدّ الأدنى لدرجة الحرارة.

1. الصفر المطلق Absolute Zero

عندما تزداد حركة الذرّات بزيادة طاقتها الحركية ترتفع درجة الحرارة. ويبدو أنّه ليس هناك حدّ أقصى لدرجة الحرارة. ولكن على النقيض من ذلك، يوجد حدّ أدنى لمقياس درجات الحرارة. فاستمرار خفض الطاقة الحركية لذرّات المادّة يؤدّي إلى انخفاض درجة الحرارة. وعندما تقترب الطاقة الحركية من الصفر تقترب درجة الحرارة إلى الحدّ الأدنى، هذا الحد هو الصفر المطلق لدرجة الحرارة.

عند الصفر المطلق لا يوجد طاقة يمكن انتزاعها من المادّة ويستحيل تخفيض درجة حرارة المادّة إلى أيّ مقدار أدنى منها. إن درجة الحرارة الحدّية هذه هي (273) درجة تحت الصفر بحسب تدريج سلسيوس. إنّ الصفر المطلق يمثّل درجة الصفر على تدريج كلفن ويُكتَب (0)K (شكل 49).



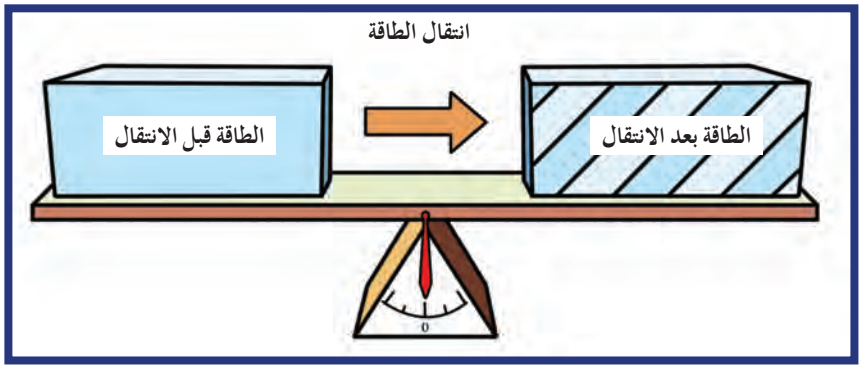
(شكل 49)

2. القانون الأوّل للديناميكا الحرارية

First Law of Thermodynamics

كان الاعتقاد السائد في مطلع القرن الثامن عشر أنّ الحرارة هي مائع غير مرئي يُسمّى السعر وينتقل من الأجسام الساخنة إلى الأجسام الباردة وأن هذه السعرات لا تتغيّر أثناء التبادل الحراري.

ولكن عام 1840، تم التخلّي عن نظرية السعر الحراري وفُهِم الانتقال الحراري على أنّه مجرّد انتقال الطاقة، فالحرارة اليوم هي شكل من أشكال الطاقة. تبقى هذه الطاقة محفوظة أثناء الانتقال، أي أنّها لا تفنى أو تُستحدَث (شكل 50).



(شكل 50)
تبقى الطاقة محفوظة اثناء الانتقال فالطاقة قبل الانتقال تساوي الطاقة بعد الانتقال

عند تطبيق قانون حفظ الطاقة على النظام الحراري نسمّيه القانون الأوّل للديناميكا الحرارية، ونصيغه بشكل عامّ على الشكل التالي:

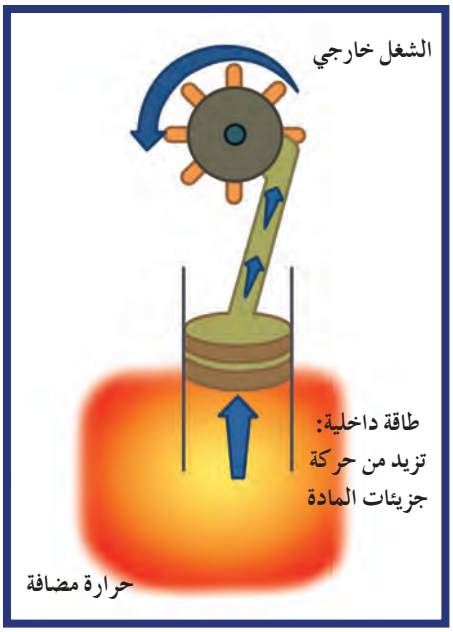
«عند إضافة كمّية من الحرارة على نظام ما، فإنّها تتحوّل إلى شكل آخر من الطاقة مساوٍ في المقدار».

يهتمّ القانون الأوّل للديناميكا الحرارية بالطاقة الداخلية للنظام والشغل والحرارة. ونعني بالنظام مجموعة الذرّات أو الجزيئات أو الجسيمات أو الأجسام التي سنتناولها، مثل البخار في الآلة البخارية أو الغلاف الجوّي للأرض. ومن المهمّ جدًّا تحديد ما يحتويه النظام وما يوجد خارجه لتطبيق قوانين الديناميكا الحرارية.

فإذا أضفنا كمّية من الحرارة (Q) إلى نظام ما، مثل آلة بخارية، فإن هذه الطاقة المضافة قد:

1. تُمتَصّ وتزداد الطاقة الداخلية للنظام ΔU.
2. تُفقَد وتُحدِث شغلًا خارجيًّا W يبذله النظام.

ويمكن لهذه الطاقة المضافة على النظام أن تؤدّي الأمرين معًا (شغل وطاقة داخلية) (شكل 51).



(شكل 51)
الحرارة المضافة تؤدي إلى زيادة الطاقة والشغل

إذًا، يمكن صياغة القانون الأول للديناميكا الحرارية بدقّة على الشكل التالي:

كمّية الحرارة المضافة = الزيادة في الطاقة الداخلية + الشغل الخارجي الذي يبذله النظام

ويمكن التعبير عن هذا القانون بالصيغة الرياضية التالية:

$$Q = W + \Delta U$$

حيث إنّ Q تمثّل الطاقة الحرارية (كمّية الحرارة) المضافة وW تمثّل مقدار الشغل وΔU تمثّل الطاقة الداخلية للنظام وتُقاس جميعها بحسب النظام الدولي بوحدة الجول J.

ولتوضيح ذلك، افترض أنّك قمت بتسخين أسطوانة مملوءة بالهواء ومُحكَمة الإغلاق بسدادة، فإن الطاقة الحرارية المضافة إلى النظام لا يمكنها بذل شغل وبالتالي تتحوّل إلى طاقة داخلية ترفع درجة حرارة الهواء، أي أنّ:

$$Q = \Delta U$$

أمّا إذا أغلقت الأسطوانة بمكبس متحرّك، فإنّ الهواء الساخن يستطيع أن يبذل شغلًا بمجرّد تمدُّده. وعليه، تكون الطاقة الحرارية المضافة قد تحوّلت إلى شغل وطاقة داخلية فتصبح درجة حرارة الهواء أقلّ من الحالة الأولى عندما كانت الأسطوانة مُغلَقة بإحكام ولم يحدث شغلًا. أمّا إذا انطلق المكبس بعيدًا من دون تغيُّر درجة حرارة الهواء المحبوس، تكون الطاقة المضافة بالكامل قد تحوّلت إلى شغلًا.

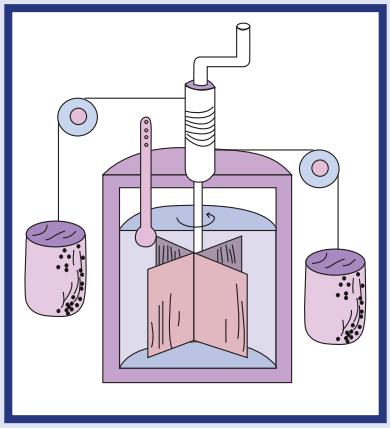
إنّ زيادة الطاقة الحرارية ليست الطريقة الوحيدة التي يمكن من خلالها زيادة الطاقة الداخلية للنظام. فإذا وضعنا مقدار الطاقة Q مساوٍ لصفر في معادلة القانون الأوّل، لوجدنا أنّ التغيُّر في مقدار الطاقة الداخلية للنظام يساوي مقدار الشغل المبذول على النظام أو منه، أي أنّ:

$$\Delta U = -W$$

على سبيل المثال، إذا كان الشغل هو ضغط كمّية من الغاز فإنّ الطاقة الداخلية للنظام تزيد من دون إضافة طاقة حرارية، من جهة أخرى، إذا قام النظام بالتمدُّد داخل الحيّز الموجود فيه فإنّ الطاقة الداخلية تقلّ، ويبرد النظام على الرغم من عدم انتزاع حرارة منه.

لاحِظ منفاخ عجلة الدرّاجة مثلًا، فعند نفخ الهواء بالضغط على المكبس يصبح المنفاخ ساخنًا. لماذا؟ لأنّ الشغل الميكانيكي المبذول على النظام يتحوّل إلى طاقة داخلية ترفع درجة الحرارة، وبخاصّة إذا حصلت العملية بسرعة كافية وبشكل لا تسمح بفقدان كمّية من الحرارة مع المحيط.

وسنتناول تفصيليًّا عملية ضغط الغاز من دون فقدان حرارة من النظام في القسم القادم من الدرس عند دراسة العمليات الأديباتيكية.



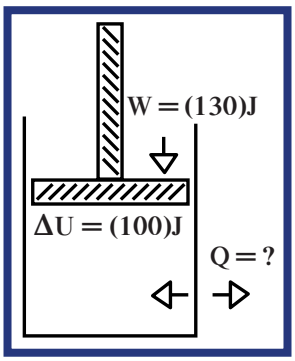
(شكل 52)
يُستخدَم هذا الجهاز في مقارنة الطاقة الحرارية بالطاقة الميكانيكية. وعندما يسقط الثقل ينتج طاقة تُسخِّن الماء. ويُعتبَر جايمس جول James Joule أوّل من ابتكر هذا الجهاز والذي سُمِّيت تبعًا لاسمه وحدة الطاقة جول J.

مثال (1)

بُذِل على النظام الموضّح في الشكل (53) شغلًا مقداره J(130) لضغطه، وأدّى ذلك إلى زيادة الطاقة الداخلية للنظام بمقدار J(100) خلال هذه العملية.

(أ) أُحسب كمّية الطاقة التي تحوّلت إلى حرارة.

(ب) هل هذه الطاقة أُضيفت إلى النظام أو سُحِبت منه على شكل حرارة؟



(شكل 53)

مثال (1) (تابع)

طريقة التفكير في الحلّ

1. حلِّل: أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: الشغل المبذول على النظام: $W = (-130)J$

زيادة الطاقة الداخلية: $\Delta U = (+100)J$

غير المعلوم: كمّية الطاقة التي تحوّلت إلى حرارة: $Q = ?$

2. أُحسب غير المعلوم.

(أ) باستخدام معادلة القانون الأوّل للديناميكا الحرارية وبالتعويض عن المقادير المعلومة، نحصل على:

$$Q = \Delta U + W$$

$$Q = 100 + (-130) = (-30)J$$

(ب) إنّ المقدار السالب لكمّية الحرارة يشير إلى أنّ الطاقة سُحِبت من النظام على شكل حرارة.

3. قيِّم: هل النتيجة مقبولة؟

على الرغم من أنّ الطاقة الداخلية للنظام قد ارتفعت تحت تأثير زيادة الضغط، فإنّ الطاقة التي أُضيفت من الشغل المبذول أكثر من المطلوب لزيادة الطاقة الداخلية، فخرجت من النظام على شكل طاقة حرارية كما هو موضّح من الإشارة السالبة للطاقة الحرارية Q.

3. العمليات الأديباتيكية Adiabatic Processes

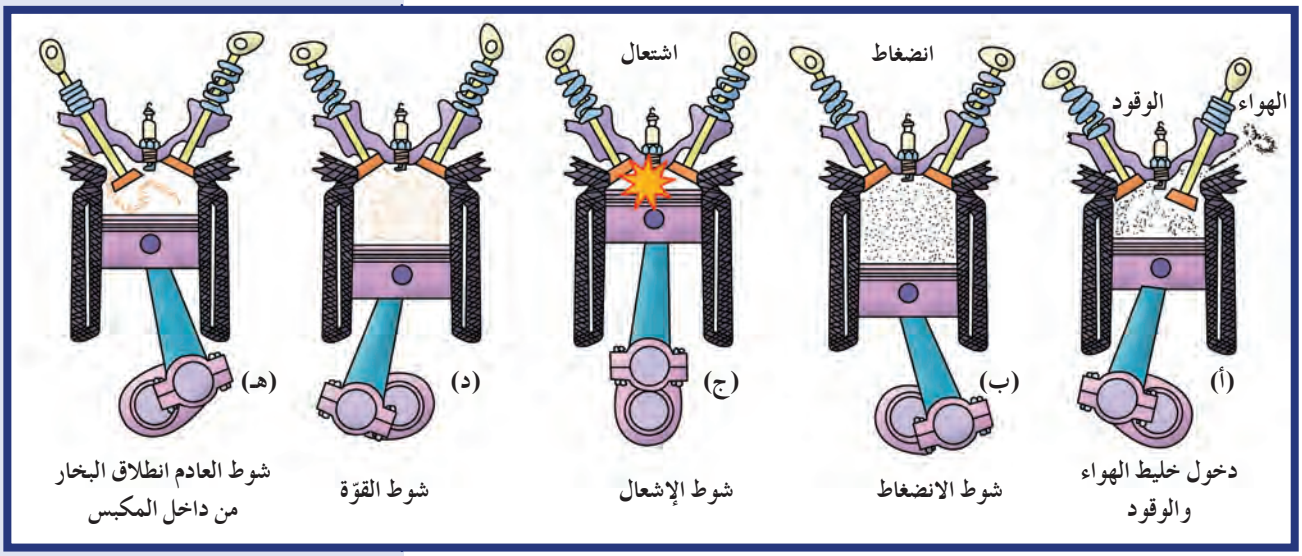
إنّ عملية انكماش الغاز أو تمدُّده في النظام من دون اكتساب أو فقدان النظام للحرارة تُسمى العملية الأديباتيكية Adiabatic Processes أي ثابتة الحرارة.

يمكن تحقيق التغيُّر الأديباتيكي في الحجم وذلك بتنفيذ العملية بسرعة كبيرة بحيث لا يكون هناك وقت لدخول الحرارة أو خروجها من النظام كما هو حال منفاخ العجلة الهوائية (شكل 54)، أو بعزل النظام عن البيئة المحيطة به.

ومن أبرز الأمثلة الشائعة عن العمليات الأديباتيكية، نذكر انكماش الغازات وتمدُّدها داخل أسطوانة محرّك السيارة (شكل 55) حيث يحدث الانكماش والتمدُّد في $(\frac{1}{100})$ من الثانية، فلا تتمكّن الطاقة من ترك غرفة الاحتراق.

(شكل 54)

ابذل شغلًا على منفاخ عجلة الدرّاجة، وذلك بالضغط إلى أسفل على المكبس وادفع الهواء إلى الداخل. يُسخّن الضغط الأديباتيكي الهواء.



(شكل 55)
دورة من أربعة أشواط لآلة الاحتراق الداخلي:
(أ) يملأ مخلوط الهواء والوقود الأسطوانة عندما يتحرّك المكبس إلى أسفل.
(ب) يتحرّك المكبس إلى أعلى ويضغط المخلوط أديباتيكيًّا حيث لا يحدث انتقال للحرارة.
(جـ) تشتعل شمعة الاحتراق ويشتعل المخلوط وترتفع درجة حرارته.
(د) يتمدّد الغاز أديباتيكيًّا فيدفع المكبس متّجهًا إلى أسفل (شوط القوّة).
(هـ) يندفع العادم عبر الصمّام، وتتكرّر الدورة مرّة أخرى.

كما أنّ الانضغاطات الكبيرة جدًّا، كتلك التي تحصل في محرّكات الديزل، تؤدّي إلى طاقة كبيرة جدًّا وكافية لإشعال مخلوط الوقود والهواء بدون شمعة الاحتراق Spark Plug، ولهذا لا يوجد شمعة احتراق في محركات الديزل.

وعليه عندما يكون الشغل المبذول على الغاز بواسطة انكماش أديباتيكي، فإنّ الغاز يكتسب طاقة داخلية ويصبح أكثر سخونة. وعندما يتمدّد أديباتيكيًّا يبذل شغلًا على الوسط المحيط به ويفقد طاقة داخلية ويبرد.

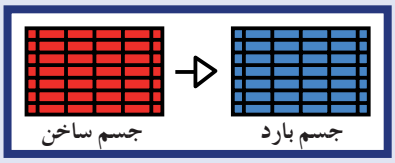
4. القانون الثاني للديناميكا الحرارية
Second Law of Thermodynamics

كما ذكرنا سابقًا، عند تلامس جسم ساخن مع جسم بارد فإنّ الجسم الساخن يبرد بسبب سريان الحرارة منه إلى الجسم البارد، والجسم البارد يدفأ، ويستمرّ انتقال الحرارة من الجسم الساخن إلى الجسم البارد إلى أن يحدث الاتّزان الحراري بين الجسمين ويصبحا عند درجة الحرارة نفسها.

وطبقًا للقانون الأوّل للديناميكا الحرارية، لن يكون هناك أيّ فقدان للطاقة عند حدوث الاتّزان الحراري.

ولكن تخيّل أنّ الجسم الساخن أخذ حرارة من الجسم البارد وأصبح أكثر سخونة. هل يتناقض ذلك مع القانون الأوّل للديناميكا الحرارية؟ كلا، فإذا أصبح الجسم البارد أكثر برودة فإنّ الطاقة الكلّية للجسمين بقيت محفوظة.

هذا لا يتعارض مع القانون الأوّل للديناميكا الحرارية ولكن هذا يتعارض بشدّة مع القانون الثاني للديناميكا الحرارية والذي يحدّد اتّجاه سريان الحرارة في العمليات الطبيعية.



(شكل 56)
تسري الحرارة من الجسم الساخن إلى البارد إلى أن يتمّ الاتّزان الحراري بين الجسمين.

ينصّ القانون الثاني للديناميكا الحرارية على التالي:
«لا يمكن للحرارة أن تسري من تلقاء نفسها من الجسم البارد إلى الجسم الساخن من دون بذل أيّ شغل خارجي».
تسري الحرارة في اتّجاه واحد من الجسم الساخن إلى البارد (شكل 52). في فصل الشتاء، تنتقل الحرارة من داخل المنزل الدافئ إلى الهواء البارد في الخارج، أمّا في فصل الصيف فتنتقل الحرارة من الهواء الساخن في الخارج إلى داخل المنزل البارد.
يمكن جعل الحرارة تسري من الجسم البارد إلى الجسم الساخن فقط إذا بذلنا شغلًا خارجي مثلما يحدث عند استخدام مضخّات الحرارة Heat Pumps التي تزيد من درجة حرارة الهواء أو مكيّفات الهواء Air Conditioners التي تقلّل من درجة حرارة الهواء. فمكيّفات الهواء الموجودة في الطائرة على سبيل المثال، تسحب الحرارة المرتفعة الناتجة عن عملية ضغط الهواء إلى المقصورة ليتساوى مع الضغط الجوّي المعتاد فيشعر الركّاب داخلها بجوّ من الراحة.
إنّ مبدأ اتّجاه سريان الحرارة هو بشكل دائم وتلقائي من الجسم الساخن إلى الجسم البارد، إلّا في حال وجود شغل مؤثّر خارجي كما هو الحال في عمل المكيّفات في المثال السابق.
ومهما كانت كمّية الطاقة الداخلية لجسم ما كبيرة، لن تسري تلقائيًّا إلى جسم آخر يختزن طاقة داخلية أقلّ ودرجة حرارة أكبر من دون مؤثّر خارجي. فلا يمكن للطاقة الداخلية الهائلة للمحيطات، على سبيل المثال، إضائة مصباح كهربائي من دون مؤثّر خارجي فهي لن تسري تلقائيًّا من ماء المحيط الباردة إلى مقاومة المصباح ذات درجة الحرارة المرتفعة.

5. المحرّكات الحرارية والقانون الثاني للديناميكا الحرارية
Heat Engines and the Second Law of Thermodynamics

من السهل تحويل الشغل كليًّا إلى حرارة، فعندما تفرك راحتي يديك معًا بسرعة يتحوّل كلّ الشغل الناتج عن الاحتكاك إلى حرارة. ولكن هل العملية العكسية ممكنة؟ أي هل يمكن تحويل الحرارة كلّها إلى شغل؟ إنّ تحويل الحرارة كلّها إلى شغل تُعتبَر عملية مستحيلة، وأفضل ما يمكن القيام به هو تحويل جزء من الحرارة إلى شغل ميكانيكي. المحرّك البخاري الذي اختُرِع عام 1700 م يُعتبَر أوّل محرّك حراري يحوّل جزء من الطاقة الحرارية إلى شغل ميكانيكي.
المحرّك الحراري (الآلة الحرارية) هو أيّ أداة تحوّل الطاقة الداخلية إلى شغل ميكانيكي. والفكرة الأساسية وراء المحرّك الحراري سواء كان محرّكًا بخاريًّا أو داخلي الاحتراق أو نفاثًا هي أنّ الشغل الميكانيكي يمكن الحصول عليه

فقرة إثرائية
الفيزياء في المختبر
أُبذل شغلًا براحتي يديك
قم بفرك راحتي يديك معًا بسرعة. أنت تقوم بشغل على جلدك. ما تأثير الشغل المبذول عند درجة حرارة راحتي يديك؟ إنّ الشغل يتحوّل بسهولة إلى طاقة حرارية.

فقط عندما تسري الحرارة من درجة الحرارة الأعلى إلى درجة الحرارة الأقلّ. في كلّ محرّك حراري يتحوّل جزء من الحرارة فقط إلى شغل. عندما نتكلّم عن المحرّكات الحرارية، فإننا نتكلم عن المستودعات Reservoirs. فالحرارة تنتقل من المستودع ذي درجة الحرارة العالية إلى المستودع ذي درجة الحرارة المنخفضة.

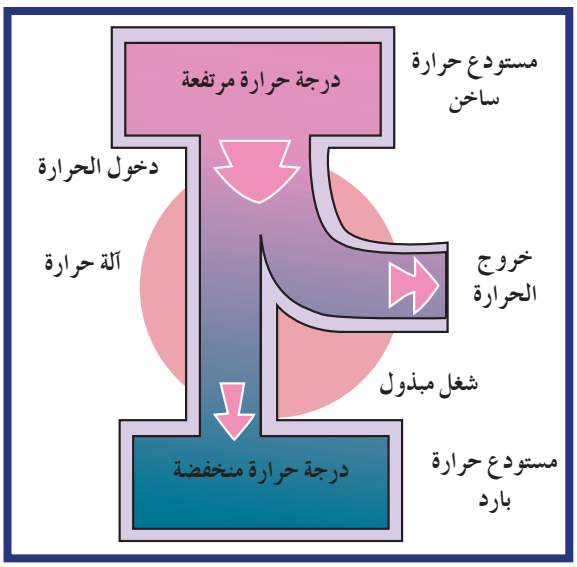
ويمكن أن نلخّص آداء المحرّك الحراري بالخطوات الثلاث التالية (شكل 57):

1. كلّ محرّك حراري يمتصّ الحرارة من المستودع ذي درجة الحرارة الأعلى فتزداد طاقته الداخلية.
2. يحوّل بعض من هذه الطاقة إلى شغل ميكانيكي.
3. يطرد الطاقة المتبقّية على صورة حرارة إلى المستودع ذي درجة الحرارة المنخفضة والذي يُسمّى المخرَج أو المُنفِذ.

على سبيل المثال، في محرّك الجازولين Gasoline Engine، تمثّل غرفة احتراق الوقود المستودع ذا درجة الحرارة المرتفعة، والشغل الميكانيكي يُبذَل على المكبس، وتُطرَد الطاقة المتبقّية إلى العادم. يشير القانون الثاني إلى أنّه لا يوجد محرّك حراري يمكن أن يحوّل كلّ الطاقة الداخلية إلى طاقة ميكانيكية، بل يتحوّل جزء من الطاقة فقط إلى شغل والباقي يُطرَد إلى الوسط الخارجي. وبعد تطبيقه على المحرّكات الحرارية، يمكن صياغة القانون الثاني للديناميكا الحرارية كما يلي:

«عندما يُنجَز شغل بواسطة محرّك حراري يعمل بين درجتين حراريتين $T_{\text{ساخن}}$ و $T_{\text{بارد}}$، فإنّه يتحوّل جزء من الطاقة فقط عند درجة الحرارة العالية إلى شغل والباقي يُطرَد كطاقة إلى المستودع البارد».

إنّ الحرارة التي يطردها المحرّك الحراري تكون في بعض الأحيان مرغوب فيها إذا كان الهدف تدفئة المستودع البارد، ولكن في أحيان أخرى، تكون غير مرغوب فيها وعديمة الفائدة وتُسمّى تلوُّث حراري Thermal Pollution.



(شكل 57)
عندما تسري الطاقة الحرارية في أيّ آلة حرارية من مكان ذي درجة حرارة عالية إلى مكان ذي درجة حرارة منخفضة، يتحوّل جزء من هذه الطاقة إلى شغل. وعند وضع هذا الشغل في آلة حرارية قد تسري الطاقة من درجة الحرارة المنخفضة إلى مكان درجة حرارته عالية مثلما يحدث في المبرّدات والمكيّفات.

6. الكفاءة المثالية للمحرّكات الحرارية

Ideal Efficiency of Heat Engine

كان الاعتقاد السائد أنّ المحرك الحراري مهمَل الاحتكاك يستطيع أن يحوّل كلّ الطاقة الداخلة أو معظمها إلى شغل مفيد أيّ أنّ لهذا المحرِّك كفاءة مثالية .

وتُعرَّف الكفاءة ، بشكل عامّ ، على أنّها قياس الطاقة المفيدة الناتجة عن عملية بالنسبة إلى الطاقة الكلّية المبذولة على العملية .

ولكن هذا غير صحيح ، ففي عام 1824 وعندما قام المهندس الفرنسي سادي كارنو بتحليل أشواط المحرِّك الحراري ، اكتشف أنّ جزء الحرارة الذي يتحوّل إلى شغل مفيد حتى تحت ظروف مثالية يعتمد على اختلاف درجة الحرارة بين المستودع الساخن والبارد . والصيغة الرياضية للكفاءة المثالية أو التي تُسمّى كفاءة كارنو تُكتب كما يلي:

$$\text{الكفاءة المثالية} = \frac{\text{درجة حرارة المستودع الساخن} - \text{درجة حرارة المستودع البارد}}{\text{درجة حرارة المستودع الساخن}}$$

أي أنّ :

$$\eta = \frac{T_h - T_c}{T_h}$$

فالكفاءة المثالية تعتمد على اختلاف درجة الحرارة بين المدخل والمنفذ فحسب .

من المهمّ الانتباه إلى أنّ درجة الحرارة تُقاس بمقياس درجات الحرارة المطلقة . على سبيل المثال ، إن كانت درجة حرارة المستودع الساخن (400)K والمستودع البارد (300)K فإنّ الكفاءة المثالية تحسب كما يلي:

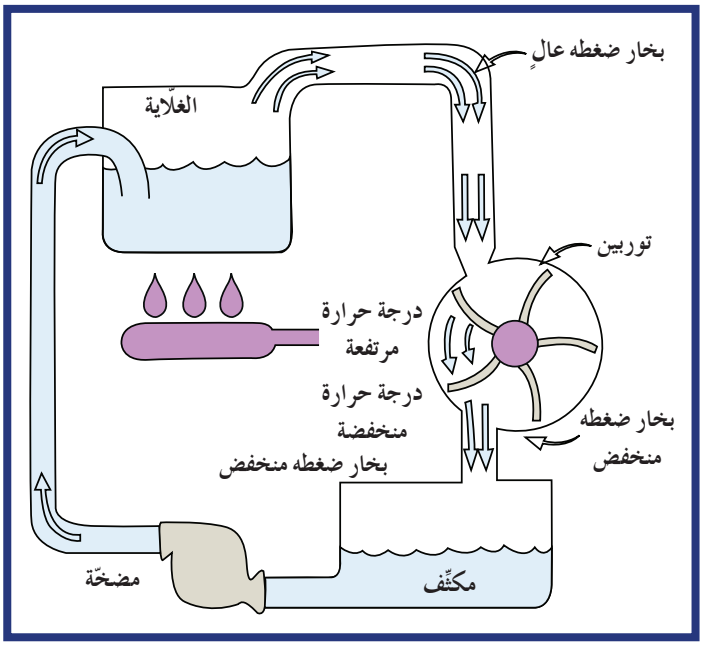
$$\eta = \frac{400 - 300}{400} = \frac{1}{4}$$

هذا يعني أنّه تحت الظروف المثالية يتحوّل 25% فقط من الطاقة البخارية المكتسَبة إلى شغل بينما الباقي والمساوي 75% يُفقَد . ولهذا يتمّ تسخين البخار إلى درجات عالية في المحرّكات البخارية ووحدات إنتاج القوى الكهربائية ، فكلّما كانت درجة حرارة البخار الداخلة للمحرِّك أكبر ، كانت كفاءة المحرِّك أكبر . فإذا كانت درجة حرارة المستودع الساخن في المثال السابق (600)K بدلًا من (400)K فإنّ الكفاءة المثالية للمحرِّك تكون:

$$\eta = \frac{600 - 300}{600} = \frac{1}{2}$$

ونلاحظ أنّها تساوي ضعف الكفاءة في المثال السابق .

ويمكن مشاهدة تأثير فرق درجات الحرارة بين المستودع الساخن والمُنفِذ (المخرج) في تشغيل توربينات الآلة البخارية في الشكل (58).



(شكل 58)
يدور التوربين لأنّ البخار الساخن من الغلّاية يبذل ضغطًا أكبر على الجانب الأمامي من زعانف مروحة التوربين ممّا يبذله البخار منخفض الحرارة على الجانب الخلفي لها. وبدون الفرق في الضغط لا يمكن للتوربين أن يتحرّك أو ينتج طاقة إلى أيّ حمل خارجي مثل المولّدات الكهربائية. ووجود ضغط بخار على الجانب الخلفي لريش التوربين، حتى مع ثبات الاحتكاك، يمنع المحرّك من أن يكون تامّ الكفاءة.

يمثّل البخار في الغلّاية المستودع الساخن، ويمثّل المُنفِذ (المخرج) المستودع البارد. وبعد مرور البخار في التوربين، يبذل البخار الساخن شغلًا على شفرات التوربين الأمامية ويؤثّر على الجوانب الخلفية للمروحة تأثيرًا معاكسًا. ولكن بما أنّ الضغط يقلّ على الجوانب الخلفية لأنّ البخار يبرد بعد إعطاء الطاقة إلى شفرات مروحة التوربين، فإنّ الشغل الخارج من التوربين يساوي الفرق بين الشغل المبذول بواسطة الشفرات والشغل الذي تبذله الشفرات على البخار البارد لإخراجه من المُنفِذ (المخرج). وعليه، نستنتج أنّ الاختلاف في الضغط ضروري لتشغيل المحرِّك الحراري حيث يرتبط بالفرق في درجات الحرارة بين المدخل والمُنفِذ (المخرج). وكلّما كان الفرق أكبر في درجات الحرارة كلّما زادت الكفاءة.

وتحدّد معادلة كارنو الحدّ الأقصى لكفاءة بعض أنواع المحرِّكات الحرارية (جدول 6)، وكلّما كانت درجة حرارة المدخل أعلى مقارنة بدرجة حرارة المُنفِذ (المخرج) كان المحرّك أكثر كفاءة. ولكن هذه الكفاءة عمليًّا تكون أقلّ عن مقدارها المثالي لوجود الاحتكاك في المحرّكات. يُظهِر الجدول (7) كفاءة المحرِّكات الحرارية بوجود الاحتكاك التي تمّ قياسها بالتجربة.

ويمكن استنتاج شكلًا آخر لمعادلة كفاءة المحرِّك الحراري انطلاقًا من تعريف الكفاءة المعتمد على الطاقة:

$$\text{الكفاءة} = \frac{\text{الشغل المفيد الناتج عن المحرِّك}}{\text{الطاقة الكلّية الداخلة إلى المحرِّك}}$$

نوع المحرِّك	الكفاءة المثالية
بخاري	0.29
جازولين	0.6
ديزل	0.56

(جدول 6)

نوع المحرِّك	الكفاءة بوجود الاحتكاك
بخاري	0.17
جازولين	0.25
ديزل	0.35

(جدول 7)

أي أنّ :

$$\eta = \frac{W}{Q_h}$$

وبما أنّ الشغل المفيد يساوي الفرق بين الحرارة الداخلة والحرارة المطرودة من المنفذ، أي $W = Q_h - Q_c$ ، يمكننا أن نستنتج أنّ الكفاءة تكتب بالمعادلة التالية:

$$\eta = \frac{W}{Q_h} = \frac{Q_h - Q_c}{Q_h}$$

$$\eta = 1 - \frac{Q_c}{Q_h}$$

مثال (2)

أُحسب كفاءة محرِّك حراري يتلقّى خلال دورة واحدة طاقة تساوي (200)J من احتراق الوقود ويخسر (100)J إلى المنفذ (المخرج).

طريقة التفكير في الحلّ

1. حلّل: اذكر المعلوم وغير المعلوم

المعلوم: الحرارة الكلّية للمستودع الساخن: $Q_h = (200)J$

الحرارة المطرودة إلى المستودع البارد: $Q_c = (100)J$

غير المعلوم: الكفاءة: $\eta = ?$

2. أُحسب غير المعلوم.

باستخدام معادلة الكفاءة وبالتعويض عن المقادير المعلومة، نحصل على:

$$\eta = 1 - \frac{Q_c}{Q_h} = 1 - \frac{100}{200} = \frac{1}{2}$$

3. قيِّم: هل النتيجة مقبولة؟

50% فقط من الطاقة الحرارية يعطي شغلًا. إنّ كفاءة المحرِّك الحراري متوقَّعة وهي أقلّ من (1) وهذا يؤكّد صحّة الإجابة مع العلم أنّه لا يوجد محرِّك له كفاءة تساوي (1).

فقرة إثرائية

الصلة بالتكنولوجيا

محرِّكات السيراميك!

عرف الإنسان الفخّار منذ آلاف السنين وطوَّره إلى ما يُعرَف اليوم باسم «السيراميك». وهو كالفخّار سهل الكسر ولا يتحمّل الصدمات. وقد توصّل العلماء إلى استنباط أنواع جديدة أكثر صلابة ونعومة ومقاومة للحرارة والصدأ من المعادن ومن هنا تولَّدت فكرة استخدام السيراميك بدلًا من المعادن في تصنيع محرِّكات السيارات لأنّه يعمل في درجات حرارة عالية تقترب من درجة انصهار الحديد. وينتج عن ذلك زيادة كبيرة في كفاءة كارنوت. ولعلّنا نرى محرِّكات السيراميك قبل حلول العام 2020 م.

مراجعة الدرس 3-2

أولًا– عرِّف الديناميكا الحرارية.

ثانيًا– ما هي أقلّ درجة حرارة على تدريج السلسيوس؟ وعلى تدريج كلفن؟

ثالثًا– أضيفت طاقة مقدارها J(10) إلى نظام لا يبذل شغلًا خارجيًّا. أُحسب مقدار الطاقة التي تزداد بها الطاقة الداخلية للنظام.

رابعًا– أضيفت طاقة مقدارها J(10) إلى نظام يبذل شغلًا خارجيًّا مقداره J(4). أُحسب مقدار الطاقة التي تزداد بها الطاقة الداخلية للنظام.

خامسًا– في حال حدوث شغل مع ثبوت درجة الحرارة على نظام ما، هل تقلّ الطاقة الداخلية للنظام أم تزداد؟ وإذا أحدث النظام شغلًا هل تقلّ الطاقة الداخلية للنظام أم تزداد؟

سادسًا– أُذكر نُصَّ القانون الثاني للديناميكا الحرارية.

سابعًا– عدِّد العمليات الثلاث التي تحدث في كلّ محرِّك حراري.

ثامنًا– إذا تغلّبنا على الاحتكاك تمامًا في محرِّك حراري، هل تصبح كفاءته 100%؟ اشرح.

تاسعًا– أُحسب الكفاءة المثالية للمحرِّك الحراري إذا كان كلا المستودعين لهما درجة الحرارة نفسها التي تساوي K(400).

عاشرًا– أُحسب الكفاءة المثالية لمحرِّك حراري له مستودع ساخن درجة حرارته K(400) ومستودع بارد درجة حرارته صفر مطلق.

الحادي عشرَ– محرِّك بخاري أخذ من الغلّاية طاقة مقدارها $kJ(2.5 \times 10^3)$ وطرَد إلى المنفذ (المخرج) $kJ(1.5 \times 10^3)$ خلال دورة واحدة. أُحسب:

(أ) كفاءة المحرِّك.

(ب) الشغل المفيد للمحرِّك.

الثاني عشرَ– محرِّك حراري يعمل على الديزل ينتج J(500) في كلّ دورة وكفاءته 30%. أُحسب مقدار الطاقة التي تنتقل من المحرِّك إلى المنفذ (المخرج).

مسائل مع إجابات

1. أُحسب الكفاءة المثالية لمحرِّك حراري إذا كانت درجة حرارة الخزّان الساخن عند K(800) ودرجة حرارة الخزّان البارد عند K(300)

الإجابة: $(\eta = 0.63)$

2. أُحسب الكفاءة المثالية لتوربين بخاري درجة حرارة الخزّان الساخن °C(112) ودرجة حرارة الخزّان البارد °C(29).

الإجابة: $(\eta = 0.22)$

مراجعة الوحدة الثانية

المفاهيم

الآلة الحرارية	Heat Engine	إشعاع	Radiation
إشعاع أرضي	Terrestrial Radiation	إعادة التجمّد	Regelation
الاتّزان الحراري	Thermal Equilibrium	الاحتباس الحراري	Global Warming
التبخّر	Evaporation	التجمّد	Freezing
تدريج (مقياس) سلسيوس	Celsius Scale	تدريج (مقياس) فهرنهايت	Fahrenheit Scale
تدريج (مقياس) كلفن	Kelvin Scale	ثرموستات (منظِّم حراري)	Thermostat
التصوير الحراري	Thermography	التقلُّص – الانكماش	Shrinkage
التكثُّف	Condensation	التلامس الحراري	Thermal Contact
التمدُّد الحراري	Thermal Expansion	التوصيل	Conduction
الحرارة	Heat	الحرارة الكامنة	Latent Heat
الحمل	Convection	درجة الحرارة	Temperature
الديناميكا الحرارية	Thermodynamics	الرطوبة	Humidity
السعة الحرارة النوعية	Specific Heat Capacity	السعة الحرارية	Heat Capacity
السعر	Calorie	الصفر المطلق	Absolute Zero
الطاقة الإشعاعية	Radiant Energy	الطاقة الداخلية	Internal Energy
العمليات الأديباتيكية (ثبات الحرارة)	Adiabatic Processes	الغليان	Boiling
القدرة الإشعاعية	Radiant Power	المزدوجة الحرارية	Thermocouple
المُسعِر الحراري	Calorimeter	موصِّل	Conductor

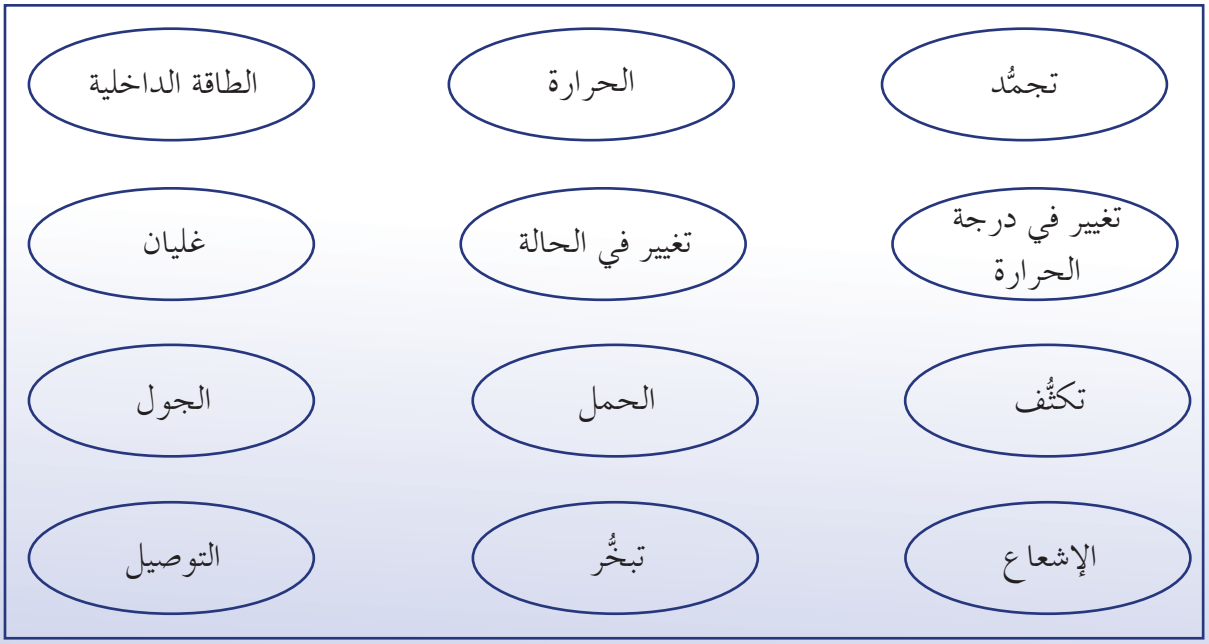
الأفكار الرئيسة في الوحدة

- درجة الحرارة مقياس يدلّ على مدى دفء أو برودة الأجسام.
- درجة الحرارة تتناسب طرديًّا مع متوسّط الطاقة الحركية للجزيء الواحد.
- الحرارة هي طاقة تنتقل بين الأجسام عند وجود فرق في درجة الحرارة.
- لا تحتوي المادّة على حرارة بل تحتوي على طاقة داخلية.
- السعة الحرارية النوعية تساوي كمّية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة وحدة الكتل من المادّة بمقدار درجة واحدة.
- تتمدّد الموادّ عند تسخينها وتنكمش عند تبريدها.
- تتمدّد الغازات بمعدّل أكبر ممّا تتمدّد به السوائل والأجسام الصلبة.
- للماء سلوك خاصّ في التمدُّد والانكماش ما بين درجتي $0^{\circ}C$ و$4^{\circ}C$.

- التبخُّر هو تغيير الحالة من سائل إلى غاز ويُعتبَر أيضًا عملية تبريد.
- التكثُّف هو عملية تحوُّل الغاز إلى سائل ويُعتبَر أيضًا عملية تسخين.
- عند الغليان يتبخّر السائل عند أيّ منطقة داخل الحيّز الذي يشغله وتتكوّن فقّاعات البخار داخل السائل، وتعتمد درجة غليان السائل على الضغط المؤثِّر على سطحه كما أنّه عملية تبريد مثل عملية التبخُّر.
- أثناء عملية التجمُّد تتغيّر الحالة السائلة لتصبح حالة صلبة وتنخفض درجة تجمُّد السائل عند إضافة موادّ إليه.
- عند تغيُّر حالة الجسم يكتسب الجسم طاقة أو يفقدها من دون تغيير في درجة حرارته.
- تنتقل الحرارة بواسطة التوصيل الذي يحدث بين الموادّ الموصِّلة المختلفة والتي تكون بحالة تلامس.
- انتقال الحرارة بواسطة تيّارات الحمل يحدث بحركة المادّة الساخنة نفسها، ويحدث في الموائع.
- تنتج الرياح من تيّارات الحمل التي تعمل على تحريك الهواء.
- تنتقل الطاقة الإشعاعية في الفراغ، والموادّ الماصّة الجيّدة للإشعاع تكون باعثًا جيّدًا أيضًا.
- يتناسب معدّل التبريد أو التسخين طرديًّا مع فرق درجات الحرارة بين الجسم المشعّ والمحيط الخارجي.
- الديناميكا الحرارية هي دراسة الحرارة والشغل.
- القانون الأوّل للديناميكا الحرارية: تتحوّل الطاقة من شكل إلى آخر من دون زيادة أو نقصان ولا يمكن إيجادها من العدم أو فناؤها. والطاقة التي يكتسبها النظام تساوي مجموع الزيادة في الطاقة الداخلية للنظام والشغل الخارجي الذي يبذله.
- التغيُّرات الأديباتيكية تكوّن انكماشًا أو تمدُّدًا بشرط عدم خروج أو دخول حرارة من النظام وإليه.
- القانون الثاني للديناميكا الحرارية: لا تسري الحرارة تلقائيًّا من الجسم البارد إلى الجسم الساخن، فلا يمكن صنع محرِّك حراري يتبادل الحرارة مع منبع وحيد.
- كفاءة المحرِّك الحراري تساوي نسبة الشغل الميكانيكي الذي يقدّمه المحرِّك إلى الطاقة الحرارية الكلّية التي يأخذها من المنبع الساخن.

خريطة مفاهيم الوحدة

اِستخدم المصطلحات الموضَّحة في الشكل التالي لرسم خريطة مفاهيم تنظِّم معظم الأفكار التي احتوتها الوحدة:



تحقق من فهمك

ضع علامة (✓) في المربّع الواقع أمام أنسب إجابة في كلّ ممّا يلي:

1. إنّ مقدار درجة الحرارة 15°C بمقياس تدريج فهرنهايت يساوي:
   - ☐ 8.3
   - ☐ 27
   - ☐ 40
   - ☐ 59
2. إنّ درجة حرارة غليان الكحول بحسب تدريج الفهرنهايت تساوي 172°F وتساوي بحسب تدريج سيلسيوس:
   - ☐ 60
   - ☐ 82
   - ☐ 27
   - ☐ 77.8
3. إنّ وحدة قياس الحرارة بحسب النظام الدولي للوحدات هي:
   - ☐ الجول
   - ☐ السعر
   - ☐ الكيلو سعر
   - ☐ كلفن
4. السعة الحرارية النوعية هي:
   - ☐ كمّية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة كيلوجرام واحد من مادّة ما درجة سيليزية واحدة.
   - ☐ كمّية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة مادّة درجة سيليزية واحدة.
   - ☐ درجة الحرارة التي ترفع حرارة مادّة ما بمقدار جول واحد.
   - ☐ درجة الحرارة التي ترفع حرارة كيلوجرام من المادّة بمقدار جول واحد.
5. كمّية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة 200g من الماء من 15°C إلى 45°C علمًا أنّ السعة الحرارية النوعية للماء 4186J/kg.K يساوي:
   - ☐ (3.7×10^4)J
   - ☐ (12.5×10^4)J
   - ☐ (1.2×10^4)J
   - ☐ (2.5×10^4)J

تحقق من معلوماتك

أجب عن الأسئلة التالية:

1. من المعروف أنّ كثافة الثلج أقلّ من كثافة الماء بسبب تركيبه البلّوري المفتوح. فسّر لماذا كثافة الماء عند درجة حرارة 0°C أقلّ منها عند درجة حرارة 4°C.
2. فسر سبب تجمُّد ماء البحيرات من أعلى إلى أسفل وليس العكس.
3. ما العلاقة بين السعة الحرارية النوعية للمادّة ومعدّل ارتفاع درجة حرارتها؟
4. عرِّف الطاقة الداخلية.
5. المادّة تحتوي على جزيئات في حركة دائمة، فهل هي تحتوي على حرارة؟
6. وضِّح اتّجاه سريان الحرارة أثناء تلامس جسمين.
7. هل يمكن اعتبار التبخُّر عملية تبريد إذا كان كلّ جزيء عند سطح السائل له المقدار نفسه من الطاقة الحركية قبل التصادم وبعده مع الجزيئات الأخرى؟
8. هل يستمرّ عمل المزدوجة الحرارية إذا تساوى معدّل تمدُّد المعدنين اللذين يكوّنانه؟ فسّر أهمّية اختلاف المعدنين في عمل المزدوجة الحرارية.

9. هل يزيد أم يقلّ احتمال تجمُّد ماء البحيرات في الشتاء بحال كانت السعة الحرارية النوعية للماء أقلّ من مقدارها الحقيقي؟ فسِّر إجابتك.
10. ما درجة الحرارة التي يجب أن يكون عليها كلّ من قطعة المعدن وقطعة الخشب حتى لا تشعر بسخونتهما وبرودتهما عند لمسهما؟
11. عندما يتكثّف بخار الماء هل يُدفئ الهواء المحيط به أم يُبرِّده؟ فسِّر إجابتك.
12. قارِن الكفاءة المثالية بين محرّكين: الأوّل يعمل بين مستودعين لهما درجتي الحرارة (600)K و (400)K والثاني بين مستودعين لهما درجتي حرارة (500)K و(400)K. اِستنتج تأثير درجة الحرارة على الكفاءة.

تحقق من مهاراتك

حلّ المسائل التالية:

1. ما مقدار الطاقة الناتجة عن تكثُّف (10)g من بخار الماء عند درجة حرارة (100)°C ليغيّر حالته إلى ثلج عند درجة حرارة (−10)°C؟ الحرارة الكامنة للانصهار تساوي (3.33×10^5)J/kg والحرارة الكامنة للتصعيد (2.26×10^6)J/kg والحرارة النوعية للماء (4180)J/kg.K والسعة الحرارة النوعية للجليد (2100)J/kg.K.
2. أُحسب معامل التمدُّد الطولي لساق معدني طوله الأولي (1)m عند درجة حرارة صفر وأصبح (1.0015)m عند درجة حرارة (100)°C.
3. ما كمّية بخار الماء عند درجة حرارة (100)°C التي يجب تكثُّفها لصهر قطعة ثلج كتلتها (20) g ودرجة حرارتها (0)°C؟ علمًا أنّ الحرارة الكامنة للانصهار تساوي (3.33×10^5)J/kg والحرارة الكامنة للتصعيد (2.26×10^6)J/kg والسعة الحرارية النوعية للماء (4180)J/kg.K.
4. وضعت قطعة من الجليد كتلتها (40)g ودرجة حرارتها (−10)°C في مُسعِر حراري سعته الحرارية النوعية (60)J/kg يحتوي على (200)g من الماء عند درجة حرارة (90)°C. أُحسب درجة الحرارة النهائية للنظام علمًا أنّ الحرارة الكامنة للانصهار تساوي (3.33×10^5)J/kg والسعة الحرارية النوعية للماء (4180)J/kg.K والسعة الحرارية النوعية للجليد (2100)J/kg.K.
5. آلة حرارية كفاءتها المثالية 25% درجة حرارة المستودع الساخن (100)°C. أُحسب درجة حرارة مستودعها البارد.
6. محرِّك حراري يتلقّى خلال دورة واحدة طاقة (400)kJ نتيجة احتراق الوقود ويطرد من المنفذ (المخرج) (50)kJ، أُحسب:
   (أ) كفاءة المحرِّك الحراري.
   (ب) الشغل المفيد للمحرِّك.
7. جدار غرفة طوله (4.5)m وعرضه (4)m وسماكته (22)cm يفصل بين الغرفة والخارج. إذا كانت درجة حرارة الغرفة (24)°C ودرجة حرارة الخارج (42)°C وموصِّلية الإسمنت (1.3) J/m.s.°C، أُحسب:
   (أ) معدّل انتقال الحرارة بالتوصيل من خلال الإسمنت.
   (ب) كمّية الحرارة التي تنتقل بعد 4 ساعات.
8. أُحسب معدّل الطاقة الإشعاعية المنبعثة من جسم مساحته $(0.5)cm^2$ وانبعاثيته (0.6) إذا كانت درجة حرارته (160)°C ودرجة حرارة المحيط (20)°C.

9. كرة من الحديد حجمها $(50)cm^3$ عند درجة حرارة $(20)^oC$. أُحسب حجمها إذا ما سخنت حتى درجة $(90)^oC$، علمًا أنّ معامل التمدُّد الطولي للحديد $(12 \times 10^{-6})(^oC)^{-1}$.

10. إناء زجاجي حجمه $(50)cm^3$ يحتوي على $(46)cm^3$ من الزيت عند درجة حرارة $(5)^oC$. أُحسب درجة الحرارة التي عندها يملأ الزيت الإناء، علمًا أنّ معامل التمدُّد الحقيقي للزيت $(0.93 \times 10^{-3})(^oC)^{-1}$ ومعامل التمدُّد الحجمي للزجاج $(25 \times 10^{-6})(^oC)^{-1}$.

التواصل

أُكتب مقالًا لا يزيد عن عشرة أسطر تبيِّن فيه سبب رشّ مسحوق الفحم على الطرقات التي يكسوها الجليد.

أشِر في مقالك إلى تأثير لون المادّة بشكل عامّ على امتصاص الطاقة الإشعاعية وبيِّن دور مسحوق الفحم (الكربون) على انصهار الجليد عند سطوع الشمس.

نشاط بحثي

يُعَدّ التلوُّث الحراري من أهمّ الأسباب المؤدّية إلى الخلل في التوازن البيئي.
قم ببحث تبيِّن فيه أهمّية هذه الظاهرة والعوامل المسبِّبة لها، وأشر في بحثك إلى أخطار هذه الظاهرة على التوازن البيئي وعلى الإنسان. يجب أن يتضمّن بحثك دور الدول والحكومات في الحدّ من تعاظم هذه الظاهرة.

الوحدة الثالثة

الكهرباء والمغناطيسية
Electricity and Magnetism

درسنا في السنوات السابقة القوى الكهربائية المتبادلة بين الشحنات الكهربائية الموجودة على مسافة من بعضها بعضًا مستخدمين قانون كولوم. وعندما درسنا الشحن بالاستقطاب لاحظنا أنّ للشحنات الكهربائية تأثير على الحيّز المحيط بها، أي أنّ الشحنة الكهربائية تصنع مجالًا كهربائيًّا حولها يحتوي على قوى المجال. وبالمثل تتغيّر خواصّ الحيّز المحيط بالمغناطيس. وهذا يشير أيضًا إلى أنّ هذا الحيّز يتأثّر بالمجال المغناطيسي.

في هذه الوحدة سنتناول تفصيليًّا المجالات الكهربائية وخواصّها، وسنميّز بين المجال المنتظم والمجال غير المنتظم منها. كذلك سنتعرّف في هذه الوحدة على المغناطيس وخواصّه وسنتناول دراسة المجالات المغناطيسية وكيفية تمثيلها أمّا في نهاية الوحدة، فسنتناول العلاقة بين المغناطيس والكهرباء وسنبيّن أهمّيتها في كثير من التطبيقات اليومية والعملية.

اكتشف بنفسك

المغناطيسية الكهربائية

للمغناطيس خواصّ فريدة، ويُستخدم في صناعات المولدات والمحركات الكهربائية. وأدت العلاقة بين ظاهرتي الكهرباء والمغناطيس إلى تطوير صناعات الصلب بإيجاد رافعات تعتمد على المغناطيسية الكهربائية في عملها، وإلى ظهور التكنولوجيا الحديثة التي أدت إلى اكتشاف القدرة الكهربائية واختراع أجهزة الراديو والتلفزيون.

أجب عن الأسئلة التالية بناءً على ما قرأته في النصّ:

1. اذكر بعض استخدامات المغناطيس.
2. ما الأثر الإيجابي لارتباط ظاهرتي الكهرباء والمغناطيسية؟
3. استنتج أهمّية المغناطيسية الكهربائية في صناعة الصلب والحديد.

فصول الوحدة

الفصل الأوّل

- الكهرباء

الفصل الثاني

- المغناطيسية

أهداف الوحدة

- يعرّف المجال الكهربائي.
- يمثّل المجال الكهربائي بالمتّجهات.
- يحسب شدّة المجال الكهربائي عند نقطة.
- يقارن بين الأقطاب المغناطيسية والشحنات الكهربائية.
- يعرّف المجال المغناطيسي.
- يصف ما يحدث للمجالات المغناطيسية للحديد تحت تأثير المجالات المغناطيسية.
- يعرّف خواصّ المجال المغناطيسي الناتج عن تيّار كهربائي في سلك.
- يعرّف المكثّفات.
- يحسب الطاقة الكهربائية المختزَنة بالمكثّفات.

معالم الوحدة

اكتشف بنفسك: المغناطيسية الكهربائية

ارتباط الفيزياء بالتقنية: طابعات نفث الحبر

الفيزياء في المختبر: مغناطيسية الأرض

الفصل الأوّل

ما هو المجال الكهربائي؟ وما هي الطاقة الكهربائية؟
هل من علاقة تربط بينهما؟
هل يمكن تخزين الطاقة الكهربائية الناتجة عن الشحنات الكهربائية؟
ذكرنا سابقًا أنّ للشحنات الكهربائية مجال ومن هذه المجالات ما هو منتظم كالمجال الكهربائي بين سطحين متوازيين مشحونين، ومنه ما هو غير منتظم كالمجالات الناتجة عن موصّلات مشحونة وشحنات نقطية في حيّز ما. هذا ما سنبيّنه تفصيليًّا في الدرس الأوّل من هذا الفصل.
في هذا الفصل، سننطلق من حقيقة أنّ الشحنة الموجودة في حيّز ما قادرة على جذب أو دفع شحنة نقطية موجودة في مجالها، أي قادرة على إنجاز شغل بسبب قوى مجالها لنستنتج أنّ المجال الكهربائي هو مخزن للطاقة الكهربائية. كما سنتعرّف على المكثّف ودوره في تخزين تلك الطاقة الكهربائية بين سطحيه المتوازيين، أي داخل مجاله الكهربائي، وكيفية حساب مقدار الطاقة الكهربائية المختزَنة. وسنشير أيضًا إلى أهمّية المكثّف في التكنولوجيا كما في ذاكرة الكومبيوتر، ولوحات المفاتيح، وأجهزة الضوء المبهر (فلاش) Photo Flash المتّصلة بآلات التصوير، وفي أجهزة الليزر لإنتاج شعاع الليزر.

دروس الفصل

الدرس الأوّل
- المجالات الكهربائية وخطوط المجالات الكهربائية

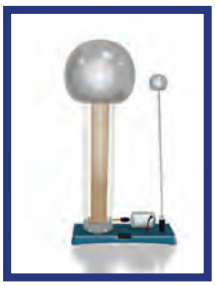
الدرس الثاني
- المكثّفات

الدرس 1-1

المجالات الكهربائية وخطوط المجالات الكهربائية
Electric Fields and Electric Field Lines

الأهداف العامة

- يعرّف المجال الكهربائي .
- يحسب شدّة المجال الكهربائي الناتج عن شحنة نقطية .
- يمثّل المجال الكهربائي لكلّ من شحنة نقطية ، وشحنتين متشابهتين ، وشحنتين مختلفتين ، وبين لوحين متوازيين ومشحونين .
- يحسب محصّلة متّجه المجال الكهربائي عند نقطة .
- يعرّف المجال الكهربائي المنتظم .
- يعدّد ميزات المجال الكهربائي المنتظم .



(شكل 59)
يمكنك الشعور بقوى المجال الكهربائي المحيط بمولّد ڤاندوجراف مشحونًا .

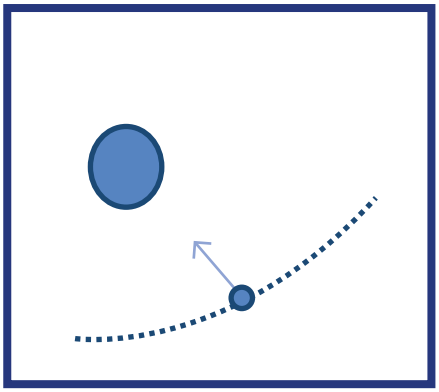
سبق أن درسنا في الصف العاشر أنّ الشحنات الكهربائية المتشابهة تتنافر وأمّا المختلفة منها فتتجاذب . وتوصّلنا باستخدام قانون كولوم إلى حساب مقدار القوّة الكهربائية عند التفاعل المتبادل بين شحنتين كهربائيتين ، وذكرنا أنّ مقدار هذه القوّة يتناسب طرديًّا مع حاصل ضرب مقدار الشحنتين ويتناسب عكسيًّا مع مربّع المسافة بين مركزيهما ، ومثّلنا قانون كولوم بالعلاقة الرياضية التالية:

$$F = \frac{K\, q_1\, q_2}{d^2}$$

وقد لاحظنا من التجارب أنّ القوّة الكهربائية تؤثّر عن بعد ، وهي بذلك تشبه قوّة التجاذب بين الكتل ، وهذا يعني أنّ للشحنة الكهربائية مجالًا تؤثّر به على أيّ شحنة موجودة داخل هذا المجال . وهذا يتماثل تمامًا مع مجال القوّة التجاذبية بين الكتل . إنّ مفهوم هذا المجال الكهربائي الناتج عن شحنة كهربائية هو محور درسنا هذا ، حيث سنتعرّف مفهوم المجال الكهربائي ونميّز أنواعه ، ونرسم خطوطه ، وسنعمل على حساب مقداره بعد إيجاد علاقة رياضية بينه وبين القوّة الكهربائية والشحنة .

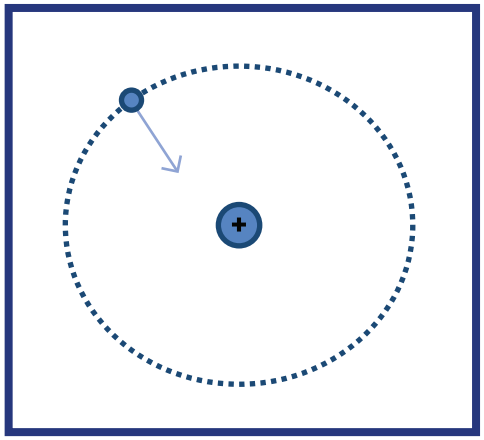
1. المجال الكهربائي Electric Field

عندما درسنا سقوط الأجسام نحو الأرض توصّلنا إلى أنّ قوّة الجاذبية، الناتجة عن التفاعل بين الجسمين، هي التي تجعل التفاحة تسقط إلى الأرض. وعندما درسنا حركة القمر الصناعي حول الأرض توصّلنا إلى أنّ قوّة الجاذبية، الناتجة عن التفاعل عن بعد بين القمر الصناعي والأرض، هي التي تعمل على الاحتفاظ بالقمر الصناعي في مداره حول الأرض (شكل 60).



(شكل 60)
التفاعل عن بعد بين القمر الصناعي والأرض

كذلك فإنّ حركة الإلكترون حول النواة موجبة الشحنة هي نتيجة القوّة الكهربائية الناتجة عن التفاعل عن بعد بين الإلكترون السالب الشحنة والبروتون الموجب الشحنة (شكل 61).

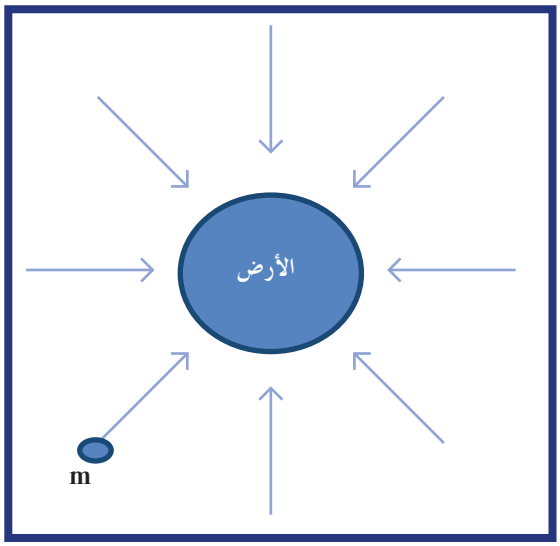


(شكل 61)
التفاعل عن بعد بين الإلكترون سالب الشحنة والبروتون موجب الشحنة

إنّ هذه الأمثلة تبيّن أنّ التفاحة والقمر الصناعي والإلكترون تختبر قوى تعمل عن بعد من دون أيّ ملامسة، ومختلفة عن القوى الناتجة عن التفاعل بين الأجسام المتلامسة مثل قوى الاحتكاك وردّ الفعل والشدّ وغيرها.

إنّ تفسير التفاعل عن بعد بين الأجسام المادّية أو الشحنات فرَض وضْع نموذج يُعرَف بنموذج المجال Field.

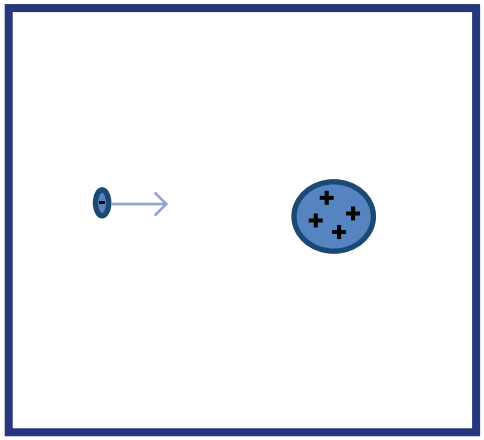
فالتفاعل عن بعد بين القمر الصناعي والأرض هو التفاعل بين القمر الصناعي ومجال الجاذبية المحيط بالأرض، أي أنّ قوة الجاذبية هي التفاعل بين كتلة القمر وجاذبية الأرض.



(شكل 62)

التفاعل بين كتلة m ومجال جاذبية الأرض.

وكذلك القوّة الكهربائية الناتجة عن التفاعل عن بعد بين الإلكترون والنواة هي التفاعل بين شحنة الإلكترون والمجال الكهربائي الذي ولّدته حولها الشحنة الأخرى.



(شكل 63)

التفاعل بين الإلكترون والمجال الكهربائي الناتج عن شحنة النواة.

وعليه، نعرّف المجال الكهربائي للشحنة على أنّه الحيّز المحيط بالشحنة الكهربائية الذي يظهر فيه تأثير القوّة الكهربائية على شحنة أخرى أو أجسام مشحونة. فالمجال الكهربائي خاصّية يكتسبها الحيّز بسبب وجود شحنات كهربائية مهما اختلف مقدارها أو نوعها.

2. شدّة المجال الكهربائي لشحنة نقطية واتّجاهه

The Magnitude and Direction of the Electric Field of a Charge

يحدَّد المجال الكهربائي $\vec{E}$ لشحنة نقطية عند نقطة ما حول الشحنة بمقداره واتّجاهه. يمكن قياس مقدار شدّة المجال الكهربائي بمدى تأثيره على شحنة اختبار موضوعة عند إحدى نقاط المجال.

إذا كانت شحنة الاختبار q متأثّرة بقوّة كهربائية $\vec{F}$ عند وضعها داخل إحدى نقاط المجال، فإنّ شدّة المجال الكهربائي عند هذه النقطة تُحسَب بالعلاقة التالية:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

وعليه، يمكن **تعريف شدّة المجال الكهربائي عند نقطة بأنّها القوّة الكهربائية المؤثّرة على وحدة الشحنات الكهربائية الموضوعة عند هذه النقطة.**

تقاس شدّة المجال الكهربائي بحسب النظام الدولي للوحدات بوحدة N/C.

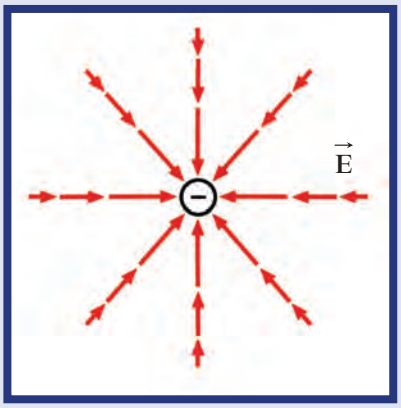
ويمكن حساب شدّة المجال الكهربائي عند نقطة تبعد d عن مركز الشحنة بالمعادلة التالية:

$$E = \frac{K\,q}{d^2}$$

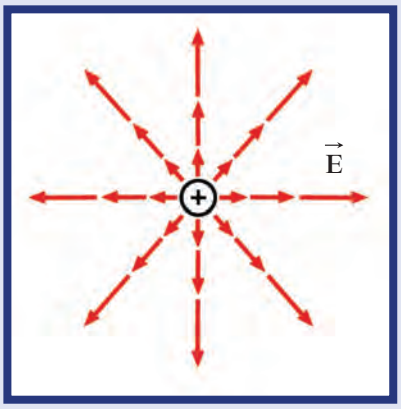
حيث $k = (9 \times 10^9)\ N.m^2/C^2$

وذلك باستبدال القوّة F بمقدارها بحسب قانون كولوم.

أمّا اتّجاه المجال الكهربائي عند إحدى نقاطه، فقد اتُّفِق على أنّه اتّجاه القوّة المؤثّرة على شحنة اختبار موضوعة عند تلك النقطة. لذلك، عندما تكون الشحنة المسبّبة للمجال موجبة، يكون اتّجاه المجال مبتعدًا عنها (شكل 64 أ). أمّا إذا كانت الشحنة المسبّبة للمجال سالبة، يكون اتّجاه المجال باتّجاهها (شكل 64 ب).



(أ) يتّجه المجال الكهربائي نحو الشحنة السالبة.



(ب) يتّجه المجال الكهربائي بعيدًا عن مركز الشحنة الموجبة

(شكل 64)

مثال (1)

شحنة نقطية مقدارها $q = (2 \times 10^{-6})C$ تؤثّر على نقطة M تبعد عنها مسافة مقدارها $d = (10)cm$ (شكل 65).

(أ) أُحسب مقدار شدّة المجال الكهربائي المؤثّرة عند النقطة M.

(ب) مثِّل بيانيًّا باستخدام مقياس رسم مناسب المجال الكهربائي على النقطة M.

طريقة التفكير في الحلّ

1. حلِّل: أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: مقدار الشحنة: $q = (2 \times 10^{-6})C$

المسافة: $d = (10)cm$

غير المعلوم: **(أ)** مقدار شدّة المجال الكهربائي: $E = ?$

2. أُحسب غير المعلوم.

(أ) باستخدام العلاقة الرياضية:

$$E = \frac{F}{q} = \frac{K\,q}{d^2}$$

وبالتعويض عن المقادير المعلومة نحصل على:

$$E = \frac{9 \times 10^9 \times 2 \times 10^{-6}}{0.1^2} = (1.8 \times 10^6)N/C$$

(ب) بما أنّ الشحنة موجبة فإنّ اتّجاه المجال الكهربائي يكون بعيدًا عن مركز الشحنة. وباستخدام مقياس رسم $(1 \times 10^6)N/C = (1)cm$، نمثّل متّجه المجال الكهربائي بمتّجه طوله (1.8)cm (شكل 65).

3. قيِّم: هل النتيجة مقبولة؟

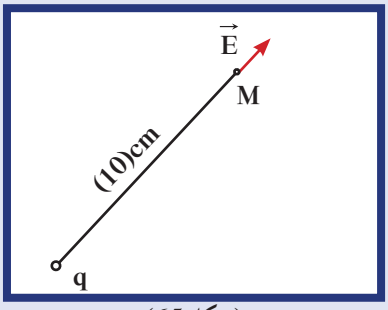
إنّ مقدار شدّة المجال واتّجاهه يتناسبان مع المقادير المعطاة في المسألة.

3. خطوط المجال الكهربائي Electric Field Lines

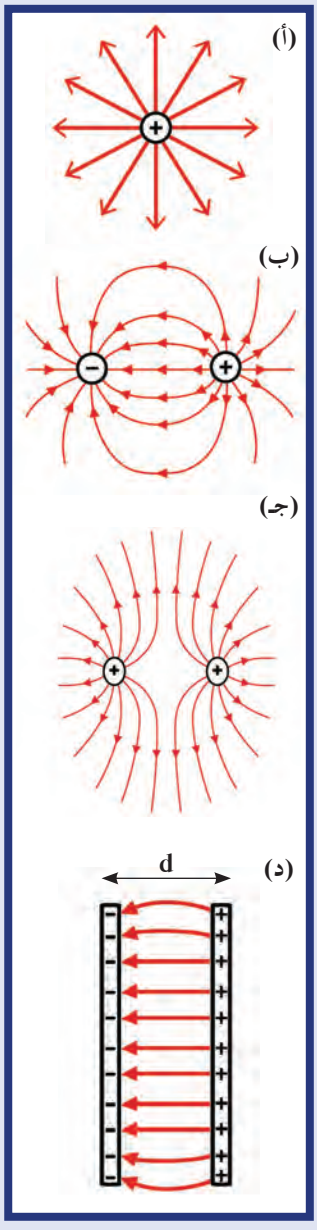
إنّ المجال الكهربائي غير مرئي ولكنه يمثَّل بخطوط تُظهر تأثيره على الجسيمات الدقيقة المشحونة، وتُسمّى هذه الخطوط خطوطَ القوى وهي تتباعد في مناطق ضعف المجال.

في حالة شحنة مفردة تمتدّ خطوط المجال إلى ما لا نهاية، أمّا في حالة شحنتين مختلفتين فتخرج الخطوط من الشحنة الموجبة لتنتهي عند الشحنة السالبة.

يوضّح الشكل (66) بعض خطوط القوى لمجالات كهربائية لشحنة نقطية مفردة ولشحنتين نقطيتين متشابهتين ومختلفتين، ولمجال كهربائي بين لوحين معدنيين متوازيين ومتقابلين وشحنتيهما المتساوية بالمقدار ولكن مختلفة من حيث النوع.



(شكل 65)



(شكل 66)
خطوط المجال الكهربائي
(أ) شحنة موجبة
(ب) شحنتين متساويتين في المقدار ومختلفتين في النوع
(جـ) شحنتين متساويتين في المقدار ومتشابهتين في النوع
(د) لوحين متوازيين مشحونين تفصل بينهما مسافة d

4. محصّلة مجالين كهربائيين ناجّين عن شحنتين نقطيتين

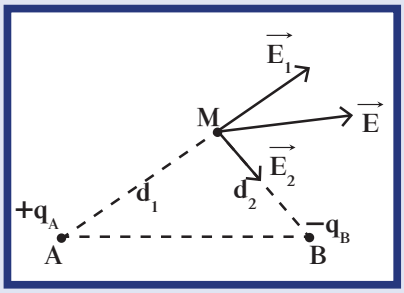
Resultant of Two Fields

لنأخذ شحنتين نقطيتين موجودتين على نقطتين A و B في حيّز ما كما في الشكل (67) . إنّ محصّلة المجال الكهربائي التي تؤثّر بها الشحنتين على النقطة M والتي تبعد عن الشحنة q_1 مسافة d_1 وعن الشحنة q_2 مسافة d_2 ، تُحسَب بالجمع الاتّجاهي لمتّجهي المجالين الكهربائيين $\vec{E}_1$ و $\vec{E}_2$. وتُكتَب بالمعادلة التالية:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

بالتالي ، إنّ محصّلة المجال الكهربائي الناتجة عن مجموعة من الشحنات النقطية على النقطة M هي الجمع الاتّجاهي لمتّجهات المجالات الكهربائية المؤثّرة على النقطة من كلّ شحنة على حدة ، ويُعبَّر عنها بالمعادلة التالية:

$$\vec{E} = \Sigma\, \vec{E}_i$$



(شكل 67)
اتّجاه المجال الكهربائي $\vec{E}_1$ بعيدًا عن مركز الشحنة لأنّ q_A موجبة ، بينما اتّجاه $\vec{E}_2$ نحو مركز الشحنة لأنّ q_B سالبة ، أمّا اتّجاه المحصّلة فهو اتّجاه $\vec{E}$.

مثال (2)

شحنتان كهربائيتان موضوعتان عند النقطتين A و B ، حيث:

$AB = (10)cm$ ، ومقدار الشحنتين q_A و q_B:

$q_A = (2 \times 10^{-8})C$

و $q_B = (-2 \times 10^{-8})C$

تبعد الشحنتان عن النقطة M مسافة:

$d_1 = (10)cm$ و $d_2 = (10)cm$ كما في الشكل (68) .

(أ) أُحسب مقدار شدّة المجال الكهربائي الناتج عن الشحنتين عند النقطة M .

(ب) حدِّد عناصر متّجه محصّلة المجال الكهربائي .

طريقة التفكير في الحلّ

1. حلِّل: أُذكر المعلوم وغير المعلوم .

المعلوم: $q_A = (2 \times 10^{-8})C$

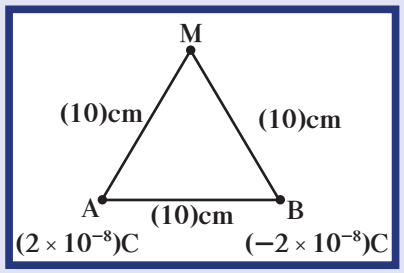
$q_B = (-2 \times 10^{-8})C$

المسافة: $d_1 = (10)cm$

المسافة: $d_2 = (10)cm$

غير المعلوم: **(أ)** مقدار شدّة المجال الكهربائي عند النقطة M .

(ب) عناصر محصّلة متّجه المجال الكهربائي .



(شكل 68)

مثال (2) (تابع)

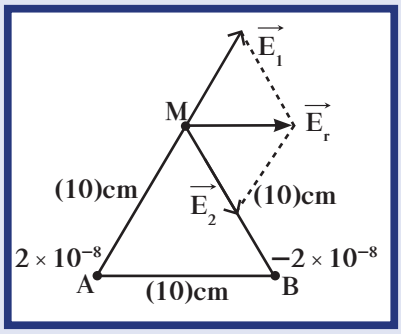
2. أُحسب غير المعلوم.

(أ) باستخدام العلاقة الرياضية التالية:

$$E = \frac{K\,q}{d^2}$$

وبالتعويض عن المقادير المعلومة نحصل على: $E_1 = E_2$

$$E_1 = E_2 = \frac{9 \times 10^9 \times 2 \times 10^{-8}}{0.1^2} = (18 \times 10^3)N/C$$



(شكل 69)

أمّا المحصّلة فتساوي:

$$\vec{E}_r = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

وباستخدام الرسم الاتّجاهي (شكل 69) نجد أنّ محصّلة شدّة المجال الكهربائي هي:

$$E_r = (18 \times 10^3)N/C$$

كما يمكن حساب المحصلة باستخدام قانون المحصّلة كما يلي:

$$\vec{E}_r = \sqrt{E_1^{\,2} + E_2^{\,2} + 2E_1E_2\cos\theta}$$

$$= \sqrt{(18 \times 10^3)^2 + (18 \times 10^3)^2 - 2(18 \times 10^3)(18 \times 10^3)\cos 120}$$

$$E_r = (18 \times 10^3)N/C$$

إنّ اتّجاه المجال الكهربائي $\vec{E}_1$ بعيد عن مركز الشحنة لأنّ q_A موجبة بينما $\vec{E}_2$ يتّجه نحو مركز الشحنة لأنّ q_B سالبة، أمّا اتّجاه المحصّلة فهو اتّجاه $\vec{E}$.

(ب) إنّ محصّلة المجال الكهربائي على النقطة M تتميّز بالعناصر التالية:

مقدار: $E = (18 \times 10^3)N/C$

اتّجاه: المحصّلة تصنع زاوية 60^o مع المحور الأفقي.

3. قيّم: هل النتيجة مقبولة؟

يمكن التحقّق من مقدار شدّة محصّلة المجال الكهربائي واتّجاهه بتمثيلهما بيانيًّا باستخدام مقياس رسم مناسب.

5. المجال الكهربائي المنتظم Uniform Electric Field

المجال الكهربائي المنتظم Uniform Electric Field هو المجال الذي يكون ثابت الشدّة وثابت الاتّجاه في جميع نقاطه.

سبق أن لاحظنا هذا النوع من المجال بين لوحين معدنيين متوازيين متقابلين مشحونين بشحنتين متساويتين في المقدار ومختلفتين من حيث النوع.

ويمكن من خلال التجربة أن نختبر المجال الكهربائي المنتظم إذا وصلنا اللوحين المعدنيين المتوازيين اللذين يبعدان عن بعضهما البعض مسافة (d)

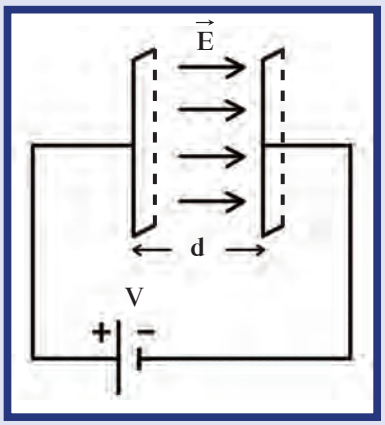
على فرق جهد كهربائي (V) كما في الشكل (70)، حيث يولّد بين اللوحين مجال كهربائي منتظم يتميّز بـ:

- خطوط مستقيمة ومتوازية وتفصل بينها مسافات متساوية.
- اتّجاه من اللوح المشحون بشحنة موجبة إلى اللوح المشحون بشحنة سالبة.
- تُحسب شدّة المجال الكهربائي باستخدام المعادلة التالية:

$$E = \frac{V}{d}$$

وتُقاس بـ V/m.

ملاحظة: إنّ اللوحين المعدنيين المتوازيين المتقابلين الذي يفصل بينهما فراغ أو مادّة عازلة تُسمّى المكثّف وهو محور درسنا القادم.



(شكل 70)
مجال كهربائي $\vec{E}$ منتظم بين اللوحين المتوازيين المتّصلين على فرق جهد V.

مثال (3)

لوحان معدنيان يبعدان عن بعضهما البعض مسافة (5)cm يتّصلان بمنبع كهربائي يساوي فرق الجهد بين طرفيه $V = (10)V$.

(أ) أُحسب مقدار شدّة المجال الكهربائي بين اللوحين.

(ب) حدِّد عناصر متّجه المجال الكهربائي.

طريقة التفكير في الحلّ

1. حلِّل: أذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: المسافة: $d = (5)cm$

الجهد الكهربائي: $V = (10)V$

غير المعلوم: **(أ)** شدّة المجال الكهربائي بين اللوحين.

(ب) عناصر متّجه المجال الكهربائي.

2. أُحسب غير المعلوم.

(أ) باستخدام العلاقة الرياضية التالية:

$$E = \frac{V}{d}$$

وبالتعويض عن المقادير المعلومة نحصل على:

$$E = \frac{10}{5 \times 10^{-2}} = (200)V/m$$

(ب) عناصر المجال الكهربائي بين اللوحين متعامدة عليهما، متّجهة من اللوح الموجب إلى اللوح السالب ومقدارها $(200)V/m$.

3. قيّم: هل النتيجة مقبولة؟

إنّ مقدار شدّة محصّلة المجال يتناسب مع المقادير المعطاة.

مراجعة الدرس 1-1

أوّلًا – عرّف المجال الكهربائي .

ثانيًا – ما هي شدّة المجال الكهربائي؟

ثالثًا – متى يكون المجال الكهربائي منتظمًا؟

رابعًا – (أ) ما هي خطوط المجال الكهربائي؟

(ب) ما العلاقة بين اتّجاه خطوط المجال واتّجاه القوّة المؤثّرة على شحنة موجبة موضوعة داخل هذا المجال عند نقطة معيّنة؟

خامسًا – شحنتان كهربائيتان موضوعتان عند النقطتين A وB، حيث $AB = (10)cm$ ، ومقدار الشحنتين $q_A = (3 \times 10^{-8})C$ و $q_B = (-2 \times 10^{-8})C$ ويبعدان عن النقطة M على التوالي $d_1 = (6)cm$ و $d_2 = (8)cm$ كما في الشكل (71) .

(أ) أُحسب مقدار شدّة المجال الكهربائي الناتج عن الشحنتين عند النقطة M .

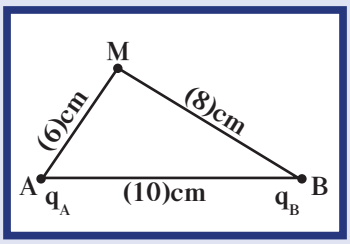
(ب) حدِّد عناصر متّجه محصّلة المجال الكهربائي .

سادسًا – لوحان معدنيان يبعدان مسافة $(10)cm$ عن بعضهما البعض يتّصلان بمنبع كهربائي يساوي فرق الجهد بين طرفيه (V) .

(أ) أُحسب مقدار فرق الجهد الكهربائي بين اللوحين إذا كانت شدّة المجال الكهربائي بين اللوحين تساوي $(400)V/m$.

(ب) حدِّد عناصر متّجه المجال الكهربائي .

سابعًا – أُحسب فرق الجهد الكهربائي بين لوحين متوازيين مشحونين إذا كانت المسافة بين اللوحين $(20)cm$ والقوّة الكهربائية المؤثّرة على شحنة مقدارها $q = (3.2 \times 10^{-19})C$ عند انتقالها بين اللوحين تساوي $(32 \times 10^{-16})N$.



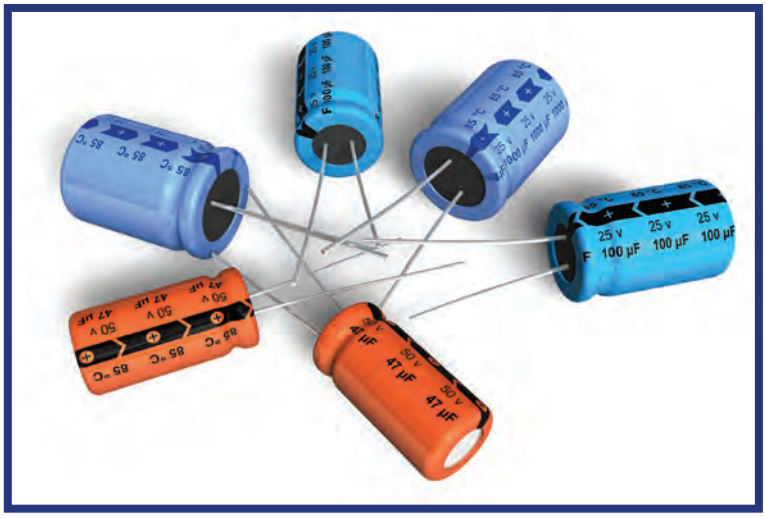
(شكل 71)

الدرس 1-2

المكثِّفات
Capacitors

الأهداف العامة

- يعرّف المكثِّف المستوي.
- ينفّذ نشاطًا عمليًّا للمقارنة بين شحن المكثّف وتفريغه.
- يحسب الشحنة على مكثِّف متّصل بمصدر جهد كهربائي.
- يحسب الطاقة الكهربائية المختزَنة في مكثِّف.
- يحسب السعة المكافئة لعدّة مكثِّفات متّصلة معًا على التوالي والتوازي.



(شكل 72)
مكثِّفات تُستخدم في حياتنا اليومية.

عندما تقوم بضبط الراديو لالتقاط إرسال محطّة محدَّدة، أو عندما تُعِدّ التلفاز لمشاهدة محطّتك المفضّلة، تكون قد استعملت المكثِّف.
المكثِّفات هي التي تجعل الفلاش يتوهّج بشدّة لإظهار الصور بشكل أوضح وبخاصّة أثناء التصوير في الليل.
إنّ أوّل مكثِّف اخترعه العالم الهولندي لايد في القرن السابع عشر، وسُمّي باسمه زجاجة لايد. أمّا اليوم فهو يُستخدَم في أجهزة الهواتف، وأجهزة الكومبيوتر، وغيرها من الأجهزة الإلكترونية.
فما هو المكثِّف؟ هل تختلف أنواعه؟ ما العوامل المؤثِّرة على سعته؟ كيف تشحن المكثِّف وكيف تفرغه؟ سوف نجيب عن هذه الأسئلة في هذا الدرس.

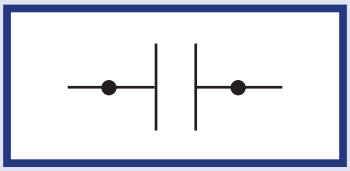
1. تعريف المكثّف المستوي

Definition of the Planar Capacitor

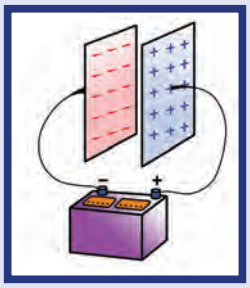
المكثّف بأبسط أنواعه يتألّف من لوحين مستويين ومتوازيين يفصل بينهما فراغ، وغالبًا ما يُملأ هذا الفراغ بمادّة عازلة.

يُمثَّل المكثّف بخطّين متوازيين متساويين في الطول كما في الشكل (73).

عند وصل لوحي المكثّف إلى مصدر فرق جهده V (شكل 74)، يختزن هذا المكثّف شحنات كهربائية ليصبح اللوح المتّصل بالقطب الموجب للبطّارية موجب الشحنة واللوح المقابل له سالب الشحنة، علمًا أنّ مقدار الشحنتين متساوي.



(شكل 73)
يُرمَز للمكثّف بخطّين متوازيين متساويين في الطول.

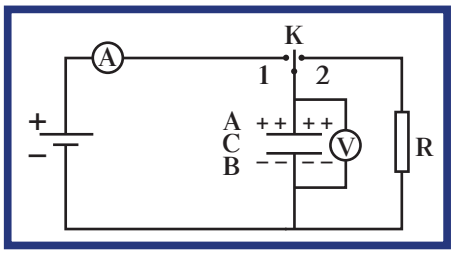


(شكل 74)
يتكوّن المكثّف من لوحين معدنيين متوازيين يفصل بينهما مسافة صغيرة.
يُشحَن اللوحان بشحنتين متساويتين ومختلفتين عند توصيلهما بقطبي بطّارية.

2. شحن المكثّف وتفريغه

Charging and Discharging the Capacitor

لدراسة عمليتي شحن المكثّف وتفريغه، نوصل الدائرة الكهربائية الموضّحة في الشكل (75).



(شكل 75)

1.2 شحن المكثّف Charging the Capacitor

عند وصل المفتاح ذو الاتّجاهين (K) إلى النقطة 1، يشير جهاز الأميتر لفترة قصيرة إلى مرور تيّار لحظي، ويقيس الفولتمتر فرق الجهد بين طرفي المكثّف فيبدأ من صفر ويزيد ليتساوى مع فرق جهد البطّارية في اللحظة نفسها التي ينعدم فيها مرور التيّار الكهربائي مشيرًا إلى انتهاء عملية الشحن.

عند انتهاء شحن المكثّف، يكتسب لوح المكثّف B المتّصل بالقطب السالب للبطّارية شحنة سالبة بينما يكتسب سطح المكثّف A المتّصل بالقطب الموجب للبطّارية شحنة موجبة، حيث إنّ الشحنتين الموجودتين على لوحي المكثّف متساويتان في القيمة المطلقة.

2.2 تفريغ المكثّف Discharging the Capacitor

عند وصل المفتاح ذو الاتّجاهين (K) إلى النقطة 2، ينطلق التيّار الكهربائي (الإلكترونات الحرّة) لفترة قصيرة من اللوح السالب إلى اللوح الموجب عبر المقاومة R لتنعدم الشحنة على المكثّف.

3. السعة الكهربائية للمكثّف المستوي والعوامل المؤثّرة فيها

Electric Capacity of a Planar Capacitor and the Factors Affecting its Capacity

تُظهر التجارب أنّ كمّية الشحنة q التي تظهر على أحد لوحي المكثّف تتناسب طرديًّا مع مقدار فرق الجهد المبذول بين سطحي المكثّف، أي أنّ:

$$\frac{q}{V} = \text{constant}$$

وأنّ هذا الثابت يمثّل السعة الكهربائية للمكثّف ويُرمَز له بالحرف اللاتيني C.
تُحسَب السعة الكهربائية للمكثّف بالمعادلة التالية:

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

وتقاس بحسب النظام الدولي للوحدات بوحدة الفاراد Farad (F) نسبة إلى الفيزيائي الإنكليزي مايكل فراداي Michael Faraday (1791–1867) الذي شارك في تطوُّر مفهوم السعة الكهربائية.

تعتمد السعة الكهربائية C للمكثّف على الأبعاد الهندسية للمكثّف، وعلى الوسط العازل الذي يملأ الفراغ بين اللوحين، ولا تعتمد على الشحنة أو الجهد المبذول. فتلخّص نتيجة التجارب العوامل التي تتوقّف عليها السعة الكهربائية للمكثّف بما يلي:

1. **المساحة اللوحية المشترَكة A:** عند ثبات المسافة الفاصلة بين اللوحين ونوع المادّة العازلة التي تفصل بينهما، نجد أنّ سعة المكثّف C تتناسب طرديًّا مع المساحة المشترَكة للوحين.
2. **المسافة بين اللوحين:** عند ثبات نوع المادّة العازلة بين اللوحين، وثبات المساحة المشترَكة للوحي المكثّف نجد بالتجربة أنّ سعة المكثّف الكهربائية تتناسب عكسيًّا مع المسافة d بين اللوحين.
3. **نوع المادّة العازلة بين اللوحين:** عند ثبات المساحة المشتركة والبعد بين اللوحين نجد أنّ السعة الكهربائية C للمكثّف تتغيّر بتغيّر نوع المادّة العازلة التي يمكن استخدامها بين اللوحين حيث إنّ لكلّ مادّة عازلة ثابت عزل كهربائي نسبي ε_r يحدّد خصائصها.

ففي حال عدم وضع أيّ مادّة عازلة وإبقاء الحيّز بين اللوحين فارغًا، نجد تجريبيًّا أنّ السعة الكهربائية C للمكثّف تتناسب طرديًّا مع ثابت العزل الكهربائي في الفراغ ε_0 حيث إنّ ε_0 يساوي: $\varepsilon_0 = (8.85 \times 10^{-12})\text{F/m}$

أمّا في حال استخدام مادّة عازلة لملء الفراغ بين اللوحين ذات ثابت عزل كهربائي نسبي ε_r نجد تجريبيًّا أنّ السعة الكهربائية للمكثّف C تتناسب طرديًّا مع ثابت العزل الكهربائي ε والذي يساوي حاصل ضرب ثابت العزل الكهربائي في الفراغ وثابت العزل الكهربائي النسبي للمادّة العازلة

فقرة إثرائية

ارتباط الفيزياء بالتقنية

طابعات نفث الحبر

تنفث (الرأس الطابعة) لأجهزة طابعات نفث الحبر خيطًا رفيعًا منتظمًا مكوَّنًا من آلاف القطيرات الضئيلة جدًّا كلّ ثانية، وذلك أثناء حركتها ذهابًا وإيابًا فوق ورق الطبع. يعبر هذا الخيط بين لوحين معدنيين يتحكّم بشحنتهما جهاز كمبيوتر، وبذلك يتمّ شحن قطيرات حبر معيّنة دون غيرها. وتعبر هذه الأخيرة لوحي المكثّف من دون انحراف وتسقط على الورق، أمّا المشحونة فتنحرف ولا تصل إلى الورق. وبذلك تتكوّن الصورة (الكلمات) على الورق من القطيرات غير المشحونة. أمّا المساحات البيضاء فهي تمثّل قطيرات مشحونة بالكامل لم تستطع الوصول إلى الورق.

المستخدمة $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$، أي أنّ $C \propto \varepsilon$ أو $C \propto (\varepsilon_0 \varepsilon_r)$. كما لا بدّ من الإشارة إلى أنّ السعة الكهربائية لمكثّف تُرِك الحيّز بين لوحيه فارغًا أو ملئ بالهواء تقريبًا متساوية حيث إنّ ثابت عزل الكهربائي النسبي للهواء يساوي تقريبًا $\varepsilon_r = 1$. ونستنتج ممّا سبق من عوامل مؤثّرة في السعة الكهربائية للمكثّف أنّ السعة الكهربائية للمكثّف تُحسَب بالمعادلة التالية:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \, \varepsilon_r \, A}{d}$$

ونضيف أنّه للحصول على مكثّف له سعة كهربائية عالية يتطلّب زيادة المساحة المشترَكة للوحي المكثّف، وتقليل المسافة بين اللوحين، وملء الفراغ الموجود بينهما بمادّة يكون ثابت عازليتها كبير .

المادّة العازلة	ثابت العزل الكهربائي النسبي
فراغ	1
هواء جافّ	1.00059
ورق برافين	4.5
بيريكس	4.7
ميكا	5.4
بورسلان	6.5

(جدول 8)
ثابت العزل الكهربائي النسبي لبعض الموادّ العازلة.

مثال (1)

مكثّف كهربائي مصنوع من لوحين معدنيين مساحتهما المشترَكة $(20)cm^2$ والمسافة الفاصلة بينهما تساوي $(1)mm$. أُحسب:

(أ) السعة الكهربائية لهذا المكثّف إذا كان الهواء هو الوسط العازل بين اللوحين، وأنّ ثابت العزل الكهربائي يساوي:

$\varepsilon_0 = (8.85 \times 10^{-12})F/m$

(ب) السعة الكهربائية لهذا المكثّف إذا مُلئ الحيّز بين اللوحين بالميكا الذي يساوي ثابت عزله النسبي $\varepsilon_r = 5.4$.

طريقة التفكير في الحلّ

1. حلِّل: أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: المساحة المشترَكة: $A = (20)cm^2$

المسافة الفاصلة: $d = (1)mm$

غير المعلوم: **(أ)** السعة الكهربائية للمكثّف الهوائي: $C = ?$

(ب) السعة الكهربائية للمكثّف عند وضع الميكا: $C' = ?$

2. أُحسب غير المعلوم.

(أ) باستخدام المعادلة الرياضية التالية:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \, \varepsilon_r \, A}{d}$$

باستخدام ثابت العزل الكهربائي النسبي للهواء والمساوي $\varepsilon_r = 1$، وبالتعويض عن المقادير المعلومة نحصل على:

$$C = 8.85 \times 10^{-12} \times 1 \times \frac{20 \times 10^{-4}}{1 \times 10^{-3}} = (17.7 \times 10^{-12})F$$

(ب) باستخدام ثابت العزل الكهربائي النسبي للميكا والمساوي $\varepsilon_r = 5.4$، وبالتعويض في المعادلة التالية $C' = \varepsilon_r \, C$ نحصل على:

$$C' = 5.4 \times 17.7 \times 10^{-12} = (95.58 \times 10^{-12})F$$

مثال (1) (تابع)

3. **قيّم:** هل النتيجة مقبولة؟
إنّ السعة الكهربائية للمكثّف مقبولة حيث إنّ مقدارها صغير كما هو متوقّع.

4. جهد التعطيل (التوقُّف) Breakdown Potential

تعلّمنا في الدرس السابق أنّ تطبيق فرق جهد على لوحين متوازيين يولّد مجال كهربائي منتظم، وأنّ شدّة هذا المجال تساوي $E = \frac{V}{d}$، حيث إنّ (d) هي المسافة بين اللوحين المتوازيين.

تتميّز كلّ مادّة عازلة تملأ الحيّز بين لوحي المكثّف بقيمة عظمى لشدّة المجال الكهربائي، وعندما تتخطّى شدّة المجال حدّ يُسمّى حدّ التحمُّل يظهر بين لوحي المكثّف شرارة تُظهر تفريغ المكثّف وتلفه.

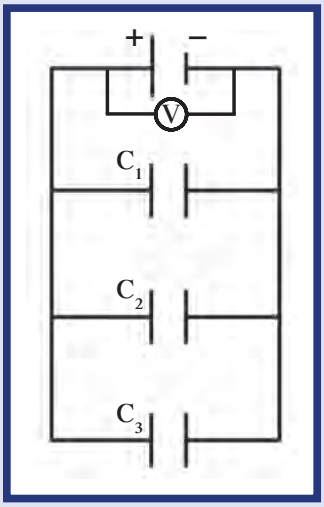
إنّ فرق الجهد المطبَّق على لوحي المكثّف والقادر على توليد مجال كهربائي يتخطّى القيمة العظمى التي تتحمّلها المادّة العازلة والذي يؤدّي إلى تلف المكثّف يُسمّى جهد التعطيل Breakdown Potential. لذلك تكتب مصانع المكثّفات على كلّ مكثّف مقدار القيمة العظمى التي لا يجب تخطّيها لتجنُّب تلف المكثّف.

5. توصيل المكثّفات Grouping Capacitors

كما سبق أن درسنا طرق حساب المقاومة المكافئة لمجموعة من المقاومات المتّصلة معًا على التوالي أو على التوازي، والتي تسمح لنا باستبدال مجموعة المقاومات الموجودة في الدائرة إمّا تقليلًا لعددها وإمّا من أجل تأمين مقاومة مكافئة، مقدارها أكبر أو أصغر من المقاومات الأخرى، لهدف ما تقتضيه ظروف تجربة أو تصميم جهاز معيّن، فسنقوم بهذا الجزء من الدرس بتعرُّف طريقة حساب السعة المكافئة لمجموعة من المكثّفات المتّصلة معًا على التوالي أو التوازي أو على شكل خليط من الاثنين لهدف تقتضيه حالة دائرة ما.

1.5 توصيل المكثّفات على التوازي

Grouping Capacitors in Parallel



(شكل 76)

لنأخذ ثلاثة مكثّفات سعاتها C_1، C_2 و C_3 متّصلة معًا على التوازي بمصدر فرق جهده V كما في الشكل (76).

إنّ تساوي فرق الجهد بين لوحي كلّ مكثّف يعني اختلاف كمّية الشحنة q التي يختزنها كلّ مكثّف. وبما أنّ شحنة المكثّف المكافئة تساوي مجموع شحنات المكثّفات الثلاثة، نكتب:

$$q_{eq} = q_1 + q_2 + q_3$$

وبما أنّ $q = C.V$ ومقدار فرق الجهد متساوٍ بين لوحي كلّ مكثّف، نكتب:

$$C_{eq}.V = C_1.V + C_2.V + C_3.V$$

وبالتالي نحصل على:

$$\boxed{C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3}$$

أي أنّ السعة المكافئة لمجموعة من المكثّفات المتّصلة معًا على التوازي تساوي مجموع سعة كلّ مكثّف.

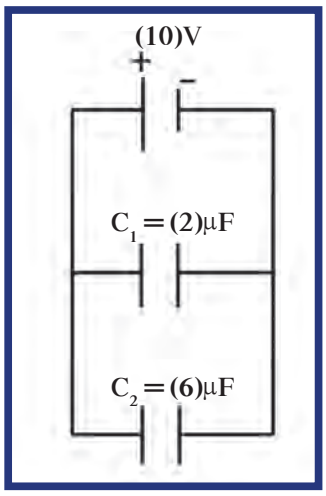
مثال (2)

وُصِل مكثّفان سعتهما $(2)\mu F$ و $(6)\mu F$ على التوازي بمصدر يساوي فرق جهده $V = (10)V$ (شكل 77).

(أ) أُحسب السعة المكافئة للمكثّفين.

(ب) أُحسب شحنة كلّ من المكثّفين.

طريقة التفكير في الحلّ



(شكل 77)

1. حلِّل: أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: سعة المكثّف الأوّل: $C_1 = (2)\mu F$

سعة المكثّف الثاني: $C_2 = (6)\mu F$

الجهد: $V = (10)V$

غير المعلوم: **(أ)** السعة المكافئة للمكثّفين: $C_{eq} = ?$

(ب) شحنة كلّ من المكثّفين: $q_1 = ?$ ، $q_2 = ?$

2. أُحسب غير المعلوم.

(أ) باستخدام العلاقة الرياضية التالية نحصل على:

$$C_{eq} = C_1 + C_2 = 2 + 6 = (8)\mu F$$

(ب) $q_1 = C_1 V = 2 \times 10^{-6} \times 10 = (20 \times 10^{-6})C$

$q_2 = C_2 V = 6 \times 10^{-6} \times 10 = (60 \times 10^{-6})C$

3. قيّم: هل النتيجة مقبولة؟

النتيجة مقبولة ويمكن التحقّق منها عمليًّا بالتجربة، كما أنّها تتناسب مع المقادير المعطاة.

2.5 توصيل المكثّفات على التوالي

Branching Capacitors in Series

لنأخذ ثلاثة مكثّفات C_1، C_2 و C_3 متّصلة معًا على التوالي بمصدر يساوي فرق جهده V كما في الشكل (78).

وبتطبيق قانون جمع الجهد في دائرة التوالي نكتب:

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

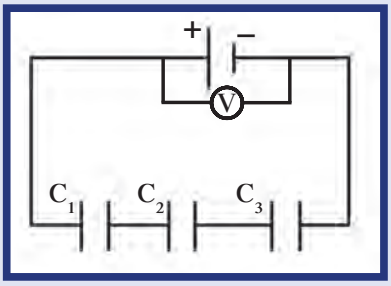
وبما أنّ الشحنة q التي يختزنها كلّ مكثّف متساوية و $V = \frac{q}{C}$، نكتب:

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

وبالتالي نحصل على:

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

أي أنّ مقلوب السعة المكافئة لمجموعة من المكثّفات المتّصلة معًا على التوالي يساوي مجموع مقلوب سعة كلّ مكثّف.



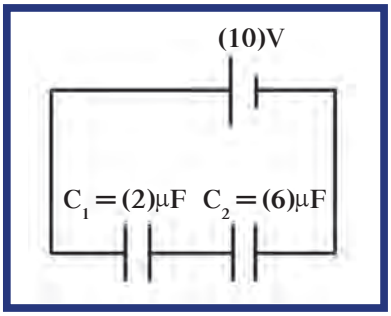
(شكل 78)

مثال (3)

وُصِل مكثّفان سعتهما (2)μF و (6)μF على التوالي بمصدر يساوي فرق جهده V = (10)V (شكل 79).

(أ) أُحسب السعة المكافئة للمكثّفين.

(ب) أُحسب شحنة كلّ من المكثّفين.



(شكل 79)

طريقة التفكير في الحلّ

1. حلّل: أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: سعة المكثّف الأوّل:

$C_1 = (2)\mu F$

سعة المكثّف الثاني:

$C_2 = (6)\mu F$

الجهد: $V = (10)V$

غير المعلوم: **(أ)** السعة المكافئة للمكثّفين: $C_{eq} = ?$

(ب) شحنة كلّ من المكثّفين: $q_1 = ?$ ، $q_2 = ?$

مثال (3) (تابع)

2. أُحسب غير المعلوم.

(أ) باستخدام العلاقة الرياضية التالية نحصل على:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} = 0.66$$

$$C_{eq} = (1.5)\mu F$$

(ب) $q_1 = q_2 = C_{eq}\, V = 1.5 \times 10 = (15)\mu C$

3. قيّم: هل النتيجة مقبولة؟

النتيجة مقبولة فمقدار سعة المكثّف المكافئ أصغر من سعة أيّ من المكثّفات المعطاة ويمكن التحقّق منها عمليًّا بالتجربة، كما أنّها تتناسب مع المقادير المعطاة.

6. الطاقة الكهربائية المختزَنة في مكثّف

Electrical Energy Stored in a Capacitor

كما لاحظنا فإنّ زيادة الجهد الكهربائي يزيد من مقدار الشحنة المختزَنة على المكثّف، وبالتالي يزيد من الطاقة الكهربائية المختزَنة في المكثّف. وتُظهر التجارب أنّ مقدار الطاقة الكهربائية المختزَنة في المكثّف يتناسب طرديًّا مع مربّع فرق الجهد المطبَّق على طرفي المكثّف.

وتشير التجارب أيضًا إلى أنّ زيادة سعة المكثّف تسمح بتخزين طاقة كهربائية أكبر على المكثّف، لأنّ الطاقة الكهربائية المختزَنة تتناسب طرديًّا مع السعة.

وبناءً عليه، نستنتج أنّ مقدار الطاقة الكهربائية المختزَنة في مكثّف سعته C ومتّصل بمصدر فرق جهده (V) يُحسَب بالعلاقة الرياضية:

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

ويمكن كتابة معادلة حساب الطاقة الكهربائية المختزَنة في مكثّف بصيغ أخرى:

$$U = \frac{1}{2} (C\, V)V$$

وبما أنّ $q = CV$ نحصل على:

$$U = \frac{1}{2} qV$$

كذلك يمكن كتابة المعادلة السابقة باستبدال $V = \frac{q}{C}$ كما يلي:

$$U = \frac{1}{2} q \left(\frac{q}{C}\right)$$

لنحصل على معادلة حساب الطاقة الكهربائية المختزَنة في المكثّف التالية:

$$U = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C}$$

فقرة إثرائية

أنواع المكثّفات

تُقسَم المكثّفات إلى نوعين: مكثّفات ثابتة السعة ومكثّفات متغيّرة السعة، وهي تُستخدَم في كثير من الدوائر الكهربائية والإلكترونية.

(أ) المكثّفات ثابتة السعة

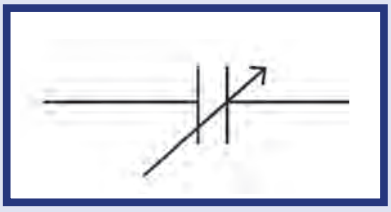
المكثّفات ثابتة السعة (شكل 80) هي المكثّفات ثابتة التركيب، أي أنّ مساحة السطح المشترَك، والبُعد بين لوحي المكثّف، ونوع الوسط العازل بين اللوحين ثابتة لا تتغيّر. وتختلف أسماء هذه المكثّفات باختلاف نوع المادّة العازلة التي تملأ الحيّز بين اللوحين، فإن كانت المادّة العازلة ميكا يُسمّى مكثّف ميكا، وإن كانت من السيراميك فنسمّيه مكثّف سيراميك، وإن كانت من الورق فيُسمّى مكثّف ورقي، أمّا إذا وُضع بين لوحي المكثّف محلول كيميائي فيُسمّى مكثّف كيميائي.

(ب) المكثّفات متغيّرة السعة

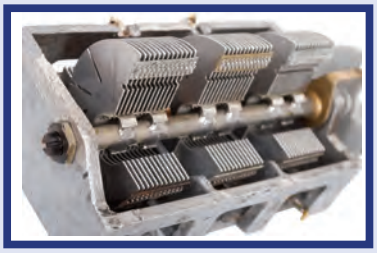
المكثّفات متغيّرة السعة هي المكثّفات التي يمكن تغيير سعاتها، بزيادة أو إنقاص المساحة المشترَكة بين السطحين، أو بتغيير المسافة الفاصلة بين لوحي المكثّف، ويُرمَز لها في الدائرة الإلكترونية أو الكهربائية كما في الشكل (81).

فالمكثّف الموضّح في الشكل (82) هو من المكثّفات المتغيّرة والتي تتركّب من مجموعتين من الصفائح نصف الدائرية، إحداهما ثابتة والأخرى يمكنها أن تدور حول محور لتتداخل في ما بين الصفائح الثابتة مغيّرة بذلك المساحة المشتركة والمسافات وبالتالي سعة المكثّف. يُستخدَم هذا النوع من المكثّفات في أجهزة الاتّصالات لتغيير التردّد وفي أجهزة التلفاز والراديو أثناء موالفة المحطّات.

(شكل 80)
مكثّفات ثابتة السعة



(شكل 81)
مكثّف متغيّر السعة



(شكل 82)
مكثّف متغيّر السعة

مراجعة الدرس 1-2

أوّلًا – ما هي العوامل التي تتوقّف عليها السعة الكهربائية للمكثّف المستوي؟

ثانيًا – مكثّف ميكا مستوي سعته الكهربائية $C = (10)\mu F$. كيف تتغيّر سعته الكهربائية إذا استبدلت الميكا بالهواء؟ (علمًا أنّ ثابت العزل الكهربائي النسبي للميكا يساوي 5.4).

ثالثًا – مكثّف هوائي مستوي سعته $(100)\mu F$، يحمل شحنة مقدارها $(10^{-9})C$.

(أ) أُحسب مقدار فرق الجهد بين لوحي المكثّف.

(ب) باعتبار أنّ لوحي المكثّف قرصين نصف قطر كلّ منهما $(10)cm$، أُحسب مقدار المجال الكهربائي بين لوحي المكثّف.

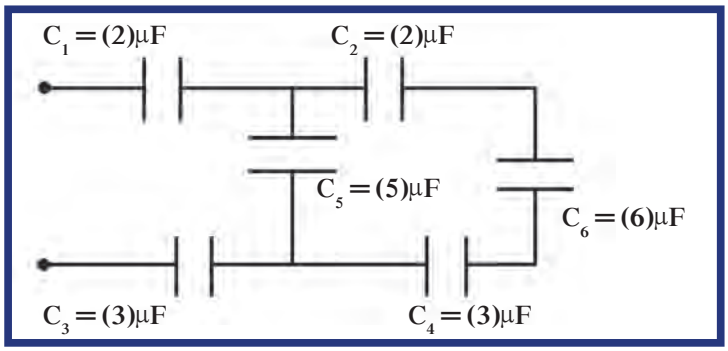
(جـ) الطاقة الكهربائية المختزَنة بين لوحي المكثّف.

رابعًا – الطاقة الكهربائية المختزَنة على مكثّف سعته $(4)\mu F$ تساوي $(2)J$. أُحسب:

(أ) شحنة المكثّف.

(ب) مقدار فرق الجهد بين لوحي المكثّف.

خامسًا – أُحسب السعة المكافئة لمجموعة المكثّفات في الشكل (83):



(شكل 83)

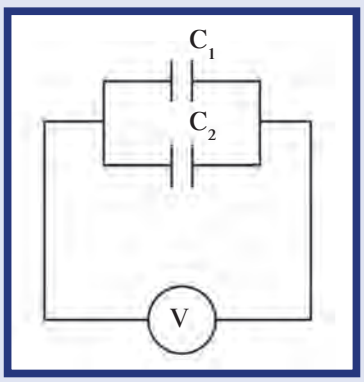
سادسًا – وُصل المكثّفان $C_1 = (2)\mu F$ و $C_2 = (4)\mu F$ على التوازي مع مصدر جهد مستمرّ (V)بحيث أصبحت الشحنة الكلّية للمكثّفين تساوي $(400)\mu C$ (شكل 84). أُحسب:

(أ) السعة المكافئة للمكثّفين.

(ب) فرق الجهد V.

(جـ) شحنة كلّ مكثّف.

(د) الطاقة الكهربائية المختزَنة بين لوحي كلّ مكثّف.



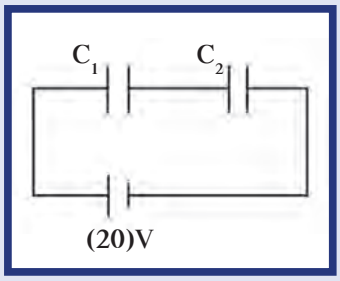
(شكل 84)

مراجعة الدرس 1-2 (تابع)

سابعًا – مكثّف سعته $(2)\mu F$ متّصل على التوالي بمكثّف آخر سعته $(6)\mu F$، وهما متّصلان على مصدر جهد يساوي $(20)V$ (شكل 85). أُحسب:

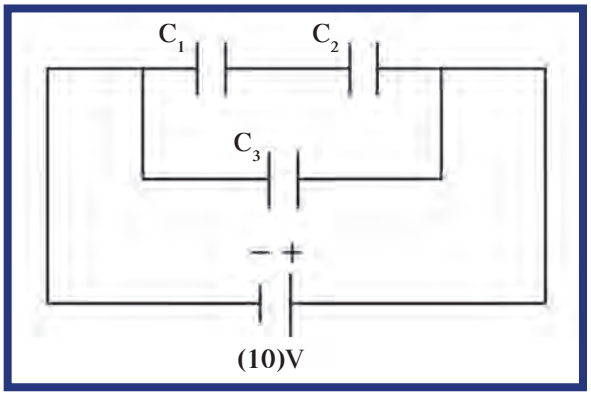
(أ) السعة المكافئة للمكثّفين.

(ب) الشحنة وفرق الجهد لكلّ مكثّف.



(شكل 85)

ثامنًا – وُصِلت ثلاثة مكثّفات $C_1 = (3)\mu F$، $C_2 = (6)\mu F$، $C_3 = (2)\mu F$ بمصدر جهد مستمرّ $V = (10)V$ كما هو موضّح في الشكل (86). أُحسب:



(شكل 86)

(أ) مقدار السعة المكافئة للمكثّفات الثلاثة.

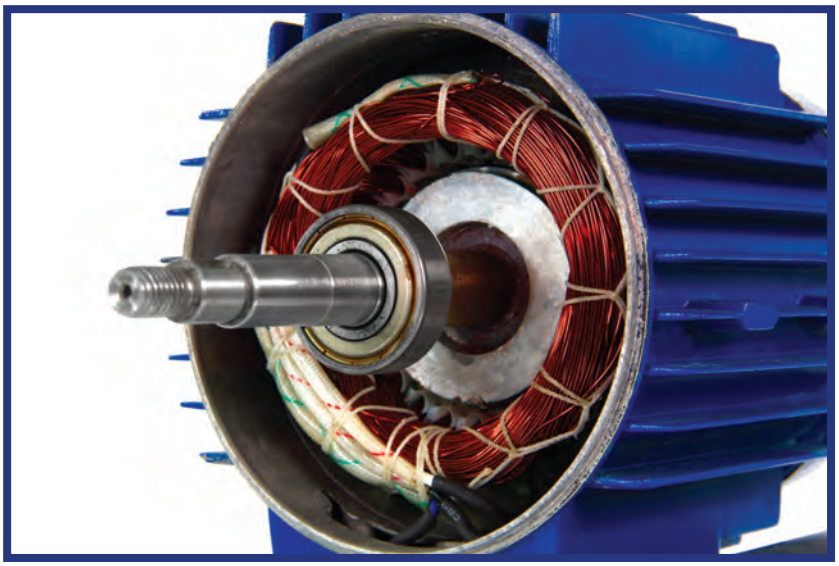
(ب) الشحنة الكهربائية وفرق الجهد لكلّ مكثّف.

(جـ) الطاقة الكهربائية المختزَنة بين لوحي المكثّف C_2 بعد شحنه.

تاسعًا – مكثّف هوائي مستوي سعته $C_1 = (6)\mu F$ وشحنته $(600)\mu C$ متّصل بمكثّف هوائي مستوي آخر سعته $(4)\mu F$ غير مشحون. أُحسب شحنة كلّ مكثّف بعد التوصيل بفترة كافية.

الفصل الثاني

المغناطيسية
Magnetism



يعود أصل مصطلح «مغناطيسية» إلى نوع من الصخور تُسمّى الحجر المغناطيسي Lodestones الذي تمّ العثور عليه في منطقة ماغنسيا «Magnesia» في اليونان منذ أكثر من 2000 عام. وفي القرن الثاني عشر ميلادي استخدم الصينيون هذه الصخور في توجيه السفن، وفي القرن الثامن عشر قام الفيزيائي الفرنسي تشارلز كولوم Charles Coulomb بدراسة القوى الموجودة بين صخور الحجر المغناطيسي «Lodestones». نحن نعلم الآن أنّ هذه الصخور تحتوي على خام الحديد الذي أطلق عليه اسم ماجنتيت «Magnetite» (Fe_3O_4). وفي أيّامنا هذه لم يعد يُستخدَم الحجر المغناطيسي واستُبدِل بمغناطيسات صناعية لها الخواصّ نفسها. وتطوّر استخدام المغناطيس في كثير من الأمور الحياتية وبخاصّة بعد أن لوحظ تأثير المغناطيس على الأسلاك الحاملة للتيّار الكهربائي. فدخل استخدام المغناطيس في صناعة المحرّكات وأدّى إلى ظهور التكنولوجيا الحديثة وإلى اختراع أجهزة الراديو والتلفاز وأجهزة القياس وغيرها.

في هذا الفصل سنتناول الظاهرة المغناطيسية، وسنتعرّف خواصّ المغناطيس وأقطابه، وسنحدّد المجال المغناطيسي لبعض أشكال المغناطيس، وسنتناول الأثر المغناطيسي للتيّار الكهربائي والذي يُعتبَر من أبرز اكتشافات القرن العشرين.

دروس الفصل

الدرس الأوّل

- المغناطيس والمجال المغناطيسي

الدرس الثاني

- التيّارات الكهربائية والمجالات المغناطيسية

الدرس 2-1

المغناطيس والمجال المغناطيسي
Magnet and Magnetic Field

الأهداف العامة

- يقارن بين الأقطاب المغناطيسية والشحنات الكهربائية.
- يعرّف المجالات المغناطيسية.
- يحدّد خصائص متّجه المجال المغناطيسي.
- يستخدم برادة الحديد لإظهار خطوط المجال المغناطيسي عند عدد من النقاط بالقرب من مغناطيس.
- يعرّف المجال المغناطيسي المنتظم.
- يجد محصّلة متّجهات لمجالات مغناطيسية عديدة تؤثّر عند نقطة.
- يصف ما يحدث للمجالات المغناطيسية للحديد تحت تأثير مجالات مغناطيسية.
- يعرّف المجال المغناطيسي للأرض.

(شكل 87)
تُستخدَم البوصلة لتحديد الاتّجاه.

من مشاهداتنا اليومية نلاحظ أنّ المغناطيس يجذب المسمار، ومشابك الورق، وغيرها من الموادّ المصنوعة من الحديد. كما أنّه يدخل في كثير من الصناعات، فنجد المغناطيس في البوصلة (شكل 87)، والمحرّكات، والأدوات الكهربائية، ومكبّر الصوت، وغيرها.

ويتميّز المغناطيس بخواصّ فريدة يمكن ملاحظتها. إذا أحضَرت قضيبين مغناطيسيين ثمّ قرّبتهما من بعضهما بعضًا، ستجد أنّهما يتقاربان ومن ثمّ يلتصقان، وإذا قمت بإدارة أحدهما فستجد أنّهما يتنافران. كذلك فبإمكان المغناطيس أن يلتصق بباب ثلّاجة، ولكنه لا يلتصق بوعاء مصنوع من الألومنيوم. للمغناطيس أشكال وأحجام متعدّدة صنعها الإنسان نذكر منها: المغناطيس القضيب، وحدوة الحصان (مغناطيس على شكل U)، والمغناطيس الأسطواني (شكل 88). للمغناطيس أهمّية كبيرة في مصانع الحديد والصلب.

(شكل 88)
أشكال مختلفة من المغناطيسات.

1. الأقطاب المغناطيسية Magnetic Poles

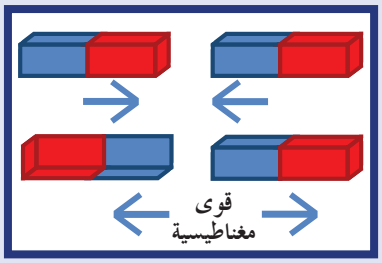
تؤثّر المغناطيسات بقوى على بعضها البعض، فهي تتماثل مع الشحنات الكهربائية، حيث إنّها كالشحنات الكهربائية يمكنها التجاذب أو التنافر من دون ملامسة أيّ طرف من طرفي المغناطيس قد وُضع بالقرب من طرف المغناطيس الآخر (شكل 89). كذلك وبالمماثلة مع الشحنات الكهربائية، إنّ مقدار قوّة التفاعل تعتمد على المسافة الفاصلة بين طرفي المغناطيسين. وكما أنّ الشحنات الكهربائية تنتج قوى كهربائية، فإنّ أطراف المغناطيسات والتي تُسمّى الأقطاب المغناطيسية تنتج قوى مغناطيسية Magnetic Forces.

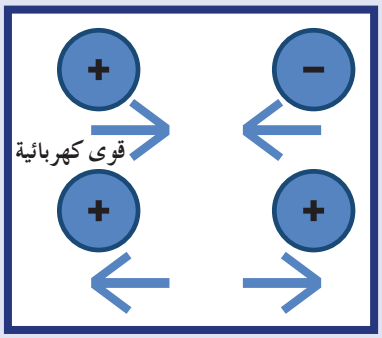
إذا ربطت قضيب مغناطيسي من منتصفه بواسطة خيط وعُلّق تعليقًا حرًّا، ستجد أنّه يؤدّي دور البوصلة، ويُسمّى الطرف المتّجِه شمالًا بالقطب الباحث عن الشمال، والقطب المتّجِه جنوبًا بالقطب الباحث عن الجنوب. لذلك، يُسمّى طرفي المغناطيس القطب الشمالي والقطب الجنوبي، وهما موجودان في أطراف أيّ قضيب مغناطيسي بسيط، وكذلك الأمر بالنسبة إلى المغناطيس الذي على شكل حدوة الحصان لأنّه عبارة عن قضيب مغناطيسي تمّ ثنيه.

إذا اقترب القطب الشمالي للمغناطيس من القطب الشمالي لمغناطيس آخر فسوف يتنافران. وبالمثل، يتنافر القطبان الجنوبيان إذا اقتربا من بعضهما بعضًا. أمّا إذا اقترب قطبان مختلفان من بعضهما بعضًا فسوف يتجاذبان. تتنافر الأقطاب المتشابهة أمّا المختلفة فتتجاذب. على الرغم من تماثل بعض خصائص الأقطاب المغناطيسية والشحنات الكهربائية، إلا أنّ هناك فارقًا ملحوظًا بينهما، حيث يمكن عزل الشحنات الكهربائية، أمّا الأقطاب المغناطيسية فلا يمكن عزلها.

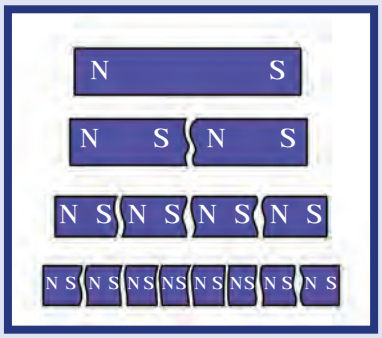
تُعتبَر الإلكترونات ذات الشحنات السالبة والبروتونات ذات الشحنات الموجبة وحدات قائمة بذاتها، فحزمة من الإلكترونات لا تحتاج إلى وجود حزمة من البروتونات، وكذلك الأمر بالنسبة إلى البروتونات. ولكن لا وجود لقطب شمالي مغناطيسي من دون وجود قطب جنوبي مغناطيسي.

إنّ القطبين الشمالي والجنوبي للمغناطيس يمثّلان وجهين لعملة واحدة، إذا قمت بشطر مغناطيس إلى نصفين فإنّ كلّ نصف يُعتبَر مغناطيسًا كاملًا، وإذا قمت مجدّدًا بشطر كلّ نصف إلى نصفين فستحصل على أربعة مغناطيسات كاملة (شكل 90). ومهما استمرّت عملية شطر القطع المغناطيسية إلى نصفين فلا يمكنك فصل قطب مفرد، حتى إذا حصلت على قطعة سمكها ذرّة واحدة، دائمًا سوف يكون لديك قطبان، وهذا يعني أنّ الذرّات نفسها هي عبارة عن مغناطيسات.





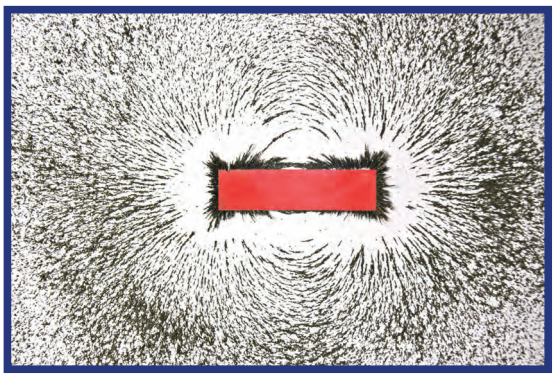
(شكل 89)
بالمماثلة مع الشحنات، الأقطاب المتشابهة تتنافر والمختلفة تتجاذب.



(شكل 90)
إكسر مغناطيسًا إلى نصفين وسوف تحصل على مغناطيسين، ثمّ اكسر المغناطيسين إلى أنصاف وبذلك تحصل على أربعة مغناطيسات، لكلّ منها قطب شمالي وآخر جنوبي.
إستمرّ في كسر المغناطيسات إلى أنصاف تحصل على ضعف عدد المغناطيسات في كلّ مرة. تتواجد الأقطاب المغناطيسية دائمًا في أزواج.

1. المجالات المغناطيسية Magnetic Fields

ضَع قطعة من الورق فوق قضيب مغناطيسي، ثمّ انثر فوقها كمّية من برادة الحديد. ستأخذ هذه الأخيرة شكل خطوط منحنية تحيط بالمغناطيس (شكل 91). **المنطقة المحيطة بالمغناطيس التي تظهر فيها آثار القوّة المغناطيسية تشكّل فيها المجال المغناطيسي Magnetic Field.** تحدّد خطوط المجال المغناطيسي شكل المجال فهي تبدأ بالانتشار عند أحد القطبين ثمّ تأخذ في الانحناء حتى تصل إلى القطب الآخر.

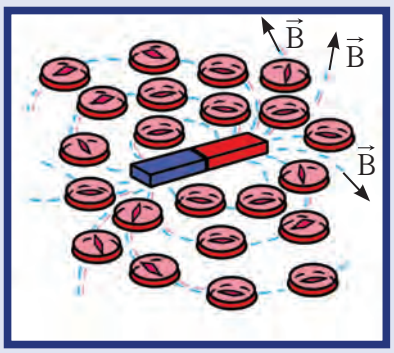


(شكل 91)
ترسم برادة الحديد شكل خطوط المجال المغناطيسي في المنطقة التي تحيط بالمغناطيس.

يتّجه المجال خارج المغناطيس من القطب الشمالي إلى القطب الجنوبي، تكون شدّة المجال كبيرة حيث تكون الخطوط قريبة من بعضها بعضًا. ونلاحظ أنّ المجال يكون أكثر شدّة عند القطبين. إذا وضعنا بوصلة صغيرة في أيّ مكان في المجال سوف نجد أنّ قطبيها يأخذان اتّجاه المجال المغناطيسي (شكل 92).

بالتالي، تُلخَّص خصائص خطوط المجال المغناطيسي بأنّها خطوط تتّجه من خارج المغناطيس، من القطب الشمالي إلى القطب الجنوبي، وأنّها لا تتقاطع.

كما أنّ المماس عند أيّ نقطة على خطوط المجال يحدّد اتّجاه متّجه المجال المغناطيسي (شكل 93).

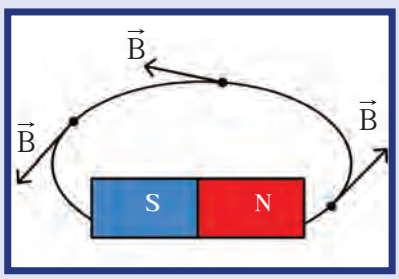


(شكل 92)
تأخذ البوصلات اتّجاه خطوط المجال المغناطيسي.

3. متّجه المجال المغناطيسي Magnetic Field Vector

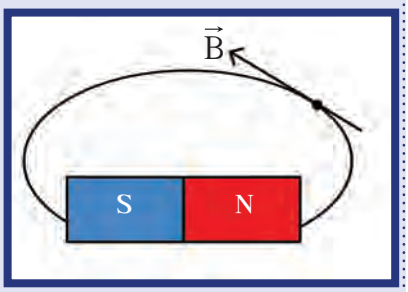
إنّ متّجه المجال المغناطيسي $\vec{B}$ على نقطة M موجودة على إحدى خطوط المجال المغناطيسي (شكل 94)، يتميّز بالخواصّ التالية:

- نقطة تأثير: هي النقطة M المراد تحديد متّجه المجال المغناطيسي عليها.
- حامل: مماسّ خطّ المجال المارّ بالنقطة M.
- اتّجاه: يُحدَّد باتّجاه إبرة بوصلة صغيرة موضوعة بالقرب من النقطة M، من القطب الجنوبي للإبرة إلى القطب الشمالي.



(شكل 93)
يحدد اتّجاه المماس اتّجاه المجال المغناطيسي.

- مقدار شدّة المجال B: ويقاس بواسطة جهاز يُسمّى التسلاميتر (Teslameter) (شكل 95) بوحدة التسلا (Tesla) بحسب النظام الدولي للوَحدات والتي يُرمَز لها بالحرف اللاتيني T.



(شكل 94)
اتّجاه متّجه المجال المغناطيسي لمغناطيس.

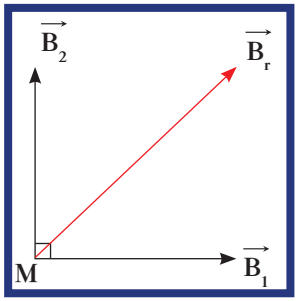
4. محصّلة متّجهات المجال المغناطيسي
Resultant of Magnetic Fields Vectors

بما أنّ شدّة المجال المغناطيسي $\vec{B}$ هي كمّية متّجهة، فإنّ جمع المتّجهات يُستخدَم في إيجاد محصّلة مجموعة من متّجهات المجالات المغناطيسية المؤثِّرة عند نقطة معيّنة في حيّز ما.

وعليه نكتب: $\vec{B}_r = \sum_{i=1}^{n} \vec{B}_i$

مثال (1)

يظهر الشكل (96) أنّ النقطة M تتعرض إلى تأثير متّجهين من مجالين مغناطيسيين $\vec{B}_1$ و $\vec{B}_2$، علمًا أنّ $\vec{B}_1$ و $\vec{B}_2$ متساويان في المقدار ومتعامدان. أُحسب محصّلة المتّجهين $\vec{B}_1$ و $\vec{B}_2$.



(شكل 96)

طريقة التفكير في الحلّ

1. حلّل: أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: $B_1 = B_2$

$\vec{B}_1 \perp \vec{B}_2$

غير المعلوم: محصّلة المتّجهين: $\vec{B}_r = ?$

2. أُحسب غير المعلوم.

$\vec{B}_r = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$

وبما أنّ $\vec{B}_1$ متعامدة على $\vec{B}_2$ وباستخدام قانون فيتاغورث نكتب:

$\vec{B}_r = \sqrt{2}\ \vec{B}_1$

$B_r = \sqrt{B_1^2 + B_2^2} = \sqrt{2B_1^2} = \sqrt{2}\ B_1$

أمّا اتجاهه فيحسب بالعلاقة:

$\tan\theta = \frac{B_2}{B_1} = 1$

$\theta = 45°$

أي أنّ متّجه محصلة المجال المغناطيسي B_r يصنع زاوية 45 درجة مع B_1.

3. قيّم: هل النتيجة مقبولة؟

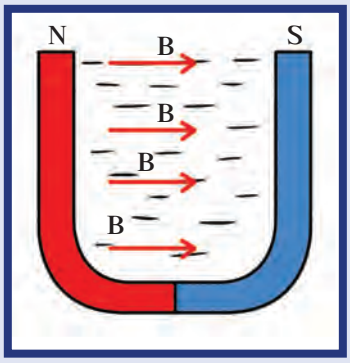
يمكن التحقّق من النتيجة باستخدام الرسم البياني ومقياس رسم مناسب.

(شكل 95)
جهاز التسلاميتر

5. المجال المغناطيسي المنتظم

Uniform Magnetic Field

ضع ورقة شفّافة فوق مغناطيس على شكل U وبرادة حديد بين فرعيه.
أُنظر إلى خطوط المجال بين فرعي المغناطيس (شكل 97). قد تلاحظ أنّ خطوط المجال المغناطيسي عبارة عن خطوط مستقيمة متوازية بين فرعي المغناطيس وإذا قمت بقياس مقدار شدّة المجال المغناطيسي $\vec{B}$ عند نقاط مختلفة بين فرعي المغناطيس لوجدتها متساوية المقدار أيضًا. وعليه، نعرّف المجال المغناطيسي الناشئ بين فرعي المغناطيس، على شكل U، بأنّه مجال مغناطيسي منتظم.
أي يكون المجال المغناطيسي في حيّز ما منتظمًا إذا كانت متّجهات المجال المغناطيسي (متساوية) أي لها المقدار والاتّجاه نفسهما.

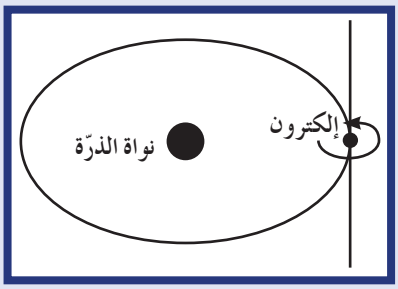


(شكل 97)
إنّ المجال المغناطيسي منتظمًا بين فرعي المغناطيس U.

6. طبيعة المجال المغناطيسي

The Nature of the Magnetic Field

يتكوّن المغناطيس من ذرّات تتحرّك فيها الإلكترونات باستمرار حول النواة وتدور بحركة مغزلية حول محورها (شكل 98). يُعتبَر الإلكترون ذو الحركة المغزلية مغناطيسًا بالغ الصغر. إذا كانت حركة زوج من الإلكترونات المغزلية في اتّجاه واحد فتشكّل مغناطيسًا قويًّا، أمّا إذا كانت حركتيهما المغزلية في اتّجاهين مختلفين فلن ينتج عن هذه الحركة أيّ مجال مغناطيسي، حيث إنّ المجالات المغناطيسية الناتجة تعمل بعكس بعضها بعضًا، لذلك لا تتمغنط هذه الموادّ.
أمّا المجالات الموجودة في موادّ كالحديد والنيكل والكوبلت، فلا تلغي بعضها ببعضٍ بشكل تامّ، حيث تحتوي كلّ ذرّة حديد على أربعة إلكترونات تشكّل حركتها المغزلية مجالًا مغناطيسيًّا. بالتالي، نعتبر أنّ كلّ ذرّة حديد مغناطيسًا صغيرًا. ويتطابق ذلك أيضًا مع ذرّات النيكل والكوبلت.

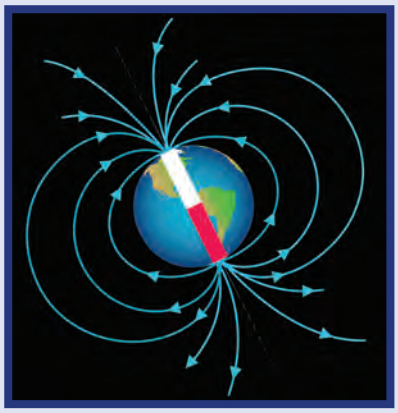


(شكل 98)
ينتج عن الحركة المغزلية لكلّ إلكترون موجود في الذرّة مجالات مغناطيسية.

فقرة إثرائية

المجال المغناطيسي للأرض

تتّجه البوصلة دائمًا نحو الشمال، لأنّ الكرة الأرضية نفسها تُعتبَر مغناطيسًا كبيرًا، فتتّخذ البوصلة اتّجاه المجال المغناطيسي للأرض. وعلى الرغم من ذلك، لا تتطابق الأقطاب المغناطيسية للأرض مع أقطابها الجغرافية، فهي لا توجد حتى على مقربة منها. على سبيل المثال، يوجد القطب المغناطيسي في نصف الكرة الشمالي على بعد (1800)km من القطب الجغرافي الشمالي في مكان ما في منطقة خليج هادسون Hudson Bay شمال كندا. أمّا القطب الآخر فهو موجود عند جنوب أستراليا (شكل 99)، ما يعني أنّ البوصلات لا



(شكل 99)
الأرض عبارة عن مغناطيس ضخم.

فقرة إثرائية (تابع)

تتّجه عامّة إلى الشمال الصحيح. إنّ الاختلاف بين اتّجاه البوصلة والشمال الصحيح يُسمّى الميل المغناطيسي.

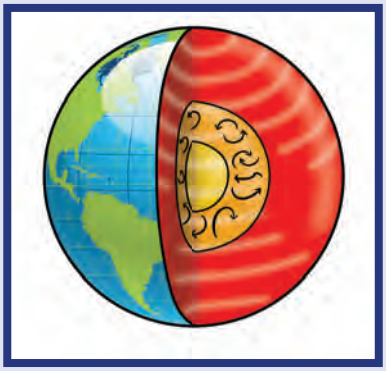
إنّ اعتبار الأرض مغناطيس ضخم غير مبرَّر حتّى الآن. يشبه شكل المجال المغناطيسي للأرض المجال الناتج عن قضيب مغناطيسي قوي موضوع بالقرب من مركز الأرض. ولكن الأرض ليست قطعة من الحديد الممغنط مثل القضيب المغناطيسي، فالذرّات المفردة لا تبقى مرتّبة بسبب السخونة الشديدة.

إنّ تيّارات الحمل في الجزء المنصهر من الأرض تحت القشرة الأرضية تقدّم تفسيرًا للمجال المغناطيسي للأرض. يظنّ علماء الأرض أنّ الشحنات المتحرّكة التي تتقلّب داخل الأرض هي السبب في وجود المجال المغناطيسي. ولأنّ حجم الأرض كبير جدًّا، يجب أن تكون سرعة الشحنات المتحرّكة أقلّ من ملليمتر في الثانية حتى يتسنّى لها تكوين هذا المجال المغناطيسي.

تُعتبَر تيّارات الحمل الناتجة عن ارتفاع حرارة قلب الأرض سببًا آخر في تكوين المجال المغناطيسي للأرض (شكل 100). تنتج حرارة الأرض عن تحرُّر الطاقة النووية الناتجة عن «الانحلال الإشعاعي». قد تتّحد تيّارات الحمل هذه مع التأثير الدوراني للأرض مكوِّنة المجال المغناطيسي للأرض. إنّ متابعة البحث سوف تساعد على جزم هذه الظاهرة.

ومهما يكن السبب، فإنّ المجال المغناطيسي للأرض غير مستقرّ. فقد تغيّر هذا المجال عبر الأزمنة الجيولوجية، والدليل على ذلك ما جاء من تحليل للخواصّ المغناطيسية للصخور Rock Strata. تميل ذرّات الحديد المنصهر إلى أن تتّخذ دائمًا اتّجاه المجال المغناطيسي للأرض. وعندما يتجمّد الحديد، نستطيع أن نحدّد اتّجاه المجال المغناطيسي للأرض من خلال اتّجاه المجالات المغناطيسية في الصخرة. ويمكن أن تقاس المغناطيسية الضعيفة الناجمة بواسطة أجهزة حسّاسة. عند دراسة عيّنات من الصخور التي تكوّنت عبر الزمن الجيولوجي، يمكن حينها جدولة المجال المغناطيسي للأرض في فترات مختلفة. وقد أوضحت الصخور أنّ المجال المغناطيسي للأرض قد انعدم لمرّات عديدة ثمّ انعكس بعد ذلك.

وتشير دراسة ترسّبات البحار العميقة إلى أنّ المجال المغناطيسي للأرض قد انعدم لمدّة تتراوح بين 10 آلاف و 20 ألف سنة على مرّ المليون سنة الماضية، ويُعتقد أنّ هذا هو وقت ظهور الإنسان على الأرض.

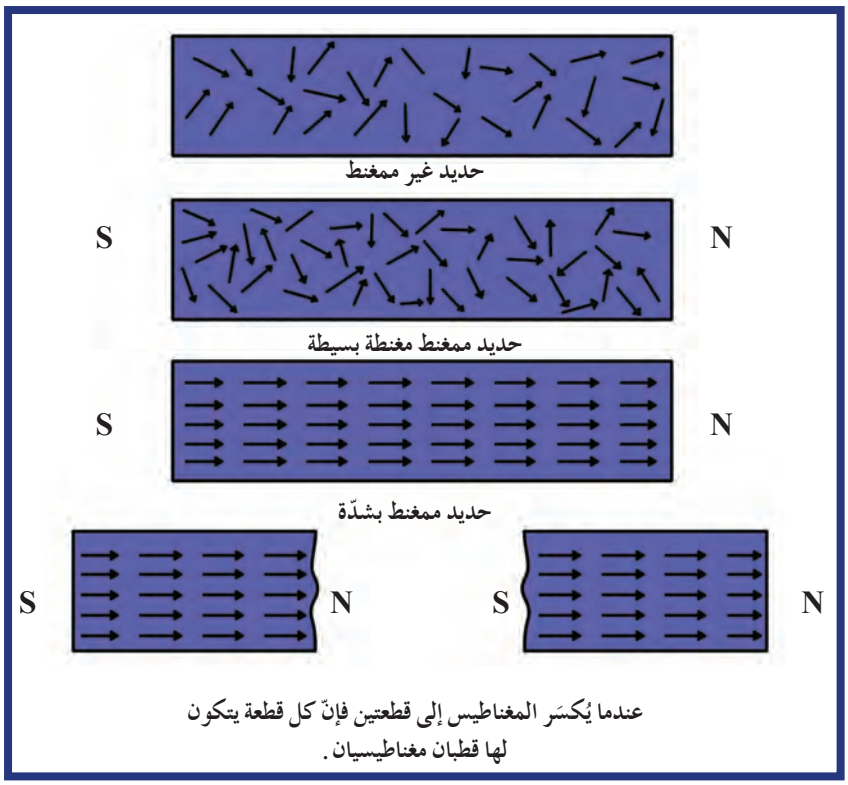


(شكل 100)
يمكن أن تكون تيّارات الحمل الموجودة في الأجزاء المنصهرة من باطن الأرض سببًا في وجود المجال المغناطيسي للأرض.

7. المجالات المغناطيسية Magnetic Domains

المجال المغناطيسي لذرّة الحديد قوي جدًّا، بحيث يؤثّر على ذرّات الحديد المتجاورة ليشكّل منها حزمًا منتظمة. تُسمّى هذه الحزم المنتظمة خطوط المجالات المغناطيسية. كلّ مجال منها ممغنط بشكل تامّ، ويحتوي على مليارات الذرّات المنتظمة. المجالات المغناطيسية صغيرة جدًّا (مجهرية) ويوجد العديد منها في بلّورة الحديد (شكل 101).

(شكل 101)
صورة مجهرية للمجالات المغناطيسية في بلّورة الحديد. كلّ مجال يتكوّن من مليارات الذرّات المصفوفة.



(شكل 102)
قطعة من الحديد تتّضح فيها الخطوات المتتابعة لعملية المغنطة. تمثّل الأسهم المجالات، حيث يمثّل رأس السهم القطب الشمالي أمّا الذيل فيمثّل القطب الجنوبي.

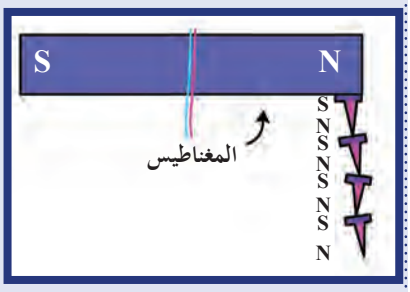
أقطاب المجالات المغناطيسية المتجاورة تلغي مفعول بعضها بعضًا، باستثناء عند الأطراف.

إنّ الفرق بين قطعة من الحديد العادي والحديد الممغنط هو في انتظام المجالات المغناطيسية. ففي مسمار من الحديد تكون المجالات المغناطيسية عشوائية غير منتظمة (شكل 102). تنتظم المجالات المغناطيسية كما تنتظم ثنائيات الأقطاب الكهربائية بوجود قضيب مشحون، فعند وضع مغناطيس قوي بالقرب من المسمار يظهر تأثيران. التأثير الأوّل هو زيادة في قياس المجالات التي لها اتّجاه المجال المغناطيسي الناتج عن المغناطيس القوي على حساب المجالات الأخرى غير المنتظمة. أما التأثير الثاني فيظهر بدوران المجالات من أجل اصطفافها وانتظامها. عند إبعاد المغناطيس القوي عن قطعة الحديد (المسمار) تسبّب الحركة الحرارية العادية عودة معظم المجالات أو كلّها إلى ترتيبها العشوائي.

تُصنع المغناطيسات الدائمة عن طريق وضع قطعة من الحديد أو من سبائك حديدية معيّنة في مجالات مغناطيسية قوية (شكل 103). تختلف سبائك الحديد عن بعضها بعضًا، فمثلًا يمغنط الحديد المطاوع بسهولة أكثر من الصلب، وهو يساعد على دفع أيّ من المجالات التي يصعب انتظامها على الاصطفاف بانتظام.

وهناك طريقة أخرى لصنع مغناطيس دائم وذلك من خلال فرك قطعة من الحديد بالمغناطيس، فحركة الدلك هذه تساعد على انتظام المجالات في الحديد.

إذا أُسقط المغناطيس الدائم أو سخن، تخرج بعض المجالات عن انتظامها فتضعف قوّته.



(شكل 103)
المسامير والسبائك الحديدية تصبح مغناطيسات عند وضعها في مجال مغناطيسي قوي.

مراجعة الدرس 2-1

أوّلًا – ما أوجه الشبه بين الشحنات الكهربائية والأقطاب المغناطيسية؟

ثانيًا– ما الفرق الرئيسي بين الشحنات الكهربائية والأقطاب المغناطيسية؟

ثالثًا– ما هي المجالات المغناطيسية؟

رابعًا– ما الذي يُميّز ذرّات الحديد ويجعلها تعمل كمغناطيسات صغيرة؟

خامسًا– لماذا تضعف الخواصّ المغناطيسية لمغناطيس دائم عند تسخينه؟

سادسًا– لماذا تظهر الخواصّ المغناطيسية في بعض قطع الحديد ولا تظهر في قطع أخرى؟

سابعًا– مجالان مغناطيسيان $\vec{B}_1$ و $\vec{B}_2$ متعامدان لمغناطيسين مختلفين يؤثّران على نقطة M في حيّز ما. يساوي مقدار شدّة المجال المغناطيسي لكلّ منهما على التوالي: (6×10^{-4})T و (8×10^{-4})T. أُحسب مقدار شدّة محصّلة المجال المغناطيسي الناتج عن المجالين $\vec{B}_1$ و $\vec{B}_2$ ومثّل المحصّلة بيانيًّا باستخدام مقياس رسم مناسب.

فقرة إثرائية

الفيزياء في المختبر

مغناطيسية الأرض

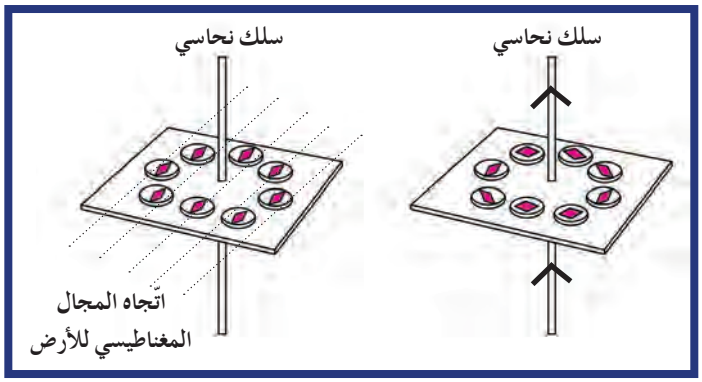
إمسك بوصلة في وضع رأسي بجوار شيء مصنوع من الحديد أو الصلب (كالثلاجة أو الغسّالة ...) بحيث تكون بالقرب من طرفه العلوي.

هل يتّجه القطب الشمالي للبوصلة إلى طرفه العلوي؟ والقطب الجنوبي إلى طرفه السفلي؟ لو حدث ذلك فإنّ هذا الشيء قد تمّت مغنطته بواسطة المجال المغناطيسي للأرض.

كرّر هذا العمل ولكن هذه المرّة إستخدم إحدى العلب المعدنية للأغذية المحفوظة، وَضَعها في وضع مستقيم، ثمّ اقلبها وراقِبها بإبرة البوصلة. لاحِظ في أيّ يوم تفقد العلبة مغنطتها، ومتى تعكس العلبة نفسها قطبيتها المغناطيسية.

الأهداف العامة

- يحدّد عناصر المجال المغناطيسي الناتج عن مرور تيّار كهربائي مستمرّ في سلك مستقيم.
- يحدّد عناصر المجال المغناطيسي الناتج عن مرور تيّار كهربائي مستمرّ في ملفّ دائري.
- يحدّد عناصر المجال المغناطيسي الناتج عن مرور تيّار كهربائي مستمرّ في ملفّ حلزوني.
- يلاحظ التماثل بين المجال المغناطيسي الناتج عن مرور تيّار كهربائي مستمرّ في ملفّ وشكل المجال المغناطيسي للمغناطيس المقابل له.



(شكل 104)

عندما لا يسري تيار في السلك، تنتظم البوصلات في اتجاه مجال الأرض (الرسم إلى اليسار).
عند سريان تيّار في السلك تأخذ البوصلات اتّجاه مجال التيّار الأكثر شدّة الناتج عنه (الرسم إلى اليمين).
خطوط المجال المغناطيسي تكوّن حلقات متّحدة المركز حول السلك.

منذ القرن الثامن عشر، بدأ اهتمام العلماء بإيجاد علاقة بين الكهرباء والمغناطيسية، فلاحظوا عدم وجود أيّ تأثير بين شحنة كهربائية ساكنة ومغناطيس.

ولكن في العام 1820، اكتشف العالم الدنماركي هانز كريستيان أورستد (1777 – 1851) في إحدى تجاربه أنّ إبرة البوصلة الموضوعة قرب سلك موصّل تنحرف عند مرور تيّار كهربائي مستمرّ تمامًا كما تنحرف عند وجودها في مجال مغناطيسي، ما يؤكّد الأثر المغناطيسي للتيّار الكهربائي.

إنّ محور هذا الدرس هو دراسة المجالات المغناطيسية الناتجة عن التيّار الكهربائي في أسلاك موصلة ملفوفة أو مستقيمة واستقصاء خواصّها.

1. المجال المغناطيسي الناتج عن مرور تيّار كهربائي مستمرّ في سلك مستقيم

The Magnetic Field Created by a Current in a Straight Wire

يمكن إظهار المجال المغناطيسي المحيط بسلك مستقيم يمرّ به تيّار كهربائي مستمرّ بوضع مجموعة من البوصلات أو بعض برادة الحديد الجافّة حول السلك، ومن ثمّ تمرير التيّار الكهربائي. تلاحظ أنّ البوصلات وبرادة الحديد تأخذ اتّجاه المجال المغناطيسي الناتج عن التيّار والتي هي دوائر مركزها محور السلك (شكل 105). عند عكس اتّجاه التيّار في السلك الموصّل المستقيم تلاحظ أيضًا انعكاس اتّجاه إبرة البوصلة، ما يؤكّد تغيّر اتّجاه المجال المغناطيسي. أمّا عناصر متّجه المجال المغناطيسي $\vec{B}$ على نقطة M تبعد مسافة d عن محور السلك فتُحدَّد بما يلي:

- الحامل: هو المماس المرسوم على خطّ المجال المغناطيسي الدائري عند النقطة M.
- الاتّجاه: يمكن تحديده عمليًّا من القطب الجنوبي إلى القطب الشمالي لإبرة مغناطيسية بعد وضعها لتستقرّ على النقطة M، أو نظريًّا باستخدام قاعدة اليد اليمنى بوضع الإبهام باتّجاه التيّار وبلف الأصابع الأخرى لتدلّ على اتّجاه المجال المغناطيسي (شكل 106).
- المقدار: والذي يمثّل مقدار شدّة المجال المغناطيسي، وقد أُثبت تجريبيًّا أنّه يتناسب طرديًّا مع شدّة التيّار المارّ في السلك المستقيم وعكسيًّا مع بعد النقطة M عن محور السلك ويُحسَب بالعلاقة التالية:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi d}$$

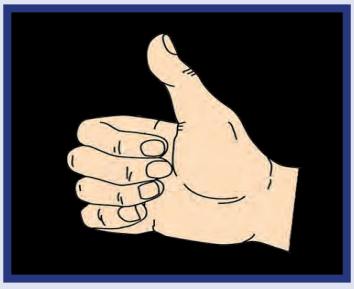
حيث إنّ μ_0 تساوي معامل النفاذ المغناطيسي وتساوي في الفراغ:

$$\mu_0 = (4\pi \times 10^{-7})\ T.m/A$$

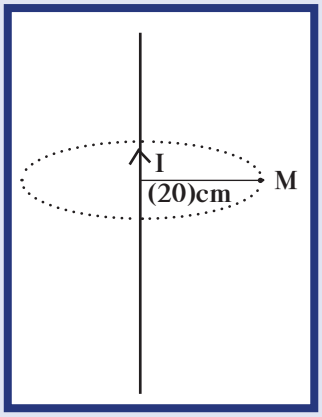
وبالتالي فإنّ شدّة متّجه المجال المغناطيسي الناتج عن مرور التيّار الكهربائي يساوي:

$$B = \frac{2 \times 10^{-7} I}{d}$$

(شكل 105)
برادة الحديد المنثورة على الورقة تظهر شكل المجال المغناطيسي والذي هو دوائر مركزها محور السلك.



(شكل 106)
اتّجاه الإبهام باتّجاه التيّار الكهربائي والأصابع تدل على اتّجاه المجال المغناطيسي.



(شكل 107)
تيّار شدّته A(10) يمرّ في سلك.

مثال (1)

تيّار كهربائي مستمرّ شدّته A(10) يمرّ في سلك مستقيم. أُحسب شدّة المجال المغناطيسي الناتج عن مرور التيّار عند نقطة في الهواء تبعد (20)cm عن محور السلك (شكل 107).

طريقة التفكير في الحلّ

1. حلِّل: أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: شدّة التيّار: $I = (10)A$

مثال (1) (تابع)

المسافة بين محور السلك والنقطة: $d = (20)cm$

2. أُحسب غير المعلوم.

باستخدام العلاقة الرياضية بين شدّة التيّار وشدّة المجال المغناطيسي:

$$B = \frac{2 \times 10^{-7} I}{d}$$

وبالتعويض عن المقادير المعلومة نحصل على:

$$B = \frac{2 \times 10^{-7} \times 10}{0.2} = (1 \times 10^{-5})T$$

3. قيّم: هل النتيجة مقبولة؟

إنّ مقدار شدّة المجال المغناطيسي يمكن التحقّق منه عمليًّا عند النقطة M باستخدام التسلاميتر، كما أنّ النتيجة تتناسب مع المقادير المعطاة في المسألة.

2. المجال المغناطيسي الناتج عن مرور تيّار كهربائي مستمرّ في ملفّ دائري

The Magentic Field Created by a Current in a Coil

إنّ تجربة مماثلة للتجربة السابقة باستخدام برادة الحديد الجافّة، على تيّار كهربائي يمرّ بسلك ملفوف عدد من اللفّات بشكل دائري تُظهر خطوط المجال المغناطيسي كما في الشكل (108)، حيث نلاحظ أنّ متّجه المجال المغناطيسي عند مركز الملفّ هو خطّ مستقيم. بالتالي، نلخّص عناصر المجال المغناطيسي الناتج عن التيّار الكهربائي في مركز الملفّ الدائري بما يلي:

- الحامل: الخطّ المستقيم المارّ بمركز الملفّ.
- الاتّجاه: ويمكن تحديده عمليًّا من القطب الجنوبي إلى القطب الشمالي لإبرة مغناطيسية بعد وضعها لتستقرّ على مركز الملفّ، أو نظريًّا باستخدام قاعدة اليد اليمنى بوضع اليد اليمنى فوق الملفّ ولفّ الأصابع باتّجاه التيّار ليدلّ الإبهام على متّجه المجال المغناطيسي (شكل 109).
- المقدار: والذي يمثّل مقدار شدّة المجال المغناطيسي والذي أُثبِت تجريبيًّا تناسبه مع شدّة التيّار وعدد اللفّات، حيث إنّ زيادة عدد اللفّات الدائرية على الملفّ يزيد من شدّة المجال المغناطيسي وعكسيًّا مع نصف قطر الملفّ r فتُحسَب بالعلاقة:

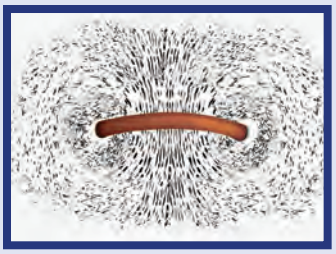
$$B = \frac{\mu_0 NI}{2r}$$

حيث إنّ μ_0 يساوي معامل النفاذية المغناطيسية وتساوي في الفراغ:

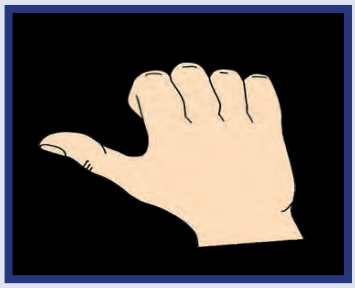
$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ T.m/A$$

وبالتالي فإنّ شدّة متّجه المجال المغناطيسي الناتج عن مرور التيّار الكهربائي المستمرّ في الملفّ الدائري عند مركزه يساوي:

$$B = \frac{2\pi \times 10^{-7} NI}{r}$$



(شكل 108)
برادة الحديد المنثورة على الورقة تظهر شكل المجال المغناطيسي في حالة ملف دائري يمر فيه تيار.



(شكل 109)
الأصابع باتّجاه التيّار الكهربائي والإبهام يدل على اتّجاه المجال المغناطيسي.

مثال (2)

ملفّ دائري نصف قطره (40)cm مؤلّف من 100 لفّة ويمرّ به تيّار كهربائي مستمرّ شدّته (0.2)A كما في الشكل (110).

(أ) أُحسب مقدار شدّة المجال المغناطيسي عند مركز الملفّ الدائري.

(ب) حدِّد عناصر متّجه المجال المغناطيسي.

طريقة التفكير في الحلّ

1. حلِّل: أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: نصف القطر: $r = (40)cm$

عدد اللفّات: لفّة $N = 100$

شدّة التيّار: $I = (0.2)A$

غير المعلوم: **(أ)** شدّة المجال المغناطيسي عند مركز الملفّ الدائري

(ب) عناصر المتّجه

2. أُحسب غير المعلوم.

(أ) باستخدام العلاقة الرياضية بين شدّة التيّار وشدّة المجال المغناطيسي للملفّ الدائري:

$$B = \frac{2\pi \times 10^{-7} NI}{r}$$

وبالتعويض عن المقادير المعلومة نحصل على:

$$B = \frac{2\pi \times 10^{-7} NI}{r}$$

$$= \frac{2\pi \times 10^{-7} \times 100\ (0.2)}{0.4}$$

$$= (3.14 \times 10^{-5})T$$

(ب) إنّ عناصر متّجه المجال المغناطيسي تحدَّد كالتالي:

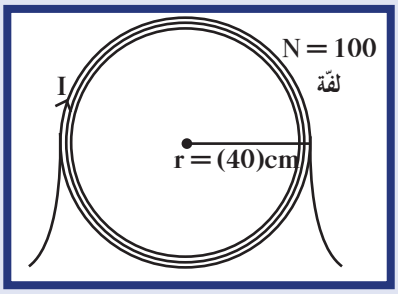
الحامل: الخطّ المستقيم المارّ بنقطة المركز.

الاتّجاه: باستخدام اليد اليمنى كما هو موضّح في الشكل (111).

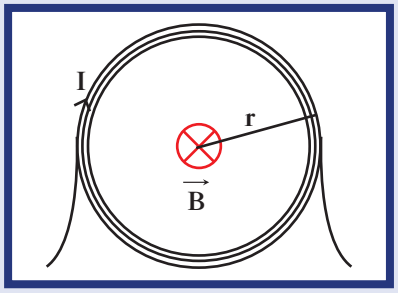
المقدار: $B = (3.14 \times 10^{-5})T$

3. قيِّم: هل النتيجة مقبولة؟

إنّ مقدار شدّة المجال المغناطيسي يمكن التحقّق منه عمليًّا عند مركز الملفّ الدائري باستخدام التسلاميتر، كما إنّ النتيجة تتناسب مع المقادير المعطاة في المسألة.



(شكل 110)
ملفّ دائري نصف قطره (40)cm

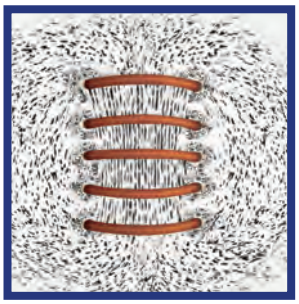


(شكل 111)
إنّ اتّجاه المجال المغناطيسي هو إلى داخل الصفحة.

3. المجال المغناطيسي الناتج عن مرور تيّار كهربائي مستمرّ في ملفّ حلزوني

The Magnetic Field From a Current in a Solenoid

إنّ استخدام برادة الحديد الجافّة في تجربة على تيّار كهربائي يمرّ في ملفّ حلزوني ملفوف عدد من اللفّات تُظهر خطوط المجال المغناطيسي كما في الشكل (112).



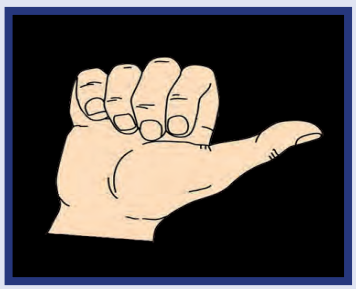
(شكل 112)

برادة الحديد المنثورة على الورقة تظهر شكل المجال المغناطيسي في ملفّ حلزوني.

تأمّل الشكل (112)، هل لاحظت التماثل بين خطوط المجال المغناطيسي خارج الملفّ الحلزوني والمغناطيس المستقيم؟ لاحِظ خطوط المجال المغناطيسي في وسط الملفّ الحلزوني بعيدًا عن الأطراف. من خلال الشكل نستنتج أنّ خطوط المجال المغناطيسي داخل الملفّ الحلزوني الطويل هي خطوط مستقيمة، أمّا خارج الملفّ الحلزوني فإنّ خطوط المجال المغناطيسي الناتج عن مرور التيّار هي متماثلة مع خطوط المجال المغناطيسي الناتج عن مغناطيس مستقيم. ولهذا يُعتبر الملفّ الحلزوني عند مرور التيّار الكهربائي فيه مغناطيسًا مستقيمًا له قطبين يحدّد نوعهما اتّجاه التيّار داخل الملفّ. كما أنّ حساب مقدار المجال المغناطيسي، وملاحظة خطوط المجال المغناطيسي على محور الملفّ بعيدًا عن الأطراف والتي هي خطوط مستقيمة وموازية لمحور الملفّ تسمح لنا بتحديد عناصر متّجه المجال المغناطيسي الناتج عن مرور التيّار كما يلي:

- الحامل: هو محور الملفّ.
- الاتّجاه: يمكن تحديده عمليًّا من القطب الجنوبي إلى القطب الشمالي لإبرة مغناطيسية بعد استقرارها على مركز الملفّ، أو نظريًّا باستخدام قاعدة اليد اليمنى (شكل 113) بوضع اليد اليمنى فوق الملفّ بحيث توازي الأصابع حلقات الملفّ باتّجاه مرور التيّار في الحلقات، ليدلّ الإبهام على متّجه المجال المغناطيسي.
- المقدار: يمثّل مقدار شدّة المجال المغناطيسي وقد أُثبت تجريبيًّا أنّه يتناسب طرديًّا مع شدّة التيّار المارّ وعدد اللفّات في وحدة الأطوال ويُحسَب بالعلاقة الرياضية:

$$B = \frac{4\pi \times 10^{-7} NI}{L}$$

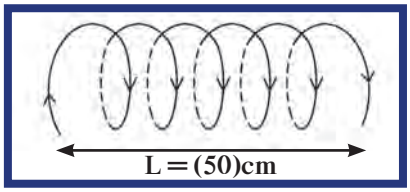


(شكل 113)

يدل الإبهام على اتّجاه المجال المغناطيسي بينما تكون الأصابع باتّجاه التيّار في حلقات الملفّ الحلزوني.

مثال (3)

ملفّ حلزوني طوله (50)cm مؤلّف من 500 لفّة ويمرّ به تيّار كهربائي مستمرّ شدّته (5)A باتّجاه المبيَّن في الشكل (114).



(شكل 114)

(أ) أُحسب مقدار شدّة المجال المغناطيسي الناتج عن مرور التيّار عند مركز الملفّ.

(ب) حدِّد عناصر متّجه المجال المغناطيسي.

طريقة التفكير في الحلّ

1. حلِّل: أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: طول الملفّ: $L = (50)cm$

عدد اللفّات: لفّة $N = 500$

شدّة التيّار: $I = (5)A$

غير المعلوم: **(أ)** شدّة المجال المغناطيسي عند مركز الملفّ

(ب) عناصر متّجه المجال المغناطيسي

2. أُحسب غير المعلوم.

(أ) باستخدام العلاقة الرياضية بين شدّة التيّار وشدّة المجال المغناطيسي للملفّ الحلزوني:

$$B = \frac{4\pi \times 10^{-7} NI}{L}$$

وبالتعويض عن المقادير المعلومة نحصل على:

$$B = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 500 \times 5}{0.5}$$

$$= (6.28 \times 10^{-3})T$$

(ب) إنّ عناصر متّجه المجال المغناطيسي تُحدَّد كالتالي:

الحامل: محور الملفّ

الاتّجاه: باستخدام اليد اليمنى كما هو موضّح في الشكل (115).

المقدار: $B = (6.28 \times 10^{-3})T$

3. قيِّم: هل النتيجة مقبولة؟

إنّ مقدار شدّة المجال المغناطيسي يمكن التحقّق منه عمليًّا عند مركز الملفّ باستخدام التسلاميتر، كما أنّ النتيجة تتناسب مع المقادير المعطاة في المسألة.

فقرة إثرائية

العلم والتكنولوجيا والمجتمع

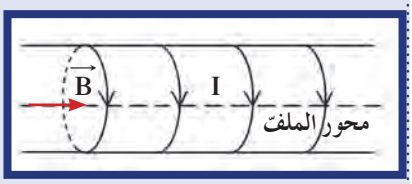
القطار الطائر!

يُعتبَر القطار السابح في الهواء من التطبيقات المثيرة للمغناطيسات فائقة التوصيل. يحمل القطار عند أسفله مغناطيسات فائقة التوصيل، وعندما يسير القطار تتولّد تيّارات مستحثّة في ملفّات أخرى مثبتة في قاع الطريق الخاصّ بالقطار بحيث تكون الأقطاب المغناطيسية المتقابلة متشابهة فتتنافر.

وتعمل قوى التنافر هذه على رفع القطار لبوصات عديدة فوق أرضية مساره ليبدو كما لو كان يسبح في الهواء.

ويحدّ الاحتكاك من سرعة هذا القطار مع الهواء ومراعاة السرعة المناسبة لراحة الركّاب. هل تتمنّى أن تقوم بمثل هذه الرحلات في المستقبل؟

التفكير الناقد: بمَ يتمتّع القطار الذي يعتمد على «الرفع المغناطيسي» عن القطارات التقليدية؟



(شكل 115)

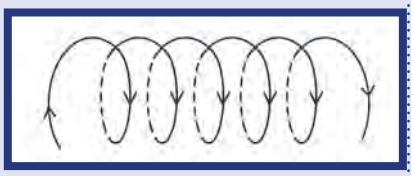
اتّجاه المجال المغناطيسي على المحور بالاتّجاه الموجب.

4. المجال المغناطيسي في أي دائرة كهربائية

Electric Field in an Electric Circuit

إنّ النتائج السابقة والتي حصلنا عليها نتيجة مرور تيّار كهربائي مستمرّ في سلك موصّل له شكل هندسي بسيط (مستقيم، دائري، ملفّ حلزوني) تجعلنا نستنتج أنّه عند أيّ نقطة في مجال مغناطيسي ناتج عن مرور تيّار كهربائي مستمرّ يكون:

- اتّجاه المجال المغناطيسي يعتمد على اتّجاه التيّار الكهربائي ويُحدَّد بواسطة قاعدة اليد اليمنى.
- مقدار شدّة المجال المغناطيسي يتناسب طرديًّا مع مقدار شدّة التيّار أي أنّ: $B = kI$
- هذه النتائج صحيحة ويمكن تعميمها على أيّ دائرة كهربائية مهما اختلف شكلها، علمًا أنّ الثابت k يعتمد على الشكل الهندسي للدائرة.



(شكل 116)

مراجعة الدرس 2-2

أوّلًا – ما شكل المجال المغناطيسي حول سلك مستقيم يحمل تيّارًا كهربائيًّا مستمرًّا؟

ثانيًا– عند لفّ سلك مستقيم يحمل تيّارًا كهربائيًّا مستمرًّا ليصبح دائري الشكل إلى ملفّ، تزيد شدّة المجال المغناطيسي داخل الملفّ عن خارجها. علّل سبب ذلك.

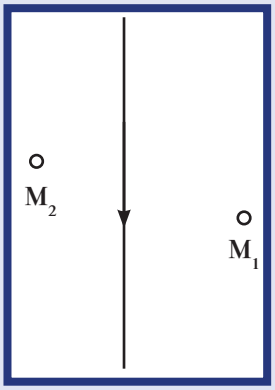
ثالثًا– حدِّد أقطاب الملفّ في الشكل (116) معتمدًا على اتّجاه مرور التيّار الكهربائي.

رابعًا– حدِّد اتّجاه المجال المغناطيسي على النقاط M_1 و M_2 في الشكل (117).

خامسًا– سلك مستقيم يمرّ به تيّار كهربائي مستمرّ شدّته A(1).

(أ) أُحسب شدّة المجال المغناطيسي الناتج عند نقطة تبعد cm(10) عن محور السلك.

(ب) حدِّد عناصر متّجه المجال المغناطيسي (وضّح ذلك بالرسم).

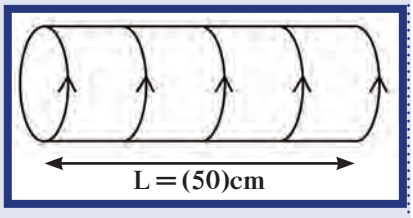


(شكل 117)

سادسًا– حدِّد عناصر متّجه المجال المغناطيسي الناتج عند مركز ملفّ حلزوني، طوله cm(50)، ومؤلّف من (1000) لفّة عند مرور تيّار كهربائي مستمرّ شدّته A(4) علمًا أنّ اتّجاه التيّار في الملفّ إلى أعلى كما موضّح في الشكل (118).

سابعًا– ملفّ دائري نصف قطره cm(10) وعدد لفّاته (5) لفّات يمرّ فيه تيّار كهربائي مستمرّ شدّته A(0.5). حدِّد بالكتابة والرسم عناصر متّجه المجال المغناطيسي الناتج عند مركز الملفّ.

ثامنًا– سلكان متوازيان طويلان يبعدان cm(80) عن بعضهما بعضًا. يمرّ في السلك الأوّل تيّار شدّته $I_1 = (2)A$، ويمرّ في الثاني تيّار كهربائي شدّته $I_2 = (3)A$ واتّجاهه معاكس لاتّجاه التيّار الأوّل. حدِّد عناصر متّجه المجال المغناطيسي على النقطة M بين السلكين والتي تبعد cm(50) عن السلك الأوّل.



(شكل 118)

مراجعة الوحدة الثالثة

المفاهيم

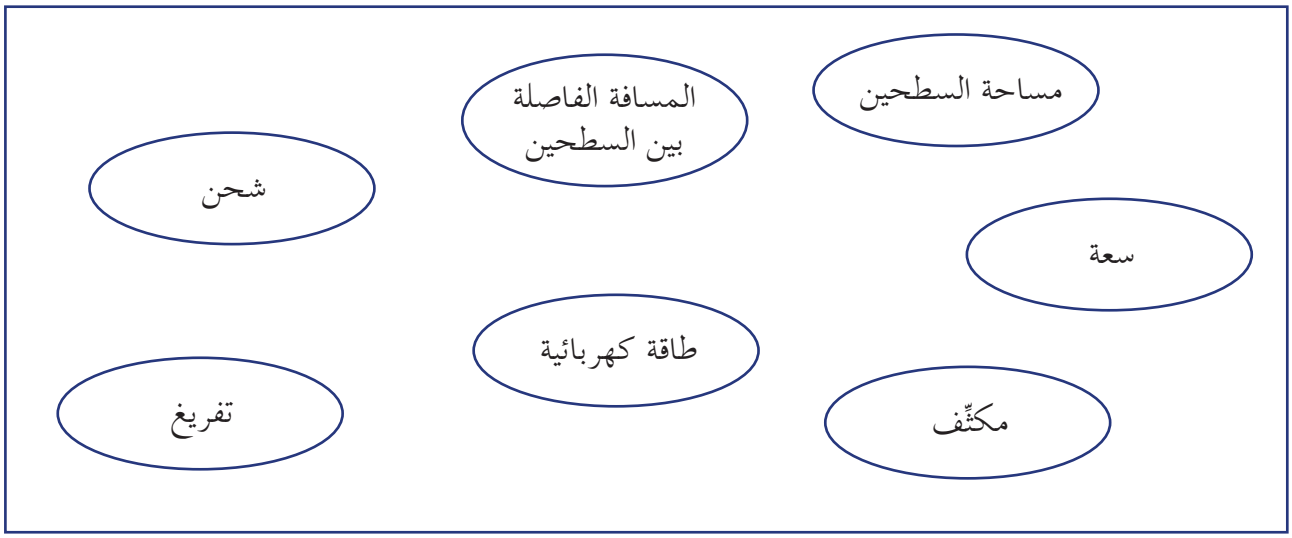
التفريغ الكهربائي	Discharging	جهد التوقف والتعطيل	Breakdown Potential
المجال الكهربائي المنتظم	Uniform Electric Field	المجالات الكهربائية	Electric Fields
المجالات المغناطيسية	Magnetic Fields	خطوط المجال الكهربائي	Electric Field Lines
الشحن الكهربائي	Charging	الطاقة الكهربائية	Electric Energy
القطب المغناطيسي	Magnetic Pole	المجال المغناطيسي	Magnetic Domain
المغناطيس	Magnet	المكثّف	Capacitor
الملفّ الحلزوني	Solenoid	الملفّ الدائري	Coil

الأفكار الرئيسية في الفصل

- المجال الكهربائي للشحنة هو الحيّز حول الشحنة الكهربائية الذي يظهر فيه تأثير القوّة الكهربائية.
- ينشأ المجال المغناطيسي في الموادّ المغناطيسية كالحديد لعدم إلغاء المجالات المغناطيسية الناتج عن الحركة المغزلية.
- في الموادّ غير المغناطيسية تدور أزواج الإلكترونات حول نفسها في اتّجاهين متعاكسين فلا ينتج عنها مجال مغناطيسي.
- شدّة المجال الكهربائي عند نقطة تساوي القوّة الكهربائية المؤثّرة على وحدة الشحنة الكهربائية الموضوعة عند النقطة.
- المجال الكهربائي المنتظم هو المجال الذي يكون ثابت الشدّة وثابت الاتّجاه عند جميع نقاطه.
- يتألّف المكثّف البسيط من سطحين متوازيين يفصل بينهما فراغ غالبًا ما يُملأ بمادّة عازلة.
- تتناسب الشحنة الكهربائية على المكثّف طرديًّا مع فرق الجهد المبذول على سطحي المكثّف.
- جهد التعطيل هو فرق الجهد على قطبي المكثّف الذي يؤدّي إلى إتلاف المكثّف.
- السعة المكافئة لمجموعة من المكثّفات المتّصلة معًا على التوازي يساوي مجموع سعات كلّ المكثّفات.
- مقلوب السعة المكافئة لمجموعة من المكثّفات المتّصلة معًا على التوالي يساوي مجموع مقلوب سعات كلّ المكثّفات.
- تتنافر أقطاب المغناطيس المتشابهة أمّا المختلفة فتتجاذب.
- متّجهات المجال المغناطيسي المنتظم متساوية أي لها المقدار والاتّجاه نفسهما.
- يُعتبر الملفّ، عند مرور التيّار الكهربائي فيه، مغناطيسًا مستقيمًا له قطبان يحدّدهما اتّجاه التيّار الكهربائي.
- يتناسب مقدار شدّة المجال المغناطيسي طرديًّا مع مقدار شدّة التيّار.
- يعتمد اتّجاه المجال المغناطيسي على اتّجاه التيّار الكهربائي ويُحدَّد بواسطة قاعدة اليد اليمنى.

خريطة مفاهيم الفصل

إستخدم المصطلحات الموضّحة في الشكل التالي لرسم خريطة مفاهيم تُنظِّم معظم الأفكار التي احتوتها الوحدة .



تحقق من فهمك

ضع علامة (✓) في المربّع الواقع أمام أنسب إجابة في كلّ ممّا يلي:

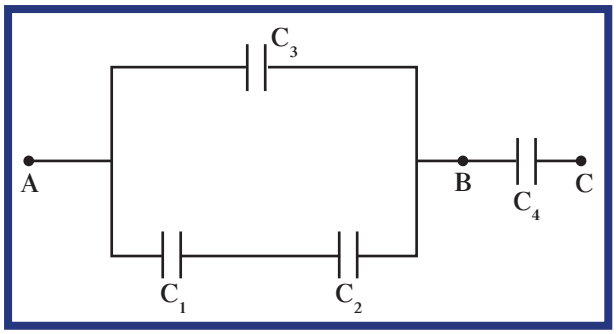
1. علمًا أنّ مقدار شحنة الإلكترون تساوي $(-1.6 \times 10^{-19})C$، فإنّ عدد الإلكترونات N التي تحملها شحنة كهربائية Q مقدارها $(-3.2 \times 10^{-17})C$ يساوي:
   - ☐ 150
   - ☐ 200
   - ☐ 0.02
   - ☐ 1.5
2. مقدار شدّة المجال الكهربائي الناتج عن شحنة نقطية مقدارها $(4 \times 10^{-6})C$ عند نقطة M تبعد عنها (0.1)m يساوي:
   - ☐ $(4.2 \times 10^{6})N/C$
   - ☐ $(1.8 \times 10^{6})N/C$
   - ☐ $(0.9 \times 10^{6})N/C$
   - ☐ $(3.6 \times 10^{6})N/C$
3. نعرّف المجال الكهربائي المنتظم بأنّه مجال :
   - ☐ جميع خطوطه متوازية ولها مقدار ثابت .
   - ☐ تنطلق جميع خطوطه من نقطة في وسطه بجميع الاتّجاهات ولها مقدار ثابت .
   - ☐ تنطلق جميع خطوطه نحو نقطة في وسطه بجميع الاتّجاهات وليس لها مقدار ثابت .
   - ☐ تنطلق جميع خطوطه من نقطة في وسطه بجميع الاتّجاهات ولها مقدار متناسب مع كمّية الشحنة .
4. يتألّف مكثّف من سطحين متوازيين متّصلين ببطّارية . إذا ضاعفنا المسافة بين السطحين المتوازيين فإنّ شدّة المجال الكهربائي بينهما:
   - ☐ يقلّ إلى النصف .
   - ☐ لا يتغيّر .
   - ☐ يزداد إلى مثلي ما كان عليه .
   - ☐ يقلّ أربع أمثال ما كان عليه .
5. إنّ ثني السلك الحامل للتيّار الكهربائي والمؤثّر على نقطة M تبعد عنه مسافة r ليكوّن لفّة أو أكثر مركزها النقطة M:
   - ☐ يقلّل من شدّة المجال المغناطيسي الناتج عن مرور التيّار .
   - ☐ يزيد من شدّة المجال المغناطيسي الناتج عن مرور التيّار .
   - ☐ لا يغيّر من شدّة المجال المغناطيسي الناتج عن مرور التيّار .
   - ☐ يزيد من شدّة التيّار الكهربائي وبالتالي يضعف المجال المغناطيسي الناتج .

تحقق من معلوماتك

أجب عن الأسئلة التالية:

1. ما الفرق بين المجال الذي يحيط بشحنة ساكنة والمجال الذي يحيط بشحنة متحرّكة؟
2. ما السبب الذي يجعل الحديد قادرًا على العمل كمغناطيس وليس الخشب؟
3. عندما ينجذب مغناطيس قوي إلى مغناطيس ضعيف ، أيّ منهما يبذل قوّة أكبر؟
4. إن كانت القوّة الكهربائية المؤثّرة على شحنة نقطية لها اتّجاه المجال نفسه ، فما هو نوع الشحنة؟

5. أُحسب مقدار القوّة الكهربائية المؤثّرة على شحنة $q = (2 \times 10^{-6})C$ موضوعة عند نقطة في مجال كهربائي $E = (2 \times 10^{4})V/m$.
6. ما نوع المجال الكهربائي واتّجاهه بين سطحيين معدنيين متوازيين متّصلين بمصدر فرق جهده V؟
7. ما مقدار الجهد على مكثّف عند انتهاء عملية الشحن؟
8. ما العلاقة بين السعة الكهربائية لمكثّف متوازي السطحيين والمادّة العازلة بين اللوحين عند ثبات العوامل الأخرى المؤثّرة في السعة الكهربائية؟
9. اِشرح ما الذي يحدث للمكثّف إذا زاد فرق الجهد المطبّق على المكثّف عن مقدار القيمة العظمى التي تحدّدها الشركة الصانعة.
10. أُحسب السعة المكافئة لمجموعات المكثّفات الموضّحة في الشكل (119):
$C_1 = (60)\mu F$ و $C_2 = (20)\mu F$ و $C_3 = (9)\mu F$ و $C_4 = (12)\mu F$.



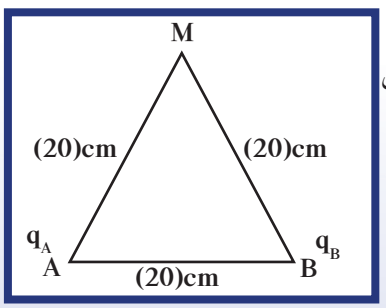
(شكل 119)

11. وُصل مكثّفان سعتهما $C_1 = (2)\mu F$ و $C_2 = (4)\mu F$ على التوازي بمصدر فرق جهده (4.5)V. أُحسب :
(أ) مقدار الشحنة التي يجب على البطّارية توفيرها لشحن المكثّفين.
(ب) الطاقة الكهربائية المختزَنة في كلّ مكثّف.
12. ما العلاقة بين شدّة المجال المغناطيسي وشدّة التيّار الكهربائي؟
13. حدِّد خواصّ متّجه المجال المغناطيسي الناتج عن مرور التيّار الكهربائي في ملفّ حلزوني طويل.

تحقق من مهاراتك

حلّ المسائل التالية:

1. شحنتان كهربائيتان $q_A = (2 \times 10^{-8})C$ و $q_B = (-4 \times 10^{-8})C$ موضوعتان عند النقطتين A و B، حيث $AB = (20)cm$.



(شكل 120)

(أ) أُحسب مقدار شدّة المجال الكهربائي الناتج عن الشحنتين على النقطة M التي تبعد (20)cm عن A و (20)cm عن B. كما في الشكل (120).
(ب) حدِّد عناصر متّجه محصّلة المجال الكهربائي.
(جـ) مثِّل بيانيًّا باستخدام مقياس رسم مناسب المجال الكهربائي على النقطة M.
(د) أُحسب مقدار محصّلة القوّة الكهربائية على النقطة M إذا وُضع عندها شحنة مقدارها $(2 \times 10^{-8})C$.

2. مكثّف سعته $2\mu F$ وصل بمصدر فرق جهده $20V$. إذا كانت المسافة بين اللوحين المتوازيين $2mm$، أُحسب:

(أ) المجال الكهربائي بين لوحيه.

(ب) الشحنة الكهربائية.

(جـ) الطاقة الكهربائية بين لوحيه.

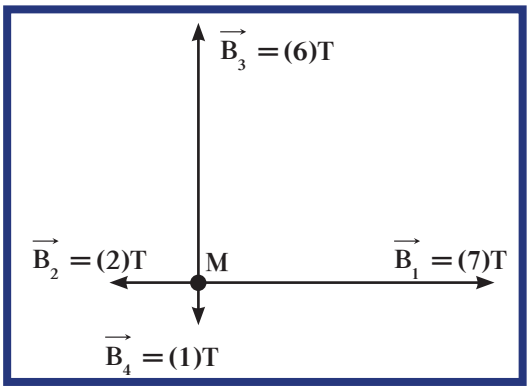
(د) إذا كان فرق الجهد بين اللوحين $40V$ مع بقاء مقدار السعة ثابت، كم تصبح الطاقة الكهربائية المختزَنة؟

3. وضع بروتون شحنته $q = (1.6 \times 10^{-19})C$ في مجال كهربائي منتظم.
أُحسب مقدار شدّة المجال الكهربائي واتّجاهه إذا كان ينتج قوّة كهربائية مساوية في المقدار لوزن الشحنة ولكن باتّجاه معاكس، علمًا أنّ كتلة البروتون تساوي $(1.67 \times 10^{-27})kg$.

4. يمثّل الشكل (121) أربعة مجالات مغناطيسية متعامدة تؤثّر على النقطة M.

(أ) أُحسب مقدار المحصّلة الناتجة عن المجالات المغناطيسية الأربعة عند النقطة M.

(ب) مثّل المحصّلة بيانيًّا باستخدام مقياس رسم مناسب.

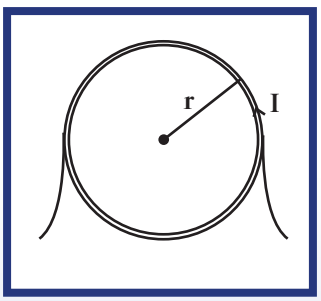


(شكل 121)

5. ملفّ دائري، (شكل 122)، نصف قطره $40cm$ مؤلّف من (50) لفّة، ويمرّ به تيّار كهربائي شدّته $0.1A$.

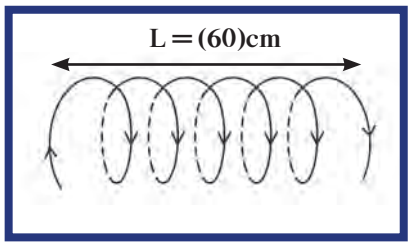
(أ) أُحسب مقدار شدّة المجال المغناطيسي عند مركز الملفّ الدائري.

(ب) حدّد عناصر متّجه المجال المغناطيسي.



(شكل 122)

6. ملفّ حلزوني طوله (60)cm، مؤلّف من (1000) لفّة، يمرّ به تيّار كهربائي مستمرّ شدّته (2)A بالاتّجاه المبيّن في الشكل (123).



(شكل 123)

(أ) أُحسب مقدار شدّة المجال المغناطيسي الناتج عن مرور التيّار عند مركز الملفّ الحلزوني.

(ب) حدِّد عناصر متّجه المجال المغناطيسي.

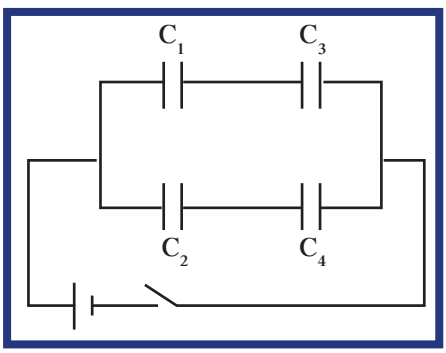
7. سلكان متوازيان طويلان يبعدان (80)cm عن بعضهما بعضًا. يمرّ في السلك الأوّل تيّار شدّته I_1 = (2)A، وفي الثاني تيّار كهربائي شدّته I_2 = (3)A له اتّجاه التيّار الأوّل نفسه.

(أ) حدِّد موضع النقطة M بين السلكين بحيث تكون محصّلة المجالات المغناطيسية عليها والناتجة عن مرور التيّارين في السلكين تساوي صفرًا.

(ب) أُحسب مقدار محصّلة المجال المغناطيسي على M في حال عكسنا اتّجاه أحد التيّارين الكهربائيين.

8. مكثّف متّصل بمصدر فرق جهده (V). تمّ إبعاد سطحيه المتوازيين عن بعضهما بعضًا بدون فصله عن مصدر الجهد. اِشرح كيف سيتغيّر كلّ من مقدار الشحنة والطاقة الكهربائية المختزَنة كنتيجة لإبعاد السطحين عمّا كانا عليه.

9. وُصِلت مجموعة من المكثّفات C_1 = (2)μF، C_2 = (6)μF، C_3 = (2)μF، C_4 = (3)μF بمصدر جهد مستمرّ (48)V، كما هو موضّح في الشكل (124). أُحسب:



(شكل 124)

(أ) مقدار السعة المكافئة للمكثّفات.

(ب) الشحنة الكهربائية وفرق الجهد على كلّ مكثّف.

(جـ) الطاقة الكهربائية المختزَنة على المكثّف C_2 بعد شحنه.

10. مكثّف هوائي مستوٍ سعته $C_1 = (2)\mu F$، شحنته $(60)\mu C$ وُصِل بمكثّف هوائي آخر مستوٍ سعته $(1)\mu F$ غير مشحون. أُحسب شحنة كلّ مكثّف بعد التوصيل بفترة كافية.

11. مكثّفان متماثلان سعة كلّ منهما C متّصلان معًا على التوالي بمصدر جهد V.

(أ) أُحسب فرق الجهد، والطاقة الكهربائية المختزَنة في كلّ منهما بدلالة C وV.

(ب) إذا وُضِع في أحدهما مادّة عازلة لها ثابت عزل كهربائي نسبي ε_r، فكم تصبح السعة، والشحنة، والطاقة الكهربائية المختزَنة في كلّ منهما؟

التواصل

أُكتب مقالًا لا يزيد عن عشرة أسطر تبيّن فيه أهمّية المغناطيسية الناتجة عن التيّارات الكهربائية، مبيّنًا في مقالك الاختلاف بين المغناطيس الطبيعي والمغناطيس الكهربائي وإمكانية التحكّم بمجالاتهما.

نشاط بحثي

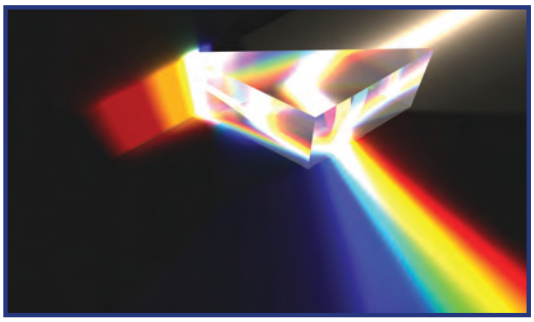
تُعَدّ المكثّفات من المركّبات الأساسية في جهاز إنعاش القلب، فهي تُشحَن لتختزن طاقة كهربائية تُستخدَم عند تفريغها فوق صدر المصاب لإنعاش القلب عند توقّفه.

أجرِ بحثًا تعرّف به تلك الآلات وتبيّن فيه دور المكثّفات في عملها.

ضمّن بحثك كيفية التحكّم بها، وطريقة عملها، وكمّية الطاقة الكهربائية التي يجب تفريغها بالمريض أثناء محاولة إنقاذ حياته.

الوحدة الرابعة

الضوء
Light



ما هو الضوء؟ وكيف نرى الأشياء؟
بناءً على الكثير من التجارب التي أُجريت لاكتشاف خواصّ الضوء، تمّ الاتّفاق على أنّ للضوء خواصّ الجسيمات وخواصّ الموجات.
في هذه الوحدة، سنتناول الخاصّية الموجية للضوء، وسنستخدمها لتفسير بعض الظواهر مثل الانعكاس والانكسار والحيود والتداخل. وسندرس في هذه الوحدة سلوك الضوء في بعض القطع الضوئية مثل انعكاسه على المرايا المستوية والكروية، وانكساره في المنشور ودور المنشور في تحليل الضوء الأبيض للتأكيد على خاصيته الموجية.
وسندرس في هذه الوحدة، وضمن التطبيقات على ظاهرة الانكسار على السطوح الكروية، العدسات واستخداماتها في التكنولوجيا بشكل واسع كالنظّارات الطبّية وفي صناعة الكاميرات وأجهزة العرض السينمائي والتلسكوبات والأدوات التكنولوجية وغيرها.

اكتشف بنفسك

تغيُّر سرعة الضوء

ينكسر شعاع الضوء عند سقوطه على السطح الفاصل بين الزجاج والهواء وعند دخوله الزجاج، كما أنّه يعاود الانكسار عند خروجه منه. وتعود هذه الظاهرة إلى تغيُّر سرعة انتشار الموجات الضوئية في الهواء عن سرعتها في الزجاج. أجب عن الأسئلة التالية مستخدمًا النص السابق:

1. ما اسم الظاهرة التي تحدث عند انتقال شعاع الضوء بين الوسطين؟
2. ما السبب العلمي وراء حدوث هذه الظاهرة؟
3. كيف ينتقل شعاع الضوء؟

فصول الوحدة

الفصل الأوّل

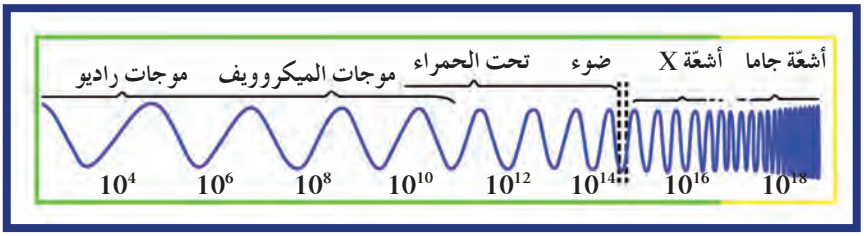
- الضوء وخواصّه

أهداف الوحدة

- يعدّد الخواصّ الموجية للضوء.
- يميّز بين انعكاس الضوء وانكساره.
- يميّز بين تداخل الضوء وحيوده واستقطابه.
- يعرّف بعض القطع الضوئية مثل المنشور والصفيحة متوازية الوجهين والعدسات اللامّة والمفرّقة.
- يحقق القانون العام للمرايا والعدسات.
- يرسم مخطّطات ضوئية لتكوين صور.
- يكتسب المهارات المطلوبة عند إجراء التجارب والأنشطة العملية والقياسات المختلفة.

معالم الوحدة

- **العلم والتكنولوجيا والمجتمع:** الألياف الضوئية
- **الفيزياء في الطبّ:** العدسة والماء الأزرق



هل يتكوّن الضوء من موجات أو من جسيمات؟

اهتمّ الإنسان بدراسة الضوء منذ آلاف السنين واختلف الفلاسفة والعلماء في ما بينهم على تفسير طبيعته، لذا أجروا اختبارات وتجارب كثيرة ليبرهنوا ما اعتقدوه عن طبيعة الضوء وكيفية رؤيته.

اعتقد بعض قدماء فلاسفة اليونان أنّ الضوء يتألّف من جزيئات صغيرة جدًّا تستطيع أن تدخل العين لتخلق حاسّة النظر، فيما اعتقد فلاسفة آخرون، بما فيهم سقراط وبطليموس، أنّ الرؤية هي نتيجة انبعاثات تصدر من العين لتلامس الأجسام. وقد أكّد اقليدس هذا عندما سأل: كيف يمكن تفسير عدم رؤية الإبرة على الأرض إلّا عندما تقع أعيننا عليها؟

في أواخر عام 1600، قدّم إسحاق نيوتن تفسيرًا للضوء مبيّنًا أنّه يتّخذ شكل تيّار دقيق من الجسيمات، وذلك لأنّه ينتشر في خطوط مستقيمة. ولكن العالم هيجنز أطلق النظرية الموجية التي تعتبر الضوء موجات، واستطاع أن يفسّر بعض الظواهر الفيزيائية معتمدًا على نظريته الموجية.

وأكّد بالتجربة أنّ الضوء ينتشر بشكل موجات لأنّه ينحني حول الأجسام. كما أنّ غيره من العلماء تبنّوا النظرية الموجية ووجدوها الأفضل في تفسير طبيعة الضوء، فأصبحت النظرية الموجية هي النظرية المقبولة في القرن التاسع عشر.

وفي عام 1905 أطلق العالم أينشتاين نظرية تفسّر عملية الأثر الكهروضوئي حيث يمكن للضوء المناسب انتزاع إلكترونات من سطح المعادن. وبحسب هذه النظرية، يتألّف الضوء من جسيمات، حزم عديمة الوزن من طاقة موجات كهرومغناطيسية مركزة، سُمّيت فوتونات.

توافق العلماء اليوم، بعد أن تحقّقوا من فرضية ماكس بلانك المتعلّقة بتبادل الطاقة بين المادّة والإشعاع وفرضية لو دي برولي حول وجود الصفة الموجية للجسيمات المادّية، على أنّ الضوء له طبيعة مزدوجة: طبيعة جسيمية وطبيعة موجية. فالضوء يسلك سلوكًا موجيًّا عندما يتفاعل مع أجسام كبيرة حيث ينعكس وينكسر ويتداخل ويستقطب، ويسلك سلوك الجسيمات عندما يتفاعل مع الذرّات والإلكترونات كما فسّر أينشتاين في ظاهرة التأثير الكهروضوئي والتي سنتطرّق إليها لاحقًا.

وكما ذكرنا سابقًا، سنتطرّق في هذا الفصل إلى الطبيعة الموجية للضوء، وسنهتمّ بدراسة انعكاسه وانكساره، وسنتناول تفصيليًّا دور قطع ضوئية مختلفة مثل المرايا والمنشور والعدسات واستخدماتها في حياتنا اليومية.

دروس الفصل

الدرس الأوّل
- خواصّ الضوء

الدرس الثاني
- الانعكاس والانكسار عند السطوح المستوية

الدرس الثالث
- الانكسار عند السطوح الكروية
  - العدسات

الدرس 1-1

خواصّ الضوء
Properties of Light

الأهداف العامة

- يعدّد خواصّ الضوء الموجية.
- يميّز بين انعكاس الضوء وانكساره.
- يميّز بين البصريات الهندسية والبصريات الفيزيائية.
- يفسّر ظاهرة التداخل باستخدام الطبيعة الموجية للضوء.
- يفسّر ظاهرة الحيود باستخدام الطبيعة الموجية للضوء.
- يعرّف ظاهرة استقطاب الموجات الكهرومغناطيسية.
- يكتسب المهارة اليدوية عند إجراء الأنشطة العملية والقياسات المختلفة.

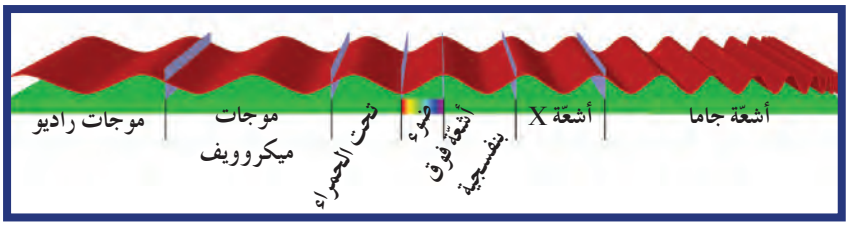
(شكل 125)

كما ذكرنا في مقدمة الفصل، للضوء نظريات تفسّر طبيعته.
فنظرية نيوتن التي تصف الضوء على أنّه جسيمات تسير بخطّ مستقيم ويُمثَّل بشعاع قد استُخدِمت في دراسة انعكاس الضوء وانكساره في البصريات الهندسية Geometrical Optics.
أمّا النظرية الموجية لهيجنز التي تعتبر الضوء موجات، فيمكنها أن تفسّر ظواهر أخرى كالتداخل والحيود اللذين لا يمكن تفسيرهما باستخدام البصريات الهندسية التي تهمل الخواصّ الموجية للضوء. فتفسير هاتين الظاهرتين وغيرهما يحتاج إلى علم البصريات الفيزيائية Physical Optics القادر على إغناء علم البصريات بتفسير ظواهر جديدة من دون أن تنقض ما أثبتته البصريات الهندسية بالتجربة حول قوانين الانعكاس والانكسار.
في هذا الدرس، سنعرّف الضوء وسنسترجع ما درسناه عن قوانين الانعكاس والانكسار، وسنتعرّف ظواهر الحيود والتداخل والاستقطاب مستخدمين الخواصّ الموجية للضوء.

1. الضوء Light

إنّ الشحنات الكهربائية المعجّلة أو الشحنات الكهربائية التي تهتزّ تطلق موجات طاقة تنتشر بجزء كهربائي وجزء مغناطيسي وتسمّى موجات كهرومغناطيسية Electromagnetic Waves.

الضوء المرئي Light هو موجة كهرومغناطيسية وهو جزء صغير من طيف الموجات الكهرومغناطيسية التي تضمّ موجات الراديو والميكروويف وتحت الحمراء وفوق البنفسجية والأشعّة السينية X–RAYS وأشعّة جاما وغيرها (شكل 126).



(شكل 126)
الطيف الكهرومغناطيسي

من الخواصّ العامّة للموجات الكهرومغناطيسة، أنّها تنتقل في الفراغ بسرعة ثابتة تساوي $c = (3 \times 10^8)m/s$. تختلف سرعة الضوء المنتقل في الوسط باختلاف الكثافة الضوئية للوسط، فهي تقلّ مع زيادة الكثافة الضوئية للأوساط الشفّافة إلى أن تصبح صفرًا في الأوساط غير الشفّافة.

ومن المهمّ الإشارة إلى أنّ الموجات الضوئية هي موجات مستعرضة تنتشر في جميع الاتّجاهات حيث تنعكس على السطوح اللامعة والمصقولة، وتنكسر على السطوح الفاصلة بين وسطين شفّافين. كما أنها تتميّز بخواصّ التداخل والحيود والاستقطاب والتي سنتناولها تفصيليًّا في سياق الدرس.

2. انعكاس الضوء وانكساره

Reflection and Refraction of Light

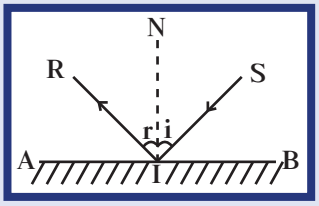
عند سقوط موجة ضوئية على سطح شفّاف يفصل بين وسطين مختلفين، يرتدّ بعض من طاقة الضوء أو كلّها في الوسط، ويُسمّى هذا بالانعكاس. وقد ينفذ بعض من الطاقة إلى الوسط الثاني ويُسمّى هذا بالانكسار. وفي الكثير من الأحيان، تكون هاتان الظاهرتان مترافقتين. ولكن سنتناول كلًّا منهما على حدة في سياق الدرس تسهيلًا لدرسهما.

سنستخدم البصريات الهندسية لدراسة هاتين الظاهرتين وسنمثّل الضوء بشعاع لأنّ استخدام البصريات الفيزيائية والسلوك الموجي لموجة الضوء لن يضيف أيّ جديد على قوانين الظاهرتين.

1. انعكاس الضوء Reflection

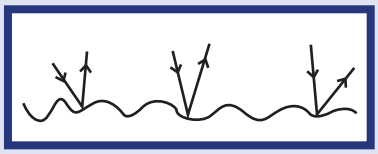
1.3 تعريف Definition

إنّ التغيّر المفاجئ في اتّجاه شعاع الضوء على سطح عاكس يُسمّى الانعكاس Reflection. ففي الشكل (127)، AB سطح عاكس، وIN العمود على السطح عند نقطة سقوط الشعاع الساقط SI بزاوية سقوط $\hat{i}$، بينما IR شعاع منعكس يصنع مع العمود زاوية انعكاس $\hat{r}$.



(شكل 127)
انعكاس منتظم

إذا كان السطح العاكس مصقولًا (مرآة على سبيل المثال)، ترتدّ الأشعّة المتوازية الساقطة عليه بشكل متوازٍ (شكل 127)، ويُسمّى انعكاسًا منتظمًا. أمّا إذا كان السطح غير مصقول خشنًا فإنّ الأشعّة الساقطة تنعكس في اتّجاهات عديدة ويُسمّى انعكاسًا غير منتظم (شكل 128). إنّ معظم ما نراه من حولنا هو نتيجة الانعكاس غير المنتظم.


(شكل 128)
انعكاس غير منتظم

2.3 قانونا الانعكاس Laws of Reflection

تظهر التجارب قانوني الانعكاس كما يلي:

2. **القانون الأوّل:** الشعاع الضوئي الساقط والشعاع الضوئي المنعكس والعمود المقام عند نقطة السقوط على السطح العاكس تقع جميعًا في مستوى واحد عمودي على السطح العاكس.
3. **القانون الثاني:** زاوية السقوط تساوي زاوية الانعكاس، أي أنّ: $\hat{i} = \hat{r}$

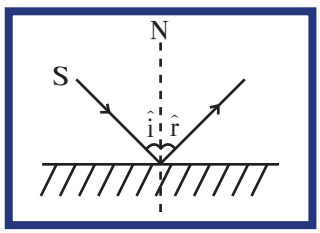
يُسمّى هذان القانونان قانوني ديكارت.

أمّا إذا سقط الشعاع الساقط عموديًّا على السطح العاكس، أي بزاوية سقوط $\hat{i} = 0$، فإنّه يرتدّ على نفسه بزاوية $\hat{r} = 0$.

مثال (1)

إذا كانت الزاوية بين الشعاع الساقط على سطح مصقول أملس والشعاع المنعكس تساوي (80^{o}) (شكل 129).

أُحسب مقدار كلّ من زاوية السقوط وزاوية الانعكاس.



(شكل 129)

طريقة التفكير في الحلّ

1. **حلّل:** أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: الزاوية بين الشعاع الساقط والشعاع المنعكس: $a = 80^{o}$

غير المعلوم: زاوية السقوط: $\hat{i} = ?$

زاوية الانعكاس: $\hat{r} = ?$

2. **أُحسب غير المعلوم.**

باستخدام الشكل (129)، نكتب: $a = \hat{i} + \hat{r}$

وباستخدام القانون الثاني للانعكاس: $\hat{i} = \hat{r}$

مثال (1) (تابع)

وباستبدال زاوية الانعكاس بزاوية السقوط، نحصل على:

$$a = \hat{i} + \hat{i}$$

$$80 = \hat{i} + \hat{i} = 2\hat{i} \Rightarrow \hat{i} = \frac{80}{2} = 40$$

وبالتالي يساوي مقدار زاوية الانعكاس 40° أيضًا.

3. **قيّم:** هل النتيجة مقبولة؟

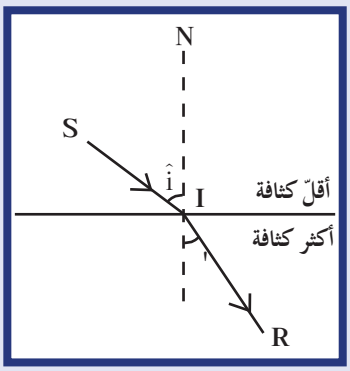
إنّ النتيجة مقبولة ويمكن التحقّق منها تجريبيًّا.

4. الانكسار Refraction of Light

1.4 تعريف Definition

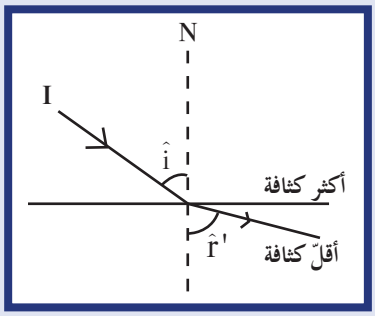
الانكسار عبارة عن التغيّر المفاجئ في اتّجاه شعاع الضوء عند مروره بشكل مائل على السطح الفاصل بين وسطين شفّافين مختلفين بالكثافة الضوئية بسبب تغيُّر سرعته.

عندما ينتقل شعاع ضوئي من وسط أقلّ كثافة ضوئية إلى وسط آخر أكبر كثافة ضوئية، فإنّه ينكسر مقتربًا من العمود (شكل 130)، أي أنّ زاوية السقوط $\hat{i}$ تكون أكبر من زاوية الانكسار $\hat{r}'$.



(شكل 130)

عندما ينتقل شعاع ضوئي من وسط أكبر كثافة إلى وسط آخر أقلّ كثافة ضوئية، فإنّه ينكسر مبتعدًا عن العمود (شكل 131)، أي أنّ زاوية السقوط $\hat{i}$ تكون أصغر من زاوية الانكسار $\hat{r}'$.



(شكل 131)

تحسب الكثافة الضوئية للوسط بالعلاقة التالية: $n = \frac{c}{v}$

حيث إنّ c هي سرعة الضوء في الفراغ وتساوي (3×10^8)m/s، و v هي سرعة الضوء في الوسط وتقاس أيضًا بوحدة m/s.

2.4 قانونا الانكسار Laws of Refraction

انطلاقًا من العديد من التجارب، استطاع الفيزيائيون صياغة قانوني انكسار الضوء على الشكل التالي:

1. **القانون الأوّل:** الشعاع الضوئي الساقط والشعاع الضوئي المنكسر والعمود عند نقطة السقوط على السطح الفاصل تقع جميعًا في مستوًى واحد عمودي على السطح الفاصل.
2. **القانون الثاني:** النسبة بين جيب زاوية السقوط للشعاع الساقط في الوسط الأوّل إلى جيب زاوية الانكسار في الوسط الثاني تساوي نسبة ثابتة تُسمّى معامل الانكسار من الوسط الأوّل إلى الوسط الثاني ويُرمَز لها بالحرف $n_{2/1}$.

أي أنّ $\frac{\sin \hat{i}}{\sin \hat{r}} = n_{2/1} \quad \Leftarrow \quad \frac{\sin \hat{i}}{\sin \hat{r}} = \frac{n_2}{n_1}$

أو $n_1 \sin \hat{i} = n_2 \sin \hat{r}'$

وهذا ما يعرف بقانون سنل.

إذا سقط شعاع الضوء عموديًّا على السطح الفاصل بين الوسطين الشفّافين المختلفين بالكثافة الضوئية، أي $\hat{i} = 0^\circ$، فإنّ الضوء يكمل مساره من دون أيّ انكسار، أي $\hat{r}' = 0^\circ$.

أمّا إذا كان الوسط الذي يسقط فيه الشعاع الضوئي هو الفراغ أو الهواء حيث تساوي الكثافة الضوئية $n_1 = 1$، فإنّ النسبة بين جيب زاوية السقوط للشعاع في الهواء إلى جيب زاوية الانكسار في الوسط الثاني تساوي معامل الانكسار المطلق للوسط ويُرمَز له بالحرف n، أي تصبح:

$$\sin \hat{i} = n \sin \hat{r}'$$

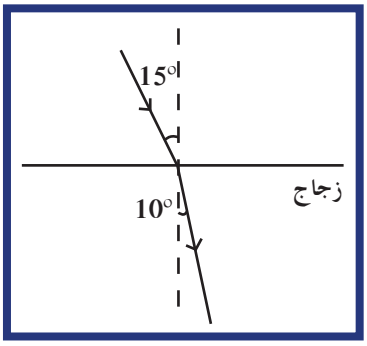
مثال (2)

أُسقط شعاع ضوئي أحادي اللون على قطعة ضوئية من الزجاج بزاويتي السقوط(15°) و(45°)، فكانت زاويتا الانكسار على التوالي (10°) و (28°) كما هو موضّح في الشكلين (132) و(133).

(أ) أُحسب معامل الانكسار المطلق للزجاج لكلّ زاوية سقوط.

(ب) ماذا تستنتج عن مقدار معامل الانكسار المطلق للزجاج؟

(جـ) أُحسب زاوية السقوط إذا كانت زاوية الانكسار (35°).



(شكل 132)

طريقة التفكير في الحلّ

1. حلِّل: أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: زاويتا السقوط: $\hat{i}_1 = (15^\circ)$ و $\hat{i}_2 = (45^\circ)$

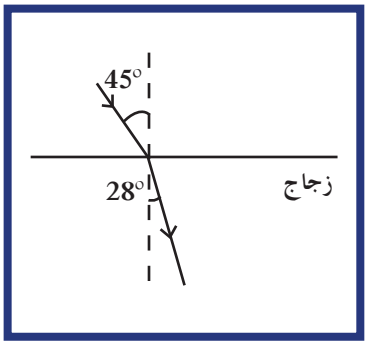
زاويتا الانكسار على التوالي: $\hat{r}'_1 = (10^\circ)$ و $\hat{r}'_2 = (28^\circ)$

غير المعلوم:

(أ) معامل الانكسار المطلق للزجاج: $n = ?$

(ب) استنتاج

(جـ) زاوية السقوط إذا كانت زاوية الانكسار: $\hat{r}' = (35^\circ)$



(شكل 133)

2. أُحسب غير المعلوم.

(أ) باستخدام قانون الانكسار الثاني:

$$\sin \hat{i} = n \sin \hat{r}'$$

وبالتعويض عن المقادير المعلومة نحصل على:

$$n = \frac{\sin 15}{\sin 10} = 1.49$$

$$n = \frac{\sin 45}{\sin 28} = 1.506$$

(ب) إنّ مقدار معامل الانكسار المطلق للزجاج ثابت لا يتغيّر مهما تغيّرت زوايا السقوط.

(جـ) باستخدام قانون سنل الثاني، وبالتعويض عن مقدار $\hat{r}' = 35^\circ$ وعن $n = 1.5$ نحصل على:

$$\sin \hat{i} = 1.5 \sin 35 = 0.860$$

$$\hat{i} = 59.21^\circ$$

مثال (2) (تابع)

3. **قيّم:** هل النتيجة مقبولة؟
النتيجة مقبولة فزاوية السقوط أكبر من زاوية الانكسار لأنّ الضوء ينتقل من وسط أقلّ كثافة ضوئية إلى وسط أكبر كثافة ضوئية.

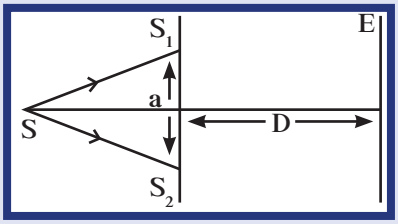
5. البصريات الفيزيائية Physical Optics

تمّ دراسة ظاهرتي الانعكاس والانكسار باستخدام مبادئ البصريات الهندسية، حيث يمثَّل الضوء بشعاع ويتمّ دراسة مساره اعتمادًا على مبدأ الانتشار المستقيم عندما يمرّ الضوء من وسط إلى آخر أو عندما ينعكس على سطح المرآة. ولكن ظواهر أخرى مثل الحيود والتداخل والتي سنتناولها في سياق الدرس، لا يمكن تفسيرها وتحليلها باستخدام البصريات الهندسية التي تتجاهل الخواصّ الموجية للضوء، بل نحن بحاجة إلى دراسة الخواصّ الموجية للضوء التي تهتمّ بما أهملته البصريات الهندسية من خواصّ موجية للضوء.

6. تداخل الضوء Interference of Light

لتحليل ظاهرة تداخل الضوء، وللتأكيد على الطبيعة الموجية للضوء، سنعرض تجربة الشقّ المزدوج لتوماس يونج (Thomas Young 1773 – 1829) التي أكّدت صحّة نظرية هيجنز الموجية.

فتجربة الشقّ المزدوج لم تُثبت الخواصّ الموجية للضوء فحسب، إنّما سمحت بقياس الطول الموجي للضوء المُستخدَم.



(شكل 134)

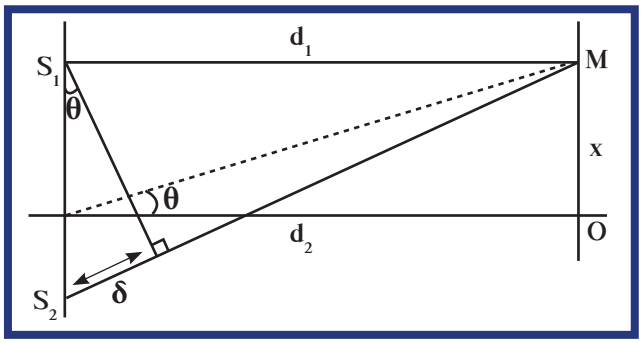
تجربة الشقّ المزدوج

استخدم يونج مصدرًا ضوئيًّا أحادي التردّد S، له طول موجي λ وموضوع خلف لوحة فيها فتحتان متوازيتان ضيّقتان جدًّا S_1 و S_2 تفصل بينهما مسافة a وتبعدان عن حائل E مسافة D (شكل 134).

عندما يصدر المصدر الضوئي S موجة ضوئية، تصل هذه الموجة إلى الفتحتين S_1 و S_2 في اللحظة نفسها بحيث تمثّلان مصدرين ضوئيين يبعثان موجات متزامنة متّفقة الطور لتتداخل وتعطي على الحائل أهداب مضيئة ومظلمة.

فعندما يكون فرق المسير δ بين الموجات المتداخلة مساويًا $n\lambda$ يحدث تداخل بنائي، أمّا إذا كان فرق المسير δ بين الموجات المتداخلة مساويًا $(2n + 1)\frac{\lambda}{2}$ يحدث تداخل هدمي.

لدراسة التداخل رياضيًّا، ولإيجاد موضع الأهداب المضيئة والمظلمة على الحائل بالنسبة إلى الهدب المركزي الذي يكون مضيء دائمًا، نستخدم الشكل (135) التالي:



(شكل 135)

لنأخذ نقطة M على الحائل تبعد مسافة x عن النقطة O. باستخدام الشكل الهندسي، نجد أنّ:

$$\sin\theta = \frac{d_2 - d_1}{s_1 s_2}$$

حيث إنّ $d_2 - d_1$ تساوي فرق المسير δ بين الموجتين.

ومن الرسم أيضًا نستنتج أنّ:

$$\tan\theta = \sin\theta = \frac{x}{D}$$

وحيث إنّ الزاوية التي يساوي مقدارها أصغر من 10° تكون:

$$\sin\theta = \tan\theta = \theta \text{ rad}$$

يمكننا أن نستنتج أنّ:

$$\frac{x}{D} = \frac{\delta}{a}$$

وعليه، تُحدَّد مواقع الأهداب المضيئة على الحائل بالعلاقة الرياضية:

$$x = \frac{n\lambda D}{a}$$

حيث $n = 0, 1, 2, \ldots$ تمثّل رتبة الهدب المضيء و$n = 0$ تمثّل الهدب المركزي المضيء.

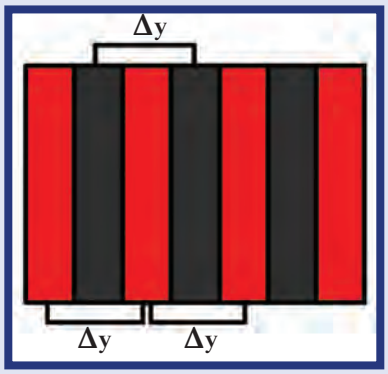
أمّا الأهداب المظلمة، فيُحدَّد موقعها على الحائل بالعلاقة الرياضية:

$$x = \frac{(2n + 1)\lambda D}{2a}$$

وتمثّل n رتبة الهدب المعتم علمًا أنّه لا يوجد هدب مركزي مظلم.

كما يمكننا، باستخدام المعادلات السابقة، أن نستنتج أنّ المسافة بين هدبين متتاليين «البعد الهدبي Interfringe Distance» من النوع نفسه (شكل 136) تساوي:

$$\Delta y = \frac{\lambda D}{a} \quad \text{(البعد الهدبي)}$$



(شكل 136)
تمثّل Δy المسافة بين هدبين من النوع نفسه.

مثال (3)

في تجربة يونج، كانت المسافة بين الشقّين تساوي (0.05)cm، والمسافة بين لوح الشقّين والحائل تساوي (5)m. إذا كان الهدب السادس المضيء يبعد عن الهدب المركزي (3)cm، أُحسب:

(أ) الطول الموجي للضوء المُستخدَم.

(ب) المسافة بين هدبين متتاليين مضيئين.

طريقة التفكير في الحلّ

1. حلِّل: أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: المسافة بين الشقّين: $a = (0.05)\text{cm}$

المسافة بين الشقّين والحائل: $D = (5)\text{m}$

رتبة الهدب المضيء: $n = 6$

المسافة بين الهدب المركزي والهدب السادس: $x = (3)\text{cm}$

غير المعلوم: **(أ)** الطول الموجي: $\lambda = ?$

(ب) المسافة بين هدبين متتاليين من النوع نفسه: $\Delta y = ?$

2. أُحسب غير المعلوم.

(أ) باستخدام المعادلة $x = \frac{n\lambda D}{a}$، أي $\lambda = \frac{x\,a}{n\,D}$، وبالتعويض عن المقادير المعلومة، نحصل على:

$$\lambda = \frac{3 \times 0.05}{6 \times 500} = (5 \times 10^{-5})\text{cm}$$

(ب) باستخدام المعادلة التالية: $\Delta y = \frac{\lambda D}{a}$

وبالتعويض عن المقادير المعلومة نحصل على:

$$\Delta y = \frac{5 \times 10^{-7} \times 5}{0.05 \times 10^{-2}} = (5 \times 10^{-3})\text{m}$$

3. قيِّم: هل النتيجة مقبولة؟

النتيجة مقبولة وتتناسب مع مقدار الكمّيات المعطاة ويمكن التحقّق منها بالتجربة.

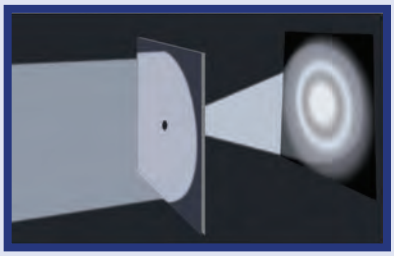
7. حيود الضوء Diffraction

الحيود من الخواص المميّزة للموجات الميكانيكية والكهرومغناطيسية.

نعرّف حيود الضوء Diffraction بأنّه ظاهرة انحراف الموجة الضوئية عن مسارها الأصلي عندما تمرّ من خلال ثقب ضيّق أو تمرّ على حافّة حادّة أثناء انتشارها. يمكن ملاحظة هذه الظاهرة بشكل واضح وبارز عندما تكون أبعاد الفتحة تقريبًا مساوية للطول الموجي λ للموجة المارّة في الفتحة. وبما أنّ الأطوال الموجية λ للضوء المرئي صغيرة جدًّا، فإنه يحتّم أن تكون الفتحة التي سيمرّ الضوء من خلالها ضيّقة جدًّا من أجل رؤية ظاهرة الحيود. فالتجارب تظهر أنّه من أجل ملاحظة ظاهرة الحيود لضوء أحادي اللون على حائل موازٍ للمستوى حيث الفتحة، ويبعد عنه مسافة D، يجب أن يكون اتّساع الفتحة a مساوٍ أو أصغر من (1)mm. وكلّما كان اتّساع الفتحة أقلّ، كانت ظاهرة الحيود أكثر وضوحًا (شكل 137).

(شكل 137)
كلّما كانت الفتحة أقلّ اتّساعًا كانت ظاهرة الحيود أكثر وضوحًا.

فإذا قمنا تجريبيًّا بإضاءة ثقب دائري قطره صغير أقلّ من (1)mm بواسطة مصدر ضوئي أحادي اللون (شكل 138)، فسوف نشاهد على الحائل أهداب دائرية مضاءة ومظلمة متعاقبة نتيجة لظاهرة الحيود، تتميّز بشدّة إضاءة مركزها عن باقي الأهداب المضاءة وبانخفاض شدّة إضاءة الأهداب الأخرى كلّما ابتعدنا عن المركز. وتتميّز هذه الأهداب أيضًا بأنّ عرض الهدب المركزي المضاءة يساوي تقريبًا ضعف عرض الأهداب المضاءة الأخرى.



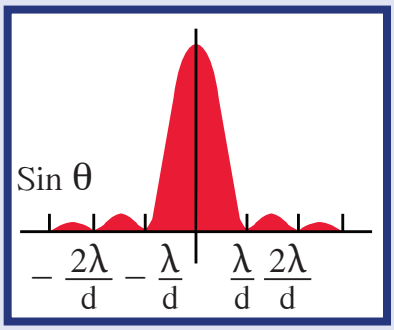
(شكل 138)

كما تُظهر تجارب الحيود، أنّ المساحة المضاءة على الحائل تتجاوز (ولو بقليل) المساحة التي كان من المفترض تغطيتها لو انتشر الضوء بخطوط مستقيمة من دون انحراف.

(شكل 139)
أهداب مضاءة ومظلمة أفقية متعاقبة واتّجاهها عمودي على اتّجاه الشقّ

ولتفسير هذه المشاهدات، نعتمد على مبدأ هيجنز الذي يرتكز على أنّ جميع نقاط الفتحة تعمل وكأنّها مصادر ضوء ثانوية تبعث الضوء في جميع الاتّجاهات. وهذا يفسّر سبب اتّساع المساحة المضاءة على الحائل عمّا نتوقّعه من دون انحراف الضوء. وباستخدام ظاهرة تداخل الموجات الضوئية نفسّر ظهور الأهداب المضيئة والمظلمة على الحائل.

وبما أنّ القسم الأكبر من الموجات المتداخلة يتّجه نحو وسط الحائل، فإنّ هذا يفسّر سبب شدّة إضاءة المركز الأكبر بالمقارنة مع شدّة إضاءة الأهداب المضاءة حوله حيث تتداخل الأعداد الأكبر من الموجات متّفقة الطور. أمّا حيث تتداخل الموجات متعاكسة الطور فإنّ شدّة الإضاءة تساوي صفرًا وهذا يفسّر سبب تشكّل الأهداب المظلمة.



(شكل 140)

أمّا إذا استبدلنا الفتحة الدائرية بشقّ طولي واستخدمنا في إضاءته ضوء أحادي اللون، فإنّ ظاهرة الحيود تنتج على الحائل أهداب مضاءة ومظلمة أفقية متعاقبة واتّجاهها عمودي على اتّجاه الشقّ (شكل 139) كما تتميّز هذه الأهداب بمركزها الشديد الإضاءة بالمقارنة مع باقي الأهداب المضاءة وبعرضها الذي يساوي ضعف عرض باقي الأهداب المضاءة (شكل 140). ومن التطبيقات الحياتية على ظاهرة الحيود، استخدام حيود الأشعّة السينية للكشف عن محاور بلّورات المعادن والأحجار الكريمة ومستوياتها وفي دراسة جزيئات الـ DNA.

8. استقطاب الضوء Polarization

الاستقطاب Polarization هو تكوين حزمة من الموجات الكهرومغناطيسية التي تكون اهتزازاتها جميعًا في مستوًى واحد، ولا يحدث إلّا للموجات المستعرضة.

نعلم أنّ موجات الضوء هي موجات كهرومغناطيسية مستعرضة، تتكوّن عندما يهتزّ مجال كهربائي من سطح مستوٍ معيّن ومجال مغناطيسي في سطح مستوٍ متعامد عليه.

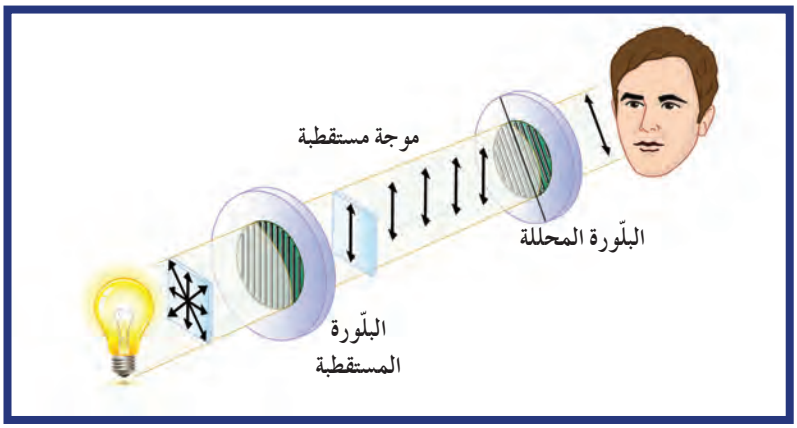
سنهتمّ بالمجال الكهربائي فحسب عندما نتحدّث عن الاستقطاب، لأنّ المجال المغناطيسي يهتزّ دائمًا باتّجاه متعامد عليه.

إذا أخذنا موجة كهرومغناطيسية واحدة، تكون هذه الموجة مستقطبة لأنّ المجال الكهربائي يهتزّ في سطح مستوٍ ثابت. أمّا إذا أخذنا ضوءًا عاديًّا، نلاحظ أنّه يحتوي على عدد كبير من الموجات التي تهتزّ على مستويات مختلفة، ويكون الضوء عندئذٍ غير مستقطب.

توجد في الطبيعة بلّورات جزيئاتها متنوّعة ومرتّبة ترتيبًا خاصًّا، بحيث لا يُسمح بالمرور إلّا للموجات الضوئية المستقطبة في سطح مستوٍ معيّن. ولكلّ من هذه البلّورات محور استقطاب معيّن نسمّيه «المحور البصري للبلّورة»، حيث يحتوي بعض هذه البلّورات على أكثر من محور بصري واحد.

ومن أهم هذه البلّورات: بلّورة التورمالين الطبيعي ومركّب البولاروید الصناعي، فهذه البلّورات تجعل القسم الأكبر من الضوء الخارج منها مستقطبًا في مستوًى واحد، في حين يكون القسم الباقي مستقطبًا في محور ثانٍ متعامد مع المحور الأوّل.

فإذا وضعنا بلّورة مستقطبة في طريق حزمة من الأشعّة الضوئية غير المستقطبة (شكل 141)، فإنّها تسمح للموجات الضوئية المستقطبة في مستوًى معيّن بالمرور، في حين تمنع مرور الموجات الأخرى.



(شكل 141)
استقطاب الموجات الضوئية

أمّا إذا وضعنا بلّورة ثانية وأدرناها بحركة دائرية، فنرى أنّ الضوء يمرّ خلالها بقوّة تزيد وتقلّ وفق الزاوية بين المحور البصري لهذه البلّورة، التي تُسمّى البلّورة المحلِّلة والمحور البصري للبلّورة الأولى التي تُسمّى البلّورة المستقطبة. وإذا كان المحور البصري للبلّورة المحلِّلة عموديًّا على المحور البصري للبلّورة المستقطبة، فإنّ مرور الضوء يتوقّف.

من التطبيقات على الاستقطاب، نظّارات البولاروید التي تحمي العين من أشعّة الشمس والضوء الساطع، كما يُستخدَم النافذ في التصوير بوضع البولاروید أمام عدسات آلة التصوير للتحكّم بشدّة الضوء الساقط على آلة التصوير، ويُستخدَم في مركز المحاليل الفعّالة ضوئيًّا التي لها القدرة على تغيير مسار الضوء المستقطب، فهي إمّا تقوم بتدويره إلى اليمين أو نحو اليسار.

فقرة إثرائية

مقياس الاستقطاب

يُستخدم مقياس الاستقطاب لقياس تركيز السكّريات البسيطة في المحاليل. يختلف اتّجاه تدوير مستوى الضوء المستقطب باختلاف نوع المحاليل الفعّالة ضوئيًّا. فالفركتوز (الليفولوز)، مثلًا، يسبّب تدوير مستوى الضوء المستقطب إلى اليسار بينما يقوم الديكستروز بتدوير الضوء المستقطب الخطّي إلى اليمين.

تعتمد درجة الدوران على الطول الموجي للضوء الأحادي اللون، والتدوير النوعي وكثافتها وطول المسار الضوئي.

يتمّ استخدام درجة التدوير لتحديد التركيز، ولتقدير نقاوة الموادّ ومتابعة سير التفاعلات وعمليات التجزيء. تسمّى هذه العملية بالمعايرة الاستقطابية.

مراجعة الدرس 1-1

أوّلًا – عرِّف انكسار الضوء، واكتب قانوني الانكسار.

ثانيًا – عرِّف انعكاس الضوء، واكتب قانوني الانعكاس.

ثالثًا – أعطِ الشرط الواجب توفّره لرؤية ظاهرة الحيود.

رابعًا – اكتب الشروط الواجب توفرها في تجربة الشقّ المزدوج ليونج لحدوث ظاهرة التداخل.

خامسًا – إذا كان معامل الانكسار للماء $\frac{4}{3}$ وسرعة الضوء في الفراغ تساوي $c = (3 \times 10^8)\text{m/s}$، أُحسب سرعة الضوء في الماء.

سادسًا – إنّ معامل الانكسار المطلق للماء يساوي 1.33 ومعامل الانكسار المطلق للزجاج يساوي 1.54. أُحسب معامل انكسار الزجاج بالنسبة إلى الماء.

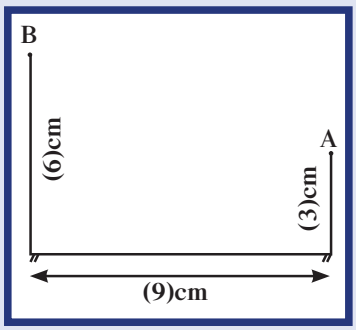
سابعًا – سقط شعاع ضوئي على سطح زجاجي بزاوية سقوط 30°. أُحسب زاوية الانكسار، علمًا أنّ معامل الانكسار المطلق للزجاج يساوي 1.5.

ثامنًا – أُرسِل شعاع ضوئي من النقطة A التي تبعد عن سطح مرآة مستوية (3)cm، ليصل إلى النقطة B التي تبعد عن السطح (6)cm بعد انعكاسه. علمًا أنّ المسافة بين مسقط النقطتين على المرآة تساوي (9)cm (شكل 142):

(أ) أُحسب زاوية السقوط وزاوية الانعكاس.

(ب) وضِّح بالرسم البياني ظاهرة الانعكاس.

تاسعًا – في تجربة الشقّ المزدوج لتوماس يونج، كانت المسافة الفاصلة بين الفتحتين الضيقتين $(2 \times 10^{-4})\text{m}$ والمسافة بين الشقّ المزدوج والحائل (1)m والمسافة بين هدبين متتاليين مضيئين $(2.5 \times 10^{-3})\text{m}$. أُحسب الطول الموجي للضوء أحادي اللون المُستخدَم.



(شكل 142)

الدرس 1-2

الانعكاس والانكسار عند السطوح المستوية
Reflection and Refraction on Plane Surfaces

الأهداف العامة

- يعرّف ظاهرة الانعكاس.
- يفسّر تطبيقات مختلفة لظاهرة الانعكاس على السطوح المستوية والكروية.
- يفسّر بعض الظواهر الطبيعية مثل الانعكاس الكلّي الداخلي والسراب.
- يحقّق القانون العام للمرايا.
- يعيّن البُعد البؤري للمرايا الكروية.
- يعرّف ظاهرة الانكسار على السطوح المستوية.
- يعرّف المنشور الثلاثي ودوره في تحلُّل الضوء الأبيض.
- يميّز المنشور الرقيق.
- يعرّف الصفيحة المتوازية الوجهين.
- يكتسب المهارة اليدوية عند إجراء الأنشطة العلمية والقياسات المختلفة.

(شكل 143)

في الدرس السابق، تناولنا ظاهرتي الانعكاس والانكسار بشكل عامّ عندما تعرّفنا خواصّ الضوء، ودرسنا القوانين التي تسمح لنا بتفسير تلك الظاهرتين اللتين لم تحتاجا إلى البصريات الفيزيائية لتحليلها، بل اكتفتا باعتبار الضوء شعاعًا ينطلق من مصدر ضوئي.

إنّ ما درسناه سابقًا لا يُعَدّ أكثر من مقدّمة لتعريف هاتين الظاهرتين بشكل علمي، ولكن من خلال مشاهدتنا اليومية، نلاحظ اختلاف نتائج الانعكاس والانكسار باختلاف نوع السطح الذي يسقط عليه الشعاع القادم من المصدر.

ففي بعض الأحيان، تكون الصور المنعكسة من سطح عاكس أكبر من الجسم نفسه، وتكون أحيانًا مساوية له وأحيانًا أخرى أصغر منه. وتكون في بعض الأحيان صورًا حقيقية يمكن مشاهدتها على حائل، وأحيانا أخرى صورًا وهمية لا يمكن التقاطها على حائل.

لذلك، سنتناول في هذا الدرس ظاهرة الانعكاس تفصيليًّا وسنميّز بين الانعكاس على السطوح المستوية والانعكاس على السطوح الكروية.

كما سنستخدم المعادلات الرياضية التي تسمح لنا بتحديد موقع صور الأجسام المنعكسة وقياسها من على السطوح المستوية وعلى السطوح الكروية. وسندرس الانكسار على السطوح المستوية لكلّ من المنشور واللوح المتوازي السطوح (الصفيحة المتوازية الوجهين)، تاركين دراسة الانكسار على السطوح الكروية للدرس اللاحق عند دراسة العدسات اللامّة والمفرّقة.

1. الانعكاس على المرايا المستوية

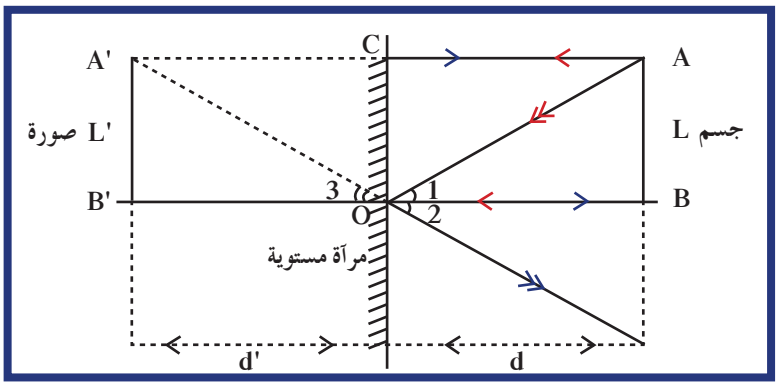
Reflection on Plane Mirrors

المرايا Mirrors هي سطوح ناعمة عاكسة، مصنوعة من معدن لامع أو من زجاج طُلِيَ أحد سطوحه بمادّة مثل التين (Tin) أو الزئبق أو الفضّة.

عندما تنظر مباشرة في المرآة، ترى صورتك المنعكسة وما يحيط بك من أشياء، فالصورة تكوّنت نتيجة انعكاس الضوء. وقد تختلف طبيعة الصورة واتّجاهها وقياسها باختلاف شكل السطح العازل. **وعندما يكون السطح العاكس مستويًا، تُسمّى المرايا مرايا مستوية Plane Mirrors.**

كيف تتكوّن الصورة بالمرايا المستوية؟ ولماذا تظهر الصورة داخل المرآة؟ هل هذه الصورة هي صورة حقيقية أو وهمية؟ للإجابة عن هذه الأسئلة، سنجد صورة الجسم AB بواسطة الرسم وباستخدام قوانين الانعكاس كما يلي:

AB جسم وُضع عموديًّا وبشكل موازٍ لمرآة مستوية على بعد BO من المرآة، كما في الشكل (144).



(شكل 144)

ينعكس شعاع الضوء الصادر من A عند اصطدامه بسطح المرآة العاكس وفقًا لقانوني الانعكاس، ويبدو وكأنّه قادم من النقطة 'A. وبالمثل، ينعكس الشعاع القادم من النقطة B على السطح وكأنّه قادم من النقطة 'B، وهذا هو حال جميع النقاط المكوِّنة للجسم AB. بالتالي، تتكوّن صورة الجسم 'A'B، التي تبدو وكأنّها داخل المرآة على مسافة من سطح المرآة تساوي بُعد الجسم عن سطح المرآة، وتُسمّى صورة تقديرية وهمية. ومن مميّزات هذه الصورة أنّها صورة معتدلة غير مقلوبة ومساوية لطول الجسم، أي أنّ تكبير المرآة مستوية السطح يساوي M = 1، علمًا أنّ التكبير يُحسَب بالعلاقة التالية:

$$M = \frac{\text{طول الصورة}}{\text{طول الجسم}}$$

وعليه، يمكننا أن نلخّص خواصّ الصورة المتكوّنة بمرآة مستوية بما يلي:

- **تعطي المرآة المستوية Plane Mirrors لكلّ جسم AB صورة تقديرية 'A'B معتدلة مساوية في قياسها للجسم ومتماثلة معه بالنسبة إلى سطحها.**

ومن الخواصّ المهمّة للصور المتكوّنة بالمرايا المستوية نذكر أيضًا انعكاس (انقلاب) اليسار واليمين Apparent Right Left Reversal. فقد تلاحظ، على سبيل المثال، عند رفع يدك اليمنى أنّ يدك اليسرى سترتفع في المرآة. وإذا قمت بتسريح شعرك إلى جهة محدّدة ستبدو التسريحة وكأنّها إلى الجهة الثانية في صورتك على المرآة (شكل 145).

(شكل 145)
من خواصّ الصور المتكوّنة بالمرايا المستوية انقلاب الصورة من اليمين إلى اليسار.

مثال (1)

جسم طوله AB = (5)cm، وُضِع على مسافة (50)cm من مرآة مستوية.

(أ) أُحسب المسافة بين الجسم وصورته المتكوّنة.

(ب) أُحسب قياس الصورة 'A'B.

(جـ) أُحسب تكبير المرآة المُستخدَمة.

طريقة التفكير في الحلّ

1. حلِّل: أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: المسافة بين الجسم والمرآة: U = (50)cm

قياس طول الجسم: AB = (5)cm

غير المعلوم: **(أ)** المسافة بين الجسم وصورته: V = ?

(ب) قياس الصورة: A'B' = ?

(جـ) التكبير: M = ?

مثال (1) (تابع)

2. أُحسب غير المعلوم.

(أ) بما أنّ الصورة متماثلة مع الجسم بالنسبة إلى سطح المرآة، فإنّ المسافة بين الصورة والمرآة تساوي (50)cm. وعليه، تكون المسافة بين الجسم وصورته:

$$d_T = U + V = 50 + 50 = (100)cm$$

(ب) قياس الصورة A'B' يساوي قياس الجسم AB. وعليه،

$$A'B' = (5)cm$$

(جـ) باستخدام المعادلة: $M = \frac{\text{طول الصورة}}{\text{طول الجسم}}$

نحصل على: $M = \frac{A'B'}{AB} = \frac{5}{5} = +1$

3. قيّم: هل النتيجة مقبولة؟

إنّ النتيجة مقبولة وتتناسب مع معطيات المسألة ويمكن التحقّق منها تجريبيًّا.

2. الانعكاس على السطوح الكروية

Reflection on Spherical Surfaces

السطوح الكروية كما يشير اسمها هي قطع من كرة نصف قطرها r، تمّ قصّها من كرة وطُلِيَ أحد وجهيها الداخلي أو الخارجي بمادّة عاكسة لتصبح مرآة كروية. وبحسب السطح العاكس، يمكن تصنيف المرآة الكروية إلى نوعين:

عندما يكون السطح الخارجي هو السطح العاكس تُسمّى مرآة محدّبة Convex Mirror (شكل 146 أ).

وعندما يكون السطح الداخلي هو السطح العاكس تُسمّى مرآة مقعّرة Concave Mirror (شكل 146 ب).

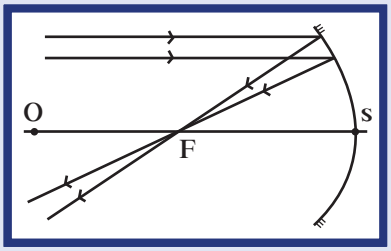
إنّ الخطّ الحامل لنصف القطر، والمارّ بمركز الكرة يُسمّى المحور الأساسي، ويتقاطع مع سطح المرآة بالقطب s، أي أنّ المسافة بين القطب ومركز الكرة تساوي نصف قطر الكرة (قطر التكوّر) التي تمّ قطع المرآة منها. نعرّف نقطة الوسط بين القطب ومركز الكرة ببؤرة المرآة ويُرمَز لها بالحرف F.

ومن مميّزات هذه النقطة في المرايا المقعّرة أنّ أيّ حزمة ضوئية موازية للمحور تنعكس مارّة بها كما في الشكل (147).

(أ)

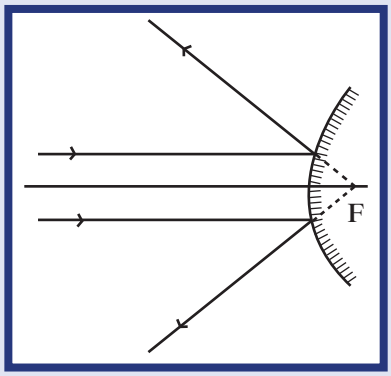
(ب)

(شكل 146)



(شكل 147)

أمّا في المرايا المحدّبة فإنّ الحزمة الضوئية الموازية للمحور تنعكس كأنّها منبعثة من البؤرة F (شكل 148).



(شكل 148)

وبناءً على الشكلين (147) و(148)، نسمّي المرايا المقعّرة مرايا لامّة أو مجمعة والمرايا المحدّبة مرايا مفرّقة.

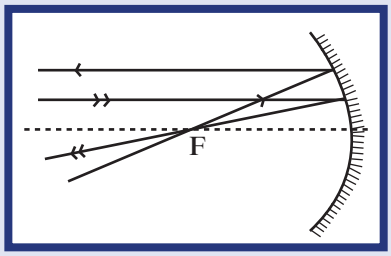
ونعرّف المسافة من قطب المرآة إلى البؤرة، أي المسافة SF التي تساوي OF، بالبُعد البؤري f، أي أنّ $f = \frac{r}{2}$.

1.2 رسم الأشعّة المنعكسة على المرايا الكروية

Drawing Reflected Rays on Spherical Mirrors

إنّ خواصّ الصورة المتكوّنة من الانعكاس على المرايا الكروية يُمكن تحديدها بالرسم الهندسي، وتكون برسم شعاعين من نقطة على الجسم أو أكثر وبتطبيق قوانين الانعكاس.

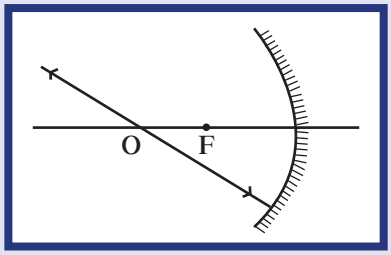
وتسهيلًا لتحديد صورة الجسم، يمكننا استخدام ثلاث حالات للأشعّة، وتُعتبَر مفاتيح لرسم الصورة، وهي:



(شكل 149)

1. شعاع موازٍ للمحور ينعكس مارًّا بالبؤرة.
2. شعاع مارّ بالبؤرة ينعكس موازيًا للمحور.
3. شعاع مارّ بالمركز ينعكس على نفسه.

ويظهر الشكلان (149) و(150) كيفية رسم تلك الأشعّة الثلاث على مرآة مقعّرة.



(شكل 150)

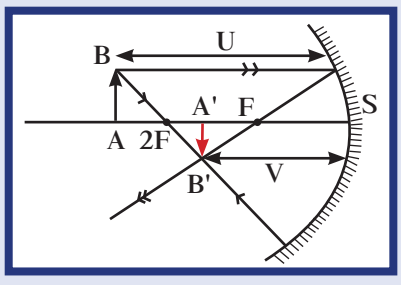
2.2 الصورة وطبيعتها The Image and its Nature

تتكوّن الصورة من تلاقي الأشعّة المنعكسة على المرايا، وتكون صورة حقيقية عندما يمكن استقبالها على حائل. أمّا الصورة التي تتكوّن من تلاقي امتددات الأشعّة المنعكسة والتي لا يمكن استقبالها على حائل فتكون صورًا تقديرية.

3.2 القانون العام لتحديد خواصّ الصورة المتكوّنة

General Law for Determining the Properties of the Formed Image

تتمثّل خواصّ الصورة المتكوّنة بتحديد موقعها بالنسبة إلى القطب S، وطبيعتها أي إذا كانت صورة حقيقية أو تقديرية، واتّجاهها، أي إذا كانت معتدلة أو مقلوبة، وأخيرًا بقياسها، أي إذا كانت أكبر من الجسم أو أصغر منه. ولدراسة هذه الخواصّ في مرآة مقعّرة، نأخذ الجسم AB ونضعه على مسافة U من القطب S. وباستخدام الرسم الهندسي نحدّد موقع الصورة المتكوّنة كما في الشكل (151). ونكتشف المسافة V بين الصورة المتكوّنة والقطب S.



(شكل 151)

باستخدام الرسم الهندسي، يمكن إيجاد العلاقة بين كلّ من البُعد البؤري f، والمسافة بين الجسم والقطب V، والصورة والقطب U والتي تتمثّل بالعلاقة الرياضية:

$$\frac{1}{U} + \frac{1}{V} = \frac{1}{f}$$

وتُسمّى هذه العلاقة القانون العام للمرايا، وتُستخدَم لجميع أنواع المرايا الكروية بفارق بسيط وهو أنّ استخدام البُعد البؤري موجب المقدار في المرايا المقعّرة $f > 0$ وسالب المقدار في المرايا المحدّبة $f < 0$.
أمّا التكبير M للمرايا الكروية فيُحسَب بالعلاقة:

$$M = \frac{\text{طول الصورة } A'B'}{\text{طول الجسم } AB}$$

كما ويُحسب بالعلاقة التالية:

$$M = \frac{\text{سالب بُعد الصورة عن المرآة}}{\text{بُعد الجسم عن المرآة}}$$

أي:

$$M = -\frac{V}{U}$$

وأثناء حلّ المسائل، يمكننا الاستفادة من قاعدة الإشارات وهي:

1. إذا كان بُعد الجسم U لجسم حقيقي تكون إشارة U موجبة.
   إذا كان بُعد الجسم U لجسم تقديري تكون إشارة U سالبة.
2. بُعد الصورة V يكون موجبًا إذا كانت الصورة حقيقية.
   بُعد الصورة V يكون سالبًا إذا كانت الصورة تقديرية.
3. التكبير M يكون موجب الإشارة إذا كانت الصورة معتدلة.
   التكبير M يكون سالب الإشارة إذا كانت الصورة مقلوبة.
4. البُعد البؤري لمرآة مقعّرة (لامّة) موجب.
   البُعد البؤري لمرآة محدّبة (مفرّقة) سالب.

مثال (2)

وُضع جسم طوله (2)cm على بُعد (20)cm من مرآة مقعّرة لها بُعد بؤري يساوي (15)cm.

(أ) حدِّد خواصّ الصورة المتكوّنة (طبيعتها، موضعها، اتّجاهها وقياسها).

(ب) أُرسم حزمة ضوئية منطلقة من نقطة في أعلى الجسم لتنعكس على المرآة.

طريقة التفكير في الحلّ

1. حلِّل: أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: المسافة بين الجسم والمرآة: $U = (20)cm$

قياس طول الجسم: $AB = (2)cm$

البُعد البؤري: $f = (+15)cm$، وهو موجب الإشارة لأنّ المرآة مقعّرة.

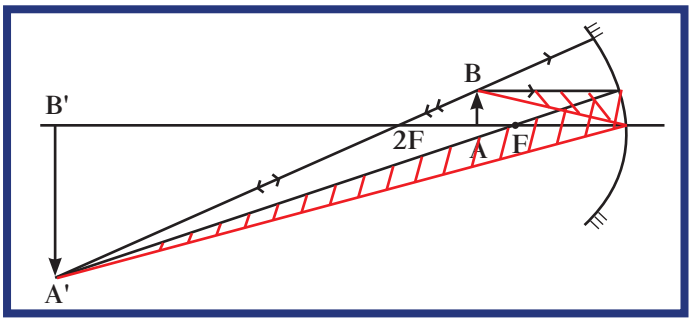
غير المعلوم: **(أ)** خواصّ الصورة (طبيعتها، موضعها $V = ?$، اتّجاهها، وقياسها)

(ب) رسم حزمة ضوئية تنطلق من الجسم لتنعكس على المرآة.

2. أُحسب غير المعلوم.

(أ) باستخدام القانون العام للمرايا، وبالتعويض عن المقادير المعلومة، نجد أنّ:

$$\frac{1}{U} + \frac{1}{V} = \frac{1}{f}$$



(شكل 152)

أي $\frac{1}{20} + \frac{1}{V} = \frac{1}{15}$

$\frac{1}{V} = \frac{1}{15} - \frac{1}{20} \Rightarrow V = (+60)cm$

وبما أنّ إشارة V موجبة فإنّ الصورة هي صورة حقيقية.

أمّا إذا استخدمنا معادلة التكبير فنحصل على:

$$M = -\frac{V}{U} = -\frac{60}{20} = -3$$

أي أنّ الصورة مقلوبة ومكبَّرة ثلاث مرّات وبالتالي يكون قياس الصورة:

$A'B' = 3AB = 3 \times 2 = (6)cm$

(ب) نرسم شعاعين منطلقين من النقطة B أعلى الجسم AB لينعكسا على المرآة حيث يمرّ الشعاعان المنعكسان بالنقطة B' صورة B كما هو موضّح في الشكل (152) باللون الأحمر.

3. قيِّم: هل النتيجة مقبولة؟

إنّ النتيجة مقبولة حيث تتطابق النتائج المحسوبة مع الرسم البياني، فصورة الجسم حقيقية، مقلوبة ومكبَّرة.

مثال (3)

وُضع جسم طوله (2)cm على بُعد (30)cm من مرآة محدّبة لها بُعد بؤري يساوي (10)cm كما هو موضّح في الشكل (153).

(أ) حدِّد خواصّ الصورة المتكوّنة (طبيعتها، موضعها، اتّجاهها وقياسها).

(ب) أُرسم حزمة ضوئية منطلقة من نقطة في أعلى الجسم لتنعكس على المرآة.

طريقة التفكير في الحلّ

1. حلِّل: أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: المسافة بين الجسم والمرآة: $U = (30)cm$

قياس طول الجسم: $AB = (2)cm$

البُعد البؤري: $f = (-10)cm$، وهو سالب لأنّ المرآة محدّبة.

غير المعلوم: **(أ)** خواصّ الصورة طبيعتها، موضعها ؟ $= V$، اتّجاهها، وقياسها

(ب) رسم حزمة ضوئية تنطلق من الجسم لتنعكس على المرآة.

2. أُحسب غير المعلوم.

(أ) باستخدام القانون العام للمرايا وبالتعويض عن المقادير المعلومة، نجد أنّ:

$$\frac{1}{U} + \frac{1}{V} = \frac{1}{f}$$

أي $$\frac{1}{30} + \frac{1}{V} = -\frac{1}{10}$$

$$\frac{1}{V} = -\frac{1}{10} - \frac{1}{30} \Rightarrow V = -(7.5)cm$$

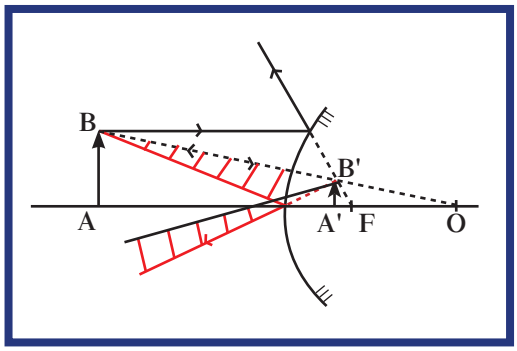
وبما أنّ إشارة V سالبة، فإنّ الصورة هي صورة تقديرية.

أمّا إذا استخدمنا معادلة التكبير فنحصل على:

$$M = -\frac{V}{U} = -\frac{-7.5}{30} = +0.25$$

أي أنّ الصورة معتدلة ومصغَّرة وبالتالي يكون قياس الصورة:

$$A'B' = \frac{AB}{4} = 2 \times \frac{1}{4} = (0.5)cm$$



(شكل 153)

(ب) نرسم شعاعين منطلقين من النقطة B أعلى الجسم AB لينعكسا على المرآة وكأنّهما قادمان من النقطة 'B صورة B كما هو موضّح في الشكل (153) باللون الأحمر.

3. قيِّم: هل النتيجة مقبولة؟

إنّ النتيجة مقبولة حيث تتطابق النتائج المحسوبة مع الرسم البياني، فصورة الجسم تقديرية، معتدلة ومصغَّرة.

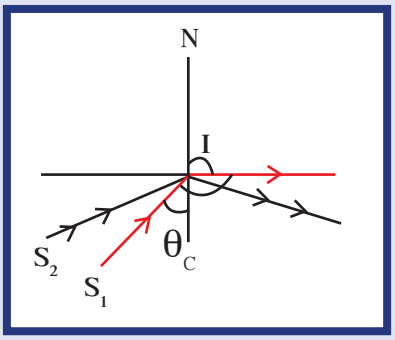
3. الانكسار والانعكاس الكلّي الداخلي على السطوح المستوية

Refraction and Total Internal Reflection on Plane Surfaces

عرّفنا في الدرس السابق الانكسار على أنّه التغيّر المفاجئ في اتّجاه شعاع الضوء عند مروره بين وسطين شفّافين مختلفي الكثافة الضوئية وفق قانوني الانكسار.

تعلّمنا في الدرس السابق أيضًا، أنّ ظاهرة الانكسار تتحقّق دائمًا عند انتقال الضوء من وسط أقلّ كثافة ضوئية إلى وسط آخر أكبر كثافة ضوئية لأنّ الشعاع ينكسر مقتربًا من العمود.

وتعلّمنا أيضًا أنّه عند انتقال الضوء من وسط أكبر كثافة إلى وسط آخر أقلّ كثافة تحدث ظاهرة الانكسار بابتعاد الشعاع المنكسر عن العمود بزاوية أكبر من زاوية السقوط والتي تزداد بزيادة زاوية السقوط. ولكن عندما يصل مقدار زاوية الانكسار إلى 90° في الوسط الأقلّ كثافة ضوئية، فإنّ زاوية السقوط في الوسط الأكبر كثافة تُسمّى الزاوية الحرجة ويُرمَز لها بـ θ_C. وإنّ زيادة مقدار زاوية السقوط في الوسط الأكبر كثافة عن الزاوية الحرجة $i > \theta_C$ تؤدّي إلى انعكاس الشعاع في الوسط الأكبر كثافة بحيث لا ينفذ إلى الوسط الأقلّ كثافة، وتُسمّى هذه الحالة بالانعكاس الكلّي الداخلي (شكل 154)، حيث يتبع الشعاع قانوني الانعكاس ولا يتبع قانوني الانكسار.



(شكل 154)
عندما تكون زاوية السقوط أكبر من الزاوية الحرجة يحدث انعكاس كلّي داخلي.

4. العلاقة بين معامل انكسار الوسط وجيب الزاوية الحرجة

Relation Between Refraction Index and the Sine of Critical Angle

لنأخذ معامل الانكسار n_2 للوسط الأقلّ كثافة ضوئية ومعامل الانكسار n_1 للوسط الأكبر كثافة ضوئية، ولنفترض أنّ شعاع الضوء يصنع زاوية سقوط تساوي الزاوية الحرجة $i = \theta_C$ لينكسر بزاوية الانكسار $\hat{r} = 90^\circ$.

بتطبيق القانون الثاني للانكسار (قانون سنل) نكتب:

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r'$$

$$n_1 \sin \theta_C = n_2 \sin 90^\circ$$

وعليه، نستنتج أنّ: $\sin \theta_C = \frac{n_2}{n_1}$

أي أنّ جيب الزاوية الحرجة يساوي معامل الانكسار للوسط الأقلّ كثافة بالنسبة إلى معامل الانكسار للوسط الأكبر كثافة.

وإن كان الهواء هو الوسط الأقلّ كثافة، تكون $n_2 = 1$. وعليه، تكون $\sin \theta_C = \frac{1}{n_1}$.

مثال (4)

أُحسب الزاوية الحرجة بين الزجاج والماء عندما ينتقل شعاع الضوء من الزجاج إلى الماء، علمًا أنّ معامل الانكسار للزجاج يساوي 1.5 ومعامل الانكسار للماء يساوي 1.4.

طريقة التفكير في الحلّ

1. حلِّل: أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: معامل الانكسار للزجاج: $n_1 = 1.5$

معامل الانكسار للماء: $n_2 = 1.4$

غير المعلوم: الزاوية الحرجة: $\theta_C = ?$

باستخدام العلاقة بين الزاوية الحرجة ومعامل الانكسار للوسطين نكتب:

2. أُحسب غير المعلوم.

$$\sin \theta_C = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1.4}{1.5} = 0.93$$

$$\theta_C = 68^\circ 57'$$

3. قيِّم: هل النتيجة مقبولة؟

إنّ النتيجة مقبولة حيث تتناسب مع معطيات المسألة ويمكن التحقّق منها عمليًّا بالتجربة.

5. بعض تطبيقات الانعكاس الكلّي الداخلي

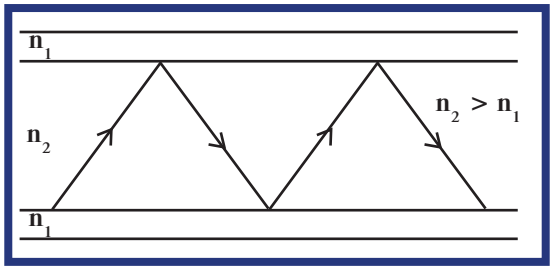
Applications of Total Internal Reflection

1.5 الألياف الضوئية البصرية Optical Fibers

هي ألياف زجاجية دقيقة، لا يفقد الضوء خلالها الطاقة.

ينتقل شعاع الضوء داخل الألياف الضوئية بالانعكاس الكلّي الداخلي حيث تكون زاوية السقوط أكبر من الزاوية الحرجة (شكل 155).

فشعاع الضوء داخل الليفة الضوئية موجود في وسط له معامل انكسار أكبر من غلاف الليفة الضوئية، وهذا ما يمنعه من الهروب. وللألياف الضوئية استخدامات عديدة وبخاصّة في العمليات الجراحية التي تعتمد على المنظار، وذلك لرِفعها وقابليتها للانثناء من دون أن تؤثّر على انتقال الضوء داخلها.



(شكل 155)
الانعكاس الكلّي في الألياف الضوئية

فقرة إثرائية

العلم والتكنولوجيا والمجتمع

الألياف الضوئية

لقد غيّرت الألياف الضوئية طرق الاتّصالات بين الناس، وحلّت محل أسلاك الهواتف القديمة على اتّساع العالم.

فإرسال الضوء خلال الألياف يؤدّي العمل نفسه كما في حالة الإشارات الكهربائية خلال الأسلاك. يمكن استخدام الألياف في الحاسبات للشراء والبيع والتعامل مع البنوك أيضًا. ومن الممكن استخدام الهاتف لزيارة المكتبات في أنحاء المدينة والحصول على المعلومات المطلوبة كلّها واستقبالها على الكمبيوتر في المنزل.

وتتمّ أنواع أخرى من الاتّصالات عن طريق الألياف الضوئية، مثل المحادثات بين أجهزة الكمبيوتر في مدن مختلفة. وتُستخدَم الألياف الضوئية في الطبّ والجراحات الداخلية لفحص جسم الإنسان من الداخل. وتُسمّى الألياف في هذه الحالة أجهزة الإندوسكوب.

ومن مميّزات الألياف الضوئية صغر حجمها ووزنها بالمقارنة مع الكابلات النحاسية التي لها السعة نفسها لحمل الإشارات الكهربائية.

فقرة إثرائية

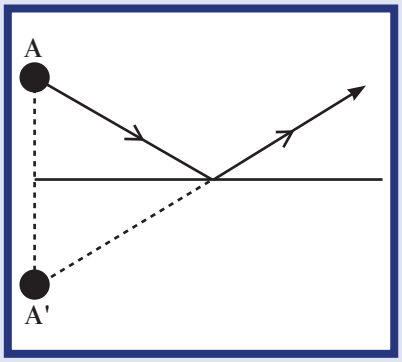
ظاهرة السراب

السراب ظاهرة تجعل المسافر في الصحراء يرى ما يبدو على هيئة صفحة ماء على مسافة قريبة منه، يحاول أن يصلها ولكنه لن يستطيع لأنّها خداع بصري. كما يمكنك أن تشاهد ظاهرة السراب في أيّام الصيف الحارّة على سطح الطريق السريع الساخن حيث يظهر أمامك سطح الطريق لامعًا مغطّى بقطرات الماء، كما لو كان الجوّ ممطرًا (شكل 156).

يعود السبب في ذلك إلى ازدياد درجة حرارة طبقات الهواء الملامس لسطح الأرض، فتقلّ كثافتها الضوئية عن الطبقات التي تعلوها.

والشعاع الضوئي المنعكس من الجسم المرئي A على سبيل المثال (شكل 157) ينتقل من وسط له كثافة ضوئية أكبر إلى وسط أقلّ كثافة ضوئية فينكسر مبتعدًا عن العمود. يحدث انعكاس كلّي داخلي على نقطة ما فترى العين صورة الجسم على امتداد الأشعّة المنعكسة كليًّا، وتبدو كما لو كان ماء يعكس صور الأجسام.

(شكل 156)
السراب



(شكل 157)
يظهر الشعاع المنعكس من الجسم A وكأنّه قادم من النقطة A'.

1. الانكسار في المنشور Refraction in Prism

المنشور هو وسط شفّاف محدّد بسطحين غير متوازيين يصنعان بينهما زاوية تُسمّى زاوية المنشور، وتُسمّى الجهة المقابلة للزاوية قاعدة المنشور (شكل 158).

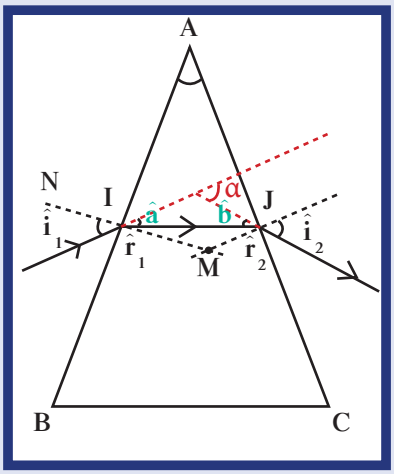
لنأخذ المنشور الزجاجي ABC، ولندرس مسار الشعاع الضوئي المنطلق من المصدر S والساقط على الوجه AB للمنشور بزاوية سقوط $\hat{i}_1$، على السطح AB. ينكسر الشعاع الضوئي مقتربًا من العمود المقام على النقطة I بزاوية انكسار r_1. وبحسب القانون الثاني للانكسار، نكتب:

$$n_1 \sin \hat{i}_1 = n_2 \sin \hat{r}_1$$

يسقط الشعاع المنكسر على الوجه AC بزاوية سقوط نُسمّيها $\hat{r}_2$.

وباستخدام الشكل الهندسي، نحدّد مقدار الزاوية $\hat{r}_2$ بالعلاقة التالية:

$$\hat{A} = \hat{r}_1 + \hat{r}_2 .$$



(شكل 158)
المنشور ABC وزاوية الانحراف α.

وبالمقارنة بين مقدار $\hat{r}_2$ والزاوية الحرجة للمنشور، نستنتج ما إذا كان الشعاع سينعكس انعكاسًا داخليًّا كليًّا في المنشور أو ينكسر ويخرج إلى الهواء مبتعدًا عن العمود. ويمكن إيجاد مقدار زاوية الانكسار بتطبيق قانون الانكسار الثاني على السطح AC.

1.6 زاوية الانحراف Deviation Angle

نعرّف زاوية الانحراف α بأنّها الزاوية الحادّة المحصورة بين امتداد مسار الشعاع الساقط على السطح الأوّل وامتداد مسار الشعاع عند خروجه من المنشور (شكل 158).

حساب زاوية الانحراف:

من الشكل الهندسي، نلاحظ أنّ زاوية الانحراف $\hat{\alpha}$ هي زاوية خارجية في المثلّث NIJ، ويمكننا أن نكتب: $\hat{\alpha} = \hat{a} + \hat{b}$

ولكن: $\hat{a} = \hat{i}_1 - \hat{r}_1$ و $\hat{b} = \hat{i}_2 - \hat{r}_2$

بالتعويض عن المقادير المعلومة، نجد أنّ:

$$\hat{\alpha} = \hat{i}_1 + \hat{i}_2 - (\hat{r}_1 + \hat{r}_2)$$

وبما أنّ النقاط I، M، J، A موجودة على دائرة واحدة، نستنتج أنّ:

$$\hat{A} + \hat{M} = (180^o)$$

وبما أنّ مجموع زوايا المثلّث يساوي 180^o نكتب:

$$\hat{r}_1 + \hat{r}_2 + \hat{M} = (180^o)$$

وعليه نستنتج أنّ $\hat{A} = \hat{r}_1 + \hat{r}_2$، وبالتالي نستنتج أنّ زاوية الانحراف تُحسَب بالعلاقة:

$$\hat{\alpha} = \hat{i}_1 + \hat{i}_2 - \hat{A}$$

أي أنّ زاوية الانحراف تساوي زاوية السقوط + زاوية الخروج − زاوية رأس المنشور.

مثال (5)

ABC منشور ثلاثي زاوية رأسه $A = (60^o)$، ومعامل الانكسار المطلق لمادته $n = 1.5$. إذا سقط شعاع ضوئي من الهواء على الوجه AB بزاوية سقوط $\hat{i}_1 = (60^o)$ كما في الشكل (159). أُحسب:

(أ) الزاوية الحرجة.

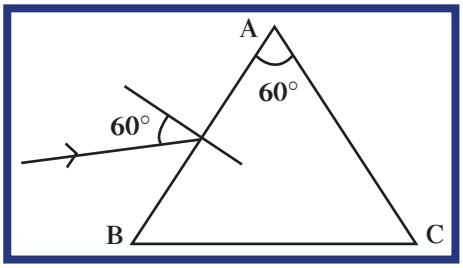
(ب) زاوية السقوط على السطح AC بعد انكسار الشعاع على السطح AB.

(جـ) زاوية خروج الشعاع من المنشور.

(د) زاوية الانحراف بين مسار الشعاع الساقط ومسار الشعاع الخارج.

مثال (5) (تابع)

طريقة التفكير في الحلّ



(شكل 159)

1. حلّل: أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: معامل انكسار الزجاج: $n_{glass} = 1.5$

زاوية المنشور: $\hat{A} = (60^\circ)$

زاوية السقوط: $\hat{i}_1 = (60^\circ)$

غير المعلوم: **(أ)** الزاوية الحرجة: $\theta_C = ?$

(ب) زاوية السقوط على السطح: $\hat{r}_2 = ?$ AC

(جـ) زاوية الخروج: $\hat{i}_2 = ?$

(د) زاوية الانحراف: $\hat{\alpha} = ?$

2. أُحسب غير المعلوم.

(أ) باستخدام العلاقة بين الزاوية الحرجة ومعامل الانكسار للوسطين، نكتب:

$$\sin\theta_C = \frac{n_{air}}{n_{glass}} = \frac{1}{1.5} = 0.66$$

$$\theta_C = (41.8^\circ)$$

(ب) باستخدام قانون الانكسار الثاني على السطح AB، وبالتعويض عن المقادير المعلومة، نكتب:

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin \hat{r}_1$$

$$1 \sin 60 = 1.5 \sin \hat{r}_1 \Rightarrow \sin \hat{r}_1 = 0.577$$

$$\Rightarrow r_1 = (35^\circ)$$

أمّا زاوية السقوط على السطح AC فتُحسب بالعلاقة التالية: $\hat{A} = \hat{r}_1 + \hat{r}_2$

$$\hat{r}_2 = 60 - 35 = (25^\circ)$$

(جـ) وبما أنّ الزاوية $r_2 < \theta_C$ فإنّ الشعاع ينكسر خارجًا من المنشور وبتطبيق قانون الانكسار الثاني على السطح AC نحصل على:

$$n_1 \sin \hat{i}_2 = n_2 \sin \hat{r}_2$$

$$1 \sin \hat{i}_2 = 1.5 \sin 25$$

$$\sin \hat{i}_2 = 0.63$$

$$\hat{i}_2 = (39^\circ)$$

(د) أمّا زاوية الانحراف فتُحسَب بالعلاقة التالية: $\hat{\alpha} = \hat{i}_1 + \hat{i}_2 - \hat{A}$

وبالتعويض عن المقادير المعلومة، نجد أنّ:

$$\hat{\alpha} = 60 + 39 - 60 = (39^\circ)$$

3. قيّم: هل النتيجة مقبولة؟

إنّ النتيجة مقبولة حيث تتناسب مع معطيات المسألة ويمكن التحقّق منها عمليًّا بالتجربة.

6.2 المنشور الرقيق Thin Prism

المنشور الرقيق هو منشور لا تزيد زاوية رأسه عن عشر درجات (شكل 160).
عندما يكون كلّ من زاوية السقوط وزاوية الانكسار صغيرًا (أقلّ من 10^{o})، فإنّ جيب الزوايا يساوي مقدار الزاويا نفسه بوحدة الراديان. وعليه يمكننا أن نكتب قوانين المنشور في الهواء على الشكل التالي:

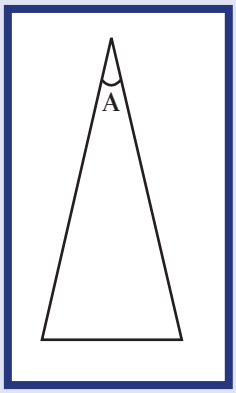
$$\hat{i}_1 = n\,\hat{r}_1$$

$$\hat{A} = \hat{r}_1 + \hat{r}_2$$

$$\hat{i}_2 = n\,\hat{r}_2$$

$$\hat{\alpha} = \hat{i}_1 + \hat{i}_2 - \hat{A} = n\hat{r}_1 + n\hat{r}_2 - \hat{A} = n(\hat{r}_1 + \hat{r}_2) - \hat{A}$$

$$\hat{\alpha} = \hat{A}\,(n - 1)$$



(شكل 160)
منشور رقيق حيث $\hat{A} < 10^{o}$

مثال (6)

منشور رقيق زاوية رأسه (6^{o})، غُمر في الماء إذا علمت أنّ معامل انكسار الزجاج $n_g = (1.5)$ ومعامل انكسار الماء $n_w = (1.33)$. أُحسب زاوية الانحراف (علمًا أنّ زاوية السقوط صغيرة جدًّا).

طريقة التفكير في الحلّ

1. حلِّل: أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: معامل انكسار الزجاج: $n_g = (1.5)$

معامل انكسار الماء: $n_w = (1.4)$

غير المعلوم: زاوية الانحراف: $\hat{\alpha} = ?$

2. أُحسب غير المعلوم.

باستخدام العلاقة التالية:

$$\alpha = A\left(\frac{n_g}{n_w} - 1\right)$$

وبالتعويض عن المقادير المعلومة، نجد أنّ:

$$\hat{\alpha} = 6\left(\frac{1.5}{1.33} - 1\right) = (0.78^{o})$$

3. قيّم: هل النتيجة مقبولة؟

إنّ النتيجة مقبولة وتتناسب مع معطيات المسألة.

6.3 تحلُّل الضوء الأبيض في المنشور

Dispersion of White Light in Prism

عند سقوط الضوء الأبيض على منشور، نلاحظ أنّ شعاع الضوء الخارج من المشور قد تحلّل إلى عدة ألوان، وهي، بدءًا من رأس المنشور، على الشكل التالي:

أحمر برتقالي، أصفر، أخضر، أزرق نيلي وبنفسجي (شكل 161).

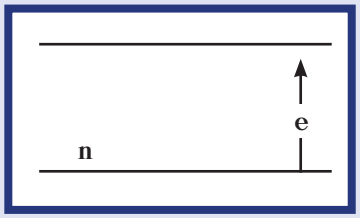
(شكل 161)
منشور يحلّل الضوء.

تُعرف تلك الألوان بألوان الطيف المرئي، وهذا يعني أنّ الضوء الأبيض ضوء مركّب من سبعة ألوان مرئية، لكلّ منها زاوية انحراف خاصّة به، تتوقّف على الطول الموجي أو التردّد لهذا اللون من الأشعّة.

ومن الملاحظ أنّ كلّما ازداد الطول الموجي قلّ الانحراف أي قلّ معامل الانكسار، فالضوء الأحمر أقلّ انحرافًا، وله معامل انكسار أقلّ على عكس الضوء البنفسجي.

7. الصفيحة المتوازية الوجهين

Surface with Parallel Plate



(شكل 162)

الصفيحة المتوازية الوجهين Surface with Parallel Plate هي وسط شفّاف محدود بمستويين متوازيين سماكته e وله معامل انكسار n أكبر من معامل انكسار الوسط الذي يحدّه من الجهتين (شكل 162).

1.7 مسير الشعاع الضوئي عبر صفيحة متوازية الوجهين

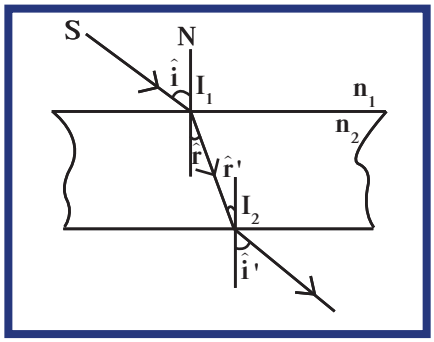
Path of Light Beam Through a Surface with Parallel Plate

إذا سقط شعاع ضوئي عموديًّا على وجه صفيحة متوازية الوجهين، فإنّه يتابع طريقه محافظًا على مساره المستقيم من دون أيّ انكسار.

أمّا إذا سقط شعاع ضوئي بزاوية $\hat{i}$ مع العمود المقام على وجه الصفيحة في نقطة السقوط I_1 فإنّه ينكسر مقتربًا من العمود، صانعًا زاوية انكسار $\hat{r}$ أصغر من $\hat{i}$ وذلك لأنّ $n_1 < n_2$.

عند وصول الشعاع إلى الوجه الثاني، يصنع مع العمود المقام على نقطة السقوط I_2 زاوية $\hat{r}'$ مساوية للزاوية $\hat{r}$، وهي أصغر من الزاوية الحرجة، ولهذا يخرج الشعاع من الوجه الثاني بزاوية $\hat{i}'$ مساوية للزاوية $\hat{i}$، وذلك بحسب مبدأ عودة الضوء على المسار الذي سلكه سابقًا (شكل 163).

بناءً على قواعد الهندسة والرسم الهندسي، نستنتج أنّ الشعاع الخارج من وجه الصفيحة الثاني موازٍ للشعاع الداخل من الوجه الأوّل أي أنّ الصفيحة متوازية الوجهين لا تغيّر اتّجاه الشعاع بل تدفعه إلى الإزاحة جانبيًّا.



(شكل 163)

مراجعة الدرس 1-2

أولًا – وُضِع جسم طوله (1)cm على بُعد (40)cm من مرآة مقعّرة لها بُعد بؤري يساوي (20)cm.

(أ) حدِّد خواصّ الصورة المتكوّنة (طبيعتها، موضعها، اتّجاهها وقياسها).

(ب) أُرسم حزمة ضوئية منطلقة من نقطة في أعلى الجسم لتنعكس على المرآة.

ثانيًا – جسم طوله AB = (2)cm وُضِع على مسافة (d) من مرآة مستوية. أُحسب:

(أ) المسافة بين الجسم والمرآة إذا كانت المسافة بين الجسم وصورته المتكوّنة تساوي (160)cm.

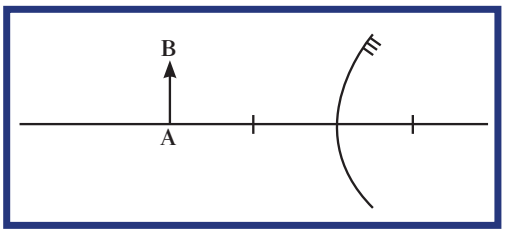
(ب) طول الصورة A'B'.

(جـ) تكبير المرآة المُستخدَمة.

ثالثًا – وُضِع جسم طوله (1)cm على بُعد (20)cm من مرآة محدّبة لها بُعد بؤري يساوي (10)cm (شكل 164).

(أ) حدّد خواصّ الصورة المتكوّنة (طبيعتها، موضعها، اتّجاهها وقياسها).

(ب) أُرسم حزمة ضوئية منطلقة من نقطة في أعلى الجسم لتنعكس على المرآة.



(شكل 164)

رابعًا – أُحسب الزاوية الحرجة لنفاذ الضوء من البنزين إلى الماء، علمًا أنّ معامل الانكسار للبنزين يساوي 1.4 ومعامل الانكسار للماء يساوي 1.3.

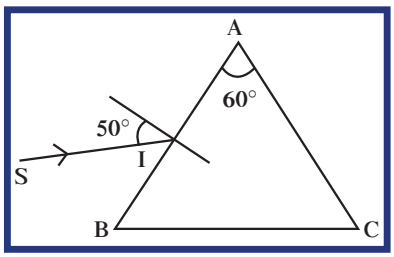
خامسًا – ABC منشور له زاوية رأس $\hat{A} = (60^\circ)$ ومعامل انكسار مطلق n = 1.3. (SI) شعاع ضوء في الهواء، سقط على الوجه AB بزاوية سقوط $\hat{i}_1 = (50^\circ)$ كما في الشكل (165). أُحسب:

(أ) الزاوية الحرجة.

(ب) زاوية السقوط على السطح AC بعد انكسار الشعاع على السطح AB.

(جـ) زاوية خروج الشعاع من المنشور.

(د) زاوية الانحراف بين مسار الشعاع الساقط ومسار الشعاع الخارج.



(شكل 165)

سادسًا – منشور زجاجي رقيق زاوية رأسه (6°) ومعامل انكسار مادته (1.5) = n، موضوع في الهواء. أُحسب زاوية الانحراف.

سابعًا – منشور له معامل انكسار (1.14)، سقط شعاع على أحد أوجهه بزاوية (45°)، فخرج عموديًّا على الوجه المقابل للمنشور. أُحسب:

(أ) زاوية رأسه.

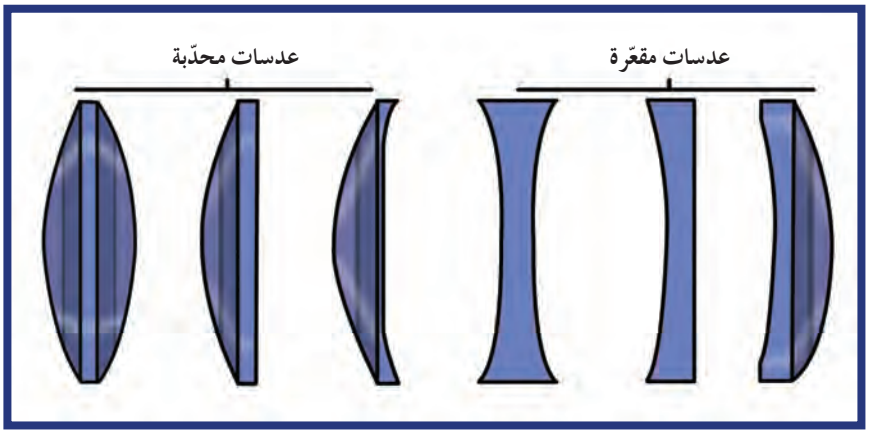
(ب) زاوية الانحراف.

الدرس 1-3

الانكسار عند السطوح الكروية - العدسات
Refraction on Spherical Surfaces Lenses

الأهداف العامة

- يعرّف العدسات وخواصّها.
- يميّز بين العدسات المحدّبة (اللامّة) والمقعّرة (المفرّقة).
- يميّز بين الصور الحقيقية والتقديرية المتكوّنة بالعدسات.
- يحدّد خواصّ الصور المتكوّنة من العدسات.
- يذكر ملخّصًا لحالات تكوين الصور.
- يرسم مخطّطات ضوئية لتكوين الصور.
- يعدّد بعض التطبيقات الحياتية للعدسات.



(شكل 166)

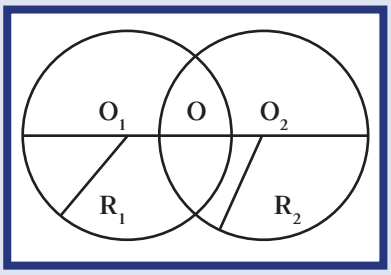
تناولنا في الدرس السابق ظاهرة انكسار الضوء على سطح مستوٍ عند انتقاله بين وسطين شفّافين. أمّا في هذا الدرس سنتناول ظاهرة الانكسار على السطوح الكروية المتمثّلة بالعدسات المحدّبة والمقعّرة، كما سنستنتج المعادلات الرياضية التي تسمح لنا بتحديد موقع صور الأجسام المتكوّنة من انكسار الأشعّة بالعدسات الكروية. وسنُحدّد قياسها وطبيعتها، وسنقدّر أهمّية العدسات ودورها في تطوير عدد كبير من الأجهزة التي ساهمت في كثير من الاكتشافات والاختراعات التكنولوجية وأبحاث الفضاء. فالمجاهر، وآلات التصوير، والنظارات الطبّية كلّها أدوات تؤدّي العدسات فيها دورًا مهمًّا. فما هي هذه العدسات؟

1. العدسات Lenses

العدسة هي أداة شفّافة تكسر أشعّة الضوء المارّة بها، وقد يكون لها سطح منحن واحد أو أكثر ولهذا تُسمّى العدسات الكروية ومنها المحدّبة والمقعّرة. ويظهر الشكل (166) في الصفحة السابقة أكثر العدسات الكروية استخدامًا.

تُصنع العدسات من زجاج أو من البلاستيك الشفّاف، وهي تُستخدَم في النظّارات، وآلات التصوير، والمجاهر، والتلسكوبات.

هناك نوعان من العدسات: عدسات محدّبة، وعدسات مقعّرة. وكلّ نوع منهما يعطي صورًا للجسم الموضوع أمامهما بخواصّ مختلفة وهذا ما سوف نراه في سياق هذا الدرس.



(شكل 167)
المميّزات الهندسية للعدسة المحدّبة

2. العدسات المحدّبة (العدسات رقيقة الحافّة)

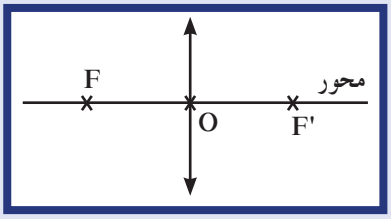
Convex Lenses

العدسة المحدّبة (شكل 168) تتكوّن من سطحين كرويين لهما المركزين O_1 وO_2 ويجعلان من العدسة المحدّبة أكثر سماكة في المركز عنه عند الأطراف. هذه السماكة مهملة بالمقارنة بين المسافة O_1O_2. ويمثّل نصفا القطرين R_1 وR_2 نصف قطر كلّ من الكرتين اللتين أخذ منهما كلّ من السطوح المنحنية. تُسمّى النقطة O مركز العدسة البصري وتُمثَّل العدسة المحدّبة في الشكل (168).

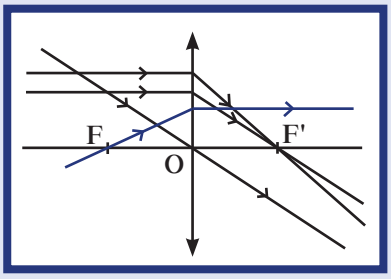
عندما يمرّ الشعاع الضوئي بمركز العدسة O يتابع مساره من دون أيّ تغيير في الاتّجاه.

وعندما تمرّ الأشعّة المتوازية بالعدسة المحدّبة، تنكسر جهة الجزء الأكثر سماكة أي مركز العدسة. تُسمّى النقطة التي تتجمّع فيها الأشعّة الضوئية بالبؤرة، والمسافة من العدسة إلى البؤرة بالبُعد البؤري (شكل 169).

أمّا إذا مرّ شعاع الضوء بالبؤرة f، فيكمل طريقه موازٍ للمحور بعد أن يمرّ بالعدسة (شكل 169 الخطّ الأخضر).



(شكل 168)
تمثيل العدسة المحدبة (اللامّة)



(شكل 169)
الشعاع المارّ بمركز العدسة يكمل طريقه من دون تغيير اتّجاهه، أمّا الشعاع الموازي للمحور فينكسر مارًّا بالبؤرة.

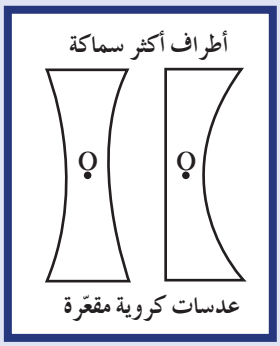
3. العدسات المقعّرة (العدسات سميكة الحافّة)

Concave Lenses

هي عدسة كروية تتكوّن من سطح كروي أو سطحين (شكل 170)، وتكون أكثر سماكة عند الأطراف ورقيقة في المركز عند النقطة O والتي تمثّل مركز العدسة المقعّرة. تُمثّل العدسة المقعّرة في الشكل (171).

كما في العدسة المحدّبة، فإنّ الشعاع الضوئي المارّ بمركز العدسة O يتابع طريقه من دون تغيير اتّجاهه. أمّا الأشعّة الضوئية المتوازية مع المحور المارّ من العدسة فتنحني نحو الجزء الأكثر سماكة من العدسة، فلا تلتقي عند البؤرة F' بل تتفرّق وكأنّها قادمة من البؤرة F (شكل 172).

أمّا إذا مرّ شعاع الضوء القادم بالبؤرة F فإنّه يكمل طريقه موازٍ للمحور بعد أن يمرّ بالعدسة (شكل 172 الخطّ الأخضر).



(شكل 170)

4. الصورة وطبيعتها Image and its Nature

تتكوّن الصورة من تلاقي الأشعّة الضوئية المنكسرة في العدسات، وتكون حقيقية عندما يمكن استقبالها على حائل. أمّا الصورة التي تتكوّن من تلاقي امتدادات الأشعّة المنكسرة في العدسة ولا يمكن استقبالها على حائل فتكون تقديرية.

5. القانون العام لتحديد خواصّ الصورة المتكوّنة بالعدسات

General Law for Identifying the Properties of Images Formed by Lenses

تتمثّل خواصّ الصورة المتكوّنة بالعدسات بتحديد موقعها بالنسبة إلى المركز O للعدسة. فتكون إمّا صورة حقيقية أو صورة تقديرية وتكون إمّا معتدلة أو مقلوبة، أمّا قياسها فيمكن تحديده من الرسم. وتختلف خواصّ الصورة باختلاف نوع العدسة المُستخدَمة وموقع الجسم بالنسبة إلى مركزها.

فإذا وُضِع الجسم أمام عدسة محدّبة على مسافة تتراوح بين البعد البؤري f وبعدين بؤريين 2f من مركزها، فإنّ صورته المتكوّنة تكون صورة حقيقية مكبَّرة مقلوبة (شكل 173). وتُستخدم هذه الحالة في أجهزة الإسقاط. أمّا إذا وُضِع الجسم أمام العدسة المحدّبة بين مركز العدسة والبؤرة فإنّ صورته المتكوّنة تكون تقديرية مكبَّرة معتدلة (شكل 174).

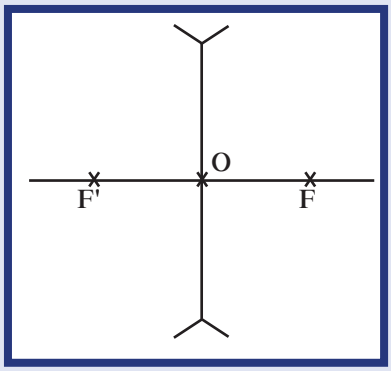
أمّا في حال وُضِع الجسم أمام عدسة مقعّرة على أيّ مسافة من مركز العدسة فتكون صورته تقديرية مصغَّرة معتدلة.

لنأخذ الجسم AB، ونضعه على مسافة U من مركز العدسة O لعدسة محدّبة L. باستخدام الرسم الهندسي ورسم شعاع ضوئي منطلق من الجسم ومارّ بالمركز O وآخر منطلقًا من الجسم موازٍ للمحور ومنكسر في العدسة نحو البؤرة F'، نحدّد موقع الصورة A'B' المتكوّنة كما في الشكل (175).

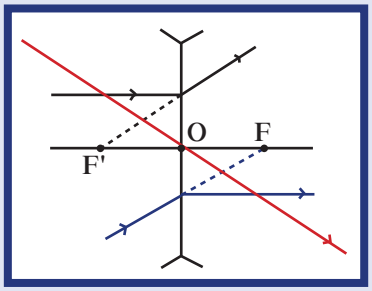
باستخدام الرسم الهندسي يمكن إيجاد علاقة بين كلّ من البُعد البؤري f والمسافة بين الجسم، ومركز العدسة U، والصورة، والمركز V والتي تتمثّل بالعلاقة الرياضية التالية:

$$\frac{1}{U} + \frac{1}{V} = \frac{1}{f}$$

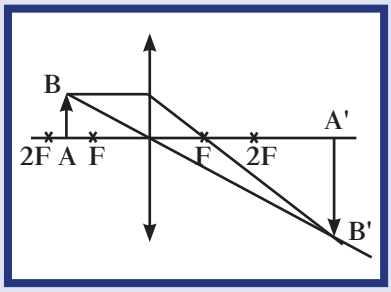
وتُسمّى هذه العلاقة بالقانون العامّ للعدسات وهي تُستخدَم لجميع أنواع العدسات الكروية بفارق بسيط وهو استخدام البُعد البؤري موجب المقدار في العدسات المحدّبة $f > 0$ وسالب المقدار في العدسات المقعّرة $f < 0$.



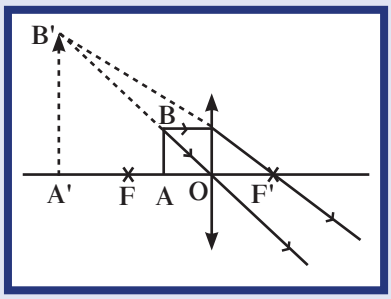
(شكل 171)
تمثيل العدسة المقعّرة



(شكل 172)



(شكل 173)
(A'B') صورة حقيقية مكبرة مقلوبة لجسم وضع على مسافة بين f و2f.



(شكل 174)
(A'B') صورة الجسم AB الموضع بين مركز العدسة والبؤرة f.

أمّا التكبير M للعدسات الكروية فيُحسَب بالعلاقة التالية:

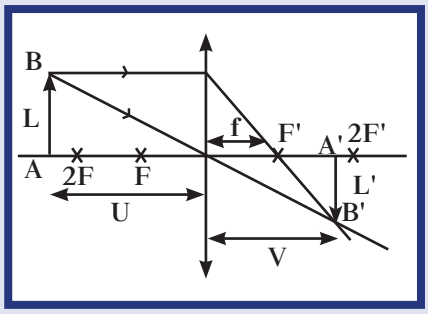
$$M = \frac{\text{طول الصورة } A'B'}{\text{طول الجسم } AB}$$

ويُحسَب أيضًا بالعلاقة التالية:

$$M = \frac{\text{سالب بُعد الصورة عن مركز العدسة}}{\text{بُعد الجسم عن مركز العدسة}}$$

أي:

$$\boxed{M = -\frac{V}{U}}$$



(شكل 175)
(A'B') صورة الجسم AB على مسافة V من المركز O.

وأثناء حلّ المسائل يمكننا الاستفادة من قاعدة الإشارات التالية:

1. إذا كان بُعد الجسم U لجسم حقيقي تكون إشارة U موجبة.
   إذا كان بُعد الجسم U لجسم تقديري تكون إشارة U سالبة.
2. بُعد الصورة V يكون موجب إذا كانت الصورة حقيقية.
   بُعد الصورة V يكون سالب إذا كانت الصورة تقديرية.
3. التكبير M يكون موجب الإشارة إذا كانت الصورة معتدلة.
   التكبير M يكون سالب الإشارة إذا كانت الصورة مقلوبة.
4. البُعد البؤري للعدسة المحدّبة (اللامّة) موجب.
   البُعد البؤري للعدسة المقعّرة (المفرّقة) سالب.

مثال (1)

وُضع جسم طوله (2)cm على بُعد (18)cm من عدسة محدّبة لها بُعد بؤري يساوي (12)cm.

(أ) حدِّد خواصّ الصورة المتكوّنة (طبيعتها، موضعها، اتّجاهها، قياسها).

(ب) أُرسم حزمة ضوئية منطلقة من نقطة في أعلى الجسم لتنكسر في العدسة.

طريقة التفكير في الحلّ

1. **حلِّل:** أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: المسافة بين الجسم ومركز العدسة: $U = (18)cm$

قياس طول الجسم: $AB = (2)cm$

البُعد البؤري: $f = +(12)cm$، وهو موجب الإشارة لأنّ العدسة محدّبة.

غير المعلوم: **(أ)** خواصّ الصورة (طبيعة الصورة، الموضع ؟ = V، اتّجاهها، قياسها).

(ب) رسم حزمة ضوئية تنطلق من الجسم لتنكسر في العدسة.

2. **أُحسب غير المعلوم.**

(أ) باستخدام القانون العامّ للعدسات وبالتعويض عن المقادير المعلومة، نجد:

$$\frac{1}{U} + \frac{1}{V} = \frac{1}{f}$$

أي $$\frac{1}{18} + \frac{1}{V} = \frac{1}{12}$$

$$\frac{1}{V} = \frac{1}{12} - \frac{1}{18} \Rightarrow V = +(36)cm$$

وبما أنّ إشارة V موجبة، فإنّ الصورة هي صورة حقيقية.

مثال (1) (تابع)

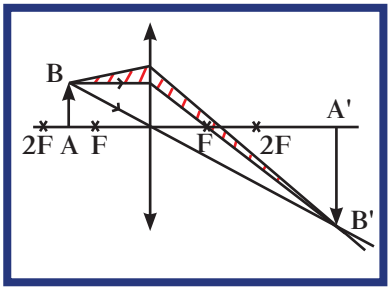
أمّا إذا استخدمنا معادلة التكبير ، نحصل على:

$$M = -\frac{V}{U} = -\frac{36}{18} = -2$$

أي أنّ الصورة مقلوبة ومكبَّرة مرّتين وبالتالي يكون قياس الصورة:

$$A'B' = 2AB = 2 \times 2 = (4)cm$$

(ب) نرسم شعاعين منطلقين من النقطة B أعلى الجسم AB لينكسرا في العدسة ويمرّا بالنقطة 'B صورة B كما هو موضّح في الشكل (176) باللون الأحمر .



(شكل 176)

3. قيّم: هل النتيجة مقبولة؟

إنّ النتيجة مقبولة حيث تتطابق النتائج المحسوبة مع الرسم البياني ، فصورة الجسم حقيقية ومقلوبة ومكبَّرة مرّتين .

مثال (2)

وُضع جسم طوله (2)cm على بُعد (20)cm من مركز عدسة مقعّرة لها بُعد بؤري يساوي (10)cm (شكل 177) .

(أ) حدِّد خواصّ الصورة المتكوّنة (طبيعتها ، موضعها ، اتّجاهها ، قياسها) .

(ب) أُرسم حزمة ضوئية منطلقة من نقطة من أعلى الجسم لتنكسر بعد مرورها في العدسة .

طريقة التفكير في الحلّ

1. حلِّل: أُذكر المعلوم وغير المعلوم .

المعلوم: المسافة بين الجسم ومركز العدسة:

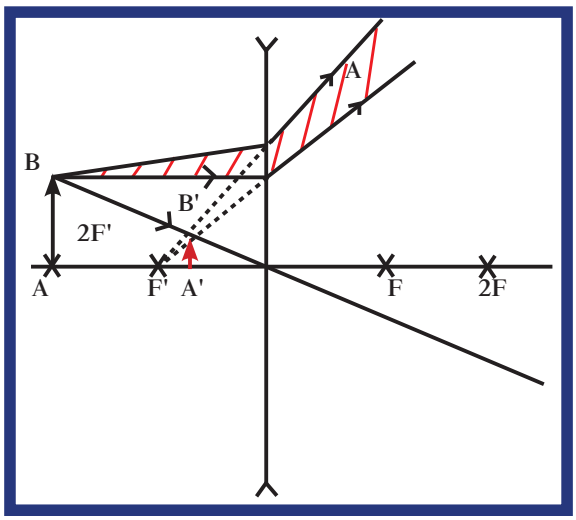
$$U = (20)cm$$

قياس طول الجسم: $AB = (2)cm$

البُعد البؤري: $f = -(10)cm$ ، وهو سالب الإشارة لأنّ العدسة مقعّرة .

غير المعلوم: **(أ)** خواصّ الصورة (طبيعة الصورة ، الموضع ? = V ، اتّجاهها ، قياسها)

(ب) رسم حزمة ضوئية تنطلق من الجسم لتنكسر في العدسة .



(شكل 177)

مثال (2) (تابع)

2. أُحسب غير المعلوم

(أ) باستخدام القانون العام للعدسات وبالتعويض عن المقادير المعلومة، نجد:

$$\frac{1}{U}+\frac{1}{V}=\frac{1}{f}$$

أي $\frac{1}{20}+\frac{1}{V}=\frac{1}{-10}$

$$\frac{1}{V}=\frac{1}{-10}-\frac{1}{20}\Rightarrow V=-(6.66)\text{cm}$$

وبما أنّ إشارة V سالبة، فإنّ الصورة هي صورة تقديرية.

أمّا إذا استخدمنا معادلة التكبير، نحصل على:

$$M=-\frac{V}{U}=+\frac{6.6}{20}=+0.33$$

أي أنّ الصورة معتدلة ومصغَّرة وبالتالي يكون قياس الصورة:

$$A'B'=0.33AB=0.33\times 2=(0.66)\text{cm}$$

(ب) نرسم شعاعين منطلقين من النقطة B أعلى الجسم AB لينكسرا في العدسة ويتفرّقا كأنّهما منطلقان من النقطة 'B صورة B كما هو موضّح في الشكل (167) باللون الأحمر.

3. قيّم: هل النتيجة مقبولة؟

إنّ النتيجة مقبولة حيث تتطابق النتائج المحسوبة مع الرسم البياني، فصورة الجسم تقديرية ومعتدلة ومصغَّرة.

6. قدرة العدسة Power of a Lens

تُعرف قدرة العدسة Power of a Lens بمقلوب البُعد البؤري للعدسة المُقاس بوحدة المتر. ويستخدم أطبّاء العيون قدرة العدسات لوصف عدسات تصحيح النظر لمرضاهم.

تُحسَب قدرة العدسة بالعلاقة الرياضية التالية: $P=\frac{1}{f}$

تُقاس قدرة العدسة بوحدة الديوبتر أو m^{-1}، وتكون هذه القدرة موجبة بالنسبة إلى العدسات اللامّة وسالبة بالنسبة إلى العدسات المفرّقة.

مسائل مع إجابات

1. وُضع جسم على بُعد (50)cm من مركز عدسة لامّة بُعدها البؤري يساوي (10)cm.
(أ) أُحسب موقع الصورة المتكوّنة بالنسبة إلى مركز العدسة.
(ب) أُحسب التكبير M للعدسة المُستخدَمة.
الإجابات: (أ) (12.5)cm
(ب) (−0.25)

2. أُحسب البُعد البؤري لعدسة محدّبة (لامّة) كوّنت صورة على بُعد (15)cm من مركزها لجسم موضوع على بُعد (30)cm من مركزها.
الإجابة: (10)cm

3. AB جسم وُضع على مسافة U = 2f من عدسة لامّة بُعدها البؤري يساوي (20)cm.
أُحسب موقع الصورة المتكوّنة وتكبير العدسة المُستخدَمة.
الإجابة: (40)cm، M = −1

4. عدسة مفرّقة بُعدها البؤري (10)cm، تكوّن صورة تقديرية على مسافة (5)cm من مركزها. إذا وُضع الجسم على مسافة U من مركزها.
أُحسب مقدار U.
الإجابة: (10)cm.

مراجعة الدرس 1-3

أوّلًا – قارِن بين العدسات المحدّبة (اللامّة) والعدسات المقعّرة (المفرّقة).

ثانيًا – ما الفرق بين الصورة الحقيقية والصورة التقديرية؟

ثالثًا – كم شعاع ضوئي يجب رسمه لتحديد صورة جسم تكوّن بعدسة؟

رابعًا – كيف تؤثّر العدسة المحدّبة على الأشعّة الضوئية الموازية لمحورها عندما تمرّ من خلالها؟

خامسًا – كيف تؤثّر العدسة المقعّرة على الأشعّة الضوئية الموازية لمحورها عندما تمرّ من خلالها؟

سادسًا – وُضع جسم طوله (2)cm على بُعد (4)cm من عدسة محدّبة لها بُعد بؤري يساوي (12)cm.

(أ) حدِّد خواصّ الصورة المتكوّنة (طبيعتها، موضعها، اتّجاهها، قياسها).

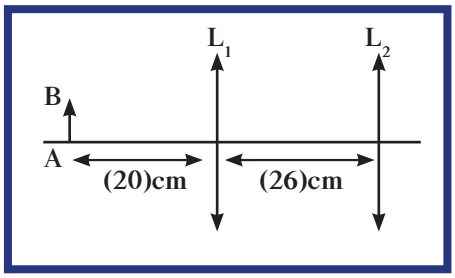
(ب) أُرسم حزمة ضوئية منطلقة من نقطة في أعلى الجسم لتنكسر في العدسة.

سابعًا – وُضع جسم طوله (4)cm على بعد (30)cm من مركز عدسة مقعّرة لها بُعد بؤري يساوي (15)cm.

(أ) حدِّد خواصّ الصورة المتكوّنة (طبيعتها، موضعها، اتّجاهها، قياسها).

(ب) أُرسم حزمة ضوئية منطلقة من نقطة أعلى الجسم لتنكسر بعد مرورها بالعدسة.

ثامنًا – عدستان محدّبتان L_1 و L_2 بُعدهما البؤري على التوالي (15)cm و(12)cm لهما محوران متطابقان ويبعدان عن بعضهم بعضًا (26)cm.
أُحسب خواصّ الصورة المتكوّنة بالعدستين للجسم AB = (2)cm موضوع على مسافة (20)cm من العدسة الأولى L_1 (شكل 178).

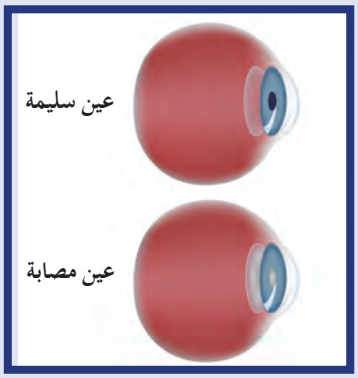


(شكل 178)

فقرة إثرائية

الفيزياء في الطبّ

العدسة والماء الزرقاء



يصيب الماء الأزرق أو الزرق Glaucoma العين نتيجة كبر السنّ، والمرض، وتأثيرات جانبية لبعض الأدوية إضافة إلى العامل الوراثي.
عند إصابة العين بالمياه الأزرق تصبح العدسة معتمة ويمكن إزالة هذه العدسة المعتمة جراحيًّا وذلك من خلال استبدالها بعدسة بلاستيكية تزرع بالعين على الدوام.
تتمّ عادة هذه الجراحة في العيادات الخارجية.

مراجعة الوحدة الرابعة

المفاهيم

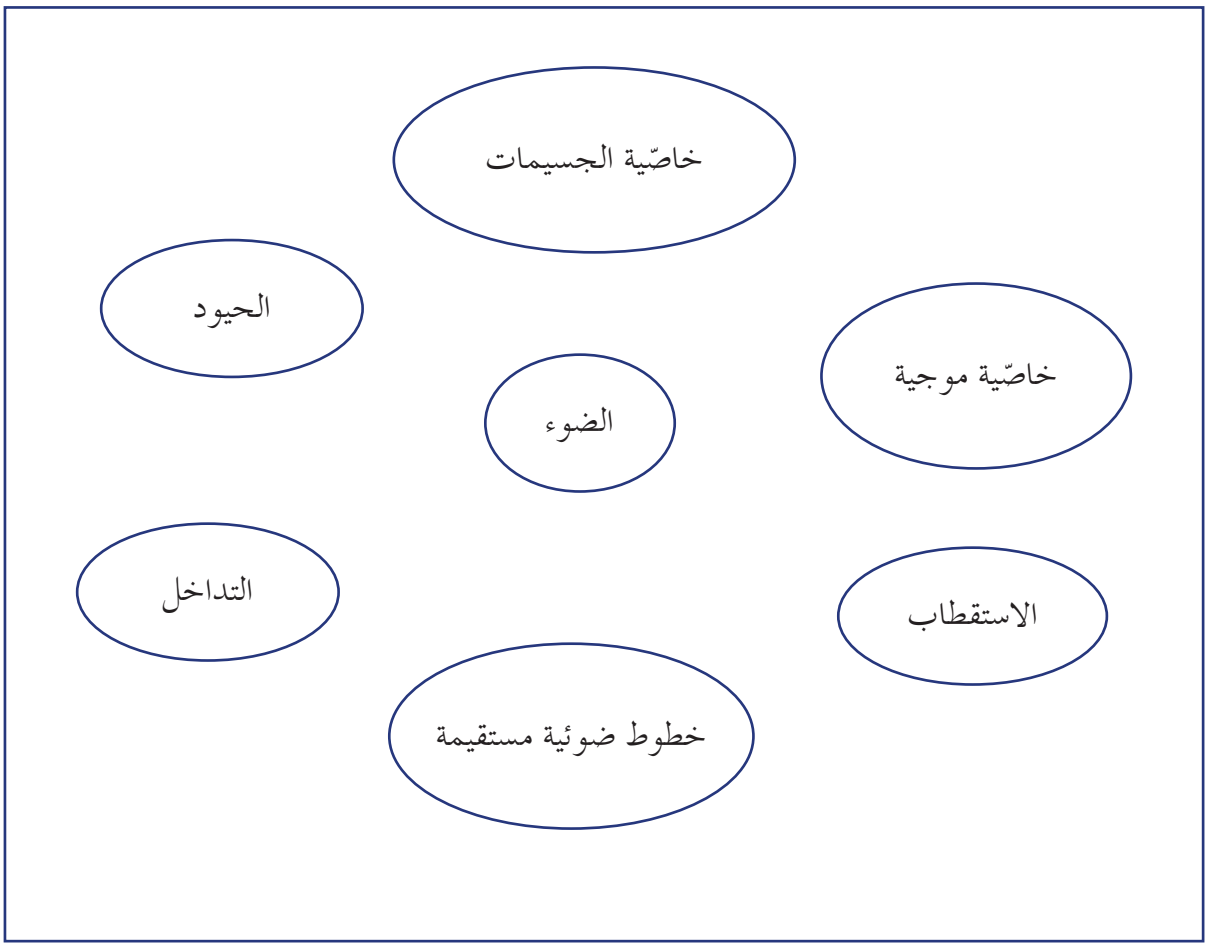
الاستقطاب	Polarization	انعكاس	Reflection
انعكاس كلّي داخلي	Total Internal Reflection	انكسار	Refraction
البؤرة	Focal Point	البُعد البؤري	Focal Length
تداخل	Interference	حيود	Diffraction
زاوية حرجة	Critical Angle	صورة تقديرية	Virtual Image
صورة حقيقية	Real Image	عدسة لامّة (محدّبة)	Converging Lens
عدسة مفرّقة (مقعّرة)	Diverging Lens	المحور الأساسي	Principle Axis

الأفكار الرئيسية في الوحدة:

- الضوء موجة كهرومغناطيسية، له خواصّ الانعكاس والانكسار والتداخل والحيود والاستقطاب.
- إنّ التغيّر المفاجئ في اتّجاه شعاع الضوء على سطح عاكس يُسمّى الانعكاس.
- التغيّر المفاجئ في اتّجاه شعاع الضوء، عند مروره بشكل مائل على السطح الفاصل بين وسطين شفّافين مختلفين بالكثافة الضوئية بسبب تغيُّر سرعته، يُسمّى الانكسار.
- الانعكاس والانكسار يتبعان قوانين محدّدة.
- الحيود هو من الخواصّ المميِّزة للموجات وظاهرة انحراف الموجة الضوئية عن مسارها الأصلي عندما تمرّ من ثقب ضيّق أو بحافّة حادّة في مسار حركتها.
- الاستقطاب هو خاصّية مميِّزة للموجات المستعرضة.
- العدسات الكروية نوعان محدّبة (لامّة) ومقعّرة (مفرّقة). وتكون العدسات اللامّة أكثر سماكة عند الوسط، بينما تكون العدسات المفرّقة أقلّ سماكة.
- المرايا سطوح عاكسة منها مستوية ومحدّبة ومقعّرة.
- تختلف خواصّ الصورة المتكوّنة لجسم ما باختلاف نوع العدسة أو المرآة المكوِّنة لهذه الصورة.
- الصور الحقيقية تتكوّن من تلاقي الأشعّة المنعكسة عن المرايا أو المنكسرة في العدسات، ويمكن استقبالها على حائل.
- الصور التقديرية (الخيالية) تتكوّن من تلاقي امتدادات الأشعّة المنعكسة عن المرايا أو المنكسرة في العدسات، ولا يمكن استقبالها على حائل.
- المنشور هو وسط شفّاف محدّد بسطحين غير متوازيين يصنعان بينهما زاوية تُسمّى زاوية المنشور، وتُسمّى الجهة المقابلة للزاوية قاعدة المنشور.
- الصفيحة المتوازية الوجهين هي وسط شفّاف محدود بمستويين متوازيين سماكته e وله معامل انكسار n أكبر من معامل انكسار الوسط الذي يحدّه من الجهتين.

خريطة مفاهيم الوحدة:

اِستخدم المصطلحات الموضَّحة في الشكل التالي لرسم خريطة مفاهيم تنظِّم معظم الأفكار التي احتوتها الوحدة:



تحقق من فهمك

ضع علامة (✓) في المربّع الواقع أمام أنسب إجابة في كلّ ممّا يلي:

1. صورة الجسم الموضوع أمام عدسة لامّة بين f و2f تكون:
   - ☐ مكبَّرة، معتدلة، حقيقية
   - ☐ مصغَّرة، مقلوبة، حقيقية
   - ☐ مكبَّرة، مقلوبة، حقيقية
   - ☐ مكبَّرة، معتدلة، تقديرية
2. صورة الجسم الموضوع أمام عدسة لامّة على مسافة أصغر من بُعد بؤري تكون:
   - ☐ مكبَّرة، معتدلة، حقيقية
   - ☐ مصغَّرة، مقلوبة، حقيقية
   - ☐ مكبَّرة، مقلوبة، حقيقية
   - ☐ مكبَّرة، معتدلة، تقديرية
3. وسطان لهما معامل الانكسار (1.2) و(1.5). فإنّ جيب الزاوية الحرجة بين الوسطين يساوي:
   - ☐ 0.8
   - ☐ 1.25
   - ☐ 0.3
   - ☐ 0.2
4. سقط شعاع ضوئي بزاوية (40°) على سطح زجاجي معامل انكساره المطلق (1.5). فإنّ زاوية انكسار الشعاع تساوي:
   - ☐ 25.3
   - ☐ 74.6
   - ☐ 30.6
   - ☐ 20
5. من خواصّ الصورة المتكوّنة لجسم وُضِع على مسافة (20)cm من مرآة مقعّرة لها بُعد بؤري يساوي (15)cm أنّها تقع على مسافة :
   - ☐ (9)cm من قطب المرآة وتكون مكبَّرة.
   - ☐ (60)cm من قطب المرآة وتكون مكبَّرة.
   - ☐ (40)cm من قطب المرآة وتكون مكبَّرة.
   - ☐ (60)cm من قطب المرآة وتكون مصغَّرة.

تحقق من معلوماتك

أجب عن الأسئلة التالية:

1. وضِّح بالرسم الانعكاس الكلّي الداخلي والزاوية الحرجة.
2. عرِّف زاوية الانحراف في المنشور.
3. اِشرح كيف يمكن تحليل ألوان الضوء الأبيض.
4. ما هي الظاهرة الفيزيائية التي تؤكّد الطبيعة الموجية للضوء؟
5. أُكتب قانوني انكسار الضوء.
6. ما الفرق بين الصورة الحقيقية والصورة التقديرية المتكوّنة من الانعكاس على السطوح الكروية العاكسة؟
7. أُحسب زاوية الانحراف لمنشور رقيق زاوية رأسه (6°) ومعامل انكساره (1.4).
8. سقط شعاع ضوئي على السطح الفاصل بين وسطين شفّافين مختلفين بزاوية (60°)، وكانت الزاوية المحصورة بين الشعاع المنكسر والسطح الفاصل (60°). أُحسب معامل الانكسار النسبي بين هذين الوسطين.

9. تُستخدَم ثلاثة أشعّة في المخطّطات الشعاعية لتحديد موضع الصورة المتكوّنة بالعدسات. صِف هذه الأشعّة معتمِدًا على اتّجاهها بالنسبة إلى المحور الأساسي وبؤرة العدسة.
10. ما موضع الجسم بالنسبة إلى عدسة لامّة بحيث تكون الصورة عند ما لا نهاية؟
11. ما موضع صورة جسم موجود على مسافة كبيرة جدًّا بالنسبة إلى العدسة اللامّة؟
12. ما شرط الحصول على انعكاس كلّي داخلي؟

تحقق من مهاراتك

حلّ المسائل التالية:

1. جسم طوله (5)cm وُضِع على بُعد (60)cm من مرآة مستوية. أُحسب:
   (أ) المسافة بين الجسم والصورة المتكوّنة.
   (ب) طول الصورة المتكوّنة.
   (جـ) تكبير المرآة.
2. ولد طوله (150)cm يقف على مسافة (2)m من مرآة مستوية.
   (أ) ما هو أصغر قياس للمرآة التي يمكن أن يستخدمها الولد ليرى صورته كاملة من رأسه إلى قدميه على افتراض أنّ عينيه (10)cm أسفل أعلى نقطة من رأسه؟
   (ب) ما هو أصغر قياس للمرآة التي يمكن أن يستخدمها الولد ليرى صورته كاملة من رأسه إلى قدميه إذا وقف على بُعد (3)m من المرآة بدلًا من (2)m؟
   (جـ) ما المسافة بين أسفل تلك المرآة والتي لها أصغر قياس والأرض والتي تسمح للولد برؤية صورته الكاملة بأصغر قياس مرآة؟
3. سقط شعاع ضوئي أحادي اللون بزاوية (60°) على أحد وجهي منشور معامل انكسار مادّته $\sqrt{3}$، فخرج عموديًّا على الوجه المقابل. أُحسب زاوية رأسه.
4. سقط شعاع ضوئي أحادي اللون بزاوية (45°) على أحد وجهي منشور معامل انكسار مادّته $\sqrt{2}$، وزاوية رأسه (60°). أُحسب:
   (أ) زاوية خروج الشعاع من الوجه المقابل إذا لم يحدث انعكاس داخلي كلّي.
   (ب) زاوية الانحراف.
5. وُضِع جسم على بُعد (15)cm من عدسة فتكوّنت له صورة معتدلة مصغَّرة خمس مرّات. ما نوع العدسة؟ أُحسب بُعدها البؤري.
6. مرآة مقعّرة نصف قطر تكوّرها (1.2)m. وُضِع جسم طوله (12)cm على بُعد (1)m من المرآة. أُحسب:
   (أ) موضع الصورة المتكوّنة.
   (ب) طولها وحدِّد خواصّها الأخرى.
7. يقع جسم على بُعد (20)cm من مرآة مقعّرة بُعدها البؤري (10)cm. أُحسب:
   (أ) بُعد الصورة المتكوّنة.
   (ب) التكبير.
   (جـ) حدِّد خواصّ الصورة المتكوّنة.

8. وُضِع جسم أمام عدسة محدّبة، ووُضِعت خلف العدسة من الجهة الأخرى مرآة مستوية فتكوّنت للجسم صورة منطبقة عليه. فإذا أُزيح الجسم بعيدًا عمّا كان عليه مسافة مرّة ونصف المرّة وأُزيلت المرآة من موضعها، تتكوّن صورة للجسم على مسافة (25)cm من العدسة من الجهة التي كانت عليها المرآة المستوية قبل إزالتها.
(أ) أُحسب البُعد البؤري للعدسة.
(ب) ما خواصّ الصورة المتكوّنة؟

9. وُضِع جسم طوله (6)cm أمام مرآة مقعّرة فتكوّنت له صورة منطبقة على الجسم، وعندما أُبعِد الجسم عن المرآة مسافة تساوي ضعف ما كان عليه سابقًا تكوّنت له صورة على بُعد (12)cm من المرآة ولها جهة الجسم نفسه.
(أ) أُحسب البُعد البؤري للمرآة.
(ب) أُذكر خواصّ الصورة المتكوّنة وطولها.
(جـ) أُرسم حزمة ضوئية تنطلق من أعلى نقطة على الجسم لتنعكس على المرآة.

10. أشعّة ضوئية تتجمّع على النقطة A. وُضِعت عدسة تعترض سير هذه الأشعّة على بُعد (6)cm من النقطة A، فتكوّنت صورة حقيقية للنقطة على بُعد (12)cm من العدسة. ما هو البُعد البؤري للعدسة وما نوعها؟

11. في تجربة الشقّ المزدوج لتوماس يونج، كانت المسافة بين الفتحتين الضيّقتين (1×10^{-4})m، والمسافة بين الشقّين والحائل (1)m، والمسافة بين هدبتين مضيئتين متتاليين (6)mm. أُحسب الطول الموجي للضوء أحادي اللون المُستخدَم.

التواصل

أُكتب مقالًا لا يزيد عن عشرة أسطر تبيّن فيه كيف فسّر هيجنز ظاهرة حيود الضوء، مبيِّنًا في مقالك اختلاف شدّة الإضاءة على الحائل، ومعلِّلًا السبب بشكل علمي.

نشاط بحثي

تتألّف آلة التصوير من عدسات عديدة مثبّتة داخل صندوق محكم لا ينفذ الضوء.
أجرِ بحثًا تبيّن فيه دور العدسات في تكوين صورة الأجسام.
ضمِّن بحثك كيفية التحكّم بآلة التصوير لتكوين صور واضحة، وسبب استخدام عدد من العدسات وعدم الاكتفاء بعدسة واحدة. أشِر في بحثك إلى كيفية التحكّم بالضوء الداخل إلى آلة التصوير.

ملاحظات

ملاحظات

ملاحظات

أودع في مكتبة الوزارة تحت رقم (٣١) بتاريخ ٢٥/ ٣/ ٢٠١٥

شركة مطابع الرسالة - الكويت