المملكة الأردنية الهاشمية
وزارة التربية والتعليم

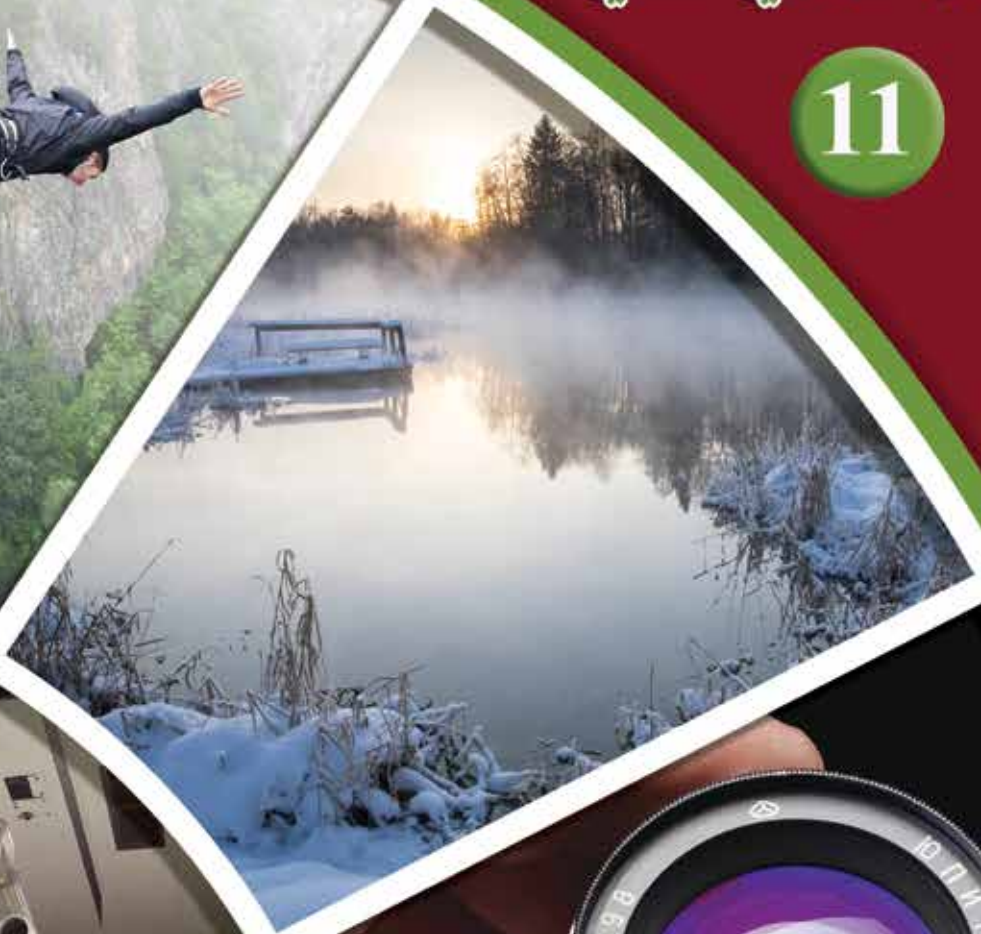
المركز الوطني لتطوير المناهج
National Center for Curriculum Development

الفيزياء

الصف الحادي عشر - كتاب الطالب

الفصل الدراسي الثاني

11



المملكة الأردنية الهاشمية
وزارة التربية والتعليم

المركز الوطني لتطوير المناهج
National Center for Curriculum Development

الفيزياء

الصف الحادي عشر - كتاب الطالب

الفصل الدراسي الثاني

11

فريق التأليف

موسى عطا الله الطراونة (رئيسًا)

أ.د. محمود إسماعيل الجاغوب

خلدون سليمان المصاروه

موسى محمود جرادات

يحيى أحمد طواها

منهاجي
منعة التعليم الهادف

الناشر: المركز الوطني لتطوير المناهج

يسرُّ المركز الوطني لتطوير المناهج استقبال آرائكم وملحوظاتكم على هذا الكتاب عن طريق العناوين الآتية:

06-5376262 / 237 06-5376266 P.O.Box: 2088 Amman 11941

@nccdjor feedback@nccd.gov.jo www.nccd.gov.jo

قـرّرت وزارة التربيـة والتعليـم تدريـس هـذا الكتـاب في مـدارس المملكـة الأردنية الهاشـمية جميعهـا، بناءً عـلى قرار المجلـس الأعلى للمركـز الوطني لتطوير المناهج في جلسـته رقـم (2021/5)، تاريـخ 2021/12/7 م، وقرار مجلس التربية والتعليـم رقم (2021/171)، تاريـخ 2021/12/21 م، بـدءًا من العام الـدراسي 2021 / 2022 م.

© HarperCollins Publishers Limited 2021.
- Prepared Originally in English for the National Center for Curriculum Development. Amman - Jordan
- Translated to Arabic, adapted, customised and published by the National Center for Curriculum Development. Amman - Jordan

ISBN: 978 - 9923 - 41 - 294 - 7

المملكة الأردنية الهاشمية
رقم الإيداع لدى دائرة المكتبة الوطنية:
(2022/4/1888)

375,001

الأردن. المركز الوطني لتطوير المناهج

الفيزياء: الصف الحـادي عشر: الفصل الثاني (كتاب الطالب)/ المركز الوطني لتطوير المناهج.- ط2؛ مزيدة ومنقحة.- عمان: المركز، 2022

(156) ص.

ر.إ.: 2022/4/1888

الواصفات: / تطوير المناهج/ / المقررات الدراسية/ / مستويات التعليم/ / المناهج/

يتحمل المؤلف كامل المسؤولية القانونية عن محتوى مصنفه ولا يعبّر هذا المصنف عن رأي دائرة المكتبة الوطنية.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, sorted in retrieval system, or transmitted in any form by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise , without the prior written permission of the publisher or a license permitting restricted copying in the United Kingdom issued by the Copyright Licensing Agency Ltd, Barnard's Inn, 86 Fetter Lane, London, EC4A 1EN.
British Library Cataloguing -in- Publication Data
A catalogue record for this publication is available from the Library.

الطبعة الأولى (التجريبية)
1442 هـ / 2021 م

منهاجي
متعة التعليم الهادف

أعيدت طباعته
2022 م – 2023 م

قائمة المحتويات

الموضوع ..... **الصفحة**

المقدّمة 5

الوحدة الرابعة: الديناميكا الحرارية **7**

تجربة استهلالية: تأثير كتلة الجسم في تغيّر درجة حرارته 9

الدرس الأول: حالات المادّة 10

الدرس الثاني: عمليات الديناميكا الحرارية 33

الدرس الثالث: التمدّد الحراري 56

الوحدة الخامسة: الحركة التوافقية البسيطة **69**

تجربة استهلالية: دراسة الحركة التذبذبية لجسم معلّق في نابض 71

الدرس الأول: خصائص الحركة التوافقية البسيطة 72

الدرس الثاني: تطبيقات الحركة التوافقية البسيطة 93

الوحدة السادسة: الموجات وخصائصها **111**

تجربة استهلالية: قياس سرعة الموجات الميكانيكية في الأوساط الصلبة 113

الدرس الأول: التمثيل البياني للموجات 114

الدرس الثاني: الموجات الموقوفة 123

الدرس الثالث: التداخل والحيود لموجات الضوء 134

مسرد المصطلحات 153

قائمة المراجع 156

منهاجي
متعة التعليم الهادف

بسم الله الرحمن الرحيم

المقدّمة

انطلاقًا من إيمان المملكة الأردنية الهاشمية الراسخ بأهمية تنمية قدرات الإنسان الأردني، وتسليحه بالعلم والمعرفة؛ سعى المركز الوطني لتطوير المناهج، بالتعاون مع وزارة التربية والتعليم، إلى تحديث المناهج الدراسية وتطويرها؛ لتكون معينًا للطلبة على الارتقاء بمستواهم المعرفي، ومجاراة أقرانهم في الدول المتقدمة.

يُعدّ هذا الكتاب واحدًا من سلسلة كتب المباحث العلمية التي تُعنى بتنمية المفاهيم العلمية، ومهارات التفكير وحلّ المشكلات، ودمج المفاهيم الحياتية والمفاهيم العابرة للمواد الدراسية، والإفادة من الخبرات الوطنية في عمليات الإعداد والتأليف وفق أفضل الطرائق المتّبعة عالميًّا؛ لضمان انسجامها مع القيم الوطنية الراسخة، وتلبيتها لحاجات أبنائنا الطلبة والمعلِّمين والمعلِّمات.

وقد روعِيَ في تأليفه تقديم المعلومة العلمية الدقيقة وفق منهجية تقوم على السلاسة في العرض، والوضوح في التعبير، إضافة إلى الربط بين الموضوعات المطروحة في المراحل الدراسية السابقة واللاحقة، واعتماد منهجية التدرّج في عرض موضوعات المادة، واستهلال وحداتها بأسئلة تُظهِر علاقة علم الفيزياء بالظواهر من حولنا؛ ما يُحفّز الطالب على الإفادة ممّا يتعلّمه في غرفة الصف في تفسير مشاهدات يومية وظواهر طبيعية قد تحدث أمامه، أو يشاهدها في التلفاز، أو يسمع عنها. وقد تضمّنت كل وحدة نشاطًا إثرائيًّا يعتمد منحى STEAM في التعليم الذي يُستعمل لدمج العلوم والتكنولوجيا والهندسة والفن والعلوم الإنسانية والرياضيات في أنشطة الكتاب المتنوّعة، وفي قضايا البحث.

ويتألّف الفصل الدراسي الثاني من الكتاب من ثلاث وحدات دراسية، هي: الديناميكا الحرارية، والحركة التوافقية البسيطة، والموجات وخصائصها. وقد أُلحق به كتاب للأنشطة والتجارب العملية، يحتوي على التجارب والأنشطة جميعها الواردة في كتاب الطالب؛ ليساعده على تنفيذها بسهولة، بإشراف المعلّم/ المعلّمة، ومشاركة زملائه/ زميلاته فيها، بما في ذلك رصد القراءات، وتحليلها، ثم مناقشتها، وصولًا إلى استنتاجات مبنية على أسس علمية سليمة. ويتضمّن أيضًا أسئلة تفكير؛ بهدف تعزيز فهم الطالب لموضوعات المادة، وتنمية التفكير الناقد لديه.

ونحن إذ نُقدّم هذه الطبعة من الكتاب، فإنّا نأمل أن يُسهم في تحقيق الأهداف والغايات النهائية المنشودة لبناء شخصية المتعلّم، وتنمية اتجاهات حُبّ التعلّم ومهارات التعلّم المستمرّ، إضافة إلى تحسين الكتاب بإضافة الجديد إلى محتواه، وإثراء أنشطته المتنوّعة، والأخذ بملاحظات المعلِّمين والمعلِّمات.

والله ولي التوفيق

المركز الوطني لتطوير المناهج

الوحدة 4

الديناميكا الحرارية

Thermodynamics

أتأمّل الصورة

الحرارة ودرجة الحرارة والطاقة

يظهر الماء في الصورة في حالاته الفيزيائية الثلاث؛ الصلبة على شكل ثلج، والسائلة في مياه البحيرة، وأخيرًا في حالته الغازية على شكل بخار الماء. فعندما تكتسب المادّة طاقة أو تفقدها تتغيّر طاقتها الداخلية، ما قد يغيّر درجة حرارتها أو حالتها الفيزيائية.

ما المقصود بالطاقة الداخلية؟ وهل لقوانين الديناميكا الحرارية أهمّية في حياتنا؟

الفكرة العامّة:

لعمليات تبادل الطاقة بين الأجسام ولقوانين الديناميكا الحرارية، تأثير كبير في كلّ ما يجري حولنا، وفي عمل كثير من الأجهزة التي نستخدمها في حياتنا اليومية.

الدرس الأول: حالات المادّة

الفكرة الرئيسة: لكلّ من الحرارة ودرجة الحرارة والطاقة الحرارية معنى مختلف، وللطاقة الحرارية أهمّية كبيرة للقيام بأنشطتنا اليومية. تتغيّر الحالة الفيزيائية للمادّة عند اكتسابها أو فقدانها مقدارًا محدّدًا من الطاقة.

الدرس الثاني: عمليات الديناميكا الحرارية

الفكرة الرئيسة: يعتمد مبدأ عمل كثير من الأجهزة؛ مثل الثلّاجات والمكيّفات وآلات الاحتراق الداخلي، على قوانين الديناميكا الحرارية.

الدرس الثالث: التمدّد الحراري

الفكرة الرئيسة: للتمدّد الحراري للموادّ بحالاتها الثلاث أهمّية كبيرة في حياتنا، وفي التطبيقات التكنولوجية المختلفة.

تأثير كتلة الجسم في تغيّر درجة حرارته

الموادّ والأدوات: كوبان بلاستيكيان مع غطاء، برادة حديد (200 g)، مقياس درجة حرارة عدد (2)، ميزان إلكتروني، شريط لاصق، مياه ساخنة (200 mL)، مخبار زجاجي، مناشف ورقية.

إرشادات السلامة: مراعاة عدم سكب الماء على أرضية المختبر، والحذر من الانزلاق نتيجة انسكاب الماء عليها.

خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أُنفّذ الخطوات الآتية:

1. أضع أحد الكوبين داخل الآخر، وأُثبّتهما معًا بالشريط اللاصق، ثم أثقب غطاء الكوب من منتصفه بالمثقب، على أنْ يدخل مقياس درجة الحرارة عبره.
2. **أقيس:** أضع (200 g) من برادة الحديد في الكوب الداخلي وأُغلقه بغطائه بإحكام، ثم أُدخل مقياس درجة الحرارة عبر ثقب الغطاء حتّى يلامس مستودعه برادة الحديد، وأُثبّت المقياس في الغطاء بالشريط اللاصق، ثمّ أقيس درجة حرارة برادة الحديد وأُدوّنها.
3. **أقيس:** أسكبُ (100 mL) من الماء الساخن في المخبار، ثمّ أقيس درجة حرارته وأُدوّنها.
4. **أُلاحظ:** أُزيل غطاء الكوب ومقياس درجة الحرارة المثبّتين معًا، ثمّ أسكبُ بحذر الماء الساخن في الكوب، ثمّ أغلقه بغطائه بسرعة. أُلاحظ ما يحدث لقراءة مقياس درجة الحرارة، وعندما تثبت قراءته أُدوّنها.
5. أُكرّر الخطوات (4–2) بزيادة كمّية الماء الساخن، وأُدوّن نتائجي في جدول بيانات.

التحليل والاستنتاج:

1. **أُفسّر:** لماذا استخدمت كوبين بلاستيكيين ولم أستخدم كوبًا واحدًا؟ أُفسّر إجابتي.
2. **أُفسّر:** ما الذي تُمثّله قراءة مقياس درجة الحرارة في الخطوة 4؟
3. **أُقارن** بين درجتَي حرارة الماء الساخن وبرادة الحديد قبل خلطهما معًا وبعده. أيّهما ارتفعت درجة حرارته؟ وأيّهما انخفضت؟ أُفسّر إجابتي.
4. **أستنتجُ** تأثير زيادة كمية الماء الساخن في تغيّر درجة حرارة الماء وبرادة الحديد.
5. **أتوقّع** كيف تؤثّر مضاعفة كتلة برادة الحديد المستخدمة في درجة حرارة المخلوط النهائية. أُبرّر توقّعي.

الفكرة الرئيسة:

لكلّ من الحرارة ودرجة الحرارة والطاقة الحرارية معنى مختلف، وللطاقة الحرارية أهمّية كبيرة للقيام بأنشطتنا اليومية. تتغيّر الحالة الفيزيائية للمادّة عند اكتسابها أو فقدانها مقدارًا محدّدًا من الطاقة.

نتاجات التعلّم:

- أُفرّق بين المفاهيم الآتية: الحرارة، ودرجة الحرارة، والطاقة الحرارية.
- أُعرّف المفاهيم الآتية: السعة الحرارية النوعية، والحرارة النوعية الكامنة للانصهار، والحرارة النوعية الكامنة للتصعيد.
- أصف تأثير انتقال الطاقة من الجسم وإليه في تغيّر درجة حرارته، أو حالته الفيزيائية.
- أُطبّق بحل مسائل على كمّية الطاقة المكتسبة أو المفقودة، والحرارة النوعية الكامنة للانصهار، والحرارة النوعية الكامنة للتصعيد.

المفاهيم والمصطلحات:

الطاقة الحرارية	Thermal Energy
الحرارة	Heat
اتّزان حراري	Thermal Equilibrium
السعة الحرارية النوعية	Specific Heat Capacity
درجة الانصهار	Melting Point
الحرارة النوعية الكامنة للانصهار	Specific Latent Heat of Fusion
درجة الغليان	Boiling Point
الحرارة النوعية الكامنة للتصعيد (للتبخير)	Specific Latent Heat of Vaporization

مفاهيم أساسية في الديناميكا الحرارية

Basic Concepts in Thermodynamics

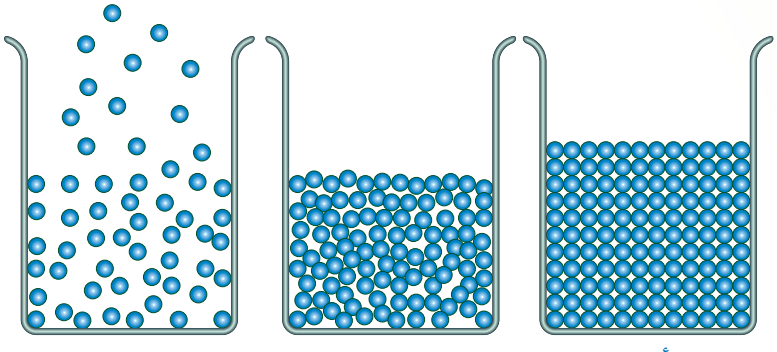
في أثناء دراسة علم الميكانيكا، حُدّدت معاني المفاهيم الأساسية، مثل: الكتلة، والقوّة، والطاقة الحركية، وغيرها بدقّة؛ لتسهيل التعامل معها. وبالمثل، لتسهيل وصف الظواهر الحرارية يلزم تحديد معاني المفاهيم الأساسية فيها بدقّة، ومنها: درجة الحرارة، والحرارة، والطاقة الحرارية. وقبل البدء بدراسة هذه المفاهيم لا بدّ من توضيح نموذج الحركة الجزيئية للمادّة؛ لدراسة الخصائص الحرارية للموادّ على المستوى المجهري.

نموذج الحركة الجزيئية للمادّة

Kinetic Molecular Model of Matter

ينصّ نموذج الحركة الجزيئية على أنّ المواد جميعها، سواء أكانت صلبة أم سائلة أم غازية، تتكوّن من جُسيمات (جزيئات وذرّات)، المسافات الفاصلة بينها صغيرة جدًّا في المواد الصلبة، ومتوسّطة في السوائل، وكبيرة جدًّا في الغازات، أنظرُ الشكل (1). ويوجد بين جُسيمات المادّة الواحدة قوى تعمل على تماسكها وترابطها، تكون كبيرة في الحالة الصلبة، ومتوسّطة في الحالة السائلة، وصغيرة جدًّا في الغازات.

✓ **أتحقّق:** علامَ ينصّ نموذج الحركة الجزيئية للمادّة؟



الشكل (1): (أ) الحالة الصلبة. (ب) الحالة السائلة. (جـ) الحالة الغازية.

درجة الحرارة والطاقة الحرارية

Temperature and Thermal Energy

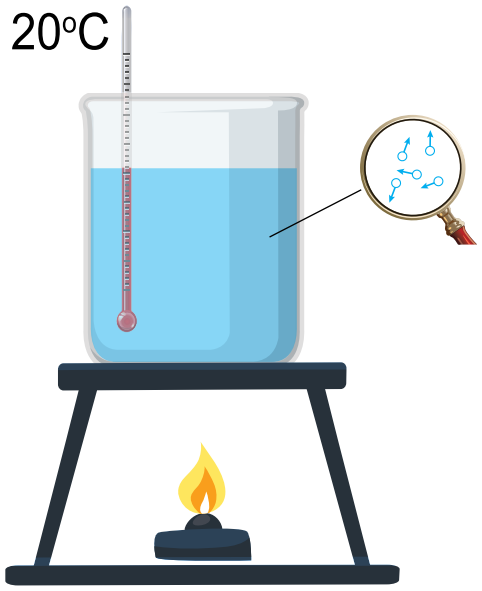
يُستخدم مصطلح درجة الحرارة؛ للتعبير عن مدى سخونة الأجسام أو برودتها. وتُحدّد درجة الحرارة اتّجاه انتقال الطاقة بين الأجسام عند اتصالها حراريًّا؛ إذ تنتقل الطاقة تلقائيًّا من الجسم الأعلى درجة حرارة إلى الجسم الأدنى درجة حرارة. فمثلًا، عندما أضع يدي في طريق الماء المتدفّق من الصنبور، أُحدّد أنّ الماء ساخن أو بارد بناءً على الفرق في درجة الحرارة بينهما. ويكون جسمان أو نظامان في حالة اتّصال حراري Thermal contact عندما تنتقل الطاقة بينهما بطريقة أو أكثر من طرائق انتقال الطاقة (التوصيل الحراري، والحمل الحراري، والإشعاع الحراري) نتيجة الاختلاف في درجتَي حرارتيهما، وليس بالضرورة وجود اتّصال مباشر (تلامس) بينهما. ويُقصد بالنظام System مجموعة الجُسيمات (الذرّات والجزيئات) أو الأجسام تحت الدراسة، وله حدود تفصله عن المحيط الخارجي Surrounding.

إنّ الاعتماد على حاسة اللمس في تحديد درجة حرارة جسم أو نظام قد يكون مضلّلًا أحيانًا؛ لأنّها تختلف من شخص إلى آخر، ولأنّ إحساسي بدرجة حرارة جسم يعتمد على توصيله الحراري، وأنّه يُعطي أيضًا عبارة وصفية لدرجة الحرارة (مثلًا: ساخن، بارد، أسخن، أبرد،...)؛ لذا، يُستخدم مقياس درجة الحرارة Thermometer لقياس درجة الحرارة على نحوٍ أكثر دقّة. وقد طوّر العلماء تدريجات مختلفة لقياس درجة الحرارة، من أشهرها: تدريج سلسيوس Celsius scale، وتدريج فهرنهايت Fahrenheit scale، وتدريج كلفن (المطلق) Kelvin scale. وقد درستُ ذلك بالتفصيل في الصفّ الثامن.

للحصول على تعريف أدقّ لدرجة الحرارة، أدرسُ ما يحصل لجُسيمات مادّة على المستوى المجهري عندما تكسب طاقة أو تفقدها؛ إذ تمتلك هذه الجُسيمات طاقة حركية، وطاقة كامنة ناتجة من القوى المتبادلة بين جُسيمات المادّة، أنظرُ الشكل (2). فعندما يكسب جسم طاقة يزداد مقدار سرعة حركة جُسيماته العشوائية (الاهتزازية، الانتقالية، الدورانية)، أي تزداد طاقاتها الحركية، فترتفع درجة حرارته. إذًا: لا بدّ من

أُعدّ فيلمًا قصيرًا باستخدام صانع الأفلام (Movie maker) يعرض ترتيب جُسيمات مادّة في حالاتها الثلاث: الصلبة والسائلة والغازية، وكيفية حركة جُسيماتها وفقًا لنموذج الحركة الجزيئية.

أفكّر: عندما أقف حافي القدمين في الغرفة، واضعًا إحدى قدمَي على سجادة، والأُخرى على أرضية الغرفة، أحسّ بأنّ أرضية الغرفة أكثر برودة من السجادة على الرغم من أنّ لهما درجة الحرارة نفسها؟ أُناقش أفراد مجموعتي، وأستخدمُ مصادر المعرفة المُتاحة للتوصّل إلى إجابة عن السؤال.



لجزيئات الماء مثلًا، طاقة حركية نتيجة حركتها العشوائية، وتوجد أيضًا طاقة كامنة بين جزيئات الماء، وطاقة كامنة بين الذرّات داخل الجزيئات.

الشكل (2): الطاقة الحركية والطاقة الكامنة لجُزيئات الماء.

وجود علاقة بين درجة حرارة الجسم والطاقة الحركية لجُسيماته؛ لذا، تُعرّف درجة الحرارة Temperature بأنّها مقياس لمتوسّط الطاقة الحركية للجُسيمات المكوّنة لجسم ما. أمّا **الطاقة الحرارية** **Thermal energy** فتُساوي مجموع الطاقة الحركية لجُسيمات الجسم جميعها.

يوضّح الشكل (3) كأسَي شاي متماثلتين لهما درجة الحرارة نفسها (T)؛ لذا، يكون متوسّط الطاقة الحركية للجُسيمات الموجودة في الكأسين متساويًا. ونظرًا إلى أنّ كتلة الشاي (ومن ثمّ عدد جُسيماته) في الكأس المُبيَّنة في الشكل (3/ أ) أكبر منها في الكأس المُبيَّنة في الشكل (3/ ب)؛ فإنّ الطاقة الحرارية للشاي في الشكل (3/ أ) هي الأكبر، على الرغم من أنّ لهما درجة الحرارة نفسها.

✓ **أتحقّق:** ما الفرق بين درجة الحرارة والطاقة الحرارية؟

الشكل (3): الطاقة الحرارية للشاي في الشكل (أ) أكبر منها للشاي في الشكل (ب)، على الرغم من تساوي درجتَي حرارة الشاي في الكأسين.

الحرارة Heat

عندما يكون جسمان (نظامان) في حالة اتّصال حراري تنتقل الطاقة من الجسم الأعلى درجة حرارة إلى الجسم الأدنى درجة حرارته، وتُسمّى هذه الطاقة المنتقلة **الحرارة Heat**، ورمزها Q.

استخدم العلماء وحدات قياس مختلفة لقياس الحرارة خلال فترة تطوّر مفهومها، ولا يزال بعضها مستخدمًا، ومن أشهرها: السعر calorie وهو كمّية الطاقة اللازمة لرفع درجة حرارة (1 g) من الماء بمقدار ($1^{\circ}C$)، وتستخدم هذه الوحدة عادة للدلالة على مقدار ما يحويه الغذاء من طاقة. أما وحدة قياس الحرارة حسب النظام الدولي للوحدات فهي الجول joule (J)، وهي نفسها وحدة قياس أشكال الطاقة الأُخرى. والعلاقة الرياضية التي تربط السعر بالجول هي: $1\ cal = 4.186\ J$.

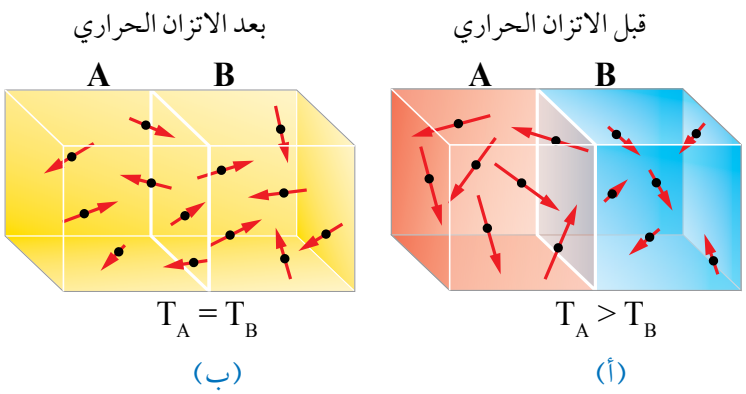
✓ **أتحقّق:** ما المقصود بالحرارة؟ وما وحدة قياسها حسب النظام الدولي للوحدات؟

الربط بالعلوم الحياتية

تحتاج الكائنات الحية إلى الطاقة لتتمكّن من القيام بأنشطتها المختلفة (تنفّس، تدوير الدم، هضم الطعام، النشاط البدني، ...)، وتحصل على هذه الطاقة من الغذاء الذي تتناوله؛ إذ يُزوّدها الغذاء بالطاقة اللازمة. فمثلًا، يحتاج جسم الإنسان إلى الطاقة للقيام بالأنشطة والأعمال المختلفة، ويتغيّر معدل حاجته إلى الطاقة حسب مستوى نشاط الجسم، والعمر، والجنس، وكتلة الجسم.

أبحثُ

تختلف السعرات الحرارية التي أحصل عليها من الغذاء حسب المادّة الغذائية التي أتناولها. أبحثُ عن كمّية السعرات الحرارية التي يُزوّدني بها (1 g) من المواد الغذائية التي أتناولها عادة. وأُعدّ عرضًا تقديميًّا أعرضه أمام طلبة الصفّ.



الشكل (4):

أ . الجسمان مختلفان في درجتَي حرارتيهما.

ب . عند الاتزان الحراري تتساوى درجتا حرارة الجسمين.

الاتّزان الحراري Thermal Equilibrium

يوضّح الشكل (4/ أ) جسمين مختلفين في درجتَي حرارتيهما؛ إذ درجة حرارة الجسم A أكبر منها للجسم B، وهذا يعني أنّ جُسيمات الجسم A لها متوسّط سرعة أكبر. ومن ثمّ، فإنّ متوسّط طاقتها الحركية أكبر منها للجسم B. وعند اتّصال الجسمين حراريًّا تنتقل الطاقة تلقائيًّا من الجسم الأعلى درجة حرارة إلى الجسم الأدنى درجة حرارة؛ إذ تصطدم الجُسيمات المتحرّكة بسرعة كبيرة في الجسم A بالجُسيمات المتحرّكة بسرعة أقلّ منها في الجسم B، فتنتقل الطاقة من الجسم A إلى الجسم B نتيجة هذه التصادمات، ما يعني ازدياد الطاقة الحركية لجُسيمات الجسم B وتناقصها لجُسيمات الجسم A. ويستمرّ انتقال الطاقة بين الجسمين حتى يُصبح لهما درجة الحرارة نفسها، وعندها يتساوى معدلا انتقال الطاقة بين الجسمين، ويكونان في حالة **اتّزان حراري Thermal equilibrium**، ويكون صافي الطاقة المنتقلة بين الجسمين صفرًا، أنظرُ الشكل (4/ ب).

✓ **أتحقّق:** متى يصل جسمان إلى حالة الاتّزان الحراري؟

السعة الحرارية النوعية Specific Heat Capacity

أُلاحظ في يوم مشمس دافئ، أنّ الماء في مسبح خارجي يظلّ أكثر برودة من الخرسانة حول المسبح. لماذا هذا الاختلاف في درجة الحرارة بينهما، إذا كان كلّ منهما يستقبل من الشمس كمّية الطاقة نفسها لكلّ وحدة مساحة وخلال الفترة الزمنية نفسها؟ للإجابة عن ذلك أُنفّذ التجربة الآتية:

أُصمّم باستخدام برنامج السكراتش (Scratch) عرضًا يوضّح طريقة انتقال الطاقة بين جسمين مختلفين في درجتَي حرارتيهما، حتّى يصلا إلى حالة الاتّزان الحراري.

التجربة 1

تأثير نوع مادّة الجسم في تغيُّر درجة حرارته

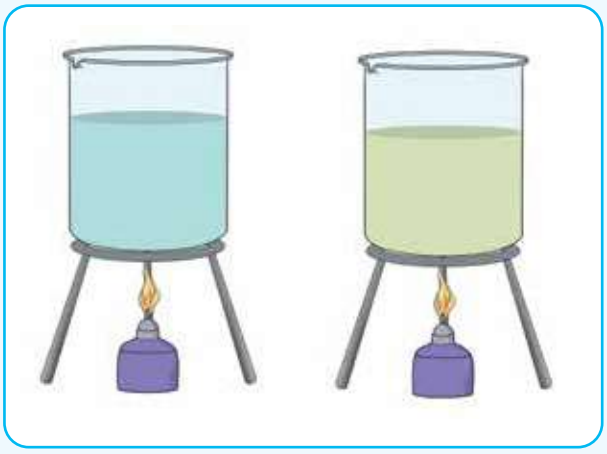
الموادّ والأدوات: مصدرا حرارة متماثلان، 3 دوارق زجاجية سَعة (150 mL) متماثلة، 100 g ماء بدرجة حرارة الغرفة، 100 g زيت طهي بدرجة حرارة الغرفة، مقياسا درجة حرارة، ساعة إيقاف، ميزان إلكتروني.

إرشادات السلامة: ارتداء المعطف واستعمال النظّارات الواقية للعينين وقفّازين حراريّين، والحذر من انسكاب الزيت على أرضية المختبر، والحذر من لمس مصدر الحرارة، وعدم رفع درجة حرارة الزيت بمقدار كبير.

خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أُنفّذ الخطوات الآتية:

1. **أقيس** باستخدام الميزان (100 g) ماء، و (100 g) زيت، ثم أسكب الماء في دورق، وأسكب الزيت في دورق آخر.
2. **أقيس** درجتَي حرارة الماء والزيت الابتدائية، ثمّ أُدوّنهما.
3. **أضبط المتغيّرات:** أضع كل دورق على مصدر حرارة، ثم أُشعل المصدرين في اللحظة نفسها، وأُشغّل ساعة الإيقاف، ثم أُطفئ مصدرَي الحرارة في اللحظة نفسها بعد مرور مدّة زمنية مناسبة (ثلاث دقائق مثلًا).
4. **أقيس** درجتَي حرارة الماء والزيت النهائية، ثمّ أُدوّنهما.
5. أُكرّر التجربة مرّة أُخرى بوضع كمّيتين مختلفتين من الماء في دورقين؛ لدراسة تأثير كتلة الجسم في مقدار تغيّر درجة حرارته، وأُدوّن نتائجي.
6. أُكرّر التجربة مرّة أُخرى بوضع كمّية محدّدة من الماء في دورق، ثمّ تسخينها مُددًا زمنية مختلفة؛ لدراسة تأثير زمن تسخين الجسم في مقدار تغيّر درجة حرارته، وأُدوّن نتائجي.



التحليل والاستنتاج:

1. **أستنتجُ:** أُحدّد المتغيّر المستقلّ والمتغيّر التابع في التجربة.
2. **أُحلّل وأستنتجُ:** ما العلاقة بين كمّيتي الطاقة التي زوّدت بهما السائلين؟ هل هما متساويتان أم لا؟ أُفسّر إجابتي.
3. **أحسبُ** مقدار التغيّر في درجة حرارة الماء، ومقدار التغيّر في درجة حرارة الزيت، ثمّ أُدوّنهما.
4. **أُقارن** مقدار التغيّر في درجة حرارة الماء بمقدار التغيّر في درجة حرارة الزيت. هل هما متساويان؟ ماذا أستنتجُ؟ أُوضّح إجابتي.
5. **أُحلّل وأستنتجُ:** ما الذي أستنتجُه بعد تنفيذ الخطوة (5)؟
6. **أُحلّل وأستنتجُ:** ما الذي أستنتجُه بعد تنفيذ الخطوة (6)؟
7. **أتوقّع** مصادر الخطأ المحتملة في التجربة.

تختلف الكتل المتساوية المصنوعة من موادّ مختلفة في مقدار تغيّر درجة حرارتها، عند اكتسابها أو فقدها كمّية الطاقة نفسها، فبعضها ترتفع درجة حرارته بمقدار أقلّ من غيره على الرغم من تزويدها بكمّيات متساوية من الطاقة. وأستنتجُ بعد تنفيذ التجربة السابقة أنّ نوع مادّة الجسم يؤثّر في مقدار التغيّر في درجة حرارته عند تسخينه أو تبريده؛ إذ توجد خاصّية للمادّة تعتمد على طبيعتها، وتختلف من مادّة إلى أُخرى نتيجة اختلاف كيفية حركة ذرّاتها وجزيئاتها على المستوى المجهري، واختلاف عدد ذرّاتها أو جزيئاتها في وحدة الكتل، إضافة إلى اختلافها في مقدرتها على توصيل الطاقة حسب تراصّ الذرّات وترابطها. تُسمّى هذه الخاصّية **السعة الحرارية النوعية** **Specific heat capacity (*c*)**، وتُعرّف بأنّها كمّية الطاقة اللازمة لرفع درجة حرارة (1 kg) من المادّة بمقدار (1 K)، وتُقاس بوحدة J/kg.K حسب النظام الدولي للوحدات. وهي تعتمد على نوع مادّة الجسم فقط؛ فهي تختلف من مادّة إلى أُخرى، ولا تعتمد على كتلة الجسم أو حجمه.

وبناءً على السعة الحرارية النوعية؛ يُمكنني تفسير سبب ارتفاع درجة حرارة الماء في المسبح بمقدار أقلّ من ارتفاع درجة حرارة الخرسانة المحيطة به، بأنّه نتيجة الاختلاف في السعة الحرارية النوعية بينهما. فالسعة الحرارية النوعية للماء (4186 J/kg.K) تقريبًا، في حين أنّ السعة الحرارية النوعية للخرسانة (880 J/kg.K) تقريبًا. وهذا يعني أنّ (1 kg) من الخرسانة يحتاج فقط إلى (880 J) من الطاقة لرفع درجة حرارته بمقدار (1 K)، في حين أنّ (1 kg) من الماء يحتاج إلى خمسة أضعاف هذه الطاقة تقريبًا لرفع درجة حرارته بمقدار (1 K)؛ لذا، ترتفع درجة حرارة الخرسانة ذات السعة الحرارية النوعية الأصغر على نحوٍ أسرع من الماء ذي السعة الحرارية النوعية الأكبر على الرغم من تزويدهما بمعدّل الطاقة نفسه لكلّ وحدة مساحة، وأنّها تبرد أيضًا بصورة أسرع من الماء عند فقدهما معدّل الطاقة نفسه.

وألاحظ أيضًا بعد تنفيذ التجربة السابقة، أنّه إضافة إلى تأثير نوع مادّة الجسم (السعة الحرارية النوعية) في مقدار التغيّر في درجة حرارته، فإنّ لكلّ من كتلته وكمّية الطاقة التي يُزوّد بها تأثير أيضًا في مقدار هذا

أُفكّر: يجب تفقّد الماء في المشعّات (الراديتر) في السيارة بشكل دوري؛ للتأكّد من كمّية الماء فيها. لماذا يُحذّر من فتح غطاء (الراديتر) عندما تكون درجة حرارة المحرّك مرتفعة؟ أُناقش أفراد مجموعتي، وأستخدمُ مصادر المعرفة المُتاحة للتوصّل إلى إجابة عن السؤال.

أبحثُ

تحتوي الكائنات الحية على نِسَب مختلفة من الماء في أجسامها؛ فنسبة الماء في جسم الإنسان مرتفعة تصل إلى (70%) تقريبًا من كتلة جسمه. أبحثُ في دور وجود الماء في جسم الإنسان وغيره من الكائنات الحية، وأهمّيته في المحافظة على ثبات درجات حرارة أجسامها طوال اليوم تقريبًا، وأُعدّ عرضًا تقديميًّا أعرضه أمام طلبة الصفّ.

التغيّر. أربطُ هذه المتغيّرات معًا عن طريق تعريف السعة الحرارية النوعية رياضيًّا على النحو الآتي:

إذا زوّد جسم كتلته (m) بطاقة مقدارها (Q)، وتغيّرت درجة حرارته بمقدار (ΔT)، فإنّه يمكن التعبير عن السعة الحرارية النوعية لمادّة الجسم رياضيًّا بالعلاقة الآتية:

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

أستخدمُ هذه العلاقة لحساب كمّية الطاقة التي يكتسبها جسم أو يفقدها عند تغيّر درجة حرارته -التي تساوي التغيّر في طاقته الحرارية (ΔE)- على النحو الآتي:

$$Q = mc\,\Delta T = mc\,(T_f - T_i)$$

أُلاحظ أنّه إذا اكتسب الجسم طاقة؛ فإنّ كلًّا من (Q) و (ΔT) تكونان موجبتين. أمّا إذا فقد الجسم طاقة فإنّ كلًّا من (Q) و (ΔT) تكونان سالبتين. ويُمكنني حساب التغيّر في درجة الحرارة بوحدة سلسيوس أو كلفن؛ إذ إنّ الفرق بين تدريجين متتاليين في مقياس سلسيوس يساوي عدديًّا الفرق بين تدريجين متتاليين في مقياس كلفن. ويوضّح الجدول (1) السعة الحرارية النوعية لبعض المواد الشائعة.

أتحقّق: ما السعة الحرارية النوعية؟ ما العوامل التي تعتمد عليها كمّية الطاقة المكتسبة أو المفقودة؟

الجدول 1: السعة الحرارية النوعية لبعض الموادّ الشائعة عند درجة حرارة (25°C) وضغط جوي معياري.

المادّة	السعة الحرارية النوعية $c(\times 10^3$ J/kg.K)
الألمنيوم	0.9
النحاس	0.387
الذهب	0.129
الحديد	0.448
الرصاص	0.128
الفضة	0.234
الجليد (0°C)	2.093
الماء (15°C)	4.186
بخار الماء (100°C)	2.01

الربط بالحياة

يُعدّ الماء سائلًا مثاليًّا للتبريد؛ بسبب سَعته الحرارية النوعية الكبيرة جدًّا، فهو يسخن ببطء ويبرد ببطء، وهذا يُمكّنه من اختزان الطاقة والحفاظ عليها لمدد زمنية طويلة بالمقارنة مع غيره من السوائل؛ لذا، يُستخدم الماء في أنظمة التبريد في المحرّكات؛ إذ يمكن لكمّية قليلة من الماء أن تكتسب كمّية كبيرة من الطاقة من أجزاء المحرّك مقابل ارتفاع قليل في درجة حرارتها، ثم يجري التخلّص من هذه الطاقة إلى الهواء الجوي عن طريق المشعّات (الراديتر Radiators)، حيث يُبرّد الماء؛ كي يرجع مرّة أُخرى إلى أجزاء المحرّك ويكمل دورته، أنظرُ الشكل (5). وهذا من شأنه حماية المحرّك من التلف، والمحافظة على فاعليّته في تحويل الطاقة.

الشكل (5): يُستخدم الراديتر في أنظمة التبريد؛ للتخلّص من الطاقة الناتجة في أجزاء المحرّك.

المثال 1

وضعت هناء قطعة رصاص كتلتها (250 g) ودرجة حرارتها (20°C)، على مصدر حراري زوّدها بكمّية طاقة مقدارها (2.6 kJ). إذا علمتُ أنّ السعة الحرارية النوعية للرصاص (c_{Pb} = 130 J/kg.K) تقريبًا، فأحسبُ مقدار ما يأتي:

أ . التغيّر في الطاقة الحرارية لقطعة الرصاص (ΔE_{Pb}).

ب. درجة حرارة قطعة الرصاص النهائية.

المعطيات: $m = 250\ \text{g} = 0.250\ \text{kg},\ T_i = 20^\circ\text{C},\ Q = 2.6 \times 1\ 0^3\ \text{J},\ c_{Pb} = 130\ \text{J/kg.K}$

المطلوب: $\Delta E_{Pb} = ?,\ T_f = ?$

الحلّ:

أ . مقدار التغيّر في الطاقة الحرارية لقطعة الرصاص يساوي كمّية الطاقة التي اكتسبتها؛ إذ لا يوجد تغيّر في الحالة الفيزيائية للرصاص.

$$\Delta E_{Pb} = Q = 2.6 \times 10^3\ \text{J}$$

ب. أستخدمُ العلاقة الآتية لحساب درجة حرارة قطعة الرصاص النهائية.

$$Q = mc\,\Delta T$$

$$\Delta T = \frac{Q}{mc} = \frac{2.6 \times 10^3}{0.250 \times 130} = 80^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = T_f - T_i$$

$$T_f = \Delta T + T_i = 80 + 20 = 100^\circ\text{C}$$

المثال 2

سخّان كهربائي قدرته (1.5 kW)، يحتوي على (20 kg) ماء درجة حرارته (15°C)، يُراد تسخينه إلى درجة حرارة (65°C). بافتراض تحوّل الطاقة الكهربائية كاملة إلى طاقة حرارية اكتسبها الماء، والسعة الحرارية النوعية للماء (c_w = 4200 J/kg.K) تقريبًا، أحسبُ مقدار ما يأتي:

أ . كمّية الطاقة التي اكتسبها الماء.

ب. الزمن الذي يستغرقه السخّان في تسخين الماء.

المعطيات: $P = 1.5 \times 10^3\ \text{W},\ m = 20\ \text{kg},\ T_i = 15^\circ\text{C},\ T_f = 65^\circ\text{C},\ c_w = 4200\ \text{J/kg.K}.$

المطلوب: $Q = ?\ ,\ \Delta t = ?$

الحلّ:

أ . تحوّل مقاومة السخّان الطاقة الكهربائية إلى طاقة حرارية يكتسبها الماء، وترفع درجة حرارته.

$$Q = mc\,\Delta T$$

$$= 20 \times 4.2 \times 10^3 \times (65 - 15)$$

$$= 4.2 \times 10^6\ \text{J}$$

ب. العلاقة التي تربط القدرة بالشغل والزمن، هي:

$$P = \frac{W}{\Delta t}$$

الطاقة الكهربائية التي يستهلكها السخّان، تُساوي كمية الطاقة التي يكتسبها الماء.

$$P = \frac{W}{\Delta t} = \frac{Q}{\Delta t}$$

$$\Delta t = \frac{Q}{P} = \frac{4.2 \times 10^6}{1.5 \times 10^3}$$

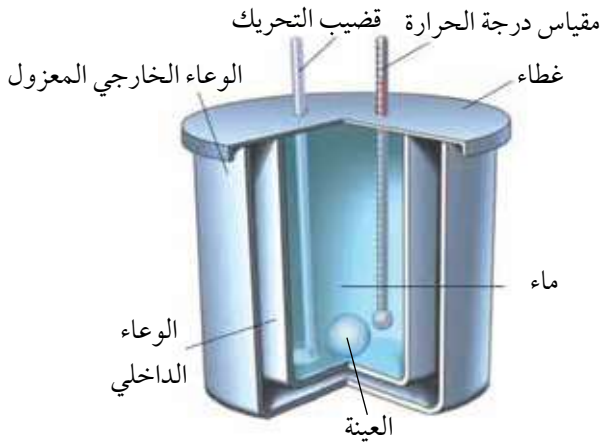
$$= 2.8 \times 10^3\ \text{s} = 46.67\ \text{min}$$

تمرين

1. **أحسبُ:** قطعة ألمنيوم كتلتها (15 g) ودرجة حرارتها (450 K). وُضِعت داخل إناء يحتوي على ماء فانخفضت درجة حرارتها إلى (280 K). أحسبُ كمّية الطاقة التي فقدتها قطعة الألمنيوم.

2. **أُحلّل وأستنتجُ:** يُبيّن الشكل (6) أحد أنواع الألعاب النارية البرّاقة الصغيرة التي تُحمل باليد وتُسمّى الماسة (Sparkler)، وتتميّز بأنّها تشتعل ببطء مولّدة شررًا ولهبًا. وتكون درجة حرارة الجزء المشتعل منها (2000°C) تقريبًا، ويؤدّي لمسه باليد إلى الإصابة بحروق خطيرة. أوضّح لماذا لا يُسبّب سقوط شرارة منبعثة من الماسة المحترقة على الجلد إصابات خطيرة له؟

الشكل (6): الشرر المتطاير من أحد أنواع الألعاب النارية (Sparklers).



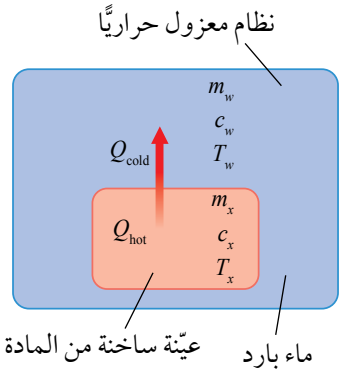
الشكل (7): مسعّر حراري بسيط لقياس السعة الحرارية النوعية لعيّنة من مادّة.

المسعّر الحراري Calorimeter

لقياس السعة الحرارية النوعية لمادّة معيّنة؛ يلزمني قياس كلّ من: كتلتها، والتغيّر في درجة حرارتها، وكمّية الطاقة التي تكتسبها أو تفقدها. يمكن قياس الكتلة والتغيّر في درجة الحرارة بطريقة مباشرة، أمّا قياس كمّية الطاقة فيتطلّب إجراءات وخطوات عدّة.

نظرًا إلى أنّ السعة الحرارية النوعية للماء معروفة؛ فيُمكنني قياس كمّية الطاقة المتبادلة بين عيّنة من مادّة مجهولة السعة الحرارية النوعية وكمّية محدّدة من الماء. إذ تُسخّن عيّنة معلومة الكتلة من مادّة معيّنة إلى درجة حرارة محدّدة، ثمّ توضع في وعاء معزول حراريًّا يحتوي على ماء بارد معلوم الكتلة ودرجة الحرارة، ثمّ تُقاس درجة حرارة الماء بعد وصول النظام المكوّن من الماء والعيّنة والوعاء إلى حالة الاتّزان الحراري، فيُمكنني حساب السعة الحرارية النوعية لتلك المادّة. تُسمّى الأداة التي يحدث داخلها تبادل الطاقة الحرارية **المسعّر الحراري Calorimeter**. أنظرُ الشكل (7) الذي يوضّح مكوّنات مسعّر حراري بسيط معزول حراريًّا، بحيث لا يحدث تبادل حراري بينه وبين المحيط الخارجي قدر الإمكان.

يوضّح الشكل (8) نظامًا يتكوّن من عيّنة (x) مرتفعة درجة الحرارة (T_x) من مادّة مجهولة السعة الحرارية النوعية (c_x) موضوعة في ماء بارد؛ إذ تنتقل الطاقة تلقائيًّا داخل النظام من الجزء الأعلى درجة حرارة إلى الجزء الأدنى درجة حرارة، حتّى يُصبحا في حالة اتّزان حراري، ويكون لهما درجة الحرارة النهائية (T_f) نفسها.



الشكل (8): في تجربة قياس السعة الحرارية النوعية، توضع عيّنة ساخنة من مادّة مجهولة السعة الحرارية النوعية في ماء بارد، في وعاء يعزل النظام عن المحيط الخارجي.

إذا كان النظام مغلقًا ومعزولًا حراريًّا، بحيث لا تدخل طاقة أو مادّة إلى النظام ولا تغادره، يبقى المجموع الكلّي للطاقة في النظام ثابتًا. وبافتراض أنّ النظام مكوّن من العيّنة (x) والماء (بإهمال الطاقة التي تكتسبها مادة المسعّر) فتكون الطاقة الكلية للنظام ثابتة، أي إنّ:

$$E_x + E_w = constant$$

ونظرًا إلى أنّ النظام مغلق ومعزول حراريًّا؛ فإنّ التغيّر الكلّي في طاقة النظام يجب أن يساوي صفرًا، أي إنّ:

$$\Delta E_x + \Delta E_w = 0$$

$$\Delta E_x = -\Delta E_w$$

لا يوجد تغيّر في الحالة الفيزيائية لجزأي النظام؛ لذا، يكون التغيّر في طاقة كل منهما ناتج من التغيّر في طاقته الحرارية فقط. أُلاحظ أنّ التغيّر في الطاقة الحرارية لأحد جزأي النظام موجب، فترتفع درجة حرارته، بينما يكون التغيّر في الطاقة الحرارية لجزء النظام الآخر سالبًا، فتنخفض درجة حرارته. ونظرًا إلى أنّ النظام مغلق ومعزول ولا يُبذل شغل عليه؛ فإنّ التغيّر في الطاقة الحرارية لجزأي النظام ناتج من انتقال الطاقة بينهما، ومقداره يساوي كمية الطاقة المنتقلة (Q)؛ لذا، يمكن التعبير عن تغيّر الطاقة الحرارية لكلّ من جزأي النظام بالعلاقة الآتية:

$$\Delta E = Q = mc\,\Delta T$$

ونظرًا إلى أنّ كمّية الطاقة التي تفقدها العيّنة x (Q_{hot}) تساوي كمّية الطاقة التي يكتسبها الماء البارد (Q_{cold})، وباستخدام مبدأ حفظ الطاقة؛ يُمكنني التعبير رياضيًّا عمّا سبق على النحو الآتي:

$$Q_x + Q_w = 0$$

ولأيّ عدد من الأجسام (A, B, C, …) في حالة اتّصال حراري في نظام مغلق ومعزول ومتّزن حراريًّا، يمكن كتابة معادلة انتقال الطاقة بينها على النحو الآتي:

$$Q_A + Q_B + Q_C + \cdots = 0$$

✓ **أتحقّق:** كيف أقيس السعة الحرارية النوعية لمادّة عمليًّا؟

المثال 3

مسعّر حراري يحتوي على ماء كتلته (0.4 kg) ودرجة حرارته (20°C)، وضِعت فيه كرة فلزّية كتلتها (0.05 kg) ودرجة حرارتها (200°C). إذا كانت درجة الحرارة النهائية للنظام عند الاتّزان الحراري (22.4°C)، والنظام مغلق ومعزول وبإهمال الطاقة التي تكتسبها مادة المسعّر، فأحسبُ مقدار ما يأتي:

أ . التغيّر في الطاقة الحرارية للماء.

ب. السعة الحرارية النوعية لمادّة الكرة الفلزّية.

المعطيات:

$m_w = 0.4\ \text{kg}\ ,\ T_{i,w} = 20^\circ\text{C}\ ,\ m_b = 0.05\ \text{kg}\ ,\ T_{i,b} = 200^\circ\text{C}\ ,\ T_f = 22.4^\circ\text{C}\ ,\ c_w = 4200\ \text{J/kg.K}.$

المطلوب:

$\Delta E_w = ?\ ,\quad c_b = ?$

الحلّ:

أ. تفقد الكرة الفلزّية الساخنة كمّية من الطاقة يكتسبها الماء البارد، حتّى يصلا إلى حالة الاتّزان الحراري. أحسبُ التغيّر في طاقته الحرارية على النحو الآتي:

$$\Delta E_w = Q_w = (mc\,\Delta T)_w$$
$$= (0.4 \times 4200 \times (22.4 - 20))_w$$
$$= 4.03 \times 10^3\ \text{J}$$

التغير في الطاقة الحرارية للماء موجب، أي إنّه اكتسب طاقة.

ب. أستخدم معادلة انتقال الطاقة الآتية:

$$Q_w + Q_b = 0$$
$$Q_w = -Q_b$$
$$m_w c_w\,\Delta T_w = -m_b c_b\,\Delta T_b$$

وبالحلّ بالنسبة إلى (c_b):

$$c_b = -\frac{(m_w c_w\,(T_f - T_{i,w})}{m_b\,(T_f - T_{i,b})}$$

$$c_b = -\frac{4.03 \times 10^3}{0.05 \times (22.4 - 200)}$$

$$c_b = 454\ \text{J/kg.K}$$

تمرين

وضع ياسين قالبًا فلزّيًّا كتلته (0.14 kg) ودرجة حرارته (160°C)، في مسعّر حراري يحتوي على ماء كتلته (0.15 kg) ودرجة حرارته (10°C)، فكانت درجة الحرارة النهائية للنظام عند الاتّزان الحراري (24°C). إذا علمتُ أنّ النظام مغلق ومعزول وبإهمال الطاقة التي تكتسبها مادّة المسعّر، فأحسبُ مقدار ما يأتي:

أ . التغيّر في الطاقة الحرارية للقالب الفلزّي.

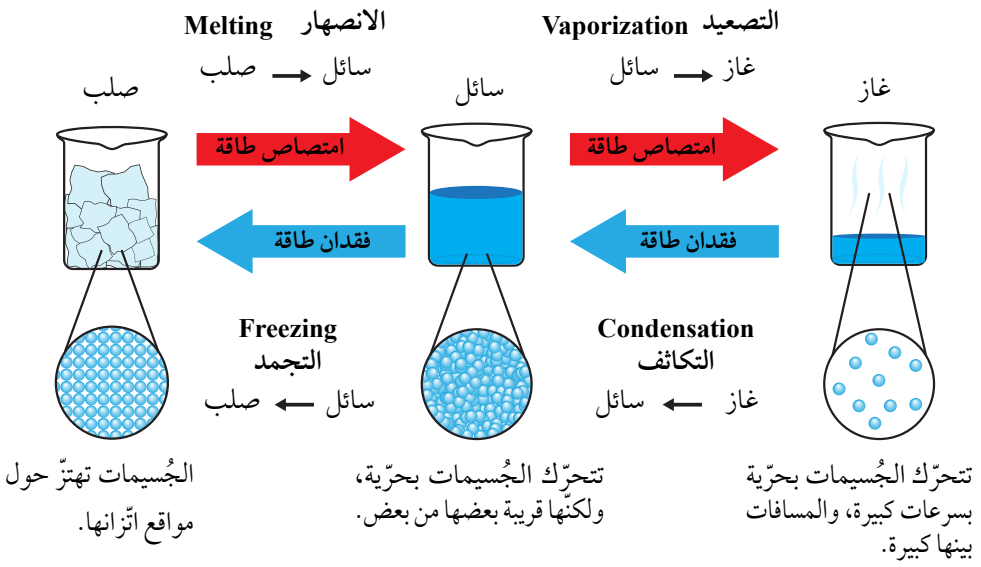
ب. السعة الحرارية النوعية لمادّة القالب.

حالات المادّة States of Matter

تُصنّف المواد حسب حالتها الفيزيائية إلى: صلبة، أو سائلة، أو غازية. تُسمّى هذه الحالات الثلاث الحالات الفيزيائية للمادّة. وتوجد حالة فيزيائية رابعة للمادّة تُسمّى البلازما (Plasma)، عند درجات الحرارة العالية جدًّا فقط؛ لذا، لن ندرسها.

يحدث غالبًا تغيّر في درجة حرارة المادّة عندما تنتقل الطاقة بينها وبين محيطها الخارجي. ولكن، توجد حالات لا يؤدّي فيها نقل الطاقة إلى تغيّر في درجة الحرارة. ويحدث هذا عندما تتغيّر الخصائص الفيزيائية للمادّة، ويُشار إلى هذا التغيّر عادة باسم تغيّر الحالة الفيزيائية Phase change، أنظرُ الشكل (9).

يوجد تغيّران شائعان في الحالة الفيزيائية للمادّة، هما: التغيّر بين الحالتين الصلبة والسائلة (الانصهار، والتجمّد)، والتغيّر بين الحالتين السائلة والغازية (التصعيد، والتكاثف). تتضمّن هذه التغيّرات في الحالة الفيزيائية للمادّة تغيّرًا في الطاقة الكامنة (الوضع) للمادّة، من دون تغيّر في درجة حرارتها.



الشكل (9): التغيّرات في الحالة الفيزيائية للمادّة عند اكتسابها أو فقدها كمّية محدّدة من الطاقة عند درجات حرارة محدّدة، وتوضيح ما يُرافق تغيّر الحالة الفيزيائية على جُسيمات المادّة.

التغيّر بين الحالتين: الصلبة والسائلة

Change of State Between Solid and Liquid

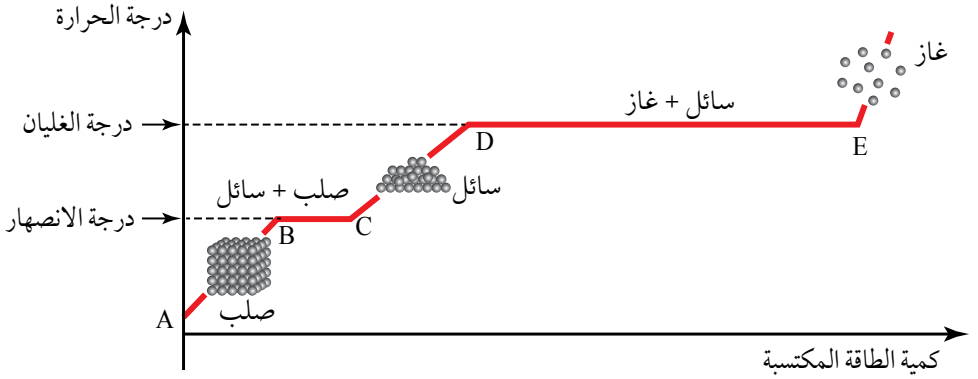
عند تزويد مادّة صلبة بالطاقة؛ ترتفع درجة حرارتها حتّى تصل إلى درجة حرارة محدّدة تثبت عندها، على الرغم من استمرار تزويدها بالطاقة، وأُلاحظ أنّ الحالة الفيزيائية للمادّة الصلبة تبدأ في التغيّر وتتحوّل إلى الحالة السائلة عند درجة الحرارة نفسها. تُسمّى درجة الحرارة التي تتغيّر عندها الحالة الفيزيائية للمادّة من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة **درجة الانصهار Melting point**، وهي خاصّية فيزيائية للمادّة النقية، وتتغيّر من مادّة إلى أُخرى حسب قوى الترابط بين جُسيمات المادّة. وهي نفسها درجة حرارة التجمّد Freezing point التي تتغيّر عندها الحالة الفيزيائية للمادّة من الحالة السائلة إلى الحالة الصلبة. أسأل: ماذا حدث لكمّية الطاقة التي زوّدت للمادّة في أثناء انصهارها؛ إذ إنّها لم ترفع درجة حرارتها؟ للإجابة عن ذلك، أدرسُ الحرارة النوعية الكامنة للانصهار.

أفكّر: عند درجة تجمّد الماء أو درجة انصهاره (درجة حرارة (0°C))، يوجد الماء في حالتيه الصلبة والسائلة معًا. إذا أضفتُ (20 g) من الجليد عند درجة حرارة (0°C) إلى كأس عصير، فسيكون له تأثير تبريد في العصير أكبر من إضافة (20 g) من الماء السائل عند (0°C) إليه. لماذا؟ أُناقش أفراد مجموعتي، وأستخدمُ مصادر المعرفة المُتاحة للتوصّل إلى إجابة عن السؤال.

الحرارة النوعية الكامنة للانصهار Specific Latent Heat of Fusion

درستُ أنّ تسخين مادّة ما يتسبّب في زيادة الطاقة الحركية لجُسيماتها، فتزداد درجة حرارتها. أمّا في أثناء تغيّر الحالة الفيزيائية للمادّة عند درجة الانصهار، فإنّ تسخينها يزيد من الطاقة الكامنة للجُسيمات، مع بقاء طاقتها الحركية ثابتة؛ لذا، لن تزداد درجة حرارتها.

أستنتجُ أنّ نقل الطاقة إلى مادّة ما؛ لا يؤدّي دائمًا إلى زيادة درجة حرارتها، فهو في بعض الأحيان يُغيّر حالتها الفيزيائية. تُعرّف **الحرارة النوعية الكامنة للانصهار Specific latent heat of fusion** بأنّها كمّية الطاقة اللازمة لتحويل (1 kg) من المادّة من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة من دون تغيير درجة حرارتها، رمزها (L_f) ووحدة قياسها (J/kg) حسب النظام الدولي للوحدات. وهي خاصّية للمادّة النقية لا تعتمد على كتلتها. فمثلًا، الحرارة النوعية الكامنة لانصهار الجليد تساوي (3.34×10^5 J/kg)، وهذا يعني أنّه يلزم طاقة مقدارها (3.34×10^5 J) لتحويل (1 kg) من الجليد عند درجة الانصهار (0°C) من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة عند درجة الحرارة نفسها.



الشكل (10): التغيّرات في درجة حرارة جسم من مادّة معيّنة، بتغيّر كمّية الطاقة المكتسبة، وتغيّر حالته الفيزيائية عند درجتَي الانصهار والغليان.

فمثلًا، يوضّح الشكل (10) تمثيلًا بيانيًّا لتغيّر درجة حرارة جسم من مادّة معيّنة بتغيّر كمّية الطاقة المكتسبة، ويوضّح أيضًا ثبات درجة حرارة مادّة الجسم في أثناء انصهارها عند درجة الانصهار. وأُلاحظ من الشكل أنّ الجسم الصلب قد زُوّد بكمّية من الطاقة فارتفعت درجة حرارته بين النقطتين A و B حتى وصلت إلى درجة الانصهار للمادّة المصنوع منها، وألاحظ أيضًا أنّ درجة حرارة مادّة الجسم تثبت بين النقطتين B و C على الرغم من استمرار تزويده بالطاقة؛ إذ تؤدّي الطاقة المكتسبة إلى انصهار مادّة الجسم عند درجة الانصهار؛ إذ تُستخدم الطاقة المكتسبة في تكسير الروابط بين جُسيمات الحالة الصلبة، بحيث تصبح حرّة وتتحرّك مبتعدة بعضها عن بعض. وبعد انصهار مادّة الجسم كاملة وتحوّلها إلى سائل تؤدّي أيّ كمّية طاقة مكتسبة إلى رفع درجة حرارة المادّة السائلة، ويتّضح ذلك بين النقطتين C و D.

✓ **أتحقّق:** ماذا أعني بقولي إنّ الحرارة النوعية الكامنة لانصهار الذهب $(6.44 \times 10^4\ J/kg)$؟

التغيّر بين الحالتين: السائلة والغازية

Change of State Between Liquid and Gas

باستمرار تسخين مادّة سائلة ترتفع درجة حرارتها حتى تثبت عند درجة حرارة محدّدة، تبدأ عندها حالتها الفيزيائية بالتغيّر إلى الحالة الغازية عند درجة الحرارة نفسها. وتُسمّى درجة الحرارة التي تتغيّر عندها الحالة الفيزيائية للمادّة من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية

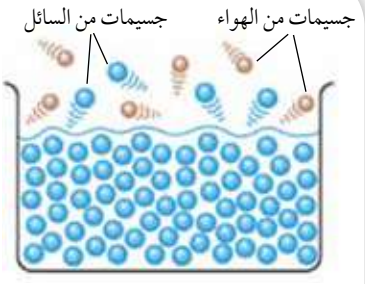
أُصمّم باستخدام برنامج السكراتش (Scratch) عرضًا يوضّح كيفية تغيّر حالة المادّة عند تزويدها بالطاقة مستعينًا بالشكل (10).

درجة الغليان Boiling point، وهي خاصّية فيزيائية للمادّة النقيّة، تتغيّر من مادّة إلى أُخرى حسب قوة الترابط بين جُسيماتها. أمّا التكاثف Condensation فهو تغيّر الحالة الفيزيائية للمادّة من الحالة الغازية إلى الحالة السائلة. وتثبت درجة حرارة المادّة في أثناء غليانها على الرغم من استمرار تزويدها بالطاقة، وكي أعرفَ ما يحدث لهذه الطاقة أدرسُ الحرارة النوعية الكامنة للتصعيد.

الحرارة النوعية الكامنة للتصعيد Specific Latent Heat of Vaporization

يتطلّب تغيير الحالة الفيزيائية لمادّة من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية تزويدها بالطاقة؛ من أجل التغلّب على القوى التي تربط بين جُسيماتها. فمثلًا، يحتاج الماء في أثناء غليانه عند (100°C) إلى استمرار تزويده بالطاقة لاستمرار غليانه وتحوّله إلى بخار.

في أثناء تغيّر الحالة الفيزيائية للمادّة عند درجة الغليان، تُستخدم الطاقة التي تُزوّد للسائل في أثناء غليانه في كسر قوى الترابط بين جُسيماته التي تُبقيها معًا، ما يؤدّي إلى زيادة المسافة الفاصلة بينها؛ لذا، يزيد التسخين من الطاقة الكامنة للجُسيمات وليس طاقتها الحركية، فتثبت درجة الحرارة عند درجة الغليان ولا تزداد. وتُستخدم هذه الطاقة أيضًا لبذل شغل ضد القوة الناتجة من ضغط الغلاف الجوي، بحيث تمكّن الجسيمات من مغادرة سطح السائل، أنظرُ الشكل (11) .



الشكل (11): يلزم طاقة إضافية لبذل شغل ضدّ قوّة الضغط للجوي لتوفير حيّز لجُسيمات السائل المتبخّرة.

تُسمّى كمّية الطاقة اللازمة لتحويل (1 kg) من المادّة من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية دون تغيير درجة حرارتها **الحرارة النوعية الكامنة للتصعيد Specific latent heat of vaporization**، ورمزها (L_v) ووحدة قياسها (J/kg) حسب النظام الدولي للوحدات. وهي خاصّية للمادّة النقية لا تعتمد على كتلتها. فمثلًا، الحرارة النوعية الكامنة لتصعيد الماء تُساوي (2.26×10^6 J/kg)، وهذا يعني أنّه يلزم طاقة مقدارها (2.26×10^6 J) لتحويل (1 kg) من الماء عند درجة الغليان (100°C) من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية (بخار الماء) عند درجة الحرارة نفسها.

وبالعودة إلى الشكل (10)، أُلاحظ ارتفاع درجة حرارة المادّة السائلة عند تسخينها، على نحو ما هو موضّح بين النقطتين C و D، حتّى تصل درجة حرارتها إلى درجة الغليان الخاصّة بها. وأُلاحظ أنّ درجة الحرارة تثبت بين النقطتين D و E على الرغم من استمرار تزويد المادّة السائلة بالطاقة؛ إذ تؤدّي الطاقة المكتسبة إلى تبخيرها عند درجة الغليان، وتستخدم الطاقة المكتسبة في تكسير الروابط بين جُسيمات الحالة السائلة، بحيث تستطيع مغادرة سطح السائل وتتحرّك مبتعدة بعضها عن بعض. وبعد تبخُّر المادّة السائلة كلها فإنّ أيّ كمّية طاقة يكتسبها البخار تؤدّي إلى رفع درجة حرارته، ويتّضح ذلك في المنحنى البياني بعد النقطة E.

أفكّر: لماذا تكون درجة حرارة الجو في أثناء تساقط الثلج أدفأ نسبيًّا من درجة الحرارة في أثناء انصهاره؟ أُناقش أفراد مجموعتي، وأستخدمُ مصادر المعرفة المُتاحة للتوصّل إلى إجابة عن السؤال.

يُعبّر عن كمّية الطاقة اللازمة لصهر (Q_{fusion}) كتلة (m) من مادّة صلبة نقيّة عند درجة انصهارها؛ بالعلاقة الآتية: $Q_{\text{fusion}} = \pm mL_{\text{f}}$.

ويُعبَّر أيضًا عن كمّية الطاقة اللازمة لتبخير (تصعيد) ($Q_{\text{vaporization}}$) كتلة (m) من مادّة سائلة نقيّة عند درجة غليانها؛ بالعلاقة الآتية: $Q_{\text{vaporization}} = \pm mL_{\text{v}}$.

يُبيّن الجدول (2) درجتَي الانصهار والغليان، وبعض قِيَم الحرارة النوعية الكامنة للانصهار، والحرارة النوعية الكامنة للتصعيد لبعض المواد النقيّة الشائعة.

الجدول 2: درجتا الانصهار والغليان والحرارة النوعية الكامنة للانصهار والحرارة النوعية الكامنة للتصعيد لبعض المواد الشائعة.

المادّة	درجة الانصهار (°C)	الحرارة النوعية الكامنة للانصهار (J/kg)	درجة الغليان (°C)	الحرارة النوعية الكامنة للتصعيد (J/kg)
الأُكسجين	-218.79	1.38×10^4	-182.97	2.13×10^5
الماء	0	3.33×10^5	100	2.26×10^6
الرصاص	327.3	2.45×10^4	1750	8.70×10^5
الألمنيوم	660	3.97×10^5	2450	1.14×10^7
الفضة	960.8	8.82×10^4	2193	2.33×10^6
الذهب	1063	6.44×10^4	2660	1.58×10^6
النحاس	1083	1.34×10^5	1187	5.06×10^6

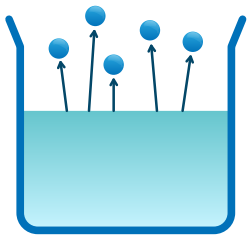
أتحقّق: ماذا أعني بقولي إنّ الحرارة النوعية الكامنة لتصعيد الرصاص (8.70×10^5 J/kg)؟

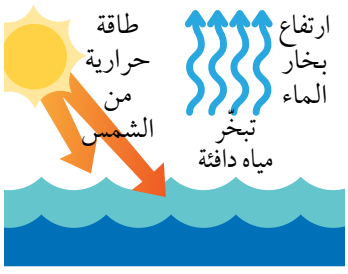
التبخّر والغليان Evaporation and Boiling

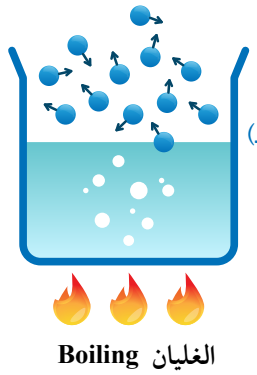
يخلط بعض الطلبة بين مفهومَي التبخّر والغليان؛ إذ يوجد فرق بينهما على الرغم من أنّهما يُمثّلان تغيّر حالة المادّة من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية، ولكنّ التبخّر Evaporation يحدث عند درجات الحرارة جميعها، وهي عملية بطيئة تحدث للجسيمات الموجودة على سطح السائل كونها أقلّ ارتباطًا ببقية جسيمات السائل مقارنة بارتباط الجسيمات داخل السائل؛ فعندما يمتلك الجسيم طاقة حركية كافية تكون عادة أكبر من متوسّط الطاقة الحركية لبقية جسيمات السائل فإنّه يتبخّر، أنظرُ الشكل (12/ أ).

فمثلًا، تُسخّن أشعّة الشمس الماء على السطح، ويكون لبعض الجزيئات الموجودة على سطح الماء طاقة حركية أكبر من غيرها، وإذا كانت هذه الطاقة كافية لكسر قوى الترابط بين جزيئاته فإنّها ستتبخّر وتغادر سطح الماء؛ على الرغم من أنّ درجة حرارته أقلّ من درجة الغليان، أنظرُ الشكل (12/ ب). أمّا الغليان Boiling فهو عملية تبخّر سريعة تحدث عندما يساوي ضغط البخار الضغط الجوي، وهي تحدث عند درجة حرارة محدّدة وهي درجة الغليان؛ إذ تمتلك جُسيمات السائل طاقة كافية لمغادرة السائل بكمّيات كبيرة بما فيها الجُسيمات داخله، فيكون التبخّر من أجزاء السائل جميعها، وتظهر الفقاعات تحت سطحه؛ إذ تعمل الطاقة المُضافة على رفع الطاقة الكامنة من دون تغيير درجة الحرارة في أثناء الغليان، فتتكسّر الروابط بينها، ما يُمكّنها من الحركة بحرّية أكبر. ومن ثمّ، تتحوّل إلى الحالة الغازية، وتخرج من السائل على شكل فقاعات. أنظرُ الشكل (12/ جـ).

✓ **أتحقّق:** أُقارن بين التبخّر والغليان.





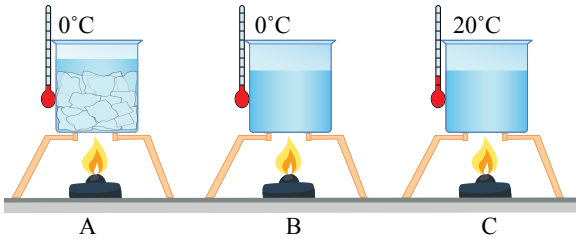


الشكل (12):
(أ) تبخّر الجُسيمات التي على سطح السائل.
(ب) تبخّر جزيئات الماء من السطح بفعل التسخين الحراري من الشمس.
(جـ) تبخّر الجُسيمات من أجزاء السائل جميعها عند غليانه.

أبحثُ

عندما يكون هواء الغرفة جافًّا وأفتح مجمّد الثلّاجة، أُلاحظ أحيانًا تصاعد البخار منه؛ إذ تتغيّر حالة الجليد فيها من الحالة الصلبة إلى الحالة الغازية دون المرور بالحالة السائلة. أبحثُ في هذه الظاهرة واسمها والتفسير الفيزيائي لها، وأُعدّ عرضًا تقديميًّا أعرضه على زملائي/ زميلاتي في الصفّ.

المثال 4



الشكل (13): مراحل انصهار مكعبات جليد.

يوضّح الشكل (13) انصهار مكعّبات جليد كتلتها (2 kg) بدرجة حرارة (0°C) إلى ماء سائل بدرجة حرارة (0°C) وتوضّحها المرحلة: (A) إلى (B)، ثم رفع درجة حرارة الماء السائل من (0°C) إلى ماء سائل بدرجة حرارة (20°C) وتوضّحها المرحلة: (B) إلى (C). إذا علمتُ أنّ السعة الحرارية النوعية للماء (4200 J/kg.K)، والحرارة النوعية الكامنة لانصهار الجليد (3.33×10^5 J/kg)، ومستعينًا بالشكل والبيانات المثبتة عليه، أُجيب عمّا يأتي:

أ . أُفسّر لماذا لم ترتفع درجة الحرارة في أثناء انصهار الجليد وتحوّله إلى ماء سائل في المرحلة: A إلى B؟

ب. أحسبُ كمّية الطاقة اللازمة لصهر الجليد في المرحلة A إلى B.

جـ. أحسبُ كمّية الطاقة اللازمة لرفع درجة حرارة الماء في المرحلة B إلى C.

د. أحسبُ كمّية الطاقة الكلية اللازمة لرفع درجة حرارة الجليد من (0°C) إلى ماء بدرجة حرارة (20°C).

المعطيات: $m = 2\ \text{kg}\ ,\ T_{\text{i,ice}} = 0°\text{C}\ ,\ T_{\text{f,liquid}} = 20°\text{C}\ ,\ c_{\text{w}} = 4200\ \text{J/kg.K}\ ,\ L_{\text{f}} = 3.33 \times 10^5\ \text{J/kg}.$

المطلوب: $Q_{\text{fusion}} = ?\ ,\ Q_{\text{w}} = ?\ ,\ Q_{\text{total}} = ?$

الحلّ:

أ. استنفدت الطاقة المكتسبة في تكسير الروابط بين جزيئات الحالة الصلبة في بلورات الجليد، ولم تؤدِّ إلى زيادة الطاقة الحركية لجزيئات الماء، بل ازدادت طاقتها الكامنة.

ب. أحسبُ كمّية الطاقة اللازمة لصهر الجليد على النحو الآتي:

$$Q_{\text{fusion}} = \pm mL_{\text{f}}$$

نظرًا إلى أنّ الجليد يمتصّ طاقة في أثناء انصهاره؛ لذا، أستخدمُ الإشارة الموجبة.

$$Q_{\text{fusion}} = mL_{\text{f}} = 2 \times 3.33 \times 10^5$$
$$= 6.66 \times 10^5\ \text{J}$$

جـ. أحسبُ كمّية الطاقة اللازمة لرفع درجة حرارة الماء في المرحلة B إلى C على النحو الآتي:

$$Q_{\text{w}} = m_{\text{w}} c_{\text{w}}\ \Delta T_{\text{w}}$$
$$= 2 \times 4200 \times (20 - 0)$$
$$= 1.68 \times 10^5\ \text{J}$$

د. أحسبُ كمّية الطاقة الكلية اللازمة لرفع درجة حرارة الجليد من (0°C) إلى ماء بدرجة حرارة (20°C) على النحو الآتي:

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{fusion}} + Q_{\text{w}}$$
$$= 6.66 \times 10^5 + 1.68 \times 10^5$$
$$= 8.34 \times 10^5\ \text{J}$$

المثال 5

كمّية من بخار الماء كتلتها (5 kg) ودرجة حرارتها (130°C)، يُراد تبريدها وتحويلها إلى سائل بدرجة حرارة (50°C). إذا علمتُ أنّ السعة الحرارية النوعية للبخار (2010 J/kg.K)، والسعة الحرارية النوعية للماء (4200 J/kg.K)، والحرارة النوعية الكامنة لتصعيد الماء (2.26×10^6 J/kg)، أحسبُ ما يأتي:

أ. كمّية الطاقة المنطلقة (Q_1) عند تبريد بخار الماء من (130°C) إلى ماء بدرجة حرارة (100°C).

ب. كمّية الطاقة المنطلقة (Q_2) عند تبريد الماء من (100°C) إلى ماء بدرجة حرارة (50°C).

ج. كمّية الطاقة الكلّية المنطلقة عند تبريد بخار الماء من (130°C) إلى ماء بدرجة حرارة (50°C).

المعطيات:

$m = 5$ kg, $T_{i,vapor} = 130°C$, $T_{f,liquid} = 50°$ C , $c_{vapor} = 2010$ J/kg.K , $c_w = 4200$ J/kg.K , $L_v = 2.26 \times 10^6$ J/kg.

المطلوب: $Q_1 = ?$, $Q_2 = ?$, $Q_{total} = ?$

الحلّ:

أ. يوجد تغيّر في الحالة في أثناء التبريد، فأحسبُ كمّية الطاقة المنطلقة على مرحلتين: الأولى عند تبريد البخار من (130°C) إلى بخار بدرجة حرارة (100°C)، والثانية عند تغيّر الحالة عند تكاثف البخار وتحوّله إلى ماء سائل عند درجة الغليان نفسها، وهي (100°C).

$$Q_1 = Q_{cooling} + Q_{condensation}$$

لتبريد بخار الماء إلى درجة حرارة (100°C) أستخدمُ العلاقة الآتية:

$$Q_{cooling} = mc_{vapor}\ \Delta T_{vapor}$$
$$= 5 \times 2010 \times (100 - 130)$$
$$= -3.015 \times 10^5 \text{ J}$$

ثمّ أحسبُ كمّية الطاقة المنطلقة عند تكاثف بخار الماء، مع وضع إشارة سالبة أمام كمّية الطاقة؛ لأنّها طاقة منطلقة، علمًا بأنّ كمّية الطاقة المنطلقة تساوي كمّية الطاقة المكتسبة في أثناء تغيّر الحالة؛ أي ستنطلق كمّية طاقة مساوية لكمّية الطاقة التي استنفدت في التصعيد.

$$Q_{condensation} = -mL_v$$
$$= -5 \times 2.26 \times 10^6$$
$$= -1.13 \times 10^7 \text{ J}$$

فتكون كمّية الطاقة المنطلقة:

$$Q_1 = Q_{\text{cooling}} + Q_{\text{condensation}}$$
$$= -3.015 \times 10^5 + (-1.13 \times 10^7)$$
$$= -1.16015 \times 10^7 \text{ J}$$

ب. لا يوجد تغيّر في الحالة عند تبريد الماء من (100°C) إلى ماء بدرجة حرارة (50°C)؛ لذا، أحسبُ (Q_2) على النحو الآتي:

$$Q_2 = m_w c_w \Delta T_w$$
$$= 5 \times 4200 \times (50 - 100)$$
$$= -1.05 \times 10^6 \text{ J}$$

جـ. كمّية الطاقة الكلّية المنطلقة (Q_{total}) عند تبريد بخار الماء من (130°C) إلى ماء بدرجة حرارة (50°C) تُساوي كمّية الطاقة المنطلقة عند تبريده من بخار بدرجة حرارة (130°C) إلى بخار بدرجة حرارة (100°C)، مضافًا إليها كمّية الطاقة المنطلقة عند تكاثفه عند درجة الغليان، مضافًا إليها كمّية الطاقة المنطلقة عند تبريد الماء من درجة حرارة (100°C) إلى درجة حرارة (50°C)؛ لذا، فهي تُساوي ناتج الجمع الجبري للكمّيتين (Q_1) و (Q_2)، وأحسبُها على النحو الآتي:

$$Q_{\text{total}} = Q_1 + Q_2$$
$$= -1.16015 \times 10^7 + (-1.05 \times 10^6)$$
$$= -1.26515 \times 10^7 \text{ J}$$

تمرين

أحسبُ: في محطة لتوليد الطاقة الكهربائية باستخدام البخار، يُسخّن الماء من (10°C) باستخدام مرجل (بويلر) لتحويله إلى بخار ماء بدرجة حرارة (100°C) بمعدل (350 kg/s). إذا علمتُ أنّ السعة الحرارية النوعية للبخار (2010 J/kg.K) والسعة الحرارية النوعية للماء (4200 J/kg.K)، والحرارة النوعية الكامنة لتصعيد الماء (2.26×10^6 J/kg)، فأحسبُ مقدار ما يأتي:

أ. كمّية الطاقة اللازمة لرفع درجة حرارة الماء من (10°C) وتحويله إلى بخار ماء بدرجة حرارة (100°C).

ب. قدرة المرجل (البويلر) بافتراض أنّ كفاءته 100%.

مراجعة الدرس

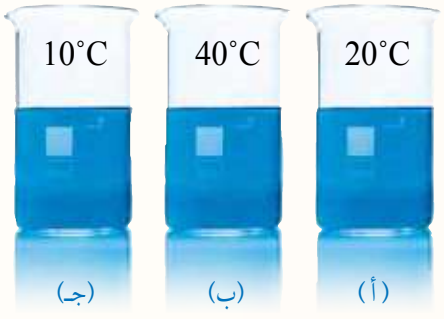
1. **الفكرة الرئيسة:** ما المقصود بدرجة الحرارة؟ ما الفرق بينها وبين الطاقة الحرارية؟

2. **أُفسّر:** جسم ساخن (A) في حالة اتّصال حراري مع جسم بارد (B). ماذا يحدث بين الجسمين على المستوى المجهري؟ وماذا يحدث لدرجتَي حرارة الجسمين؟

3. **أستخدمُ المتغيّرات:** أرادت إستبرق تصميم مدفأة كهربائية يعتمد مبدأ عملها على التسخين الكهربائي لصفيحة فلزّية صلبة من مادّة سَعتها الحرارية النوعية كبيرة توجد داخلها، وعند وصول درجة حرارة الصفيحة إلى قيمة معيّنة ينفصل التيّار الكهربائي آليًّا عن المدفأة. وفي داخل المنزل، يكتسب الهواء الأقلّ درجة حرارة الطاقة من الصفيحة الأعلى درجة حرارة مسبّبًا انخفاض درجة حرارتها. أُناقش مزايا استخدام مادّة صلبة ذات سَعة حرارية نوعية كبيرة في هذا التصميم للمدفأة وعيوبها.

4. **أستخدمُ الأرقام:** خلال ساعة من أدائه التمارين الرياضية، يفقد فادي (0.5 kg) من العرق. بافتراض أنّ كلّ هذا العرق يتبخّر، أحسبُ الطاقة الحرارية المفقودة بسبب التعرّق. أفترضُ أنّ الحرارة النوعية الكامنة لتبخير الماء عند درجة حرارة الجلد (2.4×10^6 J/kg).

5. **التفكير الناقد:** ثلاث كؤوس فيها ماء بدرجات حرارة مختلفة، على نحو ما هو موضّح في الشكل. وضعت نور يدها في الكأس (ب) أوّلًا مدّة من الزمن، ثم أخرجت يدها ووضعتها في الكأس (أ)؛ فأصدرت حُكمًا أنّ الماء فيها بارد. في حين وضعت زميلتها سوسن يدها في الكأس (جـ) أوّلًا مدّة من الزمن، ثم أخرجت يدها ووضعتها في الكأس (أ)؛ فأصدرت حُكمًا أن الماء فيها ساخن. أيّهما حكمها صحيح؟ أُبرّر إجابتي.



6. **أُصدرُ حُكمًا:** في أثناء دراسة فاتن هذا الدرس، قالتْ: «إنّ الأجسام الأعلى درجة حرارة تمتلك حرارة أكبر من الأجسام الأقلّ درجة حرارة». أُناقش صحّة قول فاتن.

الفكرة الرئيسة:

يعتمد مبدأ عمل كثير من الأجهزة، مثل الثلاجات والمكيفات وآلات الاحتراق الداخلي؛ على قوانين الديناميكا الحرارية.

نتاجات التعلّم:

- أُوضّح المقصود بالطاقة الداخلية.
- أصف تبادل الطاقة بين نظام ومحيطه.
- أشرحُ بعض العمليات الحرارية الخاصّة بالديناميكا الحرارية.
- أشرحُ القانون الأوّل في الديناميكا الحرارية.
- أُطبّق بحل مسائل على القانون الأول في الديناميكا الحرارية.

المفاهيم والمصطلحات:

الطاقة الداخلية Internal Energy

القانون الأول في الديناميكا الحرارية

The First Law of Thermodynamics

القانون الأوّل في الديناميكا الحرارية

The First Law of Thermodynamics

عُدّ مجالا الديناميكا الحرارية والميكانيكا، فرعين مستقلين من فروع العلم حتّى عام 1850م تقريبًا؛ إذ كان مبدأ حفظ الطاقة يصف فقط أنواعًا معينة من الأنظمة الميكانيكية. في منتصف القرن التاسع عشر، أظهرت تجارب نفّذها العالم الإنجليزي جيمس جول وآخرون، علاقة وطيدة بين نقل الطاقة عن طريق الحرارة في العمليات الحرارية، ونقلها عن طريق الشغل في العمليات الميكانيكية؛ إذ يمكن تحويل الطاقة الميكانيكية إلى طاقة داخلية.

يُعنى القانون الأوّل في الديناميكا الحرارية بوصف الأنظمة التي يحدث فيها تغيّر في الطاقة الداخلية، وتُنقل الطاقة فيها عن طريق الحرارة أو الشغل أو الاثنين معًا.

الطاقة الداخلية Internal Energy

تمتلك جُسيمات الموادّ طاقة حركية وطاقة كامنة. يُسمّى مجموع الطاقة الحركية والطاقة الكامنة لجُسيمات النظام جميعها **الطاقة الداخلية Internal energy**، وهي ترتبط بمكوّنات النظام المجهرية (الذرّات والجزيئات)، ورمزها U، وتُقاس بوحدة الجول (J) حسب النظام الدولي للوحدات.

الطاقة الحركية هي جزء من الطاقة الداخلية للنظام وترتبط بالطاقة الحركية لجُسيماته، والناتجة من حركتها الانتقالية والدورانية والاهتزازية، ولا ترتبط بحركة النظام الانتقالية؛ فمثلًا، الطاقة الداخلية لكرة قدم تُحلّق في الهواء ترتبط بالطاقة الحركية للجُسيمات المكوّنة لها ولجُسيمات الهواء داخلها ولا علاقة لها بحركة الكرة.

تعتمد الطاقة الداخلية للموادّ الصلبة والسائلة على كلّ من: درجة الحرارة، وكمّية المادّة، وتركيبها الكيميائي. أمّا في الغازات فإنّ الطاقة الداخلية لها تعتمد على ضغط الغاز إضافة إلى العوامل السابقة. فكلّما زاد الضغط المطبّق على الغاز قلّت المسافة بين جُسيماته، فتزداد طاقتها الكامنة نتيجة زيادة القوى بينها.

درستُ في الوحدة الأولى أنّ الطاقة الميكانيكية لنظام لا تكون محفوظة عند تأثير قوى غير محافظة فيه وبذلها شغلًا عليه، حيث يُفقد جزء من الطاقة الميكانيكية على شكل شغل للتغلّب على قوى الاحتكاك وأشكال أُخرى من الطاقة. وإذا افترضتُ أنّ التغيّرات في الطاقة الميكانيكية قد غيّرت الطاقة الداخلية فقط، فتكون الطاقة محفوظة عند أخذ التغيّرات في الطاقة الداخلية مع التغيّرات في الطاقة الميكانيكية في الحسبان؛ أي إنّ: $\Delta PE + \Delta KE + \Delta U = 0$.

✓ **أتحقّق:** ما المقصود بالطاقة الداخلية لنظام؟

الحرارة والشغل والطاقة الداخلية Heat, Work and Internal Energy

عندما تزداد الطاقة الداخلية لجسم، فهذا قد يعني ازدياد مقدار سرعة حركة جُسيماته، فيزداد متوسّط طاقتها الحركية، أو يزداد متوسّط الطاقة الكامنة لهذه الجُسيمات، أو ازدياد كليهما معًا.

العلاقة بين الحرارة والطاقة الداخلية
Relationship between Heat and Internal Energy

تزداد الطاقة الداخلية لجسم أو نظام عند اكتسابه طاقة. فمثلًا، يُمكنني تدفئة يديّ بتزويدهما بالطاقة عن طريق تقريبهما من مصدر حراري، إذ تنتقل الطاقة من المصدر إلى يديّ عن طريق الإشعاع الحراري، نتيجة الفرق في درجة الحرارة بين يديّ والمحيط الخارجي، على نحو ما هو موضّح في الشكل (14/ أ). وتزيد الطاقة المكتسبة من الطاقة الداخلية في يديّ وأشعر بدفئهما، ما يعني ارتفاع درجة حرارتهما. أتذكّر من الدرس السابق أنّ: تزويد جسم بالطاقة لا يؤدّي إلى رفع درجة حرارته دائمًا، وذلك عند تغيّر حالته الفيزيائية. وتقلّ الطاقة الداخلية لجسم أو

(أ)

(ب)

الشكل (14):
(أ) زيادة الطاقة الداخلية ليديّ بتزويدهما بالطاقة.
(ب) أو عن طريق بذل شغل عليهما.

نظام عند فقده طاقة؛ إذ تفقد الأجسام طاقة إذا كانت درجة المحيط الخارجي أقلّ من درجة حرارتها.

العلاقة بين الشغل والطاقة الداخلية

Relationship between Work and Internal Energy

ويمكن أيضًا زيادة الطاقة الداخلية لجسم أو نظام ببذل شغل عليه. فمثلًا، يُمكنني تدفئة يديّ عن طريق بذل شغل عليهما بدلكهما معًا؛ إذ يلزمني بذل شغل للمحافظة على حركة يديّ إحداهما بالنسبة إلى الأُخرى للتغلّب على قوّة الاحتكاك الحركي بينهما، أنظرُ الشكل (14/ ب). وهذا يزيد من الطاقة الداخلية في يديّ، ما يرفع درجة حرارتهما. ويمكن أيضًا تقليل الطاقة الداخلية لجسم أو نظام عن طريق بذله شغلًا. أسألُ: كيف يبذل الجسم شغلًا؟ أحيانًا أرى أسطوانة تحتوي على غاز مُسال، ويوجد جليد على جدارها الخارجي، على نحو ما هو موضّح في الشكل (15). ويتشكّل الجليد حتّى عندما تكون درجة حرارة الهواء خارج الأسطوانة أعلى من درجة تجمّد الماء. وأُفسّر ذلك بأنّ الغاز داخل الأسطوانة يُضغط بحيث يتحوّل جزء منه إلى سائل. وعند فتح الصمام الموجود في أعلى الأسطوانة، يتمدّد الغاز الموجود فوق السائل، ما يُقلّل الضغط المؤثّر في سطح السائل فيتبخّر. وهذا البخار يبذل شغلًا في أثناء تمدّده على الغاز الذي فوقه، فتتناقص الطاقة الداخلية في أثناء بذله الشغل حسب قانون حفظ الطاقة، فتنخفض درجة حرارته ودرجة حرارة السائل والأسطوانة، ما يؤدّي إلى تشكّل الجليد على السطح الخارجي للأسطوانة.

الشكل (15): بذل الغاز المحصور شغلًا على المحيط الخارجي كي يتمدّد، فانخفضت درجة حرارة السائل والأسطوانة الفلزّية إلى ما دون درجة تجمّد الماء؛ فتجمّد بخار الماء في الهواء الملامس للأسطوانة ليُشكّل طبقة الجليد.

✓ **أتحقّق:** كيف أُغيّر الطاقة الداخلية لجسم أو نظام؟

العلاقة بين الشغل والحرارة

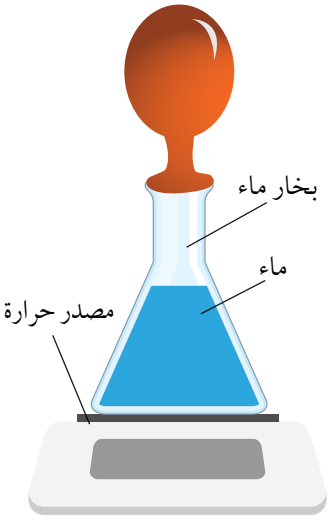
Relationship between Work and Heat

الحرارة طاقة تنتقل بين جسمين؛ نتيجة الفرق في درجتَي حرارتيهما، والشغل وسيلة لنقل الطاقة بين الأجسام بطريقة ميكانيكية. وأُلاحظ أنّ سحب مسمار بسرعة من قطعة خشب يجعله ساخنًا؛ إذ يُبذَل شغل لسحبه من قطعة الخشب، وتؤثّر فيه قوّة احتكاك من الخشب، ويتحوّل معظم الطاقة المبذولة (الشغل) للتغلّب على قوّة الاحتكاك هذه إلى طاقة داخلية للمسمار، ويؤدّي ازدياد طاقته الداخلية إلى ارتفاع درجة حرارته، وينتقل جزء من الطاقة الحرارية للمسمار إلى قطعة الخشب، فترتفع درجة حرارة الخشب أيضًا. أي إنّه يمكن تحويل الشغل إلى طاقة داخلية. ويمكن للطاقة الداخلية لجسم أن تزداد بطرائق أُخرى مثل طرقه لتغيير شكله، على نحو ما يحدث عند ثني قطعة فلزّية. كذلك يُمكن للحرارة أن تؤدّي إلى بذل شغل؛ فقد لاحظتُ في الشكل (15) أنّ جُسيمات السائل التي على السطح تكتسب طاقة منه فتتبخّر، وتبذل جُسيمات الغاز المتبخّرة شغلًا على الغاز الذي يعلوها في أثناء تمدّده فتنخفض طاقته الداخلية ودرجة حرارته. فعند تثبيت بالون بفوهة دورق زجاجي يحتوي على ماء، ووضعه على مصدر حراري، على نحو ما هو موضّح في الشكل (16) ينتفخ البالون عند غليان الماء؛ إذ تؤدّي الطاقة المنتقلة من المصدر الحراري إلى زيادة الطاقة الداخلية للماء حتّى يصل إلى درجة الغليان ويتبخّر، فيزداد حجم البخار باستمرار التسخين ويتمدّد داخل البالون، ما يتسبّب في انتفاخ البالون؛ إذ يؤثّر البخار بقوّة في الجدار الداخلي للبالون تدفعه بعكس قوّة الضغط الجوي، أي إنّ البخار يبذل شغلًا على الهواء الجوي الموجود خارج البالون في أثناء تمدّده، وتقلّ طاقته الداخلية.

إنّ الشغل والحرارة متشابهان، فكلاهما يُعبّر عن الطاقة التي يفقدها الجسم أو يكسبها. أي إنّهما يُشيران إلى الطاقة المنتقلة من الجسم أو إليه، ما يُغيّر في طاقته الداخلية. فالأجسام لا تملك حرارة أو شغلًا، بل تملك طاقة داخلية.

✓ **أتحقّق:** كيف يُمكنني تحويل الحرارة إلى شغل؟

أعد فيلمًا قصيرًا باستعمال صانع الأفلام (Movie maker) يعرض بذل بالون شغلًا على المحيط الخارجي له في أثناء تمدّده.



الشكل (16): تحوّل الطاقة المنتقلة على شكل حرارة الماء إلى بخار، فيبذل البخار شغلًا على الهواء الموجود خارج البالون في أثناء تمدّده.

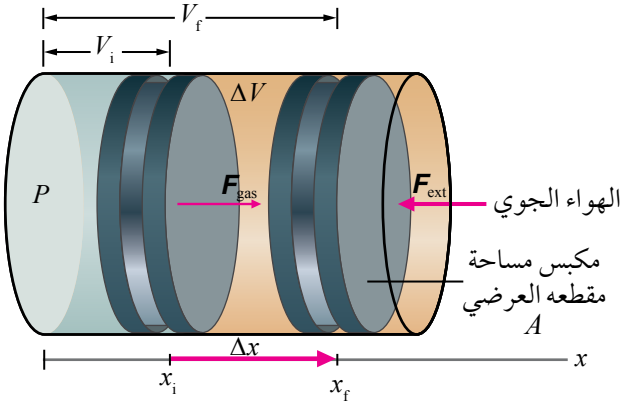
الشغل المبذول عند تغيّر حجم الغاز

Work Done when Gas Volume Changes

في الديناميكا الحرارية، توصف حالة النظام باستخدام متغيّرات مثل: الضغط P، والحجم V، ودرجة الحرارة T، والطاقة الداخلية U؛ إذ تنتمي هذه الكمّيات إلى فئة تُسمّى متغيّرات الحالة State variables، ويمكن تحديد قِيَمها لأيّ ترتيب معيّن للنظام. (بالنسبة إلى الأنظمة الميكانيكية، تشمل متغيّرات الحالة: الطاقة الحركية KE، والطاقة الكامنة PE). ولا يمكن تحديد حالة النظام إلّا إذا كان في حالة اتّزان حراري داخلي. وفي حالة الغاز المحصور في وعاء أو أسطوانة، يتطلّب الاتّزان الحراري الداخلي له أن يكون لكلّ جزء منه الضغط نفسه ودرجة الحرارة نفسها.

درستُ أنّ الحرارة هي انتقال للطاقة من جسم إلى آخر، وهنا سأدرسُ آليّة أُخرى لنقل الطاقة في أنظمة الديناميكا الحرارية وهي الشغل. وقد درستُ الشغل المبذول على الأجسام والجُسيمات سابقًا، وهنا سأدرسُ الشغل المبذول على نظام قابل للتغيّر في حجمه، وهو الغاز.

يُبيّن الشكل (17) أسطوانة مملوءة بغاز عند ضغط ثابت (P)، مغلقة بمكبس مساحة مقطعه العرضي (A) قابل للحركة لتغيير حجم الغاز (V)، وأفترضُ عدم وجود قوة احتكاك بين المكبس والجدار الداخلي للأسطوانة. بدايةً، يكون المكبس في حالة اتّزان سكوني؛ لأنّ ضغط الغاز داخل الأسطوانة مساوٍ للضغط الجوي، وعند تسخين الغاز تزداد الطاقة الحركية لجُسيماته، فتؤثّر بقوّة إضافية في المكبس، الذي يستجيب لذلك بالحركة نحو اليمين.



الشكل (17): غاز محصور في أسطوانة محكمة الإغلاق بمكبس حرّ الحركة على مسار أملس.

يؤثّر الغاز المحصور بقوّة $\boldsymbol{F}_{gas}$ في المكبس الذي يتحرّك إزاحة مقدارها (Δx) نحو اليمين باتّجاه قوّة الغاز وبعكس اتّجاه القوّة الخارجية $\boldsymbol{F}_{ext}$ (قوّة ناتجة من الضغط الجوي) المؤثرة فيه؛ فيزداد حجم الغاز، وتكون الزاوية (θ) بين اتّجاهَي القوّة الخارجية المؤثّرة في الغاز والإزاحة تساوي (180°). ولضمان ثبات ضغط الغاز في أثناء تمدّده؛ أفترضُ أنّ إزاحة المكبس صغيرة فيكون التغيّر في حجم الغاز صغيرًا، وبذلك تكون القوّتان $\boldsymbol{F}_{gas}$ و $\boldsymbol{F}_{ext}$ متساويتين في المقدار ومتعاكستين في الاتّجاه، فيتحرّك المكبس نحو اليمين بسرعة ثابتة. وأحسبُ الشغل المبذول على الغاز (W) بضرب مقدار القوّة الخارجية في إزاحة المكبس في جيب تمام الزاوية المحصورة بين اتّجاهي القوة والإزاحة. للتبسيط، سأستخدمُ $\boldsymbol{F} = \boldsymbol{F}_{ext}$، وعليه يُعبَّر عن الشغل الذي تبذله القوّة الخارجية على الغاز بالعلاقة:

$$W = F\Delta x \cos 180^\circ = -F\Delta x$$

ونظرًا إلى أنّ $P = \frac{F}{A}$، فإنّني أُعوّض مقدار القوّة ($F = PA$) في العلاقة السابقة؛ فأحصلُ على ما يأتي:

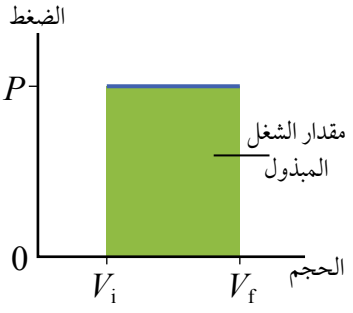
$$W = -PA\,\Delta x$$

أُلاحظ أنّ التغيّر في حجم الغاز داخل الأسطوانة يُعبَّر عنه بالعلاقة $\Delta V = A\,\Delta x$؛ لذا، يُمكنني كتابة معادلة حساب الشغل المبذول على الغاز بدلالة التغيّر في حجم الغاز عند ضغط ثابت على النحو الآتي:

$$W = -P\,\Delta V$$

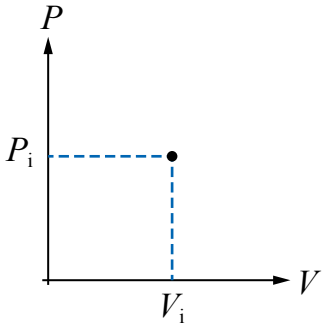
فعندما يتمدّد الغاز، يزداد حجمه، فتكون $\Delta V > 0$؛ لذا، فإنّ الشغل المبذول عليه $W < 0$. أمّا عندما يقلّ حجم الغاز فتكون $\Delta V < 0$؛ لذا، فإنّ الشغل المبذول عليه $W > 0$. أمّا الشغل الذي يبذله الغاز على محيطه الخارجي (W_{gas}) فيكون مساويًا لسالب الشغل الذي يبذله المحيط الخارجي على الغاز؛ أي إنّ $W_{gas} = -W = P\,\Delta V$.

يوضّح الشكل (18) منحنى (الضغط – الحجم) لغاز محصور. حسب معادلة حساب الشغل السابقة، أستنتجُ أنّ سالب مقدار المساحة المحصورة بين منحنى (الضغط – الحجم) ومحور الحجم تساوي عدديًّا مقدار الشغل المبذول على الغاز.



الشكل (18): مقدار شغل المحيط الخارجي (القوة الخارجية)، المبذول على غاز في أثناء تمدّده عند ضغط ثابت يساوي عدديًّا سالب مقدار المساحة المحصورة بين منحنى (الضغط – الحجم) ومحور الحجم.

ويمكنني أيضًا استخدام منحنى (الضغط – الحجم) لتحديد إذا كان الشغل يبذله الغاز أو يُبذل عليه. أفترضُ وجود نظام يتكوّن من غاز في أسطوانة محكمة الإغلاق بمكبس قابل للحركة بحرّية، مثل ذلك الموضّح في الشكل (17). إنّ الضغط الابتدائي للغاز المحصور (P_i)، وحجمه الابتدائي (V_i)، ويُمكنني تمثيلهما بنقطة على منحنى (الضغط – الحجم)، التي تمثّل الحالة الابتدائية للنظام، على نحو ما هو موضّح في الشكل (19).



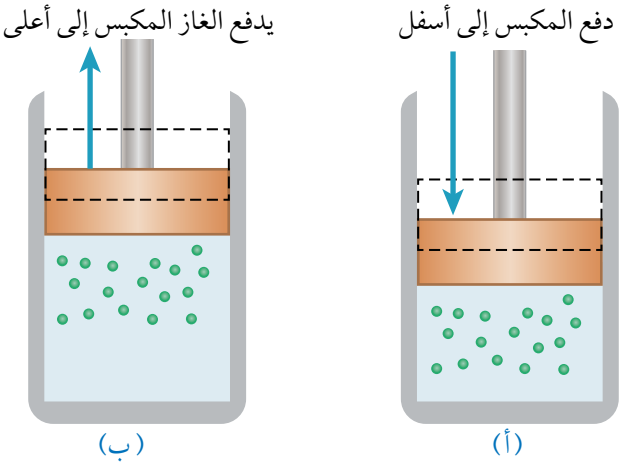
الشكل (19): منحنى (الضغط – الحجم) لغاز محصور في أسطوانة.

عندما أدفع مكبس الأسطوانة إلى الداخل، يقلّ حجم الغاز ويزداد ضغطه (ما لم يجرِ تبريده)، على نحو ما هو موضّح في الشكل (20/ أ). وهذا يعني أنّ النقطة على منحنى (الضغط – الحجم) التي تُمثّل حالة الغاز ستتحرك إلى اليسار حيث قِيَم (V) أصغر.

أمّا عندما يتمدّد الغاز فسيدفع المكبس للخارج، على نحو ما هو موضّح في الشكل (20/ ب)، فيزداد حجم الغاز ويقلّ ضغطه (ما لم يجرِ تسخينه)، وأيّ حركة إلى اليمين على منحنى (الضغط – الحجم) توضّح أنّ الغاز يبذل شغلًا.

وعمومًا، إذا عُرف ضغط غاز وحجمه عند كلّ مرحلة من مراحل عملية انضغاطه، فيمكن رسم حالة الغاز عند كل منها على منحنى (الضغط – الحجم)، على نحو ما هو موضح في الشكل (21).

✓ **أتحقّق:** ما معنى أن تكون إشارة الشغل المبذول على غاز موجبة؟ وما معنى أن تكون إشارته سالبة؟



الشكل (20):
(أ) يقلّ حجم الغاز المحصور في أسطوانة عند بذل شغل عليه.
(ب) يزداد حجم الغاز المحصور في أسطوانة عند بذله شغلًا.

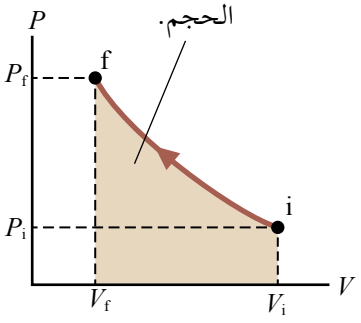
الشغل المبذول عند ضغط غاز يعتمد على المسار

Work Done When Compressing a Gas Depends on the Path

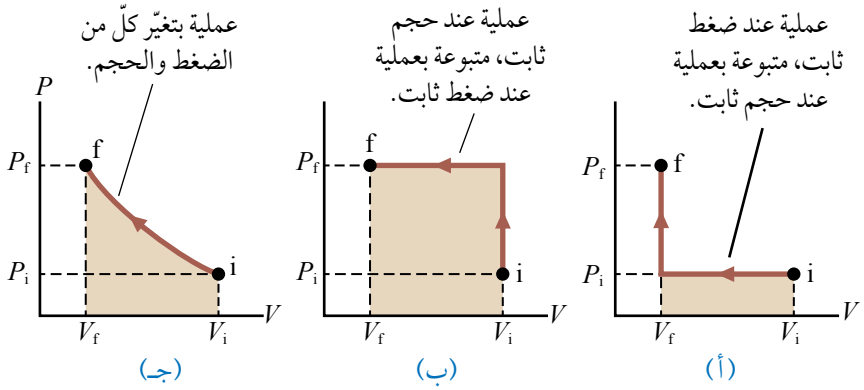
أُلاحظ من الشكل (21) أنّ الشغل المبذول في عملية ضغط غاز في أسطوانة يعتمد على المسار الذي يسلكه الغاز بين الحالتين: الابتدائية، والنهائية. ولتوضيح ذلك، أنظرُ المسارات المختلفة التي يمكن سلوكها بين الحالتين: (i) و (f) في الشكل (22). في العملية الموضّحة في الشكل (22/ أ)، يُقلّل حجم الغاز أوّلًا من (V_i) إلى (V_f) عند ضغط ثابت (P_i)، ثم يُسخّن الغاز عند حجم ثابت (V_f)، فيزداد ضغطه من (P_i) إلى (P_f). إنّ الشغل المبذول على الغاز على طول هذا المسار يساوي $(-P_i \Delta V)$. أمّا في العملية الموضحة في الشكل (22/ ب)، فتجري زيادة ضغط الغاز من (P_i) إلى (P_f) عند حجم ثابت (V_i)، ثم تقليل حجم الغاز من (V_i) إلى (V_f) عند ضغط ثابت (P_f). إنّ الشغل المبذول على الغاز على امتداد هذا المسار يساوي $(-P_f \Delta V)$. ويكون مقدار الشغل في هذه العملية أكبر من مقداره في العملية السابقة؛ لأنّ المكبس حُرّك خلال الإزاحة نفسها بقوّة أكبر. أخيرًا، في العملية الموضّحة في الشكل (22/ جـ)، يتغيّر كلّ من (P) و (V) باستمرار؛ لذا، فإنّ مقدار الشغل المبذول على الغاز في هذه العملية يقع بين مقدارَي الشغل اللذين جرى الحصول عليها في العمليتين السابقتين. ويتطلّب حساب الشغل في هذه العملية، معرفةَ الاقتران $P(V)$؛ الذي يُبيّن تغيّر الضغط بدلالة الحجم، ومعرفةً بحساب التكامل.

أتحقّق: كيف يعتمد الشغل المبذول على غاز على المسار بين حالتيه: الابتدائية والنهائية؟

شغل المحيط الخارجي (القوة الخارجية) المبذول على غاز عند ضغطه يساوي عدديًّا المساحة المحصورة بين منحنى (الضغط – الحجم) ومحور الحجم.

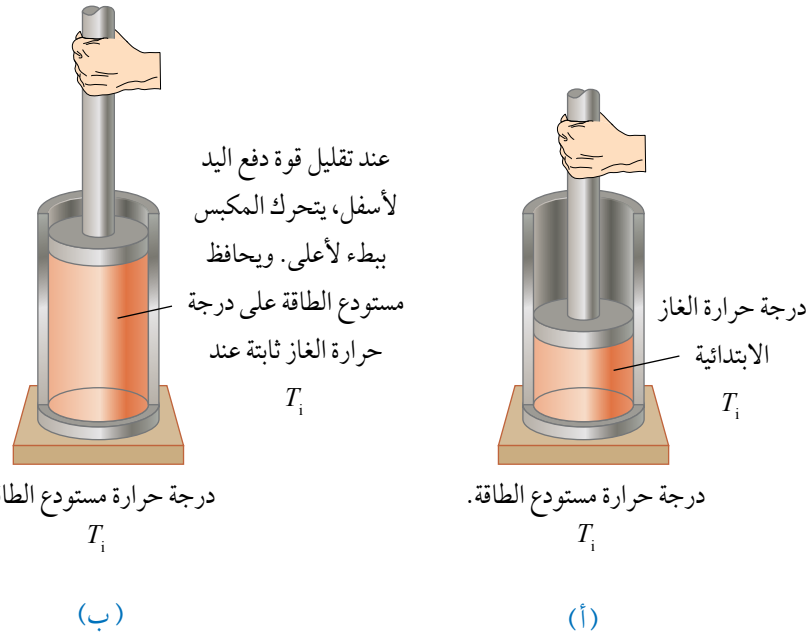


الشكل (21): منحنى (الضغط – الحجم) لعملية ضغط غاز ببطء من الحالة (i) إلى الحالة (f).



الشكل (22): يعتمد الشغل المبذول على غاز بين الحالتين: الابتدائية (i) والنهائية (f) على المسار الذي يسلكه الغاز بينهما.

ما مقدار الشغل المبذول على الغاز في المسار الأول في الشكل (ب)؟



الشكل (23):
(أ) اتصال حراري بين قاعدة الأسطوانة ومستودع الطاقة.
(ب) يتمدّد الغاز المحصور ويزداد حجمه.

الطاقة المتبادلة مع نظام تعتمد على المسار
Energy Exchanged with a System Depends on the Path

يعتمد مقدار الطاقة (Q) التي يكتسبها نظام أو يفقدها أيضًا، على المسار الذي يسلكه النظام بين حالتيه: الابتدائية والنهائية. يوضّح الشكلان (24 - 23) غازًا مثاليًّا محصورًا داخل أسطوانة، ويكون للغاز في الشكلين مقادير الحجم الابتدائي ودرجة الحرارة والضغط نفسها. في الشكل (23/ أ)، الغاز معزول حراريًّا عن المحيط الخارجي باستثناء الجزء السفلي منه، الذي يكون في حالة اتّصال حراري بمستودع طاقة Energy reservoir، وهو مصدر طاقة كبير لدرجة أنّ نقل كمّية محدّدة من الطاقة من المستودع أو إليه لا يُغيّر درجة حرارته. وأُلاحظ أن مكبس الأسطوانة مثبّت في موقعه الابتدائي باليد (قوّة خارجية).

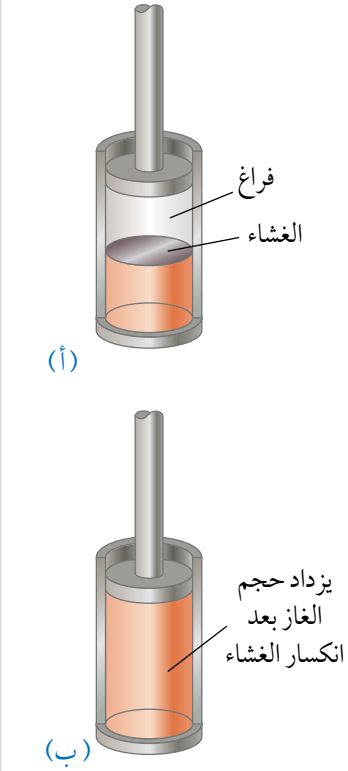
عند تقليل مقدار القوة الخارجية المؤثّرة في المكبس تدريجيًّا بمقدار صغير؛ يرتفع المكبس ببطء شديد إلى أعلى، ويزداد حجم الغاز، ويصبح حجمه النهائي (V_f) على نحو ما هو موضّح في الشكل (23/ ب)؛ إذ يبذل الغاز شغلًا على المكبس في أثناء حركته إلى أعلى. وفي أثناء هذا التمدّد تنتقل طاقة كافية (حرارة) من مستودع الطاقة إلى الغاز للمحافظة على ثبات درجة حرارته (T_i).

يوضّح الشكل (24/ أ) نظامًا معزولًا حراريًّا تمامًا؛ إذ يملأ الغاز نصف الأسطوانة السفلي، ونصفها العلوي فراغ، ويفصل بينهما غشاء رقيق. عند إزالة/ كسر الغشاء، يتمدّد الغاز بسرعة في الفراغ ويصبح حجمه النهائي (V_f)، وضغطه النهائي (P_f)، ويوضّح الشكل (24/ ب) هذه الحالة النهائية للغاز. وأُلاحظ في هذه العملية أنّ الغاز لا يبذل شغلًا؛ لأنّه لا يؤثّر بقوة؛ إذ لا تلزم قوّة للتمدّد في الفراغ، ولا تنتقل طاقة على شكل حرارة عبر الجدران المعزولة حراريًّا.

تُظهر التجارب أنّ درجة حرارة الغاز المثالي لا تتغيّر في العملية الموضّحة في الشكل (24)؛ لذا، فإنّ الحالتين الابتدائية والنهائية للغاز المثالي في الشكل (23) مماثلة تمامًا للحالتين الابتدائية والنهائية في الشكل (24) لكنّ المسارين مختلفان. في الحالة الأولى، يبذل الغاز شغلًا على المكبس، وتنتقل الطاقة ببطء إلى الغاز على شكل حرارة. في حين أنّه في الحالة الثانية، لا تنتقل طاقة على شكل حرارة، ومقدار الشغل المبذول صفر. أي إنّ نقل الطاقة على شكل حرارة يعتمد على عملية الديناميكا الحرارية التي تحدث في النظام، على نحو ما هي الحال في حالة الشغل المبذول.

أستنتجُ ممّا سبق، أنّه لا تُحدّد الحرارة (الطاقة المنتقلة) أو الشغل المبذول عن طريق نقطتَي بداية ونهاية العملية الديناميكية الحرارية؛ لأنّ كلًّا منهما يعتمد على المسار المتّبع بين الحالتين الابتدائية والنهائية في منحنى (الضغط-الحجم).

أتحقّق: كيف تعتمد الطاقة المتبادلة بين نظام ومحيطه الخارجي على المسار بين حالتَي النظام: الابتدائية والنهائية؟



الشكل (24):
(أ) درجة حرارة الغاز الابتدائية T_i، ويفصله غشاء رقيق عن الفراغ الذي فوقه، والأسطوانة كاملة معزولة حراريًّا.
(ب) عند إزالة الغشاء يتمدّد الغاز بحرّية في منطقة الفراغ، ويزداد حجمه ولا تتغيّر درجة حرارته.

الربط بالحياة

يوضّح الشكل (25) مضخّة هواء تُستخدم لضخ الهواء في إطار درّاجة هوائية. في أثناء استخدام مضخة الهواء، تُصبح نهايتها الأقرب إلى الإطار أكثر دفئًا؛ فعندما أدفع مكبس الأسطوانة بقوّة إلى الداخل، فإنّني أُطبّق ضغطًا على الهواء الموجود داخلها. وفي أثناء ذلك يتحرّك المكبس إزاحة معيّنة لتغيير حجم الهواء؛ لذا، فإنّني أبذل شغلًا على الهواء. ونظرًا إلى أنّ بذل شغل على جسم هو إحدى طرائق زيادة طاقتها الداخلية؛ فإنّ الطاقة الداخلية للهواء المحصور ستزداد، وستزداد تبعًا لذلك الطاقة الحركية لجزيئاته، وهذا هو سبب ارتفاع درجة الحرارة الهواء والأسطوانة.

الشكل (25): أبذلُ شغلًا عندما أدفعُ مكبس مضخّة الهواء الخاصّة بالدرّاجة.

المثال 6

غاز محصور في أسطوانة حجمه ($1.5 \times 10^{-4}\ m^3$)، وضغطه ($1.4 \times 10^6\ Pa$)، ومكبس الأسطوانة مهمل الكتلة وحرّ الحركة. زوِّد الغاز بطاقة فتمدّد تحت ضغط ثابت، ودُفع المكبس فأصبح حجمه النهائي ($1.6 \times 10^{-4}\ m^3$). أحسبُ مقدار ما يأتي:

أ. الشغل الذي يبذله الغاز على المكبس في أثناء تمدّده.

ب. قوّة ضغط الغاز المؤثّرة في المكبس في أثناء تمدّد الغاز، إذا تحرّك المكبس إزاحة مقدارها (4 cm).

المعطيات: $P = 1.4 \times 10^6\ m^3$, $V_i = 1.5 \times 10^{-4}\ m^3$, $V_f = 1.6 \times 10^{-4}\ m^3$.

المطلوب: $W_{gas} = ?$, $F_{gas} = ?$

الحلّ:

أ . تمدّد الغاز تحت ضغط ثابت، والشغل الذي يبذله الغاز يساوي سالب الشغل الذي يبذله المحيط الخارجي (القوّة الخارجية) عليه؛ لذا، أستخدمُ العلاقة الآتية لحساب مقدار الشغل.

$$W_{gas} = -W = -(-P\,\Delta V)$$

$$= 1.4 \times 10^6 \times (1.6 \times 10^{-4} - 1.5 \times 10^{-4})$$

$$= 14\ J$$

إشارة الشغل الذي بذله الغاز موجبة؛ لأنّ الغاز تمدّد وبذل شغلًا.

ب. أستخدمُ العلاقة الآتية لحساب مقدار قوّة ضغط الغاز المؤثّرة في المكبس.

$$W_{gas} = -W = -(-F\,\Delta x)\ ,\ F_{gas} = F_{ext} = F$$

$$F = \frac{W_{gas}}{\Delta x} = \frac{14}{0.04} = 350\ N$$

المثال 7

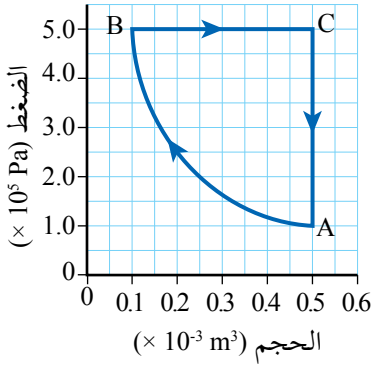
يوضّح الشكل (26) منحنى (الضغط-الحجم) لعيّنة من غاز محصور في أثناء مروره بدورة تغيّرات ABCA. أُجيب عمّا يأتي:

أ . أيّ العمليّات يُبذل فيها شغل على الغاز؟

ب. أيّ العمليات يتغيّر فيها ضغط الغاز، ولا يوجد شغل مبذول من الغاز أو عليه؟

جـ. هل يبذل الغاز شغلًا أم يُبذل عليه في العملية من B إلى C؟

د . أحسبُ الشغل المبذول على الغاز في العملية من B إلى C.



الشكل (26): تغيّر الضغط مع الحجم لغاز محصور.

المعطيات: منحنى (الضغط-الحجم).

المطلوب: $W_{B-C} = ?$

الحلّ:

أ . يُبذَل شغل على الغاز عندما يتغيّر منحنى (الضغط-الحجم) عبر المسار من A إلى B.

ب. في منحنى (الضغط - الحجم)، لا يُبذل شغل على الغاز ولا يبذل الغاز شغلًا عندما لا يوجد تغيّر في حجمه؛ إذ يكون منحنى (الضغط-الحجم) رأسيًّا؛ ويوضّح الجزء الرأسي من المنحنى (C إلى A) أنّ الضغط يتناقص.

جـ. يبذل الغاز شغلًا خلال هذا الجزء من المنحنى؛ لأنّ المنحنى يتّجه نحو اليمين إذ يتمدّد الغاز.

د. تمدّد الغاز تحت ضغط ثابت؛ لذا أستخدمُ العلاقة الآتية لحساب الشغل المبذول عليه من المحيط الخارجي.

$$W = -P\,\Delta V$$
$$= -5 \times 10^5 \times (0.5 - 0.1) \times 10^{-3}$$
$$= -2 \times 10^2 \ \text{J} = -W_{gas}$$

تمرين

1. **أحسبُ:** كتلة ثابتة من غاز النيتروجين حجمها ($2.5 \times 10^{-2}\ m^3$)، تمدّدت تحت ضغط ثابت مقداره ($1.01 \times 10^5\ Pa$) بحيث أصبح حجمها ($2.8 \times 10^{-2}\ m^3$). أحسبُ مقدار ما يأتي:

أ . الشغل الذي يبذله الغاز في أثناء تمدّده.

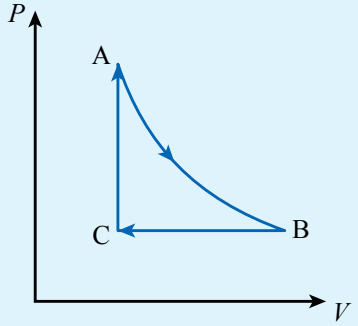
ب. قوّة ضغط الغاز المؤثّرة في المكبس في أثناء تمدّد الغاز إذا تحرّك المكبس إزاحة مقدارها (5.6 cm).

2. **أُحلّل:** يوضّح الشكل (27) منحنى (الضغط-الحجم) لعيّنة من غاز محصور في أسطوانة مغلقة في إحدى نهايتيها بمكبس حرّ الحركة، في أثناء مرور الغاز بدورة تغيّرات ABC. أُجيب عمّا يأتي:

أ . أيّ العمليّات يُبذل فيها شغل على الغاز؟

ب. أيّ العمليات يبذل فيها الغاز شغلًا؟

جـ. أيّ العمليّات لا يبذل فيها الغاز شغلًا ولا يُبذل عليه شغلٌ؟



الشكل (27): منحنى (الضغط-الحجم) لعيّنة من غاز محصور.

تجارب العالِم جول Joule's Experiments

حتّى نهاية القرن الثامن عشر، كان العلماء يعتقدون أنّ الحرارة مائع يُسمّى كالوريك Caloric، وأنّه موجود داخل الأجسام الساخنة، وكانوا يعتقدون أنّه يتدفّق من الأجسام الساخنة إلى الأجسام الباردة.

في عام 1798م، نشر عالم يُدعى رامفورد Rumford مقالًا يتعلّق بمصدر الحرارة الذي يولّده الاحتكاك، كتب فيه عن الآلات التي استُخدمت لحفر الثقوب في المدافع. إذ لاحظ أنّ الفلزّ المُستخدم في المدفع يمكن حفره بشكل متكرّر، وأنّ الاحتكاك سيولّد حرارة في كل مرّة. فإذا كانت الحرارة مائعًا، فإنّ المائع سيتدفّق كاملًا من الفلزّ في النهاية، ما يعني أنّه لن يصبح ساخنًا عند حفره.

اهتمّ العالم جول بعمل العالم رامفورد، حيث كان جول أول شخص بيّن أنّه يمكن تحويل الشغل الميكانيكي إلى حرارة. فقد صمّم جول التجارب وأجرى القياسات، واكتشف أنّ الشغل والطاقة متكافئان، وهذا سبب تسمية وحدتَي قياسهما باسمه.

أظهرت تجارب جول أنّ الحرارة طاقة وليست مائعًا، وأنّ الشغل الميكانيكي يمكن تحويله إلى طاقة حرارية. أدّت هذه الاستنتاجات إلى فكرة أنّه يمكن زيادة الطاقة الداخلية لنظام عن طريق تسخينه أو بذل شغل ميكانيكي عليه. وأدّى هذا إلى التوصّل إلى **القانون الأول في الديناميكا الحرارية The first law of thermodynamics**، الذي ينصّ على أنّ: "التغيّر في الطاقة الداخلية لنظام يساوي الطاقة المتبادلة مع النظام مضافًا إليها الشغل المبذول".

$$\Delta U = Q + W$$

حيث W هو الشغل المبذول على الغاز عن طريق قوّة خارجية، ويُعدّ هذا القانون نتاج تطبيق قانون حفظ الطاقة، وهو يربط بين التغيّر في الطاقة الداخلية للنظام، والطاقة المتبادلة معه على شكل حرارة وشغل ميكانيكي. وهو حالة خاصّة من قانون حفظ الطاقة؛ إذ يصف العمليات التي تتغيّر فيها الطاقة الداخلية لنظام، وتكون فيها عمليات نقل الطاقة عن طريق الحرارة والشغل فقط.

وعند استخدام هذه المعادلة، يجب مراعاة أن يكون للكمّيات

الفيزيائية الثلاث وَحدات القياس نفسها، ووَحدة قياس الطاقة هي الجول حسب النظام الدولي للوحدات، وإذا فقد النظام طاقة فإنّ Q تُعوّض سالبة، في حين تُعوّض Q موجبة في حال اكتسب النظام طاقة.

تُسمّى المحرّكات التي تُحوّل الطاقة الحرارية إلى شغل ميكانيكي المحرّكات الحرارية Heat engines. ومنها: محرّكات الاحتراق الداخلي في المركبات، والمحرّكات التوربينية في الطائرات، والمحرّكات التوربينية البخارية في محطّات الطاقة. وتُزوَّد هذه المحرّكات بالطاقة (حرارة) لتحويلها إلى شغل.

أمّا المضخّات الحرارية Heat pumps فيُبذل فيها شغل على نظام من أجل نقل الطاقة من منطقة أبرد إلى منطقة أسخن؛ أي نقلها بعكس اتّجاه انتقالها التلقائي. ومن أمثلتها الثلّاجات ومكيّفات الهواء. كلّ هذه الأنظمة تحقق القانون الأول في الديناميكا الحرارية.

✓ **أتحقّق:** علامَ ينص القانون الأول في الديناميكا الحرارية؟ وما الفرق بين المحرّكات الحرارية والمضخّات الحرارية؟

عمليّات الديناميكا الحرارية Thermodynamic Processes

يربط القانون الأول في الديناميكا الحرارية بين التغيّر في الطاقة الداخلية لنظام والشغل المبذول والحرارة، ولا يشترط حدوث تغيّر في هذه الكمّيات الفيزيائية الثلاث في كلّ عملية حرارية. فمثلًا، يمكن بذل شغل على نظام في إحدى العمليّات الحرارية بحيث تتغيّر طاقته الداخلية من دون حدوث تبادل حراري مع المحيط الخارجي، أو قد تتغيّر الطاقة الداخلية لنظام في عملية ما عند حدوث تبادل حراري مع المحيط الخارجي من دون بذل شغل عليه. وفي معظم العمليّات الحرارية يحدث التفاعل بين النظام ومحيطه الخارجي على شكل حرارة وشغل. وإذا كان النظام معزولًا Isolated system؛ فإنّه لا يتبادل طاقة مع المحيط الخارجي $(Q = 0)$، والشغل المبذول عليه يساوي صفرًا $(W = 0)$؛ لذا، لا تتغيّر الطاقة الداخلية للنظام؛ $U_i = U_f$. وقبل تطبيق القانون الأول في الديناميكا الحرارية على أنظمة محدّدة لا بدّ لي من تعرّف بعض العمليات الحرارية المثالية.

التجربة 2

عمليّات الديناميكا الحرارية

الموادّ والأدوات: علبة ملطّف جو فلزّية، ساعة إيقاف، دورق زجاجي ذو فوّهة صغيرة، بالون عدد (2)، ماء، مصدر حرارة (كهربائي أو صفيحة تسخين)، مضخّة تفريغ هواء، مصدر طاقة كهربائية، ناقوس زجاجي.

إرشادات السلامة: ارتداء المعطف واستعمال النظّارات الواقية للعينين وقفّازين حراريّين، والحذر من انسكاب الماء على أرضية الغرفة، والحذر من لمس مصدر الحرارة.

خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أُنفّذ الخطوات الآتية:

1. **ألاحظ:** أُزيل غطاء علبة ملطّف الجو، وألمس العلبة وفوّهتها لملاحظة درجتَي حرارتهما.
2. **أضبطُ المتغيّرات:** أضغطُ على صمّام (كبسة) العلبة مدّة (3 s)، على أنْ يتدفّق الغاز منها للمحيط الخارجي، ثمّ ألمسُ مباشرة العلبة وفوّهتها، ثمّ أُدوّن ملاحظاتي حول درجة حرارة العلبة وفوّهتها مقارنة بدرجتَي حرارتيهما في الخطوة السابقة.
3. أسكبُ الماء في الدورق إلى منتصفه تقريبًا، ثمّ أُثبّت البالون عند فوّهة الدورق، ثم أضعه على مصدر الحرارة، مراعيًا عدم ملامسة البالون جدار الدورق كي لا يتلف البالون.
4. **ألاحظ** ما يحدث للبالون عند غليان الماء في داخل الدورق، وأُدوّن ملاحظاتي.
5. أصل مضخّة التفريغ بالناقوس الزجاجي، وأنفخُ البالون قليلًا وأضعه داخل الناقوس. ثم أصل المضخّة بمصدر الطاقة الكهربائية.
6. **ألاحظ:** أبدأ بسحب الهواء من داخل الناقوس ببطء عن طريق تشغيل مضخة التفريغ، ثمَّ أُدوّن ملاحظاتي حول ما يحدث للبالون في أثناء هذه العملية.

التحليل والاستنتاج:

1. **أُفسّر** سبب انخفاض درجة حرارة العلبة والصمّام في الخطوة (2). لماذا يجب تنفيذ هذه العملية بسرعة؟
2. **أُحلّل وأستنتجُ:** ما الذي حدث للبالون في الخطوة (4)؟ هل بقي الضغط ثابتًا داخل البالون أم تغيّر؟ أُفسّر إجابتي.
3. **أُحلّل وأستنتجُ:** ما الذي حدث للبالون في الخطوة (6)؟ هل ارتفعت درجة حرارة الهواء داخله؟ أُفسّر إجابتي.
4. **أُحلّل وأستنتجُ:** هل حدث تبادل للطاقة بين النظام والمحيط الخارجي، في أثناء كلّ عملية من العمليّات الحرارية الموضّحة في الخطوات: 2، و4، و6؟
5. **أُحلّل وأستنتجُ:** ماذا تُسمّى كلّ عملية من العمليّات الحرارية الموضّحة في الخطوات: 2، و4، و 6؟
6. **أتوقّع** ما يحدث لعلبة ملطّف الجو الفلزّية عند تزويدها بكمّية من الطاقة على شكل حرارة؟ هل يتغيّر حجم الغاز في أثناء هذه العملية؟ ماذا تُسمّى هذه العملية؟

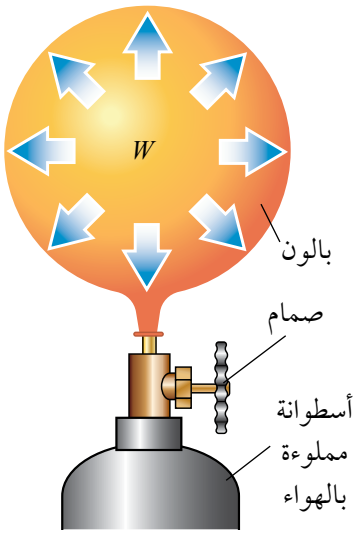
العملية الكاظمة Adiabatic process

العملية الكاظمة Adiabatic process هي عملية لا يحدث فيها تبادل للطاقة بين النظام ومحيطه على شكل حرارة؛ أي إنّ $Q = 0$. ويُمكن تحقيق هذه العملية باستخدام نظام معزول حراريًّا، أو بتنفيذ العملية بسرعة بحيث لا يوجد وقت كافٍ لحدوث تبادل للطاقة على شكل حرارة مع المحيط الخارجي، وهذا ما لاحظتُه عند تنفيذ الخطوة (2) في التجربة السابقة. أُطبّق القانون الأول في الديناميكا الحرارية على عملية كاظمة لأحصل على المعادلة:

$$\Delta U = W$$

توضّح هذه النتيجة أنّه إذا ضغطت غازًا في عملية حرارية كاظمة، يكون $W > 0$، و $\Delta U > 0$، فتزداد درجة حرارة الغاز. أمّا إذا تمدّد الغاز في عملية حرارية كاظمة فستنخفض درجة حرارته، ومثال ذلك النفخ السريع لبالون باستخدام أسطوانة مملوءة بالهواء أو غاز. أنظرُ الشكل (28).

للعمليّات الحرارية الكاظمة أهمّية كبيرة في التطبيقات الهندسية، ومنها: تمدّد الغازات الساخنة في محرك الاحتراق الداخلي، وتسييل الغازات (تحويلها إلى الحالة السائلة) في نظام التبريد، وشوط ضغط الوقود في محرّك الديزل.



الشكل (28): تنخفض الطاقة الداخلية للهواء في البالون والأسطوانة مع تمدّده السريع؛ إذ يبذل الهواء شغلًا على المحيط الخارجي في أثناء تمدّد البالون.

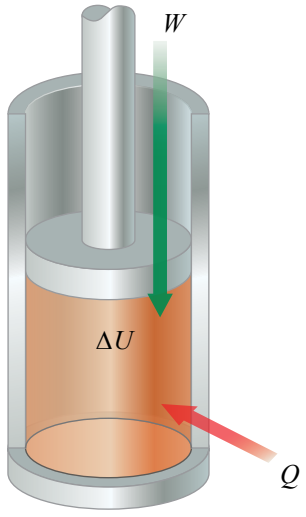
العملية عند ضغط ثابت Isobaric process

العملية عند ضغط ثابت Isobaric process هي عملية حرارية تحدث عند ثبات الضغط. وهذا ما لاحظتُه عند تنفيذ الخطوة (4) من التجربة السابقة. ويمكن تحقيق شروط العملية الحرارية عند ضغط ثابت في العملية الموضّحة في الشكل (29) بجعل المكبس حرّ الحركة، على أن يكون دائمًا في حالة اتزان؛ أي إنّ قوة ضغط الغاز المؤثّرة في المكبس إلى أعلى تساوي وزن المكبس وقوة ضغط الهواء الجوي المؤثّرة فيه إلى أسفل. ومن الأمثلة على العمليّات الحرارية عند ضغط ثابت العملية الأولى في الشكل (22/ أ)، والعملية الثانية في الشكل (22/ ب).

عادة، لا يساوي مقدار كلّ من الحرارة والشغل المبذول على الغاز صفرًا في مثل هذه العملية؛ لذا، يُستخدم القانون الأول في الديناميكا الحرارية في صورته العامّة. ويُعبَّر عن مقدار الشغل المبذول على الغاز في هذه العملية بالعلاقة:

$$W = -P\Delta V = -P(V_f - V_i)$$

حيث يكون ضغط الغاز (P) ثابتًا في أثناء هذه العملية.



الشكل (29): القانون الأوّل في الديناميكا الحرارية؛ $\Delta U = Q + W$.

العملية عند حجم ثابت Isovolumetric process

العملية عند حجم ثابت Isovolumetric process هي عملية حرارية تحدث عند ثبات الحجم. إنّ تثبيت المكبس عند موقع معيّن في الشكل (29)، يضمن حدوث هذه العملية. ومن الأمثلة على العمليّات عند حجم ثابت العملية الثانية في الشكل (22/ أ)، والعملية الأولى في الشكل (22/ ب).

لا يتغيّر حجم الغاز في هذه العملية؛ لذا، فإنّ الشغل المبذول يساوي صفرًا؛ $W = -P\Delta V$. وأستخدمُ القانون الأول في الديناميكا الحرارية للتوصّل إلى أنّ: $\Delta U = Q$

تُبيّن هذه العلاقة أنّه إذا أضفتُ طاقة إلى نظام ذي حجم ثابت، فإنّ الطاقة المنتقلة كلها تبقى في النظام على شكل زيادة في طاقته الداخلية.

أفكّر: لماذا يجب ألّا أترك ملطّفات الجو وعلب العطور المضغوطة (Spray) داخل السيارة في الأيام الحارّة؟ أُناقش أفراد مجموعتي، وأستخدمُ مصادر المعرفة المُتاحة للتوصّل إلى إجابة عن السؤال.

العملية عند درجة حرارة ثابتة Isothermal process

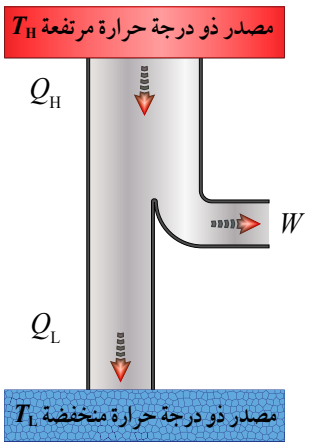
العملية عند درجة حرارة ثابتة Isothermal process هي عملية حرارية تحدث عند ثبات درجة الحرارة. ويمكن تنفيذ هذه العملية عن طريق غمر الأسطوانة الموضّحة في الشكل (29) في حمّام ماء وجليد، أو عن طريق وضع الأسطوانة في حالة اتّصال حراري بمستودع طاقة ذي درجة حرارة ثابتة. ولاحظتُ هذه العملية في الخطوة (6) من التجربة السابقة؛ إذ بقيت درجة حرارة الغاز داخل البالون ثابتة. وتعتمد الطاقة الداخلية للغاز المثالي على درجة الحرارة فقط، ونظرًا إلى أنّ درجة الحرارة لا تتغيّر في العملية عند درجة حرارة ثابتة لغاز مثالي؛ فإنّ $\Delta U = 0$. وأستنتجُ من القانون الأول في الديناميكا الحرارية أنّ الطاقة المنتقلة (Q) يجب أن تُساوي سالب الشغل المبذول على الغاز في العملية عند درجة حرارة ثابتة؛ أي إنّ $Q = -W$. إذ إنّ أيّ طاقة تدخل إلى النظام على شكل حرارة تنتقل إلى خارج النظام على شكل شغل؛ لذا، لا تتغيّر الطاقة الداخلية للنظام في هذه العملية.

أفكّر: إذا لم تتغيّر درجة حرارة نظام، فهل يعني ذلك عدم انتقال الطاقة على شكل حرارة من النظام أو إليه؟ أُناقش أفراد مجموعتي، وأستخدمُ مصادر المعرفة المُتاحة للتوصّل إلى إجابة عن السؤال.

أتحقّق: أُقارن بين عمليات الديناميكا الحرارية السابقة من حيث شروط حدوثها، وأُحدّد إشارة كلّ من الشغل والحرارة إن كانت موجبة أم سالبة لكلّ عملية.

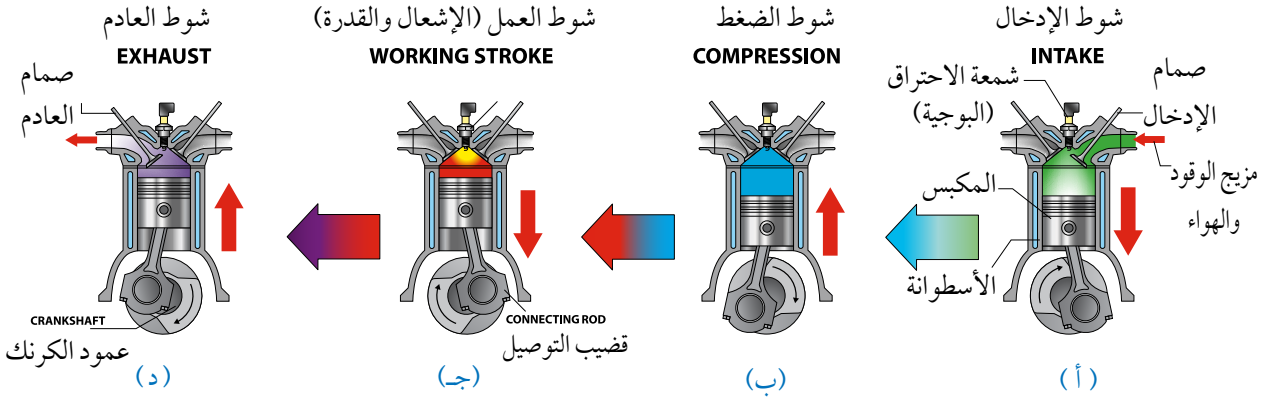
تطبيق: محرّك الاحتراق الداخلي Internal combustion engine

يُعدّ محرّك الاحتراق الداخلي Internal combustion engine الموجود في معظم المركبات مثالًا على الآلات الحرارية؛ إذ يعمل على تحويل الحرارة إلى شغل ميكانيكي. ويُعدُّ أيضًا مثالًا على العمليات الدورية Cyclic process؛ وهي العملية التي يعود فيها النظام في مرحلته النهائية إلى الحالة الابتدائية نفسها عند بدء العملية من دون تغيّر الطاقة الداخلية للنظام؛ أي إنّ $\Delta U = 0$ في العملية الدورية. وتبذل المحرّكات الحرارية الشغل عن طريق اكتساب الحرارة (Q_H) من مصدر حراري ذي درجة حرارة مرتفعة (T_H)، وتحوِّل جزءًا منها إلى شغل ميكانيكي مفيد، وتُصرِّفُ جزءًا منها (Q_L) إلى مستودع حراري ذي درجة حرارة منخفضة (T_L). أنظرُ الشكل (30) الذي يوضّح رسمًا تخطيطيًّا لمحرّك حراري، ويكون مقدار مجموع الشغل المبذول مساويًا الفرق بين الطاقة المكتسبة من المصدر الحراري والطاقة التي صُرِّفت إلى المستودع الحراري؛ أي إنّ ($W = Q_H - Q_L$).



الشكل (30): محرّك حراري.

يوضّح الشكل (31) خطوات دورة كاملة من دورات محرّك بنزين ذي أربع مراحل. ويوضّح الشكل (31/ أ)، شوط الإدخال؛ إذ يدخل مزيج من بخار البنزين والهواء عن طريق صمّام الدخول إلى الأسطوانة بوساطة حركة المكبس إلى أسفل. ثم يحدث شوط الضغط؛ إذ يبذل المكبس شغلًا في عملية حرارية كاظمة عند ضغطه مزيج البنزين والهواء في الأسطوانة، على



الشكل (31): مراحل (أشواط) دورة كاملة لمحرّك بنزين.

نحو ما هو موضّح في الشكل (31/ ب). ثم يحدث شوط العمل (الإشعال والقدرة)؛ إذ تُطلق شمعة الاحتراق شرارة عند لحظة الانضغاط القصوى، فيحترق مزيج البنزين والهواء ويحدث الانفجار داخل الأسطوانة، ويؤدّي تحوّل الطاقة الكيميائية المختزنة في النظام إلى طاقة حرارية إلى زيادة طاقته الداخلية وارتفاع درجة حرارته، على نحو ما هو موضّح في الشكل (31/ جـ)، فتتمدّد الغازات ذات الضغط المرتفع الناتجة من الاحتراق، وتدفع بسرعة كبيرة مكبس الأسطوانة إلى الخارج باذلة شغلًا على المحيط الخارجي، وتُدوّر عمود الكرنك الذي يحوّل الحركة الخطّية للمكابس إلى حركة دورانية للإطارات والمحاور المتّصلة بها. ولا يُستفاد من كامل الطاقة الحرارية الناتجة من الاحتراق في بذل شغل مفيد؛ إذ ينتقل جزء منها عبر جدران الأسطوانة، وينتقل جزء آخر أكبر مع الغازات الساخنة التي تُطرد عن طريق عادم المركبة، على نحو ما هو موضّح في الشكل (31/ د). ثم يدخل مزيج جديد من الوقود والهواء عبر صمّام الدخول إلى الأسطوانة، وتتكرّر هذه الدورة مئات المرات في الدقيقة، وتتحوّل الطاقة الحرارية الناتجة من احتراق الوقود إلى طاقة ميكانيكية؛ فتتحرّك المركبة.

أبحثُ

تختلف آليّة عمل المضخّات الحرارية عن المحرّكات الحرارية. أبحثُ عن آلية عمل مضخّة حرارية، وأُقارنها بآلية عمل محرّك حراري. وأُعدّ عرضًا تقديميًّا أعرضه على زملائي/ زميلاتي في الصفّ.

المثال 8

يبذل غاز في ثلّاجة شغلًا مقداره (140 J) في أثناء تمدّده، فتنخفض طاقته الداخلية بمقدار (115 J). أحسبُ مقدار الطاقة التي جرى تبادلها مع الغاز على شكل حرارة.

المعطيات: $W_{gas} = 140\ J\ ,\quad \Delta U = -115\ J.$

المطلوب: $Q = ?$

الحلّ:

الشغل المبذول على الغاز يساوي سالب الشغل الذي يبذله الغاز: أي إنّ $W = -\ 140\ J$. والطاقة الداخلية انخفضت فيكون التغيّر فيها سالبًا.

$$\Delta U = Q + W$$

$$Q = \Delta U - W$$

$$= -115 - (-140)$$

$$= 25\ J$$

نظرًا إلى أنّ إشارة (Q) موجبة؛ فإنّ النظام كسب طاقة.

المثال 9

أُدخل مزيج من البنزين والهواء إلى أُسطوانة محرّك احتراق داخلي. إذا حُرّك مكبس الأسطوانة إلى الداخل ببطء للمحافظة على ثبات ضغط الغاز خلال هذه العملية عند مقدار (7×10^5 Pa)، ونقص حجم المزيج بمقدار (1×10^{-4} m^3)، وارتفعت طاقته الداخلية بمقدار (60 J)، فأحسبُ مقدار الطاقة التي جرى تبادلها مع الغاز على شكل حرارة.

المعطيات: $P = 7 \times 10^5$ Pa , $\Delta V = -1 \times 10^{-4}$ m^3 , $\Delta U = 60$ J.

المطلوب: $Q = ?$

الحلّ:

بدايةً، أحسبُ الشغل المبذول على الغاز في أثناء ضغطه، مع مراعاة أنّها عملية عند ضغط ثابت.

$$W = -P\,\Delta V$$
$$= -7 \times 10^5 \times (-1 \times 10^{-4})$$
$$= 70 \text{ J}$$

ثمّ أحسبُ مقدار الطاقة المتبادلة مع النظام على شكل حرارة؛ باستخدام القانون الأوّل في الديناميكا الحرارية.

$$\Delta U = Q + W$$
$$Q = \Delta U - W$$
$$= 60 - 70$$
$$= -10 \text{ J}$$

نظرًا إلى أنّ إشارة (Q) سالبة؛ فإنّ النظام فقد طاقة.

المثال 10

كتلة ثابتة من غاز محصور في أسطوانة معزولة حراريًّا ومغلقة بمكبس حرّ الحركة. ازداد حجم الغاز من (2.1×10^{-3} m^3) إلى (2.4×10^{-3} m^3) عند ضغط ثابت مقداره (1.38×10^5 Pa).أحسبُ مقدار ما يأتي:

أ . الشغل الذي بذله الغاز في أثناء تمدّده.

ب. التغيّر في الطاقة الداخلية للغاز.

المعطيات: $V_i = 2.1 \times 10^{-3}$ m^3 , $V_f = 2.4 \times 10^{-3}$ m^3 , $P = 1.38 \times 10^5$ Pa.

المطلوب: $W = ?$, $\Delta U = ?$

الحلّ:

أ. أحسبُ بداية الشغل المبذول على الغاز من المحيط الخارجي في أثناء تمدّد الغاز عند ضغط ثابت.

$$W = -P\,\Delta V$$

$$= -1.38 \times 10^{5} \times (2.4 \times 10^{-3} - 2.1 \times 10^{-3})$$

$$= -41.4 \text{ J}$$

الشغل الذي بذله الغاز يساوي سالب الشغل المبذول عليه، أي إنّ: $W_{gas} = -W = 41.4$ J.

ب. النظام معزول حراريًّا عن المحيط الخارجي؛ لذا، لا يكتسب طاقة على شكل حرارة ولا يفقدها؛ أي إنّ $Q = 0$. ثمّ أحسبُ مقدار التغيّر في الطاقة الداخلية للنظام؛ باستخدام القانون الأول في الديناميكا الحرارية.

$$\Delta U = Q + W$$

$$= 0 + (-41.4) = -41.4 \text{ J}$$

الإشارة السالبة تفيد أنّ الطاقة الداخلية قلّت بمقدار 41.4 J.

تمرين

أسطوانة مملوءة بغاز حجمه (3 L)، ومغمورة في حمّام مائي فيه ماء وجليد بدرجة (0°C). سحبت هدى مكبس الأسطوانة للخارج ببطءٍ بحيث أصبح حجم الغاز (10 L) وضغطه (2.25×10^{5} Pa)، وبذل الغاز شغلًا مقداره (2.7×10^{3} J). أجيب عمّا يأتي:

أ. ما العملية الديناميكية الحرارية المثالية التي تمثّل ما حدث؟

ب. ما مقدار الطاقة التي جرى تبادلها مع الغاز على شكل حرارة؟

جـ. إذا ضغطت هدى مكبس الأسطوانة إلى الداخل ببطءٍ لإرجاع الغاز إلى حجمه الابتدائي بعملية عند ضغط ثابت (2.25×10^{5} Pa)؛ فما مقدار الشغل المبذول على الغاز؟

التلوّث الحراري Thermal Pollution

تُستخدم المحرّكات الحرارية في العديد من الأجهزة والآلات في حياتنا اليومية، أو تلك التي تزوِّدنا بالطاقة التي نستهلكها، ومنها: المركبات، ومحطّات توليد الطاقة الكهربائية، وغيرها... إذ يعتمد أغلبها على الوقود الأحفوري.

ينتج التلوّث الحراري للبيئة من الطاقة الحرارية (Q_L) التي تطرحها المحرّكات الحرارية؛ إذ تُطرد هذه الطاقة إلى المحيط الخارجي في أثناء تبريد المحرّكات عن طريق المياه أو الهواء. وعند طرح مياه التبريد الحارّة في البحار والبحيرات؛ فإنّها ترفع درجة حرارة هذه المياه ما يُسبّب الإخلال بالتوازن البيئي للحياة البحرية؛ لأنّ نسبة الأكسجين المُذاب في الماء تقلّ بارتفاع درجة حرارته. وعند استخدام أبراج التبريد في حالة الهواء؛ فإنّ الطاقة التي تُطرح في الهواء ترفع درجة حرارة الغلاف الجوي الذي يؤثّر بدوره في المناخ. ويؤدّي أيضًا انبعاث غاز ثاني أكسيد الكربون، الناتج من حرق الوقود الأحفوري في السيّارات ومحطّات الطاقة والمصانع وغيرها إلى ازدياد نسبته في الغلاف الجوي، ويُعدّ هذا من أكبر المشكلات المرتبطة باستخدام الوقود الأحفوري. إذ يُعدّ غاز ثاني أكسيد الكربون من غازات الدفيئة التي تُسبّب ظاهرة الاحتباس الحراري العالمي ورفع درجة حرارة الأرض؛ إذ يمتص غاز ثاني أكسيد الكربون بعض الأشعة تحت الحمراء التي تُشعّها الأرض، ويُعيد إشعاعها إلى الأرض مرّة أُخرى؛ لذا، يجب ترشيد استهلاكنا للوقود الأحفوري؛ للمحافظة على وجوده أطول مدّة ممكنة وعدم نضوبه، ولحماية الأرض من تأثير غازات الدفيئة التي ترفع درجة حرارتها.

مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** ما المقصود بالطاقة الداخلية لنظام؟ علامَ ينصّ القانون الأول في الديناميكا الحرارية؟

2. **أُحلّل:** أملأُ الجدول أدناه بالرمز المناسب (+، -، 0) لكلّ من: Q، و W ، و ΔU في الأعمدة الثلاثة الأخيرة منه.

الحالة	النظام	Q	W	ΔU
نفخ إطار دراجة هوائية بمضخّة هواء بسرعة.	الهواء في مضخّة.			
وعاء به ماء بدرجة حرارة الغرفة، وضِع على مصدر حرارة ساخن.	الماء في الوعاء.			
تسرّب هواء بسرعة من بالون.	الهواء الموجود في بالون.			

3. **أفسّرُ:** صندوقان من الحديد (A) و (B)، لهما درجة الحرارة نفسها، وكتلة (A) تساوي m، وكتلة (B) تساوي $2m$. ما العلاقة بين الطاقة الداخلية لكلا الصندوقين؟

4. **أُفسّر:** يتمدّد غاز في أسطوانة ويدفع مكبسها؛ إذ يبذل الغاز شغلًا. أُجيب عمّا يأتي:

أ . أُوضّح المقصود بجملة: "يبذل الغاز شغلًا".

ب. عند تطبيق القانون الأوّل في الديناميكا الحرارية على الغاز، يجري التعامل مع الغاز والأسطوانة والمكبس بوصفها نظامًا مغلقًا. أُوضّح المقصود بالنظام المغلق.

5. **أستخدمُ الأرقام:** يزداد حجم غاز محصور في منطاد مغلق من ($15.5\ m^3$) إلى ($16.2\ m^3$) عند ضغط جوي معياري مقداره ($1.01 \times 10^5\ Pa$). أحسبُ مقدار الشغل الذي يبذله الغاز في أثناء هذا التمدّد.

6. تنخفض الطاقة الداخلية لغاز في إحدى أسطوانات محرّك احتراق داخلي بمقدار (200 J)، عند بذله شغلًا مقداره (50 J). أُجيب عمّا يأتي:

أ. **أحسبُ** مقدار الطاقة التي جرى تبادلها مع الغاز على شكل حرارة.

ب. **أُحلّل:** هل زُوّد الغاز بهذه الطاقة أم فقدها؟

التمدّد الحراري
Thermal Expansion

الدرس 3

الفكرة الرئيسة:

للتمدّد الحراري للموادّ بحالاتها الثلاث أهمّية كبيرة في حياتنا، وفي التطبيقات التكنولوجية المختلفة.

نتاجات التعلّم:

- أُعرّف معامل التمدّد الحراري الطولي، وأُعبّر عنه بمعادلة رياضية.
- أتوصّل إلى العوامل التي تُغيّر من مقدار الزيادة في طول ساق فلزّية عند تسخينها.
- أُصمّم ثيرموستات يعمل على التحكّم في درجة حرارة سخّان كهربائي.
- أشرحُ شذوذ الماء ودوره في بقاء الكائنات البحرية على قيد الحياة تحت الجليد في البحيرات المتجمّدة.

المفاهيم والمصطلحات:

معامل التمدّد الطولي

Coefficient of Linear Expansion

شذوذ الماء

Anomalous Behavior of Water

التمدّد الحراري للموادّ الصلبة والسائلة والغازية
Thermal Expansion of Solids, Liquids and Gases

درستُ أنّه عندما يحدث تبادل حراري بين جسم ومحيطه الخارجي؛ فإنّ حالته الفيزيائية قد تتغيّر، وإذا لم تتغيّر حالته الفيزيائية؛ فإنّ تبادل الطاقة هذا يؤدّي إلى تغيّر درجة حرارة الجسم، ما يؤدّي إلى تمدّده (أو تقلّصه) طوليًّا أو سطحيًّا أو حجميًّا. إذ تزداد أبعاد أغلب المواد بارتفاع درجة حرارتها، وتتقلّص أبعادها بانخفاض درجة حرارتها. ولهذا التمدّد الحراري فوائد وتطبيقات كثيرة في حياتنا، أنظرُ الشكل (32/ أ). وقد يؤدّي إهمال تمدّد الأجسام إلى حدوث أضرار كبيرة، أنظرُ الشكل (32/ ب).

الشكل (32):
أ. يعتمد مبدأ عمل مقياس درجة الحرارة على تمدّد السائل المستخدم فيه وتقلّصه بتغيّر درجة الحرارة.
ب. أدّت درجات الحرارة المرتفعة إلى تقوّس مسارات سكة الحديد نتيجة تمدّدها.

تفسير التمدّد الحراري للمواد
Explaining Thermal Expansion of Materials

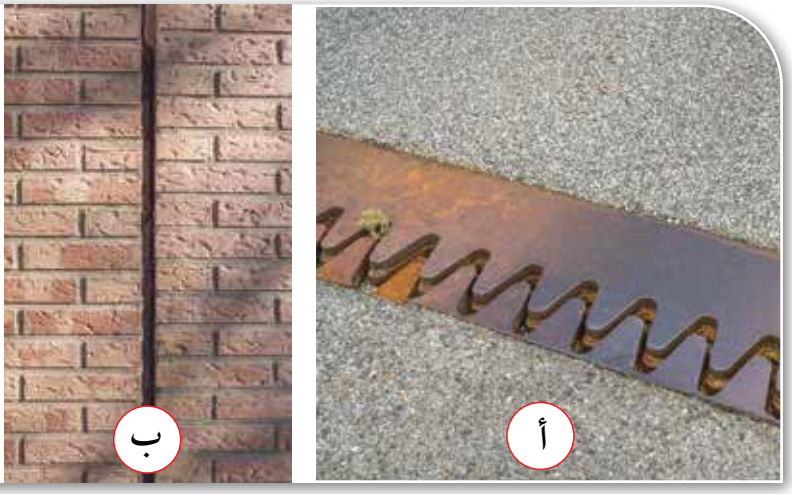
وفقًا لنموذج الحركة الجزيئية – الذي درستُه سابقًا – تتحرّك جُسيمات الموادّ الصلبة والسائلة حركة اهتزازية مستمرّة، إضافة إلى وجود حركة انتقالية لجُسيمات السوائل. وعند ارتفاع درجة حرارة هذه الموادّ يزداد مقدار سرعة جُسيماتها، فيتباعد بعضها عن بعض قليلًا وتتمدّد. ويكون التمدّد الحراري للمواد السائلة أكبر منه للموادّ الصلبة. أمّا الغازات التي تكون أصلًا المسافات بين جُسيماتها كبيرة؛ فيكون تمدّدها هو الأكبر.

أتحقّق: لماذا تتمدّد الموادّ عند ارتفاع درجة حرارتها؟

التمدّد الحراري الطولي Thermal Linear Expansion

لظاهرة التمدّد الحراري دور مهمّ في العديد من التطبيقات الهندسية؛ إذ يحرص المهندسون على ترك فراغات أو وضع فاصل تمدّد حراري في المباني والطرق الخرسانية ومسارات السكك الحديدية والجسور وغير ذلك... للسماح لها بالتمدّد والتقلّص بحرّية عند تغيّر درجة الحرارة، من دون أن يؤدّي ذلك إلى تلفها أو انهيارها، أنظرُ الشكل (33). تُسمّى الزيادة في طول سلك فلزّي رفيع عند رفع درجة حرارته التمدّد الطولي Thermal linear expansion. وتُظهر التجارب أنّ التغيّر في طول ساق أو سلك فلزّي رفيع (Δl) يتناسب طرديًّا مع التغيّر في درجة حرارته (ΔT)؛ فكلّما كان الارتفاع في درجة حرارته أكبر زاد مقدار التغيّر في طوله. ويتناسب أيضًا التمدّد الطولي

أُعدّ فيلمًا قصيرًا باستخدام صانع الأفلام (Movie maker) يعرض تأثيرات عدم مراعاة التمدّد الحراري، في المباني والطرق الخرسانية ومسارات السكك الحديدية والجسور وغيرها....



الشكل (33):
أ . يسمح فاصل التمدّد (الفراغ أو المادّة اللدّنة) في الجسر لمادّة الجسر وسطح الطريق، بالتمدّد في الأيام الشديدة الحرارة، والتقلّص في الأيام الشديدة البرودة بحرّية من دون تقوّس الجسر أو انهياره أو تشقّقه.
ب. يُملأ فاصل التمدّد الرأسي بين قطع الطوب في البناء بمادّة ليّنة (مرنة) تسمح للطوب بالتمدّد والتقلّص بتغيّر درجة حرارته.

للساق أو السلك الرفيع طرديًّا مع طوله؛ فتمدّد ساق فلزّية من الحديد طولها (4 m) يساوي أربعة أضعاف مقدار تمدّد ساق مماثلة طولها (1 m) عند رفع درجة حرارتيهما بالمقدار نفسه. فإذا كان لديّ سلك طوله (l_i) عند درجة حرارة (T_i)، وأصبح طوله (l_f) عند درجة حرارة (T_f)؛ فإنّني أستخدمُ المعادلة الآتية لحساب الزيادة في طول الجسم عند تمدّده أو النقصان في طوله عند تقلّصه:

$$\Delta l = \alpha l_i \ \Delta T$$

حيث ($\Delta l = l_f - l_i$)، و ($\Delta T = T_f - T_i$)، أمّا ألفا (α) فتمثّل **معامل التمدّد الطولي** **Coefficient of linear expansion** لمادّة السلك، وهو يختلف من مادّة إلى أُخرى، ووحدة قياسه ($^\circ C^{-1}$) أو (K^{-1}). ويُعرف بأنّه يساوي مقدار الزيادة في طول (1 m) من المادّة عند رفع درجة حرارتها بمقدار (1°C). يوضّح الجدول (3) معاملات التمدّد الطولي لموادّ مختلفة عند درجة حرارة الغرفة. أُلاحظ من الجدول أنّ مقدار معامل التمدّد الطولي للفلزات يكون أكبر من مقداره للموادّ الأُخرى.

✓ **أتحقّق:** ما العوامل التي يعتمد عليها التمدّد الطولي للموادّ الصلبة؟

الجدول 3: معامل التمدّد الطولي لموادّ مختلفة عند درجة حرارة الغرفة (20 °C).

المادّة	معامل التمدّد الطولي (α ($^\circ C^{-1}$))
الألمنيوم	24×10^{-6}
النحاس	17×10^{-6}
الخرسانة	12×10^{-6}
الفولاذ / الحديد	11×10^{-6}
الزجاج العادي	9×10^{-6}
زجاج البايركس	3.2×10^{-6}

المثال 11

يبلغ طول أحد قضبان سكّة حديد (30 m) عند درجة حرارة (0°C). إذا علمتُ أنّ القضيب مصنوع من الفولاذ Steel، وبالاستعانة بالبيانات الواردة في الجدول (3)، فأحسبُ مقدار ما يأتي:

أ . طول القضيب الفولاذي عندما تصبح درجة حرارته (50°C).

ب. النقصان في طول القضيب الفولاذي عندما تصبح درجة حرارته (-50°C).

المعطيات: $l_i = 30\ \text{m}\ ,\ T_i = 0°\text{C}\ ,\ T_{f1} = 50°\text{C}\ ,\ T_{f2} = -\ 50\ °\text{C}\ ,\ \alpha_{steel} = 11 \times 10^{-6}\ °\text{C}^{-1}$.

المطلوب: $l_f = ?\ ,\ \Delta l = ?$.

الحلّ:

أ. أستخدمُ المعادلة الآتية لحساب التغيّر في طول قضيب الفولاذ.

$$\Delta l = \alpha l_i \Delta T$$
$$= 11 \times 10^{-6} \times 30 \times (50 - 0)$$
$$= 1.65 \times 10^{-2}\ \text{m} = 1.65\ \text{cm}$$

نظرًا إلى صغر معامل التمدّد الحراري يكون مقدار التمدّد صغيرًا.

أجد الطول النهائي لقضيب الفولاذ على النحو الآتي:

$$\Delta l = l_f - l_i$$
$$l_f = \Delta l + l_i = 1.65 \times 10^{-2} + 30$$
$$= 30.0165\ \text{m}$$

ب. أستخدمُ المعادلة السابقة نفسها لإيجاد مقدار التمدّد أو مقدار التقلّص. ولمّا كانت الزيادة في طول قضيب الفولاذ (1.65×10^{-2} m) عند رفع درجة حرارته بمقدار (50°C)؛ فإنّ مقدار تقلّصه عند انخفاض درجة حرارته بمقدار (50°C) سيكون (1.65×10^{-2} m).

تمرين

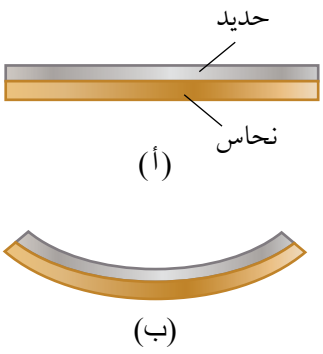
أحسبُ: مسطرة طولها (30 cm) مصنوعة من الفولاذ، تكون أكثر دقّة عند استخدامها عند درجة حرارة (20°C). بالاستعانة بالبيانات الواردة في الجدول (3)، أحسبُ مقدار طول المسطرة عند استخدامها عند درجة حرارة (35°C).

أفكّر: في أيّ اتّجاه ينحني الشريط الثنائي الفلزّ عند تبريده؟ أُناقش أفراد مجموعتي، وأستخدمُ مصادر المعرفة المُتاحة للتوصل إلى إجابة عن السؤال.

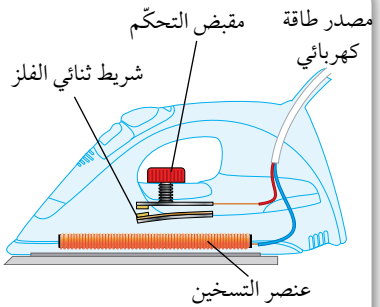
تطبيقات على التمدّد الطولي Applications of Linear Expansion

أُلاحظ من الجدول (3)، أنّ معامل التمدّد الطولي يختلف من مادّة إلى أُخرى؛ إذ تتمدّد الأطوال المتساوية من هذه المواد وتتقلّص بمقادير مختلفة للتغيّر نفسه في درجة الحرارة. ولهذا الاختلاف في معاملات التمدّد مزايا وعيوب. فمثلًا، يجب على المهندسين مراعاة الاختلاف في معاملات تمدّد الموادّ عند تصميمهم الجسور والمباني والسكك الحديدية وغيرها... فمثلًا، في الأسمنت المسلح تُستخدم قضبان من الحديد مع الخرسانة (الأسمنت والحصى وغيرهما) من أجل تقويتها؛ لذا، يجب أن يكون لهما معامل التمدّد نفسه، وإلّا تصدّع البناء عند تعرّضه بشكل مستمر لارتفاع درجة حرارته وانخفاضها بتغيّر درجة حرارة الجو.

من التطبيقات المهمّة للاختلاف في معاملات تمدّد الموادّ صناعة الشريط الثنائي الفلزّ Bimetalic strip الذي يُستخدم في منظّم الحرارة Thermostat. يتكوّن الشريط الثنائي الفلزّ من شريطين فلزّيين مختلفين، لهما الطول نفسه ومثبّتان معًا، ويكون عادة من الحديد والنحاس، أنظرُ الشكل (34/ أ). وعند تسخين الشريط يتمدّد النحاس بمقدار أكبر من تمدّد الحديد بسبب الاختلاف في معامل التمدّد الحراري الطولي للفلزّين، أنظرُ الجدول (3)، ونظرًا إلى أنّ الشريطين مثبّتان معًا؛ فإنّ الشريط الثنائي الفلزّ ينحني نحو الحديد، بحيث يكون النحاس على السطح الخارجي للشريط، أنظرُ الشكل (34/ ب). يُحافظ منظّم الحرارة على ثبات درجة حرارة الغرفة أو الجهاز الكهربائي المستخدم فيه. ويوضّح الشكل (35) منظّم حرارة يستخدم شريطًا ثنائي الفلزّ في دائرة التسخين الكهربائي لمكواة كهربائية. فعندما تصل درجة حرارة عنصر التسخين إلى درجة الحرارة المطلوبة، ينحني الشريط بعيدًا عن نقطة التوصيل الكهربائي، فتفصل الدائرة الكهربائية في المكواة، ولا يمر فيها تيار كهربائي. وعندما يبرد الشريط الثنائي الفلزّ فإنّه يعود إلى وضعه الابتدائي (مستقيمًا)، فيلامس نقطة التوصيل الكهربائي ويُغلق الدائرة الكهربائية، وتعمل المكواة مرّة أُخرى. وإذا دُوّر مقبض التحكّم بحيث ينزل إلى أسفل قليلًا، فيجب أن ينحني الشريط الثنائي الفلزّ بمقدار أكبر لفتح الدائرة الكهربائية، وهذا يتطلّب ارتفاع درجة حرارة الشريط بمقدار أكبر.



الشكل (34):
أ . شريط ثنائي الفلز من الحديد والنحاس بدرجة حرارة الغرفة.
ب. ينحني الشريط نحو الحديد عند تسخينه.



الشكل (35): يُستخدم الشريط الثنائي الفلزّ في منظّم الحرارة في المكواة الكهربائية.

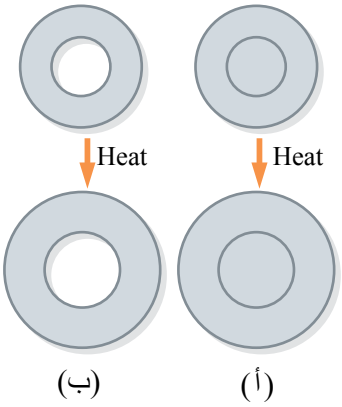
التمدّد الحراري السطحي Thermal Surface Expansion

عند رفع درجة حرارة صفيحة رقيقة من مادّة صلبة فإنّها تتمدّد، إذ يتغيّر مقدار كلّ من طولها وعرضها فتزداد مساحتها. وإذا احتوت الصفيحة على تجويف يزداد نصف قطره (نتيجة تمدّد مادّة الصفيحة المحيطة به) كما لو كان ممتلئًا بمادّة الصفيحة نفسها. أنظرُ الشكل (36/ أ)، الذي يُبيّن تمدّد قرص فلزّي وازدياد نصف قطره عند رفع درجة حرارته بمقدار (ΔT)، في حين يُبيّن الشكل (36/ ب) ازدياد نصف قطر التجويف بالمقدار نفسه، كما لو كان ممتلئًا بمادّة القرص نفسها عند رفع درجة حرارته بالمقدار (ΔT) نفسه.

أتحقّق: ما الذي يحدث لأبعاد صفيحة فلزّيّة رقيقة عند رفع درجة حرارتها؟

أبحثُ

يُستخدم الشريط الثنائي الفلزّ في مُنظِّمات الحرارة في السخّانات الكهربائية. أبحثُ عن آليّة عمل منظّم الحرارة في السخّان الكهربائي ودور الشريط الثنائي الفلزّ في عمله، وأُعدّ عرضًا تقديميًّا أعرضه على زملائي/ زميلاتي في الصفّ.

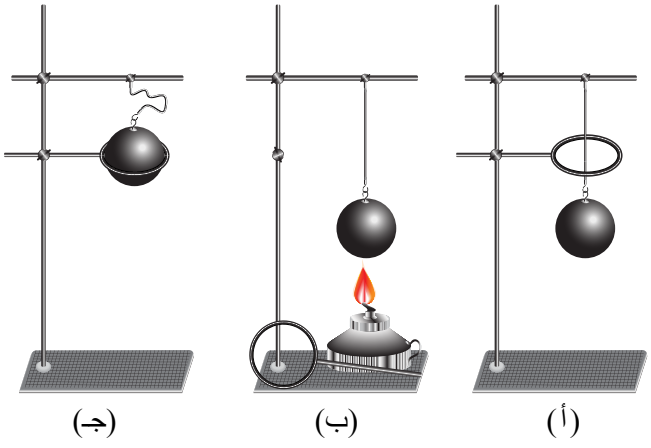


الشكل (36):
أ. يزداد نصف قطر القرص الفلزّي عند رفع درجة حرارته.
ب. يزداد نصف قطر التجويف عند رفع درجة حرارته.

التمدّد الحراري الحجمي Thermal Volume Expansion

التمدّد الحراري الحجمي للموادّ الصلبة

تتمدّد الموادّ الصلبة حجميًّا عند رفع درجة حرارتها، إذ يزداد كلّ من طولها وعرضها وارتفاعها؛ فيزداد حجمها. وإذا احتوى الجسم الصلب على فجوات فإنّها تتمدّد بالكيفية نفسها كما لو كانت ممتلئة بمادّة الجسم الصلب نفسها. ويوضّح الشكل (37) تجربة الحلقة والكرة؛ فعند درجة حرارة الغرفة أستطيع إدخال الكرة الفلزّية من الحلقة الفلزّية بسهولة. أمّا عند تسخين الكرة فإنّه يصعب إدخالها من الحلقة؛ فقد ازداد نصف قطر الكرة ومن ثمّ ازداد حجمها، وأصبح نصف قطرها أكبر من نصف قطر الحلقة.



الشكل (37):
أ. عند درجة حرارة الغرفة تدخل الكرة بسهولة من الحلقة الفلزية.
ب. عند تسخين الكرة الفلزية يزداد نصف قطرها فيزداد حجمها.
جـ. يصبح قطر الكرة أكبر من قطر الحلقة فلا تدخل منها.

الربط بالحياة

يُفسّر التمدّد غير المعتاد للماء بين (4°C) و(0°C) سبب بقاء الأسماك وأشكال الحياة البحرية الأُخرى على قيد الحياة، في البحار والمحيطات والبحيرات في فصل الشتاء. إذ يبرد الماء الموجود في الجزء العلوي منها أوّلًا، فيقلّ حجمه ويغوص إلى قاعها؛ لأنّه أكبر كثافة حاملًا معه الأكسجين اللازم لتنفّس الكائنات البحرية، ثم يرتفع الماء الأكثر دفئًا والأقلّ كثافة إلى السطح (حاملًا معه ثاني أكسيد الكربون)، فتنخفض درجة حرارته نتيجة ملامسته الهواء البارد، ثمّ يغوص إلى أسفل، وهكذا دواليك. وإذا انخفضت درجة حرارة الماء على السطح إلى ما دون (4°C)؛ فإنّها تصبح أقلّ كثافة وتبقى في الأعلى، وتُشكّل في النهاية طبقة من الجليد عند درجة حرارة (0°C) وتتجمّد مياه بحيرة مثلًا بدايةً من السطح، مع بقاء الماء تحت الطبقة الجليدية سائلًا، ما يسمح للكائنات البحرية في البقاء على قيد الحياة، وتكون درجات حرارة طبقات الماء في بحيرة على نحو ما هو موضّح في الشكل (39).

التمدّد الحراري الحجمي للسوائل Thermal Volume Expansion of Liquids

تتمدّد السوائل تمدّدًا حجميًّا عند ارتفاع درجة حرارتها؛ إذ تأخذ السوائل شكل الوعاء الذي توضع فيه. ويكون تمدّد السوائل عادة أكبر من تمدّد المواد الصلبة للارتفاع نفسه في درجات الحرارة؛ لأنّ حرية حركة جُسيمات السائل أكبر منها لجُسيمات المادّة الصلبة.

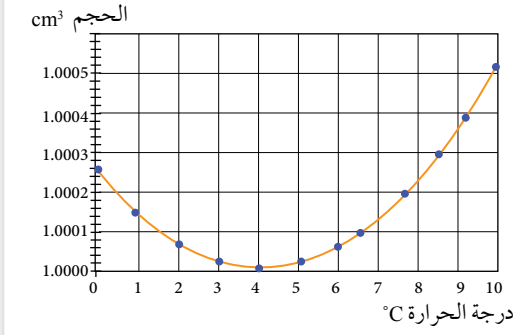
وعند تسخين أغلب السوائل يزداد حجمها وتقلّ كثافتها، حيث ($\rho = \frac{m}{V}$)، وعند تبريدها يقلّ حجمها فتزداد كثافتها. ويشذّ عن هذا السلوك الماء بين درجتَي الحرارة (0°C) و (4°C).

شذوذ الماء

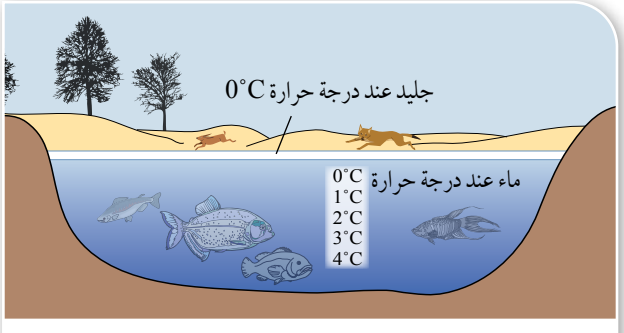
عند تبريد الماء إلى (4°C) فإنّه يتقلص، مشابهًا بذلك في سلوكه بقيّة السوائل. ولكن في أثناء تبريده من 4°C إلى 0°C فإنّه يتمدّد، مخالفًا بهذا السلوك سلوك بقية السوائل التي يقلّ حجمها باستمرار تبريدها حتّى تجمّدها. إذ يكون أقل حجم لكمّية من الماء (أكبر كثافة) عند (4°C). أنظرُ الشكل (38). ويُطلق على سلوك الماء هذا بين درجتَي حرارة (4°C) و (0°C) **شذوذ الماء Anomalous behavior of water.**

عندما يتجمّد الماء عند درجة حرارة (0°C) يحدث تمدّد في حجمه، ويصبح حجم كلّ ($100\ cm^3$) من الماء مساويًا ($109\ cm^3$) من الجليد. وهذا يُفسّر سبب انفجار أنابيب المياه المكشوفة في الطقس الشديد البرودة، ويفسّر أيضًا حقيقة أنّ كثافة الجليد أقلّ من كثافة الماء البارد؛ لذا، فهو يطفو على سطح الماء.

أتحقّق: ما سبب بقاء الأسماك وأشكال الحياة البحرية المختلفة على قيد الحياة، في البحيرات المتجمّدة؟



الشكل (38): عند تبريد الماء إلى ما دون (4°C) يزداد حجمه.



الشكل (39): نتيجة شذوذ الماء؛ يتجمّد ماء البحيرة من أعلى إلى أسفل.

مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** لماذا تتمدّد الموادّ الصلبة عند تسخينها؟ هل للتمدّد الحراري تأثير في حياتنا؟

2. **أُفسّر** سبب تقوّس الشريط الثنائي الفلزّ عند تسخينه.

3. **أستخدمُ المتغيّرات:** أراد صقر دراسة التمدّد الطولي لفلزّين مختلفين، فأحضر سلكين رفيعين (A) و(B) من الفلزّين، لهما الطول نفسه ودرجة الحرارة الابتدائية نفسها، ثم سخّنهما بحيث ارتفعت درجتا حرارتيهما بالمقدار نفسه. لاحظ صقر أنّ مقدار الزيادة في طول السلك (B) أكبر منها للسلك (A). أجيب عمّا يأتي:

أ. لماذا ضبطنا التغيّر في درجة الحرارة للفلزّين؟

ب. يتناسب مقدار التمدّد الطولي لجسم طرديًّا مع طوله. هل يُمكن لصقر أن يستنتج ذلك من تجربته هذه؟

جـ. استنتج صقر أنّ: "معامل التمدّد الطولي لمادّة السلك (B) أكبر منه لمادّة السلك (A)". أُصدر حُكمًا على صحّة استنتاجه بناءً على تجربته.

4. **التفكير الناقد:** يُبيّن الشكل أدناه إناءً زجاجيًّا مغلقًا بغطاء فلزّي. حاولت هدى فتح الغطاء الفلزّي لكنّها وجدت صعوبة في ذلك. بناءً على ما تعلّمْتُه في هذا الدرس أقترح طريقة على هدى تمكّنها من فتح الغطاء الفلزّي بسهولة. أُفسّر إجابتي.

5. **أُصدرُ حُكمًا:** في أثناء دراستي وزميلتي باسمة هذا الدرس، قالت: "يجب أن يكون معامل تمدّد مادّة حشو الأسنان أكبر من معامل تمدّد مينا الأسنان؛ كي تثبت الحشوة في السن ولا تسقط". أُناقش صحّة قول باسمة.

الثلّاجات Refrigerators

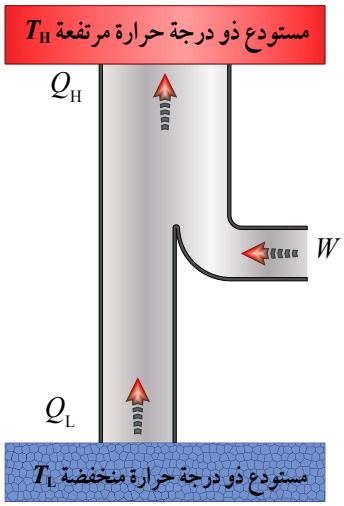
كيف تُبرّد الثلاجة الطعام؟ لماذا يكون الجزء الخلفي من الثلاجة ساخنًا؟

يعتمد مبدأ عمل الثلّاجة على بذل شغل لنقل كمّية من الطاقة من داخل الثلّاجة (منطقة ذات درجة حرارة منخفضة T_L) إلى خارجها (منطقة ذات درجة حرارة مرتفعة T_H)، على نحو ما هو موضّح في الشكل المجاور؛ إذ يبذل محرّك ضاغط كهربائي (Electric compressor motor) شغلًا لضغط غاز التبريد الذي يتدفّق داخل أنابيب موجودة في الثلّاجة.

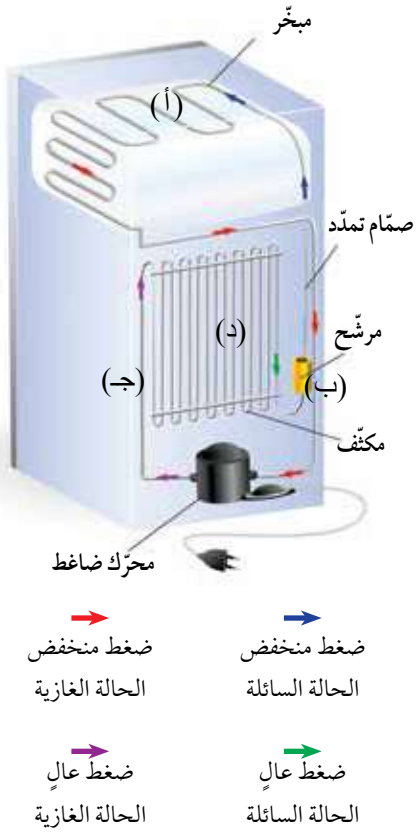
تتكوّن عملية التبريد من أربع مراحل؛ ففي البداية تكون درجة حرارة سائل التبريد وضغطه منخفضين؛ إذ تكون درجة حرارته أقلّ من درجة حرارة الهواء داخل الثلّاجة؛ فيكتسب سائل التبريد طاقة من داخل الثلّاجة، ما يؤدّي إلى انخفاض درجة الحرارة داخلها، ورفع درجة حرارة سائل التبريد الذي يبدأ في الغليان (المرحلة أ). وتستمر عملية اكتساب الطاقة من داخل الثلاجة حتّى يتحوّل سائل التبريد كلّه إلى الحالة الغازية؛ إذ يدخل في الضاغط الذي يبذل شغلًا على الغاز فيُقلّل حجمه من دون حدوث أيّ تبادل حراري (عملية كاظمة)، في حين يزداد ضغطه وطاقته الداخلية (المرحلة ب). ثم يُنقل الغاز عبر الأنابيب إلى الأجزاء الخارجية من الثلّاجة؛ إذ يحدث اتّصال حراري مع هواء الغرفة (المحيط الخارجي) ذي درجة الحرارة الأقلّ، فيكتسب طاقة من الغاز، فيبرد الغاز ويتكاثف متحوّلًا إلى سائل (المرحلة جـ)، وفي أثناء عودة سائل التبريد مرّة أُخرى إلى الثلّاجة، يمرّ الغاز بصمّام تمدّد يكون عمله مشابهًا لعمل صمّام (كبسة) علبة مُلطّف الجو؛ إذ يتعرّض سائل التبريد لعملية تمدّد سريع في عملية حرارية كاظمة (أديباتية) عن طريق صمّام التمدّد، فيبرد وتقلّ طاقته الداخلية (المرحلة د)، بحيث تصبح مماثلة لطاقته الداخلية عند بدء العملية، وتتكرّر دورة سائل التبريد ما دامت درجة حرارة الهواء داخل الثلّاجة أكبر من درجة حرارته.

Heat pump

مضخة حرارية



تبذل الثلاجة شغلًا لنقل الطاقة من داخلها (T_L) إلى المحيط الخارجي (T_H).



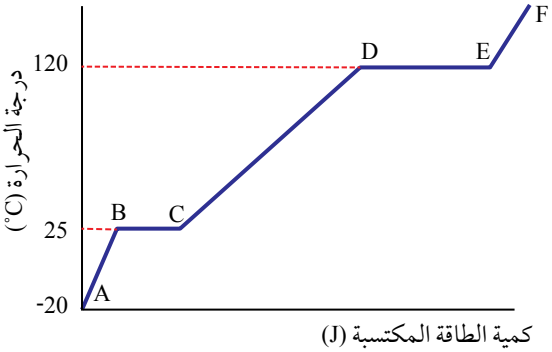
أبحث مستعينًا بمصادر المعرفة المناسبة، أبحثُ عن مبدأ عمل مكيّف هواء وآليّة عمله، وأُعدّ وأفراد مجموعتي تقريرًا مدعَّمًا بالصور يوضّح ذلك، وأُقارنه بمبدأ عمل الثلّاجة.

1. أضع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة لكلّ جملة ممّا يأتي:

1. وحدة قياس الحرارة حسب النظام الدولي للوحدات، هي:
   أ . السعر. ب. الكلفن.
   جـ. السلسيوس. د. الجول.

2. ما السعة الحرارية النوعية بوحدة (J/kg) لفلزّ كتلته (620 g) إذا لزم (15000 J) لرفع درجة حرارته من (20°C) إلى (85°C)؟
   أ. 3.72 ب. 231
   جـ. 15000 د. 372

يوضّح الشكل أدناه منحنى (درجة الحرارة – الطاقة المكتسبة) لكتلة محدّدة من مادّة ما في أثناء تزويدها بالطاقة. أستعين بهذا الشكل للإجابة عن الأسئلة (6 – 3):



3. أيّ أجزاء المنحنى البياني يُشير إلى زيادة في متوسّط الطاقة الحركية لجُسيمات المادّة؟
   أ. الأجزاء: AB، CD، EF.
   ب. الأجزاء: AB، BC، CD.
   جـ. الجزءان: BC، DE.
   د. الجزءان: AB، BC.

4. أيّ أجزاء المنحنى البياني يُشير إلى زيادة فقط، في مقدار الطاقة الكامنة لجُسيمات المادّة؟
   أ. الأجزاء: AB، CD، EF.
   ب. الأجزاء: AB، BC، CD.
   جـ. الجزآن: BC، DE.
   د. الجزآن: AB، CD.

5. ماذا تُسمّى كمّية الطاقة المكتسبة اللازمة للانتقال من النقطة (B) إلى النقطة (C)؟
   أ. السعة الحرارية النوعية.
   ب. الحرارة النوعية الكامنة للانصهار.
   جـ. الحرارة النوعية الكامنة للتصعيد.
   د. متوسّط الطاقة الحركية لجُسيمات المادّة.

6. ما مقدار درجة غليان المادّة؟
   أ. -20°C ب. 25°C
   جـ. 120°C د. 0°C

7. تسمّى درجة الحرارة التي تُستخدم عندها الطاقة المكتسبة جميعها لتحويل مادّة من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة:
   أ. درجة الانصهار.
   ب. الحرارة النوعية الكامنة للانصهار.
   جـ. درجة الغليان.
   د. الحرارة النوعية الكامنة للتصعيد.

8. ما العلاقة بين كمّية الطاقة التي يكتسبها (1 kg) ماء بدرجة حرارة (100°C) ليتحوّل إلى بخار عند درجة الحرارة نفسها، وكمّية الطاقة التي تفقدها الكتلة نفسها عندما تتحوّل من بخار بدرجة حرارة (100°C) إلى ماء سائل عند درجة الحرارة نفسها؟
   أ . الطاقة التي يكتسبها الماء، أكبر من الطاقة التي يفقدها البخار.
   ب. الطاقة التي يكتسبها الماء، أصغر من الطاقة التي يفقدها البخار.
   جـ. الطاقة التي يكتسبها الماء، تساوي الطاقة التي يفقدها البخار.
   د. لا يوجد فقد أو كسب للطاقة؛ لأنّ درجة الحرارة لم تتغيّر.

9. ما الذي يحدث لطاقة جُسيمات مادّة في أثناء تغيّر حالتها الفيزيائية من: السائلة إلى الغازية؟
أ. تزداد طاقتها الحركية فقط.
ب. تزداد طاقتها الكامنة فقط.
جـ. تزداد طاقتها الحركية وطاقتها الكامنة.
د. لا تتغيّر طاقتها الحركية ولا الكامنة؛ لأنّ درجة الحرارة لم تتغيّر.

10. جسمان: A وB، حدث اتّصال حراري بينهما ولم تتغيّر درجتا حرارتيهما. أستنتجُ أنّ الجسمين:
أ. مختلفان في الكتلة.
ب. لهما السعة الحرارية النوعية نفسها.
جـ. لهما الكتلة نفسها.
د. متّزنان حراريًّا.

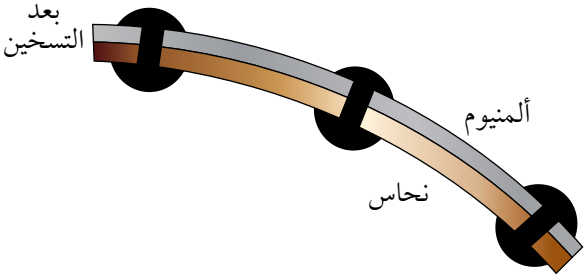
11. تُسمّى الطاقة التي تنتقل تلقائيًّا من الجسم الأعلى درجة حرارة إلى الجسم الأدنى درجة حرارة:
أ. الطاقة الحركية. ب. الطاقة الكامنة.
جـ. درجة الحرارة. د. الحرارة.

12. كمّية فيزيائية تُعدّ مقياسًا لمتوسّط الطاقة الحركية لجُسيمات المادّة، هي:
أ. الطاقة الحركية. ب. الطاقة الكامنة.
جـ. درجة الحرارة. د. الحرارة.

13. يُبذل شغل في المضخّات الحرارية على نظام؛ من أجل:
أ. نقل الطاقة في اتّجاه انتقالها التلقائي نفسه.
ب. نقل الطاقة بعكس اتّجاه انتقالها التلقائي.
جـ. نقل الطاقة من المناطق الأعلى درجة حرارة إلى المناطق الأدنى درجة حرارة.
د. وصوله إلى حالة الاتّزان الحراري مع المحيط الخارجي.

14. أيّ عمليات الديناميكا الحرارية الآتية تحدث لغاز وتبقى طاقته الداخلية ثابتة، على الرغم من حدوث تبادل للطاقة مع الغاز وبذل شغل؟
أ. الكاظمة . ب. عند حجم ثابت.
جـ. عند ضغط ثابت. د. عند درجة حرارة ثابتة.

15. يوضّح الشكل أدناه شريطًا ثنائي الفلزّ بعد تسخينه إلى درجة حرارة أكبر من درجة حرارة الغرفة. عند تبريد الشريط إلى ما دون درجة حرارة الغرفة بكثير فإنّه:
أ. يصبح مستقيمًا.
ب. يزداد انحناؤه نحو النحاس.
جـ. ينحني نحو الألمنيوم.
د. لا يتغيّر انحناؤه؛ إذ يبقى ثابتًا.



2. **أُفسّر** ما يأتي:
أ. الحرق الناتج من تعرّض شخص لكتلة معيّنة من بخار ماء بدرجة حرارة (100°C)، أشدّ من الحرق الناتج من تعرّضه لكتلة مساوية من الماء بدرجة حرارة (100°C).

ب. الكأس الزجاجية السميكة أكثر عرضة للكسر من الكأس الزجاجية غير السميكة، عند سكب شاي ساخن فيها.

3. **أُقارن:** كوبا ماء متماثلان، يحتوي الكوب الأوّل على (150 g) ماء بدرجة حرارة (40°C)، ويحتوي الكوب الثاني على (300 g) ماء بدرجة الحرارة نفسها. أُجيب عمّا يأتي:

أ. أُقارن بين الطاقة الحرارية للماء في الكوبين.

ب. أُقارن بين متوسّط الطاقة الحركية لجزيئات الماء في الكوبين.

4. **أُحلّل:** هل الموادّ التي ترتفع درجة حرارتها بسرعة وتبرد بسرعة، لها سَعة حرارية نوعية كبيرة أم صغيرة؟

5. **أتوقّع:** يثني أحمد بسرعة سلك نحاس طويلًا أسطواني الشكل بزاوية (90°)، فيُلاحظ ارتفاع درجة حرارة السلك عند موقع الثني. أتوقّع سبب ارتفاع درجة حرارة السلك عند هذا الموقع.

6. **أُحلّل:** في كلّ حالة ممّا يأتي، أُوضّح إذا كان يُبذَل شغل أم لا، وفي حالة بذل الشغل أُحدّد هل بذله الغاز أم بُذل عليه.

أ. ضغط الهواء في مضخّة تعمل بضغط القدم؛ عن طريق التأثير بقوّة في مكبسها.

ب. إطلاق غاز ثاني أكسيد الكربون من طفّاية حريق في الغلاف الجوي.

جـ. زيادة ضغط غاز في أسطوانة من دون تغيّر حجمه.

د. التمدّد السريع لمزيج الوقود والهواء المحترق في أسطوانة محرّك سيارة، ما يدفع مكبسها إلى الخارج.

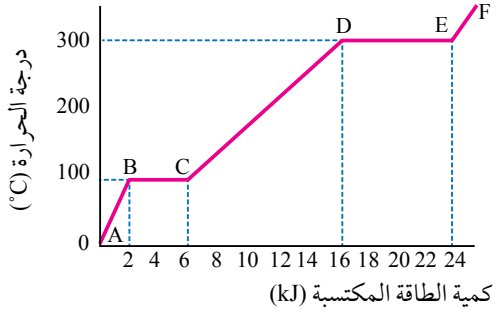
7. **أُحلّل:** مصدر حراري يعمل بالوقود. إذا كانت كمّية الوقود المتوافرة فيه تولّد طاقة مقدارها (1.25 MJ) عند حرقها، فأحسبُ كتلة الماء التي يُمكن تسخينها من درجة حرارة (8°C) إلى درجة حرارة (100°C) بافتراض اكتساب الماء الطاقة المتولّدة كلها، والسعة الحرارية النوعية للماء ($c_w = 4200\ J/kg.K$) تقريبًا.

8. **أحسبُ:** كرة ألمنيوم كتلتها (0.05 kg)، وُضِعت في مسعّر حراري يحتوي على ماء كتلته (0.15 kg) ودرجة حرارته (20°C)، فكانت درجة الحرارة النهائية للنظام عند الاتّزان الحراري (24°C). إذا علمتُ أنّ النظام مغلق ومعزول، وبإهمال الطاقة التي تكتسبها مادّة المسعّر، فأحسبُ مقدار ما يأتي:

أ. التغيّر في الطاقة الحرارية للماء.

ب. درجة حرارة كرة الألمنيوم الابتدائية.

9. **أُفسّر البيانات:** سُخّنت عيّنة من مادّة ما كتلتها (10 g)، فتغيّرت درجة حرارتها على نحو ما هو موضّح في الشكل. أُجيب عمّا يأتي:



أ. ما درجة انصهار هذه المادّة؟

ب. ما الحالة الفيزيائية للمادّة بين النقطتين (B) و(C)؟

جـ. أحسبُ الحرارة النوعية الكامنة للتصعيد لهذه المادّة.

10. يُستخدم في الثلاجات سائل تبريد لنقل الطاقة على شكل حرارة من داخلها إلى المحيط الخارجي، ويتحوّل سائل التبريد إلى الحالة الغازية نتيجة امتصاصه الطاقة من الثلّاجة. إذا دخل هذا الغاز إلى المكبس في أثناء دورته في الثلّاجة، فبذل عليه شغلًا مقداره (150 J) في أثناء ضغطه، وارتفعت طاقته الداخلية بمقدار (120 J)، فأُجيب عمّا يأتي:

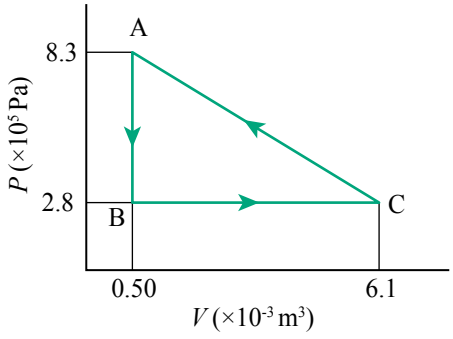
أ. ما مقدار الطاقة التي جرى تبادلها مع الغاز على شكل حرارة؟

ب. هل زُوّد الغاز بهذه الطاقة أم فقدها؟

11. **أُفسّر البيانات:** يوضّح الشكل أدناه منحنى (الضغط – الحجم) لنظام يتكوّن من عيّنة من غاز محصور تمرّ بعمليّات ديناميكا حرارية عدّة خلال دورة (ABCA) في نظام مغلق. أفترضُ أنّه لا يوجد طاقة متبادلة على شكل حرارة مع النظام في أثناء التغيير (العملية الحرارية) من B إلى C. أُجيب عمّا يأتي:

أ. أُحدّد عملية تحدث عند حجم ثابت.

ب. أحسبُ التغيّر في الطاقة الداخلية للنظام في أثناء العملية BC.



12. **أستخدمُ المتغيّرات:** عيّنة من غاز الأرغون محصورة في أسطوانة مزوّدة بمكبس. اكتسب الغاز طاقة مقدارها (1.75×10^5 J) على شكل حرارة، فازداد حجمه من (0.16 m^3) إلى (0.3 m^3) عند ضغط ثابت مقداره (2×10^5 Pa). أحسبُ مقدار ما يأتي:

أ. الشغل الذي بذله الغاز.

ب. التغيّر في الطاقة الداخلية لغاز الأرغون.

13. **أُحلّل:** أكتبُ القانون الأوّل في الديناميكا الحرارية لغاز مثالي لكلّ عملية من العمليّات الحرارية الآتية:

أ. العملية عند درجة حرارة ثابتة.

ب. العملية عند حجم ثابت.

جـ. العملية الكاظمة.

14. **التفكير الناقد:** تقول هناء إنّه يمكنها تبريد المطبخ في يوم حارّ عن طريق فتح باب الثلّاجة فيه. أُناقش صحّة قول هناء.

15. **أحسبُ:** يُستخدم سلك نحاس طوله (2 m) في مدفأة كهربائية. بالاستعانة بالبيانات الواردة في الجدول (3)، أحسبُ مقدار طول السلك عندما ترتفع درجة حرارته بمقدار (100°C).

الوحدة 5

الحركة التوافقية البسيطة

Simple Harmonic Motion

أتأمّل الصورة

برج تايبيه Taipei 101 أحد أطول المباني في العالم؛ يتكوّن من 101 طابق، ويبلغ ارتفاعه أكثر من 509 m ويقع في مدينة تايبيه في تايوان، في منطقة يمكن أن تشهد زلازل بقوّة 6 درجات، ورياحًا عاتية بسرعة تزيد على 200 km/h. استخدم المصمّمون كرة فلزّية كتلتها 660000 kg عُلّقت داخل البرج على ارتفاع 370 m تقريبًا عن سطح الأرض؛ لإخماد أيّ اهتزازات قد تحدث له والحفاظ على ثباته.

كيف تعمل الكرة على إخماد الاهتزازات التي قد يتعرّض لها البرج، عند حدوث الزلازل والأعاصير؟

الفكرة العامّة:

تتحرّك الأجسام من حولنا بأشكال مختلفة؛ منها ما يُسمّى الحركة التوافقية البسيطة، إذ يتذبذب أو يهتز الجسم فيها حول موقع اتّزانه. ولهذه الحركة خصائص متعدّدة، وهي ذات أهمّية كبيرة ولها تطبيقات كثيرة ومتنوّعة في حياتنا اليومية.

الدرس الأول: خصائص الحركة التوافقية البسيطة

الفكرة الرئيسة: تتميّز الحركة التوافقية البسيطة بأنّها حركة تذبذبية يتناسب فيها تسارع الجسم طرديًّا مع إزاحته من موقع الاتّزان، ويكون اتّجاهه دائمًا باتّجاه موقع الاتّزان.

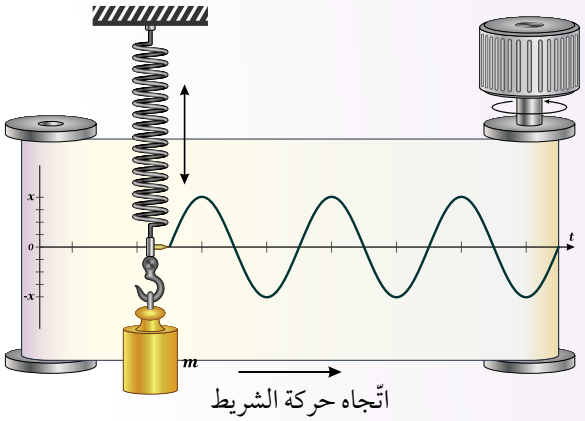
الدرس الثاني: تطبيقات الحركة التوافقية البسيطة

الفكرة الرئيسة: الحركة التوافقية البسيطة لها تطبيقات كثيرة، ولها أهمّية في حياتنا اليومية، مثل البندول البسيط والآلات الموسيقية وغيرها.

دراسة الحركة التذبذبية لجسم معلّق في نابض

الموادّ والأدوات: نابض، حامل فلزي، شريط ورقي، قلم سائل، أسطوانة عدد (2)، أجسام ذات كُتَل مختلفة.

إرشادات السلامة: الحذر من سقوط الأجسام والأدوات على القدمين.



خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أُنفّذ الخطوات الآتية:

1. أُثبّت طرف النابض العلوي بالحامل الفلزي، وأُثبّت القلم عند الطرف السفلي للنابض، على أن يلامس شريطًا ورقيًّا قابلًا للسحب باتّجاه أفقي بين أسطوانتين على نحو ما يظهر في الشكل.
2. أُعلّق بطرف النابض السفلي جسمًا كتلته m وأتركه حتى يتّزن عند نقطة تُسمّى موقع الاتّزان ($x = 0$) وأرسمُ محورًا أفقيًّا يمرّ بها يُمثّل زمن الحركة (t) .
3. أسحبُ الجسم المعلّق بالنابض رأسيًّا إلى أسفل (مسافة 5 cm مثلًا) وأتركه يتذبذب بالتزامن مع سحب الشريط الورقي بسرعة ثابتة، من قِبَل أحد أفراد مجموعتي، ثم أرسم محورًا رأسيًّا يُمثّل الإزاحة (x) بعد الانتهاء من سحب الشريط.
4. **أُلاحظ** الشكل الذي رسمه القلم على الشريط في أثناء اهتزاز الجسم في الخطوة السابقة.
5. **أُقارن:** أُكرّر الخطوات (4-2) مستخدمًا جسمًا آخر ذا كتلة مختلفة (m')، وأُلاحظ الفرق بين شكل المنحنى الناتج وشكله في الخطوة (3).

التحليل والاستنتاج:

1. **أُفسّر:** ما سبب اهتزاز الجسم المعلّق بالنابض؟
2. **أُحلّل:** أصف المنحنيات التي رسمها القلم على الشريط الورقي.
3. **أُحلّل:** أُحدّد على المنحنى الناتج كلًّا من: ذبذبة كاملة، الزمن الدوري، سَعة الذبذبة.
4. **أُقارن** سَعة الذبذبة (x) عند استخدام كل من الكتلتين. هل تعتمد سَعة الذبذبة على كتلة الجسم المعلّق؟
5. **أتوقّع:** إذا استخدمت نابضًا آخر مختلفًا في مرونته عن النابض السابق وكرّرت التجربة، فهل ستتغيّر النتائج؟
6. **أُفسّر** تناقص سَعة الذبذبة مع الزمن.

الدرس 1

خصائص الحركة التوافقية البسيطة
Properties of Simple Harmonic Motion

الفكرة الرئيسة:

تتميّز الحركة التوافقية البسيطة بأنّها حركة تذبذبية، يتناسب فيها تسارع الجسم طرديًّا مع إزاحته عن موقع الاتّزان، ويكون دائمًا باتجاه موقع الاتّزان.

نتاجات التعلّم:

- أصف الحركة التوافقية البسيطة، وأُعبّر عن شرط الحركة التوافقية البسيطة بمعادلة.
- أُفسّر عددًا من الظواهر والمشاهدات اليومية، المتعلّقة بالحركة التوافقية البسيطة.
- أُطبّق المعادلات الخاصة بالحركة التوافقية البسيطة، في حلّ مسائل حسابية.

المفاهيم والمصطلحات:

الحركة التذبذبية	Oscillatory Motion
القوّة المعيدة	Restoring Force
الحركة التوافقية البسيطة	Simple Harmonic Motion
التردّد الزاوي	Angular Frequency
زاوية الطور	Phase Angle
ثابت الطور	Phase Constant

الحركة الدورية Periodic Motion

تتحرّك الأجسام بأشكال مختلفة، ونشاهد بعضًا منها في حياتنا اليومية. فمنها ما يتذبذب (يهتزّ) ذهابًا وإيابًا حول موقع ثابت؛ مثل حركة بندول الساعة من جهة إلى أخرى، واهتزاز أوتار بعض الآلات الموسيقية، ومنها ما يدور حول محور؛ مثل دوران العجلة حول محورها، ومنها ما يدور حول مركز دوران ما؛ مثل حركة الكواكب حول الشمس. هذه الأشكال من الحركة تُسمّى **حركة دورية** Periodic motion وهي الحركة التي تُكرّر نفسها على المسار نفسه في فترات زمنية متساوية، ويوجد نوع خاص من الحركة الدورية يُسمّى **الحركة التذبذبية (الاهتزازية) Oscillatory motion**، وهي حركة دورية تُكرّر نفسها ذهابًا وإيابًا على المسار نفسه في فترات زمنية متساوية حول موقع الاتّزان (محصلة القوى عند هذا الموقع تساوي صفرًا)؛ مثل: تذبذب البندول البسيط وحركة الأرجوحة، أنظرُ إلى الشكل (1)، واهتزاز وتر آلة موسيقية، وتذبذب جُسيمات المادة الصلبة وغيرها. والحركة التذبذبية حركة دورية، ولكن ليس كلّ حركة دورية هي حركة تذبذبية؛ فمثلًا، حركة الكواكب حول الشمس حركة دورية ولكنّها ليست تذبذبية. وتُشكّل دراسة الحركة التذبذبية الأساس النظري لدراسة الموجات الميكانيكية التي سأدرسها لاحقًا.

✓ **أتحقّق:** ما الفرق بين الحركة التذبذبية والحركة الدورية؟

الشكل (1): الحركة التذبذبية لأرجوحة.

وصف الحركة التوافقية البسيطة
Describing Simple Harmonic Motion

لدراسة الحركة التوافقية البسيطة؛ أفترض أنّ لدينا نابضًا مهمل الكتلة مثبّتًا من طرف، في حين يتّصل الطرف الآخر بجسم كتلته (m) يتحرّك على سطح أفقي أملس على نحو ما يظهر في الشكل (2)، إذ تُعدّ هذه الحالة مثالًا نموذجيًّا للحركة التوافقية البسيطة. والموقع الذي تكون فيه القوّة المحصّلة المؤثّرة في الجسم تساوي صفرًا يُسمّى موقع الاتّزان ($x = 0$)، وتُقاس إزاحة الجسم ($\Delta x = x$) خلال الحركة التذبذبية من موقع الاتّزان، أنظرُ الشكل (2/ أ). وعند موقع الاتّزان؛ فإنّ إزاحة الجسم تساوي صفرًا، واستطالة النابض (أو انضغاطه) تساوي صفرًا.

إذا أُزيح الجسم عن موقع الاتّزان سواء إلى اليمين (استطالة) أو إلى اليسار (انضغاط)؛ فإنّ النابض يؤثّر دائمًا بقوّة في الجسم لإعادته إلى موقع الاتّزان تُسمّى **القوّة المُعيدة (*F*) Restoring force**، وتُعرف بأنّها القوّة التي تؤثّر في الجسم المهتز لإعادته إلى موقع الاتّزان، وتتناسب طرديًّا مع إزاحة الجسم (x) ويكون اتّجاهها دائمًا باتّجاه موقع الاتّزان بعكس اتّجاه الإزاحة، ويُعبَّرُ عن القوّة المُعيدة –في حالة حركة الجسم المتّصل بنابض– بالعلاقة الآتية:

$$F = - k\, x$$

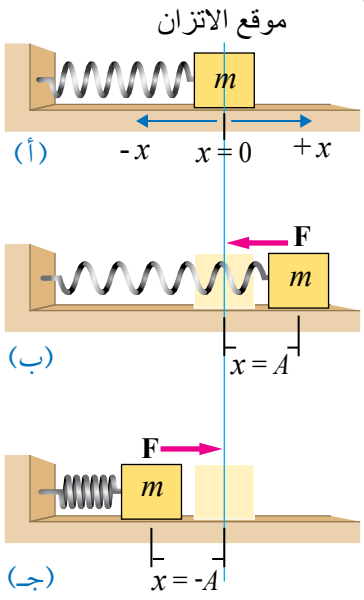
وتُعرف هذه العلاقة بقانون هوك حيث:

k: ثابت النابض ووحدة قياسه في النظام الدولي للوحدات N/m.

x: إزاحة الجسم من موقع الاتّزان.

وتدلّ الإشارة السالبة في قانون هوك، على أنّ اتّجاه القوّة المُعيدة يكون دائمًا باتجاه معاكس لإزاحة الجسم ونحو موقع الاتّزان ($x = 0$).

عند سحب الجسم نحو اليمين ثم تركه فإنّه يتذبذب حول موقع الاتّزان، ويكون الجسم في الموقع المبيّن في الشكل (2/ ب) عند أقصى إزاحة ($x = A$)؛ وتُسمّى أقصى إزاحة يتحرّكها الجسم من موقع الاتّزان سَعة الذبذبة (A) Amplitude. أمّا القوّة المُعيدة F والتسارع a فيكون لكلّ منهما قيمة عظمى عند ذلك الموقع، واتّجاه كلّ منهما نحو موقع الاتّزان (باتجاه محور $-x$)، في حين مقدار السرعة (v) يساوي



الشكل (2): جسم متّصل بنابض يتذبذب على سطح أفقي أملس.

(أ) الجسم عند موقع الاتزان.

(ب) النابض في حالة استطالة.

(جـ) النابض في حالة انضغاط.

أبحثُ

قانون هوك له تطبيقات متنوّعة في مجالات مختلفة، أبحثُ في مصادر المعرفة المتاحة والموثوقة عن قانون هوك والتطبيقات العملية له، وأعدّ عرضًا تقديميًّا أعرضه على زملائي/ زميلاتي في الصف.

صفرًا؛ إذ يسكن الجسم لحظيًّا عند الموقع المبين في ذلك الشكل.

وفي أثناء عودة الجسم لليسار؛ فإنّ مقدار السرعة يزداد ليصل قيمة عظمى عند مروره بموقع الاتّزان، في حين يقلّ مقدار كلّ من الإزاحة، والقوّة المُعيدة، والتسارع ليصبح كل منها صفرًا لحظة مروره بموقع الاتّزان، ويستمر الجسم في الحركة باتّجاه اليسار مبتعدًا عن موقع الاتّزان؛ إذ يقل مقدار سرعته تدريجيًّا ليصبح صفرًا عند أقصى إزاحة ($x = -A$)، أنظرُ الشكل (2/ جـ)، في حين يزداد مقدار كلّ من الإزاحة، والقوّة المُعيدة، والتسارع تدريجيًّا حتى يصل كلّ منها إلى قيمته العظمى عند ($x = -A$)، واتّجاه كلّ من القوّة المُعيدة والتسارع يكون باتّجاه موقع الاتّزان (نحو محور $+x$)، وتستمر هذه الحركة التذبذبية في غياب قوى الاحتكاك، في حين تتلاشى تدريجيًّا إلى أن يتوقّف الجسم عن التذبذب بعد مدّة زمنية في حال وجود قوى احتكاك. تُسمّى الحركة التذبذبية **حركة توافقية بسيطة** **Simple harmonic motion (SHM)** إذا حقّقت شرطين؛ هما:

- أنْ يتناسب مقدار القوّة المُعيدة طرديًّا مع إزاحة الجسم من موقع الاتّزان.
- أنْ يكون اتّجاه القوّة المُعيدة باتّجاه موقع الاتّزان دائمًا ومعاكسًا لاتّجاه الإزاحة.

تُحقّق العلاقة:

$$F \propto -x$$

الشرطين معًا. ونظرًا إلى أنّ التسارع يكون باتجاه القوّة المحصّلة المؤثّرة في الجسم؛ فإنّ التسارع a أيضًا يكون بعكس اتّجاه الإزاحة، ويتناسب مقداره طرديًّا مع مقدار الإزاحة؛ أي إنّ:

$$a \propto -x .$$

✓ **أتحقّق:** ما العوامل التي تعتمد عليها القوّة المُعيدة، في الحركة التوافقية البسيطة لجسم يتّصل بنابض على سطح أفقي أملس؟

أفكّر: ما الكمّيتان من الكمّيات المتّجهة الآتية في الحركة التوافقية البسيطة: (الإزاحة، القوّة المُعيدة، السرعة، التسارع) اللتان يكون اتّجاههما دائمًا:

أ. متعاكسًا؟

ب. بالاتّجاه نفسه؟

أُصمّم باستخدام برنامج السكراتش (Scratch) عرضًا يوضّح كيف تتغيّر كلّ من السرعة والتسارع والقوّة المُعيدة والإزاحة في الحركة التوافقية البسيطة، مثل حركة جسم يتصل بنابض، ثمّ أعرضه على زملائي/ زميلاتي في الصف.

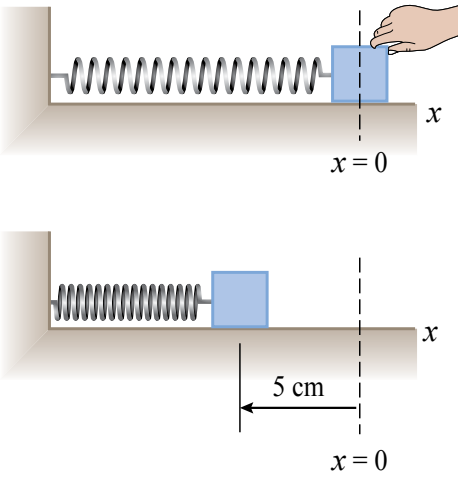
المثال 1

ضُغِط جسم متّصل بنابض موضوع على سطح أفقي أملس إلى نقطة تبعد مسافة 5 cm (أقصى إزاحة) عن موقع اتّزانه على نحو ما هو مبيَن في الشكل (3)، وتُرِك يتذبذب ذهابًا وإيابًا. فإذا كان مقدار القوّة المُعيدة عند تلك النقطة 4 N أجيب عمّا يأتي.

أ . ما مقدار سَعة الذبذبة؟

ب. أحسبُ ثابت النابض.

جـ. أحسبُ القوّة المُعيدة وأُفسّر إشارتها؛ عندما يُصبح الجسم على بعد 2 cm عن موقع الاتّزان في أثناء عودته.



الشكل (3): تذبذب جسم متّصل بنابض أفقيًّا على سطح أملس.

المعطيات:

$x = -5\ \text{cm} = -0.05\ \text{m}\ ,\quad F = +4\ \text{N}$

المطلوب:

$A = ?\ ,\quad k = ?\ ,\quad F_{2\text{cm}} = ?$

الحلّ:

أ . سَعة الذبذبة هي أقصى إزاحة عن موقع الاتّزان وتساوي: $A = 0.05\ \text{m}$

ب. ثابت النابض k:

$F = -k\,x\ ,\quad x = -A = -0.05\ \text{m}$

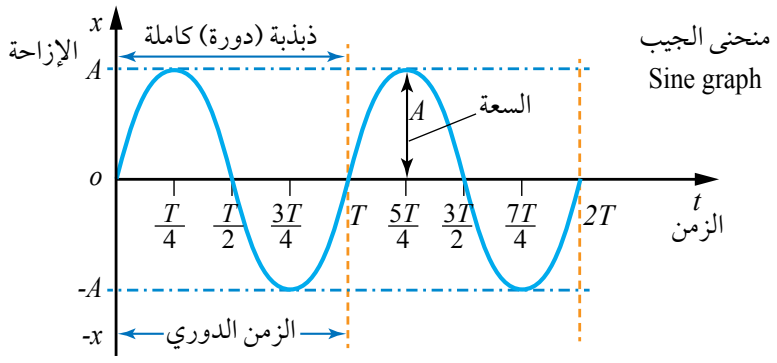
$4 = -k \times (-0.05)$

$k = 80\ \text{N/m}$

جـ. القوّة المُعيدة عند $x = -2\ \text{cm}$:

$F_{2\text{cm}} = -k\,x = -80 \times (-0.02) = 1.6\ \text{N}$

تعني الإشارة الموجبة للقوّة، أنّ اتّجاهها معاكس لاتجاه الإزاحة في اتجاه محور(+x).



الشكل (4): تغيّر الإزاحة (x) مع الزمن (t) للحركة التوافقية البسيطة بدءًا من موقع ($x = 0$) و ($t = 0$).

الإزاحة والتردّد الزاوي في الحركة التوافقية البسيطة

Displacement and Angular Frequency in SHM

يُمثّل الشكل (4) العلاقة البيانية لتغيّر الإزاحة مع الزمن لتذبذب جسم يتّصل بنابض على نحو ما يظهر في الشكل (2)، بدءًا من الزمن ($t = 0$)؛ إذ بدأ الجسم حركته من موقع الاتّزان ($x = 0$). وهذا المنحنى هو اقتران جيبي والذي ربّما لاحظت منحنًى شبيهًا له عند إجراء النشاط التمهيدي في بداية الوحدة. ولمزيد من المناقشات للحركة التوافقية البسيطة سنراجع تعريف بعض المصطلحات المهمة التي سبق أن درستها في صفوف سابقة.

يطلق مصطلح الدورة Cycle على الذبذبة الكاملة، وهي الحركة التي يُحدثها الجسم المهتزّ في زمن معيّن؛ كي يمرّ بالنقطة الواحدة في مسار حركته مرّتين متتاليتين في الاتّجاه نفسه. أمّا الزمن الدوري Period (T) فيُعرف بأنّه الزمن اللازم لإكمال الجسم دورة كاملة، في حين يُعرَّف التردّد Frequency (f) بأنّه عدد الدورات التي يُحدثها الجسم في وحدة الزمن ويقاس بوحدة (s^{-1}) في النظام الدولي للوحدات، وتُعرف بوحدة هيرتز (Hz)، ويتناسب التردّد f عكسيًّا مع الزمن الدوري T حسب العلاقة:

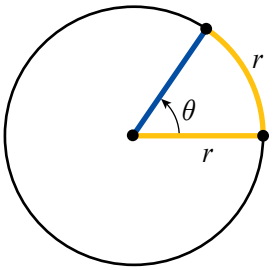
$$T = \frac{1}{f}$$

وأمّا الراديان Radian (ويُرمز إليه بالرمز rad) فهو زاوية مركزية في دائرة تقابل قوسًا طوله مساوٍ لطول نصف قطر الدائرة، على نحو ما هو مبيَّن في الشكل (5)؛ إذ إنّ:

$$360^{\circ} = 2\pi \text{ rad}$$

$$1 \text{ rad} = \frac{180^{\circ}}{\pi} = 57.29578^{\circ}$$

$\theta = 1$ radian (rad)
$= 57.29578^{\circ}$



الشكل (5): تمثيل الراديان بالدرجات.

كم تعادل زاوية مقدارها 1.57 rad بوحدة درجة؟

الربط بالرياضيات

يُعرّف العدد π أو ما يُسمّى النسبة التقريبية، بأنّه النسبة بين محيط الدائرة وقطرها ($\pi = \frac{2\pi r}{2r}$)، وهو ثابت رياضي يُستخدم في الرياضيات والفيزياء. وأول من أطلق على النسبة التقريبية اسم (باي) عالم الرياضيات وليام جونز عام 1706.

العلاقة بين الحركة الدائرية والحركة التوافقية البسيطة

تُستخدم في حياتنا الكثير من الأجهزة التي تظهر فيها علاقة بين الحركة التوافقية والحركة الدائرية؛ مثل مكبس محرّك السيارة الذي تتحوّل فيه الحركة الاهتزازية إلى الأعلى والأسفل إلى حركة دورانية في عجلات السيارة.

ولفهم أكبر للعلاقة بين الكمّيات الزاويّة (في الحركة الدائرية المنتظمة) والحركة التوافقية البسيطة؛ ثُبّتت كرة على طرف قرص نصف قطره A يدور في مستوى رأسي، وتُسقَط أشعّة ضوئية متوازية من جانب القرص الأيسر باتّجاه موازٍ لسطحه على نحو ما يظهر في الشكل (6)، على أن ينطبع ظل الكرة على الشاشة الموضوعة على يمين القرص. في أثناء دوران القرص تتحرّك الكرة على محيط الدائرة في حين يتحرّك ظلّ الكرة على الشاشة إلى الأعلى وإلى الأسفل حول موقع النقطة D، وحركة ظلّ الكرة تماثل تمامًا الحركة التوافقية البسيطة لجسم متّصل بنابض بدأ بالتذبذب من موقع الاتّزان.

عند الزمن $(t = 0)$ تكون الكرة في الموقع C وظلّها في الموقع D على الشاشة والذي يُنظر إليه بوصفه موقع اتّزان، وبعد فترة زمنية (t) تصبح الكرة عند الموقع P وظلّها عند الموقع E.

تُعرّف **السرعة الزاويّة** **Angular speed (ω)** لدوران القرص بأنّها الزاوية θ التي يمسحها نصف قطر القرص في وحدة الزمن ويُعبَّر عنها بالعلاقة:

$$\omega = \frac{\theta}{t} \Rightarrow \theta = \omega t$$

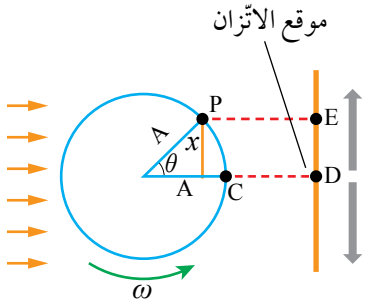
إذ تُقاس الزاوية θ بوحدة (rad) والزمن بوحدة (s) والسرعة الزاويّة ω بوحدة rad/s.

وتمثّل المسافة DE على الشاشة إزاحة ظلّ الكرة (x) من موقع الاتّزان في الزمن (t)، وبتطبيق قانون الجيب في المثلثات على حركة الكرة؛ فإنّ الإزاحة (x) بالنسبة إلى الزمن يُعبَّر عنها بالعلاقة:

$$x(t) = A \sin\theta = A \sin \omega t$$

حيث A: سَعة الذبذبة وهي أقصى إزاحة لظلّ الكرة عن موقع الاتّزان سواء في الاتّجاه الموجب أو السالب.

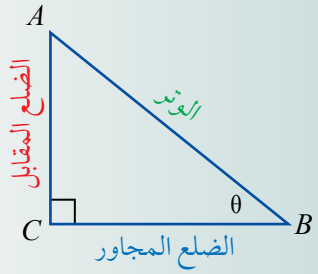
ω: التردّد الزاوي للحركة التوافقية البسيطة لظلّ الكرة وهو نفسه السرعة الزاويّة لدوران القرص ω. ويعرّف **التردّد الزاوي** **Angular frequency (ω)**



الشكل (6): العلاقة بين الحركة التوافقية والحركة الدائرية.

الربط بالرياضيات

بعض الاقترانات أو النسب المثلّثية في المثلّث القائم الزاوية:



$$\sin\theta = \frac{\text{المقابل}}{\text{الوتر}}$$

$$\cos\theta = \frac{\text{المجاور}}{\text{الوتر}}$$

$$\tan\theta = \frac{\text{المقابل}}{\text{المجاور}}$$

بأنّه عدد الدورات في وحدة الزمن مضروبًا في (2π)، ويقاس بوحدة rad/s، ويُعبَّر عنه بالعلاقة الآتية:

$$\omega = 2\pi f \quad , \quad 1 \text{ cycle} = (2\pi) \text{ rad}$$

ونظرًا إلى أنّ:

$$T = \frac{1}{f}$$

فإنّ التردّد الزاويّ يمكن كتابته بالصورة الآتية:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

حيث ω: التردّد الزاوي.

T: الزمن الدوري.

f: التردّد.

وبوجهٍ عام، تنطبق المعادلة:

$$x(t) = A\sin\theta = A\sin(\omega t)$$

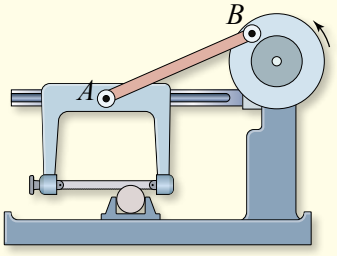
على أيّ حركة توافقية بسيطة تبدأ من موقع الاتّزان عند الزمن $(t = 0)$، وتُمثّل بيانيًّا باقتران الجيب على نحو ما هو مبيَّن في الشكل (4)، أمّا إذا بدأت الحركة التوافقية عند الزمن $(t = 0)$ ولكن من أقصى إزاحة (A)؛ فإنّ تغيّر الإزاحة مع الزمن يُمثّل بيانيًّا باقتران جيب التمام على نحو ما يظهر في الشكل (7)، لتصبح معادلة تغيّر الإزاحة مع الزمن:

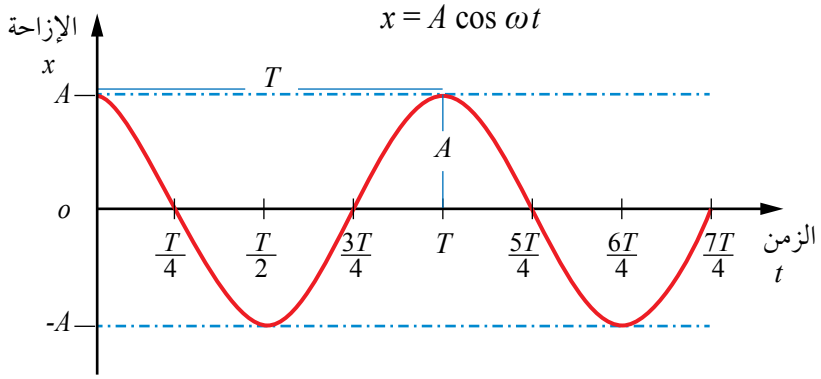
$$x(t) = A\cos\theta = A\cos(\omega t)$$

وأيّ من المعادلتين السابقتين (الجيب وجيب التمام) لا تُعدّ صيغة عامّة لمعادلة الحركة التوافقيّة البسيطة بل حالة خاصّة، وللتوصّل إلى المعادلة العامّة؛ يجب إدخال مفهومَي زاوية الطور وثابت الطور.

الربط بالحياة

للحركة التوافقية البسيطة تطبيقات في المجال الصناعي، منها الأدوات التي تحوّل الحركة الدائرية إلى حركة تذبذبية أو العكس. ومثال على ذلك منشار القطع الكهربائي الذي يعمل عن طريق وصله بمحرك كهربائي يتّصل بقرص ويتحرّك حركة دائرية بسرعة زاويّة ثابتة؛ لتتحوّل حركته الدائرية إلى حركة تذبذبية ذهابًا وإيابًا في المنشار على نحو ما يظهر في الشكل.





الشكل (7): منحنى جيب التمام لتغيّر الإزاحة x مع الزمن t للحركة التوافقية البسيطة، بدءًا من أقصى إزاحة مقارنة بمنحنى الجيب، حيث بدأت الحركة من موقع الاتّزان.

المثال 2

يتّصل جسم بطرف نابض موضوع على سطح أفقي أملس، سُحِب الجسم إلى أقصى إزاحة عن موقع الاتّزان على نحو ما يظهر في الشكل (8)، ثم تُرِك ليبدأ بالتذبذب عند الزمن ($t = 0$)، فإذا علمتُ أنّ معادلة تغيّر الإزاحة مع الزمن:

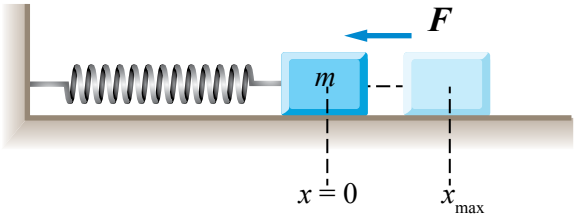
$$x(t) = 0.05 \cos\left(\frac{\pi}{2}t\right)$$

إذ تُقاس الإزاحة بوحدة (m) والزمن بوحدة (s). أجد:

أ. السَّعة والتردّد الزاوي.

ب. الزمن الدوري والتردّد.

جـ. الإزاحة بعد نصف ثانية من بدء الحركة.



الشكل (8): جسم متّصل بنابض يتذبذب على سطح أفقي بعد سحبه إلى أقصى إزاحة.

المعطيات: $x(t) = 0.05 \cos\left(\frac{\pi}{2}t\right)$, $t = 0.5$ s

المطلوب: $A = ?$, $\omega = ?$, $T = ?$, $x(0.5) = ?$, $f = ?$

الحلّ:

أ. عن طريق مقارنة معادلتَي تغيّر الإزاحة بالزمن:

$$x(t) = A \cos(\omega t)$$

$$x(t) = 0.05 \cos\left(\frac{\pi}{2}t\right)$$

أجد أنّ: السعة: $A = 0.05$ m

التردّد الزاوي: $\omega = \frac{\pi}{2}$ rad.s^{-1}

ب. الزمن الدوري:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$\frac{\pi}{2} = \frac{2\pi}{T} \Rightarrow T = 4 \text{ s}$$

التردّد:

$$T = \frac{1}{f} \Rightarrow f = \frac{1}{T} = \frac{1}{4} \text{ s}^{-1}$$

جـ. الإزاحة بعد نصف ثانية:

أجد أولًا الزاوية (ωt) بوحدة الدرجة بافتراض أنّ (π rad = 180°):

$$(\omega\, t) = \left(\frac{\pi}{2} \times 0.5\right) \text{rad} = 0.25\, \pi \text{ rad} = 0.25\, \pi \times \frac{180^\circ}{\pi} = 45^\circ$$

أُعوّض مقدار الزاوية ($\omega t = 45^\circ$) في معادلة تغيّر الإزاحة مع الزمن:

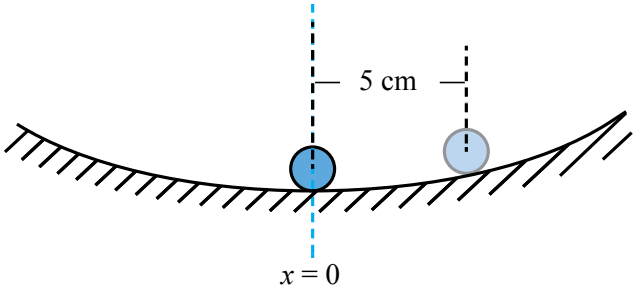
$$x(t) = 0.05 \cos(\omega\, t) = 0.05 \cos 45^\circ = 0.05 \times 0.7 = 0.035 \text{ m} = 3.5 \text{ cm}$$

المثال 3

تتذبذب كرة بحركة توافقية بسيطة في وعاء أملس مقعّر على نحو ما يظهر في الشكل (9)، فإذا بدأت الحركة من موقع الاتّزان ($x = 0$) عند الزمن ($t = 0$) وكانت سعة الذبذبة 5 cm والزمن الدوري 860 ms، أحسبُ:

أ . التردّد الزاوي.

ب. إزاحة الكرة بعد مرور 250 ms من بدء حركته.



الشكل (9): تذبذب كرة في وعاء مقعّر.

المعطيات: $A = 5\text{ cm} = 0.05\text{ m}$ ، $T = 860\text{ ms} = 0.86\text{ s}$ ، $t = 250\text{ ms} = 0.25\text{ s}$

المطلوب: $\omega = ?$ ، $x = ?$

الحلّ:

أ. التردّد الزاوي: $\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{0.86} = 2.33\,\pi = 7.31\text{ rad/s}$

ب. نستخدم معادلة الجيب؛ لأنّ الحركة التذبذبية بدأت من موقع الاتّزان على النحو الآتي:

$$x(t) = A \sin(\omega t) = 0.05 \sin(2.33\,\pi \times 0.25\text{ rad})$$

$$= 0.05 \sin\left(0.58\,\pi \times \frac{180^\circ}{\pi}\right) = 0.05 \sin(104.4)^\circ = 0.05 \times 0.96 = 0.048\text{ m}$$

تمرين

يتحرّك جسم حركة توافقية بسيطة باتّجاه أفقي؛ بحيث يُكمل دورة واحدة في زمن 3 s. فإذا بدأ الجسم الحركة عند الزمن ($t = 0$) من موقع الاتّزان باتجاه محور $+x$ وكانت سَعة الذبذبة 4 cm؛ أُجيبُ عمّا يأتي:

أ . أكتبُ معادلة تغيّر الإزاحة مع الزمن.

ب. أحسبُ الإزاحة بعد مرور 0.6 s من بدء الحركة.

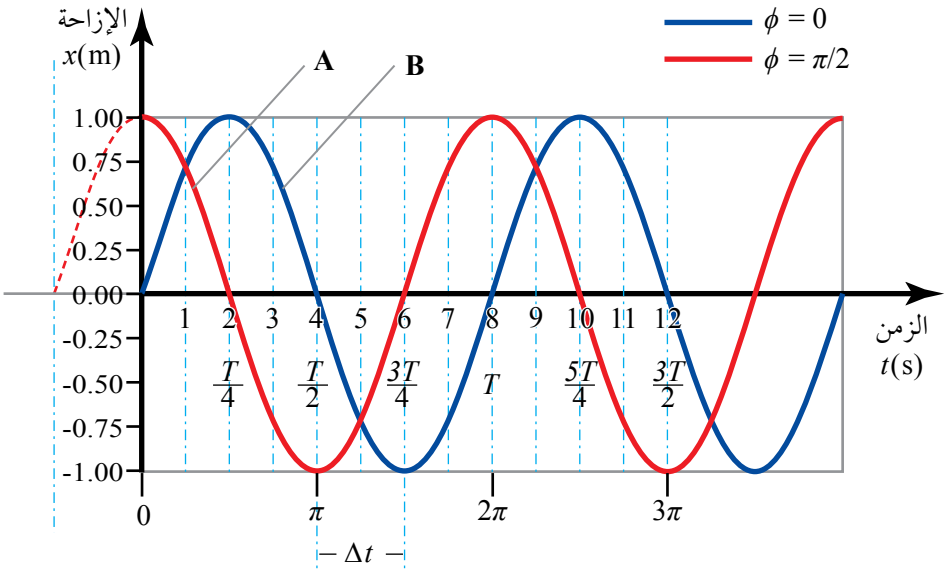
جـ. أرسمُ منحنى الإزاحة – الزمن لدورتين كاملتين.

فرق الطور في الحركة التوافقية البسيطة Phase Difference in SHM

أفترضُ أنّ لدينا نظامين (A,B) يتحرّك كلّ منهما حركة توافقية بسيطة؛ الزمن الدوري والسعة لكلّ منهما متساويان، مثل نظامَي (كتلة – نابض) متماثلين تُركا ليتحرّكا في الوقت نفسه ومن أقصى إزاحة بالاتّجاه نفسه، فإنّهما سيمرّان من موقع الاتّزان في الوقت نفسه، وسيصلان أقصى إزاحة في الوقت نفسه كذلك، عندئذٍ يقال إنّ فرق زاوية الطور بينهما يساوي صفرًا. فما المقصود بزاوية الطور؟

تُعرّف **زاوية الطور Phase angle** بأنّها الزاوية التي تُحدّد موقع الجسم عند أيّة لحظة زمنية (t) وتساوي $(\omega t + \phi)$، إذ تُمثّل ϕ **ثابت الطور Phase constant** ويعرّف بأنّه الزاوية التي تبدأ عندها الحركة؛ أي عند $t = 0$.

أفترضُ تحرّك أحد النابضين قبل الآخر بزمن معيّن (Δt) على نحو ما يظهر في الشكل (10)، ما يؤدّي إلى فرق في زاوية الطور بينهما؛ وهذا يعني أنّ النابضين لن يمرّا من موقع الاتّزان في الوقت نفسه ولن يصلا أقصى إزاحة في الوقت نفسه أيضًا، بسبب الاختلاف في زاوية الطور نتيجة للاختلاف المُفترض في زمن بدء الحركتين. هذا الفرق في الزمن (Δt) بين حركة النابضين يُكافئ فرقًا في زاوية الطور بين الحركتين



الشكل (10): نظامان في الحركة التوافقية البسيطة الفرق في زاوية الطور بينهما ثابت.

ما مقدار كل من السعة، والتردد لحركة كلّ من النابضين؟

مقدارها ($\omega\Delta t$) تقاس بوحدة راديان (rad) على النحو الآتي:

$$\omega\Delta t = \frac{2\pi}{T}\Delta t$$

بوجهٍ عامّ؛ يُعبَّر عن معادلة الإزاحة للحركة التوافقية البسيطة بالنسبة إلى الزمن بالعلاقة الآتية:

$$x(t) = A \sin(\omega t + \phi)$$

فمثلًا، إذا بدأ الجسم من أقصى إزاحة ($x = A$) عند ($t = 0$)؛ فإنّ

$$A = A \sin(0 + \phi) \Rightarrow \sin\phi = 1 \Rightarrow \phi = \frac{\pi}{2}$$

ومن ثمّ، فإنّ معادلة الحركة التوافقية البسيطة:

$$x(t) = A \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) = A \cos(\omega t)$$

باستخدام المعادلة أعلاه نستطيع حساب موقع الجسم بعد أي زمن بتعويض قيمة (t) في هذه المعادلة.

المثال 4

بناءً على المعلومات المبيّنة في الشكل (10) الذي يُمثّل منحنيَي (الإزاحة – الزمن) لحركة نابضين (A, B) أُجيب عمّا يأتي:

أ . أيّ المنحنيين يتقدّم على الآخر؟

ب. أحسبُ الفرق في زاوية الطور بين حركتَي النابضين.

الحلّ:

أ . المنحنى A يتقدّم على المنحنى B بربع دورة ($\frac{T}{4}$).

ب. يمكن إيجاد الفرق في زاوية الطور بطريقتين:

- إمّا من الشكل مباشرة؛ إذ فرق الزمن Δt يساوي ربع الزمن الدوري ($\frac{T}{4}$)، ونظرًا إلى أنّ كلّ دورة تعادل زاوية 2π بالتقدير الدائري؛ فإنّ الفرق في زاوية الطور يساوي:

$$\frac{2\pi}{4} = \frac{\pi}{2}$$

- وإمّا بتطبيق العلاقة:

$$\omega\Delta t = \frac{2\pi}{T}\Delta t = \frac{2\pi}{8} \times (6 - 4) = \pi/2$$

السرعة والتسارع في الحركة التوافقية البسيطة

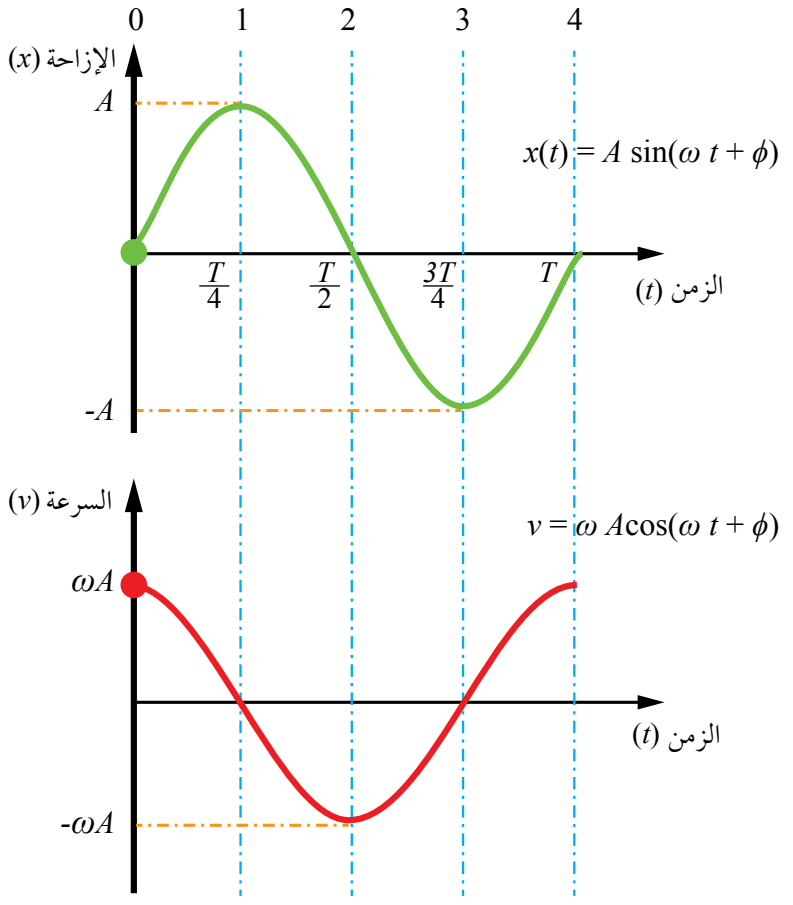
Velocity and Acceleration in SHM

بعد دراسة منحنى (الإزاحة – الزمن) للحركة التوافقية البسيطة، لجسم يتّصل بنابض وبدأ الحركة من موقع الاتّزان عند الزمن ($t = 0$)، يمكن استخدام ميل ذلك المنحنى للتوصّل إلى منحنى (السرعة – الزمن)، على نحو ما يظهر في الشكل (11) الذي يُمثّل منحنيات كلّ من الإزاحة والسرعة مع الزمن في الحركة التوافقية البسيطة.

عند دراسة هذين المنحنيين ألاحظ ما يأتي:

- للسرعةِ قِيَم عظمى عند النقاط التي تكون الإزاحة عندها صفرًا، أنظرُ الخطوط (0,2,4)، والسرعة تساوي صفرًا عند النقاط التي تكون للإزاحة عندها قِيَم قصوى، أنظرُ الخطوط (1,3).
- تردّد منحنيي الإزاحة والسرعة متساويان.

ونظرًا إلى إنّ الجسم بدأ الحركة من موقع الاتّزان ($x = 0$) عند الزمن ($t = 0$)؛



الشكل (11): تغيّر كلّ من الإزاحة، والسرعة مع الزمن في الحركة التوافقية البسيطة.

أُحدّد مواقع الجسم على منحنى (الإزاحة – الزمن) عندما يكون تسارعه صفرًا.

فإنّ

$$x(t) = A \sin(\omega t + \phi)$$

$$0 = A \sin(0 + \phi) \Rightarrow \sin\phi = 0 \Rightarrow \phi = 0$$

ومن ثمّ، يُعبَّر عن معادلة الإزاحة مع الزمن بالعلاقة:

$$x(t) = A \sin(\omega t)$$

سرعة الجسم عند أيّة لحظة (t) مثل سرعة النقطة الواقعة على الخط العمودي رقم (0) في منحنى (السرعة – الزمن) المبيّن في الشكل، يُعبَّر عنها بالعلاقة الآتية:

$$v(t) = \omega A \cos(\omega t)$$

وتصل السرعة إلى قيمتها العظمى عندما يكون: $\cos(\omega t) = 1$؛ أي إنّ:

$$v_{max} = \omega A$$

لذا؛ يمكن إعادة كتابة علاقة السرعة على النحو:

$$v(t) = v_{max} \cos(\omega t)$$

كذلك تسارع الجسم عند أيّة لحظة (t) يُعبَّر عنه بالعلاقة الآتية:

$$a(t) = -\omega^2 A \sin(\omega t) = -\omega^2 x$$

عندما $\sin(\omega t) = -1$ فإنّ قيمة التسارع تصبح قيمة عظمى وتعطى بالعلاقة:

$$a_{max} = \omega^2 A$$

ونظرًا إلى أنّ القوّة المُعيدة F هي القوّة المحصّلة المؤثّرة في الجسم المتّصل بالنابض؛ فإنّ الجسم سيكتسب تسارعًا حسب القانون الثاني لنيوتن:

$$F = ma = -kx$$

$$m(-\omega^2 x) = -kx$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

وبتعويض $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ في العلاقة $T = \frac{2\pi}{\omega}$ فإنّ الزمن الدوري T:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

حيث k: ثابت النابض.

m: كتلة الجسم المتصل بالنابض (بإهمال كتلة النابض نفسه).

أفكّر: أُحدّد النقطة على منحنى (الإزاحة - الزمن) في الشكل (11) التي تكون عندها:

- السرعة قيمة عظمى سالبة والتسارع يساوي صفرًا.
- السرعة تساوي صفرًا والتسارع قيمة عظمى موجبة.

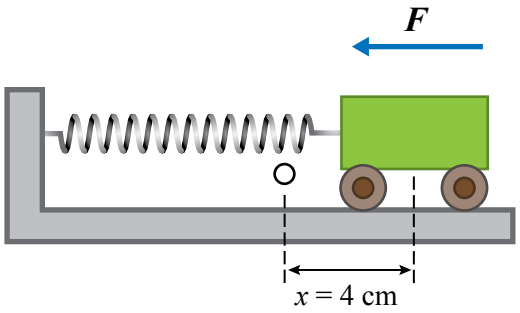
أفكّر: هل يتغيّر الزمن الدوري في نظام (كتلة - نابض) بتغيّر سَعة الذبذبة؟ أُوضّح ذلك.

المثال 5

عربة كتلتها 2 kg تتّصل بأحد طرفَي نابض موضوع على سطح أفقي أملس، في حين أنّ الطرف الآخر للنابض مثبّت في الجدار على نحو ما يظهر في الشكل (12)، سُحبت العربة إزاحة $x = +4$ cm عن موقع الاتّزان، ثم تُركت تتذبذب بدءًا من الزمن $(t = 0)$. فإذا كان ثابت النابض 32 N/m أُجيبُ عمّا يأتي:

أ . أحسبُ التردّد الزاوي.

ب. أكتبُ معادلات تغيّر كلّ من الإزاحة، والسرعة مع الزمن.



الشكل (12): عربة تتّصل بنابض سُحبت مسافة 4 cm وتُركت تتذبذب.

المعطيات:

$m = 2$ kg , $x = 4$ cm $= 0.04$ m , $k = 32$ N/m

المطلوب:

$\omega = ?$, $x(t) = ?$, $v(t) = ?$

الحلّ:

أ . التردّد الزاوي:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{32}{2}} = 4 \text{ rad/s}$$

ب. الجسم بدأ الحركة التوافقية عند $(t = 0)$ ومن أقصى إزاحة $x = A = +4$ cm، لذا فإنّ معادلة تغيّر الإزاحة مع الزمن:

$$x(t) = A \sin(\omega t + \phi)$$

$$A = A \sin(0 + \phi)$$

$$\Rightarrow \sin(\phi) = 1 \Rightarrow \phi = \frac{\pi}{2}$$

ومن ثمّ، فإنّ معادلة تغيّر الإزاحة مع الزمن يُعبَّر عنها بالعلاقة:

$$x(t) = 0.04 \sin(4t + \frac{\pi}{2})$$

ومعادلة تغيّر السرعة مع الزمن يُعبَّر عنها بالعلاقة:

$$v(t) = \omega A \cos(\omega t + \phi) = 0.16 \cos(4t + \frac{\pi}{2})$$

المثال 6

يتحرّك جسم حركة توافقية بسيطة حسب معادلة الإزاحة الآتية: $x(t) = 0.08 \sin (1.33\, t + \frac{\pi}{5})$

إذ تُقاس الإزاحة بوحدة (m) والزمن بوحدة (s). أجد:

أ. السعة والتردّد الزاوي والزمن الدوري وثابت الطور. ب. القيمة العظمى للسرعة.

جـ. أكتبُ معادلة تغيّر السرعة مع الزمن. د . زاوية الطور بعد بدء الحركة بثلاث ثوانٍ.

المعطيات: $x(t) = 0.08 \sin (1.33\, t + \frac{\pi}{5})$, $t = 3$ s

المطلوب: $v\,(t) = ?$, $\phi = ?$, $v_{max} = ?$, $T = ?$, $\omega = ?$, $A = ?$

الحلّ:

أ. عن طريق مقارنة معادلتَي الإزاحة:

$$x(t) = A \sin (\omega\, t + \phi)$$

$$x(t) = 0.08 \sin (1.33\, t + \frac{\pi}{5})$$

أستنتجُ أنّ: – السعة: $A = 0.08$ m

– التردّد الزاوي: $\omega = 1.33$ rad/s

– ثابت الطور: $\phi = \frac{\pi}{5}$ rad $= 36^{o}$

– الزمن الدوري:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2 \times 3.14}{1.33} = 4.72 \text{ s}$$

ب. القيمة العظمى للسرعة:

$$v_{max} = \omega A = 1.33 \times 0.08 = 0.11 \text{ m/s}$$

جـ. معادلة تغيّر السرعة مع الزمن:

$$v(t) = \omega A \cos (\omega t + \phi)$$

$$v(t) = 1.33 \times 0.08 \cos (1.33\, t + \frac{\pi}{5})$$

د. زاوية الطور بعد (3 s):

$$(\omega t + \phi) = \left((1.33 \times 3) + \frac{\pi}{5}\right) = 3.99 + 0.63 = 4.62 \text{ rad} = 265^{o}$$

تمرين

يتحرّك جسم حركة توافقية بسيطة حسب معادلة الإزاحة الآتية:

$$x(t) = 0.1 \sin (\pi\, t + \pi)$$

إذ تُقاس الإزاحة بوحدة (m) والزمن بوحدة (s). أجد:

أ . التردّد والتردّد الزاوي.

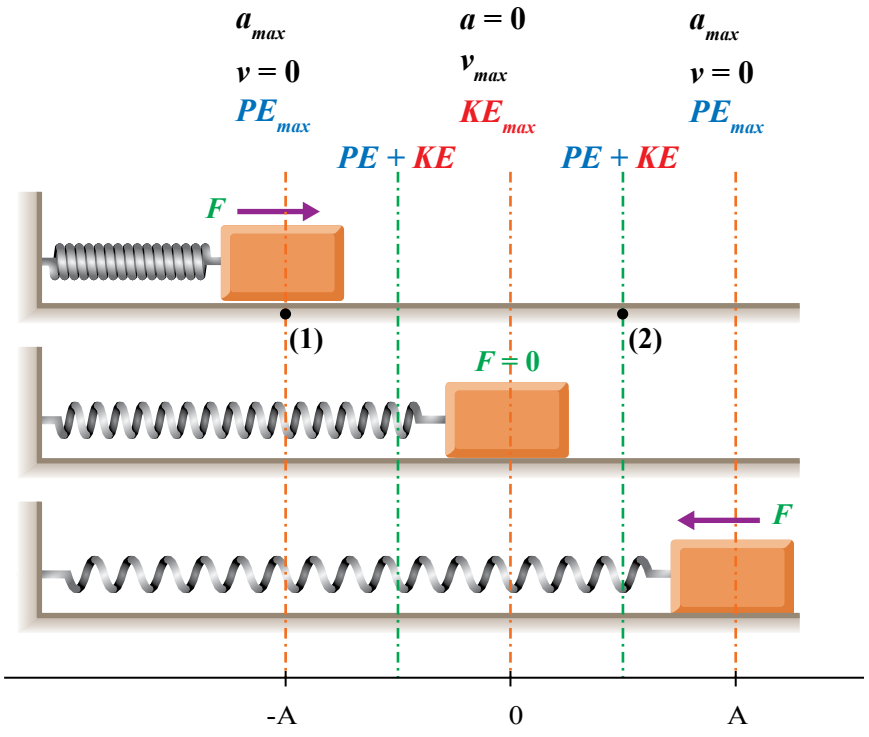
ب. سرعة الجسم بعد 0.5 s من بدء الحركة.

الطاقة في الحركة التوافقية البسيطة Energy in SHM

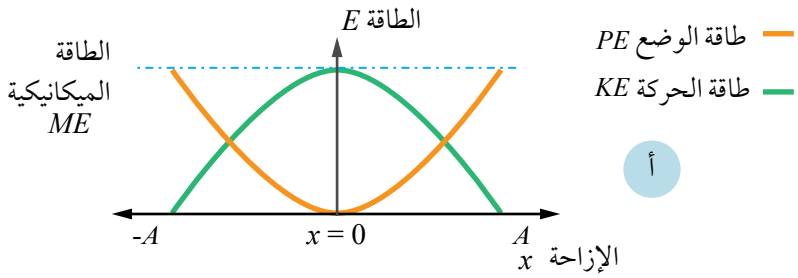
عندما تكون القوى المؤثّرة في جسم ما غير ثابتة، كما هي الحال في الحركة التوافقية البسيطة؛ فإنّه من الأنسب استخدام مفهوم الطاقة؛ كون الطاقة الكلّية ثابتة في ظل غياب قوى غير محافظة مثل قوة الاحتكاك. أفترضُ جسمًا كتلته m يتّصل بنابض موضوع على سطح أفقي أملس عند موقع الاتّزان ($x = 0$) على نحو ما يظهر في الشكل (13)، فإذا ضُغط النابض نحو اليسار عن طريق قوّة خارجية إزاحة قصوى ($x = -A$) فإنّ الشغل الذي تبذله تلك القوّة يُختزن على شكل طاقة وضع مرونية Potential energy (PE) ويُعبَّر عن طاقة الوضع المرونية المختزنة في نابض استطال أو انضغط إزاحة x بالعلاقة الآتية:

$$PE = \frac{1}{2} k x^2$$

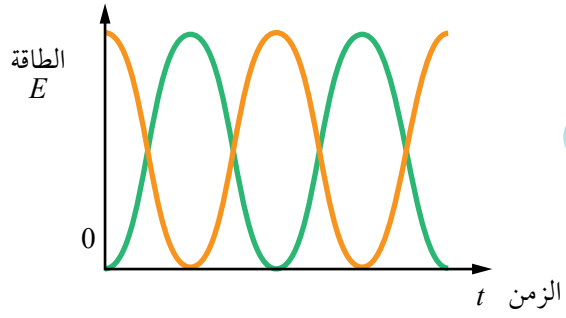
وإذا تُرك الجسم ليبدأ بالتذبذب بدءًا من ذلك الموقع، حيث سرعة الجسم تساوي صفرًا ($v = 0$) وطاقة الوضع المرونية قيمة



الشكل (13): تحوّلات الطاقة في أثناء تذبذب جسم يتّصل بنابض على سطح أفقي أملس.



أ



ب

الشكل (14):

أ : تغيّرات كلّ من الطاقة الحركية وطاقة الوضع المرونية والطاقة الميكانيكية مع الإزاحة، في الحركة التوافقية البسيطة عند غياب القوى غير المحافظة مثل قوة الاحتكاك.

ب: تغيّر كلّ من طاقة الوضع المرونية والطاقة الحركية مع الزمن في الحركة التوافقية البسيطة، بدءًا من أقصى إزاحة عند بداية الحركة، حيث t=0.

عظمى، تبدأ بعدها تحوّلات الطاقة؛ إذ تتناقص طاقة الوضع المرونية وتزداد الطاقة الحركية Kinetic energy (KE) لتتحوّل طاقة الوضع المرونية كلها إلى طاقة حركية عند موقع الاتّزان ($x = 0$)، ثم تتزايد طاقة الوضع المرونية وتقلّ الطاقة الحركية إلى أن تتحوّل الطاقة كلها إلى طاقة وضع مرونية عند الإزاحة القصوى على الطرف الآخر ($x = A$) وهكذا، أنظرُ الشكل (14). ونظرًا إلى أنّ قوّة النابض قوّة محافظة، وبغياب قوى الاحتكاك، فإنّ الطاقة الميكانيكية (ME) تكون محفوظة على النحو الآتي:

$$ME = PE + KE = \text{constant}$$

أي إنّ مجموع طاقة الوضع المرونية والطاقة الحركية عند أيّ نقطتين (1، 2) على مسار حركة الجسم المتّصل بنابض على نحو ما هو مبيَّن في الشكل (13)، يكون متساويًا.

أفكّر: إذا ضُغط النابض في الشكل (13) بحيث تضاعفت الإزاحة القصوى ($x = -2A$)، فماذا يحدث لكلّ من:

أ. الطاقة الميكانيكية.

ب. القيمة العظمى لسرعة الجسم المتذبذب.

جـ. القيمة العظمى لتسارع الجسم المتذبذب.

وعنـد أيّ من النقطتين على طرفَي مسـار الحركة ($x = A$ ، $x = -A$) فـإنّ الطاقـة الميكانيكيـة هـي طاقـة وضـع مرونيـة، حيـث السـرعة تسـاوي صفرًا، أي إنّ:

$$ME = PE + KE = \frac{1}{2}kA^2 + \frac{1}{2}m(0)^2 = \frac{1}{2}kA^2 = PE_{max}$$

حيث A: سعة الذبذبة.

لـذا؛ تتناسـب الطاقة الميكانيكية فـي الحركة التوافقية البسـيطة طرديًّا مع مربّع السـعة.

وعنـد موقـع الاتزان، تأخـذ الطاقـة الحركية أقصى قيمة لها وتسـاوي الطاقة الميكانيكية؛ أيْ إنّ

$$ME = KE_{max} = \frac{1}{2}m(\omega A)^2$$

أتحقّق: جسم يتحرّك حركة توافقية بسيطة، عند أيّ موقع/ مواقع يمتلك:

أ. طاقة حركية فقط.

ب. طاقة وضع فقط.

جـ. طاقة وضع وطاقة حركية معًا.

أُفكّر: فـي اللحظـة التـي يكـون فيهـا الجسـم عنـد أقصـى إزاحـة عـن موقـع الاتّـزان فـي أثنـاء حركته حركة توافقية بسيطة، أيّ الكميـات الآتيـة: (السـرعة، طاقـة الحركـة، طاقـة الوضـع المرونية) تكـون لهـا قيمـة عظمـى عنـد تلك اللحظـة؟ مفسّـرًا إجابتـي.

أبحثُ

مستعينـًا بمصادر المعـرفـة الموثوقة والمتاحة ومنها شبكة الإنترنت، أبحثُ عن تغيّرات كلّ من الطاقة الميكانيكية، والطاقة الحركية، وطاقة الوضع، والسرعة لجسم يتحرّك حركة توافقية بسيطة، على أنْ يتضمّن البحث فيديوهات تفاعلية تُظهر تغيّرات الطاقة والسرعة لحظيًّا عند تغيير موقع الجسم، وأعرضه أمام زملائي/ زميلاتي مستخدمًا جهاز العرض (Data Show) لإتاحة الفرصة للجميع للمشاركة والتفاعل مع العرض.

المثال 7

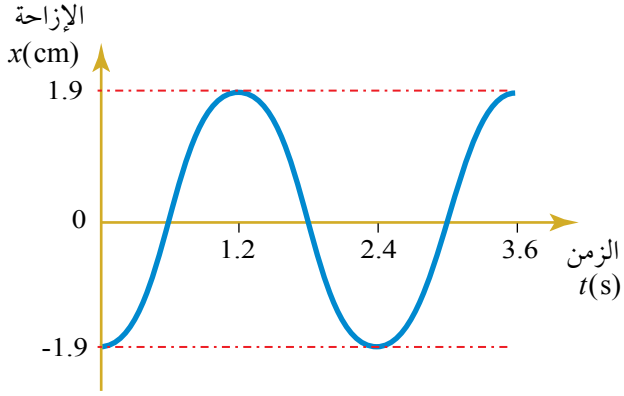
يتذبذب جسم كتلته 75 g يتّصل بنابض في حركة توافقية بسيطة على نحو ما هو مبيَّن في الشكل (15)، مستعينًا بالبيانات المثبّتة على الشكل أحسبُ:

أ . التردّد الزاوي.

ب. الطاقة الحركية العظمى.

جـ. طاقة الوضع المرونية العظمى.

دـ. طاقة الوضع المرونية والطاقة الحركية بعد (0.6 s) من بدء الحركة.



الشكل (15): العلاقة بين الإزاحة والزمن لجسم يتحرّك حركة توافقية بسيطة.

المعطيات: $m = 75\ \text{g} = 75 \times 10^{-3}\ \text{kg}$ ، $A = 1.9\ \text{cm} = 1.9 \times 10^{-2}\ \text{m}$ ، $T = 2.4\ \text{s}$ ،$t = 0.6\ \text{s}$

المطلوب: $\omega = ?$ ، $KE_{max} = ?$ ، $PE_{max} = ?$ ، $PE = ?$ ، $KE = ?$

الحلّ:

أ. التردّد الزاوي:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{2.4} = 0.83\ \pi = 2.61\ \text{rad/s}$$

ب. الطاقة الحركية العظمى:

$$KE_{max} = ME = \frac{1}{2}\ m(\omega A)^2$$

$$= \frac{1}{2} \times (75 \times 10^{-3})\ (2.61 \times (1.9 \times 10^{-2}))^2 = 9.2 \times 10^{-5}\ \text{J}$$

جـ. طاقة الوضع المرونية العظمى:

$$PE_{max} = ME = 9.2 \times 10^{-5}\ \text{J}$$

د . عند ($t = 0.6$ s): يكون الجسم عند موقع الاتّزان ($x = 0$). ومن ثمّ، فإنّ:

طاقة الوضع المرونية:

$$PE = 0\ \text{J}$$

وطاقة الحركة:

$$\text{KE} = KE_{max} = 9.2 \times 10^{-5}\ \text{J}$$

المثال 8

ضُغِط جسم كتلته 0.2 kg يتّصل بنابض موضوع على سطح أفقي أملس إلى أقصى إزاحة 10 cm، وتُرِك ليتحرّك حركة توافقية بسيطة. إذا كان ثابت النابض 19.6 N/m، أحسبُ:

أ . الطاقة الميكانيكية.

ب. الطاقة الحركية العظمى.

جـ. طاقة الوضع المرونية والطاقة الحركية؛ عندما تكون إزاحة الجسم نصف السعة.

المعطيات: $k = 19.6\ \text{N/m}\ ,\ A = 10\ \text{cm} = 0.1\ \text{m}\ ,\ m = 0.2\ \text{kg}$

المطلوب: $ME = ?\ ,\ KE_{max} = ?\ ,\ KE_{x=A/2} = ?\ ,\ PE_{x=A/2} = ?$

الحلّ:

أ. $ME = \frac{1}{2} k A^2 = \frac{1}{2} \times 19.6 \times (0.1)^2 = 0.098\ \text{J}$

ب. $KE_{max} = ME = 0.098\ \text{J}$

جـ. عند $x = 0.05\ \text{m}$:

$$PE_{x=0.05} = \frac{1}{2} k x^2 = \frac{1}{2} \times 19.6 \times (0.05)^2 = 0.0245\ \text{J}$$

$$ME = PE_{x=0.05} + KE_{x=0.05}$$

$$KE_{x=0.05} = ME - PE_{x=0.05} = 0.098 - 0.0245 = 0.0735\ \text{J}$$

تمرين

كتلة مقدارها 83 g متّصلة بنابض وتتذبذب بحركة توافقية بسيطة على سطح أفقي أملس. إذا كانت سَعة الذبذبة 7.6 cm والطاقة الحركية العظمى للكتلة 320 mJ، أحسبُ:

أ. ثابت النابض

ب. الزمن الدوري.

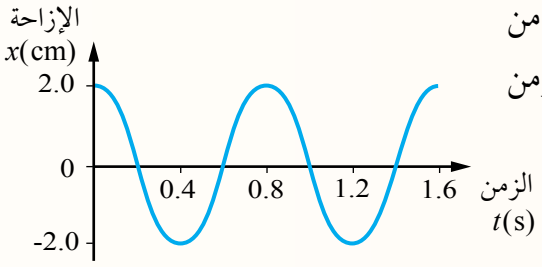
مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** ما مدى صحّة الجملة الآتية: كلّ حركة دورية هي حركة تذبذبية، وكلّ حركة تذبذبية هي حركة توافقية بسيطة؟ أدعم إجابتي بأمثلة.

2. **أستخدمُ المتغيّرات:** بدأ جسم بالتذبذب في حركة توافقية بسيطة من أقصى إزاحة 15 cm، بحيث يُكمل الدورة الواحدة في فترة زمنية مقدارها 3.4 s أحسبُ:

أ. التردّد. ب. التردّد الزاوي. جـ. الإزاحة بعد 3.0 s من بدء الحركة.

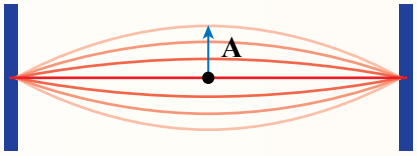
3. **أُحلّل:** يتحرّك جسم حركة توافقية بسيطة، فإذا بدأ التذبذب من أقصى إزاحة عن موقع اتّزانه ومُثّلت العلاقة بين الإزاحة والزمن بيانيًّا على نحو ما في الشكل المجاور، أُجيبُ عمّا يأتي:



أ. ما مقدار كلّ من السعة والزمن الدوري.

ب. أكتبُ معادلة تغيّر الإزاحة مع الزمن لحركة الجسم.

4. **أرسمُ:** سُحب وتر آلة موسيقية من نقطة في منتصفه إزاحة A على نحو ما هو مبيَّن في الشكل المجاور، وتُرِك يتذبذب ذهابًا وإيابًا في حركة توافقية بسيطة بتردّد 5 Hz وسعة 10 mm، فإذا بدأ التذبذب من أقصى إزاحة عند الزمن ($t = 0$) من السكون، أُجيب عمّا يأتي:

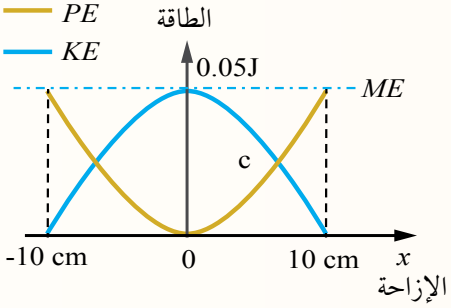


أ. ما مقدار القيمة العظمى لسرعة النقطة على الوتر.

ب. أحسبُ سرعة النقطة على الوتر عند الزمن ($t = 0.12$ s).

جـ. أرسمُ العلاقة البيانية بين الإزاحة والزمن، وكذلك بين السرعة والزمن.

5. **التفكير الناقد:** يوضّح الشكل المجاور تغيّرات كلّ من الطاقة الحركية وطاقة الوضع المرونية، مع الإزاحة لجسم كتلته 400 g يتّصل بنابض ويتحرّك حركة توافقية بسيطة على سطح أفقي أملس. مستعينًا بالشكل أُجيب عمّا يأتي:



أ . أحسبُ كلًّا من ثابت النابض والزمن الدوري.

ب. ما مقدار طاقة الوضع المرونية عند موقع الاتّزان؟

جـ. أحسبُ سرعة الجسم لحظة مروره بموقع الاتّزان.

د . ماذا تُمثّل نقطة التقاطع c؟

الفكرة الرئيسة:

الحركة التوافقية البسيطة لها تطبيقات كثيرة وذات أهمّية في حياتنا اليومية، مثل البندول البسيط والآلات الموسيقية وغيرها.

نتاجات التعلّم:

- أصف حركة بندول بسيط.
- أحدّد الشروط التي يجب تحقّقها لتكون حركة البندول توافقية بسيطة عمليًّا.
- أحدّد العوامل التي يعتمد عليها الزمن الدوري لحركة البندول البسيط عمليًّا.
- أصمم ساعة بندولية، ويستخدمها في قياس زمن معين.
- أطبق المعادلات الخاصّة بالبندول البسيط في حلّ مسائل حسابية.

المفاهيم والمصطلحات:

الحركة التوافقية المخمدة

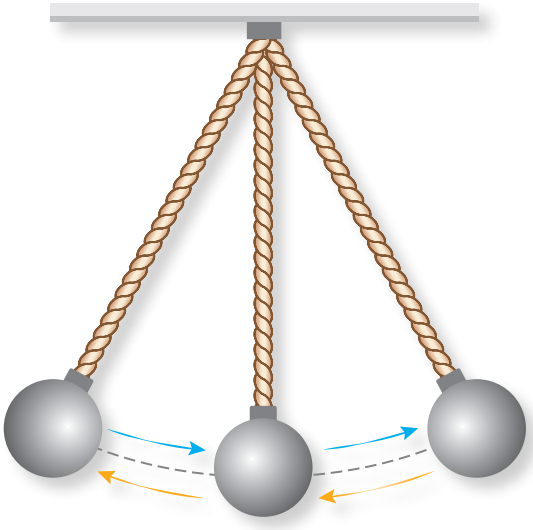
Damped harmonic motion

من دراستي الدرس الأوّل، تعرّفت الشروط اللازم تحقّقها كي تكون الحركة التذبذبية حركة توافقية بسيطة؛ مثل حركة كتلة تتّصل بنابض. وسأتعرّف في هذا الدرس أمثلة وتطبيقات أخرى مختلفة للحركة التوافقية البسيطة.

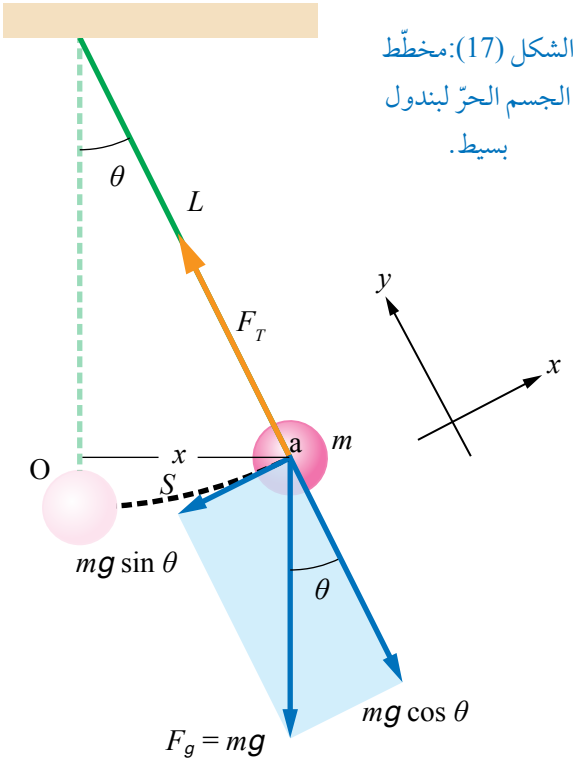
البندول البسيط Simple Pendulum

من الأمثلة الأخرى على الحركة التذبذبية حركة البندول البسيط، مثل حركة الأرجوحة وحركة بندول الساعة وغيرها. يتكوّن البندول البسيط من جسم ذي كتلة (كرة) صغيرة معلّقة بخيط رفيع مهمل الكتلة (كتلته صغيرة جدًّا بالمقارنة مع كتلة الجسم) مثبّت على حامل على نحو الشكل (16)، فإذا سُحِب الجسم إلى جهة معيّنة عن موقع الاتّزان وتُرِك؛ فإنّه يتأرجح ذهابًا وإيابًا على المسار نفسه حول موقع الاتّزان. ويبدو واضحًا أنّ حركة البندول حركة دورية، ولكن هل يمكن وصفها بأنّها حركة توافقية بسيطة؟

أفترضُ أنّ طول خيط البندول L وكتلة الكرة المعلّقة به m وأزيحت الكرة نحو اليمين إلى النقطة a بحيث يمسح خيط البندول زاوية θ وتقطع الكرة مسافة قوسية



الشكل (16): بندول يتكوّن من كرة معلّقة بخيط تتأرجح ذهابًا وإيابًا بحركة توافقية بسيطة.



الشكل (17):مخطّط الجسم الحرّ لبندول بسيط.

S عـن موقـع الاتّـزان O تُمثّـل جزءًا مـن دائرة نصـف قطرهـا L علـى نحـو مـا هـو مبيّـن في مخطّـط الجسـم الحرّ للكرة في الشـكل (17). إذا تُركـت الكـرة فإنّهـا تتذبـذب علـى طـول القـوس الدائـري وليـس فـي خـطّ مسـتقيم. تؤثّـر في الكـرة عنـد النقطة a (أقصـى إزاحة) قـوّة الشـدّ فـي الخيـط F_T وقـوّة الجاذبيـة الأرضيـة F_g . باختيار محـور x باتجاه يوازي المماس للقـوس عنـد النقطـة a ومحـور y باتّجـاه عمـودي عليـه وتحليـل وزن الكـرة إلـى مركبتيـن $(mg \sin \theta , mg \cos \theta)$، فـإنّ مركّبَتَـي القـوّة المحصّلـة المؤثّـرة فـي الكرة

على امتداد المحورين y و x على التوالي هما:

$$\sum F_y = F_T - mg \cos \theta$$

$$\sum F_x = -mg \sin \theta$$

والقوّة المُعيدة F المؤثّرة في الكرة باتّجاه موقع الاتّزان، هي مركّبة القوّة المحصّلة باتّجاه المماس:

$$F = -mg \sin \theta$$

وعندما تكون الزاوية θ صغيرة $(\theta \lesssim 10^o)$ فإنّ:

$\sin \theta$ يساوي الزاوية θ نفسها تقريبًا بالتقدير الدائري.

طول القوس (S) يساوي الإزاحة الأفقية x تقريبًا من موقع الاتّزان.

ومن ثمّ، فإنّ القوّة المُعيدة تساوي تقريبًا:

$$F = -mg\theta$$

وبافتراض أنّ: $\sin \theta = \theta = \frac{x}{L}$ حيث x الإزاحة الأفقية للكرة، يمكن كتابة معادلة القوّة المُعيدة على الصورة الآتية:

$$F = -mg \frac{x}{L} = -\left(\frac{mg}{L}\right) x$$

وتتبع هذه المعادلة الشكل العام للقوّة المُعيدة في قانون هوك ($F = - k x$) بافتراض أنّ:

$$k = \left(\frac{mg}{L}\right)$$

وتحقّقُ هذه المعادلة شرطَي الحركة التوافقية البسيطة؛ إذ تتناسب القوّة المُعيدة طرديًّا مع مقدار الإزاحة x، واتّجاه القوّة المُعيدة باتّجاه معاكس لاتّجاه الإزاحة x (باتّجاه موقع الاتّزان دائمًا)، وذلك في حالة الزوايا الصغيرة ($\sin \theta \approx \theta$).

الربط بالفلك

بندول فوكو Foucault Pendulum

بندول فوكو هي تجربة صمّمها الفيزيائي الفرنسي جان ليون فوكو لتقديم إثبات علمي بسيط لحقيقة دوران الأرض حول محورها؛ عن طريق تعليق ثقل كتلته 28 kg بسلك طوله 67 m في سقف قبة البانثيون في باريس بطريقة تسمح للبندول بالتذبذب في أيّ اتّجاه.

الزمن الدوري للبندول البسيط Period of Simple Pendulum

درستُ في الدرس الأول أنّ التردّد الزاوي في نظام (كتلة – نابض) يُعبَّر عنه بالعلاقة:

$$\omega = 2\pi f = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

وبتعويض قيمة الثابت k للبندول: $k = \left(\frac{mg}{L}\right)$ في معادلة التردّد الزاوي للنابض؛ نحصل على معادلة التردّد الزاوي للبندول:

$$\omega = \sqrt{\frac{\left(\frac{mg}{L}\right)}{m}} = \sqrt{\frac{g}{L}}$$

وباستخدام:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

نحصل على علاقة الزمن الدوري للبندول T على النحو الآتي:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$

أي إنّ الزمن الدوري للبندول البسيط–الذي يُحقّق شروط الحركة التوافقية البسيطة–يبقى ثابتًا ما دام كلّ من طول الخيط وتسارع السقوط الحر ثابتًا ولا يتغيّر بتغيّر الزاوية θ ما دامت ($\theta \lesssim 10^{\circ}$).

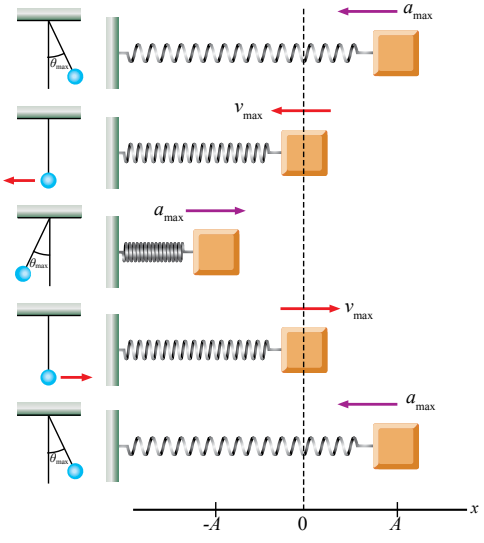
يُظهر الشكل (18) التشابه بين الحركة التوافقية البسيطة لنظام (كتلة – نابض) وحركة البندول البسيط.

أتحقّق: ما العوامل التي يعتمد عليها الزمن الدوري للبندول البسيط؟

الربطُ بعلوم الأرض والبيئة

يستخدم الجيولوجيون غالبًا البندول البسيط، عند التنقيب عن النفط أو المعادن. وينتج من الرواسب تحت سطح الأرض عدم انتظام تسارع السقوط الحر فوق المنطقة قيد الدراسة؛ لذا، يُصمّم بندول خاصّ بطول معروف يُستخدم لقياس الزمن الدوري، والذي بدوره يُستخدم لحساب تسارع السقوط الحر (g). وعلى الرغم من أنّ مثل هذا القياس في حد ذاته غير حاسم، إلّا فإنّه يُعدّ أداة مهمّة للمسوحات الجيولوجية.

أفكّر: هل يتغيّر الزمن الدوري للبندول بتغيّر أيّ من سَعة الذبذبة أو كتلة البندول؟ أُوضّح إجابتي.



t	x	v	a	KE	PE
0	A	0	$-\omega^2 A$	0	$\frac{1}{2}kA^2$
$T/4$	0	$-\omega A$	0	$\frac{1}{2}mv^2$	0
$T/2$	$-A$	0	$\omega^2 A$	0	$\frac{1}{2}kA^2$
$3T/4$	0	ωA	0	$\frac{1}{2}mv^2$	0
T	A	0	$-\omega^2 A$	0	$\frac{1}{2}kA^2$

الشكل (18): التشابه بين حركة نظام (كتلة – نابض) وحركة البندول البسيط.

المثال 9

استخدم جيولوجي بندولًا طوله 17.1 cm لقياس مقدار تسارع السقوط الحر في منطقة على سطح الأرض، فإذا أكمل البندول 72 دورة في مدّة زمنية (60 s). أحسبُ تسارع السقوط الحر في تلك المنطقة.

المعطيات: عدد الدورات 72 دورة خلال 60 s , $L = 17.1\ \text{cm} = 0.171\ \text{m}$

المطلوب: $g = ?$

الحلّ: أحسبُ الزمن الدوري عن طريق قسمة الزمن الكلّي للدورات (t) على عدد الدورات الكاملة:

$$T = \frac{60}{72} = 0.833\ \text{s}$$

أُطبّق المعادلة:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} \Rightarrow T^2 = 4\pi^2\frac{L}{g}$$

$$g = \frac{4\pi^2 L}{T^2} = \frac{4 \times (3.14)^2 \times 0.171}{(0.833)^2} = 9.73\ \text{m/s}^2$$

تمرين

ما مقدار الزمن الدوري للبندول نفسه على سطح القمر، حيث مقدار تسارع السقوط الحر $1.62\ \text{m/s}^2$

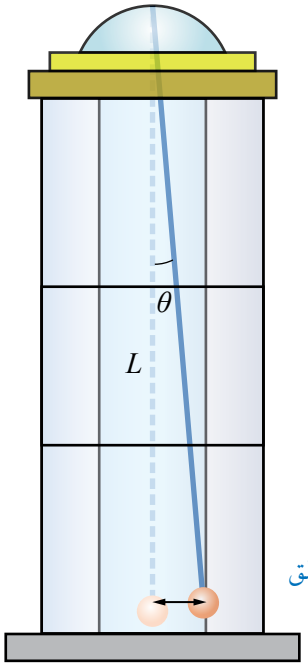
المثال 10

أراد مصطفى قياس ارتفاع برج فلاحظ وجود حبل معلّق في سقف البرج ويصل الأرض تقريبًا. ربط كرة كتلتها 10 kg بالطرف السفلي للحبل وأزاحه مسافة مقدارها 3 m عن موقع اتّزانه، وتركه يتذبذب على نحو ما هو مبيَّن في الشكل (19)، وحسب زمن الذبذبة الواحدة للبندول (عن طريق قياس زمن ذبذبات عدة) فكان 10 s. أحسبُ:

أ . ارتفاع البرج.

ب. التردّد والتردد الزاوي للبندول.

جـ. القوّة المُعيدة عند أقصى إزاحة.



الشكل (20): حبل معلق في سقف برج.

المعطيات: $m = 10\ \text{kg}$, $T = 10\ \text{s}$, $x = 3\ \text{m}$

المطلوب: $\omega = ?$, $f = ?$, $L = ?$, $F = ?$

الحلّ:

أ . ارتفاع البرج:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} \Rightarrow T^2 = 4\pi^2\frac{L}{g}$$

$$L = \frac{T^2 g}{4\pi^2} = \frac{10^2 \times 10}{4 \times (3.14)^2} = 25.3 \text{ m}$$

ب. التردّد:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{10} = 0.1 \text{ Hz}$$

التردّد الزاوي:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2 \times 3.14}{10} = \quad 0.628 \text{ rad/s}$$

جـ. القوّة المُعيدة:

$$F = -\left(\frac{mg}{L}\right)x = -\left(\frac{10 \times 10}{25.3}\right) \times 3 = -11.86 \text{ N}$$

المثال 11

يتذبذب بندول الساعة بحيث يُكمل دورة واحدة في الثانية. إذا علمتُ أنّ سَعة حركته التوافقية البسيطة تساوي (4 cm) فأحسبُ:

أ . سرعة البندول لحظة مروره بموقع الاتّزان.

ب. تسارع البندول لحظة مروره بموقع الاتّزان.

المعطيات: $A = 4 \text{ cm} = 0.04 \text{ m}$, $f = 1 \text{ Hz}$

المطلوب: $v_{max} = ?$, $a = ?$

الحلّ:

أ. سرعة البندول لحظة مروره بموقع الاتّزان ≡ تساوي القيمة العظمى لسرعة البندول v_{max}. لحساب قيمتها؛ نحتاج إلى حساب التردّد الزاوي أولًا:

التردّد الزاوي: $\omega = 2\pi f = 2 \times 3.14 \times 1 = 6.28 \text{ rad/s}$

القيمة العظمى لسرعة البندول: $v_{max} = \omega A = 6.28 \times 0.04 = 0.25 \text{ m/s}$

ب. تسارع البندول لحظة مروره بموقع الاتّزان يساوي صفرًا؛ حيث القوّة المُعيدة تساوي صفرًا.

التجربة ١ استخدام البندول البسيط؛ لإيجاد تسارع السقوط الحرّ عمليًّا

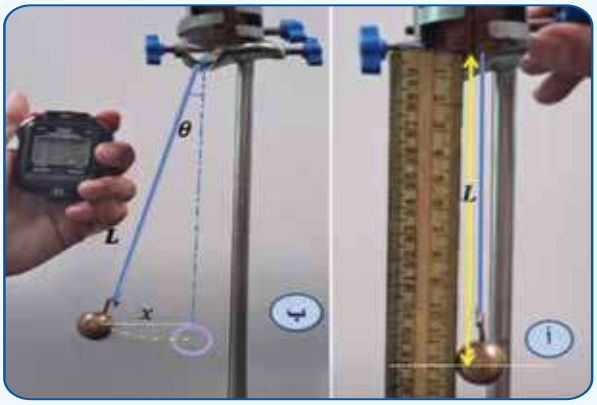
الموادّ والأدوات: كرتان فلزّيتان مختلفتان في الكتلة، حامل فلزّي، خيط غير قابل للاستطالة (أو سلك رفيع)، ساعة إيقاف رقمية، مسطرة مترية.

إرشادات السلامة: الحذر من سقوط الأدوات والأثقال على القدمين.

خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي أُنفّذ الخطوات الآتية:

1. أضع الحامل على سطح الطاولة، وأُثبّت اللواقط على قمّة الحامل ثمّ أربط أحد طرفَي الخيط بكرة كتلتها m، في حين أُثبّت الطرف الآخر للخيط باللواقط على نحو ما في الشكل، على أنْ أتمكّن من تغيير طول الخيط L.
2. **أقيس** طول الخيط (L) باستخدام المسطرة المترية على نحو ما يظهر في الشكل (أ)، وأُدوّن النتيجة في الجدول.
3. **أقيس:** أسحبُ الكرة إلى اليسار مسافة أفقية صغيرة على أنْ تكون الزاوية θ أقل من 10° تقريبًا على نحو ما في الشكل (ب)، وأتركها تتذبذب بالتزامن مع تشغيل ساعة الإيقاف من قِبَل أحد أفراد مجموعتي؛ لقياس زمن 10 ذبذبات كاملة (t_1)، وأُدوّن نتائجي في الجدول.
4. أُكرّر الخطوة (3) مرّتين، وأُدوّن زمن عشر ذبذبات في كلّ مرّة (t_2, t_3)، ثمّ أدوّن نتائجي في الجدول.
5. أُكرّر الخطوتين (3-4) مستخدمًا أطوالًا مختلفة للخيط، وأُدوّن نتائجي في الجدول.
6. أُكرّر الخطوتين (3-4) مستخدمًا كرة ذات كتلة مختلفة m'، وأُدوّن نتائجي في الجدول.
7. أُكرّر الخطوتين (3-4) بعد أن أُغيّر الزاوية إلى 25°، وأُدوّن نتائجي في الجدول.



التحليل والاستنتاج:

1. **أحسبُ** المتوسّط الحسابي (t) للفترات الزمنية الثلاث (t_1, t_2, t_3) ثمّ أحسبُ الزمن الدوري (T)؛ بقسمة متوسّط الزمن (t) على عدد الذبذبات، وأُكرّر ذلك عند تغيّر طول الخيط، ثمّ أُدوّن نتائجي في الجدول. كيف يتغيّر الزمن الدوري بتغيّر طول الخيط؟
2. **أرسمُ** العلاقة البيانية بين مربّع الزمن الدوري (T^2) على محور y وطول الخيط L على محور x، ثمّ أجد ميل الخطّ الناتج $(\frac{\Delta T^2}{\Delta L})$، وأُطبّق العلاقة:

$$g = \left(\frac{L}{T^2}\right) \times 4\pi^2 = \frac{4\pi^2}{\left(\frac{\Delta T^2}{\Delta L}\right)}$$

لحساب تسارع السقوط الحرّ g.

3. **أُحلّل:** هل تتّفق قيمة تسارع السقوط الحر g المحسوبة مع القيمة المعروفة $g = 9.8\ m/s^2$؟ وما سبب الاختلاف إن وجد؟
4. **أُحلّل:** هل تغيّر مقدار الزمن الدوري للبندول؛ عند استخدامي كرة ذات كتلة مختلفة m'؟
5. **أتوقّع:** هل يتغيّر الزمن الدوري للبندول؛ عندما أُعيد إجراء التجربة في منطقة أعلى؟ أُفسّر إجابتي.
6. **أُفسّر:** عند تغيير الزاوية إلى 25° وحساب تسارع السقوط الحرّ؛ هل القيمة التي حصلت عليها قريبة من القيمة المقبولة للتسارع؟ أُفسّر إجابتي.

ربما توصّلت من التجربة السابقة، إلى أنّ الزمن الدوري للبندول البسيط يتغيّر بتغيّر طول البندول، ولا يعتمد على كتلة البندول. وقيمة تسارع السقوط الحر التي توصلت إليها ثابتة بغض النظر عن طول الخيط أو كتلة الجسم ما دامت الزاوية $\theta \lesssim 10^{o}$، أمّا عندما تصبح الزاوية θ أكبر من 10^{0} (مثلًا 25^{o}) فإنّ قيمة تسارع السقوط الحرّ التي قمت بحسابها تختلف عن القيمة المحسوبة عند الزاوية $\theta \lesssim 10^{o}$؛ لأنّ حركة البندول التذبذبية في هذه الحالة لا تُحقّق شروط الحركة التوافقية البسيطة. ومن ثمّ، لا تنطبق عليها العلاقات الخاصّة بهذه الحركة التي تُستخدم في حساب تسارع السقوط الحرّ.

أفكّر: أُعلّل: تسارع السقوط الحر لا يتغيّر بتغيّر طول خيط البندول.

من التطبيقات على البندول البسيط الساعة البندولية Pendulum Clock، أنظرُ الشكل (20)، التي اخترعها العالم الهولندي كريستيان هيغنز Christian Huygens عام 1657م، إذ وظّف فكرة البندول البسيط؛ فالزمن الدوري لبندول الساعة المثبّت عند سطح البحر ($g = 9.81\ m/s^2$) يكون ثانية واحدة عندما يكون طوله:

الشكل (20): ساعة بندولية.

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$

$$1 = 2 \times 3.14 \times \sqrt{\frac{L}{9.81}} \Rightarrow L = 24.87\ cm$$

أي إنّ البندول يُكمل ذبذبة واحدة في زمن مقداره ثانية واحدة.

ومن التطبيقات الأخرى على البندول البسيط؛ الأرجوحة Swing وسرير الأطفال الهزاز Cradle؛ إذ يتحرّك كلّ منهما حركة توافقية بسيطة على أن تكون الزاوية $\theta \lesssim 10^{o}$.

أفكّر: تعتمد الساعة البندولية على الزمن الدوري للبندول للحفاظ على دقّة الزمن، أفترضُ أنّ طول ساق البندول قد ازداد فهل الزمن الذي تقيسه الساعة يبقى صحيحًا أم يقلّ أم يزداد؟ أُفسّر إجابتي.

الشكل (21): اهتزاز وتر الغيتار.

تطبيقات حياتية على الحركة التوافقية البسيطة

Life Applications of Simple Harmonic Motion

توجد تطبيقات كثيرة في حياتنا اليومية على الحركة التوافقية البسيطة يمكن ملاحظتها أو التعامل معها، نذكر منها:

الآلات الموسيقية Musical Instruments

عندما يعزف الموسيقار على الغيتار أو العود على نحو ما يظهر في الشكل (21)، ينتج من اهتزاز أوتار تلك الآلات أصوات تسمعها الأذن البشرية موسيقا. فعند إزاحة وتر الغيتار عن موقع اتّزانه مسافة معيّنة (تعتمد على القوّة التي يؤثّر بها عازف الغيتار في الوتر) ثم تركه؛ فإنّه يتذبذب حول موقع الاتّزان ذهابًا وإيابًا في حركة توافقية بسيطة، وينتج من طاقة تذبذب الوتر صوت موسيقي يتلاشى تدريجيًّا نتيجة التناقص في طاقة الذبذبات.

القفز بالحبال المطّاطية (بنجي) Bungee Jumping

يُعدُّ القفز بالحبال أو ما يُعرف بالبنجي على نحو ما يظهر في الشكل (22)، تطبيقًا آخر على الحركة التوافقية البسيطة، وهو نشاط رياضي ينطوي على القفز من مناطق شاهقة الارتفاع، في حين يكون القافز مربوطًا بحبل مطّاطي يُحقّق مواصفات الأمان؛ ويقفز من مناطق ثابتة كالجسور والمباني، أو متحرّكة كالقفز من منطاد أو من طائرة

الشكل (22): القفز من ارتفاعات شاهقة؛ باستخدام حبل مطّاطي.

عمودية. وأُدخلت في السنوات الأخيرة رياضة القفز من الرافعات إلى بعض المدن الترفيهية بوصفها وسيلة للترفيه. وعندما يقفز الشخص ويصل إلى أقصى إزاحة يبدأ بالتذبذب إلى أعلى وأسفل، وتكون الحركة توافقية بسيطة إذا تحقّقت شروطها.

البندول الإيقاعي (الرقاص) Metronome

هو جهاز يعمل على إصدار صوت منتظم ومكرّر على شكل تكّة أو نقرة بعد إكمال ذبذبة كاملة؛ أي خلال الزمن الدوري للبندول الذي يمكن تغييره عن طريق تغيير طول البندول؛ باستخدام الكتلة القابلة للحركة على ذراع البندول لزيادة طوله أو إنقاصه.

والبندول الإيقاعي يُصدر نبضات صوتية يمكن ملاحظتها بصريًّا كبندول الساعة. وقد يكون البندول الإيقاعي ميكانيكيًّا على نحو ما يظهر في الشكل (23) الذي اخترع عام 1815م، أو كهربائيًّا أو إلكترونيًّا يمكن تحميله بوصفه تطبيقًا على هاتفي الخلوي. ويَستخدم الموسيقيون البندول الإيقاعي للتأكّد من أنّ العزف يجري بوتيرة تامّة وأداء دقيق، ويُستخدم كذلك في الساعات للحفاظ على دقّة مماثلة لتلك المستخدمة في ساعات اليد.

✓ **أتحقّق:** ما مصدر القوّة المُعيدة في كلّ من التطبيقات الثلاثة السابقة؟

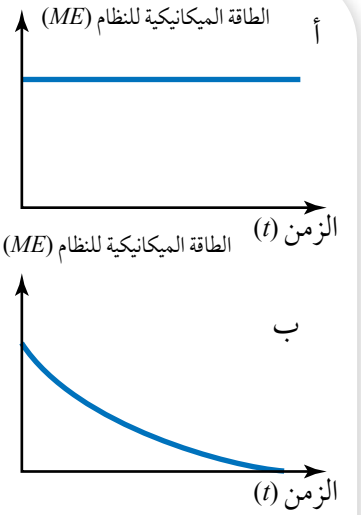
الشكل (23): تذبذب البندول الإيقاعي.

الحركة التوافقية المُخمدة Damped Harmonic motion

عند دراسة الحركة التوافقية البسيطة (مثل حركة البندول وحركة الكتلة المعلقة بالنابض وغيرها) افترضنا عدم وجود قوى احتكاك؛ ولذلك فالنظام لا يفقد طاقة، وسعة التذبذب تبقى ثابتة ويستمر في الحركة إلى اللانهاية، أنظرُ الشكل (24/أ)، وهذا الافتراض لتسهيل التعامل مع الحركة التوافقية البسيطة رياضيًّا، لكن في الواقع تقل سعة التذبذب مع الزمن بالتدريج حتى تتوقف الحركة التذبذبية لأن قوى أخرى تؤثر في النظام (مثل قوى الاحتكاك) تبدد من طاقة النظام حتى تؤول سعة التذبذب إلى الصفر، أنظرُ الشكل (24/ب)، حيث تتحول الطاقة الميكانيكية إلى طاقة داخلية في الجسم والوسط الذي يتذبذب فيه.

بوجهٍ عام فإن أنظمة التذبذب الطبيعية تكون متخامدة. ويطلق على الحركة التذبذبية التي تقل سعتها مع الزمن بسبب قوى المقاومة؛ مثل قوة الاحتكاك اسم **الحركة التوافقية المخمدة Damped harmonic motion.**

في حالة التخامد فإن الحركة التذبذبية لا تعد حركة توافقية بسيطة. من الأمثلة على الحركة التوافقية المخمدة غالق الباب الهيدروليكي Hydraulic door closer أو ما يُسمّى ردّاد الباب على نحو ما هو مبيَّن في الشكل (25)؛ حيث يوجد في داخل الغالق نابض ينضغط عند فتح الباب، وعند فتح الباب يرتخي النابض فيؤثّر بقوّة في الزيت لدفعه عبر ثقب صغير؛ إذ تعمل هذه القوّة على تخميد النظام؛ لذا، يُغلق الباب ببطء.



الشكل (24): الطاقة الميكانيكية لحركة توافقية:
أ) في غياب قوى احتكاك.
(ب) بوجود قوى احتكاك.

الشكل (25): غالق (رداد) الباب.

مُخمّد الرياح والزلازل في برج Taipei

استفاد المهندسون من فكرة التخامد الحرج في تصميم أكثر المخمّدات شهرة في العالم، وهو برج Taipei 101 المُبيَّن في الشكل؛ ويتكوّن من كرة عملاقة ترتكز على مكابس هيدروليكية ضخمة تشبه قليلًا ممتصّ الصدمات في المركبات. وعند حدوث زلزال أو هبوب رياح عاتية تحاول إحداث ميلان في البرج باتّجاه معين؛ فإنّ الكرة تتحرّك في الاتجاه المعاكس للتقليل من ميلان البرج بحيث لا يشعر الشخص داخل البرج بتلك الاهتزازات.

صورة لبرج Taipei.

أبحثُ

للحركة التوافقية المخمدة تطبيقات أخرى في حياتنا اليومية. مستعينًا بمصادر المعرفة الموثوقة والمتاحة ومنها شبكة الإنترنت، أبحث عن بعض تلك التطبيقات، وأعد عرضًا تقديميًا يتضمن صورًا وفيديوهات توضيحية وأعرضه أمام زملائي/ زميلاتي.

مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** ما الشروط اللازم تحقيقها في البندول البسيط؛ كي يتذبذب في حركة توافقية بسيطة؟ وما مصدر القوّة المُعيدة في البندول البسيط؟

2. **أحلّ المشكلات:** يستخدم جد ليلى ساعة بندولية تعتمد على الزمن الدوري للبندول، وذات يوم لاحظ أنّ ساعته غير دقيقة؛ فنظرت ليلى إلى ساعتها فكانت 5:15 PM في حين كانت ساعة جدّها 5:00 PM . كيف يمكن لليلى ضبط ساعة جدّها على أنْ تقيس الزمن بدقّة دون تقديم أو تأخير.

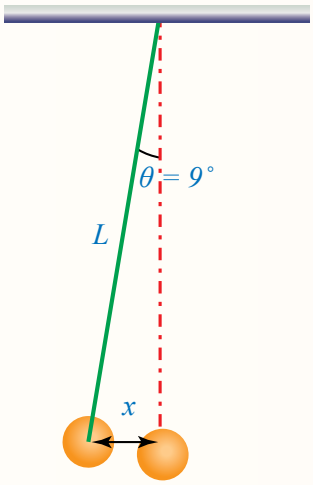
3. **أستخدمُ المتغيّرات:** طفل كتلته 15 kg يجلس في أرجوحة كتلتها 5 kg مربوطة بحبل مثبّت من الأعلى. إذا دُفِع الطفل مسافة صغيرة ثمّ تُرِك ليبدأ بالتحرّك حركة توافقية بسيطة زمنها الدوري 4 s فأحسبُ:

   أ . التردّد الزاوي.

   ب. طول الحبل.

4. **التفكير الناقد:** ساعة بندولية يكمل بندولها ذبذبة واحدة في زمن مقداره ثانية واحدة عندما يكون طوله L. إذا تضاعف طول البندول أربع مرّات $(4L)$، فكم ذبذبة يكمل البندول في زمن مقداره ثانية واحدة؟

5. **أستخدمُ المتغيّرات:** بندول بسيط كتلته 0.25 kg وطوله 80 cm. إذا أُزيح زاوية 9^{o} على نحو ما هو مبيَّن في الشكل المجاور، ثمّ تُرِك يتذبذب في حركة توافقية بسيطة، فأحسبُ:



   أ . الزمن الدوري.

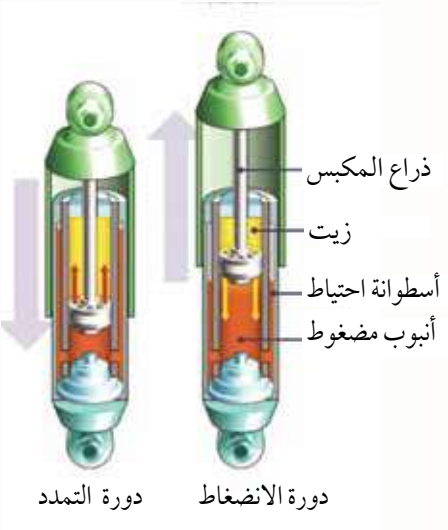
   ب. أقصى إزاحة x.

   جـ القيمة العظمى للسرعة.

مُمتَصّ الصدمات في المركبات
Shock Absorber Car

يُعدّ ممتصّ الصدمات أحد تجهيزات السلامة الأساسية، التي لا يمكن الاستغناء عنها في المركبة مثل المكابح ونظام التوجيه، وهو من الأجزاء المهمة في نظام التعليق في المركبة وجزء لا يتجزّأ منه. وتكمن أهمّيته في تخميد الاهتزازات الناتجة من النوابض؛ من أجل المحافظة على ثبات المركبة على الطريق، والتقليل من اهتزاز هيكل المركبة وتأرجحه في أثناء القيادة، ولاسيما على الطرق الوعرة غير الممهّدة وعند مواجهة المطبات والحفر، ويعمل أيضًا على ضمان الاتّصال المستمرّ للإطارات بسطح الطريق في الأوقات جميعها والسيطرة على المركبة وتوجيهها، وعدم انحرافها عن مسارها.

من الناحية التقنية، يُعدّ ممتصّ الصدمات همزة الوصل بين تعليق العجلات وهيكل المركبة؛ ويُثبّت بجانب العجلات على نحو ما يظهر في الشكل المجاور؛ إذ يجري التغلّب على عدم استواء الطريق عن طريق امتصاص الاهتزازات والحدّ منها؛ وذلك عبر تحويل الطاقة الحركية في النوابض إلى طاقة حرارية خلال السائل الهيدروليكي والوسط المحيط.



يتحرّك مكبس ممتصّ الصدمات إلى أعلى وأسفل عبر أسطوانة مليئة بالزيت على نحو ما هو مبيَّن في الشكل المجاور، ويضغط المكبس الزيت عبر نظام لصمام مرتبط بالنوابض، ثم يتوقّف المكبس ويُقلّل الاهتزازات، وكلما زادت لزوجة الزيت تعود المركبة بزمن أقل إلى وضع الاتّزان حيث يتوقّف الاهتزاز.

يُستخدم في السيارات الحديثة نوع آخر من ممتصّ الصدمات؛ يحتوي على غاز مثل النيتروجين إضافة إلى السائل الهيدروليكي؛ لزيادة فاعلية ممتصّ الصدمات، ويوجد نوع ثالث يحتوي على الغاز فقط، ولكلّ نوع استخداماته الخاصة. ومن أجل قيادة آمنة؛ يجب الاهتمام بممتصّ الصدمات وصيانته أو استبداله من فترة إلى أخرى.

أبحث مستعينًا بمصادر المعرفة الموثوقة والمُتاحة ومنها شبكة الإنترنت، أبحثُ عن أعراض تلف ممتصّ الصدمات ومتى يجب استبداله وكيفية المحافظة عليه، وكذلك عن استخدامات الأنواع الأخرى التي تعمل على الغاز والسائل معًا أو الغاز وحده، وأعدّ وأفراد مجموعتي تقريرًا مدعّمًا بالرسوم التوضيحية.

1. أضع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة لكل جملة ممّا يأتي:

1. أيّ الكمّيات الآتية متعاكستان دائمًا في الاتّجاه في الحركة التوافقية البسيطة:

أ. السرعة والإزاحة. ب. السرعة والتسارع.

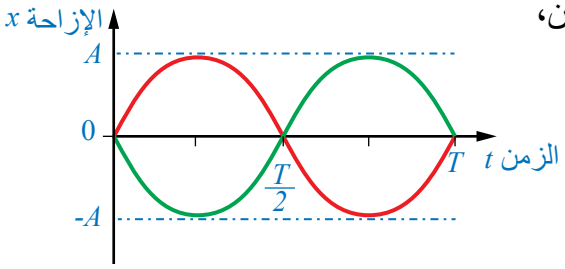
جـ. التسارع والإزاحة. د. القوة المعيدة والتسارع.

2. إذا تغيّرت السعة فقط لحركة كرة تتحرّك حركة توافقية بسيطة؛ فأيّ ممّا يأتي يبقى ثابتًا:

أ. الطاقة الميكانيكية للكرة. ب. القيمة العظمى للتسارع.

جـ. القيمة العظمى للسرعة. د. الزمن الدوري.

3. يُمثّل الشكل منحنيَي (الإزاحة – الزمن) لحركة نابضين، فرق الطور بين المنحنيين يساوي بوحدة rad:



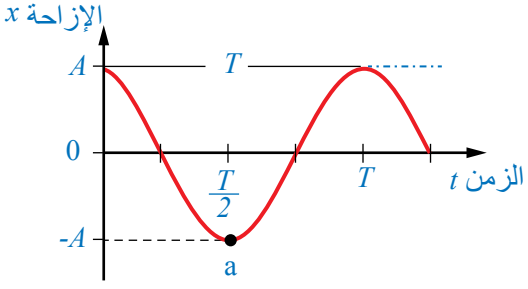
أ. $\frac{\pi}{4}$ ب. $\frac{\pi}{2}$

جـ. π د. 2π

4. بندول طوله L يتذبذب في حركة توافقية بسيطة بتردد زاوي ω، إذا تناقص طول البندول إلى الربع؛ فإنّ التردّد الزاوي للبندول:

أ. $\frac{\omega}{2}$ ب. $\frac{\omega}{4}$ جـ. ω د. 2ω

5. تتّصل كتلة بنابض على سطح أملس أفقي وتتحرّك حركة توافقية بسيطة، فإذا مُثّلت العلاقة بين الإزاحة والزمن على نحو ما في الشكل؛ فإنّ كلًّا من سرعة الكتلة والقوّة المُعيدة عند النقطة a توصف على النحو الآتي:



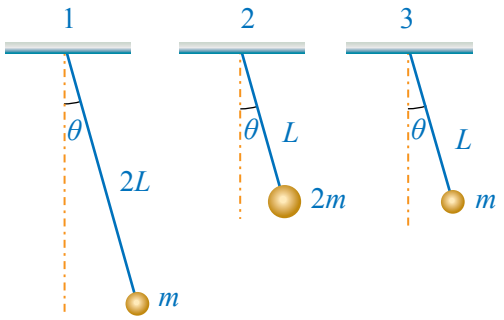
أ. $(v: +, F: -)$ ب. $(v: -, F = 0)$

جـ. $(v = 0, F: +)$ د. $(v = 0, F: -)$

6. تتأرجح فدوى في أرجوحة بحركة توافقية بسيطة بزمن دوري T، فإذا ركب معها في الأرجوحة شقيقها مصطفى وكتلته مساوية لكتلة فدوى واستمرّا في التأرجح؛ فإن الزمن الدوري يساوي:

أ. $\sqrt{2}\,T$ ب. $2T$ جـ. T د. $\frac{T}{2}$

7. أجرت الطالبة تقوى ثلاث تجارب لقياس تسارع السقوط الحر؛ باستخدام البندول البسيط على نحو ما يظهر في الشكل المجاور. أيّ نتائج تلك التجارب تُمثّل القيمة الصحيحة لتسارع السقوط الحر؟



أ . 1 فقط. ب. 2 فقط.

جـ. (1، 2) فقط. د . جميعها.

2. أُفسّر:

أ . تقيس الساعة البندولية الزمن بدقّة متناهية في منطقة تقع أسفل جبل. إذا نُقلت إلى منطقة أعلى الجبل فهل تتغيّر دقّة قياسها للزمن؟ أُوضّح ذلك.

ب. بندول زاويته ($\theta = 30^{o}$) يتحرك حركة تذبذبية، هل تُعدّ حركته حركة توافقية بسيطة؟ أُفسّر إجابتي.

3. التفكير الناقد: ينزلق جسم كتلته m داخل تجويف نصف كروي أملس نصف قطره R، أُثبتُ أنّه إذا بدأ الحركة التذبذبية من السكون بإزاحة صغيرة عن موقع الاتّزان؛ فإنّ الجسم يتحرّك حركة توافقية بسيطة بتردّد زاوي:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{R}}$$

4. أستخدمُ المتغيّرات: يتحرّك مكبس محرّك سيارة إلى أعلى وأسفل بحركة توافقية بسيطة بتردّد 7500 Hz. إذا علمتُ أنّ الإزاحة التي يتحرّكها المكبس من الأعلى إلى الأسفل في الدورة 30 cm، فأحسبُ السرعة العظمى للمكبس.

5. أستخدمُ المتغيّرات: يتذبذب جسم في حركة توافقية بسيطة حسب المعادلة الآتية:

$$x(t) = 5 \sin(4t + \frac{\pi}{4})$$

حيث الإزاحة x بوحدة cm، والزمن t بوحدة s، وبدأ الحركة التذبذبية من الزمن ($t = 0$) أجد:

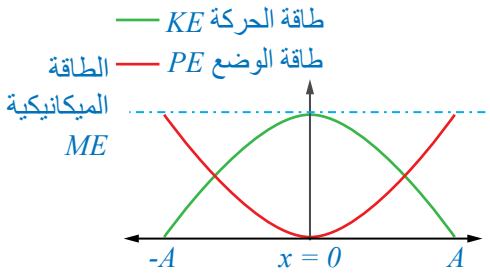
أ. السعة والتردّد الزاوي وزاوية الطور.

ب. الزمن الدوري.

جـ. إزاحة الجسم وسرعته بعد 0.02 s من بدء الحركة .

6. **التفكير الناقد:** أُثبتُ أنّ الإزاحة الأفقية من موقع الاتّزان للنقطة التي تتساوى عندها طاقة الوضع مع الطاقة الحركية في الشكل المجاور، لجسم يتذبذب بحركة توافقية بسيطة يُعبَّر عنها بالعلاقة:

$$x = \frac{A}{\sqrt{2}}$$

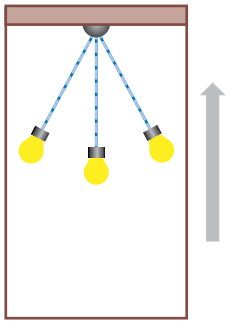


7. **أرسمُ:** بدأ مكعّب بالتذبذب من موقع الاتّزان بحركة توافقية بسيطة. إذا كانت السعة 80 mm والزمن الدوري 2.5 s فأُجيب عمّا يأتي:

أ . أكتبُ معادلة الإزاحة بالنسبة إلى الزمن على أنْ تكون وحدة السعة m والتردّد الزاوي rad/s والزمن s.

ب. أرسمُ العلاقة البيانية للإزاحة - الزمن لدورتين كاملتين.

8. **أُحلّل:** قيس الزمن الدوري لمصباح معلّق بسقف مصعد ساكن في أثناء تذبذبه في حركة توافقية بسيطة على نحو ما هو مبيَّن في الشكل المجاور. أصف التغيّر الذي يطرأ على الزمن الدوري لحركة المصباح عندما يتحرّك المصعد:



أ . بتسارع ثابت إلى أعلى.

ب. بسرعة ثابتة.

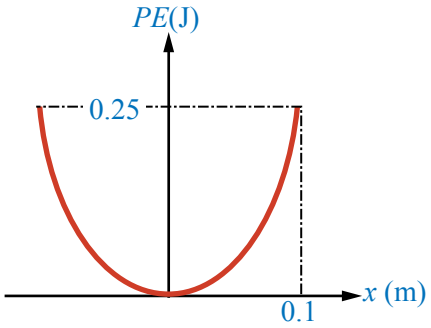
9. **أحسبُ:** بندول بسيط كتلته 50 g سُحِب مسافة مقدارها 12 cm من موقع الاتّزان، ثم تُرِك يتذبذب في حركة توافقية بسيطة بزمن دوري 2.9 s. أحسبُ:

أ . طول البندول.

ب. الطاقة الحركية العظمى للبندول.

10. **أستخدمُ المتغيّرات:** عربة كتلتها 0.5 kg تتّصل بنابض على سطح أفقي أملس، وتتحرّك حركة توافقية بسيطة، مُثّلت العلاقة بين طاقة الوضع للعربة والإزاحة على نحو ما يظهر في الشكل المجاور.

أحسبُ مستعينًا بالشكل ما يأتي:



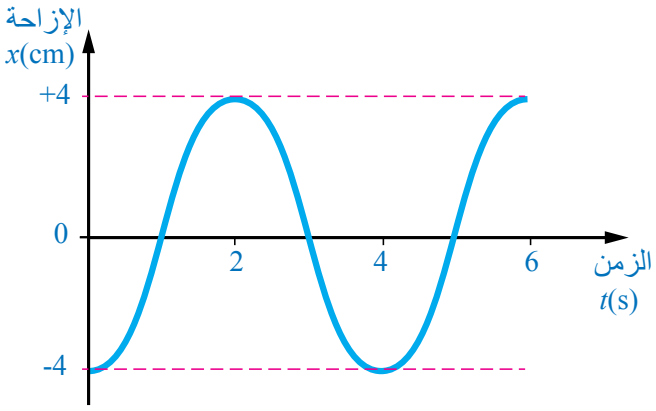
أ . الطاقة الميكانيكية.

ب. ثابت النابض.

جـ. طاقة الوضع المرونية؛ عندما تكون العربة على بعد 5 cm من موقع الاتّزان.

د . القيمة العظمى للتسارع.

11. **أحلل:** يتذبذب جسم كتلته (100 g) يتّصل بنابض أفقي في حركة توافقية بسيطة على نحو ما هو مبيّن في الشكل المجاور، مستعينًا بالبيانات المثبّتة على الشكل:



أ . أحسبُ التردد الزاوي.

ب. أحسبُ الطاقة الحركية العظمى للجسم.

جـ. أكتبُ معادلة تغيّر موقع الجسم مع الزمن.

د . أحسبُ طاقة الوضع والطاقة الحركية بعد (1.2s) من بدء الحركة.

12. **أستخدم المتغيرات:** يتذبذب جسم كتلته (m) يتّصل بنابض مهمل الكتلة ثابت النابض له (k = 20 N/m). إذا كانت أقصى إزاحة للنابض عن موقع الاتزان (A = 8 cm)، وسرعة النابض العظمى $v_{max} = 0.16$ m/s أحسبُ:

أ . السرعة الزاويّة للنابض.

ب. الزمن الدوري للنابض.

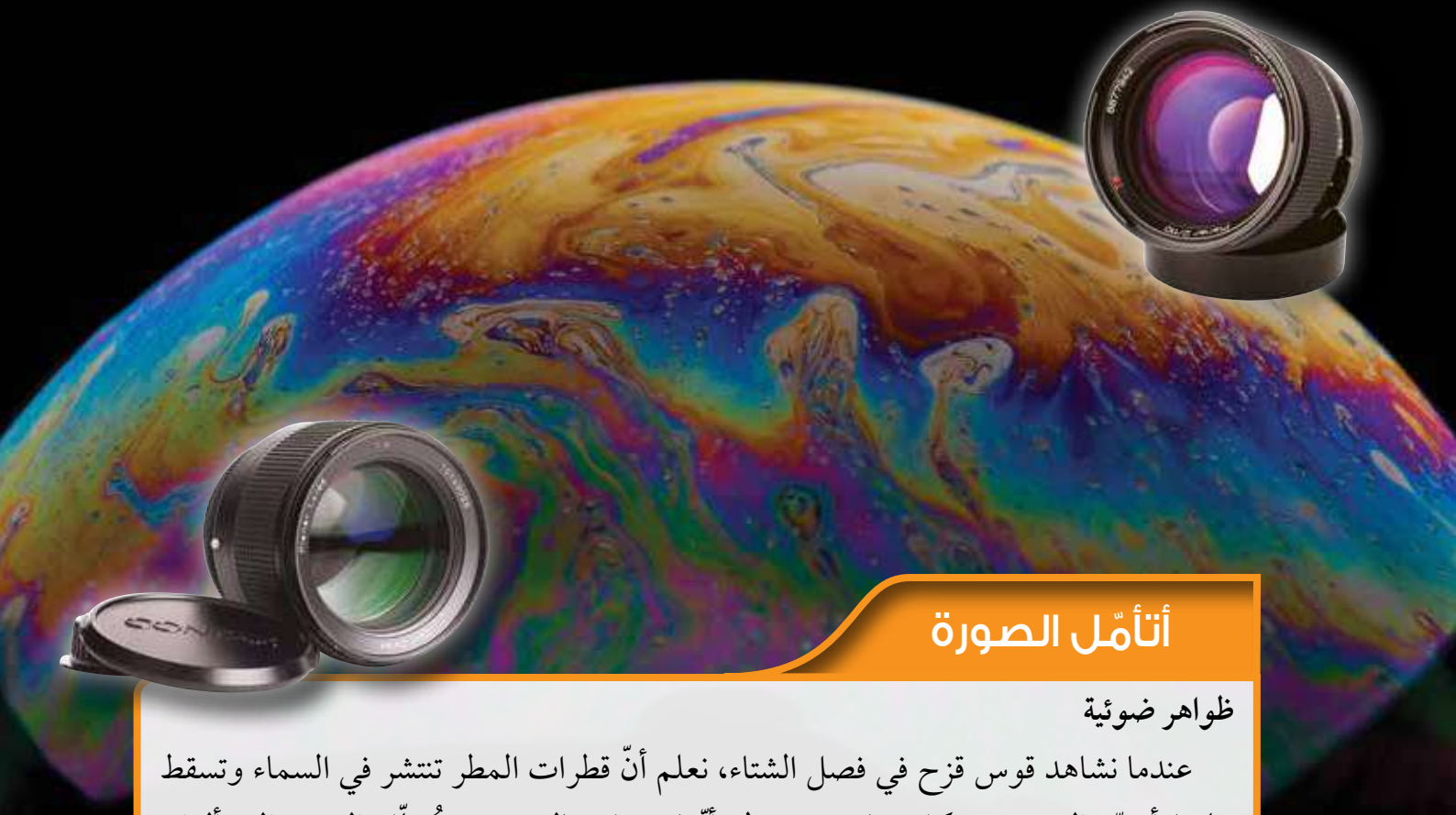
جـ. قيمة التسارع العظمى للنابض.

د . كتلة الجسم.

الوحدة 6

الموجات وخصائصها

Waves and Wave Properties



أتأمّل الصورة

ظواهر ضوئية

عندما نشاهد قوس قزح في فصل الشتاء، نعلم أنّ قطرات المطر تنتشر في السماء وتسقط عليها أشعّة الشمس بشكل مباشر؛ فندرك أنّها تعمل كالمنشور وتُحلّل الضوء إلى ألوانه المعروفة. ولكن، هل فكّرت يومًا في سبب ظهور الألوان على فقاعة الصابون، أو على عدسة الكاميرا والنظّارة الطبّية؟ إنّ الأمر مختلف هنا؛ فالضوء يسقط على غشاء فقاعة الصابون ثم ينعكس مرّتين، وبعد الانعكاس تختفي ألوان وتظهر أخرى.

ماذا يحدث للضوء عند انعكاسه عن فقاعة الصابون؟ وكيف استفاد العلماء من هذه الظاهرة في زيادة كفاءة عدسات النظّارة الطبّية وآلة التصوير؟

الفكرة العامّة:

تهدف دراسة كلّ من الحركة الموجية وطبيعة الموجات وصفاتها، إلى فهم الظواهر الطبيعية المتعلّقة بالموجات، وما يُبنى عليها من علوم ومعارف وتطبيقات حياتية تكنولوجية، بما يُمهّد تسهيل استخدامها والتعامل معها.

الدرس الأول: التمثيل البياني للموجات

الفكرة الرئيسة: تنقل الموجات الطاقة، وتختلف في صفاتها نتيجة اختلاف مصادرها وطرائق انتشارها وطبيعة الأوساط التي تنتشر خلالها، وتوصف الموجة باستخدام مفاهيم خاصّة، مثل الطول الموجي والتردّد والسعة.

الدرس الثاني: الموجات الموقوفة

الفكرة الرئيسة: الموجات الموقوفة ظاهرة موجية يمكن دراستها بدقّة في الموجات الميكانيكية باستخدام علاقات رياضية؛ من أجل فهمها والاستفادة من خصائصها في كثير من التطبيقات.

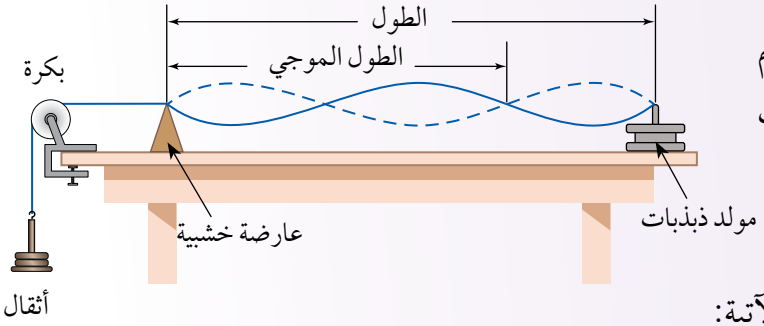
الدرس الثالث: التداخل والحيود لموجات الضوء

الفكرة الرئيسة: لفهم طبيعة الضوء وتفسير الظواهر الضوئية، افترض العلماء أن للضوء طبيعة مزدوجة (جُسيمية – موجية)؛ إذ تظهر صفاته الجسيمية في بعض الظواهر الفيزيائية كالتأثير الكهرضوئي، وتظهر صفاته الموجية في ظواهر فيزيائية أخرى كالتداخل والحيود.

تجربة استهلالية

قياس سرعة الموجات الميكانيكية في الأوساط الصلبة

الموادّ والأدوات: خيط متين طوله (1.5 m)، بكرة، مولّد ذبذبات ومولّد إشارة، حامل أثقال، مجموعة كتل، عارضة خشبية.



إرشادات السلامة: الحذر من سقوط الأجسام والأدوات على القدمين، ووضع النظّارات الواقية خوفًا من انقطاع الخيط.

خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي، أُنفّذ الخطوات الآتية:

1. أُثبّت مولّد الذبذبات على طرف الطاولة، وأُثبّت البكرة على الطرف المقابل.
2. أربطُ طرف الخيط بالجزء المهتزّ في مولّد الذبذبات وطرفه الآخر بحامل الأثقال، وأُمرّره فوق البكرة، ثم أضع العارضة الخشبية تحت الخيط بالقرب من البكرة، على نحو ما يظهر في الشكل.
3. أضع كتلة (200 g) على حامل الأثقال وأُشغّل مولّد الذبذبات عن طريق توصيله بمولّد الإشارة، ثمّ أُحرّك العارضة أفقيًّا كي ينتظم اهتزاز الخيط وأُشاهد بوضوح الموجات، وعدد القمم والقيعان المتكوّنة.
4. أقيس المسافة بين عقدتين متجاورتين (بطن) وأُكرّر هذا القياس لأكثر من موقع، ثم أحصل على الطول الموجي بمضاعفة المسافة.
5. أحصل على تردّد الموجات من تردّد الجهاز المولّد للذبذبات، وأدوّنه في الجدول.
6. أُكرّر خطوات التجربة 3 مرات بتغيير تردّد المولّد في كلّ مرة، وأُدوّن نتائجي في جدول البيانات.
7. أُغيّر الكتلة المعلّقة بالخيط، وأُكرّر التجربة مرّة إضافية وأُلاحظ الاختلاف في القياسات.

التحليل والاستنتاج:

1. أرسمُ النمط المتكوّن عند الحصول على شكل منتظم للموجات، وأُوضّح ما تعنيه العقدة.
2. أُفسّر سبب ثبات سرعة انتشار الموجات في المحاولات الثلاث الأولى.
3. أستنتجُ العلاقة بين التردّد والطول الموجي للموجات المنتشرة في الخيط.
4. أحسبُ سرعة الموجات باستخدام العلاقة الرياضية التي تربط بين السرعة وكلّ من التردّد والطول الموجي.
5. أُفسّر تأثير اختلاف الكتلة المعلّقة في سرعة الموجات في الخيط.
6. أستنتجُ: ما الطرائق التي يمكن بها زيادة الطاقة المنقولة في المدّة الزمنية نفسها خلال الحركة؟

الدرس 1

التمثيل البياني للموجات
Graphical Representation of Waves

الفكرة الرئيسة:
تنقل الموجات الطاقة، وتختلف في صفاتها نتيجة اختلاف مصادرها وطرائق انتشارها وطبيعة الأوساط التي تنتشر خلالها، وتوصف الموجة باستخدام مفاهيم خاصّة مثل الطول الموجي والتردّد والسعة.

نتاجات التعلم:
- أصف الموجة باستخدام مفاهيم خاصة مثل الطول الموجي والتردد والسعة.
- أصنف الموجات الى ميكانيكية أو كهرمغناطيسية.
- أستقصي مكوّنات الطيف الكهرمغناطيسي.

المفاهيم والمصطلحات:

الطول الموجي	Wavelength
السعة	Amplitude
التردد	Frequency
الزمن الدوري	Period

أنواع الموجات Types of Waves

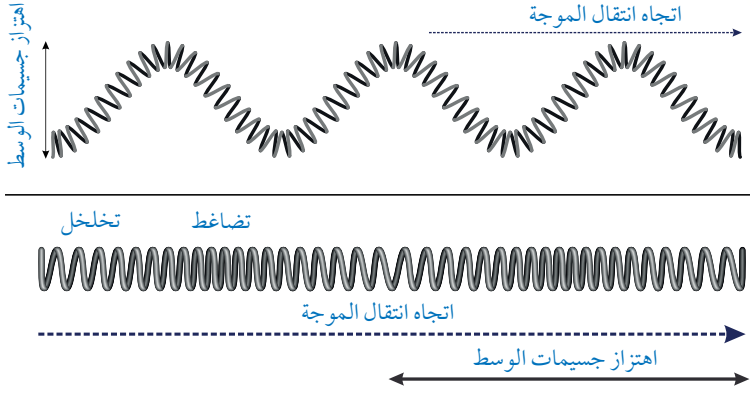
أُلاحظ الكثير من الظواهر الطبيعية والأحداث اليومية، التي تُعدّ شواهد على الحركة الموجية وطرائق انتشارها. وتعلّمتُ سابقًا أنّ الموجات تُقسم من حيث طبيعة انتشارها وحاجتها إلى وسط تنتقل خلاله إلى نوعين، هما: موجات ميكانيكية وموجات الإشعاع الكهرمغناطيسي.

الموجات الميكانيكية Mechanical Waves

تنتقل الموجات الميكانيكية على شكل اضطراب أو اهتزاز في أجزاء الوسط الناقل، ولحدوث هذه الموجات يجب توافر أمرين، هما: مصدر مهتزّ لتوليد الموجات ووسط مادي تنتقل فيه الموجات على شكل اهتزاز في الجُسيمات، التي يتكوّن منها الوسط. وتُقسم الموجات الميكانيكية من حيث طريقة الاهتزاز الذي تحدثه الموجات في جسيمات الوسط الناقل إلى نوعين، هما:

- **الموجات المستعرضة Transverse waves:** هي موجات تهتزّ فيها جُسيمات الوسط باتجاه يتعامد مع اتّجاه انتشار الموجة. ومن الأمثلة عليها الموجات المولّدة في نابض، على نحو ما يُبيّن الشكل (1/ أ).
- **الموجات الطولية Longitudinal waves:** هي موجات تهتزّ فيها جُسيمات الوسط باتّجاه يوازي اتّجاه انتشار الموجة. ومن الأمثلة عليها موجات الصوت في الهواء، والموجات التضاغطية في النابض، على نحو ما يُبيّن الشكل (1/ ب).

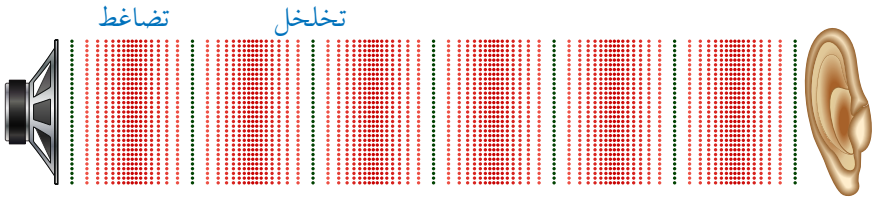
أتحقّق: أُفرّق بين الموجات المستعرضة والموجات الطولية.



(أ) موجة مستعرضة.

(ب) موجة طولية.

الشكل (1): الموجات المستعرضة والموجات الطولية.



الشكل (2): موجات الصوت في الهواء.

تتكوّن موجات الصوت في الهواء، من سلسلة تضاغطات وتخلخلات متتالية ومتساوية في المسافات في ما بينها؛ إذ يُمثّل التضاغط منطقة ضغط مرتفع، ويُمثّل التخلخل منطقة ضغط منخفض، على نحو ما يُبيّن الشكل (2). أي إنّ الإزاحة التي تحدث لجُسيمات الهواء تكون مع اتجاه انتشار الموجة أحيانًا وبعكس اتّجاه انتشارها أحيانًا أخرى.

موجات الإشعاع الكهرمغناطيسي
Electromagnetic Radiation Waves

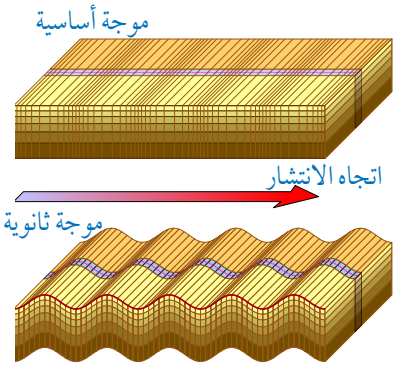
تُشكّل الموجات الكهرمغناطيسية ما يُعرف بالطيف الكهرمغناطيسي Electromagnetic spectrum، الذي يضمّ أنواعًا مختلفة من الإشعاع تعرّفتها في صفوف سابقة، من بينها: الأشعّة تحت الحمراء، والضوء المرئي، والأشعّة فوق البنفسجية، والأشعّة السينية، وغيرها.

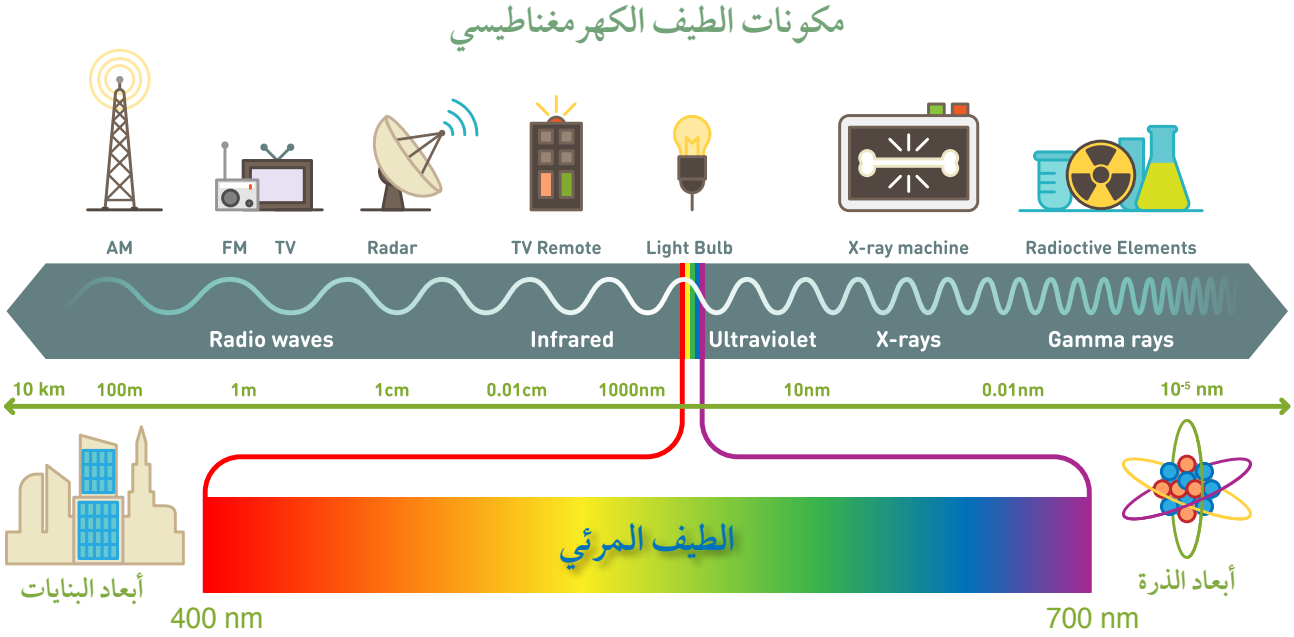
تتكوّن الموجات الكهرمغناطيسية من مجالين: كهربائي ومغناطيسي، تنتقل في الفراغ وفي الأوساط المادية، وهي لا تحتاج إلى إحداث اضطراب ميكانيكي في الوسط، بل تنتقل على شكل اضطراب في المجالين الكهربائي والمغناطيسي. وتتّصف الموجات الكهرمغناطيسية بصفات عامّة، أهمّها:

- تتكوّن من مجالين أحدهما كهربائي والآخر مغناطيسي يتذبذب أحدهما باتّجاه عمودي على الآخر، وهما متساويان في تردّدهما، الذي يُمثّل تردد الموجة نفسها.
- موجات مستعرضة يكون اتّجاه تذبذب المجالين الكهربائي والمغناطيسي متعامدًا مع اتّجاه انتشارها.
- تنتقل الموجات الكهرمغناطيسية جميعها في الفراغ بسرعة ($c = 3 \times 10^8$ m/s) مهما كان تردّدها.

الربط بعلم الزلازل

ينتشر نوعان من الموجات في ثلاثة أبعاد تحت سطح الأرض على طول الصدع الذي يحدث عنده الزلزال، هما؛ موجات طولية سرعتها (7-8 km/s) تُسمّى الموجات الأساسية Primary، وموجات مستعرضة سرعتها (4-5 km/s) تصل إلى مكان الرصد متأخّرة قليلًا؛ لذا، تُسمّى ثانوية Secondary. وعن طريق تسجيل الفاصل الزمني بين لحظتَي وصول هذين النوعين من الموجات إلى جهاز الرصد Seismograph، يمكن تحديد بُعد مكان صدور تلك الموجات. وعن طريق استخدام ثلاث محطّات رصد في مواقع متباعدة بعضها عن بعض، يُحدّد موقع بؤرة الزلزال بدقّة.





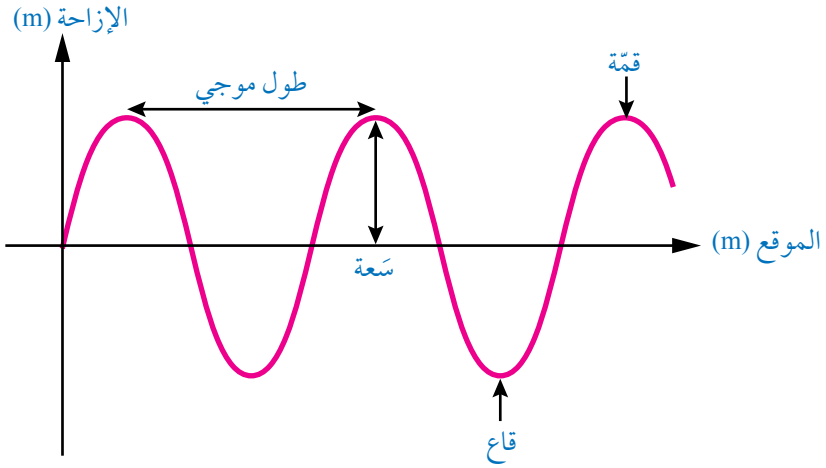
الشكل (3): مكوّنات الطيف الكهرمغناطيسي المرئي وغير المرئي.

أستخرجُ من الشكل تطبيقًا تكنولوجيًا واحدًا لاستخدام كلّ من موجات الراديو، وموجات الأشعّة تحت الحمراء، وموجات الأشعّة السينية، وموجات أشعّة غاما.

تتراوح الأطوال الموجية للموجات الكهرمغناطيسية من 10^{4} m (موجات الراديو) إلى 10^{-14} m (أشعّة غاما)، وتختلف تبعًا لذلك طاقة كلٍّ منها؛ فأشعّة غاما أكبرها طاقة، وموجات الراديو أصغرها طاقة. يُبيّن الشكل (3) مكوّنات الطيف الكهرمغناطيسي المرئي وغير المرئي، وأطوالها الموجية، وبعض استخداماتها.

للموجات الكهرمغناطيسية العديد من التطبيقات في الحياة اليومية، ففي المجال الطبي، تستخدم أشعة غاما، ذات الطاقة العالية لقتل الخلايا السرطانية. وتستخدم الأشعة السينية (X-ray) من أجل تصوير العظام، مما يساعد الأطباء على تحديد أماكن الكسور. وفي مجال الاتصالات تستخدم موجات الراديو لنقل الصوت والصورة إلى مسافات بعيدة كالبث التلفزيوني، كما تشمل استخداماتها أغلب الاتصالات اللاسلكية من هواتف محمولة وشبكات الإنترنت وغيرها.

أصمّم باستخدام برنامج السكراتش (Scratch) عرضًا يوضّح طريقة اهتزاز المجالين الكهربائي والمغناطيسي، في أثناء تقدّم الموجة الكهرمغناطيسية، ثمّ أشارك فيه زملائي/ زميلاتي في الصفّ.



الشكل (4): الطول الموجي والسعة لموجة مستعرضة.

وصف الموجات Wave Description

الطول الموجي والسعة Wavelength and Amplitude

تعلّمتُ سابقًا أنّ أشكال الحركة الموجية جميعها توصف باستخدام مفاهيم خاصّة أهمّها **الطول الموجي** (λ) **Wavelength**، وهو المسافة بين أيّ نقطتين متتاليتين ومتماثلتين في إزاحتيهما، كأن تكون بين قمّتين متتاليتين على نحو ما هو مبيَّن في الشكل (4)، الذي يُبيّن تمثيلًا بيانيًّا للإزاحة التي تُحدثها الموجة لجُسيمات الوسط بالنسبة إلى بعدها عن مصدر الاهتزاز. وألاحظ أيضًا في الشكل **السعة** **Amplitude** (*A*) وهي أقصى إزاحة تُحدثها الموجة لجُسيمات الوسط بالنسبة إلى موقع اتّزانها. وتزداد الطاقة التي تنقلها الموجة الميكانيكة بزيادة سعتها.

السرعة والتردّد والزمن الدوري للموجات Speed, Frequency and Period of Waves

إضافة إلى ما سبق، يمكن وصف الموجات باستخدام كمّيات أخرى، مثل سرعة الموجة (*v*)، **والتردّد** **Frequency** (*f*) وهو عدد الموجات التي تعبر نقطة ثابتة في الوسط خلال ثانية واحدة.

أمّا سرعة الموجة في الوسط الواحد فهي ثابتة ويعتمد مقدارها على نوع الوسط وصفاته، وتُحسب بدلالة الطول الموجي والتردّد، باستخدام العلاقة الرياضية:

$$v = \lambda f$$

أفكّر: أيّ الكمّيات الآتية الخاصّة بوصف الموجة تعتمد على مصدر الموجة؟ وأيّها تعتمد على الوسط الناقل؟ السرعة، السعة، التردّد، الطاقة.

وتوصف الموجات أيضًا باستخدام كمّية فيزيائية أخرى، هي **الزمن الدوري** **Period** (T) الذي يُعرّف بأنّه الزمن اللازم لمرور موجة كاملة خلال نقطة محدّدة، ويتناسب الزمن الدوري للموجة عكسيًّا مع تردّدها، على نحو ما تُبيّن العلاقة الرياضية الآتية:

$$T = \frac{1}{f}$$

من الواضح أنّ وحدة التردّد هي (s^{-1}) وفقًا للنظام الدولي للوحدات، وتُعرف بوحدة هيرتز (Hz). فمثلًا، الموجة التي زمنها الدوري (0.25 s)، يكون تردّدها ($4\ s^{-1}$)، أو (4 Hz).

بتعويض الزمن الدوري في العلاقة الخاصّة بالسرعة، يمكن حساب سرعة الموجة بدلالة زمنها الدوري:

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

أعدّ فيلمًا قصيرًا باستعمال برنامج صانع الأفلام (movie maker) يوضّح كيف تُكرّر الموجة نفسها في الوسط الواحد بطول موجي وتردّد ثابتين، بالتزامن مع حركة دائرية لها التردّد الموجي نفسه، ثمّ أشارك فيه زملائي/ زميلاتي في الصف.

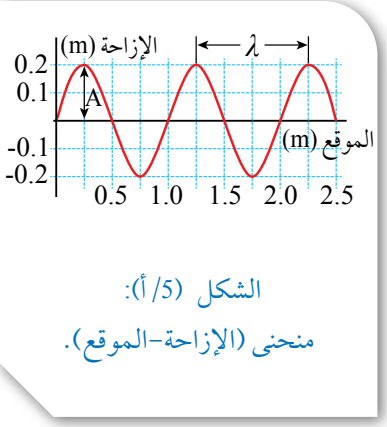
✓ **أتحقّق:** أُوضّح المقصود بكلّ من التردّد والزمن الدوري، ثم أصف العلاقة بينهما.

التمثيل البياني للموجة Wave Graphs

يمكن تمثيل الحركة الموجية بيانيًّا بطريقتين؛ الطريقة الأولى منحنى (الإزاحة – الموقع)، والطريقة الثانية منحنى (الإزاحة – الزمن).

منحنى (الإزاحة – الموقع): Displacement-position Graph

يصف هذا المنحنى البياني إزاحة جُسيمات الوسط عن نقطة الاتّزان عند مرور الموجة فيه، فالمنحنى يُشبه صورة ثابتة (Snapshot) تُبيّن الموجة في لحظة زمنية معيّنة؛ أي عند تثبيت الزمن. على نحو ما يظهر في الشكل (5/ أ)، إذ يُمثّل التدريج على محور (x) مواقع جُسيمات الوسط المهتزّة وبُعدها عن مصدر الموجة، ويُمثّل التدريج على محور (y) إزاحة جُسيمات الوسط عن نقطة الاتّزان إلى أعلى وأسفل. ويظهر في هذا التمثيل البياني كلّ من الطول الموجي، والسعة.

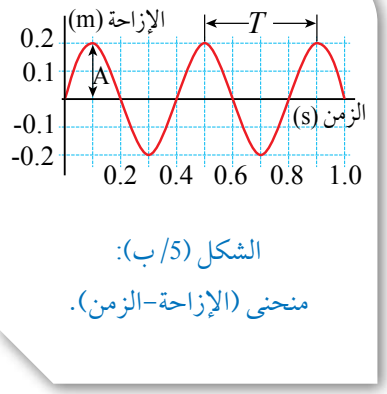


الشكل (5/ أ):
منحنى (الإزاحة–الموقع).

منحنى (الإزاحة – الزمن): Displacement-time Graph

يصف هذا المنحنى البياني شكل الموجة بالنسبة إلى الزمن؛ إذ يصف الإزاحة الرأسية لجُسيم واحد من جُسيمات الوسط عن نقطة اتّزانه، وكيف يتغيّر موقع هذا الجُسيم مع مرور الزمن. دون أن ننظر إلى جُسيمات أخرى من الوسط، على نحو ما يُبيّن الشكل (5/ ب).

أُلاحظ أنّ النقاط التي تتساوى في إزاحتها على المنحنى، لا تعود لجُسيمات مختلفة، بل تُمثّل مواقع جُسيم واحد من الوسط عند لحظات زمنية دورية مختلفة؛ فالجُسيم الواحد يصل إلى أعلى موقع، ثمّ ينخفض إلى أسفل موقع، ثم يعود إلى موقع اتّزانه خلال دورة واحدة. وأُلاحظ على الشكل تلك الدورة ممثّلة بالزمن الدوري للموجة، وألاحظ أيضًا سَعة الموجة ممثّلة بأقصى إزاحة رأسية للجُسيم نفسه.



الشكل (5/ ب):
منحنى (الإزاحة–الزمن).

✓ **أتحقّق:** أستنتجُ: عن طريق المقارنة بين الشكلين (5/ أ) و (5/ ب)، تماثلًا في الشكل بين الطول الموجي والزمن الدوري. أُفسّر هذا التماثل.

المثال 1

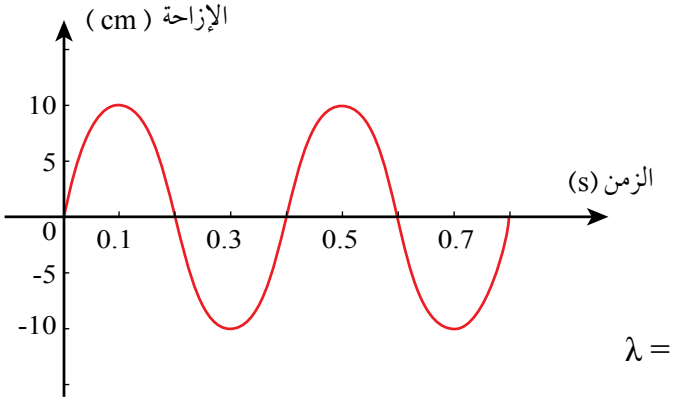
يبين الشكل (6) منحنى (الإزاحة – الزمن) لحركة موجية. بالاعتماد على البيانات المثبتة على الشكل، وإذا علمت أن الطول الموجي (10 cm). أجد ما ياتي:

أ . السعة

ب. الزمن الدوري

جـ. التردد

د . سرعة انتشار الموجات.



الشكل (6): منحنى (الإزاحة– الزمن) لحركة موجية.

المعطيات: منحنى (الإزاحة – الزمن)، $\lambda = 10$ cm

المطلوب: $A = ?,\ T = ?,\ f = ?,\ v = ?$

الحل:

أ. من الشكل أجد السعة؛ وهي أقصى إزاحة عن موقع الاتزان:

$A = 10$ cm

ب. من الشكل أتوصل إلى أن زمن الدورة الواحدة (الزمن الدوري):

$T = 0.4$ s

جـ. أحسب التردد من العلاقة :

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.4} = 2.5 \text{ Hz}$$

د. أحسب السرعة من العلاقة :

$$v = \frac{\lambda}{T} = \frac{10}{0.4} = 25 \text{ cm/s}$$

تمرين

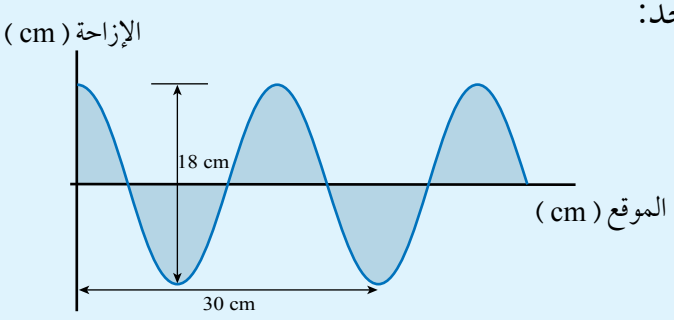
يبين الشكل (7) منحنى (الإزاحة–الموقع) لحركة موجية ترددها (25Hz). بالاعتماد على البيانات المكتوبة على الشكل، أجد:

أ . السعة.

ب. الطول الموجي.

جـ. الزمن الدوري.

د . السرعة.



الشكل (7): منحنى (الإزاحة–الموقع) لحركة موجية.

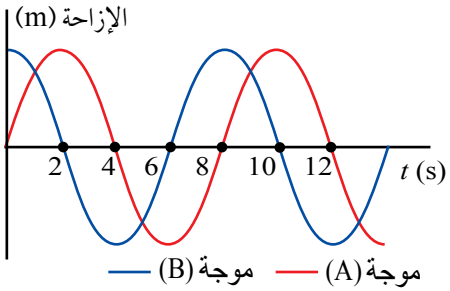
المثال 2

موجتان (A, B) الطول الموجي لكلّ منهما (0.24 m) تنتشران في الوسط نفسه. يُبيّن الشكل (8) منحنى (الإزاحة–الزمن) للموجتين معًا. بناءً على الشكل؛ أجد ما يأتي:

أ . الزمن الدوري والتردّد لكلّ من الموجتين (A, B).

ب. الفارق الزمني الذي تأخّرت به إحدى الموجتين عن الأخرى.

جـ. الفرق في زاوية الطور بين الموجتين.



الشكل (8): موجتان متساويتان في التردّد والطول الموجي ومختلفتان في الطور.

المعطيات: الشكل، $\lambda = 0.24\ m$

المطلوب: $T = ?\ ,\ f = ?\ ,\ \Delta t = ?\ ,\ \Delta\phi = ?$

الحلّ: أ . أستخرجُ من الشكل، الزمن الدوري لكلّ موجة:

$$T_A = 8\ s - 0\ s = 8\ s\ ,\quad T_B = 10\ s - 2\ s = 8\ s$$

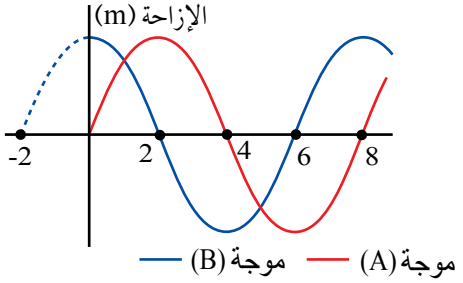
تردّد كلّ موجة هو مقلوب الزمن الدوري لها:

$$f_A = \frac{1}{T_A} = \frac{1}{8} = 0.125\ Hz$$

$$f_B = \frac{1}{T_B} = \frac{1}{8} = 0.125\ Hz$$

ب. أُلاحظ من الشكل (9) أنّ الموجة (A) تأخّرت في حركتها عن الموجة (B) بمقدار ربع موجة، أي إنّ الموجة (B) بدأت الاهتزاز قبل الموجة (A) بثانيتين؛ أي إنّ الفارق الزمني بينهما:

$$\Delta t = 2\ s$$



الشكل (9): صنعت الموجة (B) إزاحة عظمى عند (t = 0s)؛ لذا، يمكنني أن أتخيّل أنّها بدأت الاهتزاز من (t = -2 s).

جـ. زاوية فرق الطور: أُلاحظ من الشكلين أنّ الفارق الزمني بين الموجتين يساوي ربع الزمن الدوري، ونظرًا إلى أنّ الزمن الدوري (T) تقابله زاوية طور مقدارها (2π)؛ فإنّ الفرق في زاوية الطور بينهما يساوي:

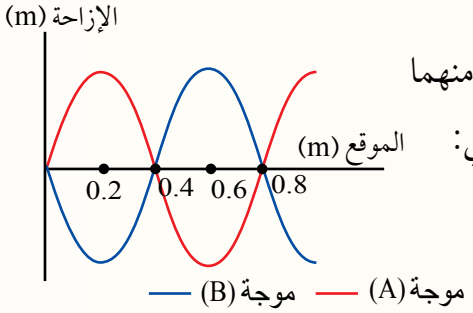
$$\Delta\phi = \frac{1}{4}(2\pi) = \frac{\pi}{2}\ rad\ ,\quad (90°)$$

مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** أمثّل بيانيًّا الحركة الموجية بطريقتين؛ الأولى منحنى (الإزاحة–الموقع) والثانية منحنى (الإزاحة–الزمن)، وأوضح الوصف الذي يقدمه كل منحنى عن الحركة الموجية، وما يمثله التدريج على محور (y) ومحور (x).

2. **أُحلّل:** أُصنّف الموجات الآتية إلى ميكانيكية أو كهرمغناطيسية: الأشعّة تحت الحمراء، الأشعّة السينية، الموجات الصوتية، موجات الضوء المرئي، الموجات المنتشرة في نابض، الموجات الزلزالية.

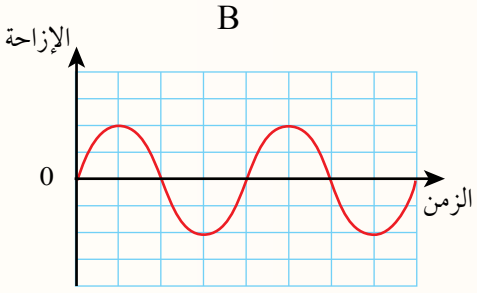
3. **أستعملُ المتغيّرات:** موجتان (A, B) الزمن الدوري لكلّ منهما (0.40 s) تنتشران في وسط واحد. بناءً على الشكل، أجد ما يأتي:

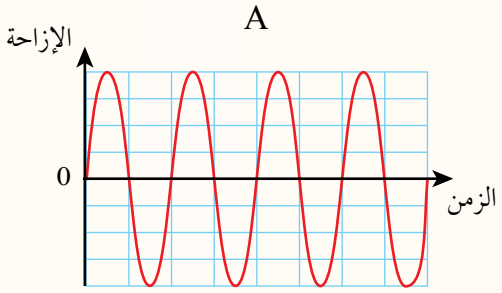


أ . الطول الموجي لكلّ من الموجتين (A, B).

ب. فرق الطور بين الموجتين.

4. **التفكير الناقد:** يبين الشكل منحنى (الإزاحة–الزمن) لحركتين موجيتين (A) و (B) تنتقلان في الوسط نفسه. أقارن بين الحركتين من حيث: السعة، التردد، الطول الموجي، والسرعة.





الفكرة الرئيسة:

الموجات الموقوفة ظاهرة موجية يمكن دراستها بدقّة في الموجات الميكانيكية باستخدام علاقات رياضية؛ من أجل فهمها والاستفادة من خصائصها في كثير من التطبيقات.

نتاجات التعلّم:

- أصف تراكب موجتين.
- أصف الموجات الموقوفة في وتر مشدود، وأحدّد شروط تكوّن هذه الموجات.
- أحسب التوافقات التي يهتز بها وسط ما (وتر مشدود، عمود هواء في أنبوب مفتوح النهاية أو مغلق النهاية).

المفاهيم والمصطلحات:

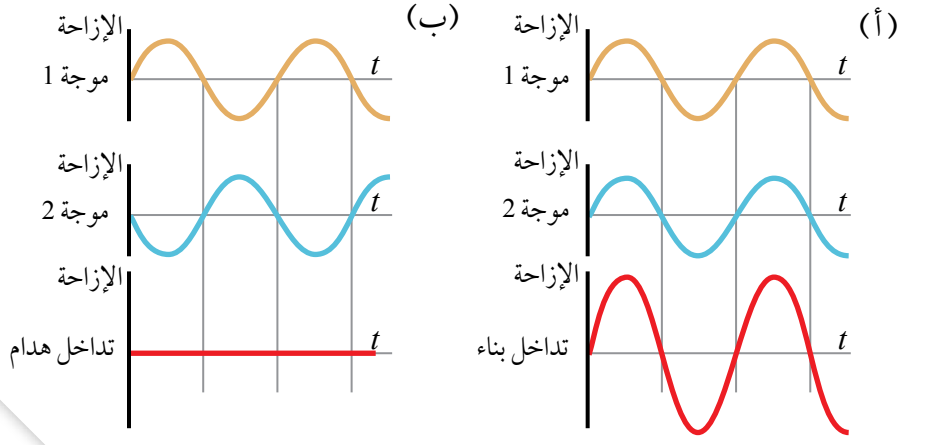
تراكب	Superposition
موجة موقوفة	Standing Wave
عقدة	Node
بطن	Antinode

ظواهر موجية Wave Phenomena

درستُ في صفوف سابقة بعض الظواهر الموجية مثل الانعكاس والحيود. لتعميق فهمي لظاهرتي التداخل والحيود، سأدرس في ما يأتي تراكب موجتين.

التراكب والتداخل Superposition and Interference

- **التراكب**: المعنى العامّ لكلمة تراكب؛ أن تضع شيئًا فوق آخر، لكن في حالة الموجات؛ فإنّ **التراكب Superposition**، يعني جمع الإزاحات الناتجة من موجتين (أو أكثر) عند التقائهما في نقطة في الوسط الذي تنتقلان خلاله. ويحدث التراكب في كلا النوعين؛ الموجات الطولية والموجات المستعرضة، ولكن يُشترط أن تكون الموجتان من النوع نفسه.
- **مبدأ تراكب الموجات Superposition principle:** ينصّ على أنّه عند حدوث تراكب موجتين؛ فإنّ الإزاحة الناتجة عند أي نقطة في الوسط تساوي ناتج الجمع المتجهي للإزاحتين الناتجتين عن الموجتين وهما منفردتان. الشكل (10/ أ) يوضح تراكب موجتين لهما نفس التردد والطول الموجي والسعة ومتفقتان في الطور، في حين أنّ



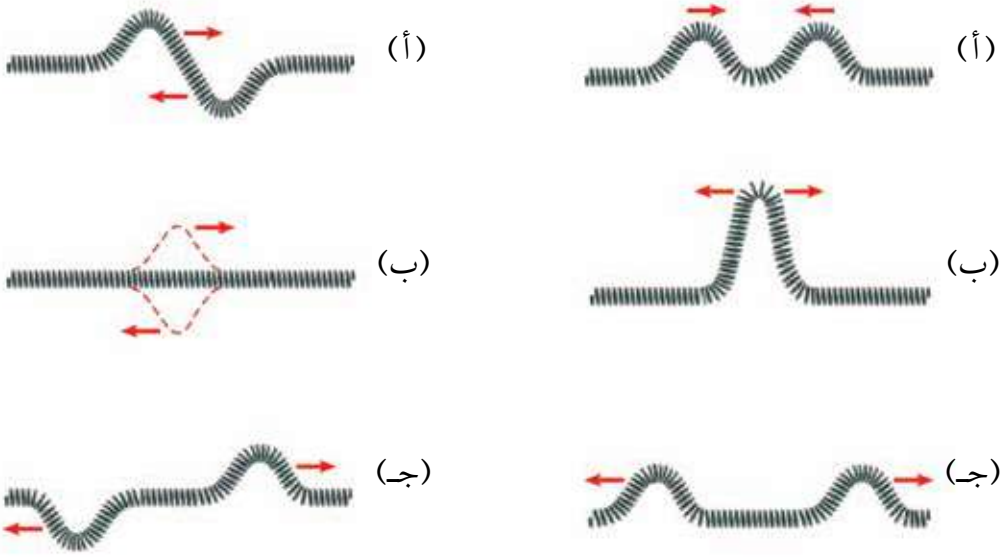
الشكل (10): منحنى (الإزاحة - الزمن) عند التقاء موجتين عند نقطة في الوسط الذي تنتقلان خلاله.

الشكل (10/ ب) يوضّح تراكب موجتين لهما نفس التردد والطول الموجي، لكن الفرق في الطور بينهما يساوي 180^{o}.

- **التداخل البنّاء والتداخل الهدّام**: عندما تكون السعة الناتجة من التقاء موجتين أكبر من السعة لكل منهما؛ نحصل على تداخل يُسمّى تداخلًا بنّاءً Constructive interference. يُبيّن الشكل (10/ أ) أنّ سَعة الموجة الناتجة عن التداخل البنّاء لموجتين متساويتين في السعة، تساوي ضعفَي سَعة أيّ من الموجتين. وعندما تكون إزاحات الموجتين المتراكبتين عند نقطة في الوسط متعاكستين؛ فإنّ نمط التداخل الناتج يُسمّى تداخلًا هدّامًا Destructive interference، وفي حال كانت الموجتان المتداخلتان متساويتين في السعة؛ تُلغي إحدى الموجتين الأخرى، فتكون الإزاحة المحصّلة صفرًا، على نحو ما يُبيّن الشكل (10/ ب).

✓ **أتحقّق:** عند التقاء موجتين من النوع نفسه، متساويتين في الطول الموجي والتردّد في نقطة واحدة، ما شروط الحصول على إزاحة محصّلة مقدارها يساوي صفرًا (تداخل هدّام تام)؟

أفكّر: حركتان موجيتان متساويتان في السعة تنتقلان في نابض على نحو ما هو مبين في الشكلين التاليين. أصفُ لكل من الشكلين ما يحدث لحظة التقاء الموجتين وبعد التقائهما.



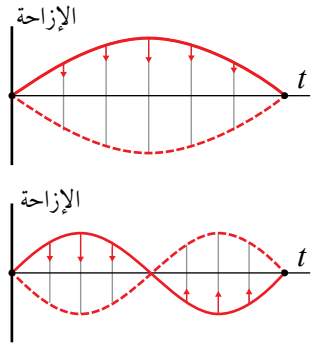
الموجات الموقوفة في الأوتار والأعمدة الهوائية
Standing Waves in Strings and Air Columns

تنتج الموجات الموقوفة من تراكب موجتين ضمن شروط محدّدة، وهي ظاهرة تحدث في الموجات المستعرضة والموجات الطولية. **والموجات الموقوفة Standing waves** هي أنماط موجية ثابتة الأشكال تنتج عن تراكب موجتين متساويتين في التردّد والطول الموجي والسعة، تنتقلان في اتّجاهين متعاكسين في الوسط نفسه. سنتناول مثالًا على الموجات المستعرضة الموقوفة وهي موجات الوتر، ومثالًا على الموجات الطولية الموقوفة وهي موجات الأعمدة الهوائية.

الموجات الموقوفة في وتر Standing Waves in a String

عندما نُثبّت وترًا من طرفيه ونُحرّكه من منتصفه على نحو ما في التجربة الاستهلالية، تنتشر فيه موجات مستعرضة، وتنعكس مقلوبة عن طرفيه المثبّتين وهي مساوية للموجة الأصلية في التردّد والطول الموجي. وبافتراض عدم ضياع الطاقة، تكون الموجة المنعكسة مساوية في سَعتها للموجة الأصلية، عندها سيحدث تداخل بين الموجتين يعتمد نوعه على فرق الطور بينهما، فيكون هدّامًا في بعض أجزاء الوتر وبنّاءً في أجزاء أخرى. فيظهر على شكل موجات مستعرضة موقوفة كما في الشكل (11). وينتج من التقاء موجتين تنتشران باتّجاهين متعاكسين، ظهور نقاط في الوتر تُسمّى عقدًا وأخرى تُسمّى بطونًا. **والعقدة Node** هي نقطة تكون الإزاحة المحصّلة عندها صفرًا **والبطن Antinode** هو نقطة تكون الإزاحة المحصّلة عنده عظمى.

سُمّيت الموجة الموقوفة بهذا الاسم؛ لأنّها لا تتقدّم، فاهتزازها ناتج من اهتزاز أجزاء الوتر بسَعة تتغيّر من الصفر في مناطق العُقد إلى قيمتها العظمى (A) في مناطق البطون.

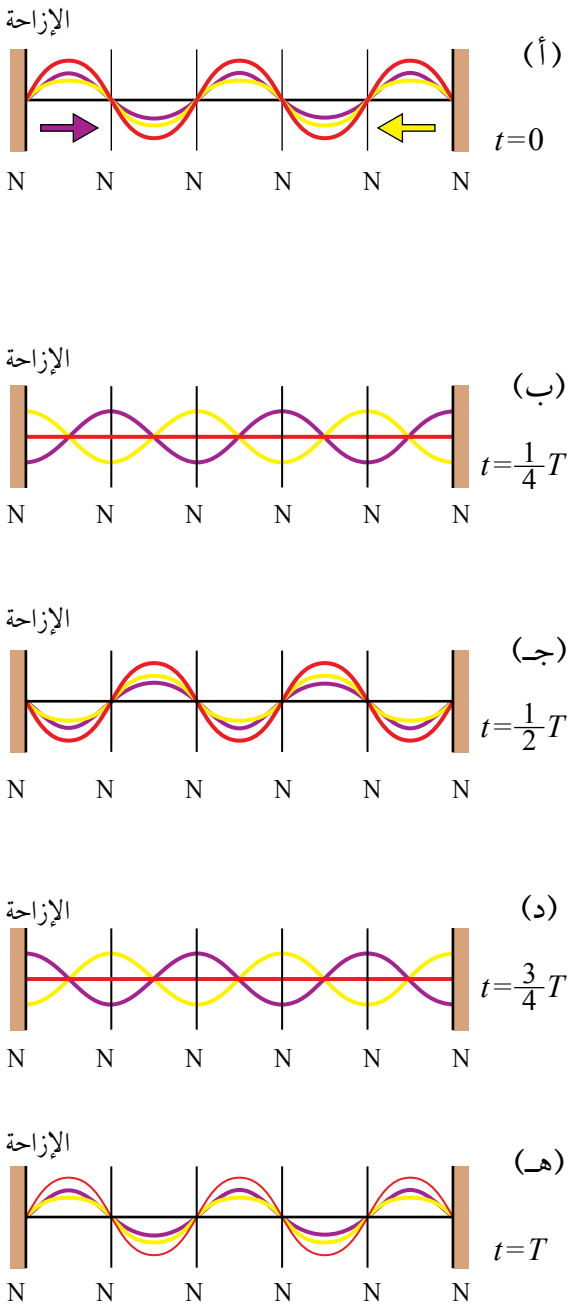


الشكل (11): نمطان مختلفان من الموجات الموقوفة المتكوّنة في وتر مشدود.

✓ **أتحقّق:** أُوضّح المقصود بكلّ من العقد والبطون في الموجات الموقوفة.

يوضّح الشكل (12) منحنى (الإزاحة–الزمن) لموجتين؛ الأولى (اللون البنفسجي) تنتقل في وتر مشدود باتجاه اليمين، والثانية (اللون الأصفر) تنتقل في الوتر نفسه باتّجاه اليسار، يتكوّن الشكل من خمسة مشاهد ثابتة رُصِدت في لحظات زمنية مختلفة. يتّضح من الشكل الموجة الموقوفة الناتجة من تراكب الموجتين عند لحظات زمنية معينة بدلالة الزمن الدوري (T) (اللون الأحمر). أستنتج من الشكل ما يأتي:

الشكل (12): منحنى (الإزاحة – الزمن) لموجتين متراكبتين والموجة الموقوفة الناتجة، عند لحظات زمنية مختلفة.

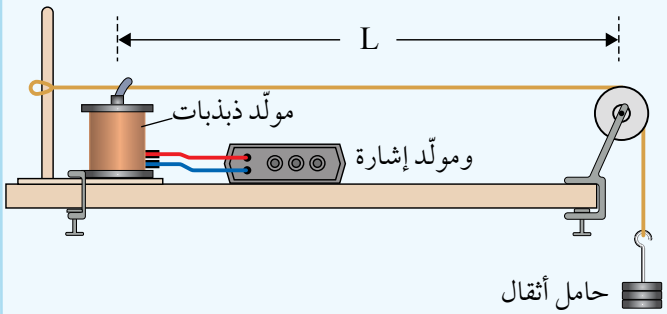


- مشهد (أ): عند اللحظة الزمنية ($t = 0$) في بداية الحركة الموجية، حيث الفرق في الطور بين الموجتين يساوي صفرًا يظهر فيها التقاء القمم مع القمم والقيعان مع القيعان فتنتج منها البطون، ويتضح تكوّن العقد (N) التي لا يحدث عندها اهتزاز في الموجة الموقوفة الناتجة.
- مشهد (ب): عند اللحظة الزمنية ($t=\frac{1}{4}T$)، تقدّمت كلّ موجة بمقدار ($\frac{1}{4}\lambda$) فأصبح فرق الطوربينهما يساوي π، وتلتقي القمم مع القيعان فتنعدم الإزاحة في كلّ أجزاء الوتر وتظهر على شكل خط مستقيم.
- مشهد (جـ): في اللحظة الزمنية ($t=\frac{1}{2}T$)، حيث تقدّمت كلّ موجة بمقدار ($\frac{1}{2}\lambda$) فأصبح فرق الطور بين الموجتين يساوي 2π. تلتقي القمم مع القمم والقيعان مع القيعان فتنتج منها البطون، ويتّضح تكوّن العقد (N) التي تنعدم عندها الإزاحة في الموجة الموقوفة الناتجة.
- مشهد (د): في اللحظة ($t=\frac{3}{4}T$)، تقدّمت كلّ موجة بمقدار ($\frac{3}{4}\lambda$) فأصبح فرق الطور بين الموجتين يساوي 3π. ألاحظ انعدام الإزاحة في كل أجزاء الوتر كما في المشهد (ب).
- مشهد (هـ): في اللحظة ($t = T$)، تقدّمت كلّ موجة مسافة بمقدار (λ)، فأصبح فرق الطور بين الموجتين يساوي 4π. وتكرّر المشهد (أ) الذي حدث عند اللحظة ($t = 0$).

التجربة 1

استقصاء تردّدات الموجات الموقوفة في وتر مشدود

الموادّ والأدوات: مولّد ذبذبات ومولّد إشارة، خيط نايلون، بكرة صغيرة، ملزمتان للتثبيت، حامل أثقال ومجموعة أثقال.



إرشادات السلامة: الحذر من سقوط الأجسام والأدوات على القدمين، ووضع النظّارات الواقية خوفًا من انقطاع الخيط.

خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي، أُنفّذ الخطوات الآتية:

1. أُركّب أدوات التجربة على نحو ما يظهر في الشكل المجاور، مستخدمًا الملزمتين في تثبيت البكرة ومولّد الذبذبات في الطاولة.
2. أُعلّق كتلة (50 g) في الخيط، ثمّ أُشغّل مولّد الذبذبات على أقلّ تردّد ممكن.
3. أبدأ بزيادة التردّد وأُراقب الخيط حتى تبدأ الموجات الموقوفة بالتكوّن، أُلاحظ عدد البطون والعُقد المتكوّنة، وأقيس المسافة بين العقدتين وأُدوّنها في جدول، ثمّ أُدوّن قياس التردّد.
4. أزيد من مقدار التردّد، وأُراقب تكوّن نمط آخر من الموجات الموقوفة. أُلاحظ عدد البطون والعُقد المتكوّنة، وأقيس المسافة بين عقدتين وأُدوّنها في جدول، ثمّ أُدوّن قياس التردّد.
5. أُكرّر الخطوة (4)، وأُدوّن القياسات والملاحظات في الجدول.

التحليل والاستنتاج:

1. **أصف** النمط الأول وأرسمُ شكل الموجة المتكوّنة، وأُحدّد عدد العقد والبطون فيها، ثمّ أُقارن بين طول الخيط وطول الموجة المتكوّنة.
2. **أصف** النمطين الثاني والثالث بالطريقة نفسها، التي وصفت بها النمط الأول.
3. **أستنتجُ** علاقة بين طول الخيط وعدد العُقد والطول الموجي للنمط الأول، ثمّ للأنماط المتكوّنة جميعها.
4. **أستنتجُ** علاقة بين طول الخيط والطول الموجي والتردّد للنمط الأول، ثمّ للأنماط المتكوّنة جميعها.
5. **أتوقّع** أثر زيادة الكتلة المعلّقة في القياسات السابقة.

التوافقات harmonics

توصّلتُ في التجربة السابقة إلى أنّ نمط الموجات الموقوفة المتولّدة في الوتر المشدود يتغيّر بتغيّر التردّد، ولاحظتُ وجود تردّد أدنى للمصدر المولّد للموجات الموقوفة، يُسمّى التوافق الأول First harmonic. ويُبيّن الشكل (13) موجات موقوفة في وتر مشدود؛ إذ يُظهر الشكل (أ) النمط الناتج من التوافق الأول وتتكوّن فيه عُقدتان وبطن واحد. وألاحظ أيضًا أنماط التوافقات؛ الثاني والثالث والرابع، التي تظهر مع زيادة التردّد. يمكنني التوصّل إلى العلاقات الرياضية اللازمة لمعرفة التردّد والطول الموجي للموجات الموقوفة المتكوّنة في وسط ما؛ بمعرفة رقم التوافق المتكوّن (n) وسرعة انتشار الموجات في الوسط (v).

أُلاحظ في التوافق الأول أنّ طول الوتر (L) يساوي نصف موجة فقط، أي إنّ: $\lambda = 2L$

ويُعبَّر عن الطول الموجي للتوافق رقم (n) بالعلاقة:

$$n\lambda_n = 2L$$

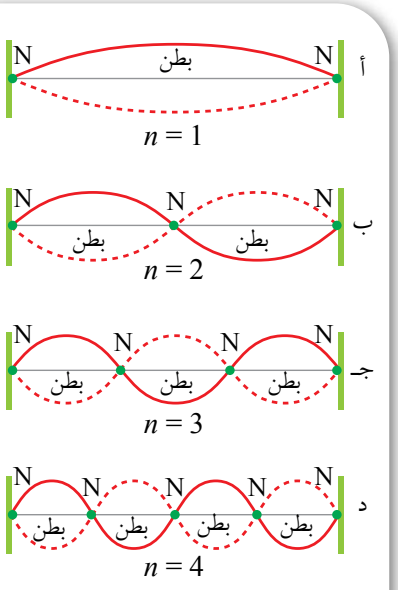
أمّا التردّد الأول فيُساوي:

$$f_1 = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{2L}$$

ويُعبَّر عن تردّد التوافق رقم (n) بالعلاقة:

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{nv}{2L} = nf_1$$

باستخدام العلاقات السابقة، يمكن تلخيص صفات الأنماط الواردة في الشكل (13) ضمن الجدول (2).



الشكل (13): موجات موقوفة بتردّدات مختلفة في وتر مشدود.

الربط بالموسيقى

تُعزف آلة الكمان وآلة الربابة باستخدام قوس يحتوي على حزمة مشدودة من الشعر، تنزلق على أوتار الآلة؛ فتنشأ في الوتر موجات موقوفة. وعند وضع الأصبع على الوتر يُحدّد طول الوتر والطول الموجي فيصبح قصيرًا، وتنتج نغمة عالية الدرجة مقارنة مع نغمة الوتر الكامل.

جدول 2: العُقد والطول الموجي والتردّد لأنماط الموجات الموقوفة في وتر.

الشكل	التوافق	العُقد	الطول الموجي	التردّد
أ	الأول	2	$\lambda = 2L$	$f = \frac{v}{2L}$
ب	الثاني	3	$2\lambda = 2L$	$f = \frac{2v}{2L}$
جـ	الثالث	4	$3\lambda = 2L$	$f = \frac{3v}{2L}$
د	الرابع	5	$4\lambda = 2L$	$f = \frac{4v}{2L}$

المثال 5

أقلّ تردّد يمكن توليده في وتر قيثارة (196 Hz). أحسبُ التردّدين التاليين اللذين يمكن توليدهما في الوتر، مع ثبات العوامل الأخرى.

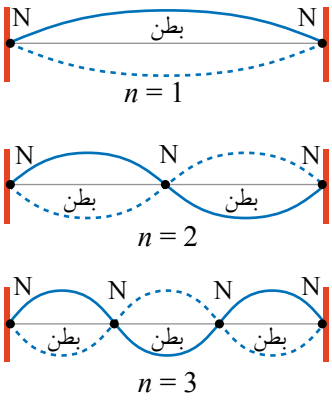
المعطيات: $f_1 = 196\ \text{Hz}$, $n = 1$

المطلوب: $f_2 = ?$, $f_3 = ?$

الحلّ:

أرسمُ الموجات الموقوفة في الوتر في التوافقات الثلاثة الأولى، على نحو ما في الشكل (14)، حيث:

$n = 1$, $n = 2$, $n = 3$



الشكل (14): موجات موقوفة في وتر قيثارة، في التوافقات الأول والثاني والثالث.

التوافق الأول:

$$f_n = \frac{nv}{2L} \Rightarrow f_1 = \frac{1 \times v}{2L}$$

$$196 = \frac{1 \times v}{2L} \Rightarrow \frac{v}{2L} = 196$$

التوافق الثاني:

$$f_2 = \frac{2v}{2L} = 2 \times 196 = 392\ \text{Hz}$$

التوافق الثالث:

$$f_3 = \frac{3v}{2L} = 3 \times 196 = 588\ \text{Hz}$$

المثال 6

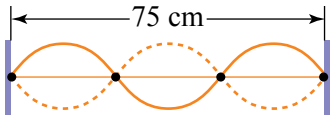
يُبيّن الشكل (15) موجات موقوفة في وتر طوله (75 cm)، وتردّد الموجات يساوي (18 Hz). أحسبُ كلًّا من:

أ .الطول الموجي.

ب. سرعة الموجة في الوتر.

المعطيات: الشكل، $L = 0.75\ \text{m}$, $f_3 = 18\ \text{Hz}$

المطلوب: $\lambda_3 = ?$, $v = ?$



الشكل (15): موجات موقوفة في وتر مشدود طوله (75 cm).

الحلّ:

أ . من الشكل، أجد أنّ: $n = 3$

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} = \frac{2 \times 0.75}{3} = 0.5\ \text{m}$$

ب. لحساب سرعة الموجة أستخدمُ العلاقة:

$$v = \lambda_n f_n = 0.5 \times 18 = 9\ \text{m/s}$$

الشكل (16): عازف البوق.

الموجات الموقوفة في الأعمدة الهوائية
Standing Waves in Air Columns

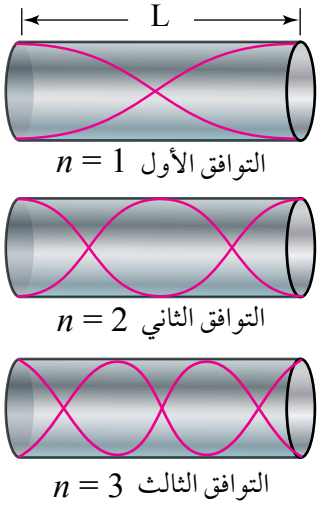
يُحدِث عازف البوق الذي يظهر في الشكل (16) اهتزازات عند طرف البوق، تنتقل خلال عمود الهواء إلى داخل البوق على شكل موجات صوتية، وتنعكس عن الطرف الثاني للبوق، سواء أكان مغلقًا أم مفتوحًا، فيحدث تداخل بين الموجات الصادرة والموجات المنعكسة، وتنشأ موجات طولية موقوفة في عمود الهواء، كتلك المستعرضة التي تحدث في وتر مشدود. يُغيّر العازف التردّد بتغيير طول عمود الهواء، عندما يفتح الصمام بضغط الأصبع؛ فتتغيّر النغمة.

أبحثُ

أبحث في مصادر المعرفة الموثوقة والمتاحة، كيف تنعكس موجات الصوت في الأعمدة الهوائية عند الطرف المفتوح؟

الأعمدة الهوائية المفتوحة Open Air Columns

نقصد بعمود الهواء المفتوح، أن يكون مفتوح البداية ومفتوح النهاية. تتكوّن الموجات الموقوفة في الأعمدة الهوائية المفتوحة على أنْ تكون سَعة الاهتزاز عظمى عند نهايتَي الأنبوب، وتظهر في الشكل (17) على هيئة بطون. تنشأ الموجات الموقوفة بتردّدات مختلفة بما يُحقّق مجموعة من التوافقات، فنحصل على التوافق الأول والثاني والثالث، وغيرها، كما في حالة الوتر تمامًا. يُحسب الطول الموجي للموجات الصوتية الموقوفة للتوافق (n)



الشكل (17): تمثيل بياني لموجات طولية موقوفة في عمود هواء مفتوح النهاية.

في عمود الهواء المفتوح النهاية وفقًا للعلاقة المستخدمة في الموجات المستعرضة.

$$n\lambda_n = 2L$$

وكذلك التردّد للتوافق رقم (n) يساوي:

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{nv}{2L} = nf_1 \ , \ f_1 = \frac{v}{2L}$$

الأعمدة الهوائية المغلقة Closed Air Columns

نقصد بعمود الهواء المغلق، أن يكون مفتوح البداية ومغلق النهاية. تتكوّن الموجات الموقوفة في الأعمدة الهوائية المغلقة النهاية، على أنْ تكون سعة الاهتزاز صفرًا عند النهاية المغلقة للأنبوب، وتظهر في الشكل (18) على هيئة عُقد. وتختلف التوافقات الناتجة هنا عمّا سبق، إذ تتكوّن التوافقات الفردية فقط، وذلك كي يتحقّق تكوّن العُقد عند النهاية المغلقة للأنبوب. ويُحسب الطول الموجي للتوافق (n)، حيث (n) عدد صحيح فردي، وفقًا للعلاقة:

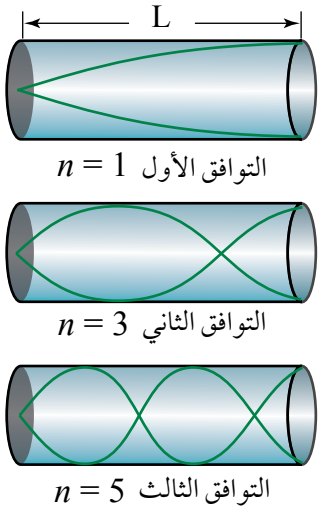
$$n\lambda_n = 4L$$

وكذلك التردّد للتوافق رقم (n) يساوي:

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{nv}{4L}$$

✓ **أتحقّق:** ما الفرق بين التوافقات الناتجة في عمود الهواء المغلق وعمود الهواء المفتوح.

أعدّ فيلمًا قصيرًا باستعمال برنامج صانع الأفلام (movie maker) يعرض التوافقات المختلفة التي يتغيّر فيها التردّد والطول الموجي في كلّ مرّة، ويوضّح كيف يتغيّر نمط الموجات الموقوفة بتغيّر الطور بين الموجتين المتداخلتين، ثم بتغيير التردّد.



الشكل (18): تمثيل بياني لموجات طولية موقوفة في عمود هواء مغلق النهاية.

المثال 7

أجرت حنين تجربة لقياس طول موجة الصوت المتولّدة في عمود هواء مغلق النهاية، طوله (62.5 cm). إذا كان أقلّ تردّد (136 Hz)، فأحسبُ كلًّا من:

أ . الطول الموجي.

ب. سرعة الموجة في الهواء داخل الأنبوب.

جـ. التردّد اللاحق.

المعطيات: $f_1 = 136\ \text{Hz}\ ,\ L = 0.625\ \text{m}\ ,\ n = 1$

المطلوب: $\lambda_1 = ?\ ,\ v = ?\ ,\ f_3 = ?$

الحلّ:

أ . الطول الموجي للتوافق الأول في العمود المغلق:

$$n\lambda_n = 4L$$

$$1 \times \lambda_1 = 4 \times 0.625$$

$$\lambda_1 = 2.5\ \text{m}$$

ب. سرعة الموجة في الهواء داخل الأنبوب:

$$v = \lambda_n f_n = 2.5 \times 136 = 340\ \text{m/s}$$

جـ. يحدث التردّد اللاحق عند $(n = 3)$؛ لأنّ العمود مغلق النهاية.

$$f_n = \frac{nv}{4L} = \frac{3 \times 340}{4 \times 0.625} = 408\ \text{Hz}$$

أبحثُ

في الآلات الموسيقية المختلفة، وأحصر من بينها آلات النفخ، ثمّ أستخرجُ منها أمثلة على الأعمدة المفتوحة النهاية والأعمدة المغلقة النهاية.

تمرين

أُقارن بين الموجات الصوتية الموقوفة المتولّدة في التوافق الأول في عمودَي هواء طول كلّ منهما (90 cm)؛ الأول مفتوح النهاية والثاني مغلق النهاية، علمًا بأنّ سرعة الصوت في الهواء (340 m/s)؛ من حيث:

أ . الطول الموجي.

ب. التردّد.

مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** أُوضّح المقصود بالموجات الموقوفة، ثم أذكرُ شروط تكوّنها في وتر مشدود.

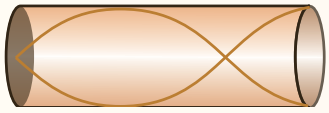
2. **أُقارن** بين أنماط التوافقات المختلفة للموجات الموقوفة التي تنشأ في الأعمدة الهوائية المفتوحة، وتلك التي تنشأ في الأعمدة الهوائية المغلقة.

3. **أُفسّر:** ما أهمّية تغيير طول الوتر عند العزف على آلة موسيقية وترية مثل العود؟

4. **أُحلّل:** يهتزّ وتر مشدود محدثًا موجات موقوفة فيه، مشكّلة (3) عقد وبطنين. أُعبّر عن الطول الموجي والتردّد بدلالة كلّ من طول الوتر وسرعة الموجة.

5. **أستعملُ المتغيّرات:** إذا كان تردّد التوافق الثاني الذي يمكن توليده في وتر قيثارة هو (392 Hz). فأحسبُ التردّدين الأول والثالث اللذين يمكن توليدهما في الوتر نفسه مع ثبات بقيّة العوامل الأخرى.

6. **أحسبُ:** يُبيّن الشكل رسمًا بيانيًّا لموجات موقوفة في عمود هواء مغلق النهاية طوله (0.6 m). إذا علمتُ أنّ سرعة الصوت في الهواء (340 m/s)، فأحسبُ كلًّا من:



أ . الطول الموجي.

ب. تردّد الموجات الموقوفة.

التداخل والحيود لموجات الضوء
Interference and Diffraction of Light Waves

الفكرة الرئيسة :

لفهم طبيعة الضوء وتفسير الظواهر الضوئية؛ افترض العلماء أنّ للضوء طبيعة مزدوجة (جسيمية – موجية)؛ إذ تظهر صفاته الجسيمية في بعض الظواهر الفيزيائية كالتأثير الكهرضوئي، وتظهر صفاته الموجية في ظواهر فيزيائية أخرى كالتداخل والحيود.

نتاجات التعلم :

- أحدّد شروط حدوث تداخل (بنّاء وهدّام) بين موجات الضوء، ومواقع الأهداب المضيئة والأهداب المعتمة.
- أستخدم المطياف الضوئي ومحزوز الحيود؛ لتحليل الضوء الأبيض إلى الألوان المكوّنة له، وقياس الطول الموجي لكلّ منها.
- أحسب مواضع الأهداب المضيئة والأهداب المعتمة في نمط الحيود، الناتج من إضاءة محزوز حيود بضوء أحادي اللون.

المفاهيم والمصطلحات :

متناغم	Coherent
غير متناغم	Incoherent
أحادي اللون	Monochromatic
محزوز حيود	Diffraction Grating
مطياف	Spectrometer

طبيعة الضوء The Nature of Light

ساد الاعتقاد قديمًا أنّ عملية الإبصار تحدث عندما يخرج الضوء من العين ويسقط على الأجسام. لكنَّ العالم المسلم الحسن بن الهيثم وضّح أنّ عملية الإبصار تحدث نتيجة سقوط الضوء الصادر من الأجسام أو المنعكس عنها على العين، فيُثير فيها مستقبلات ويجري الإبصار، وبعده فسّر العالم إسحق نيوتن سلوك الضوء بأنّه يُشبه أجسامًا مادية ترتدّ عن الحواجز فتنعكس، وفسّر بذلك ظاهرتَي الانعكاس والانكسار. ثمّ بعد نيوتن، ظهرت فرضية أنّ الضوء موجات، بهدف تفسير ظواهر لم يتمكّن افتراض نيوتن من تفسيرها، مثل ظاهرتَي التداخل والحيود. وتمكّن العالم كريستيان هيغنز من تفسير ظاهرتَي الانعكاس والانكسار، إضافة إلى التداخل والحيود، وفقًا للنموذج الموجي للضوء.

نتيجة لأبحاث العالم ماكسويل، وُصف الضوء بأنّه موجات كهرمغناطيسية، ثم رصدت ظواهر للضوء لم يتمكن النموذج الموجي للضوء من تفسيرها، مثل الظاهرة الكهرضوية (سأدرسها في الصف القادم)، ولتفسيرها افترض العالم أينشتاين أنّ الضوء موجات كهرمغناطيسية تتكوّن من كمات (وحدات أساسية) من الطاقة يطلق على كل منها اسم فوتون، تنتقل في الفضاء بسرعة الضوء، وأنّ الطاقة التي تحملها الموجات الكهرمغناطيسية تتناسب طرديًّا مع تردّد هذه الفوتونات. افترض العلماء أنّ للضوء طبيعة مزدوجة؛ إذ تُرصد صفاته الجسيمية في ظواهر معيّنة، وصفاته الموجية في ظواهر أخرى. سنركّز في هذا الدرس على الطبيعة الموجية للضوء، وذلك لتفسير ظاهرتَي التداخل والحيود، وبعض التطبيقات المتعلّقة بهما.

تداخل موجات الضوء Interference of Light Waves

لاحظتُ في الدرسين السابقين أنّ ظاهرة التداخل تحدث في الموجات الميكانيكية الطولية والمستعرضة، وهي تحدث أيضًا في الموجات الكهرمغناطيسية. تتداخل موجتان تداخلًا بنّاءً عندما تكون السعة المحصّلة لجُسيمات الوسط في موقع معيّن أكبر من سَعة كلّ من الموجتين، أو يكون التداخل هدّامًا عندما تكون السعة المحصّلة أقلّ من سَعة أيّ من الموجتين.

إذا وضعت مِصباحين ضوئيين بجوار بعضهما ببعض وراقبت الضوء الصادر منهما؛ فلن أتمكّن من مشاهدة تداخل الضوء، وذلك لعدم وجود فرق ثابت في الطور بين الموجات الصادرة عن المصباحين. فالمصباح الضوئي العادي يُصدر موجات يتغيّر ثابت الطور فيها تغيُّرًا عشوائيًّا باستمرار. ومثل هذه المصادر الضوئية تُسمّى مصادر **غير متناغمة Incoherent**.

كي يظهر نمط تداخل منتظم يمكن ملاحظته في موجات الضوء، لا بدّ من أن تكون موجات المصدرين الضوئيين متناغمة (متجانسة)، **والتناغم Coherence** يتطلّب تحقيق ما يأتي:

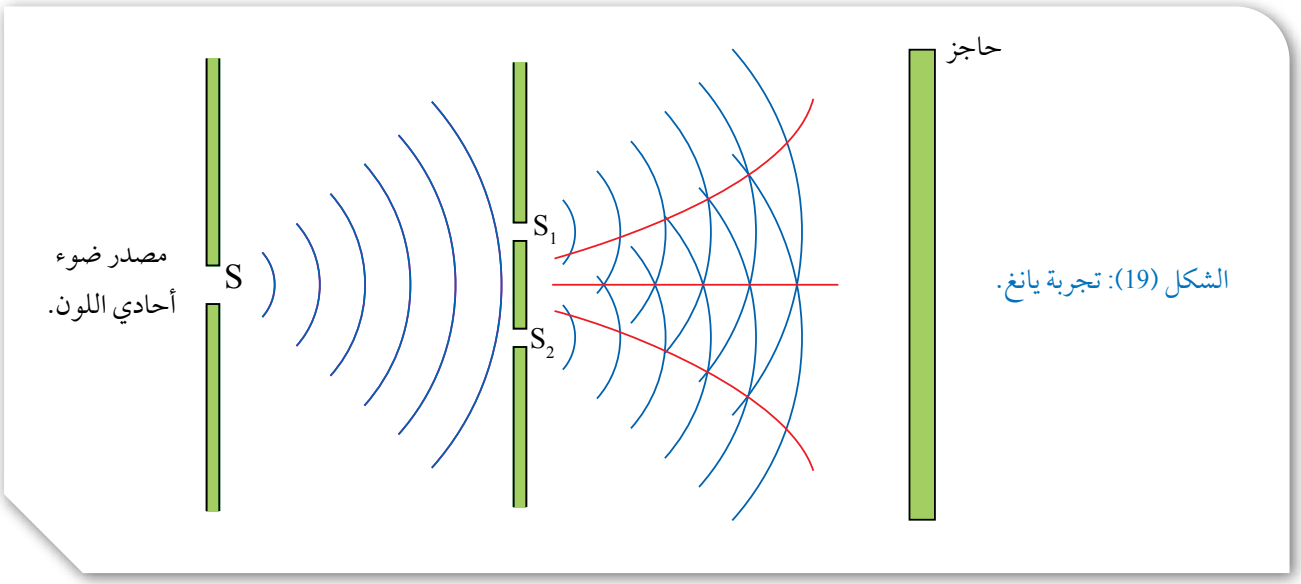
- أن يكون كلّ مصدر من مصدري الضوء **أحادي اللون Monochromatic**، أي إنّ موجاته لها طول موجي واحد.
- أن تتساوى موجات المصدرين في تردّدها، أو طولها الموجي.
- أن تحافظ موجات المصدرين على فرق ثابت في الطور بينها.

أي مصدرين ضوئيين لا يُحقّقان هذه الشروط هما غير متناغمين (غير متجانسين).

✓ **أتحقّق:** هل يكون مصدران ضوئيان أحدهما أخضر والثاني أحمر متناغمين أم لا؟ أُوضّح إجابتي.

أبحثُ

يُصدر المصباح الضوئي العادي ضوءًا ثابت الطور مدّةً زمنية لا تتجاوز نانو ثانية (1.0 ns)، ثمّ بعد ذلك يتغيّر ثابت الطور تغيّرًا عشوائيًّا. يعني هذا أنّ نمط تداخل معيّن يمكن أن يحدث خلال هذه المدّة الزمنية فقط. لكنّ هذه المصابيح توصف بأنّها غير متناغمة ولا تنتج تداخلًا. أبحثُ عن تفسير هذا الوصف.



الشكل (19): تجربة يانغ.

تداخل الشق المزدوج Double-Slit Interference

يمكن الحصول على مصدرَي ضوء متناغمين؛ بوضع حاجز يحتوي على شقّين أمام مصدر ضوئي أحادي اللون، بهذه الطريقة فإنّ الضوء الصادر من الشقّين يكون أحادي اللون ومتناغمًا. وقد أجرى العالم توماس يانغ تجربته الشهيرة التي أسهمت في إثبات الطبيعة الموجية للضوء؛ إذ مرّر الضوء خلال شقّ صغير في قطعة من الورق فحصل على شعاع رفيع، ثم استخدم بطاقة ورقية سُمكها (0.7 mm) تقريبًا، تحتوي على شقّين ضيّقين متوازيين ومتجاورين، فنفذت موجات الضوء من الشقّين باتّجاه الحاجز. لاحظ يانغ نمط تداخل، كالذي ينتج من تداخل موجات الماء.

يمكن الآن إجراء تجربة مماثلة لتجربة يانغ، باستخدام ضوء أحادي اللون، على نحو ما يُبيّن الشكل (19).

ينفذ من الشقّ الأول S شعاع رفيع أحادي اللون (يمكن الاستغناء عن الحاجز الأول والشقّ S عند توافر مصدر ليزر، لأنّه يُصدر موجات متناغمة عالية الشدة). تنفذ موجات الضوء من الشقّين S_1، S_2 باتّجاه الحاجز ويكون لها الطور نفسه، لأنّها ناتجة من المصدر نفسه، فيحدث للموجات حيود يشبه حيود موجات الماء، فتصل إلى المواقع كافّة على الحاجز. عندما يصدر عن الشقّين شعاعان ضوئيان يلتقيان عند نقطة على الحاجز، فإنّهما يتداخلان

تداخـلًا بنّـاءً أو هدّامًـا، حسـب فـرق الطـور بينهمـا، على النحـو الآتي:

1. يتكوّن عند النقطة (P) في الشكل (20/ أ) هدب مضيء ناتج من تداخل بنّاء لشعاعين متّفقين في الطور، لأنّهما قطعا مسافة متساوية، ويُسمّى الهدب المركزي.

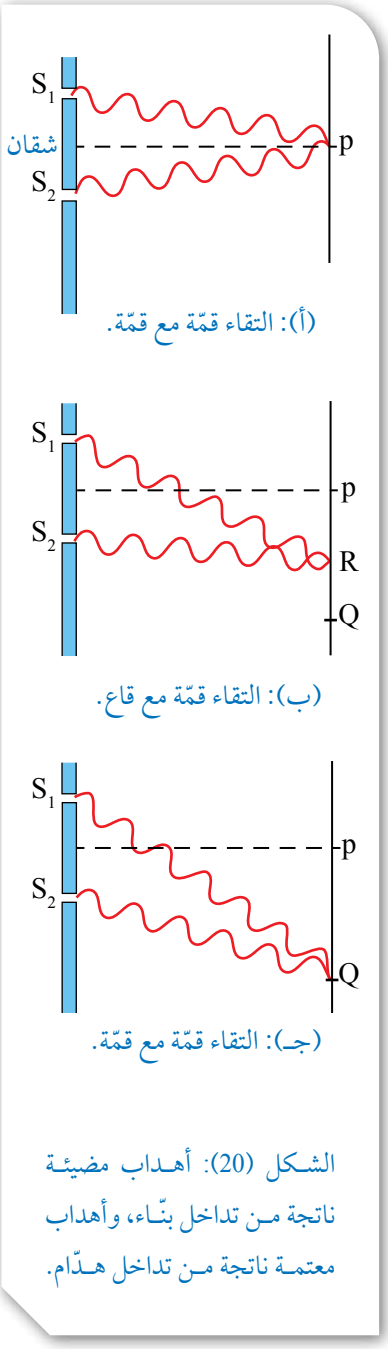
2. يتكوّن عند النقطة (R) في الشكل (20/ ب) هدب معتم ناتج من تداخل هدّام لشعاعين الفرق في الطور بينهما يساوي (π) لأنّ فرق المسار بينهما ($\frac{1}{2}\lambda$).

3. يتكوّن عند النقطة (Q) في الشكل (20/ جـ) هدب مضيء ناتج من تداخل بنّاء لشعاعين متّفقين في الطور؛ لأنّ فرق المسار بينهما موجة كاملة (λ).

4. تتكوّن الأهداب المضيئة والمعتمة على جانبَي الهدب المركزي، وتكون متماثلة، وتفصلها مسافات متساوية، ويمكن الاطّلاع عليها في الجدول (3) الآتي:

جدول 3: الأهداب المضيئة وفرق المسار في تجربة يانغ.

الهدب	n	فرق المسار	الفرق في الطور بين الشعاعين
المضيء المركزي	0	صفر	0
المعتم الأول		$\frac{\lambda}{2}$	π
المضيء الأول	1	λ	0
المعتم الثاني		$\frac{3\lambda}{2}$	π
المضيء الثاني	2	2λ	0

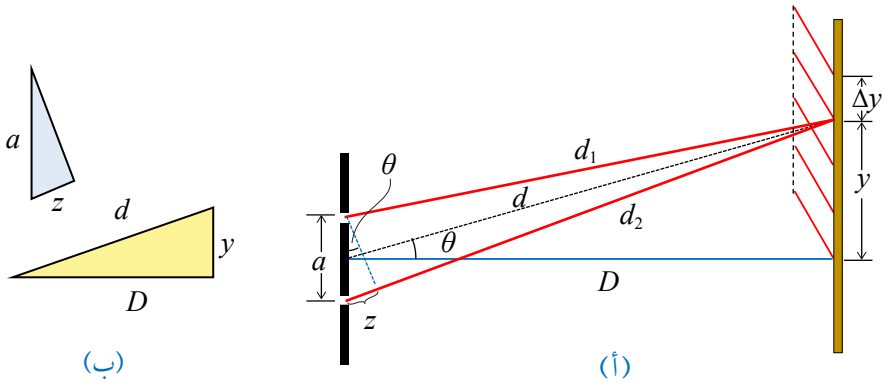


(أ): التقاء قمّة مع قمّة.

(ب): التقاء قمّة مع قاع.

(جـ): التقاء قمّة مع قمّة.

الشكل (20): أهداب مضيئة ناتجة من تداخل بنّاء، وأهداب معتمة ناتجة من تداخل هدّام.



الشكل (21):
(أ): مسارات الأشعّة المتداخلة، وتكوّن الأهداب المضيئة الناتجة من التداخل على الحاجز.
(ب): تشابه المثلثات.

يرتبط تكوّن الأهداب المضيئة والمعتمة على الحاجز بعلاقات رياضية مع العوامل التي أدّت إلى تكوّن هذه الأهداب. إذا كانت المسافة بين الشقّين (a)، كما يُبيّن الشكل (21/ أ)، واستُخدم في التجربة ضوء له طول موجي (λ)، ووضع الحاجز على مسافة (D) عن الشقّين، فتتكوّن عليه أهداب مضيئة يرتفع كلّ هدب بمقدار (y) عن الهدب المركزي، نتيجة وجود فرق في مساري الموجات (d_2, d_1) مقداره (z). أُلاحظ الشكل (21/ ب) الذي يُبيّن مثلّثين متشابهين حصلنا عليهما من الشكل السابق؛ إذ تتساوى زوايا المثلّثين، أجد علاقة بين نسب أضلاع المثلّثين:

$$\frac{z}{a} = \frac{y}{d}$$

نظرًا إلى أنّ المسافة الرأسية (y) صغيرة جدًّا بالمقارنة مع بعد الحاجز عن الشقين (D)، فإنّه يمكن افتراض ($d \cong D$)، وعندها، فإنّ:

$$\frac{z}{a} = \frac{y}{D}$$

بالانتقال من الهدب المضيء الثالث إلى الهدب المضيء الرابع، تزداد المسافة (y) بمقدار (Δy)، وتزداد المسافة (z) بمقدار طول موجي واحد، فتصبح العلاقة السابقة على الصورة:

$$\frac{z+\lambda}{a} = \frac{y+\Delta y}{D} \Rightarrow \frac{z}{a} + \frac{\lambda}{a} = \frac{y}{D} + \frac{\Delta y}{D}$$

بطرح العلاقة السابقة من العلاقة الأخيرة نحصل على:

$$\frac{\lambda}{a} = \frac{\Delta y}{D} \Rightarrow \Delta y = \frac{\lambda D}{a}$$

تربط هذه العلاقة المسافة الفاصلة بين هدبين مضيئين على الحاجز مع الطول الموجي للضوء المستخدم في التجربة، بمعرفة كلّ من

الربط بالرياضيات

يتشابه المثلّثان عندما تكون زوايا المثلث الأول مساوية لزوايا المثلّث الثاني، وينتج من التشابه أن يكون ناتج قسمة كلّ ضلع من المثلث الأوّل على الضلع الذي يقابله من المثلث الثاني يساوي مقدارًا ثابتًا، وهذا يختلف عن تطابق المثلّثات الذي يتطلّب المساواة في الزوايا والأضلاع والمساحة.

المسافة بين الشقّين، وبعد الحاجز عنهما. حيث تكون المسافة (Δy) بحدود الملمتر أو أجزاء منه، وهي أكبر بكثير من الطول الموجي الذي يقاس بوحدة نانومتر ولا يمكن رصده بالعين.

✓ **أتحقّق:** تخرج الأشعّة الضوئية جميعها من الشقّين وهي متفقة في الطور. ما الذي يؤدي إلى حدوث تداخل هدّام، تنتج منه أهداب معتمة على الحاجز؟

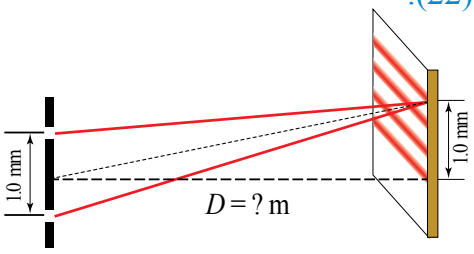
أُصمّم باستخدام برنامج السكراتش (Scratch) عرضًا يوضّح طريقة حدوث التداخل لموجات الضوء بعد نفاذها من شقّين متجاورين، وظهور الأهداب على حاجز، ثم أشاركه مع زملائي/ زميلاتي في الصف.

المثال 8

يُصدر مصدر ليزر ضوءًا أحادي اللون طوله الموجي (650 nm)، وعند نفاذ الضوء من شقّين متجاورين تفصلهما مسافة (1.0 mm). حدث نمط تداخل نتجت عنه أهداب مضيئة تكوّنت على حاجز، فكانت بمعدل (3) أهداب في مسافة مقدارها (1.0 mm)، على نحو ما في الشكل (22).

أ . ما مقدار المسافة بين الحاجز والشقّين؟

ب. عند إبعاد الحاجز إلى مثلَي المسافة السابقة، كم ستصبح المسافة بين هدبين مضيئين متتاليين؟



الشكل (22): أهداب مضيئة ناتجة من تداخل ضوء ليزر.

المعطيات: $y = 1.0\ \text{mm}, a = 1.0\ \text{mm}, \quad \lambda = 650\ \text{nm}$

المطلوب: $D = ?, \quad y = ?$

الحلّ:

لإيجاد المسافة بين هدبين مضيئين متتاليين على الحاجز:

$$y = 1.0 \times 10^{-3}\ \text{m}$$

$$\Delta y = \frac{1.0 \times 10^{-3}}{3} = 3.3 \times 10^{-4}\ \text{m}$$

أ . بُعد الحاجز عن الشقّين (D):

$$\Delta y = \frac{\lambda D}{a} \Rightarrow D = \frac{a\,\Delta y}{\lambda}$$

$$D = \frac{1.0 \times 10^{-3} \times 3.3 \times 10^{-4}}{650 \times 10^{-9}} = 0.51\ \text{m}$$

ب. العلاقة بين (y) و (D) طردية، ونظرًا إلى العوامل الأخرى لم تتغيّر عند تكرار التجربة، فإنّ:

$$\frac{\Delta y_2}{\Delta y_1} = \frac{D_2}{D_1} \Rightarrow \frac{\Delta y_2}{\Delta y_1} = 2 \Rightarrow \Delta y_2 = 2\Delta y_1$$

$$\Delta y_2 = 3.3 \times 10^{-4} \times 2 = 6.6 \times 10^{-4}\ \text{m}$$

المثال 9

أُجريت تجربة يانغ لقياس الطول الموجي لضوء ليزر أخضر، على نحو ما في الشكل (23). كانت المسافة بين الشقّين (1.3 mm)، ووضع الحاجز على بعد (94.5 cm) منهما، وعند قياس المسافة بين الهدبين المضيئين الأول والثاني كانت (0.4 mm). أحسبُ مقدار الطول الموجي للضوء الأخضر.

الشكل (23): مصدر ضوء ليزر أخضر (أحادي اللون).

المعطيات: $\Delta y = 0.4\ \text{mm}\ ,\ a = 1.3\ \text{mm}\ ,\ D = 94.5\ \text{cm}$

المطلوب: $\lambda = ?$

الحلّ:

$$\lambda = \frac{a\Delta y}{D} = \frac{1.3 \times 10^{-3} \times 0.4 \times 10^{-3}}{94.5 \times 10^{-2}}$$

$$\lambda = 550 \times 10^{-9}\ \text{m} = 550\ \text{nm}$$

التداخل في الأغشية الرقيقة Interference in Thin Films

نشاهد أنماط تداخل موجات الضوء في الأغشية الرقيقة، مثل طبقة رقيقة من الزيت أو أحد المشتقات النفطية على سطح الماء، أو غشاء فقاعة الصابون. فعندما يسقط ضوء أبيض على هذه الأغشية، نلاحظ ألوانًا مختلفة كما في الشكل (24)، تنتج من تداخل الموجات المنعكسة عن طبقتي الغشاء الداخلية والخارجية.

الشكل (24): تداخل موجات الضوء المنعكس عن غشاء فقاعة الصابون.

طلاء عدسات آلات التصوير: تطلى عدسات آلات التصوير بطبقة رقيقة من مادة شفافة لها معامل انكسار أقل من معامل انكسار زجاج العدسة، ويكون سمك هذه الطبقة بمقدار ربع طول موجي، فينتج من ذلك أن تتداخل الأشعة المنعكسة عن وجهي الطلاء الخارجي والداخلي تداخلًا هدامًا، ما يقلل من انعكاس الضوء عن العدسة بنسبة كبيرة جدًّا، وهذا يزيد من كمية الضوء التي تعبر العدسة ويحسن كفاءة التصوير. عند تحديد سمك طبقة الطلاء تكون المقارنة مع متوسط الأطوال الموجية للضوء المرئي، ما يجعل الأشعة التي تقع في طرفي الطيف المرئي تنعكس عن الطلاء. ألاحظ انعكاس اللون البنفسجي عن العدسة في الشكل(25).

الشكل (25): عدسة آلة تصوير مطلية بطبقة رقيقة مانعة للانعكاس.

حيود موجات الضوء Diffraction of Light Waves

الحيود ظاهرة موجية تحدث للموجات الميكانيكية وللموجات الكهرمغناطيسية أيضًا، مثل موجات الضوء، كما ولاحظنا أيضًا في تجربة يانغ بعد أن نفذ الضوء من الشقّين (S_1, S_2).

الحيود عبر شقّ ضيّق Diffraction due to a Narrow Slit

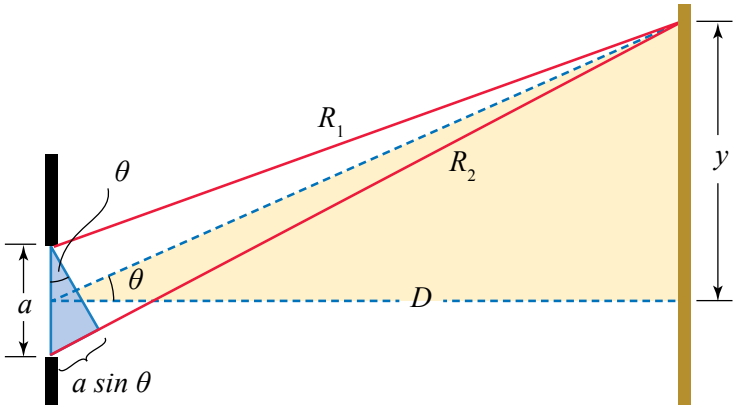
عند مرور شعاع ضوئي من شقّ ضيّق، ينتشر على جانبَي الشق، وإذا أتيح للضوء السقوط على حاجز بعيد مقابل للشقّ؛ فإنّه يكوّن أهدابًا مضيئة وأخرى معتمة، على نحو ما يُبيّن الشكل (26). تتكوّن هذه الأهداب نتيجة حدوث تداخل بنّاء وآخر هدّام لأشعّة الضوء المختلفة، التي نفذت خلال طرفَي الشقّ الضيّق. أي إنّ ظاهرة الحيود تؤدّي إلى التقاء الموجات، ما يُسبّب حدوث تداخل بينها.

الشكل (26): تكوّن نمط من الأهداب المضيئة والمعتمة على حاجز، نتيجة ظاهرة الحيود.

أفترضُ شعاعين R_1, R_2 يتّجهان من طرفَي الشقّ إلى نقطة على الحاجز يظهر عندها هدبًا معتمًا، وتبعد إلى الأعلى عن مركز الحاجز مسافة y، والمسافة بين الشقّ والحاجز D، على نحو ما يُبيّن الشكل (27). أعلمُ أنّ الموجات جميعها تغادر الشقّ وهي متّفقة في الطور كونها صادرة من المصدر نفسه. وهذا يعني أن تكوّن الهدب المعتم عند التقاء الشعاعين R_1, R_2 ناتج من قطع أحدهما مسافة أكبر من الثاني بفرق مسار مقداره $\Delta d = \frac{\lambda}{2}$، أي إنّ:

$$R_2 - R_1 = \frac{\lambda}{2} = a \sin\theta$$

$$\sin\theta = \frac{\lambda}{2a}$$



الشكل (27): حيود موجات الضوء بعد مرورها من شقّ ضيّق وتكون نمط تداخل على حاجز.

ولكن من المثلّث الكبير، ونظرًا إلى أنّ الزاوية θ صغيرة، أجد أنّ:

$$\sin\theta \cong \tan\theta = \frac{y}{D}$$

$$\frac{\lambda}{2a} = \frac{y}{D} \Rightarrow \lambda = \frac{2ay}{D}$$

عندما يتكوّن هدبٌ مضيء عند نقطة التقاء الشعاعين على الحاجز، فإنّ فرق المسار بينهما يكون بمقدار موجة كاملة أو مضاعفاتها، أي إنّ:

$$a\sin\theta = n\lambda$$

حيث n عدد صحيح.

✓ **أتحقّق:** ما الفرق بين ظاهرتَي التداخل والحيود؟

المثال 10

نفذ ضوء متناغم (متجانس) من شقّ صغير اتّساعه 16 µm، فتكوّنت أهداب حيود على حاجز يبعد عن الشقّ مسافة 2 m، إذا كان الهدب المعتم الأول يبعد لأعلى عن مركز الحاجز مسافة 4 cm؛ فأحسبُ الطول الموجي للضوء.

المعطيات: $y = 4\text{ cm}\ ,\quad a = 16\ \mu\text{m}\ ,\quad D = 2\text{ m}$

المطلوب: $\lambda = ?$

الحلّ:

$$\lambda = \frac{2ay}{D}$$

$$\lambda = \frac{2 \times 16 \times 10^{-6} \times 4 \times 10^{-2}}{2}$$

$$\lambda = 64 \times 10^{-8} = 640\text{ nm}$$

أفكّر:

- إذا كان الهدب المعتم الأول ينتج من فرق مسار بين الشعاعين مقداره $\frac{\lambda}{2}$، فما مقدار فرق المسار الذي ينتج منه الهدب المعتم الثاني؟
- إذا كان الهدب المضيء الأول ينتج من فرق مسار بين الشعاعين مقداره λ، فما مقدار فرق المسار الذي ينتج منه الهدب المضيء الثاني؟

محزوز الحيود Diffraction Grating

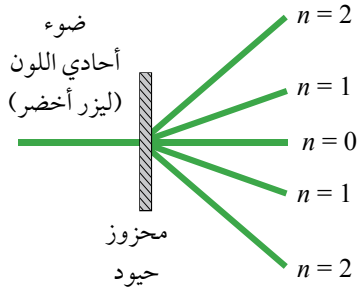
لاحظتُ في موضوع التداخل، كيف تم الحصول على مصدرين متناغمين من مصدر واحد، بوضع حاجز يحتوي على شقّين متجاورين. بالطريقة نفسها، تعمل أداة تسمى **محزوز الحيود Diffraction grating** وهي سلسلة من الشقوق المتوازية التي تفصلها مسافات متساوية يمرّ خلالها الضوء. وتُصنع من قطعة زجاجية أو بلاستيكية شفافة، تُرسم عليها خطوط سوداء رفيعة متوازية، تفصلها مسافات شفّافة تُشكّل الشقوق، التي يصل عددها إلى 300 شقّ في الملمتر الواحد، على نحو ما يُبيّن الشكل (28/ أ).

حيود ضوء أحادي اللون Diffraction of Monochromatic Light

عند سقوط ضوء أحادي اللون على محزوز الحيود؛ فإنّه ينفذ من الشقوق جميعها، ويحدث له حيود فيخرج من كلّ شقّ باتّجاهات عدّةٍ، على نحو ما في الشكل (28/ ب)، ثم تتداخل أشعّة الضوء كما يحدث في حالة الشقّين المتوازيين. وقد أُعطي رقم خاصّ لكلّ هدب مضيء ناتج من تداخل بنّاء، فالهدب المركزي رقمه (0)، ثم يليه الهدب رقم (1) من الجهتين، وهكذا... وتزداد الأرقام بزيادة زاوية حيود الأشعّة. ويكون نمط الحيود متماثلًا على جهتَي الشعاع المركزي. أُلاحظ الشكل (30/ جـ) الذي يُبيّن نمط الحيود الناتج من إسقاط ضوء ليزر أخضر على محزوز حيود، يظهر الشعاع المركزي ($n = 0$)، وهو الأكثر سطوعًا، ثمّ الشعاعان ($n = 1$)، ثمّ الشعاعان ($n = 2$)، عن اليمين واليسار.

كلّ بقعة مضيئة على الحاجز في الشكل (28/ جـ) نتجت من عملية تداخل بنّاء بين الأشعّة الصادرة من شقوق محزوز الحيود، بسبب اتّفاقها في الطور. لتسهيل الحسابات؛ سنختار شعاعين فقط صادرين من شقّين متجاورين في المحزوز. بالنسبة إلى البقعة المركزية التي يُشار إليها بالرتبة ($n = 0$)؛ فإنّ فرق المسار بين الشعاعين يساوي صفرًا. أمّا البقعة المضيئة الأولى من جهتَي اليمين أو اليسار، فرتبتها ($n = 1$)، وفرق المسار بين شعاعيها (λ). والبقعة المضيئة الثانية التي رتبتها ($n = 2$)، فإنّ فرق المسار بين شعاعيها (2λ).بوجهٍ عامّ، عند البقعة المضيئة التي رتبتها (n)؛ فإنّ فرق المسار بين الشعاعين يُساوي ($n\lambda$). حيث n عدد صحيح.

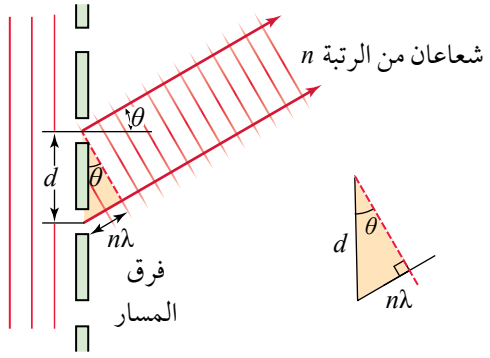
(أ): محزوز الحيود.



(ب): أشعّة الضوء عند حيودها.

(جـ): حيود شعاع ليزر.

الشكل (28): محزوز الحيود، وحيود ضوء أحادي اللون باستخدام محزوز الحيود.



الشكل (29): فرق المسار بين الشعاعين الضوئيين في البقعة المضيئة من الرتبة (n).

أُلاحظ الشكل (29) الذي يُبيّن العلاقة بين المسافة الفاصلة بين شقّين متجاورين في محزوز الحيود، وفرق المسار بين الشعاعين. يتّضح من الشكل أنّ:

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

إذ يُشير الرمز (d) إلى المسافة الفاصلة بين كلّ شقّين متجاورين، ويُشير الرمز (n) إلى رتبة البقعة المضيئة.

تُحسب المسافة بين الشقّين من عدد الخطوط في وحدة الأطوال، الذي يكون مكتوبًا على المحزوز. فمثلًا، المحزوز الذي يحتوي على 300 خطّ في ملمتر واحد، تكون فيه المسافة بين شقّين:

$$d = \frac{1\text{ mm}}{300} = 3.3 \times 10^{-3}\text{ mm} = 3.3 \times 10^{-6}\text{ m}$$

يمكن التعبير عن هذه المسافة بوحدة الميكرومتر: 3.3 µm

أُعدّ فيلمًا قصيرًا باستخدام صانع الأفلام (Movie maker) يعرض عملية الحيود خلال محزوز الحيود وظهور أنماط التداخل على حاجز ثمّ تحريك الحاجز، وملاحظة التغيّر في المسافات بين الأهداب المضيئة المتكوّنة.

المثال 11

أجرى طلبة تجربة باستخدام محزوز حيود مكتوب عليه 450 خطّ في كلّ ملمتر، وضوء طول موجته 650 nm. أحسبُ مقدار الزاوية التي يميل بها الهدب المضيء الأول.

المعطيات: $n = 1,\ lines = 450\text{ mm}^{-1},\ \lambda = 650\text{ nm}$

المطلوب: $\theta_n = ?$

الحلّ:

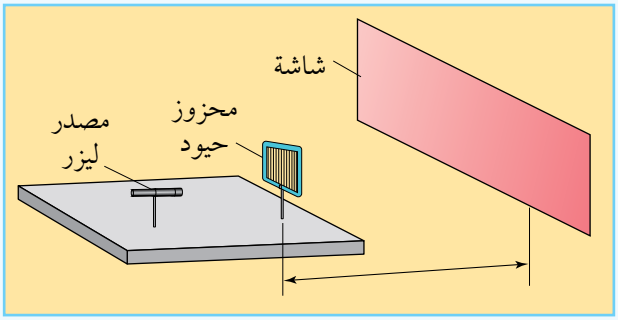
$$d = \frac{1}{450} = 2.2 \times 10^{-3}\text{ mm} = 2.2 \times 10^{-6}\text{ m}$$

$$\sin\theta_n = \frac{n\lambda}{d} = \frac{1 \times 650 \times 10^{-9}}{2.2 \times 10^{-6}} = 0.295$$

$$\theta_n = 17.16°$$

التجربة 2

قياس طول موجة ضوء أحادي اللون باستخدام محزوز الحيود



الموادّ والأدوات: مصدر ضوء ليزر، محزوز حيود عدد خطوطه معلوم، مشابك تثبيت، شاشة مناسبة للعرض، مسطرة مترية، منقلة.

إرشادات السلامة: عدم النظر إلى مصدر الليزر أو انعكاساته.

خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي، أُنفّذ الخطوات الآتية:

1. أُركّب أدوات التجربة على نحو ما هو مُبيّن في الشكل أعلاه.
2. أُثبّت محزوز الحيود بشكل عمودي على سطح طاولة أفقي مستخدمًا المشبك، على أن يكون المحزوز في وضع رأسي تمامًا.
3. أُثبّت الشاشة في وضع رأسي، وأجعل بعدها عن محزوز الحيود أكبر ما يمكن، أي بحدود (1.5 m).
4. أستخدم مشبكًا آخر في تثبيت مصدر الليزر على مسافة مناسبة من محزوز الحيود.
5. أُشغّل مصدر الليزر وأُلاحظ تكوّن الأهداب المضيئة والمعتمة على الشاشة.
6. أُحرّك الشاشة اقترابًا أو ابتعادًا عن الطاولة حتّى أشاهد الهدب الثاني ($n = 2$)، الذي أرمز إليه بالرمز (n_2)، ثمّ أقيس المسافة بين محزوز الحيود والشاشة وأدوّنها في جدول خاص.
7. **أقيس** المسافة بين الهدب المركزي (n_0) والهدب الأول الأيمن (n_1)، والمسافة بين الهدب المركزي والهدب الأول الأيسر، وأُدوّن القياسين في الجدول.
8. **أحسبُ** قياس الزاوية بين الشعاع المركزي والشعاع الأول من أحد الجانبين، وذلك بقسمة المسافة بين الهدبين (n_0) و (n_1) على البعد بين الشاشة والمحزوز، فأحصلُ على ظل الزاوية، علمًا بأنّ:

$$\theta \cong \sin\theta = \tan\theta$$ (عند قياس الزاوية بالتقدير الدائري)

9. أُكرّر القياسات مع الهدب الثاني الأيمن والهدب الثاني الأيسر، وأُدوّن القياسات.

التحليل والاستنتاج:

1. أُوضّح لماذا يجب أن تكون المسافة بين المحزوز والشاشة أكبر ما يمكن.
2. **أقترحُ** طريقة للتأكّد من أنّ محزوز الحيود مثبّت بشكل موازٍ للشاشة.
3. **أُفسّر** سبب قياس المسافة من الهدب المركزي إلى الهدب الأول من جهتَي اليمين واليسار، ثمّ استخراج المتوسط الحسابي للقيمتين.
4. **أحسبُ** مقدار الطول الموجي للضوء بمعرفة الزاوية θ والقياسات الأخرى في الجدول.

حيود الضوء متعدد الألوان

Diffraction of Non Monochromatic Light

لاحظتُ أنّ الضوء أحادي اللون يحدث له حيود عند مروره خلال محزوز الحيود، فتظهر على الحاجز أهداب مضيئة برتب مختلفة. هل تنحرف الألوان جميعها بالزاوية نفسها؟ أم أنّ لكلّ لون زاوية؟

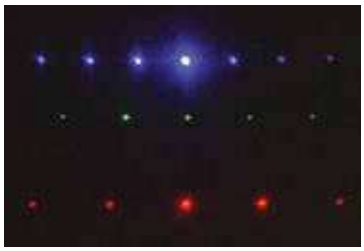
أُجريت تجربة لدراسة أثر الطول الموجي على زاوية الحيود، استُخدم فيها ثلاثة مصادر أحادية اللون (أزرق وأخضر وأحمر)، لإسقاط الضوء على محزوز حيود في اللحظة نفسها. يُبيّن الشكل (30/ أ) صورة الحاجز عند تكوّن الأهداب المضيئة عليه.

أُلاحظ في الشكل أنّ الهدب الأول لكلّ لون ينحرف بزاوية تختلف عن اللونين الآخرين، ما يعني أنّ زاوية الحيود تختلف باختلاف الطول الموجي. ويبيّن الشكل أيضًا أنّ الزاوية تزداد بزيادة الطول الموجي، فاللون الأحمر له أكبر زاوية حيود، واللون الأزرق له أصغرها. يتكوّن الضوء الأبيض من مجموعة من الأطوال الموجية المختلفة تنتج منها مكوّنات الطيف المرئي، وعند مرور هذه الموجات من محزوز الحيود؛ فإنّ كلّ موجة منها تحيد (تنحرف) بزاوية مختلفة، فتظهر على الحاجز مجموعة ألوان قوس قزح، على نحو ما يُبيّن الشكل (30/ ب). أستنتجُ من ذلك أنّ محزوز الحيود يعمل على تحليل الضوء الأبيض إلى مكوّناته، على نحو ما يفعل المنشور.

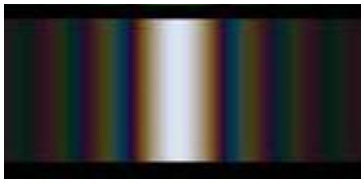
باستخدام العلاقة السابقة، يمكن قياس زاوية حيود أيّ من ألوان الضوء وحساب طوله الموجي. والعلاقة هي:

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

يمكن إجراء عملية تحليل الضوء بمزيد من الدقّة باستخدام جهاز المطياف الضوئي، الذي يتكوّن من منصة لوضع محزوز الحيود، وتلسكوب خاصّ لتحديد أيّ من الأهداب الملوّنة، وتدريج لقياس الزوايا بدقّة، على نحو ما يُبيّن الشكل (31)، ثمّ استخدام العلاقة السابقة لحساب الطول الموجي لكلّ لون.



(أ)



(ب)

الشكل (30): صورة الأهداب المتكوّنة على حاجز أبيض نتيجة حيود الضوء:
(أ): حيود الضوء لثلاثة مصادر نقطية أحادية اللون.
(ب): تحليل الضوء الأبيض إلى مكوّناته نتيجة الحيود.

الشكل (31): المطياف الضوئي.

تطبيقات على ظاهرتَي تداخل الضوء وحيوده

Application of interference and Diffraction of Light

يُستخدم محزوز الحيود لتحليل الطيف الناتج من التركيبات الذرية والجزيئية، وكذلك في تحليل أطياف النجوم لدراسة تركيبها وخصائصها الأخرى. ويستخدم أيضًا في تصوير بعض العيّنات الطبّية، باستخدام أطوال موجية محدّدة، أو تحفيز بعض الجزيئات في خلايا هذه العيّنات.

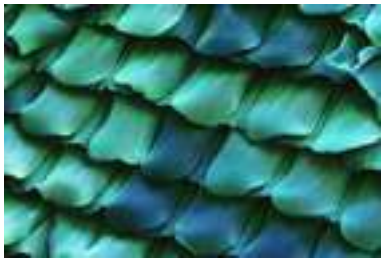
تعرّفنا إلى محزوز الحيود الشفّاف الذي ينفذ منه الضوء، ثمّ يحيد ويتداخل. ولكن، يوجد محزوز حيود عاكس بحيث يحتوي على خطوط دقيقة عاكسة وأخرى معتمة لا تعكس الضوء، فيحدث للضوء المنعكس حيود وتداخل وتحليل إلى الألوان المختلفة، وهذا يوجد في الطبيعة ضمن تركيب ريش بعض الطيور؛ كما في الطائر الطنان، وتركيب أجنحة بعض الفراشات الملونة.

قوّة التفريق في محزوز الحيود

يُعدّ استخدام محزوز الحيود مع جهاز المطياف الضوئي عند تحليل طيف معيّن، أكثر دقّة من استخدام المنشور للغرض نفسه؛ وذلك لأنّ الخطوط الملوّنة في المنشور تكون عريضة ومتداخلة، في حين تكون الخطوط الملوّنة في محزوز الحيود دقيقة ومنفصلة عن بعضها عن بعض، وتكون إضاءتها أيضًا أكثر شدّة.

الربط بالعلوم الحياتية

الطائر الطنان من أصغر الطيور حجمًا؛ إذ لا يتعدّى طوله (5 cm). يتغذّى على الرحيق، ويُحرّك جناحيه بتردّد يصل إلى (80 Hz). يبدو هذا الطائر بألوان زاهية تتغيّر مع تغيّر زاوية النظر إليه؛ وذلك لأنّ التركيب الدقيق لريش الطائر يحتوي على أخاديد تُشبه تركيب محزوز الحيود، فيحدث حيود للضوء الذي يعكسه الريش، بحيث تنعكس بعض الألوان دون غيرها، ويختلف اللون باختلاف زاوية النظر.



صورة مجهرية لجناح فراشة تعمل عملَ محزوز حيود.

مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** أُوضّح المقصود بكلّ من تداخل الضوء وحيوده، وأُبيّن الشروط التي يجب تحقّقها في مصدرين ضوئيين؛ كي يتكوّن نمط تداخل منتظم لموجاتهما.

2. **أُقارن** بين سبب تكوّن الأهداب المضيئة والأهداب المعتمة على حاجز أبيض، في تجربة يانغ.

3. **أُفسّر** سبب ظهور الألوان المختلفة عند انعكاس الضوء عن بعض أنواع عدسات آلات التصوير، على الرغم من أنّ الضوء الساقط عليها أبيض، وهي شفّافة عديمة اللون.

4. أيّ الظواهر الضوئية الآتية يمكن تفسيرها باستخدام النموذج الجُسيمي للضوء؟ وأيّها باستخدام النموذج الموجي؟ وأيها باستخدام النموذجين؟ (الانعكاس، التداخل، الظاهرة الكهرضوئية، الحيود، الانكسار).

5. **أُحلّل** الشكل المجاور، الذي يُمثّل صورة عمود التُقطت في النهار والشمس تختفي خلف العمود، وأُبيّن الظاهرة العلمية التي تعرضها الصورة، وكيف تحدث.

6. **أستعملُ المتغيّرات:** أُجريت تجربة يانغ لقياس الطول الموجي لضوء أحادي اللون، فكانت المسافة بين الشقّين (1.4 mm)، وكانت المسافة بين الحاجز والشقّين (140 cm)، وعند قياس المسافة بين الهدبين المضيئين الأول والثالث كانت (1.2 mm). أحسبُ مقدار الطول الموجي للضوء.

7. **أحسبُ:** في تجربة باستخدام محزوز حيود مكتوب عليه 250 خطًّا في كل ملمتر، كانت زاوية الحيود التي يميل بها الهدب المضيء الثاني n_2 بمقدار (15°). فما مقدار الطول الموجي للضوء المستخدم في التجربة؟

الرنين
Resonance

لاحظت أنَّ نظام الوتر المشدود أو عمود الهواء لديه القدرة على الاهتزاز وفقًا لنمط توافقٍ طبيعيٍّ واحد أو أكثر. أيْ إنّ للأجسام المهتزّة تردّدًا طبيعيًّا واحدًا على الأقل. وعند التأثير بقوّة دوريّة ذات تردّد معيّن في نظام مهتزّ، فإنَّ سعة اهتزازه تتزايد وتصبح قيمة عظمى عندما يتساوى تردّد القوة الخارجية مع التردّد الطبيعي للنظام، وتُعرف هذه الظاهرة بالرنين. ومثالاً على ذلك الأرجوحة عند دفعها بقوّة خارجيّة دوريّة تتفق في تردّدها مع التردّد الطبيعيّ لها.

أمّا الأعمدة الهوائيّة فتمتلك أكثر من تردّد طبيعيّ، لكلٍّ منها نمط مختلف من الموجات الموقوفة، وعندما يتساوى تردّد القوّة المؤثّرة مع واحد من هذه التردّدات الطبيعيّة تصبح سعة الاهتزاز قيمة عظمى، وتحدث حالة الرنين. في الموجات الطوليّة يُعدُّ الرنين مهمًّا بالنسبة إلى الآلات الموسيقيّة الهوائيّة مثل البوق والناي؛ وذلك لتضخيم الصوت الذي تُصدره.

ومن الجدير بالذكر أنَّ ظاهرة الرنين غير مرغوب فيها في بعض الحالات؛ فعند تصميم المباني يُؤخذ في الحسبان ألّا تحدث ظاهرة الرنين عند حدوث الزلازل؛ فحدوث الرنين في المبنى عند اهتزازه يزيد من سعة الاهتزاز إلى درجة قد تؤدّي إلى أضرار في المبنى أو انهياره.

كذلك يصمّم المهندسون الجسور على ألّا يحدث لها رنين؛ بسبب حركة السيارات والمشاة فوقها أو هبوب الرياح عليها، نظرًا لما يشكّل ذلك من خطر على بقائها، على نحو ما حدث مع جسر تاكوما في أمريكا عام 1940م، الذي انهار بفعل تأثير الرياح فيه.

أبحثُ أبحثُ في مصادر المعرفة المتاحة والموثوقة عن استخدامات ظاهرة الرنين في مجال التصوير الطبي، وأعدّ عرضًا تقديميًّا أعرضه على زملائي/ زميلاتي في الصف.

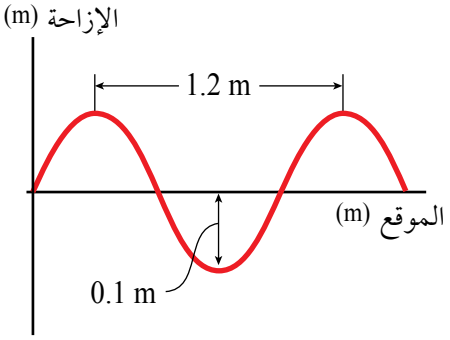
1. أضع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة في ما يأتي:

1. أيّ الأطوال الموجية الآتية، تقع ضمن الأشعّة تحت الحمراء في الطيف الكهرمغناطيسي؟

أ. (600 nm)　　ب. (250 mm)

جـ. (20 cm)　　د. (300 μm)

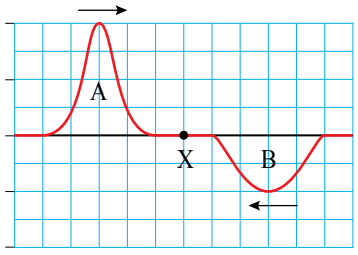
2. تنتقل موجة مستعرضة في حبل أفقي، وتعبُر نقطة محدّدة 8 قمم في (6 s). مستعينًا بمنحنى (الإزاحة- الموقع)؛ فإنّ سرعة الموجة تساوي:



أ. (1.2 m/s)　　ب. (1.6 m/s)

جـ. (1.8 m/s)　　د. (2.4 m/s)

3. عند إلتقاء الموجتين الموضحتين في الشكل عند النقطة (X)، وباعتبار كل وحدة على محور (y) تمثل (1cm) فإن سعة الموجة الناتجة في منطقة التداخل :



أ. 2 cm، للأعلى　　ب. 2 cm، للأسفل

جـ. صفر　　د. 6 cm، للأعلى

4. تتكوّن الموجات الموقوفة وفقًا لأكثر من نمط توافق في الخيط الواحد، نُميّزها بالرقم (n). فأيّ العبارات الآتية توضّح العلاقة بين عدد العُقد والرقم التوافقي (n)؟

أ. عدد العُقد يساوي $(n - 1)$.　　ب. عدد العُقد يساوي $(n + 1)$.

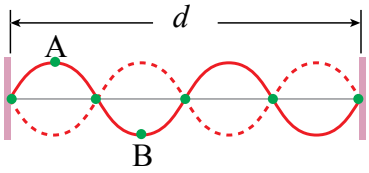
جـ. عدد العُقد يساوي $(\frac{n}{2})$.　　د. عدد العُقد يساوي $(\frac{n}{2} + 1)$

2. **أحسبُ** تردّد الموجات الكهرمغناطيسية ذوات الأطوال الموجية الآتية: (640 m)، (10 cm)، (1.0 μm)، (330 nm)، ثمّ أُحدّد موقع كلّ منها ضمن الطيف الكهرمغناطيسي.

3. **أفسّر:** عندما أُحرّك رأسيًّا بانتظام طرف حبل مشدود أفقيًّا بمعدل **3** مرّات في الثانية. كم سيكون الزمن الدوري للموجة المنتشرة؟ وهل يؤثّر عدد الاهتزازات في سرعة الموجة؟ أُبرّر إجابتي.

4. **أفسّر:** حبل طويل معلّق بالسقف، أمسكت بطرفه السفلي وحرّكته أفقيًّا بشكل منتظم. فتكوّنت موجات ثابتة. أُفسّر ذلك.

5. **أُحلّل:** أجرى عمر تجربة باستخدام خيط مشدود، ولاحظ تكوّن موجات موقوفة فيه، ثم رسم الشكل المجاور لتوضيح ما حصل عليه. أُساعد عمر في الإجابة عمّا يأتي:



أ . أُعبّر عن طول الخيط بدلالة الطول الموجي.

ب. أُبيّن العلاقة في الطور بين النقطتين A و B على الخيط، وأشرح إجابتي.

6. **أُحلّل:** تكوّنت موجات موقوفة في وتر مشدود بين نقطتين ثابتتين المسافة بينهما (86 cm). أُجيب عمّا يأتي:

أ . عند تكوّن بطن واحد؛ ما المسافة بين عُقدتين متتاليتين؟ ما مقدار الطول الموجي؟

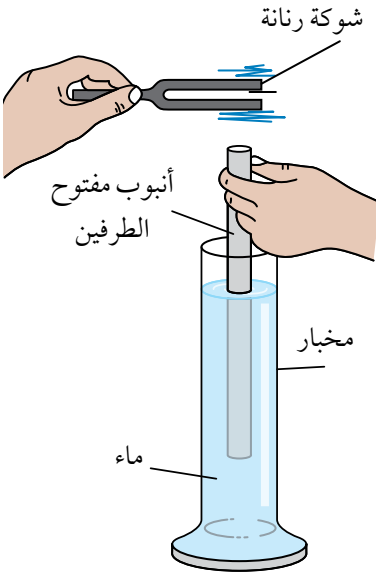
ب. عند تكوّن بطنين؛ ما المسافة بين عُقدتين متتاليتين؟ ما مقدار الطول الموجي؟

7. **أُقارن:** لدى وسيم ناي مفتوح النهاية، ولدى شقيقه يوسف مزمار مغلق النهاية، إذا كانت الآلتان متساويتين في الطول. فأيٌّ منهما يمكن استخدامها لعزف نغمة أكثر انخفاضًا بتوليدها موجات موقوفة ضمن التوافق الأول؟ أُوضّح إجابتي بالرسم.

8. **أتوقّع:** أجرت حنين تجربة لاستقصاء توافقات الموجات الموقوفة، فاستخدمت وترًا مشدودًا ومولّد اهتزازات. بدأت بزيادة التردّد ومراقبة الموجات الموقوفة في الحبل، ثم دوّنت بعض القياسات في الجدول الآتي:

التردّد (Hz)	100	200	300			
عدد البطون	1	2	3			
الطول الموجي (m)	1.00	0.50	0.33			

أُكمل الجدول، بتوقع التردّدات وعدد البطون والأطوال الموجية للمراحل الثلاث الإضافية للتجربة.



9. **التفكير الناقد:** تحاول رؤى استقصاء تردّدات التوافقات المختلفة في الأعمدة الهوائية المغلقة النهاية، والشكل المجاور يُبيّن وضعها أنبوبًا مفتوح الطرفين داخل مخبار فيه ماء، واستخدامها شوكة رنّانة.

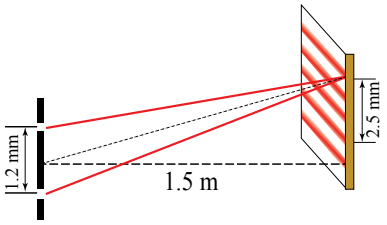
أ . كيف تتحكّم رؤى في طول عمود الهواء؟

ب. كيف تعلم بأنّ موجات موقوفة تولّدت في عمود الهواء؟

جـ. كيف يمكنها قياس الطول الموجي لموجات الصوت في الهواء في تجربتها هذه؟

10. **أحسبُ:** أُسقط ضوء أحادي اللون على محزوز حيود يحتوي على 500 خطّ في 1 ملمتر. فكانت زاوية الحيود للهدب المضيء الأول (15°). أحسبُ الطول الموجي للضوء الساقط.

11. **أستخدم المتغيرات:** أجرت مجموعة طالبات تجربة، فاستخدمن مصدرين ضوئيين متناغمين لتوليد نمط تداخل على حاجز، تفصل بين المصدرين مسافة (1.2 mm)، ويبعدان عن الحاجز مسافة (1.5 m)، لاحظت المجموعة تكوّن 4 أهداب مضيئة في مسافة (2.5 mm) على الحاجز، على نحو ما في الشكل المجاور.



أ. أحسبُ الطول الموجي للضوء.

ب. ما القِيَم التي تتغيّر عند تقريب الحاجز من الشقّين؟

12. **حل المشكلات:** تُستخدم الخلايا الشمسية لتوليد الكهرباء من أشعّة الشمس. ويتكوّن سطحها العلوي من السيليكون وهي مادة معامل انكسارها (3.5) وتعكس الضوء بنسبة (30%). أُقدّم رأيًا أُبيّن فيه كيف يمكن زيادة كفاءة هذه الخلايا بزيادة الضوء الذي ينفذ داخلها، وتقليل الضوء المنعكس عنها؟

13. **أحسبُ:** محزوز حيود يحتوي على 600 خطّ في كلّ ملمتر، أُسقط عليه ضوء ليزر طوله الموجي (405 nm)، أحسبُ زاوية الحيود:

أ . للهدب المضيء الأوّل.

ب. للهدب المضيء الثاني.

14. **أحسبُ:** استُخدم محزوز حيود لتوليد نمط تداخل باستخدام ضوء طوله الموجي (670 nm). تكوّن الهدب المضيء الثاني بزاوية حيود (58°). أحسبُ عدد خطوط المحزوز لكلّ ملمتر.

مسرد المصطلحات

- **اتّزان حراري Thermal Equilibrium:** الحالة التي يتساوى عندها معدلا انتقال الطاقة بين جسمين؛ إذ يُصبح لهما درجة الحرارة نفسها، ويكون صافي الطاقة المنتقلة بين الجسمين صفرًا.
- **بطن Antinode:** منطقة في الموجات الموقوفة، تكون الإزاحة المحصّلة فيها عظمى.
- **تداخل بنّاء Constructive Interference:** تداخل ناتج من التقاء موجتين متّفقتين في الطور.
- **تداخل هدّام Destructive Interference:** تداخل ناتج من التقاء موجتين متعاكستين في الطور.
- **تراكب Superposition :** جمع ما تحدثه موجتان (أو أكثر) من أثر في وسط واحد في لحظة واحدة، عندما تنتقلان خلاله.
- **تردّد Frequency :** عدد الموجات الكاملة التي تعبر نقطة ثابتة في الوسط خلال ثانية واحدة.
- **تردّد زاوي Angular Frequency:** عدد الدورات في وحدة الزمن مضروبًا في (2π)، ويقاس بوحدة rad/s.
- **تناغم Coherent:** يكون مصدرا الموجات من النوع نفسه، ويكونان متساويين في التردّد وبينهما فرق ثابت في الطور.
- **ثابت الطور Phase Constant** الزاوية التي تبدأ عندها الحركة التذبذبية.
- **حرارة Heat**: الطاقة التي تنتقل من الجسم (النظام) الأعلى درجة حرارة إلى الجسم الأدنى درجة حرارة، عندما يكونان في حالة اتّصال حراري، ورمزها Q.
- **حرارة نوعية كامنة للانصهار Specific Latent Heat of Fusion:** كمّية الطاقة اللازمة لتحويل (1 kg) من المادّة من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة من دون تغيير درجة حرارتها، رمزها (L_f) ووحدة قياسها (J/kg) حسب النظام الدولي للوحدات، وهي خاصّية للمادّة النقيّة.
- **حرارة نوعية كامنة للتصعيد (للتبخير) Specific Latent Heat of Vaporization:** كمّية الطاقة اللازمة لتحويل (1 kg) من المادّة من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية من دون تغيير درجة حرارتها، رمزها (L_v) ووحدة قياسها (J/kg) حسب النظام الدولي للوحدات، وهي خاصّية للمادّة النقيّة.

- **حركة توافقية بسيطة Simple Harmonic Motion (SHM):** حركة تذبذبية تتناسب فيها القوّة المُعيدة طرديًّا مع الإزاحة باتّجاه معاكس لها.
- **حركة تذبذبية (اهتزازية) Oscillatory Motion:** حركة دورية تُكرّر نفسها ذهابًا وإيابًا على المسار نفسه في فترات زمنية متساوية حول موقع الاتّزان.
- **حركة توافقية مُخَمّدة Damped Harmonic Motion:** الحركة التذبذبية التي تقّل سَعتها مع الزمن بسبب قوى المقاومة؛ مثل قوّة الاحتكاك.
- **حيود Diffraction:** ظاهرة انعطاف الموجات عند مرورها بالقرب من حاجز أو خلال فتحة ضيّقة في حاجز.
- **درجة انصهار Melting Point:** درجة الحرارة التي تتغيّر عندها الحالة الفيزيائية للمادّة من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة، وهي خاصّية فيزيائية للمادّة النقيّة.
- **درجة غليان Boiling Point:** درجة الحرارة التي تتغيّر عندها الحالة الفيزيائية للمادّة من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية، وهي خاصّية فيزيائية للمادّة النقيّة.
- **زاوية الطور Phase Angle:** الزاوية التي تُحدّد موقع الجسم عند أيّة لحظة زمنية (t) في أثناء حركته التوافقية البسيطة.
- **زمن دوري Period :** الزمن اللازم لمرور موجة كاملة خلال نقطة محدّدة.
- **سَعة Amplitude :** أقصى إزاحة تُحدثها الموجة لجُسيمات الوسط بالنسبة إلى موقع اتّزانها.
- **سَعة حرارية نوعية Specific Heat Capacity:** كمّية الطاقة اللازمة لرفع درجة حرارة (1 kg) من المادة بمقدار ($1^\circ C$)، رمزها c، وتُقاس بوحدة J/kg.K حسب النظام الدولي للوحدات.
- **شذوذ الماء Anomalous Behavior of Water :** سلوك الماء بين درجتَي حرارة ($4^\circ C$) و($0^\circ C$)؛ إذ إنّه في أثناء تبريد الماء من $4^\circ C$ إلى $0^\circ C$ فإنّه يتمدّد، مخالفًا بهذا السلوك سلوك بقية السوائل التي يقلّ حجمها باستمرار تبريدها حتى تجمّدها، ويكون أقلّ حجم لكمّية من الماء (أكبر كثافة) عند ($4^\circ C$).
- **طاقة حرارية Thermal Energy:** مجموع الطاقة الحركية لجُسيمات الجسم جميعها.
- **طاقة داخلية Internal Energy:** مجموع الطاقة الحركية والطاقة الكامنة لجُسيمات النظام جميعها،

وهي ترتبط بمكوّنات النظام المجهرية (الذرّات والجزيئات)، رمزها "U" ، وتُقاس بوحدة الجول (J) حسب النظام الدولي للوحدات.

- **طول موجي Wavelength:** المسافة بين أيّ نقطتين متتاليتين ومتماثلتين في إزاحتيهما.
- **عقدة Node:** منطقة في الموجات الموقوفة تكون الإزاحة المحصّلة عندها صفرًا في الأوقات جميعها.
- **فرق الطور Phase Difference :** اختلاف في شكل منحنى الموجة، ناتج من ابتداء الحركة بإزاحة لا تساوي صفرًا.
- **القانون الأوّل في الديناميكا الحرارية The first Law of Thermodynamics:** ينصّ على ما يأتي: "التغيّر في الطاقة الداخلية لنظام مغلق، يُساوي الطاقة المتبادلة مع النظام مضافًا إليها الشغل المبذول".
- **قوة مُعيدة Restoring Force:** القوّة التي تؤثّر في الجسم المهتز لإعادته إلى موقع الاتّزان، وتتناسب طرديًّا مع إزاحة الجسم (x)، ويكون اتّجاهها دائمًا باتجاه موقع الاتّزان بعكس اتّجاه الإزاحة.
- **مبدأ تراكب الموجات Principle of Superposition:** ينصّ على أنّه عند حدوث تراكب موجتين؛ فإنّ الإزاحة الناتجة عند أيّ نقطة في الوسط، تساوي ناتج الجمع المتّجهي للإزاحتين الناتجتين من الموجتين، وهما منفردتان.
- **محزوز حيود Diffraction Grating:** سلسلة من الفتحات المتوازية التي تفصلها مسافات متساوية يمرّ خلالها الضوء.
- **معامل التمدّد الطولي Coefficient of Linear Expansion:** يُساوي مقدار الزيادة في طول (1 m) من المادّة عند رفع درجة حرارتها بمقدار (1°C)، رمزه ألفا (α)، وهو يختلف من مادّة إلى أُخرى، ووَحدة قياسه ($°C^{-1}$) أو (K^{-1}).
- **موجات موقوفة Standing Waves:** نمط اهتزاز ثابت الشكل ينتج من تراكب موجتين متساويتين في التردّد والطول الموجي والسعة، تنتقلان في اتّجاهين متعاكسين في الوسط نفسه.
- **موجة جيبية Sinusoidal Wave:** الموجة التي يتّفق تمثيلها البياني مع اقتران الجيب.

قائمةُ المراجعِ (References)

1. Avijit Lahiri, **BASIC PHYSICS: PRINCIPLES AND CONCEPTS,** Avijit Lahiri, 2018 David Halliday, Robert Resnick , Jearl Walker, Fundamentals of Physics, Wiley; 11 edition 2018.
2. Douglas C. Giancoli, Physics: **Principles with Applications**, Addison Wesley, 6th edition, 2009.
3. Gurinder Chadha, **A Level Physics a for OCR**, A Level Physics a for OCR, 2015.
4. Hugh D. Young , Roger A. Freedman, **University Physics with Modern Physics**, Pearson; 14 edition (February 24, 2015)
5. Paul A. Tipler, Gene Mosca, **Physics for Scientists and Engineers**, W. H. Freeman; 6th edition, 2007.
6. Paul G. Hewitt, **Conceptual Physics**, Pearson; 14th edition, 2015.
7. R. Shankar, **Fundamentals of Physics I: Mechanics, Relativity, and Thermodynamics**, Yale University Press; Expanded Edition, 2019.
8. Raymond A. Serway , John W. Jewett, **Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics**, Cengage Learning; 009 edition, 2015.
9. Raymond A. Serway, Chris Vuille, **College Physics**, Cengage Learning; 11 edition, 2017.
10. Roger Muncaster, **A Level Physics**, Oxford University Press; 4th edition, 2014.
11. Steve Adams, **Advanced Physics**, Oxford University Press, USA; 2nd. Edition, 2013.
12. Tom Duncan, **Advanced Physics**, Hodder Murray; 5th edition, 2000.

Collins