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

الناشر: المركز الوطني لتطوير المناهج

يسر 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 الوطنـي لتطويـر المناهـج في جلسـته رقـم (/2021)، تاريـخ / /2021 م، وقرار مجلس التربية والتعليـم رقم (/2021) تاريـخ / /2021 م بـدءًا مـن العـام الـدراسي 2021 / 2022 م.

© Harper Collins 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: - - - -

المملكة الأردنية الهاشمية
رقم الإيداع لدى دائرة المكتبة الوطنية
(/ /)

373,19

الأردن. المركز الوطني لتطوير المناهج

فيزياء:الصف الحادي عشر الفرع العلمي: كتاب الطالب الفصل الثاني/ المركز الوطني لتطوير المناهج.– عمان: المركز، 2021

( ) ص.

ر.إ.: / /2021

الواصفات: / الفيزياء/ / المناهج/ / التعليم الثانوي/

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

قائمة المحتويات

الموضوع ..... **الصفحـة**

المقدّمة 5

الوحدة الرابعة: الحركة التوافقية البسيطة **7**

تجربة استهلالية: دراسة الحركة التذبذبية لجسم معلّق في نابض 9

الدرس الأول: خصائص الحركة التوافقية البسيطة 10

الدرس الثاني: تطبيقات الحركة التوافقية البسيطة 31

الوحدة الخامسة: الموجات وخصائصها **53**

تجربة استهلالية: قياس سرعة الموجات الميكانيكية في الأوساط الصلبة 55

الدرس الأول: التمثيل الرياضي للموجات 56

الدرس الثاني: الموجات الموقوفة والرنين 73

الدرس الثالث: التداخل والحيود لموجات الضوء 90

الوحدة السادسة: الديناميكا الحرارية **111**

تجربة استهلالية: تأثير كتلة الجسم في تغيّر درجة حرارته 113

الدرس الأول: حالات المادّة 114

الدرس الثاني: قوانين الديناميكا الحرارية 137

الدرس الثالث: التمدّد الحراري 164

مسرد المصطلحات 177

قائمة المراجع 180

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 والمعلّمين.

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 الكتاب من ثلاث وحدات دراسية، هي: الحركة التوافقية البسيطة، والموجات وخصائصها، والديناميكا الحرارية. وقد أُلحق به كتاب للأنشطة والتجارب العملية، يحتوي على التجارب والأنشطة جميعها الواردة في كتاب الطالب؛ ليساعده على تنفيذها بسهولة، بإشراف المعلّم، ومشاركة زملائه فيها، بما في ذلك رصد القراءات، وتحليلها، ثم مناقشتها، وصولًا إلى استنتاجات مبنية على أسس علمية سلمية. 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 المعلّمين.

والله ولي التوفيق

المركز الوطني لتطوير المناهج

الوحدة 4

الحركة التوافقية البسيطة

Simple Harmonic Motion

أتأمّل الصورة

برج تايبيه Taipei 101 واحد من 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، ورياح 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

Characteristics of Simple Harmonic Motion

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

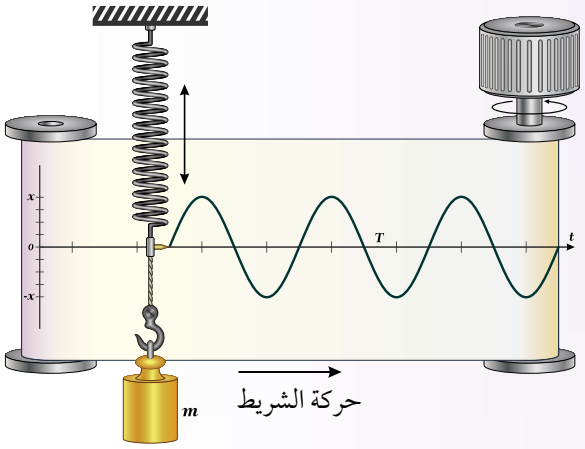
Applications of Simple Harmonic Motion

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 بالمنصب الفلزي، وأُثبّت القلم عند الطرف السفلي للنابض، بحيث يلامس شريطًا ورقيًّا قابلًا للسحب باتّجاه أفقي بين أسطوانتين كما 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 (2-4) 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 القصوى (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، هل ستتغيّر النتائج؟
6. **أُفسّر** تناقص سَعة الاهتزاز 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 الذرّات في جزيئات 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 الأمواج 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، بينما يتّصل الطرف الآخر بجسم كتلته (m) يتحرّك على سطح أفقي أملس كما 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 إلى 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، وتُعطى القوّة المُعيدة –في حالة حركة الجسم المتّصل بنابض– بالعلاقة الآتية:

$$F = - k\, x$$

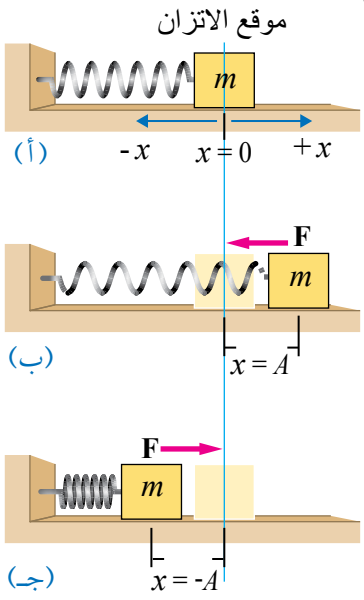
وتُعرف هذه العلاقة بقانون هوك حيث:

k: ثابت النابض (المرونة) 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 فإنه يتذبذب حول موقع الاتزان، ويكون الجسم في الموقع المبين 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 $-x$)، بينما مقدار السرعة (v) يساوي



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

سؤال: عند مرور الجسم في موقع الاتّزان في الشكل (2/ ب) يستمرّ في الحركة؛ على الرغم من أنّ القوّة المُعيدة والتسارع يساوي صفرًا عند تلك اللحظة. أُفسّر ذلك.

أبحثُ

قانون هوك له تطبيقات متنوّعة في مجالات مختلفة، أبحثُ في مصادر المعرفة المتاحة والموثوقة عن قانون هوك والتطبيقات العملية له، وأُعدّ عرضًا تقديميًّا أعرضه أمام طلبة 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، بينما يقلّ مقدار كلّ من الإزاحة، والقوّة المُعيدة، والتسارع ليصبح صفرًا لحظة مروره بموقع الاتّزان، ويستمر الجسم في الحركة باتّجاه اليسار مبتعدًا عن موقع الاتّزان؛ إذ يقل مقدار سرعة الجسم تدريجيًّا ليصبح صفرًا عند اقصى إزاحة ($x = -A$)، أنظرُ إلى الشكل (2/ جـ)، بينما 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، بينما 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:

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

تُحقّق العلاقة:

$$F \propto -x$$

الشرطين معًا. وبما 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؟

أُفكّر: 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 أمام معلمي وزملائي في الصف.

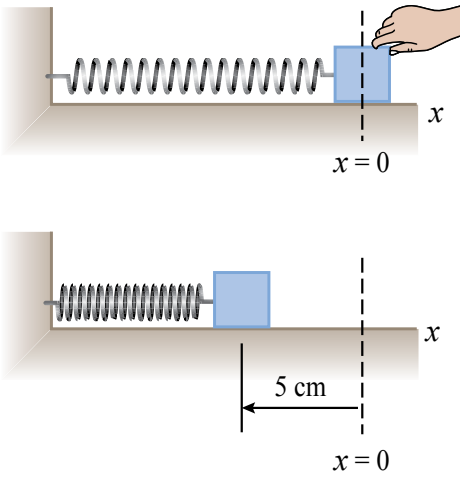
المثال 1

ضُغِط جسم متّصل بنابض موضوع على سطح أفقي أملس إلى نقطة تبعد مسافة 5 cm عن موقع اتّزانه كما في الشكل (3)، وتُرِك يتذبذب ذهابًا وإيابًا. إذا كان مقدار القوّة المُعيدة عند تلك النقطة 4 N فأجيب عمّا يأتي.

أ . ما مقدار سَعة الذبذبة؟

ب. أحسبُ ثابت النابض.

جـ. أحسبُ القوّة المُعيدة؛ 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:

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

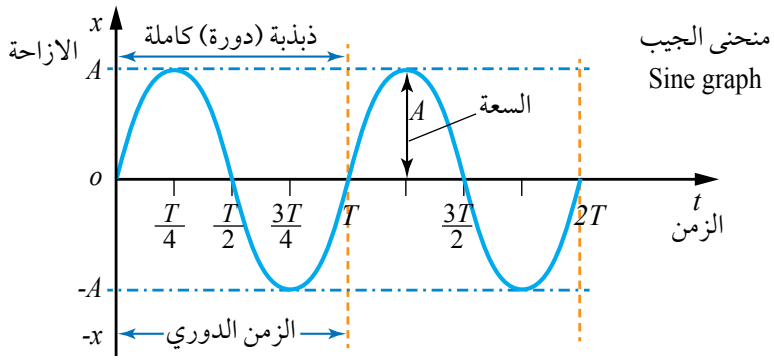
$4 = -k \times (-0.05)$

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

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 معاكسًا 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 كما 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، بينما يُعرف 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:

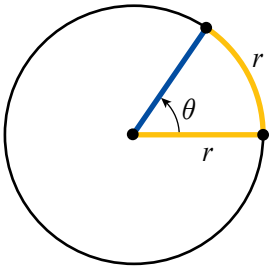
$$T = \frac{1}{f}$$

وأمّا الراديان Radian (ويُرمز له بالرمز rad) فهو زاوية مركزية في دائرة تقابل قوسًا طوله مساوٍ لطول نصف قطر الدائرة، كما في الشكل (5)؛ إذ إنّ:

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

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

θ = 1 radian (rad)
= 57.29578°



الشكل (5): تمثيل الراديان بالدرجات.

سؤال: كم تعادل زاوية مقدارها 1.57 rad بوحدة درجة؟

الربط مع الرياضيات

يُعرّف العدد π أو ما يُسمّى النسبة التقريبية، بأنّه النسبة بين محيط الدائرة وقطرها ($\pi = \frac{2\pi r}{2r}$)، وهو عدد غير حقيقي وغير نسبي، كما أنّه ثابت رياضي يُستخدم في الرياضيات والفيزياء. وأول من أطلق على النسبة التقريبية اسم (باي) عالم الرياضيات وليام جونز عام 1706. ويتطابق الكسر $\frac{22}{7}$ مع العدد (باي) حتّى 3 رتب فقط (3.14) وبعدها تتجاوز قيمته قيمة العدد (باي) بنسبة 0.04% تقريبًا.

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 كما في الشكل (6)، بحيث ينطبع ظل الكرة على الشاشة الموضوعة على يمين القرص. في أثناء دوران القرص تتحرّك الكرة على محيط الدائرة بينما يتحرّك ظلّ الكرة على الشاشة ذهابًا وإيابًا حول الموقع ($x = 0$)، وحركة 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 وتُعطى بالعلاقة:

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

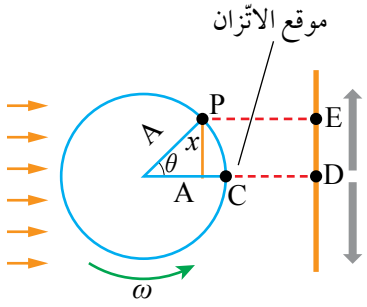
إذ تُقاس الزاوية θ بوحدة (rad) والزمن بوحدة (s) والسرعة الزاويّة ω بوحدة rad/s أو rad.s^{-1}

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 للزمن تُعطى 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.

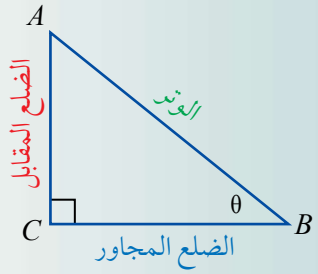
ω: التردّد الزاوي للحركة التوافقية البسيطة لظلّ الكرة وهو نفسه السرعة الزاويّة لدوران القرص ω. ويعرّف **التردّد الزاوي (Angular frequency (ω))** بأنّه عدد الدورات في وحدة الزمن مضروبًا في (2π)، ويقاس بوحدة rad/s،



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

الربط مع الرياضيات

بعض الاقترانات أو النسب المثلّثية في المثلّث القائم الزاوية:



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

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

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

ويُعطى بالعلاقة الآتية:

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

وبما 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.

وبشكل عام، تنطبق المعادلة:

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

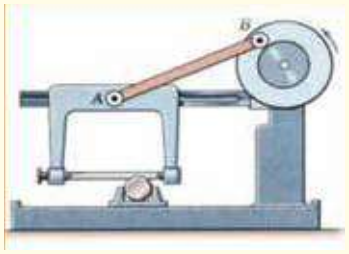
على أيّ حركة توافقية بسيطة تبدأ من موقع الاتّزان عند الزمن $(t = 0)$، وتُمثّل بيانيًّا باقتران الجيب كما في الشكل (4)، أمّا إذا بدأت الحركة التوافقية عند الزمن $(t = 0)$ ولكن من أقصى إزاحة (A)؛ فإنّ تغيّر الإزاحة مع الزمن يُمثّل بيانيًّا باقتران جيب التمام كما في الشكل (7)، لتصبح معادلة تغيّر الإزاحة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

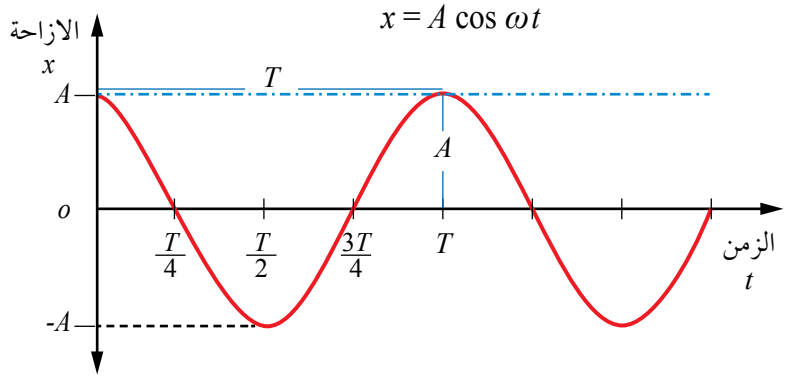
$$x(t) = A\ \cos\ \theta = A\ \cos\ (\omega\ t)$$

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

الربط مع الحياة

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 مع محرّك كهربائي يتّصل بقرص ويتحرّك حركة دائرية بسرعة زاويّة ثابتة؛ لتتحوّل حركته الدائرية إلى حركة تذبذبية ذهابًا وإيابًا في المنشار كما في الشكل.





الشكل (7): (أ) منحنى جيب التمام لتغيّر الإزاحة x مع الزمن t للحركة التوافقية البسيطة، بدءًا من أقصى إزاحة مقارنة مع منحنى 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 كما في الشكل (8)، ثم تُرِك ليبدأ بالتذبذب عند الزمن (t = 0)، فإذا علمتُ أنّ معادلة تغيّر الإزاحة مع الزمن:

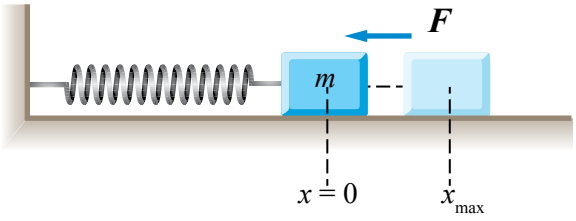
$$x(t) = 0.05 \cos\left(\frac{\pi}{2}t\right)$$

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

الحلّ:

أ. عن طريق مقارنة معادلتَي تغيّر الإزاحة مع الزمن:

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

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

أجد أنّ: السعة: $A = 0.05$ m

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

ب. الزمن الدوري:

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

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

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:

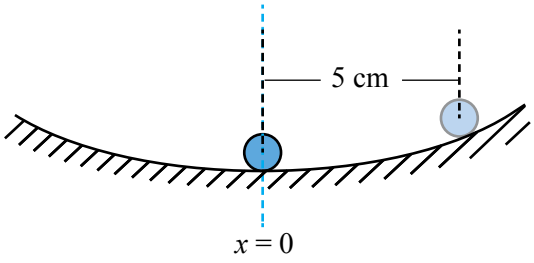
$$x(t) = 0.05 \cos(\omega\, t) = 0.05 \cos 45^\circ = 0.05 \times 0.7 = 0.035 \text{ m} = 3.5 \text{ cm}$$

المثال 3

تتذبذب كرة بحركة توافقية بسيطة في وعاء أملس مقعّر كما 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: $\omega = \dfrac{2\pi}{T} = \dfrac{2\pi}{0.86} = 2.33\ \pi = 7.31\ \text{rad/s}$

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. إذا بدأ الجسم الحركة عند الزمن ($t = 0$) من موقع الاتّزان باتجاه محور $+x$ وكانت سَعة الذبذبة 4 cm؛ فأُجيبُ عمّا يأتي:

أ . أكتبُ معادلة تغيّر الإزاحة مع الزمن.

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

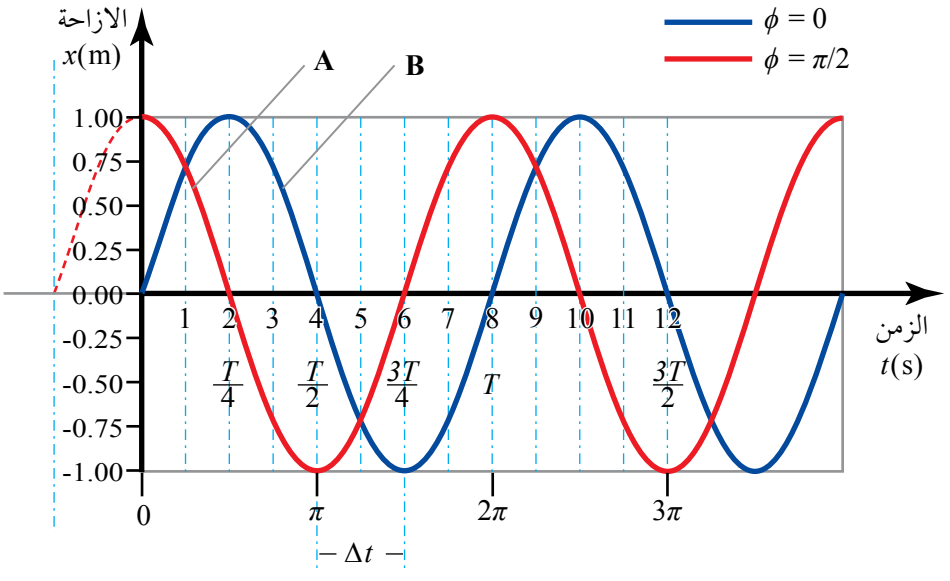
جـ. أرسمُ منحنى الإزاحة – الزمن لدورتين كاملتين.

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 نفسة ومن أقصى إزاحة بالاتّجاه نفسه، فإنّهما سيمرّان من موقع الاتّزان في الوقت نفسه، وسيصلان أقصى إزاحة في الوقت نفسه كذلك، عندئذٍ يقال إنّ النابضين متّفقان في الطور، وفرق زاوية الطور بينهما يساوي صفرًا. فما المقصود بالطور وزاوية الطور؟

الطـور وصف لموقـع الجسم في أثنـاء تذبذبـه، أمّـا **زاويـة الطور Phase angle** فتُعرف بأنّها الزاوية التي تُحدّد موقع الجسم عند أيّة لحظة زمنية (t) وتساوي ($\omega t + \phi$)، إذ تُمثّل ϕ ثابت الطور **constant Phase** ويعرّف بأنّه الزاوية التي تبدأ عندها الحركة.

أفترضُ تحرّك أحد النابضين قبل الآخر بزمن معيّن (Δt) كما في الشكل (10)، ما يؤدّي إلى فرق في الطور بينهما، عندئذٍ يُقال إنّ النابضين مختلفان في الطور؛ وهذ 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 في زمن بدء الحركتين. هذا الفرق في الزمن (Δt) بين حركة النابضين يُكافئ فرقًا



الشـكل (10): نظامـان فـي الحركـة التوافقيـة البسـيطة فـرق الطـور بينهمـا ثابـت.

سـؤال: مـا مقـدار كل مـن السـعة، والتـردد لحركة كلّ مـن النابضيـن؟

في زاوية الطور بين الحركتين مقدارها ($\omega\Delta t$) تقاس بوحدة راديان (rad) على النحو الآتي:

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

بشكل عامّ؛ تُعطى معادلة الإزاحة للحركة التوافقية البسيطة بالنسبة إلى الزمن بالعلاقة الآتية:

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

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

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

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

ومن ثمّ، فإنّ معادلة الحركة التوافقية البسيطة:

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

أُفكّر: إذا اختلفت سَعة النظامين (A, B) مع بقاء تساوي الزمن الدوري لهما وتحرّكا في الوقت نفسه من أقصى إزاحة بالاتّجاه نفسه. فهل يبقيان متفقان في الطور؟

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 فرق الطور بين حركتَي النابضين.

الحلّ:

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

ب. يمكن إيجاد فرق الطور بطريقتين:

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

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

- 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

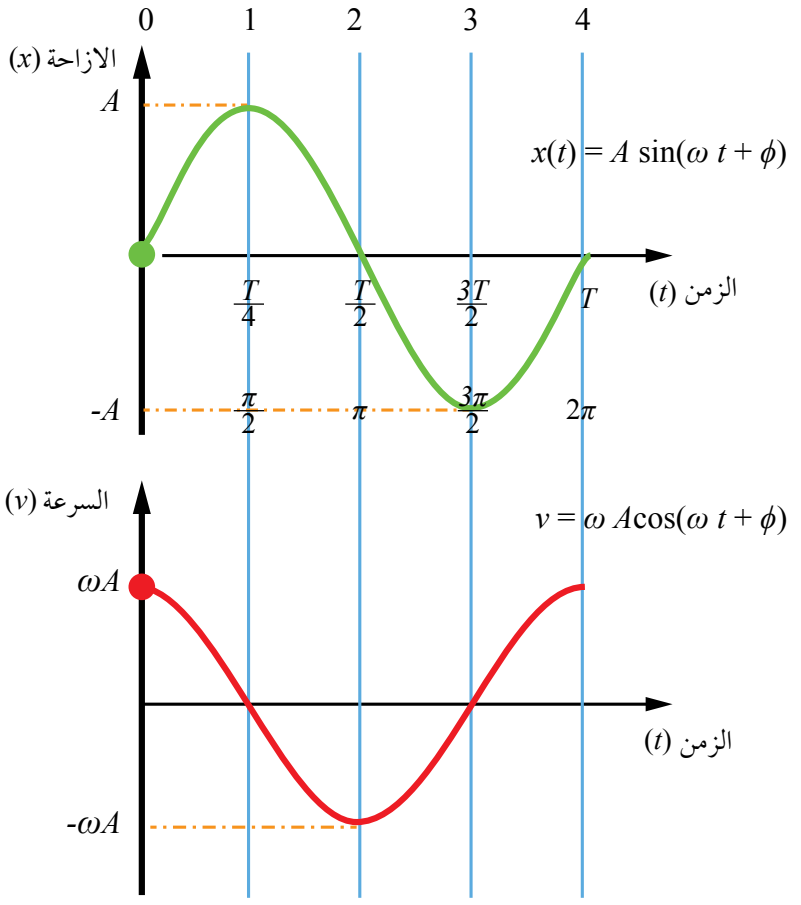
Velocity and Acceleration in SHM

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

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



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

سؤال الشكل:

حدّد 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، تعطى معادلة الإزاحة مع الزمن بالعلاقة:

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

سرعة الجسم عند أيّة لحظة (t) مثل سرعة النقطة الواقعة على الخط العمودي رقم (0) في منحنى (السرعة – الزمن) المبيّن في الشكل، تساوي مشتقّة معادلة (الإزاحة – الزمن) عند اللحظة نفسها؛ وتُعطى بالعلاقة الآتية:

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

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:

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

كذلك تسارع الجسم عند أيّة لحظة (t) تساوي مشتقّة معادلة السرعة مع الزمن؛ وتُعطى بالعلاقة الآتية:

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

عندما $\sin(\omega t) = -1$ ، $a_{max} = \omega^2 A$

وحيث إنّ 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.

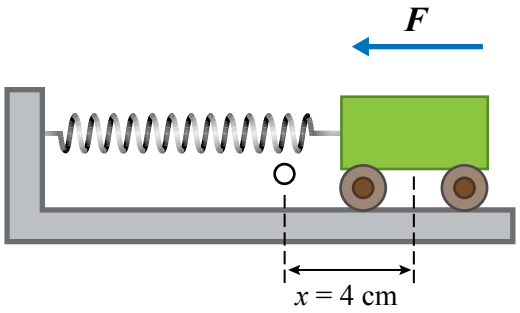
أفكّر: هل يتغيّر الزمن الدوري في نظام (كتلة - نابض) بتغيّر سَعة الذبذبة؟ أُوضّح ذلك.

المثال 5

عربة كتلتها 2 kg تتّصل بأحد طرفَي نابض موضوع على سطح أفقي أملس، بينما الطرف الآخر للنابض مثبّت في الجدار كما 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 فأُجيب 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 تُعطى بالعلاقة:

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

ومعادلة تغيّر السرعة مع الزمن تُعطى بالعلاقة:

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

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: $\phi = ?$, $T = ?$, $\omega = ?$, $A = ?$

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

– 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:

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

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

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.

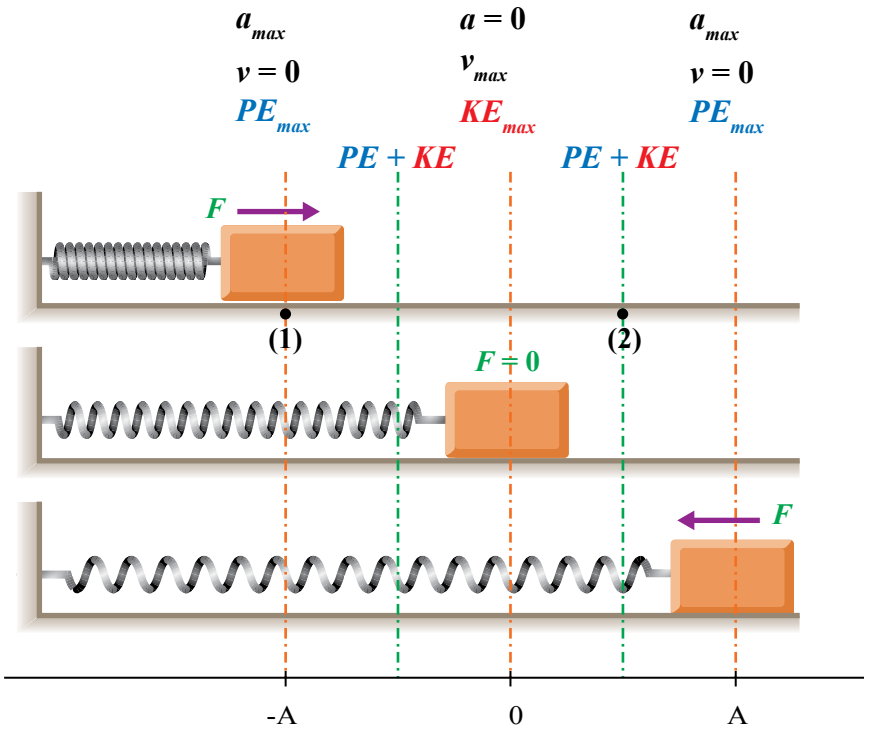
ب. سرعة الجسم بعد 0.5 s من بدء الحركة.

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. أفترض جسمًا كتلته m يتّصل بنابض موضوع على سطح أفقي أملس عند موقع الاتّزان ($x = 0$) كما في الشكل (13)، فإذا ضُغط النابض نحو اليسار بوساطة قوّة خارجية إزاحة قصوى ($x = -A$) فإنّ الشغل الذي تبذله تلك القوّة يُختزن على شكل طاقة وضع مرونية Potential energy (PE) وهي طاقة وضع تختزن في جسم مرن عند التأثير عليه بقوة تعمل على تغيير شكله، مثل ضغط أو استطالة نابض. وتُعطى 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 عظمى،



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

تبدأ بعدها تحوّلات الطاقة؛ إذ تتناقص طاقة الوضع المرونية وتزداد الطاقة الحركية Kinetic energy (KE) لتتحوّل طاقة الوضع المرونية كاملة إلى طاقة حركية عند موقع الاتّزان ($x = 0$)، ثم تتزايد طاقة الوضع المرونية وتقلّ الطاقة الحركية إلى أن تتحوّل الطاقة كاملة إلى طاقة وضع مرونية عند الإزاحة القصوى على الطرف الآخر ($x = A$) وهكذا، وبما 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 كما في الشكل (13)، يكون متساويًا:

$$PE_1 + KE_1 = PE_2 + KE_2$$

$$\frac{1}{2}kx_1^2 + \frac{1}{2}mv_1^2 = \frac{1}{2}kx_2^2 + \frac{1}{2}mv_2^2$$

وتكون الطاقة الميكانيكية في الحركة التوافقية البسيطة محفوظة في غياب القوى غير المحافظة، والقيمة العظمى لطاقة الوضع المرونية تساوي القيمة العظمى للطاقة الحركية، وتساوي الطاقة الميكانيكية كما هو مبيّن في الشكل (14). أي إنّ:

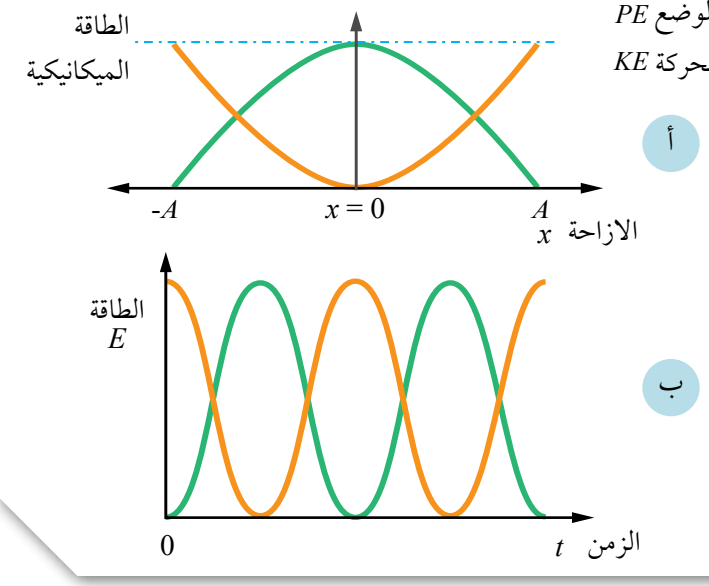
$$ME = PE_{max} = KE_{max}$$

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.



الشكل (14):

أ : تغيّرات كلّ من الطاقة الحركية وطاقة الوضع المرونية والطاقة الميكانيكية مع الإزاحة، في أيّ حركة توافقية بسيطة .

ب: تغيّر كلّ من طاقة الوضع المرونية والطاقة الحركية مع الزمن في الحركة التوافقية البسيطة، بدءًا من أقصى إزاحة.

والطاقة الحركية العظمى (عند موقع الاتّزان $(x = 0)$؛ حيث تبلغ السرعة قيمتها العظمى، تعطى بالعلاقة:

$$KE_{max} = \frac{1}{2}m(v_{max})^2$$

وبما أنّ: $v_{max} = \omega A$

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

وعند أيّ من النقطتين على طرفَي مسار الحركة $(x = A \text{ ، } x = -A)$ فإنّ الطاقة الميكانيكية هي طاقة وضع مرونية، حيث السرعة تساوي 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.

لذا؛ تتناسب الطاقة الميكانيكية في الحركة التوافقية البسيطة طرديًّا مع مربّع السعة. عند موقع الاتّزان $(x = 0)$ تتحوّل طاقة الوضع المرونية العظمى إلى طاقة حركية عظمى:

$$\frac{1}{2}kA^2 = \frac{1}{2}m(v_{max})^2$$

$$(v_{max})^2 = (\frac{k}{m})A^2$$

$$v_{max} = \pm\sqrt{\frac{k}{m}}\,A = \pm\,\omega A \quad , \quad \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

حيث v_{max}: السرعة العظمى خلال الحركة عند النقطة $(x = 0)$.

بشكل عامّ عند أيّ نقطة على مسار حركة الجسم المتصل بنابض يكون:

$$\frac{1}{2}kx^2 + \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}kA^2 \Rightarrow \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}kA^2 - \frac{1}{2}kx^2$$

$$v = \pm\sqrt{\frac{k}{m}(A^2 - x^2)} = \pm\sqrt{\frac{k}{m}}\sqrt{(A^2 - x^2)}$$

$$v = \pm\,\omega\sqrt{(A^2 - x^2)}$$

حيث v: سرعة الجسم عند أيّ نقطة على مسار حركة النابض، وقد تكون موجبة أو سالبة اعتمادًا على اتجاه حركة الجسم عند تلك النقطة.

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.

أبحثُ

مستعينًا بمصادر المعرفة الموثوقة والمتاحة ومنها شبكة الإنترنت، أبحثُ عن تغيّرات كلّ من الطاقة الميكانيكية، والطاقة الحركية، وطاقة الوضع، والسرعة لجسم يتحرّك حركة توافقية بسيطة، بحيث يتضمّن البحث فيديوهات تفاعلية تُظهر تغيّرات الطاقة والسرعة لحظيًّا عند تغيير موقع الجسم، وأعرضه أمام طلبة الصف مستخدمًا جهاز العرض (Data Show) لإتاحة الفرصة للطلبة للمشاركة والتفاعل مع العرض.

أفكّر: في اللحظة التي يكون فيها الجسم عند أقصى إزاحة عن موقع الاتّزان في أثناء حركته حركة توافقية بسيطة، أيّ الكميات الآتية: (السرعة، التسارع، طاقة الحركة، طاقة الوضع المرونية) تكون لها قيمة عظمى عند تلك اللحظة؟ مفسّرًا إجابتي.

المثال 7

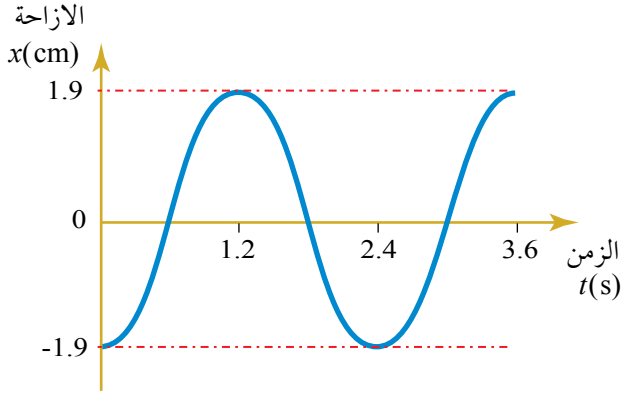
يتذبذب جسم كتلته 75 g يتّصل بنابض في حركة توافقية بسيطة كما في الشكل (15)، مستعينًا بالبيانات المثبّتة على الشكل أحسبُ:

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

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:

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

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

جـ. طاقة الوضع المرونية العظمى:

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

د . عند ($t = 0.6\ \text{s}$): 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، فأحسبُ:

أ . الطاقة الميكانيكية.

ب. الطاقة الحركية العظمى.

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

د . سرعة الجسم عندما تصبح إزاحته 2 cm عن موقع الاتّزان.

المعطيات:

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

المطلوب:

$ME = ?\ ,\quad KE_{max} = ?\ ,\quad KE_{x = A/2} = ?\ ,\quad PE_{x=A/2} = ?\ ,\quad v_{x = 0.02} = ?$

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 $x = 0.05\ \text{m}$:

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

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

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

د . السرعة v عند $(x = 0.02\ \text{m})$:

$$v = \pm \frac{k}{m} \sqrt{A^2 - x^2} = \frac{19.6}{0.2} \sqrt{(0.1)^2 - (0.02)^2} = 9.60\ \text{m/s}$$

وتُحدّد الإشارة ± حسب اتّجاه الحركة عند تلك النقطة.

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، فأحسبُ:

أ. ثابت النابض

ب. الزمن الدوري.

جـ. سرعة الجسم عندما تصبح إزاحته $(x = -5\ \text{cm})$.

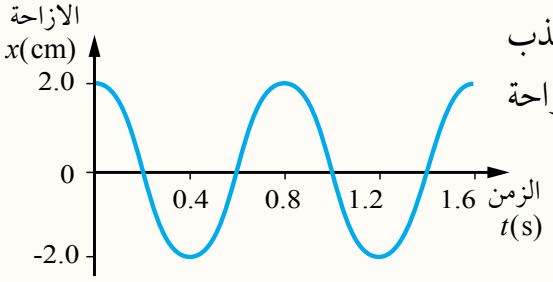
مراجعة الدرس

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.

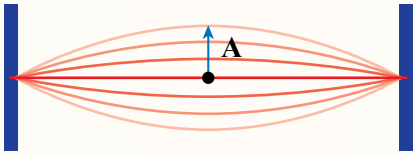
3. **أُحلّل:** يتحرّك جسم حركة توافقية بسيطة، فإذا بدأ التذبذب من أقصى إزاحة عن موقع اتّزانه ومُثّلت العلاقة بين الإزاحة والزمن بيانيًّا كما في الشكل، فأُجيب عمّا يأتي:



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 كما في الشكل، 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، فأُجيب عمّا يأتي:

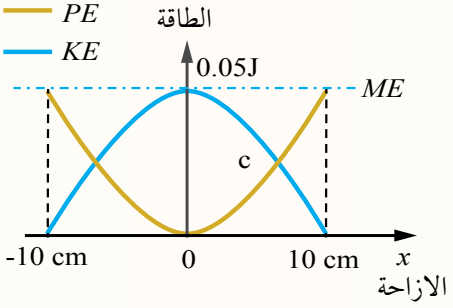


أ. ما مقدار القيمة العظمى لسرعة النقطة على الوتر.

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:

- يصف حركة بندول بسيط.
- يُحدّد الشروط التي يجب تحقّقها لتكون حركة البندول توافقية بسيطة عمليًا.
- يُحدّد العوامل التي يعتمد عليها الزمن الدوري لحركة البندول البسيط عمليًا.
- يُصمّم ساعة بندولية، ويستخدمها في قياس زمن معين.
- يُطبّق المعادلات الخاصّة بالبندول البسيط في حلّ مسائل حسابية.

المفاهيم والمصطلحات:

الحركة التوافقية المخمدة

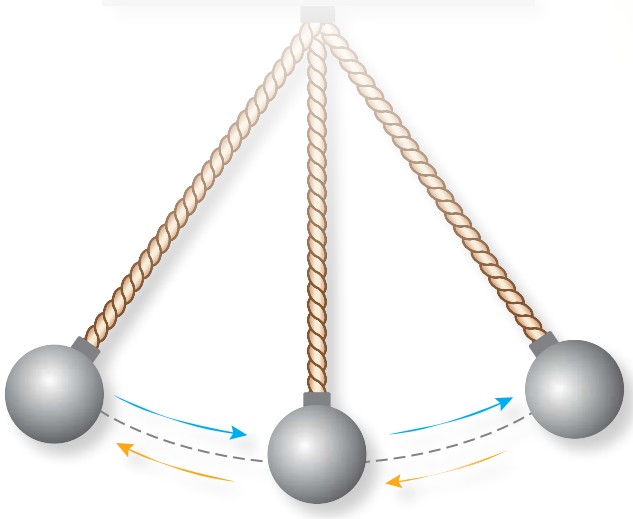
Damped harmonic motion

من دراستي الدرس الأوّل، تعرّفت الشروط اللازمة 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

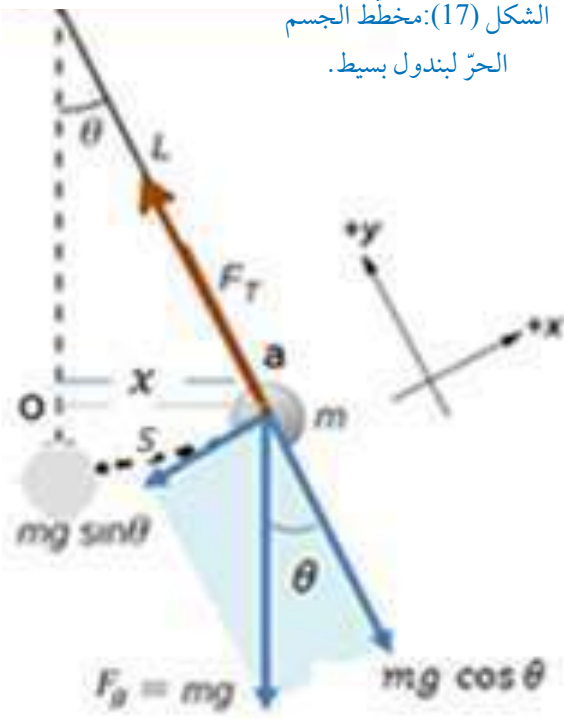
من الأمثلة الأخرى على الحركة التذبذبية حركة البندول البسيط، مثل حركة الأرجوحة وحركة بندول الساعة وغيرها. يتكوّن البندول البسيط من جسم ذي كتلة (كرة) صغيرة معلّقة بخيط رفيع مهمل الكتلة (كتلته صغيرة جدًّا بالمقارنة مع كتلة الجسم) مثبّت على حامل كما الشكل (16)، فإذا سُحِب الجسم إلى جهة معيّنة عن موقع الاتّزان وتُرِك؛ فإنّه يتأرجح ذهابًا وإيابًا على المسار نفسه حول موقع الاتّزان. يبدو 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 تُمثّل جزءًا مـن دائرة نصـف قطرهـا L كمـا هـو مبيّـن فـي مخطّط الجسـم الحـرّ للكـرة فـي الشـكل (17). إذا تُركـت الكـرة فإنّهـا تتذبـذب علـى طـول القـوس الدائـري وليـس فـي خـطّ مسـتقيم. تؤثّـر فـي الكـرة عنـد النقطـة a (أقصـى إزاحـة) قـوّة الشـدّ فـي الخيـط F_T ووزن الكـرة F_g وباختيـار محـور x باتجـاه يـوازي المماس للقـوس عنـد النقطـة a ومحـور y باتّجـاه عمـودي عليـه وتحليـل وزن الكـرة إلـى مركبتيـن $(mg \sin\theta , mg \cos\theta)$ فـإنّ مركّبتَـي القـوّة المحصّلـة المؤثّرة فـي الكرة

(المركّبة العمودية $\sum F_y$، المركّبة باتّجاه المماس لاتّجاه الحركة $\sum F_x$):

$$\sum F_y = F_T - mg \cos\theta = 0$$

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

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:

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

كما تُحقّق 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 مع الفلك

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 البانثو 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) يُعطى 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 ($\theta \lesssim 10^{o}$).

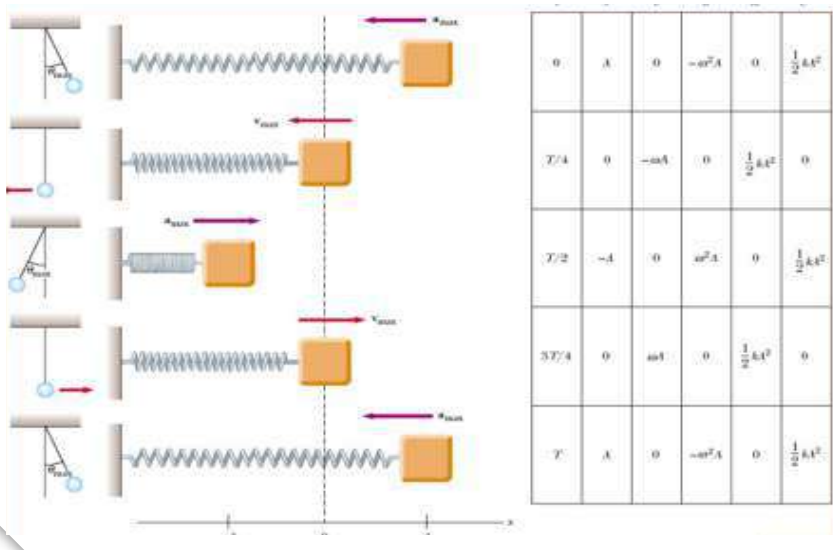
يُظهر الشكل (18) التشابه بين الحركة التوافقية البسيطة لنظام (كتلة – نابض) وحركة البندول البسيط.

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

الربطُ مع الجيولوجيا

يستخدم الجيولوجيون غالبًا البندول البسيط، عند التنقيب عن النفط أو المعادن. وينتج عن 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 أنّه يُعدّ أداة مهمّة للمسوحات الجيولوجية.

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



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

المثال 9

استخدم جيولوجي بندول 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:

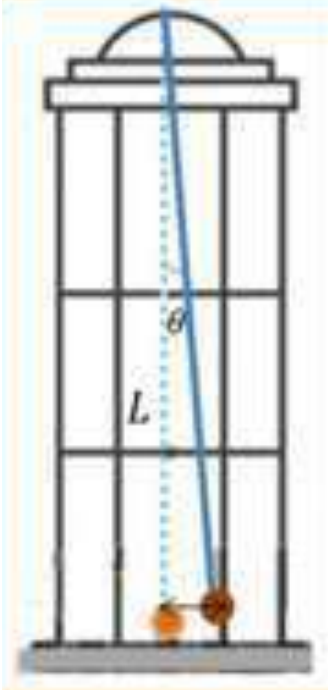
$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} \Rightarrow T^2 = 4\pi^2\frac{L}{g}$$

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

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 كما في الشكل (19)، وحسب زمن الذبذبة الواحدة للبندول (عن طريق قياس زمن عدة ذبذبات) فكان 10 s. أحسبُ:

أ . ارتفاع البرج.

ب. التردّد والتردد الزاوي للبندول.

جـ. مقدار القوّة المُعيدة عند أقصى إزاحة.

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

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

الحلّ:

أ . ارتفاع البرج:

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

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

ب. التردّد:

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

التردّد الزاوي:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2 \times 3.14}{10} = 0.0.628 \text{ rad/s}$$

جـ. القوّة المُعيدة:

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

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 ≡ القيمة العظمى لسرعة البندول v_{max}. لحساب قيمتها؛ نحتاج إلى حساب التردّد الزاوي أولا:

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

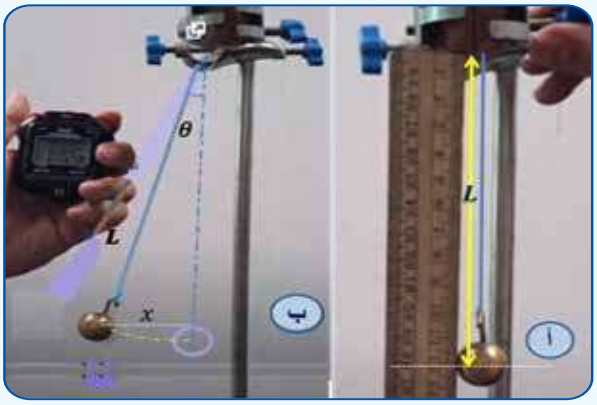
المواد والأدوات: كرتان فلزّيتان مختلفتان في الكتلة، حامل فلزّي، خيط غير قابل للاستطالة (أو سلك رفيع)، ساعة إيقاف رقمية، مسطرة مترية.

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 بينما أُثبّت الطرف الآخر للخيط باللواقط كما في الشكل، بحيث أتمكّن من تغيير طول الخيط L.
2. **أقيس** طول الخيط (L) باستخدام المسطرة المترية كما في الشكل (أ)، وأُدوّن النتيجة في الجدول.
3. **أقيس:** أسحبُ الكرة إلى اليسار مسافة أفقية صغيرة بحيث تكون الزاوية θ أقل من 10^{o} تقريبًا كما 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) وأُدوّن نتائجي في الجدول.
5. أُكرّر الخطوتين (3-4) مستخدمًا أطوال 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 $\theta = 25^{o}$ 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 $g = 9.8\ m/s^2$؟ ما 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 $\theta = 25^{o}$ 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. وتسارع السقوط الحر يبقى ثابتًا بغض النظر عن طول الخيط أو كتلة الجسم ما دامت الزاوية $\theta \lesssim 10^{o}$، أمّا عندما تصبح الزاوية θ أكبر من (مثلًا $\theta = 25^{o}$) فإنّ قيمة تسارع السقوط الحرّ تختلف عن القيمة المحسوبة عند الزاوية $\theta \lesssim 10^{o}$؛ لأنّ حركة البندول التذبذبية في هذه الحالة لا تُحقّق شروط الحركة التوافقية البسيطة. وبالتالي لا تنطبق عليها العلاقات الخاصة بهذه الحركة التي تستخدم في حساب تسارع السقوط الحر.

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

الساعة البندولية Pendulum Clock

من التطبيقات الأخرى للبندول البسيط الساعة البندولية Pendulum Clock أنظر إلى الشكل (20). التي اخترعها العالم الهولندي كريستيان هايغنز 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.

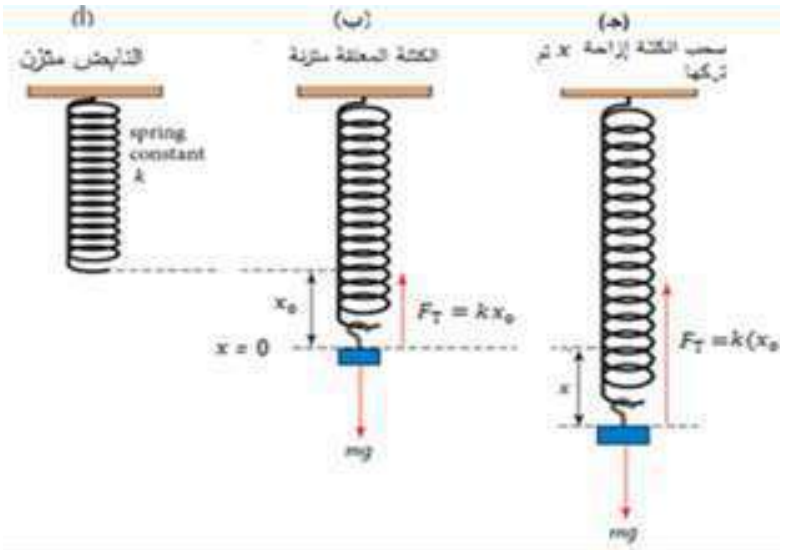
$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$

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

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، نفترض أنّ الكتلة المعلّقة بساق البندول تحرّكت إلى أسفل فهل الزمن الذي تقيسه الساعة يبقى صحيحًا أم يقلّ أم يزداد؟ أُفسّر إجابتي.



الشكل (21): العلاقة بين القوّة واستطالة النابض الرأسي.

سؤال: في أثناء تذبذب الجسم إلى أعلى وأسفل حول موقع الاتّزان ($x = 0$)، هل تساوي القوّة المُعيدة عند موقع الاتّزان صفرًا؟ أُوضّح إجابتي.

نظام (كتلة- نابض) رأسي Vertical Mass-Spring System

من الأمثلة الشائعة على الحركة التوافقية البسيطة نظام (كتلة – نابض)، وقد درستُ سابقًا حركة كتلة تتّصل بنابض على سطح أفقي أملس، ولكن ماذا لو عُلّقت كتلة رأسيًّا بنابض وسُحبت إلى أسفل ثمّ تُركت تتذبذب.

عند تعليق نابض بشكل رأسي دون تعليق أي جسم (كتلة) به كما في الشكل (21/أ)؛ لا تحدث له استطالة عند إهمال كتلته، أمّا إذا عُلّق جسم كتلته (m) بالنابض كما في الشكل (21/ب)؛ فإنّ وزن الجسم mg يؤثّر في النابض فيستطيل إزاحة (x_o) يعتمد مقدارها على ثابت النابض، وعندما يتّزن الجسم فإنّ قوّة الشد في النابض ($F_T = -kx_o$) رأسيًّا إلى الأعلى تساوي وزن الجسم mg وتعاكسه في الاتّجاه؛ وبما أنّ مقدارَيهما متساويان فإنّ: $kx_o = mg$

إذا سُحِب الجسم إزاحة إضافية (x) نحو الأسفل؛ فإنّ مقدار قوّة الشد في النابض تُصبح ($F_T = k(x_o + x)$)، والقوّة المُعيدة F التي تسحب الجسم رأسيًّا إلى أعلى باتّجاه موقع الاتّزان، هي محصّلة قوّة الشدّ لأعلى ووزن الجسم لأسفل كما هو مبين في الشكل، على النحو الآتي:

$$F = F_T - mg$$

$$F = k(x_o + x) - mg$$

أعدُّ فيلمًا قصيرًا باستعمال برنامج صانع الأفلام (movie maker) يوضّح تغيّر كلّ من الأزاحة السرعة والتسارع والقوّة المُعيدة، في أثناء تذبذب كلّ من البندول البسيط والكتلة المعلّقة بنابض، ثم أشاركه معلمي وزملائي في الصف.

ولكن: $k x_o = mg$

وبذلك؛ فإنّ القوّة المُعيدة (وهي القوّة المحصّلة المؤثّرة في الجسم) تُعطى مقدارًا واتّجاهًا بالعلاقة:

$$F = - k x$$

والإشارة السالبة تعني أنّ اتّجاه القوّة المُعيدة بعكس اتّجاه الإزاحة.

باستخدام القانون الثاني لنيوتن:

$$F = ma = - k x$$

فإنّ التسارع يُعطى بالعلاقة:

$$a = - \frac{k}{m} x$$

وتُشير هذه المعادلة إلى أنّ تسارع الجسم المعلّق بالنابض يتناسب طرديًّا مع الإزاحة ولكن باتّجاه معاكس لها؛ وهذه شروط الحركة التوافقية البسيطة. كذلك عبر مقارنة المعادلة الأخيرة مع المعادلة $a = -\omega^2 x$ نحصل على:

$$\omega^2 = \frac{k}{m}$$

وبما أنّ:

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

يُعطى الزمن الدوري T في نظام (كتلة – نابض) بالعلاقة:

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

ومن المثير للاهتمام، أنّ الزمن الدوري لتذبذب الجسم المتّصل بالنابض لا يعتمد على تسارع السقوط الحر (g) كما هي الحال في البندول.

أفكّر: ما تأثير تغيّر تسارع السقوط الحرّ على كلّ من التردّد الزاوي وموقع الاتّزان في نظام (كتلة - نابض) الرأسي.

✓ **أتحقّق:** ما العوامل التي يعتمد عليها الزمن الدوري لجسم معلّق بنابض رأسي، يتذبذب لأعلى وأسفل في حركة توافقية بسيطة.

المثال 12

جسم كتلته 150 g معلّق بطرف نابض ويتذبذب في حركة توافقية بسيطة بشكل رأسي، فإذا كان ثابت النابض 25 N/m فأحسبُ:

أ . الزمن الدوري.

ب. التردّد الزاوي.

المعطيات:

$$m = 150\ \text{g} = 0.15\ \text{kg}\ ,\quad k = 25\ \text{N/m}$$

المطلوب:

$$T = ?\ ,\quad \omega = ?$$

الحلّ: أ. الزمن الدوري:

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

$$T = 2 \times 3.14 \times \sqrt{\frac{0.15}{25}} = 0.487\ \text{s}$$

ب. التردّد الزاوي: إمّا بتطبيق العلاقة:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2 \times 3.14}{0.487} = 12.9\ \text{rad/s}$$

وإمّا بتطبيق العلاقة:

$$\omega^2 = \frac{m}{k} \Rightarrow \omega = \sqrt{\frac{m}{k}} = \sqrt{\frac{25}{0.15}} = 12.9\ \text{rad/s}$$

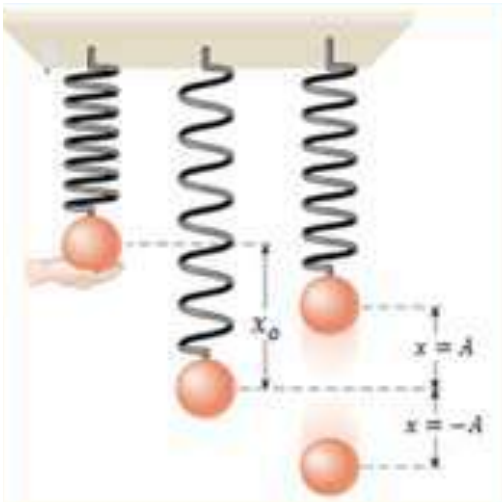
المثال 13

علّقت فدوى كرة بنابض رأسي، وبعد استقرارها عند موقع الاتّزان سحبتها إلى أسفل مسافة معيّنة كما في الشكل (22)، ثم تركتها تتذبذب حول ذلك الموقع في حركة توافقية بسيطة بحيث تُكمل خمس دورات في ثانيتين. إذا كان ثابت النابض 350 N/m فأحسبُ:

أ . التردّد.

ب. كتلة الكرة.

جـ. كلًّا من تسارع الكرة والقوّة المُعيدة وقوّة شدّ النابض عند موقع الاتّزان.



الشكل (22): العلاقة بين القوّة واستطالة النابض الرأسية.

المعطيات: $k = 350$ N/m , خمس دورات خلال ثانيتين.

المطلوب: $F_T = ?$, $F = ?$, $a = ?$ $m = ?$, $f = ?$

الحلّ:

أ. الزمن الدوري: $T = \frac{2}{5} = 0.4$ s

التردّد: $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.4} = 2.5$ Hz

ب. كتلة الكرة: $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$

$$m = \frac{T^2 k}{4\pi^2} = \frac{(0.4)^2 \times 350}{4 \times (3.14)^2} = 1.4 \text{ kg}$$

جـ. عند موقع الاتّزان ($x = 0$): التسارع يساوي صفرًا: $a = -\frac{k}{m}x = 0$

القوّة المُعيدة F تساوي صفرًا: $F = -kx = 0$

قوة الشدّ في النابض FT:

$F = F_T - mg$

$0 = F_T - mg \Rightarrow F_T = mg = 1.4 \times 10 = 14$ N

المثال 14

وضع طفل كتلته 5.4 kg في كرسي نطاطة أطفال معلقة بحبل مرن كما في الشكل (23) فاستطال بمقدار 24 cm ليصل حالة الاتّزان، سُحِب الطفل إلى أسفل مسافة ما ثم تُرِك الطفل يتذبذب بشكل رأسي في حركة توافقية بسيطة. بإهمال كتلة النطّاطة أحسبُ:

أ . ثابت المرونة للحبل.

ب. تردّد الذبذبات.

المعطيات: $m = 5.4\ \text{kg}\ ,\ x_o = 24\ \text{cm} = 0.24\ \text{m}$

المطلوب: $f = ?\ ,\ k = ?$

الشكل (23): نطّاطة أطفال.

الحلّ:

أ. عندما يصل الطفل إلى حالة الاتزان فإنّ:

$$F_T = mg = 5.4 \times 10 = 54\ \text{N}$$

$$F_T = -kx$$

$$54 = -k \times (-0.24) \Rightarrow k = 225\ \text{N/m}$$

ب. تردّد الذبذبات:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2 \times 3.14 \times \sqrt{\frac{5.4}{225}} = 0.94\ \text{s}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.94} = 1.06\ \text{Hz}$$

تمرين

عُلّق جسم كتلته 7 kg بنابض، ثم سُحِب إلى أسفل وتُرِك يتذبذب رأسيًّا إلى أعلى وأسفل في حركة توافقية بسيطة. إذا كان الزمن الدوري لحركته 1.26 s فأحسبُ:

أ . التردّد الزاوي.

ب. ثابت النابض.

جـ. تسارع الجسم عندما يصبح على 0.15 m من موقع الاتّزان.

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 الجيتار أو العود كما في الشكل (24)، ينتج عن اهتزاز أوتار تلك الآلات أصوات تسمعها الأذن البشرية موسيقى. فعند إزاحة وتر الغيتار عن موقع اتّزانه مسافة معيّنة (تعتمد على القوّة التي يؤثّر بها عازف الجيتار في الوتر) ثم تركه؛ فإنّه يتذبذب حول موقع الاتّزان ذهابًا وإيابًا في حركة توافقية بسيطة، وينتج عن طاقة تذبذب الوتر صوت موسيقي يتلاشى تدريجيًّا نتيجة التناقص في طاقة الذبذبات.

الشكل (24): اهتزاز وتر الغيتار.

القفز بالحبال المطّاطية (بنجي) Bungee Jumping

يُعدُ القفز بالحبال أو ما يُعرف بالبنجي كما في الشكل (25)، تطبيقًا آخر على الحركة التوافقية البسيطة، وهو نشاط رياضي ينطوي على القفز من مناطق شاهقة الارتفاع، بينما يكون القافز مربوطًا بحبل مطّاطي يُحقّق مواصفات الأمان؛ ويقفز من مناطق ثابتة كالجسور والمباني، أو متحرّكة كالقفز من منطاد أو من طائرة عمودية. وأُدخلت

الشكل (25): القفز من ارتفاعات شاهقة؛ باستخدام حبل مطّاطي.

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 كما في الشكل (26) الذي اخترع عام 1815م، أو كهربائيًّا أو إلكترونيًّا يمكن تحميله كتطبيق على هاتفي الخلوي. يُستخدم البندول الايقاعي من قِبَل الموسيقيين 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 (26): 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، أنظر الشكل (27/أ)، وهذا الافتراض لتسهيل التعامل مع الحركة التوافقية البسيطة رياضيًا، 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 إلى الصفر، أنظر الشكل (27/ب)، حيث تتحول الطاقة الميكانيكية إلى طاقة داخلية في الجسم والوسط الذي يتذبذب فيه، ونتيجة لذلك تقل سعة الذبذبات.

الشكل (27): الطاقة الميكانيكية لحركة توافقية:

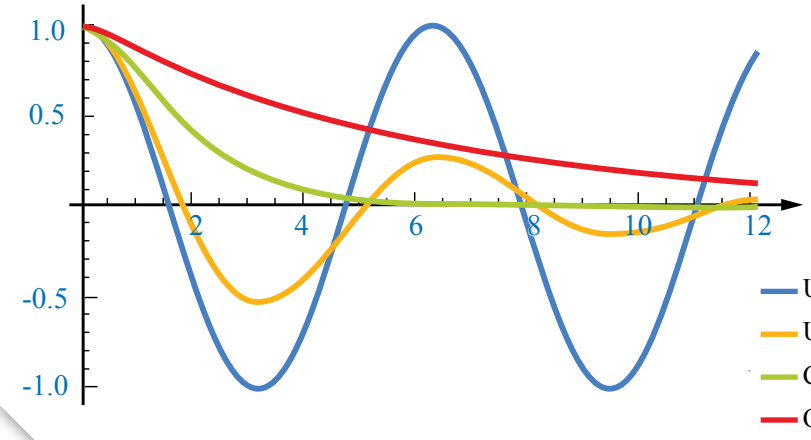
أ) في غياب قوى احتكاك.

(ب) بوجود قوى احتكاك.

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

في حالة التخامد فإن الحركة التذبذبية لا تعد حركة توافقية بسيطة، لذا يمكن التعامل مع ثلاث حالات شائعة من التذبذب المتخامد لاقتران الإزاحة – الزمن ممثلة في الرسم البياني المبين في الشكل (28) وهي:

- **التخامد البسيط Under- damped:** يكون التخامد في النظام متوسّطًا، بحيث يتذبذب عدّة مرّات يتناقص خلالها مقدار كلّ من السعة والطاقة بالتدريج قبل أن تصل إلى الصفر، ويصل الجسم إلى موقع الاتّزان، مثل الحركة التوافقية البسيطة في نظام (كتلة – نابض) والبندول البسيط.



الشكل (28): تغيّر الإزاحة مع الزمن لحالات مختلفة من التخامد وحالة غير متخامدة.

سؤال: بناءً على الشكل، أُقارن بين المنحنيات الأربعة من حيث تغيّر السعة مع الزمن.

الشكل (29): غالق (رداد) الباب.

- **التخامد القوي Over damped:** يكون التخامد في النظام كبيرًا، بحيث يستغرق الجسم مدّة زمنية للوصول إلى موقع الاتّزان وبشكل أُسّي، دون أن يتذبذب، ومثال على ذلك غالق الباب الهيدروليكي Hydraulic door closer أو ما يُسمّى رداد الباب كما في الشكل (29)؛ 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.

- **التخامد الحرج Critical damped:** يكون التخامد في النظام كبيرًا جدًّا، بحيث يصل الجسم إلى موقع الاتّزان بأسرع وقت ممكن، دون أن يتذبذب، ومثال على ذلك ممتصّ الصدمات shock absorber في المركبات، ومخمد الذبذبات في برج Taipei 101 في صفحة أتأمّل الصورة في بداية الوحدة. ويبيّن الشكل (30) صورة لذلك البرج الذي وُضعت في داخله الكرة.

بالنسبة إلى النظام الخاضع للاهتزاز القسري Forced oscillation (النظام الذي تؤثّر فيه قوى خارجية إضافية)؛ فإنّ القوّة الخارجية الإضافية تبذل شغلًا يزوّد النظام بالطاقة باستمرار، للتغلّب على الطاقة الضائعة بسبب قوة الاحتكاك وغيرها من المقاومات. فمثلًا، إذا دفعتُ أرجوحة باستمرار فإنّها تستمر في التذبذب ولا تتخامد حركتها.

✓ **أتحقّق:** ما سبب تخامد أنظمة التذبذب الحرّة؟ وما تأثير ذلك على كلّ من طاقة النظام وسَعة التذبذب؟

الربط مع الهندسة

مُخمّد الرياح والزلازل في برج Taipei

استفاد المهندسون من فكرة التخامد الحرج في تصميم أكثر المخمّدات شهرة في العالم، وهو برج Taipei 101 كما 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.

الشكل (30): 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 طلبة الصف.

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.

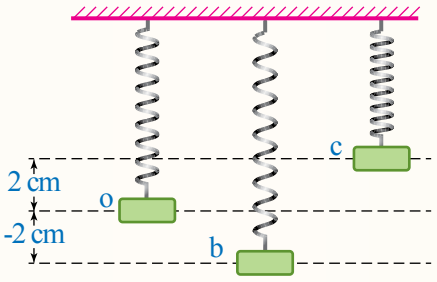
2. **أحلّ المشكلات:** يستخدم جد ليلى ساعة بندولية تعتمد على الزمن الدوري للبندول، وذات يوم لاحظ أنّ ساعته غير دقيقة؛ فنظرت ليلى إلى ساعتها فكانت 5:15 PM بينما ساعة جدّها 5:00 PM . كيف يمكن لليلى ضبط ساعة جدّها بحيث تقيس الزمن بدقّة دون تقديم أو تأخير.

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. **أستخدمُ المتغيّرات:** عُلّق جسم بنابض، وبعد أن استقر عند النقطة o كما في الشكل، سُحِب إلى أسفل عند النقطة b، ثم تُرِك يتذبذب رأسيًا إلى الأعلى والأسفل بين النقطتين (b وc). إذا استغرق الجسم زمنًا قدره 0.6 s في أثناء حركته من b إلى c، فأحسبُ:



   أ . الزمن الدوري.

   ب. التردّد الزاوي.

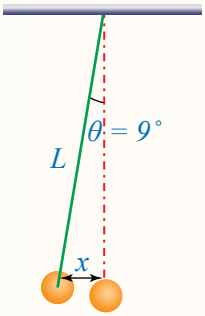
   جـ. تسارع الجسم عند النقطة c.

   د . مقدار التسارع عند النقطة c واتّجاهه.

   هـ. سرعة الجسم عندما يصبح على بعد 1.5 cm من موقع الاتّزان باتجاه النقطة c.

5. **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.

6. **أستخدمُ المتغيّرات:** بندول بسيط كتلته 0.25 kg وطوله 80 cm. إذا أُزيح زاوية 9^{o} كما في الشكل ثمّ تُرِك يتذبذب في حركة توافقية بسيطة، فأحسبُ:



   أ . الزمن الدوري.

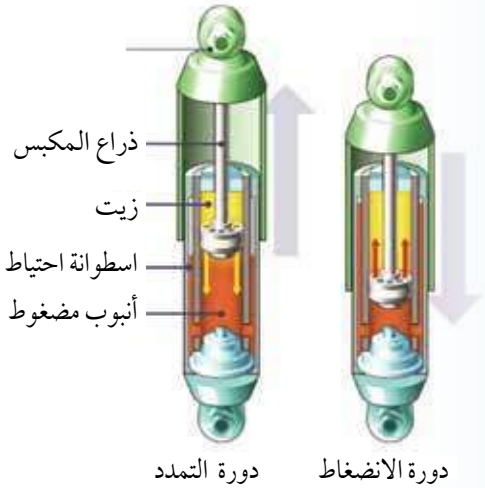
   ب. أقصى إزاحة x.

   جـ القيمة العظمى للسرعة.

ممتص 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 عنه. وتكمن أهمّيته في تخميد الاهتزازات الناتجة عن النوابض؛ من أجل المحافظة على ثبات المركبة على الطريق، والتقليل من اهتزاز هيكل المركبة وتأرجحه في أثناء القيادة، وبخاصّة على الطرق الوعرة غير الممهّدة وعند مواجهة المطبات والحفر، كما أنّه يعمل 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 كما 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 كما في الشكل، 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 لأخرى.

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 وحدة، وأعد وأفراد مجموعتي تقريرًا مدعّمًا بالرسومات 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. جسم كتلته m معلّق بنابض رأسي ويتذبذب إلى أعلى وأسفل في حركة توافقية بسيطة والزمن الدوري لتذبذبه T، فإذا استبدل جسم آخر كتلته 2 m بالجسم ذي الكتلة m فإنّ الزمن الدوري لتذبذب الجسم $2\ m$ يساوي:

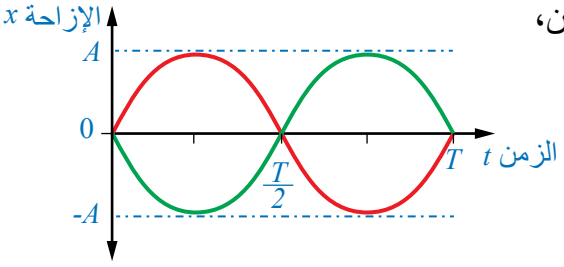
أ. $2T$ ب. $\sqrt{2}T$ جـ. T د. $\frac{T}{\sqrt{2}T}$

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

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

ب. القيمة العظمى للسرعة. د. الزمن الدوري.

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



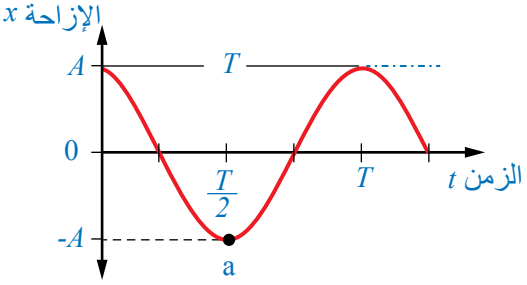
أ. $\frac{\pi}{4}$ ب. $\frac{\pi}{2}$

جـ. π د. 2π

5. 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

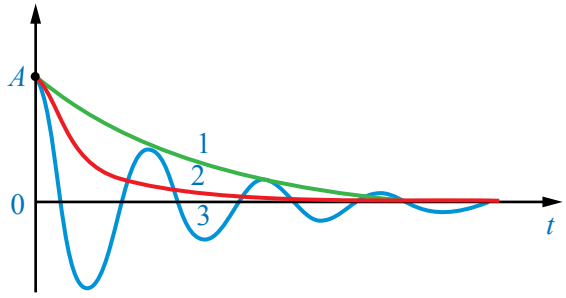
6. تتّصل كتلة بنابض على سطح أملس أفقي وتتحرّك حركة توافقية بسيطة، فإذا مُثّلت العلاقة بين الإزاحة والزمن كما في الشكل؛ فإنّ كلًّا من سرعة الكتلة والقوّة المُعيدة عند النقطة a توصف على النحو الآتي:



أ. $(v: +\ ,\ F: -)$ ب. $(v: -\ ,\ F = 0)$

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

7. يُمثّل المنحنى رقم 2 في الشكل حالة:



أ. تخامد بسيط.

ب. تخامد قوي.

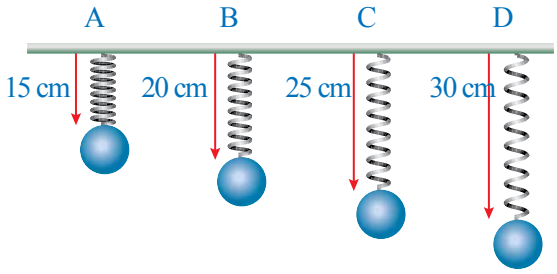
جـ. تخامد حرج.

د. غير متخامدة.

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

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

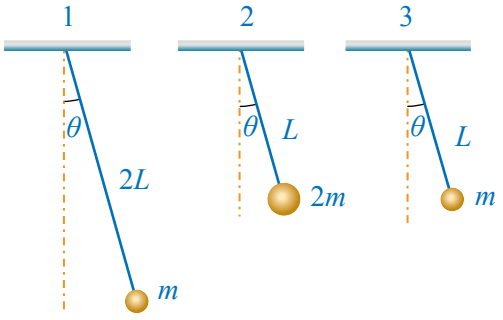
9. عُلّقت أربع كرات متماثلة بأربعة نوابض متساوية في الطول؛ فاستطال كل منها مسافة مختلفة حتى استقرت الكرات كما في الشكل. إذا سُحِبت كلّ كرة المسافة نفسها إلى أسفل وتُركت تتذبذب إلى أعلى وأسفل، فأيّ الكرات تتذبذب بزمن دوري أكبر؟



أ. A ب. B

جـ. C د. D

10. أجرت الطالبة تقوى ثلاث تجارب لقياس تسارع السقوط الحر؛ باستخدام البندول البسيط كما في الشكل. 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 ($\theta = 30^{\circ}$) يتحرك حركة تذبذبية، هل تعد 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. أحسبُ: يتذبذب جسم معلّق بنابض بشكل رأسي في حركة توافقية بسيطة بتردّد 1.8 Hz وسَعة 3.6 cm. أحسبُ سرعة الجسم عندما تصبح إزاحته 50 % من أقصى إزاحة خلال حركته إلى الأسفل.

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

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

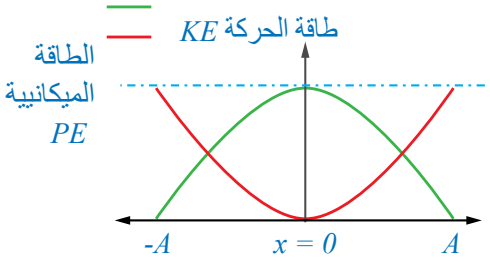
$$x(t) = 5\cos(4t + \frac{\pi}{4})$$

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 .

7. **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 تُعطى بالعلاقة:

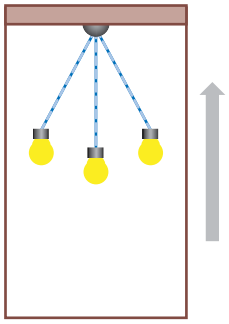


$$x = \frac{A}{\sqrt{2}}$$

8. **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 بحيث تكون وحدة السعة m والتردّد الزاوي rad/s والزمن s.

ب. أرسمُ العلاقة البيانية للإزاحة - الزمن لدورتين كاملتين.



9. **أحلّل:** قيس الزمن الدوري لمصباح معلّق بسقف مصعد ساكن في أثناء تذبذبه في حركة توافقية بسيطة كما في الشكل. أصف التغيّر الذي يطرأ على الزمن الدوري لحركة المصباح عندما يتحرّك المصعد:

أ . بتسارع ثابت إلى أعلى.

ب. بسرعة ثابتة.

10. **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.

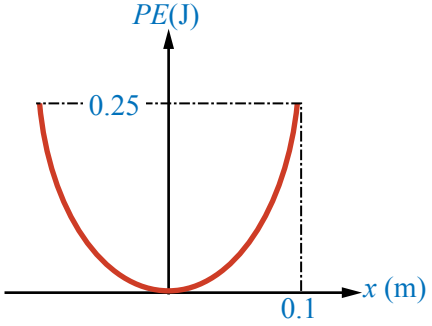
11. **أستخدمُ المتغيّرات:** عربة كتلتها 0.5 kg تتّصل بنابض على سطح أفقي أملس، وتتحرّك حركة توافقية بسيطة، مُثّلت العلاقة بين طاقة الوضع للعربة والإزاحة كما في الشكل. أحسبُ مستعينًا بالشكل ما يأتي:

أ . الطاقة الميكانيكية.

ب. ثابت النابض.

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

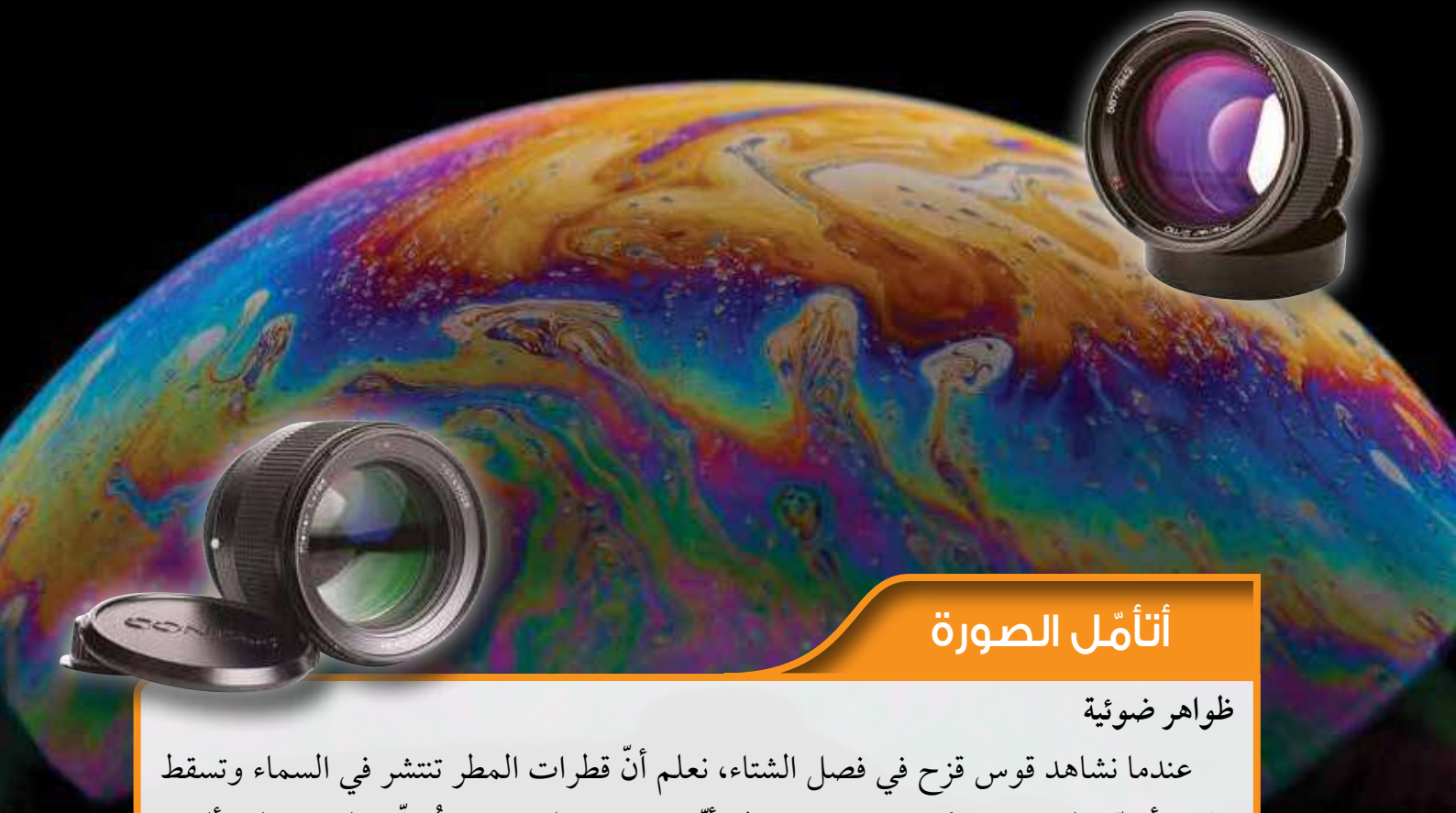
د . القيمة العظمى للتسارع.



الوحدة 5

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 الرياضي للموجات
Mathematical 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. كما توصف رياضيًّا باستخدام اقتران يعتمد على متغيّرين؛ الموقع والزمن.

الدرس الثاني: الموجات الموقوفة والرنين
Standing Waves and Resonance

الفكرة الرئيسة: الموجات الموقوفة والرنين ظواهر موجية يمكن دراستها بدقّة في الموجات الميكانيكية باستخدام علاقات رياضية؛ من أجل فهمها والاستفادة من خصائصها في كثير من التطبيقات، كبناء الجسور والمباني وغيرها.

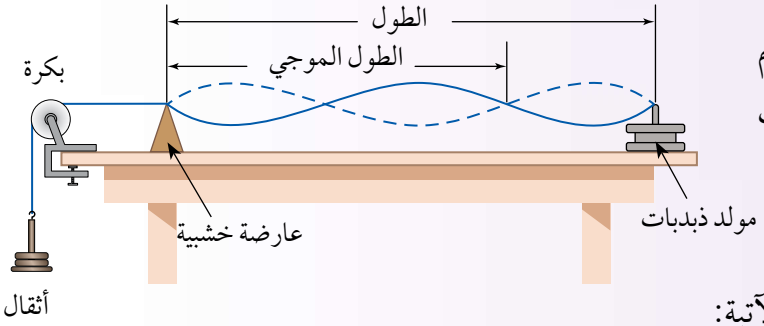
الدرس الثالث: التداخل والحيود لموجات الضوء
Interference and Diffraction of Light Waves

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، كما في الشكل.
3. أضع كتلة (200 g) على حامل الأثقال وأُشغّل مولّد الذبذبات عن طريق توصيله مع مولّد الإشارة، ثمّ أُحرّك العارضة أفقيًّا كي ينتظم اهتزاز الخيط وأُشاهد بوضوح الموجات، وعدد القمم والقيعان المتكوّنة.
4. أقيس طول المسافة بين عقدتين متجاورتين (بطن) وأُكرّر هذا القياس لأكثر من موقع، ثم أحصل على الطول الموجي بمضاعفة طول المسافة.
5. أحصل على تردّد الموجات من تردّد الجهاز المولّد للذبذبات، وأدونه 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؟

التمثيل الرياضي للموجات
Mathematical 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، كما توصف رياضيًّا باستخدام اقتران يعتمد على متغيّرين؛ الموقع والزمن.

نتاجات التعلم:
- يُعبّر عن الموجة الصوتية بمعادلة.
- يصف الصوت بوصفه موجات ميكانيكية.
- يستقصي مكوّنات الطيف الكهرومغناطيسي.

المفاهيم والمصطلحات:

موجة جيبية	Sinusoidal Wave
طور	Phase
فرق الطور	Phase Difference
زاوية الطور	Phase Angle
اقتران الموجة	Wave Function

أنواع الموجات Types of Waves

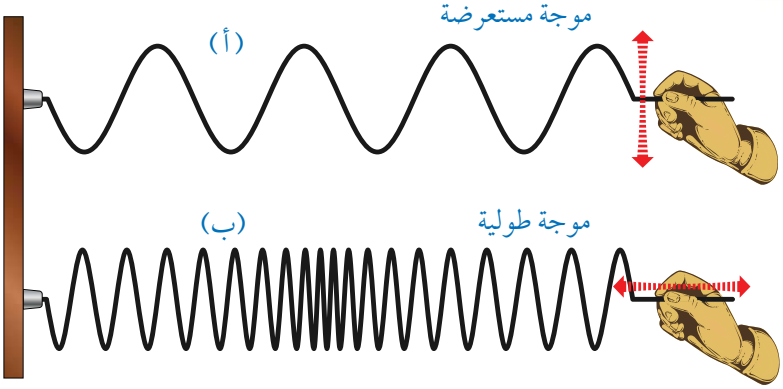
أُلاحظ الكثير من الظواهر الطبيعية والأحداث اليومية، التي تُعدّ شواهد على الحركة الموجية وطرائق انتشارها. وتعلّمتُ سابقًا أنّ الموجات تُقسم من حيث طبيعة انتشارها وحاجتها إلى وسط تنتقل خلاله إلى نوعين، هما: موجات ميكانيكية وموجات الإشعاع الكهرمغناطيسي.

الموجات الميكانيكية Mechanical Waves

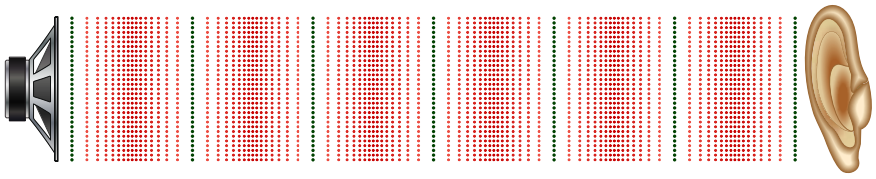
تنتقل الموجات الميكانيكية على شكل اضطراب أو اهتزاز في أجزاء الوسط الناقل، ولحدوث هذه الموجات يجب توافر أمرين، هما: مصدر مهتزّ لتوليد الموجات ووسط مادي تنتقل فيه الموجات على شكل اهتزاز في الجُسيمات التي يتكوّن منها الوسط. وتُقسم الموجات الميكانيكية من حيث طريقة الاهتزاز الذي تحدثه الموجات في جسيمات الوسط 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 حبل مشدود، كما 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، كما يُبيّن الشكل (1/ ب).

✓ **أتحقّق:** أُفرّق بين الموجات المستعرضة والموجات الطولية.



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، كما يُبيّن الشكل (2). أي إنّ الإزاحة التي تحدث لجزيئات الهواء تكون مع اتجاه انتشار الموجة أحيانًا وبعكس اتّجاه انتشارها أحيانًا أخرى.

موجات الإشعاع الكهرمغناطيسي

Electromagnetic Radiation Waves

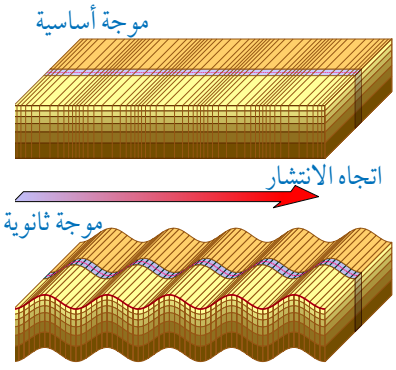
تُشكّل الموجات الكهرمغناطيسية ما يُعرف **بالطيف الكهرمغناطيسي Electromagnetic spectrum**، الذي يضمّ أنواعًا مختلفة من الإشعاع تعرّفتها في صفوف سابقة، من بينها: الأشعّة تحت الحمراء، والضوء المرئي، والأشعّة فوق البنفسجية، والأشعّة السينية، وغيرها...

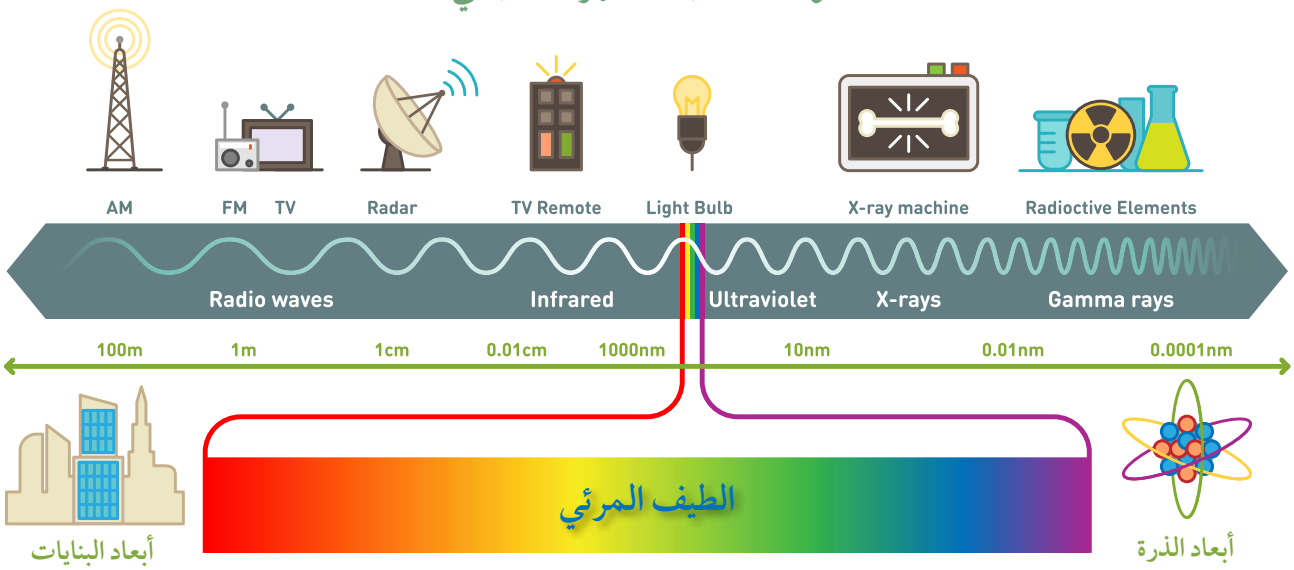
تتكوّن الموجات الكهرمغناطيسية من مجالين: كهربائي ومغناطيسي، تنتقل في الفراغ وفي الأوساط المادية، وهي لا تحتاج إلى إحداث اضطراب ميكانيكي في الوسط، بل تنتقل على شكل اضطراب في المجالين الكهربائي والمغناطيسي. وتتّصف الموجات الكهرمغناطيسية بصفات عامّة، أهمّها:

- تتكوّن من مجالين أحدهما كهربائي والآخر مغناطيسي يتذبذب أحدهما باتّجاه عمودي على الآخر، ومتساويان 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.

الربطُ مع علوم الأرض

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 عن بعضها، يُحدّد موقع بؤرة الزلزال بدقّة.





الشكل (3): مكوّنات الطيف الكهرمغناطيسي المرئي وغير المرئي.

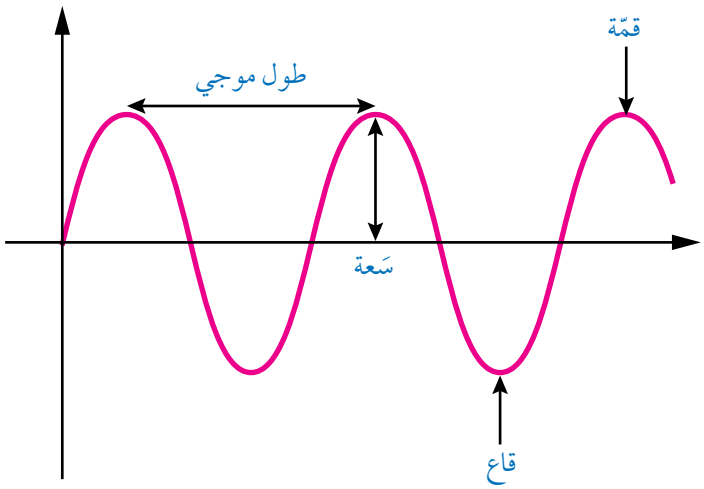
سؤال: أستخرجُ من الشكل تطبيقًا تكنولوجيًّا واحدًا لاستخدام كلّ من موجات الراديو، وموجات الأشعّة تحت الحمراء، وموجات الأشعّة السينية، وموجات أشعّة جاما.

تتراوح الأطوال الموجية للموجات الكهرمغناطيسية من 10^{4} m (موجات الراديو) إلى 10^{-12} m (أشعّة جاما)، وتختلف تبعًا لذلك طاقة كل منها؛ فأشعّة جاما أكبرها طاقة، وموجات الراديو أصغرها طاقة. يُبيّن الشكل (3) مكوّنات الطيف الكهرمغناطيسي المرئي وغير المرئي، وأطوالها الموجية، وبعض استخداماتها.

أثبتت دراسة الكثير من الظواهر أنّ الأشعّة الكهرمغناطيسية لها طبيعة مزدوجة، فهي تظهر بصفات الموجات أحيانًا كما في ظاهرتَي التداخل والحيود، وتظهر بصفات الجُسيمات أحيانًا أخرى كما في الظاهرة الكهرضوئية التي سأدرسها لاحقا، والتي تؤدي إلى انبعاث إلكترونات حرّة من سطح الفلزّ؛ عند سقوط إشعاع كهرمغناطيسي ذي طاقة كافية على هذا الفلزّ.

يتكوّن الإشعاع الكهرومغناطيسي من حزم من الطاقة، وهذه الطاقة مكماة؛ أي تتكوّن من كمّات (وحدات أساسية) يُطلق على كلّ منها اسم **فوتون Photon**. ينتقل الفوتون في الفراغ بسرعة الضوء. ومع أنّ للفوتون صفات مادّية، إضافة إلى صفاته الموجية؛ إلا أنّ كتلته تساوي صفرًا. والطاقة التي تحملها الموجة الكهرمغناطيسية تساوي عددًا صحيحًا من مضاعفات طاقة الفوتون، وهذا يشبه مبدأ تكمية الشحنة، الذي ينصّ على أنّ شِحنة الجسم تساوي عددًا صحيحًا من مضاعفات شِحنة الإلكترون.

أصمّم باستخدام برنامج السكراتش (Scratch) عرضًا يوضّح طريقة اهتزاز المجالين الكهربائي والمغناطيسي، في أثناء تقدّم الموجة الكهرمغناطيسية، ثمّ أشاركه مع معلمي وزملائي 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 كما في الشكل (4)، الذي يُبيّن تمثيلًا بيانيًّا للإزاحة التي تُحدثها الموجة لدقائق الوسط بالنسبة إلى بعدها عن مصدر الاهتزاز. كما أُلاحظ في الشكل **السعة (A) Amplitude** وهي أقصى إزاحة تُحدثها الموجة لجُسيمات الوسط بالنسبة إلى موقع اتّزانها. فلكلّ موجة طول موجي وسَعة يُميّزانها عن غيرها من الموجات.

وتتناسب الطاقة التي تنقلها الموجة مع سَعتها، فبزيادة سَعة اهتزاز المصدر المولّد للموجات، تزداد سَعة الموجة فتزداد طاقتها.

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 (f) Frequency** وهو عدد الموجات الكاملة التي تعبر نقطة ثابتة في الوسط خلال ثانية واحدة.

أبحثُ

للموجات الكهرمغناطيسية طبيعتان؛ موجية وجسيمية. أبحثُ في الظاهرة الكهرضوئية وكيف تنبعث الإلكترونات من سطح الفلزّ، وكيف يثبت أنّ الضوء جسيمات. وأبحثُ عن التطبيقات التكنولوجية للظاهرة، ثمّ أشارك ذلك مع زملائي.

أُفكّر: أيّ الكمّيات الآتية الخاصّة بوصف الموجة تعتمد على مصدر الموجة؟ وأيّها تعتمد على الوسط الناقل؟ السرعة، السعة، التردّد، الطاقة.

علمًا بأنّ طاقة الموجة تتناسب طرديًّا مع تردّدها، أمّا سرعة الموجة في الوسط الواحد فهي ثابتة ويعتمد مقدارها على نوع الوسط وصفاته، وتُحسب بدلالة الطول الموجي والتردّد، باستخدام العلاقة الرياضية:

$$v = \lambda f$$

كما توصف الموجات 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، كما تُبيّن العلاقة الرياضية الآتية:

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

من الواضح أنّ وحدة التردّد هي (s^{-1}) وفق النظام 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:

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

✓ **أتحقّق:** أُوضّح المقصود بكلّ من التردّد والزمن الدوري، ثم أصف العلاقة بينهما.

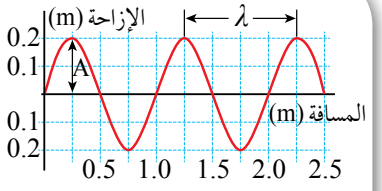
أعدّ فيلمًا قصيرًا باستعمال برنامج صانع الأفلام (movie maker) يوضّح كيف تُكرّر الموجة نفسها في الواحد بطول موجي وتردّد ثابتين، بالتزامن مع حركة دائرية لها التردّد الموجي نفسه، ثمّ أشاركه مع معلمي وزملائي في الصفّ.

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. كما يظهر في الشكل (5/ أ)، إذ يُمثّل التدريج على محور (x) مواقع دقائق الوسط المهتزّة وبُعدها عن مصدر الموجة، ويُمثّل التدريج على محور (y) الإزاحة لكلّ موقع عن نقطة الاتّزان إلى أعلى وأسفل. ويظهر في هذا التمثيل البياني كلّ من الطول الموجي، والسعة.

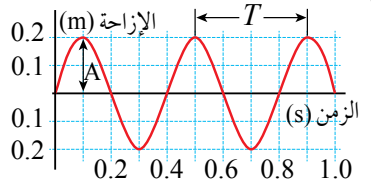


الشكل (5/ أ):
منحنى (الإزاحة–المسافة).

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، كما 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 خلال دورة واحدة. وأُلاحظ على الشكل تلك الدورة ممثّلة بالزمن الدوري للموجة، كما أُلاحظ سَعة الموجة ممثّلة بأقصى إزاحة رأسية للجُسيم نفسه.



الشكل (5/ ب):
منحنى (الإزاحة–الزمن).

✓ **أتحقّق:** عن طريق المقارنة بين الشكلين (5/ أ) و (5/ ب)، أستنتجُ تماثلًا في الشكل بين الطول الموجي والزمن الدوري. أُفسّر هذا التماثل.

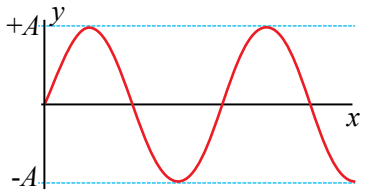
اقتران الموجة Wave Function

ساعد التمثيل البياني للموجات على تعرّف الكثير من خصائصها عن طريق الرسم. وللوصول إلى خصائص أخرى للموجات، والتعامل مع الحركة الموجية بشكل أكثر دقّة؛ لا بدّ من استخدام المعادلات الرياضية، والنظر إلى الموجة على أنّها علاقة رياضية بين عدد من المتغيّرات. وقد وُجد تشابه بين منحنى الموجة ومنحنيات الاقترانات المثلّثية؛ جيب الزاوية وجيب تمام الزاوية، ويمكن وصف الموجة عندما يتّفق تمثيلها البياني مع اقتران الجيب بأنّها موجة جيبية Sinusoidal wave. عندما أُثبّت حبلًا من أحد طرفيه وأشدّه قليلًا، ثمّ أُحرّك طرفه الآخر حركة توافقية بسيطة، تنتشر فيه سلسلة من الموجات المستعرضة، فتُحدِث إزاحة لكلّ جزء من أجزاء الحبل إلى الأعلى والأسفل، أي إنّ الإزاحة بالنسبة إلى موقع الاتّزان تتّخذ قِيَمًا سالبة وأخرى موجبة، ويكون التمثيل البياني للموجة مشابهًا لأحد الاقترانات المثلّثية وهو الاقتران الجيبي، الذي يصف العلاقة بين الزاوية (θ)، وجيبها ($\sin\theta$)، كما جرى في وصف الحركة التوافقية البسيطة. وتُسمّى هذه الزاوية **زاوية الطور Phase angle** لأنّها تُحدّد نمط الموجة أو طورها، وهو شكل منحنى العلاقة الجيبية الناتج عن الاقتران الآتي:

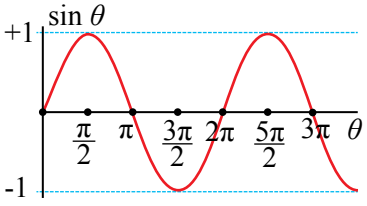
$$y(\theta) = A\sin\theta$$

يُبيّن الشكل (6/ أ) التمثيل البياني لانتشار موجة مستعرضة في حبل مشدود، ويُبيّن الشكل (6/ ب) الاقتران الجيبي للزاوية (θ)، أُلاحظ التشابه في الشكلين.

تعتمد زاوية الطور (θ) على متغيّرين، هما: موقع الجزء المهتزّ من الحبل، واللحظة الزمنية التي تُحسب عندها الإزاحة الرأسية، وسوف نُلاحظ أوّلاً تغيّر زاوية الطور الناتج عن الموقع (x).



الشكل (أ):
موجة مستعرضة في حبل.



الشكل (ب):
اقتران جيبي (θ مع $\sin\theta$).

الشكل (6): مقارنة الرسم البياني للموجة المستعرضة مع الاقتران الجيبي.

أُفكّر: موجتان جيبيّتان، تردّد الأولى (f) وتردّد الثانية ($2f$)، تنتقلان في خيطين متماثلين مشدودين بالمقدار نفسه. أصف سرعة الموجة الثانية نسبة إلى سرعة الأولى، مبرّرًا إجابتي.

الإزاحة بدلالة الموقع Displacement in terms of Position

لدراسة العلاقة بين كلّ عنصر من الحبل والإزاحة الحاصلة له بتثبيت عامل الزمن؛ يمكن الاعتماد على الاقتران الجيبي في توقّع مقدار الإزاحة الرأسية التي تحدث لأيّ نقطة (x) على الحبل، عند

اللحظة الزمنية ($t = 0$)، وذلك بكتابة اقتران الموجة على الصورة الآتية:

$$y(x,t = 0) = A \sin (kx)$$

إذ يُشير الرمز (A) إلى سَعة الموجة، ويُمثّل المقدار (kx) زاوية الطور للموجة، ويُشير الرمز (k) إلى مقدار ثابت يُسمّى الرقم الموجي، ويُعرّف بالعلاقة:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

باستخدام الرقم الموجي؛ يمكن حساب زاوية الطور التي تقابل أيّ موقع (x) كما يأتي:

$$\theta = kx = \frac{2\pi}{\lambda}x$$

فمثلًا ($x = \frac{\lambda}{4}$) عند الموقع (b) في الشكل (7)، تقابلها زاوية الطور:

$$\theta = \frac{2\pi}{\lambda}x = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\lambda}{4} = \frac{\pi}{2}$$

لإيجاد الإزاحة الرأسية عند الموقع (a)؛ أُعوّض الموقع ($x_a = 0$) في الاقتران الجيبي، فأحصل على:

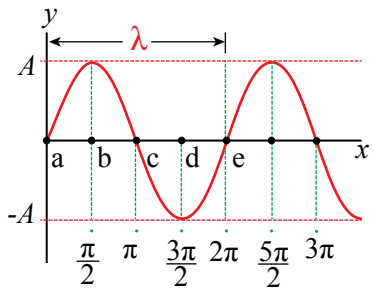
$$y(x_a,0) = A \sin (0) = 0$$

أجد أنّ الإزاحة صفر، ويمكن التحقّق من ذلك بملاحظة الشكل (7).

كما أنّ الإزاحة الرأسية عند الموقع (b) تكون عظمى ($y = A$)، ويمكن حسابها بالطريقة نفسها:

$$y(x_b, 0) = A \sin (\frac{\pi}{2}) = A$$

يبعد الموقع (c) عن نقطة الأصل بمقدار نصف طول موجي، وفيه تكون الإزاحة الرأسية صفرًا، تقابله زاوية طور مقدارها (π).



الشكل (7): الإزاحة بدلالة الموقع وزاوية الطور عند اللحظة ($t = 0$).

أفكّر: أبحثُ في الشكل (7) عن المواقع وزوايا الطور الخاصّة بها، التي تكون إزاحة جسيمات الوسط عندها ($y = -A$).

✓ **أتحقّق:** أجد المسافة في الشكل (7) بين كلّ من (d, e) ونقطة الأصل بدلالة الطول الموجي، ثم أُحدّد زاوية الطور المقابلة لكل موقع.

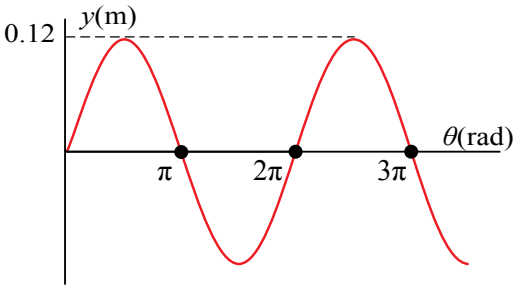
المثال 1

تنتشر موجة جيبية أفقيًّا في حبل مشدود باتّجاه اليمين ($+x$) سَعتها (0.12 m) وطولها الموجي (0.32 m) وتردّدها (10 Hz). بناءً على الشكل (8). أجد ما يأتي:

أ . مقدار الرقم الموجي (k).

ب. أكتبُ اقتران الموجة عند اللحظة ($t = 0$s).

جـ. الإزاحة الرأسية للموقع ($x = 0.16$ m) عند اللحظة ($t = 0$ s).



الشكل (8): منحنى موجة جيبية عند اللحظة (t = 0)

المعطيات: الشكل، $A = 0.12$ m , $\lambda = 0.32$ m , $f = 10$ Hz

المطلوب: $k = ?$, $y(x, 0) = ?$

الحلّ:

أ . أجد الرقم الموجي (k) بمعرفة الطول الموجي:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2 \times 3.14}{0.32} = 19.625 \text{ rad/m}$$

ب. اقتران الموجة عند لحظة بداية الحركة ($t = 0$)

$$y(x, 0) = A \sin (kx)$$

$$y(x, 0) = 0.12 \sin (19.625x)$$

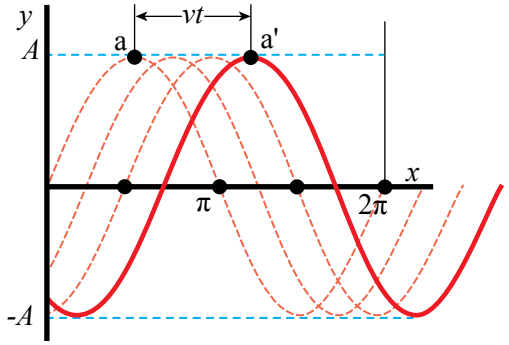
جـ. مقدار الإزاحة الرأسية عندما ($x = 0.16$ cm)

$$y(0.16,0) = 0.12 \sin(19.625 \times 0.16)$$

$$y(0.16,0) = 0.12 \sin (3.14)$$

$$y(0.16,0) = 0.12 \times 0 = 0 \text{ m}$$

أُلاحظ أنّ زاوية الطور ($kx = \pi$). وجيب هذه الزاوية يساوي الصفر، وبذلك فإنّ الإزاحة الرأسية تساوي صفرًا ($y = 0$).



الشكل (9): أثر الزمن في الإزاحة الرأسية لنقطة محدّدة على منحنى الموجة.

الإزاحة بدلالة الموقع والزمن

Displacement in terms of Position and Time

بالرجوع إلى الشكل (7) السابق، أُلاحظ أنّ الإزاحات الرأسية عند مواقع النقاط (a, b, c, …) رُصِدت في لحظة زمنية واحدة في بداية الحركة، عندما ($t = 0$). لكنّ الموجة تتقدّم خلال زمن (t) نحو اليمين بسرعة (v) فتقطع كلّ نقطة على الموجة مسافة مقدارها (vt) نحو اليمين، كما يُبيّن الشكل (9). أُلاحظ أنّ الإزاحة الرأسية للنقطة (a') عند الموقع (x) هي الإزاحة الرأسية نفسها للنقطة (a) عند الموقع ($x - vt$). وبشكل عامّ فإنّ:

$$y(x, t) = y(x - vt, 0)$$

باستخدام الرقم الموجي k لتحويل الموقع الى زاوية طور:

$$k(x - vt) = kx - \frac{2\pi}{\lambda} vt$$

وبما أنّ سرعة الموجة $v = \lambda f$ والسرعة الزاوية $\omega = 2\pi f$ أستنتجُ أنّ:

$$k(x - vt) = kx - \omega t$$

وبذلك؛ فإنّ الاقتران الموجي الذي يصف اعتماد حركة الموجة على كلّ من الموقع والزمن يُعطى بالعلاقة:

$$y(x, t) = A \sin(kx - \omega t)$$

يمكن كتابة الاقتران بمزيد من التفصيل كما يأتي:

$$y(x,t) = A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{T}t\right)$$

حيث استُخدمت العلاقة:

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

والمثال الآتي يوضّح كيفية إيجاد الإزاحة الرأسية لموقع معيّن في منحنى الموجة، بمعرفة كلّ من بُعد هذا الموقع عن نقطة ابتداء الموجة، والمدّة الزمنية المقيسة منذ بدء الحركة الموجية.

المثال 2

تنتشر موجة جيبية أفقيًّا في حبل مشدود باتّجاه اليمين ($+x$) وتوصف بالاقتران الآتي:

$y = 0.34 \sin (1.57x - 14t)$

إذ تُقاس x, y بوحدة متر، وتقاس t بوحدة ثانية. أجد ما يأتي:

أ. السعة، التردّد الزاوي، الرقم الموجي.

ب. الطول الموجي، وسرعة الموجة.

جـ. الإزاحة الرأسية لعنصر من الحبل يبعد عن نقطة الأصل (6 m)، عند اللحظة ($t = 0.5$ s).

المعطيات: المعادلة.

المطلوب: $y = ?$, $v = ?$, $\lambda = ?$, $k = ?$, $\omega = ?$, $A = ?$

الحلّ:

أ . بكتابة اقتران الموجة ومقارنته بالمعادلة المعطاة في المثال، أجد أنّ:

$y(x, t) = A \sin (kx - \omega t)$

$A = 0.34$ m , $\omega = 14$ rad/s , $k = 1.57$ rad/m

ب. لحساب الطول الموجي والسرعة:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{2 \times 3.14}{1.57} = 4 \text{ m}$$

$$v = \lambda f = \lambda \frac{\omega}{2\pi} = \frac{4 \times 14}{2 \times 3.14} = 8.92 \text{ m/s}$$

جـ.الإزاحة الرأسية (مع ملاحظة أنّ زاوية الطور تُقاس بوحدة راديان):

$y(6,0.5) = 0.34 \sin(1.57 \times 6 - 14 \times 0.5)$

$y(6,0.5) = 0.34 \sin(9.42 - 7)$

$y(6,0.5) = 0.34 \sin(2.42)$

$y(6,0.5) = 0.34 \times 0.66 = 0.22$ m

ثابت الطور Phase Constant

يصف اقتران الموجة إزاحة موقع أي جُسيم بالنسبة إلى متغيّرين، هما؛ بُعد الجُسيم عن نقطة الأصل (x)، والزمن (t) من بداية الحركة الموجية. ولكن على افتراض أنّ الموجات جميعها متساوية في الطور، أي إنّها تبدأ الاهتزاز من زاوية طور ($\theta = 0$)، بإزاحة رأسية ($y = 0$). والموجات في الواقع لا تنتقل جميعها في طور واحد، فقد لاحظنا عند وصف الحركة التوافقية البسيطة، وجود زاوية طور (θ)، وأضفنا ما يُعرف بثابت الطور (ϕ) إلى زاوية الطور لتمييز الذبذبات عن بعضها. وبالمثل، يمكنني إضافة ثابت الطور إلى اقتران الموجة، ليصبح على الصورة العامة الآتية:

$$y = A \sin (kx - \omega t + \phi)$$

فتصبح زاوية الطور: $\theta = kx - \omega t + \phi$

اختلاف الطور Phase Difference

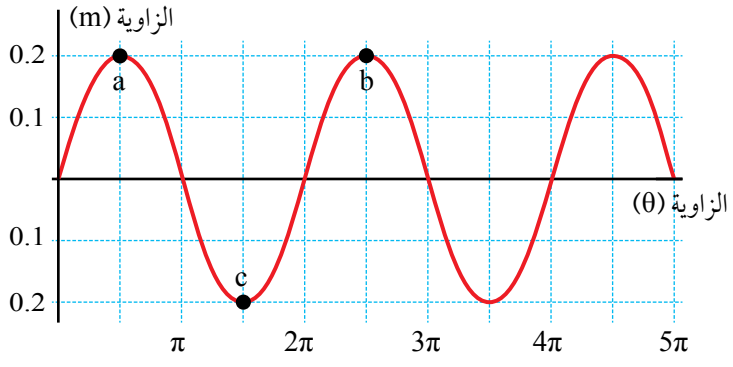
يُبيّن الشكل (10) مجموعة نقاط على المنحنى البياني لموجة جيبية. أُلاحظ أنّ موقع النقطة (a) يفصله عن النقطة (b) فرق طور مقداره:

$$\phi = \frac{5\pi}{2} - \frac{\pi}{2} = 2\pi$$

وهذا الفرق في الطور يعني أنّ النقطة (b) تسبق النقطة (a) بزمن مقداره زمن دوري واحد (T)، أو أنّ بُعد النقطة (b) عن نقطة الأصل يزيد عن بعد (a) بمقدار طول موجي واحد (λ)، فهما متماثلتان في الطور.

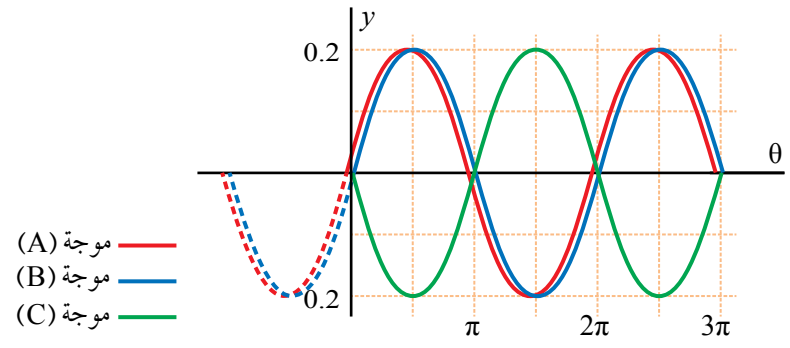
أُلاحظ في الشكل (10) أنّ النقطتين (b, c)، متعاكستان في الطور، أي إنّ فرق الطور بينهما يساوي (π)، وهذا يعادل زاوية مقدارها ($180°$). ويكون فرق الطور بين نقطتين أيّ قيمة ضمن المدى ($2\pi - 0$).

عند مقارنة موجتين متساويتين في التردّد والسَعة والطول الموجي؛ فإنّ زاوية الطور مهمّة في هذه المقارنة، فعندما تبدأ الموجتان الحركة في اللحظة



الشكل (10): زاوية الطور.

سؤال: هل يمكنني القول إنّ نقاط تقاطع المنحنى مع محور (x) جميعها متّفقة في الطور؟ أُوضّح إجابتي.



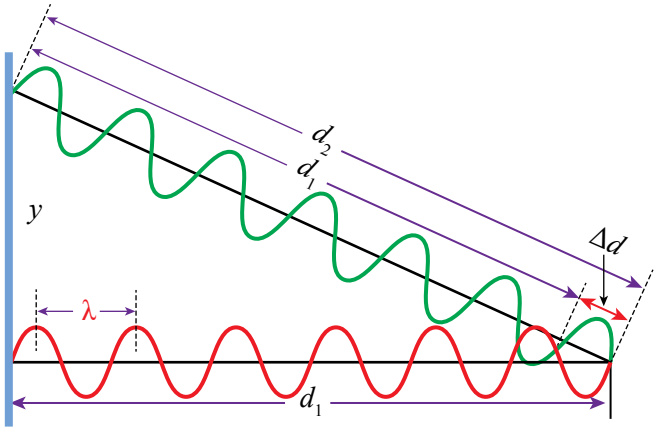
الشكل (11): موجتان متّفقتان في الطور، وموجة ثالثة معاكسة لهما في الطور.

نفسها، وتكون الإزاحة متساوية عند الزوايا جميعها لكلّ من الموجتين؛ يمكن القول إنّ الموجتين متّفقتان في الطور، وأُلاحظ ذلك بالنسبة إلى الموجتين (A, B) في الشكل (11).

ينطبق الاتّفاق في الطور أيضًا على موجتين تبدأ إحداهما بعد بداية الأخرى بزاوية طور قياسها (2π)، أو مضاعفات هذا القياس.

ويمكن أن أعبّر عن الطول الموجي أو الزمن الدوري بزاوية طور قياسها (360°)، أو (2π rad). كما أُلاحظ من الشكل (11) أنّ الموجتين (A,C) متعاكستان في الطور؛ لأنّ الموجة (C) بدأت الحركة بعد الموجة (A) بزاوية طور مقدارها (π). كما أنّ الموجتين (B, C) متعاكستان في الطور أيضًا. وكلّ قيمة لفرق الطور بين موجتين يقابلها فرق في المسار (Δd)، يساوي الفرق بين المسافة التي قطعتها كلّ من الموجتين ($d_2 - d_1$)، كما في الشكل (12)، وقد نُعبّر عن فرق المسار بالطول الموجي. ويمكن التعبير عن فرق الطور أيضًا بالفارق الزمني بين الموجتين منسوبًا إلى الزمن الدوري.

✓ **أتحقّق:** ما فرق المسار بين موجتين، الذي يقابله فرق طور مقداره (π)؟



الشكل (12): موجتان متساويتان في التردّد والطول الموجي، ومختلفتان في طول المسار.

سؤال: أستخرجُ من الشكل طول مسار كلّ موجة وفرق المسار بين الموجتين بدلالة الطول الموجي.

المثال 3

تنتشر موجة جيبية أفقيًّا في حبل مشدود باتّجاه اليمين ($+x$)، وتوصف بما يأتي: سَعتها (0.40 m) وزمنها الدوري (0.20 s)، وسرعتها (12 m/s)، وثابت الطور ($0.86\,\pi$). أجد ما يأتي:

أ . أكتبُ الاقتران الموجي.

ب. أحسبُ الإزاحة الرأسية عند ($x = 8$ m) ، ($t = 0.52$ s).

المعطيات: $\phi = 0.86\pi$ rad , $v = 12$ m/s

$T = 0.2$ s , $A = 0.4$ m

المطلوب: كتابة الاقتران الموجي، $y(8,0.52) = ?$

الحلّ:

أ . لكتابة الاقتران، أبدأ بإيجاد (k, ω)؛ لذا، يلزم معرفة (λ, f).

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.2} = 5 \text{ Hz}\,, \quad \lambda = \frac{v}{f} = \frac{12}{5} = 2.4 \text{ m}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{2.4} = 0.83\pi\,, \quad \omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{0.2} = 10\,\pi$$

$$y(x, t) = 0.4 \sin (0.83\pi x - 10\,\pi t + 0.86\pi)$$

ب. لحساب الإزاحة الرأسية عند (8,0.52):

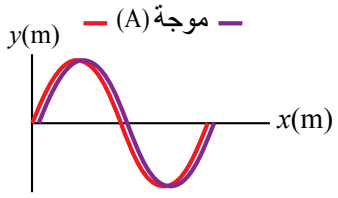
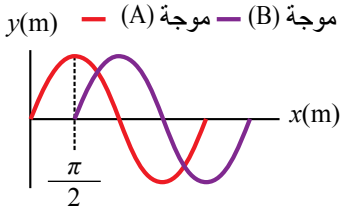
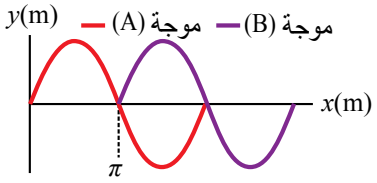
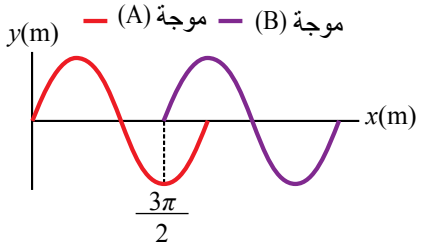
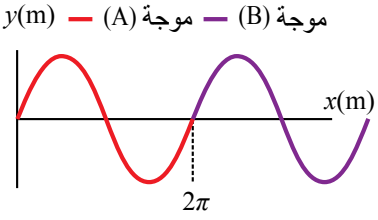
$$y(8,0.52) = 0.4 \sin(0.83 \times 8\pi - 10 \times 0.52\pi + 0.86\pi)$$

$$y(8,0.52) = 0.4 \sin(6.64\pi - 5.2\pi + 0.86\pi)$$

$$y(8,0.25) = 0.4 \sin(2.3\pi) = 0.32 \text{ m}$$

يوضّح الجدول الآتي ملخّصًا للمقارنة بين موجتين (A, B) متساويتين في التردّد والطول الموجي، باستخدام ثابت الطور (ϕ)، وفرق المسار بدلالة الطول الموجي لهما، والفارق الزمني بين الموجتين بدلالة الزمن الدوري.

جدول 1: فرق الطور والزمن والمسار بين موجتين متساويتين في التردّد والطول الموجي.

الشكل	الوصف	Δd (λ)	Δt (s)	ϕ (degree)	ϕ (rad)
	متّفقتان	0	0	0 °	0
	مختلفتان	$\frac{1}{4}\lambda$	$\frac{1}{4}T$	90 °	$\frac{\pi}{2}$
	متعاكستان	$\frac{1}{2}\lambda$	$\frac{1}{2}T$	180 °	π
	مختلفتان	$\frac{3}{4}\lambda$	$\frac{3}{4}T$	270 °	$\frac{3\pi}{2}$
	متّفقتان	λ	T	360 °	2π

المثال 4

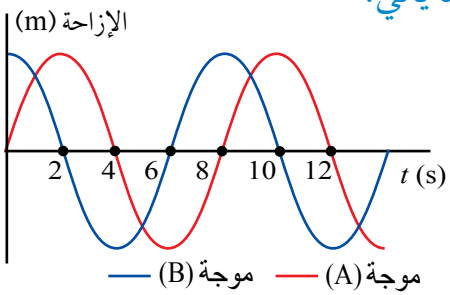
موجتان (A, B) الطول الموجي لكلّ منهما (0.24 m) تنتشران في وسط واحد. يُبيّن الشكل (13) منحنى (الإزاحة–الزمن) للموجتين معًا. بناءً على الشكل؛ أجد ما يأتي:

أ . الزمن الدوري والتردّد لكلّ من الموجتين (A, B).

ب. الفارق الزمني الذي تأخّرت به إحدى الموجتين عن الأخرى.

جـ. زاوية الفرق في الطور بين الموجتين.

د . فرق المسار بين الموجتين.



الشكل (13): موجتان متساويتان في التردّد والطول الموجي ومختلفتان في الطور.

المعطيات: الشكل، $\lambda = 0.24\ m$

المطلوب: $T = ?\ ,\ f = ?\ ,\ \Delta t = ?\ ,\ \phi = ?\ ,\ \Delta d = ?$

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 (14) أنّ الموجة (A) تأخّرت في حركتها عن الموجة (B) بمقدار ربع موجة، أي إنّ الموجة (B) بدأت الاهتزاز أوّلًا، عند (t = -2 s)، فالفارق الزمني بينهما:

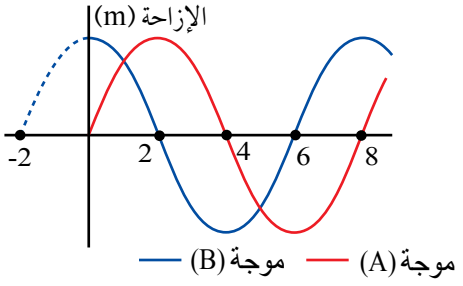
$$\Delta t = 2\ s$$

جـ. زاوية فرق الطور: أُلاحظ من الشكلين أنّ الفارق الزمني بين الموجتين يساوي ربع الزمن الدوري، وبما أنّ الزمن الدوري (T) تقابله زاوية طور مقدارها (2π)؛ فإنّ زاوية الفرق في الطور تُعطى بالعلاقة الآتية:

$$\phi = \frac{1}{4}(2\pi) = \frac{\pi}{2}\ rad\ ,\quad (90°)$$

د . فرق المسار: أُلاحظ من الشكل أنّ فرق المسار بين الموجتين يساوي ربع الطول الموجي، أي إنّ فرق المسار (Δd):

$$\Delta d = \frac{1}{4}(\lambda) = \frac{0.24}{4} = 0.06\ m$$



الشكل (14): صنعت الموجة (B) إزاحة عظمى عند (t = 0s)؛ لذا، يمكنني أن أتخيّل أنّها بدأت الاهتزاز من (t = -2 s).

تمرين

في المثال 4، إذا كانت ($\phi = 4\pi$)، فما مقدار الفارق الزمني وفرق المسار بين الموجتين؟

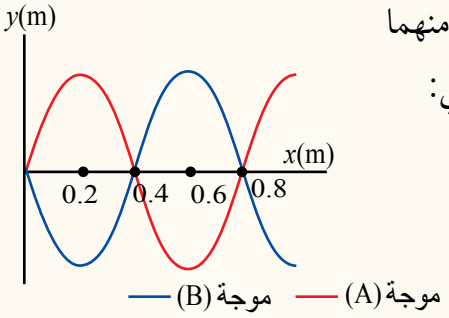
مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** أكتبُ اقترانًا موجيًّا يصف الإزاحة الرأسية لدقائق وسط صلب، عندما تنتشر فيه موجة مستعرضة. مبيّنًا كلًّا من: السعة، زاوية الطور، الرقم الموجي، ثابت الطور، التردد الزاوي.

2. **أُحلّل:** أُصنّف الموجات الآتية حسب نوع الطاقة التي تنقلها: الأشعّة تحت الحمراء، الأشعّة السينية، الموجات الصوتية، موجات الضوء المرئي، الموجات المنتشرة في نابض، الموجات الزلزالية.

3. **أتوقّع:** تنتشر موجة ميكانيكية في حبل رفيع، ثم تُكمل انتشارها في حبل غليظ. أيّ الكميات الآتية ستتغيّر عند الحدّ الفاصل بين الحبلين؟ (التردّد، الزمن الدوري، الطول الموجي، السرعة).

4. **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.

جـ. ثابت الطور لكلّ من الموجتين.

5. **أحسبُ:** تنتشر موجة جيبية أفقيًّا في حبل مشدود باتجاه اليمين ($+x$) سَعتها (0.28 m) وطولها الموجي (0.20 m) وتردّدها (8 Hz)، وثابت الطور لها ($\frac{\pi}{2}$). أجيب عمّا يأتي:

أ . أحسبُ مقدار الرقم الموجي (k)، والتردّد الزاوي.

ب. أكتبُ اقتران الموجة.

جـ. أجد الإزاحة الرأسية عند الموقع ($x = 1.9$ m)، عند اللحظة ($t = 1.5$ s).

الدرس 2

الموجات الموقوفة والرنين
Standing Waves and Resonance

الفكرة الرئيسة:

الموجات الموقوفة والرنين ظواهر موجية يمكن دراستها بدقّة في الموجات الميكانيكية باستخدام علاقات رياضية؛ من أجل فهمها والاستفادة من خصائصها في كثير من التطبيقات، كبناء الجسور والمباني وغيرها.

نتاجات التعلّم:

- يصف عددًا من الظواهر الموجية مثل انعكاس موجة، تراكب موجتين.
- يستقصي عمليًّا ظاهرة حيود موجات الماء، ويُحدّد شروط حدوث الحيود.
- يُعرّف الموجات الموقوفة على وتر مشدود، ويُحدّد شروط تكوّن هذه الموجات.
- يحسب تردّد النغمة الأساسية والنغمات الأخرى التي يهتز بها وسط ما) وتر مشدود، عمود هواء في أنبوب مفتوح النهاية أو مغلق النهاية).

المفاهيم والمصطلحات:

تراكب	Superposition
موجة موقوفة	Standing Wave
رنين	Resonance

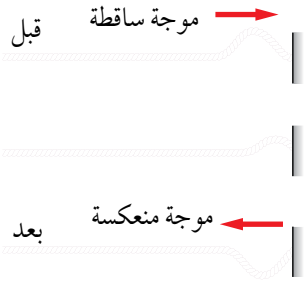
ظواهر موجية Wave Phenomena

درستُ في صفوف سابقة بعض الظواهر الموجية؛ باستخدام موجات الماء أو الموجات المنتشرة في نابض ممدود. في ما يأتي استعراض لبعض هذه الظواهر.

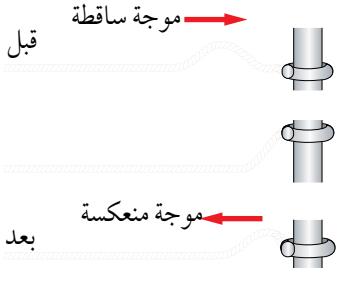
النفاذ والانعكاس Transmission and Reflection

أفترضُ أنّ لدي حبلًا مثبّتًا من طرفه الأيمن، وأُحرّك طرفه الثاني حركة واحدة إلى الأعلى ثم أُعيده إلى موضع اتّزانه، ستنتشر موجة مستعرضة على شكل نبضة واحدة في الحبل نحو اليمين، كما يُبيّن الشكل (15/ أ) حتّى تصل إلى الحاجز، ثمّ ترتدّ عائدة نحو اليسار، لكنّها تكون مقلوبة. لماذا ارتدّت النبضة مقلوبة رأسيًّا؟ حسب القانون الثالث لنيوتن، أثّر الحبل في الحاجز بقوّة نحو الأعلى، فأثّر الحاجز في الحبل بقوّة مساوية نحو الأسفل، فارتدّت الموجة مقلوبة رأسيًّا.

عندما أُثبّت طرف الحبل في الحاجز بطريقة تسمح له بالحركة إلى الأعلى والأسفل، كأن يكون مثبّتًا بحلقة تنزلق على قضيب رأسي بدلًا من الحاجز، فإنّه عند وصول الموجة إلى هذا الطرف فإنّها ستنعكس معتدلة؛ لأنّ الحبل لم يؤثّر في القضيب بقوّة فعل، بل كان التأثير في الحلقة فاستجابت وتحرّكت إلى الأعلى، ثمّ عادت إلى الأسفل، وبذلك انعكست الموجة معتدلة، كما يُبيّن الشكل (15/ ب).

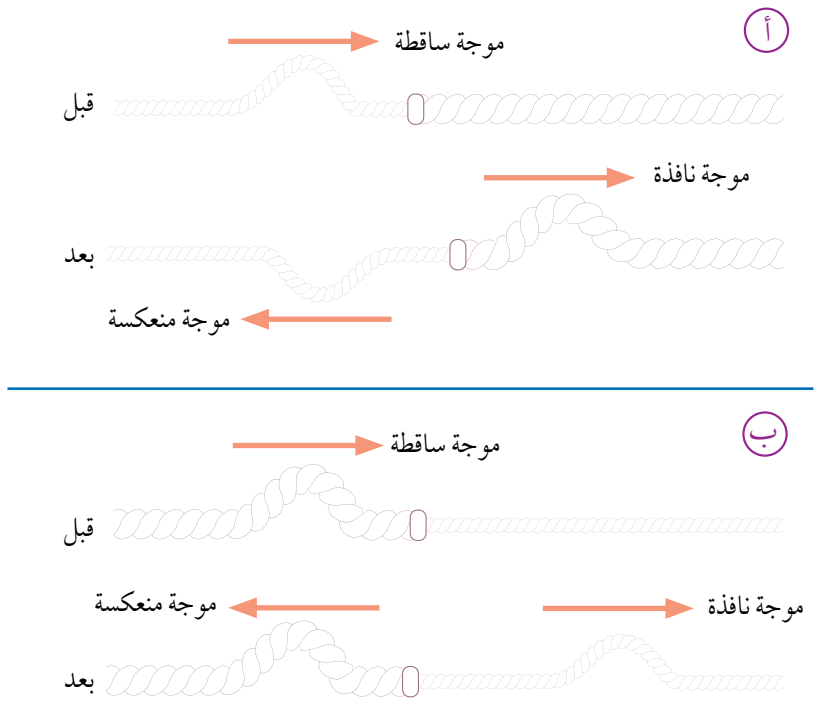


(أ)



(ب)

الشكل (15): انعكاس موجة في حبل.



الشكل (16): (أ): انتقال موجة من حبل رفيع إلى حبل غليظ. (ب) انتقال موجة من حبل غليظ إلى حبل رفيع.

عند وصل حبلين مختلفين في السمك معًا، ثم انتقال موجة من الحبل الرفيع إلى الحبل الغليظ؛ فإنّ جزءًا منها ينعكس عند نقطة الوصل مقلوبًا، وكأنّه انعكس عن حاجز ثابت، والجزء الآخر يواصل تقدّمه في الحبل الغليظ بشكل معتدل، كما يُبيّن الشكل (16/أ). أمّا إذا انتقلت الموجة من الحبل الغليظ إلى الحبل الرفيع؛ فإنّ الجزء المنعكس منها يكون معتدلاً مثل الجزء النافذ، كما يُبيّن الشكل (16/ب). لماذا لم تنعكس الموجة مقلوبة في هذه الحالة؟ عندما تصل الموجة إلى نقطة التقاء الحبلين، وتؤثّر نهاية الحبل الغليظ بقوّة إلى الأعلى في طرف الحبل الرفيع؛ فإنّ الحبل الرفيع يستجيب لهذه القوّة ويتحرّك إلى الأعلى، أمّا قوة ردّ الفعل التي يؤثّر بها الحبل الرفيع في الغليظ؛ فإنّها غير كافية لقلب الموجة بسبب الممانعة الكبيرة للحبل الغليظ، فتنعكس الموجة معتدلة كما كان حال سقوطها.

✓ **أتحقّق:** أُفسّر لماذا ترتدّ النبضة مقلوبة رأسيًّا عند انعكاسها عن حاجز.

التجربة ١

استقصاء ظاهرة حيود موجات الماء، واستنتاج شروطه

الموادّ والأدوات: حوض الموجات وملحقاته، شاشة عرض، مصدر ضوء علوي ومرآة.

إرشادات السلامة: توخّي الحذر من وصول الماء إلى مصدر الكهرباء.

خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي، أُنفّذ الخطوات الآتية:

1. أركّبُ حوض الموجات بوضع أفقي، وأُثبّت مصدر الإضاءة في مكانه فوق الحوض والمرآة أسفله؛ كي أحصل على خيال واضح على الشاشة، بمساعدة المعلم وأعضاء مجموعتي.
2. أضع كمّية ماء في الحوض إلى ارتفاع مناسب لا يقلّ عن 3 cm تقريبًا.
3. أُثبّت المحرك الكهربائي المولّد للاهتزازات فوق المسطرة الخاصّة بتوليد الموجات المستقيمة، وأُشغّله بحيث يصدر موجات مستقيمة، وأُراقب حركة تقدّم هذه الموجات في الحوض.
4. أضع حاجزًا يحتوي على فتحة واحدة ضيقة بحدود (1 cm)، ثمّ أُدوّن الملاحظات عن النمط المتكوّن خلف الحاجز، ثمّ أزيد اتساع الفتحة بشكل تدريجي (1 cm) في كلّ مرّة، حتى يصل إلى (10 cm). وأُراقب ما يحدث للموجات عند كل زيادة.
5. أرسمُ الأنماط التي حصلت عليها في الخطوة السابقة، مع تغيير اتّساع الفتحة.

التحليل والاستنتاج:

1. أصفُ ما حدث للموجات المستقيمة بعد تجاوزها الحاجز، الذي يحتوي على فتحة اتّساعها يساوي الطول الموجي تقريبًا. أذكرُ اسم هذه العملية؟
2. أصفُ ما حدث للموجات المستقيمة بعد تجاوزها الحاجز، الذي يحتوي على فتحة اتّساعها يساوي ضعفَي الطول الموجي. أُميّز الشكل الناتج عن الحالة الأولى.
3. أصفُ ما حدث للموجات المستقيمة بعد تجاوزها الحاجز، الذي يحتوي على فتحة اتّساعها أكبر بكثير من الطول الموجي. أُميّز الشكل الناتج عن الحالتين السابقتين.
4. **أستنتجُ** العلاقة بين حيود الموجات واتّساع الفتحة؟
5. **أستنتجُ** الشروط اللازمة لحدوث ظاهرة الحيود في موجات الماء، وأُعمّمها على أنواع الموجات الأخرى.

الحيود Diffraction

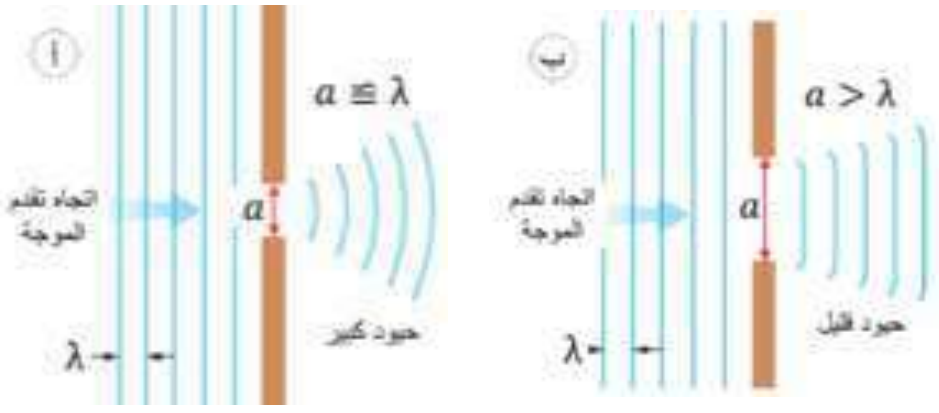
لاحظتُ في التجربة السابقة حيود موجات سطح الماء المستوية (تغيّر في اتجاه انتشارها) عند مرورها من فتحة ضيّقة أو حاجز.

الحيود Diffraction هو ظاهرة انعطاف الموجات عند مرورها بالقرب من حاجز أو خلال فتحة ضيّقة لحاجز، في حين تتقدّم الموجة في خطّ مستقيم عندما لا يوجد حواجز في طريقها.

عند تغيير اتّساع الفتحة في الحاجز أُلاحظ ما يأتي:

- عندما كان اتّساع الفتحة أصغر بكثير من الطول الموجي، لم تنفذ الموجات خلالها.
- بزيادة اتّساع الفتحة تبدأ الموجات بالنفاذ، والموجات النافذة يحدث لها حيود بحيث ينحني مسارها حول جانبَي الفتحة، كما في الشكل (17/ أ).
- عندما يصبح اتّساع الفتحة أكبر من الطول الموجي، تنفذ الموجات مستوية ومتوازية، لكنّها تنتحي قليلًا عند الطرفين، كما في الشكل (17/ ب).

درستُ سابقًا أنّ ظاهرة الحيود تحدث لأنواع الموجات جميعها، ومنها موجات الضوء. وفي التطبيقات البصرية يؤثّر حيود الضوء سلبًا في كفاءة الأداة، فكلّما كانت الفتحة التي يعبر منها الضوء أقلّ اتّساعًا، انخفضت قوّة التفريق Resolution في



الشكل (17): ظاهرة الحيود وتأثّرها باتّساع الفتحة.

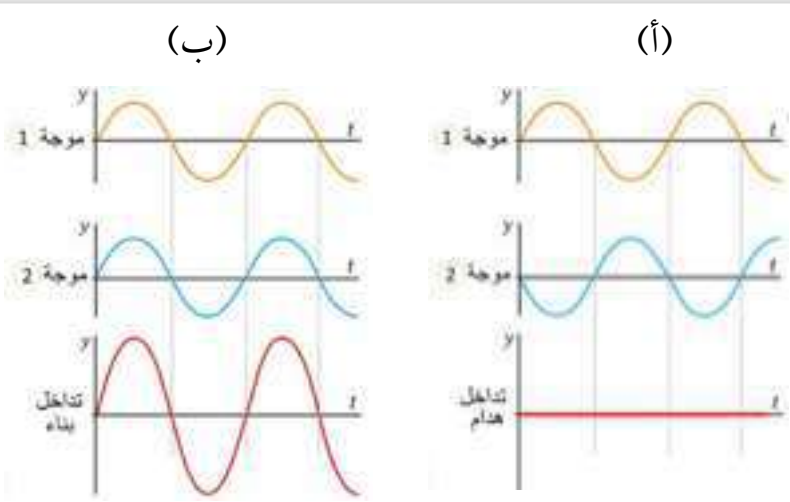
الشكل (18): توجد في جزر كناري، مرآة أكبر تلسكوب فلكي في العالم، قطرها (10.4 m) تتكوّن من (36) مرآة منفصلة، يجري التحكّم بكلّ منها على انفراد، للتغلّب على كثير من العقبات.

الأداة البصرية. تحدث ظاهرة الحيود للضوء عند نفاذه من عدسة ضيّقة، أو انعكاسه عن مرآة ضيّقة. ويُبيّن الشكل (18) استخدام مرآة مقعّرة في أكبر تلسكوب عاكس بُني في جزر كناري، واتّساع المرآة يفيد في أمرين؛ جمع كمّية أكبر من الضوء الوارد من النجوم، والتخلّص من الحيود الناتج عن المرايا والعدسات الصغيرة، ما يعطي التلسكوب قوّة تفريق عالية تجعلنا نُميّز التجمّعات النجمية الصغيرة القريبة من بعضها، فنراها منفصلة عن بعضها.

✓ **أتحقّق:** أُوضّح المقصود بظاهرة الحيود، وأُحدّد الاتّساع المناسب للفتحة التي يحدث منها الحيود بالنسبة إلى الطول الموجي.

التراكب والتداخل Superposition and Interference

- **التراكب**: المعنى العامّ لكلمة تراكب؛ أن تضع شيئًا فوق آخر، لكن في حالة الموجات؛ فإنّ **التراكب Superposition**، يعني جمع ما تحدثه موجتان (أو أكثر) من أثر في وسط واحد في لحظة واحدة، عندما تنتقلان خلاله. ويحدث التراكب في كلا النوعين؛ الموجات الطولية والموجات المستعرضة، ولكن يُشترط أن تكون الموجتان من النوع نفسه.



الشكل (19): منحنى (الإزاحة - الزمن) لاهتزاز نقطة في الوسط تتأثر بموجتين معًا.

- **مبدأ تراكب الموجات Principle of superposition:** 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. وعندما تتساوى الموجتان في التردّد والطول الموجي؛ فإنّ تراكبهما يعتمد على فرق الطور بينهما، كما يُبيّن الشكل (19). وتتكوّن أنماط تداخل منتظمة (ثابتة) عندما يكون فرق الطور بينهما ثابتًا.

- **التداخل البنّاء والتداخل الهدّام:** ينتج عن تراكب موجتين متّفقتين في الطور نمط خاصّ يُسمّى **تداخلًا بنّاءً Constructive interference**، كما يُبيّن الشكل (19/أ). تكون سَعة الموجة الناتجة عن تداخل موجتين مساوية لناتج جمع سَعتيهما. وعندما تكون الموجتان المتراكبتان متعاكستين في الطور (فرق الطور بينهما يساوي 180^{o})؛ 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، كما يُبيّن الشكل (19/ب).

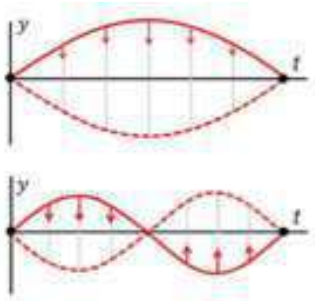
✓ **أتحقّق:** عند التقاء موجتين من النوع نفسه، متساويتين في الطول الموجي والتردّد في نقطة واحدة، ما شروط حدوث تداخل بنّاء بين الموجتين؟

الموجات الموقوفة Standing Waves

تنتج الموجات الموقوفة عن تراكب موجتين ضمن شروط محدّدة، وهي ظاهرة تحدث في الموجات المستعرضة والموجات الطولية. **والموجات الموقوفة Standing waves** هي اهتزاز يولّد أنماطًا موجية ثابتة الأشكال تنتج عن تراكب موجتين متساويتين في التردّد والطول الموجي والسعة، تنتقلان في اتّجاهين متعاكسين في الوسط نفسه، والموجات الموقوفة لا تنقل الطاقة، بل تبقى بين طرفَي الوسط، ويلزم تزويدها بمصدر مستمر للطاقة لتعويض الطاقة المفقودة. 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 كما 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 (20). وينتج عن التقاء موجتين تنتشران باتّجاهين متعاكسين، ظهور نقاط في الوتر تُسمّى عقدًا وأخرى تُسمّى بطونًا. **والعقدة Node** هي منطقة تكون الإزاحة المحصّلة عندها صفرًا في الأوقات جميعها، **والبطن Antinode** هو منطقة تكون الإزاحة المحصّلة فيها عظمى في بعض الاوقات.



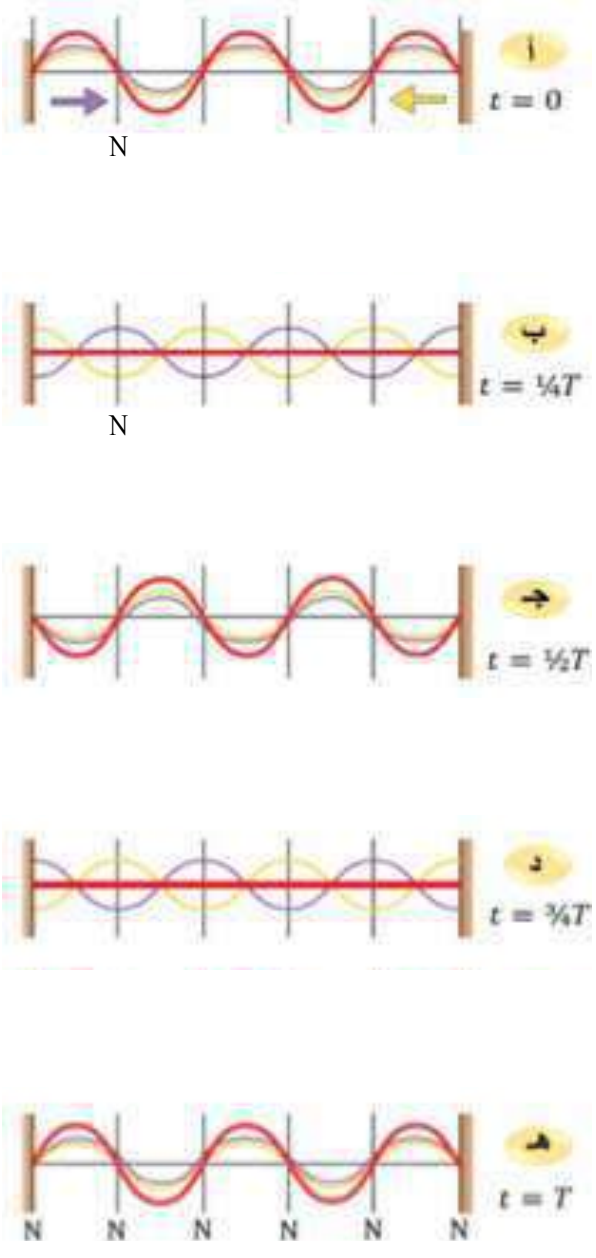
الشكل (20): نمطان مختلفان من الموجات الموقوفة المتكوّنة في وتر مشدود.

سُمّيت الموجة الموقوفة بهذا الاسم؛ لأنّها لا تتقدّم، فاهتزازها ناتج عن اهتزاز أجزاء الوتر بسَعة تتغيّر من الصفر في مناطق العُقد إلى قيمتها العظمى (A) في مناطق البطون، كما أنّ سَعة الاهتزاز لكلّ جزء من الوتر تساوي مقدارًا ثابتًا.

✓ **أتحقّق:** أُوضّح المقصود بكلّ من العقد والبطون في الموجات الموقوفة.

يوضّح الشكل (21) منحنى (الإزاحة-الزمن) لموجتين؛ الأولى (اللون البنفسجي) تنتقل في وتر مشدود باتجاه اليمين، والثانية (اللون البرتقالي) تنتقل في الوتر نفسه باتّجاه اليسار، يتكوّن الشكل من خمسة مشاهد ثابتة رُصِدت في لحظات زمنية مختلفة. يتّضح من الشكل الموجة الموقوفة الناتجة عن تراكب الموجتين في كلّ لحظة زمنية (اللون الأحمر). نستنتج من الشكل ما يأتي:

الشكل (21): منحنى (الإزاحة – الزمن) لموجتين متراكبتين والموجة الموقوفة الناتجة، عند لحظات زمنية مختلفة.

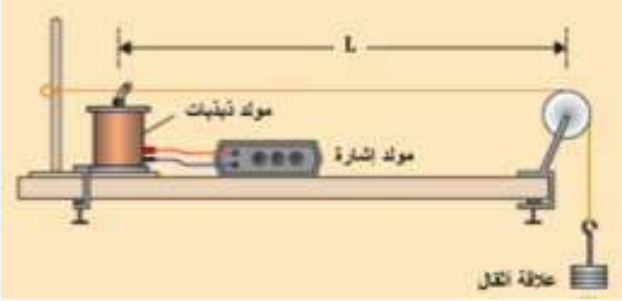


- مشهد (أ): عند اللحظة الزمنية ($t = 0$) في بداية الحركة الموجية، حيث فرق الطور بين الموجتين ($\phi = 0$)؛ يظهر فيها التقاء القمم مع القمم والقيعان مع القيعان فتنتج عنها البطون، ويتضح تكوّن العقد (N) التي لا يحدث عندها اهتزاز في الموجة الموقوفة الناتجة.
- مشهد (ب): عند اللحظة الزمنية ($t = \frac{1}{4}T$)، تقدّمت كلّ موجة بمقدار ($\frac{1}{4}\lambda$) فأصبح فرق الطور ($\phi = \pi$)، 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 ($\phi = 2\pi$)، تلتقي القمم مع القمم والقيعان مع القيعان فتنتج عنها البطون، ويتّضح تكوّن العقد (N) التي لا يحدث عندها اهتزاز في الموجة الموقوفة الناتجة.
- مشهد (د): في اللحظة ($t = \frac{3}{4}T$)، تقدّمت كلّ موجة بمقدار ($\frac{3}{4}\lambda$) فأصبح فرق الطور ($\phi = 3\pi$)، وتكرر ظهور المشهد (ب).
- مشهد (هـ): في اللحظة ($t = T$)، تقدّمت كلّ موجة مسافة بمقدار (λ)، فأصبح فرق الطور ($\phi = 4\pi$)، وتكرّر المشهد (أ) الذي حدث عند اللحظة ($t = 0$). أُلاحظ أنّ مواقع العُقد (N) لم تُغيّر أماكنها مهما تغيّر الزمن.

التجربة 2

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 كما في الشكل، 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 (22) موجات موقوفة في وتر مشدود؛ إذ يُظهر الشكل (أ) النمط الناتج عن التوافق الأول وتتكوّن فيه عُقدتان وبطن واحد. كما أُلاحظ 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: $\lambda = 2L$,

يُعطى الطول الموجي للتوافق رقم (n) بالعلاقة:

$$n\lambda_n = 2L$$

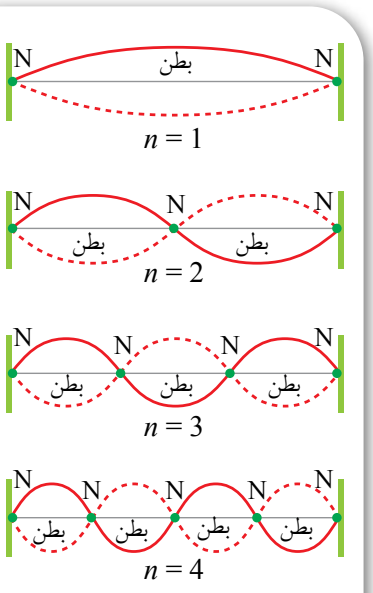
أمّا التردّد الأول فيُساوي:

$$f_1 = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{2L} \text{ ,} f_1 = \frac{v}{2L}$$

ويُعطى 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 (22) ضمن الجدول (2).



الشكل (22): موجات موقوفة في وتر مشدود بتردّدات مختلفة.

الربط مع الموسيقى

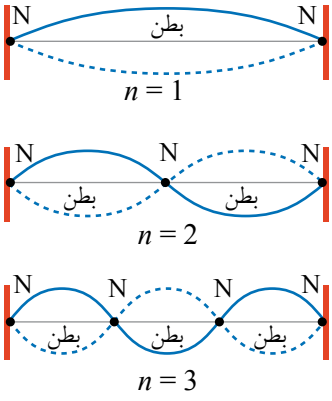
تُعزف آلة الكمان وآلة الربابة باستخدام قوس يحتوي على حزمة مشدودة من الشعر، تنزلق على أوتار الآلة؛ فتنشأ في الوتر موجات موقوفة. وعند وضع الأصبع على الوتر يُحدّد طول الوتر والطول الموجي فيصبح قصيرًا، وتنتج نغمة عالية الدرجة مقارنة مع نغمة الوتر الكامل.

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 الترددين التاليين اللذين يمكن توليدهما في الوتر، مع ثبات العوامل الأخرى.



الشكل (23): موجات موقوفة في وتر قيثارة، في التوافقات الأول والثاني والثالث.

المعطيات: $f_1 = 196\ \text{Hz}$, $n = 1$

المطلوب: $f_2 = ?$, $f_3 = ?$

الحلّ:

أرسمُ الموجات الموقوفة في الوتر في التوافقات الثلاثة الأولى، كما في الشكل (23)، حيث: $n = 1$, $n = 2$, $n = 3$

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:

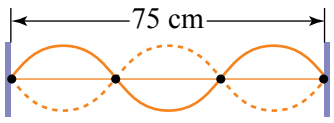
$$f_3 = \frac{3v}{2L} = 3 \times 196 = 588\ \text{Hz}$$

المثال 6

يُبيّن الشكل (24) موجات موقوفة في وتر طوله (75 cm)، وتردّد الموجات يساوي (18 Hz). أحسبُ كلًّا من:

أ .الطول الموجي.

ب. سرعة الموجة في الوتر.



الشكل (24): موجات موقوفة في وتر مشدود طوله (75 cm).

المعطيات: الشكل، $L = 0.75\ \text{m}$, $f_3 = 18\ \text{Hz}$

المطلوب: $v = ?$, $\lambda_3 = ?$

الحلّ:

أ . من الشكل، أجد أنّ: $n = 3$

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} = \frac{2 \times 75}{3} = 0.5\ \text{m}$$

ب. لحساب سرعة الموجة أستخدمُ العلاقة:

$$v = \lambda_n f_n = 0.5 \times 18 = 9\ \text{m/s}$$

اقتران الموجة الموقوفة Standing Wave Function

ورد في الدرس السابق تمثيل الموجة المتقدّمة نحو اليمين بالاقتران:

$$y_1 = A \sin (kx - \omega t)$$

وفي حال كانت الموجة تتقدّم نحو اليسار، يُصبح اقتران الموجة على الشكل الآتي:

$$y_2 = A \sin (kx + \omega t)$$

عند حدوث تراكب لموجتين متماثلتين ومتعاكستين، ونشوء موجة موقوفة؛ فإنّ الإزاحة المحصّلة لنقاط الوسط جميعها تنتج عن جمع إزاحتَي الموجتين، كما يأتي:

$$y = y_1 + y_2$$

لا يصف ناتج جمع الاقترانين موجة متحرّكة، لكنّه يصف شكلًا من الحركة التوافقية البسيطة لدقائق الوسط، فكلّ نقطة في الوسط تهتز بسَعة تختلف عن غيرها من النقاط الأخرى، لكنّها جميعًا لها التردّد نفسه (ω). وتتغيّر سَعة اهتزاز هذه النقاط بتغيّر موقعها.

✓ **أتحقّق:** وتر طوله (0.8 m) تولدت فيه موجات موقوفة طولها الموجي ($\lambda = 0.4$ m)، فهل تُمثّل النقطة ($x = 0.7$ m) عقدة أم بطن؟ أُوضّح إجابتي.

الموجات الموقوفة في الأعمدة الهوائية
Standing Waves in Air Columns

يُحدِث عازف البوق الذي يظهر في الشكل (25) اهتزازات عند طرف البوق، تنتقل خلال عمود الهواء 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.

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 (25): عازف البوق.

أبحثُ

في مصادر المعرفة الموثوقة والمتاحة، كيف تنعكس موجات الصوت في الأعمدة الهوائية عند الطرف المفتوح.

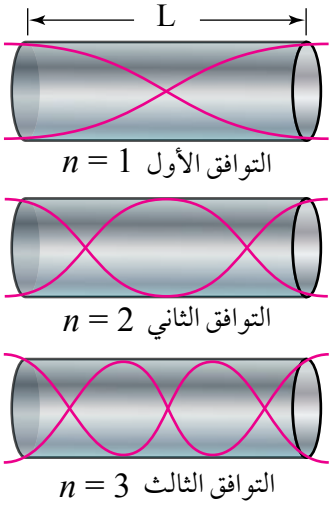
الأعمدة الهوائية المفتوحة Open Air Columns

نقصد بعمود الهواء المفتوح، أن يكون مفتوح البداية ومفتوح النهاية. تتكوّن الموجات الموقوفة في الأعمدة الهوائية المفتوحة النهاية بحيث تكون سَعة الاهتزاز عظمى عند نهايتَي الأنبوب، وتظهر في الشكل (26) 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) في عمود الهواء المفتوح النهاية وفقًا للعلاقة المستخدمة في الموجات المستعرضة.

$$n\lambda_n = 2L$$

وكذلك التردّد للتوافق رقم (n) يساوي:

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{nv}{2L} = nf_1 \quad , \quad f_1 = \frac{v}{2L}$$



الشكل (26): تمثيل بياني لموجات طولية موقوفة في عمود هواء مفتوح النهاية.

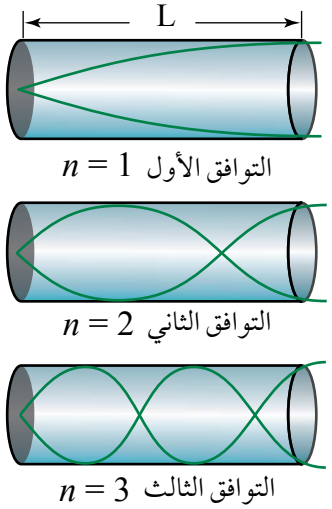
الأعمدة الهوائية المغلقة Closed Air Columns

نقصد بعمود الهواء المغلق، أن يكون مفتوح البداية ومغلق النهاية. تتكوّن الموجات الموقوفة في الأعمدة الهوائية المغلقة النهاية، بحيث تكون سعة الاهتزاز صفرًا عند النهاية المغلقة للأنبوب، وتظهر في الشكل (27) 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، وفق العلاقة:

$$n\lambda_n = 4L$$

وكذلك التردّد للتوافق رقم (n) يساوي:

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{nv}{4L}$$



الشكل (27): تمثيل بياني لموجات طولية موقوفة في عمود هواء مغلق النهاية.

أبحثُ

في الآلات الموسيقية المختلفة، وأحصر من بينها آلات النفخ، ثمّ أستخرجُ منها أمثلة على الأعمدة المفتوحة النهاية والأعمدة المغلقة 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 التالي.

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 التالي عند $(n = 3)$؛ لأنّ العمود مغلق النهاية.

$$f_n = \frac{nv}{4L} = \frac{3 \times 340}{4 \times 0.625} = 408\ \text{Hz}$$

أفكّر: 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.

الرنين Resonance

لاحظتُ أنّ نظام الوتر المشدود أو عمود الهواء لديه القدرة على الاهتزاز وفق نمط توافق طبيعي واحد أو أكثر. وإذا أثّرنا بقوّة دورية خارجية ذات تردّد معين في هذه الأنظمة المهتزّة، فإنّ سَعة اهتزازها ستتزايد وتصبح قيمة عظمى؛ عندما يتساوى تردّد القوّة الخارجية مع التردّد الطبيعي للنظام، وتُعرف هذه الظاهرة **بالرنين Resonance**، كما يحدث في الأرجوحة عند دفعها بقوّة خارجية دورية، تتّفق في تردّدها مع التردّد الطبيعي للأرجوحة الناتج عن طول حبالها.

كذلك في نظام (نابض–كتلة)، وفي البندول البسيط؛ إذ يوجد لكلّ منهما ترددّ طبيعي واحد فقط، ويُعطى تردّد البندول بالعلاقة:

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{L}{g}}$$

ويُعطى تردّد نظام (نابض– كتلة) بالعلاقة:

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$$

ويحدث الرنين لهما عند تأثير قوّة خارجية في البندول أو في الكتلة المتّصلة بنابض، بحيث يكون تردّد القوّة مساويًا لتردّد أيّ منهما، فتزداد سَعة الاهتزاز إلى أكبر مقدار ممكن.

لاحظنا في ما سبق، أنّه يوجد لنظام الوتر المهتزّ أو عمود الهواء المهتزّ أكثر من تردّد طبيعي، لكلّ منها نمط مختلف من الموجات الموقوفة، وعندما يتساوى تردّد القوّة المؤثّرة مع واحد من هذه التردّدات الطبيعية تُصبح سَعة الاهتزاز قيمة عظمى وتحدث حالة رنين.

جدول 3: التردّدات الطبيعية وفق النمط (n) لكل من الوتر والأعمدة الهوائية.

ترددّات الوتر	ترددّات عمود هواء مفتوح النهاية	ترددّات عمود هواء مغلق النهاية
$f_n = \frac{nv}{2L}$	$f_n = \frac{nv}{2L}$	$f_n = \frac{nv}{4L}$

الربط مع التكنولوجيا

يُشكّل حدوث الرنين لجناحي الطائرة وجسمها خطرًا جسيمًا؛ لذا، عند تصميم هيكل الطائرة، يسعى المصمّمون للتخلّص من هذه الظاهرة، ثمّ يجري اختبار لجسم الطائرة داخل نفق هواء ضخم.

تحتوي الأنظمة جميعها في الطبيعة على قوى معيقة، مثل قوّة الاحتكاك. وتأتي هنا أهمّية شغل القوّة الخارجية الذي يُبذل ضد الاحتكاك للتغلّب على هذه القوّة، ثم لتزويد النظام المهتزّ بالطاقة اللازمة لاستمرار حركته الاهتزازية، وتزويده بالطاقة اللازمة لزيادة السعة عند تحقّق شروط الرنين. وفي حال الوصول إلى السعة القصوى، يلزم استمرار بذل شغل القوّة الخارجية للتغلّب على الاحتكاك.

في الموجات الطولية، يُعدّ الرنين مهمًّا جدًّا بالنسبة إلى الآلات الموسيقية الهوائية مثل البوق والناي؛ وذلك لتضخيم الصوت الذي تُصدره. حتى الآلات الموسيقية الوترية مثل القيثارة، يُصنع لها تجويف مناسب للحصول على رنين. ويُراعى عند تصميم كثير من الآلات الأخرى مثل الهاتف الخلوي وبعض أجهزة التصوير الطبّية؛ أن تعمل ضمن مجال رنين معيّن.

بينما في أنظمة أخرى، يكون الرنين ظاهرة غير مرغوب بحدوثها، فعند تصميم المباني يُراعى ألّا تُحدِث رنينًا عند حركة الرياح حولها، أو عند حدوث الزلازل؛ فحدوث الرنين في المبنى عند اهتزازه يزيد من سَعة الاهتزاز إلى درجة قد تُسبب أضرارًا في المبنى أو انهياره.

كذلك يُصمّم المهندسون الجسور بحيث لا يحدث لها رنين بسبب حركة السيارات والمشاة فوقها أو هبوب الرياح عليها، لما يُشكّل ذلك من خطر على بقائها، كما حدث مع جسر تاكوما في أمريكا عام 1940م، الذي انهار بفعل تأثير الرياح فيه على شكل قوّة خارجية تردّدها يساوي التردّد الطبيعي للجسر، ما أدّى إلى ازدياد سَعة الاهتزاز وحدوث الرنين، كما يُبيّن الشكل (28).

✓ **أتحقّق:** ماذا سيحدث لوتر مشدود فيه موجات موقوفة؛ عندما تؤثّر فيه قوّة دورية خارجية تختلف في تردّدها عن التردّدات الطبيعية جميعها للوتر؟

الشكل (28): تحطّم جسر تاكوما المعلّق فوق نهر تاكوما في ولاية واشنطن الأمريكية، بسبب رياح لا تزيد سرعتها على (67 km/h)، لكنّ تردّدها توافق مع التردّد الطبيعي للجسر، فحدث له رنين لمدّة (45) دقيقة أدّى إلى انهياره. يمكنني الحصول على تصوير فيديو من الرابط الآتي:
https://archive.org/details/Pa2096Tacoma

مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** أُوضّح المقصود بالموجات الموقوفة، ثم أذكرُ شروط تكوّنها في وتر مشدود، وأُبيّن أهمّية وجود قوّة خارجية دورية تؤثّر في هذا الوتر، تتّفق مع الوتر في تردّدها.

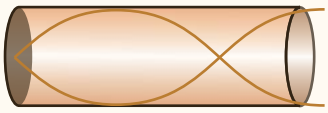
2. **أُقارن** بين أنماط التوافقات المختلفة للموجات الموقوفة التي تنشأ في الأعمدة الهوائية المفتوحة، وتلك التي تنشأ في الأعمدة الهوائية المغلقة.

3. **أُفسّر:** ما أهمّية تغيير طول الوتر عند العزف على آلة موسيقية وترية مثل العود؟ وما أهمّية وجود تجويف هوائي بحجم مناسب لهذه الآلة، كما في الشكل؟

4. ما الإجراء الذي يتّبعه المهندسون عند تصميم المباني المرتفعة والجسور وغيرها؛ للحدّ من تزايد اهتزازها ووصولها إلى سَعة اهتزاز كبيرة تُشكّل خطرًا على المبنى أو الجسر.

5. **أُحلّل:** يهتزّ وتر مشدود محدثًا موجات موقوفة فيه، مشكّلة (3) عقد وبطنين. أُعبّر عن الطول الموجي والتردّد بدلالة كلّ من طول الوتر وسرعة الموجة.

6. **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.



7. **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.

الدرس 3 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:

- يُحدّد شروط حدوث تداخل (بنّاء وهدّام) بين موجات الضوء، ويُحدّد مواقع الأهداب المضيئة والأهداب المعتمة.
- يستخدم المطياف الضوئي ومحزوز الحيود؛ ليُحلّل الضوء الأبيض إلى الألوان المكوّنة له، ويقيس الطول الموجي لكلّ منها.
- يحسب مواضع الأهداب المضيئة والأهداب المعتمة في نمط الحيود، الناتج عن إضاءة محزوز حيود بضوء أحادي اللون.

المفاهيم والمصطلحات:

متناغم	Coherent
غير متناغم	Incoherent
أحادي اللون	Monochromatic
محزوز حيود	Diffraction Grating
مطياف	Spectrometer
غشاء رقيق	Thin Film

طبيعة الضوء The Nature of Light

ساد الاعتقاد قديمًا أنّ عملية الإبصار تحدث عندما يخرج الضوء من العين ويسقط على الأجسام. إلّا أنّ 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 أجسام 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، وفق النموذج الموجي للضوء.

افترض العلماء أنّ للضوء طبيعة مزدوجة؛ إذ تُرصد صفاته الجسيمية في ظواهر معيّنة، وصفاته الموجية في ظواهر أخرى.

نتيجة لأبحاث العالم ماكسويل، وُصف الضوء بأنّه موجات كهرمغناطيسية، ثم افترض العالم أينشتاين أنّ الضوء موجات كهرمغناطيسية تتكوّن من فوتونات، وأنّ الطاقة التي تحملها الموجات الكهرومغناطيسية تتناسب طرديًّا مع تردّد هذه الموجات. 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، ومنها موجات الضوء. قد تتداخل موجتان تداخلًا بنّاءً عندما تكون السعة المحصّلة لدقائق الوسط في موقع معيّن أكبر من سَعة كلّ من الموجتين، أو يكون التداخل هدّامًا عندما تكون السعة المحصّلة أقلّ من سَعة أيّ من الموجتين.

لاحظتُ بسهولة تداخل موجات الماء، ولكن إذا وضعت مِصباحين ضوئيين بجوار بعضهما وراقبت الضوء الناتج عنهما؛ 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 بشكل عشوائي 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:

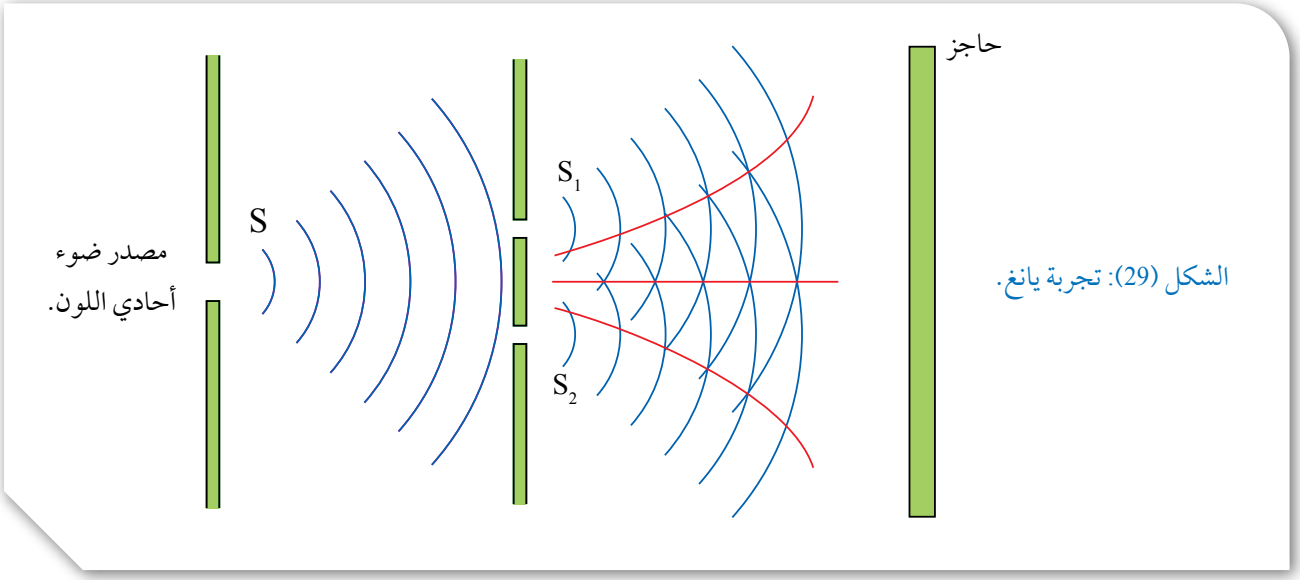
- أن يكون كلّ مصدر من مصدري الضوء أحادي اللون Monochromatic، أي إنّ موجاته لها طول موجي واحد.
- أن تتساوى موجات المصدرين في تردّدها، أو طولها الموجي.
- أن تحافظ موجات المصدرين على فرق ثابت في الطور بينها.

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 لمدّة زمنية لا تتجاوز نانو ثانية (1.0 ns)، ثمّ بعد ذلك يتغيّر الطور بشكل عشوائي. يعني هذا أنّ نمط تداخل معيّن يمكن أن يحدث خلال هذه المدّة الزمنية فقط. إلّا أنّ هذه المصابيح توصف بأنّها غير متناغمة ولا تنتج تداخلًا. أبحثُ عن تفسير هذا الوصف.



الشكل (29): 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 عن تداخل موجات الماء.

يمكن الآن إجراء تجربة مماثلة لتجربة يانغ، باستخدام ضوء أحادي اللون، كما يُبيّن الشكل (29).

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 عن المصدر نفسه، فيحدث للموجات حيود يشبه حيود موجات الماء، فتصل إلى المواقع كافّة على الحاجز كما هو مُبيّن في الشكل (29). عندما يصدر عن الشقّين شعاعان ضوئيان يلتقيان

عنـد نقطـة علـى الحاجـز، فإنّهمـا يتداخـلان تداخـلًا بنّـاءً أو هدّامًـا، حسـب فـرق الطـور بينهمـا، كمـا يأتي:

1. يتكوّن عند النقطة P في الشكل (30/ أ) هدب مضيء ناتج عن تداخل بنّاء لشعاعين متّفقين في الطور، لأنّهما قطعا مسافة متساوية، ويُسمّى الهدب المركزي.

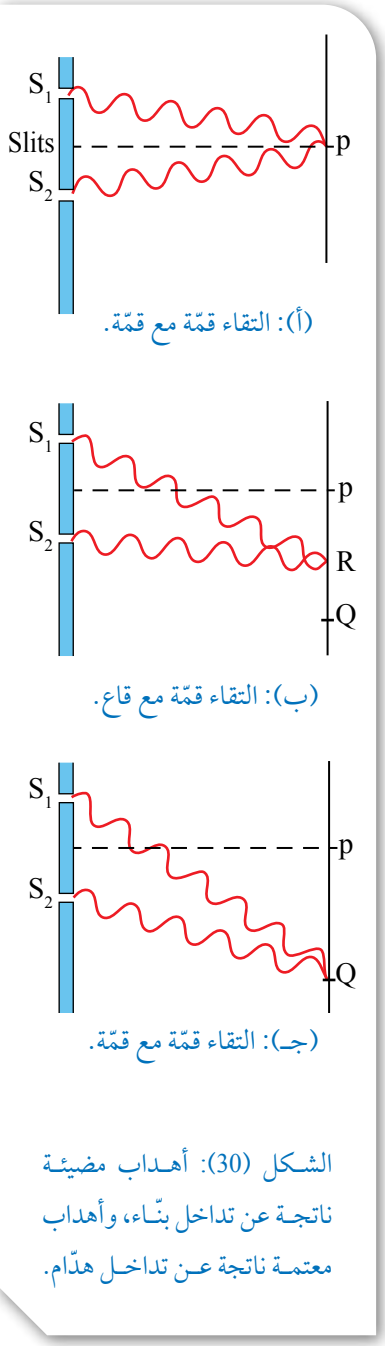
2. يتكوّن عند النقطة R في الشكل (30/ ب) هدب معتم ناتج عن تداخل هدّام لشعاعين متعاكسين في الطور؛ لأنّ فرق المسار بينهما $(\frac{1}{2}\lambda)$.

3. يتكوّن عند النقطة Q في الشكل (30/ جـ) هدب مضيء ناتج عن 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 (4) الآتي:

جدول 4: الأهداب المضيئة وفرق المسار في تجربة يانغ.

الهدب	n	فرق المسار	طور الشعاعين
المضيء المركزي	0	صفر	متّفقان
المعتم الأول		$\frac{\lambda}{2}$	متعاكسان
المضيء الأول	1	λ	متّفقان
المعتم الثاني		$\frac{3\lambda}{2}$	متعاكسان
المضيء الثاني	2	2λ	متّفقان

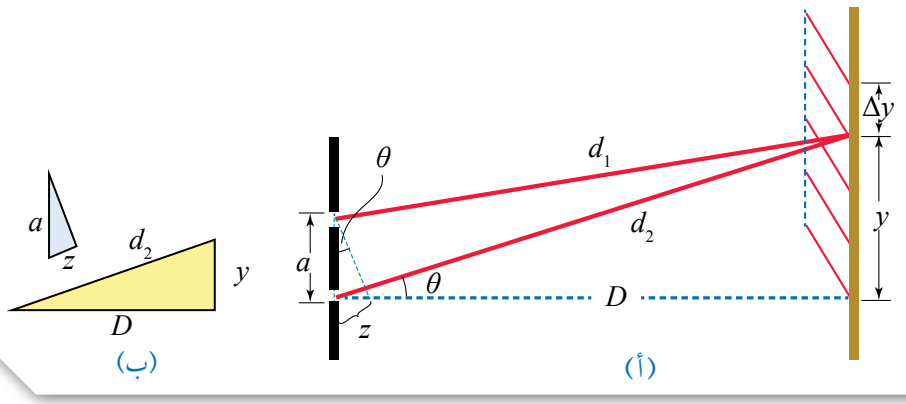


(أ): التقاء قمّة مع قمّة.

(ب): التقاء قمّة مع قاع.

(جـ): التقاء قمّة مع قمّة.

الشكل (30): أهداب مضيئة ناتجة عن تداخل بنّاء، وأهداب معتمة ناتجة عن تداخل هدّام.



الشكل (31):
(أ): مسارات الأشعّة المتداخلة، وتكوّن الأهداب المضيئة الناتجة من التداخل على الحاجز.
(ب): تشابه المثلثات.

يرتبط تكوّن الأهداب المضية والمعتمة على الحاجز بعلاقات رياضية مع العوامل التي أدّت إلى تكوّن هذه الأهداب. إذا كانت المسافة بين الشقّين (a)، كما يُبيّن الشكل (31/ 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 (31/ ب) الذي يُبيّن مثلّثين متشابهين حصلنا عليهما من الشكل السابق؛ إذ تتساوى زوايا المثلّثين، أجد علاقة بين نسب أضلاع المثلّثين:

$$\frac{z}{a} = \frac{y}{d_2}$$

بما أنّ المسافة الرأسية (y) صغيرة جدًّا بالمقارنة مع بعد الحاجز عن الشقين (D)، فإنّه يمكن افتراض $(d_2 \cong D)$، 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 مع الرياضيات

يتشابه المثلّثان عندما تكون زوايا المثلث الأول مساوية لزوايا المثلّث الثاني، وينتج عن التشابه أن يكون ناتج قسمة كلّ ضلع من المثلث الأوّل على الضلع الذي يقابله من المثلث الثاني يساوي مقدارًا ثابتًا، وهذ 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 عنه أهداب معتمة على الحاجز؟

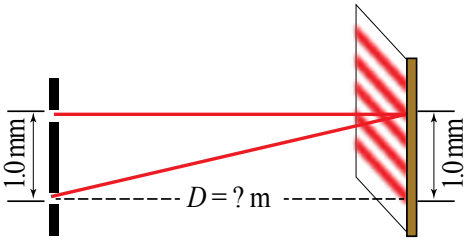
أُصمّم باستخدام برنامج السكراتش (Scratch) عرضًا يوضّح طريقة حدوث التداخل لموجات الضوء بعد نفاذها من شقّين متجاورين، وظهور الأهداب على حاجز.

المثال 8

يُصدر مصدر ليزر ضوءًا أحادي اللون طوله الموجي (650 nm)، عند 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)، كما في الشكل (32).

أ . ما مقدار المسافة بين الحاجز والشقّين؟

ب. عند إبعاد الحاجز إلى مثلَي المسافة السابقة، كم ستصبح المسافة بين هدبين مضيئين متتاليين؟



الشكل (32): أهداب مضيئة ناتجة عن تداخل ضوء ليزر.

المعطيات: $\lambda = 650\ \text{nm}$, $y = 1.0\ \text{mm}, a = 1.0\ \text{mm}$

المطلوب: $y = ?$, $D = ?$

الحلّ:

لإيجاد المسافة بين هدبين مضيئين متتاليين على الحاجز:

$$y = 1.0 \times 10^{-3}\ \text{m}$$

$$y = \frac{1.0 \times 10^{-3}}{3} = 3.3 \times 10^{-4}\ \text{m}$$

أ . بُعد الحاجز عن الشقّين (D):

$$y = \frac{\lambda D}{a} \Rightarrow D = \frac{ay}{\lambda}$$

$$D = \frac{1.0 \times 10^{-3} \times 3.3 \times 10^{-4}}{650 \times 10^{-9}} = 0.51\ \text{m}$$

ب. العلاقة بين (y) و (D) طردية، وبما أنّ العوامل الأخرى لم تتغيّر عند تكرار التجربة، فإنّ:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{D_2}{D_1} \Rightarrow \frac{x_2}{y_1} = 2 \Rightarrow y_2 = 2y_1$$

$$y_2 = 3.3 \times 10^{-4} \times 2 = 6.6 \times 10^{-4}\ \text{m}$$

المثال 9

أُجريت تجربة يانغ لقياس الطول الموجي لضوء ليزر أخضر، كما في الشكل (33). 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 (33): مصدر ضوء ليزر أخضر (أحادي اللون).

المعطيات: $y = 0.4\ \text{mm}\ ,\ a = 1.3\ \text{mm}\ ,\ D = 94.5\ \text{cm}$

المطلوب: $\lambda = ?$

الحلّ:

$$\lambda = \frac{ay}{D} = \frac{1.3 \times 10^{-3} \times 0.4 \times 10^{-3}}{94.5 \times 10^{-2}}$$

$$\lambda = 550 \times 10^{-9}\ \text{m} = 550\ \text{nm}$$

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، نُلاحظ ألوانًا مختلفة، كما في الشكل (34)، تنتج عن تداخل الموجات المنعكسة عن طبقتَي الغشاء الداخلية والخارجية.

الشكل (34): تداخل موجات الضوء المنعكس عن غشاء فقاعة الصابون.

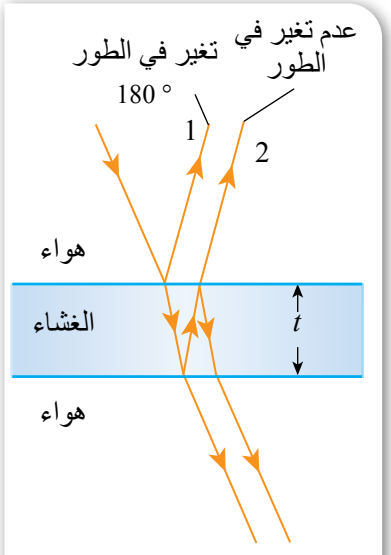
للتعرّف إلى ما يحدث عند انعكاس شعاع ضوئي عن سطحَي الغشاء الرقيق، يجب أن نتذكّر حالات انتقال الموجة الميكانيكية بين حبلين أحدهما رفيع والآخر غليظ، وما حدث للجزء المنعكس منها في كلّ حالة، والتي نلخّصها في الحقائق الآتية:

- عند سقوط موجة على الحد الفاصل بين وسطين شفافين مختلفين، إذا كان معامل انكسار الوسط الثاني أكبر من معامل انكسار الوسط الأوّل؛ فإنّ الجزء المنعكس من الموجة يكون مقلوبًا (يحدث له تغيّر في الطور مقداره 180°).

- عند سقوط موجة على الحد الفاصل بين وسطين شفّافين مختلفين، إذا كان معامل انكسار الوسط الثاني أقلّ من معامل انكسار الوسط الأوّل؛ فلا يحدث تغيّر في الطور.
- يقلّ الطول الموجي للضوء عند دخوله وسط معامل انكساره (n) ليصبح: $(\lambda_n = \frac{\lambda}{n})$، حيث (λ) الطول الموجي للضوء في الهواء.

ليكن لديّ غشاء فقاعة صابون منتظم السمك، سُمكه (t) ومعامل انكسار مادته (n). أفترضُ سقوط الأشعّة من الهواء بصورة عمودية تقريبًا على الغشاء، كما يُبيّن الشكل (35). ينعكس الشعاع مرّتين: الأولى عند الوجه العلوي؛ إذ ينعكس الشعاع 1 مع حدوث فرق طور °180، والثانية عند الوجه السفلي؛ إذ ينعكس الشعاع 2 دون تغيّر في الطور، وينفذ الشعاعان 3, 4 داخل الفقاعة.

نتج عن الانعكاس فرق طور °180 بين الشعاعين 1, 2، وهذا يعادل فرق مسار مقداره $\frac{\lambda_n}{2}$. لكنّ الشعاع الثاني 2 قطع مسافة إضافية داخل الغشاء تساوي $2t$، وبما أنّ سقوط الأشعّة عمودي تقريبًا على الغشاء، وإذا كان سُمك الغشاء يساوي ربع طول موجي؛ فإنّ المسافة الإضافية $2t$ تُحدِث فرق مسار $2t = \frac{\lambda_n}{2}$، فيعود الشعاع 2 متّفقًا في الطور مع الشعاع 1 ويكون التداخل بينهما بنّاءً.



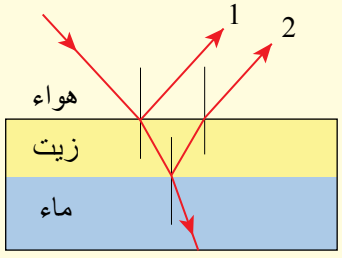
الشكل (35): سقوط شعاع ضوئي من الهواء على غشاء رقيق، وما يحدث له من انكسارات وانعكاسات. وقد رُسمت الأشعّة بشكل غير عمودي للتوضيح.

أتحقّق: لماذا يحدث فرق في الطور عند الانعكاس عن الوجه العلوي، ولا يحدث عند الانعكاس عن الوجه السفلي لغشاء الصابون؟

طلاء عدسات آلات التصوير: تُطلى عدسات آلات التصوير بطبقة رقيقة من مادّة شفّافة لها معامل انكسار أقلّ من معامل انكسار زجاج العدسة، ويكون سُمك هذه الطبقة بمقدار ربع طول موجي، فينتج عن ذلك أن تتداخل الأشعّة المنعكسة عن وجهَي الطلاء الخارجي والداخلي تداخلًا هدّامًا، ما يُقلّل انعكاس الضوء عن العدسة بنسبة كبيرة جدًّا، وهذا يزيد من كمّية الضوء التي تعبر العدسة ويحسّن كفاءة التصوير. عند تحديد سُمك طبقة الطلاء تكون المقارنة مع متوسّط الأطوال الموجية للضوء المرئي، ما يجعل بعض الأشعّة التي تقع في طرفي الطيف المرئي تنعكس عن الطلاء. أُلاحظ انعكاس اللون البنفسجي عن العدسة في الشكل (36).

الشكل (36): عدسة آلة تصوير مطلية بطبقة رقيقة مانعة للانعكاس.

أفكّر: عند سقوط ضوء من الهواء على غشاء رقيق من الزيت يطفو فوق سطح الماء، وانعكاس الشعاع مرّتين؛ الأولى 1 عن السطح الفاصل بين الهواء والزيت، والثانية 2 عن السطح الفاصل بين الزيت والماء. إذا علمت أنّ معامل انكسار الماء أكبر منه للزيت، أصف ما يحدث من تغيّر في الطور بالنسبة إلى الشعاعين المنعكسين.

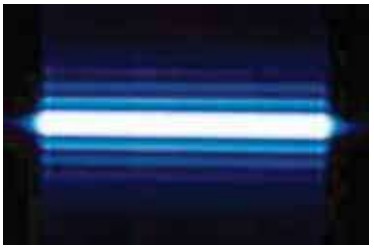


حيود موجات الضوء Diffraction of Light Waves

لاحظتُ في الدرس الأول تجربة حيود موجات الماء، واستنتجتُ شرط تكوّنه. الحيود ظاهرة موجية تحدث للموجات الميكانيكية وللموجات الكهرمغناطيسية أيضًا، مثل موجات الضوء، كما لاحظنا 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، كما يُبيّن الشكل (37). تتكوّن هذه الأهداب نتيجة حدوث تداخل بنّاء وآخر هدّام لأشعّة الضوء المختلفة، التي نفذت خلال طرفَي الشقّ الضيّق. أي إنّ ظاهرة الحيود سببٌ في انحراف مسار الموجات وحدوث التداخل.

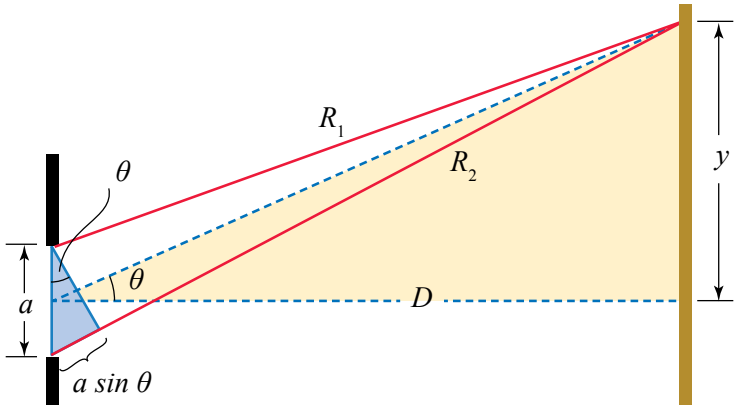


الشكل (37): تكوّن نمط من الأهداب المضيئة والمعتمة على حاجز، نتيجة ظاهرة الحيود.

أفترضُ شعاعين R_1, R_2 يتّجهان من طرفَي الشقّ إلى نقطة على الحاجز تُشكّل هدبًا معتمًا، وتبعد إلى الأعلى عن مركز الحاجز مسافة y، والمسافة بين الشقّ والحاجز D، كما يُبيّن الشكل (38). أعلمُ أنّ الموجات جميعها تغادر الشقّ وهي متّفقة في الطور كونها ناتجة من المصدر نفسه. وهذا يعني أن تكوّن الهدب المعتم عند التقاء الشعاعين R_1, R_2 ناتج عن 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 (38): حيود موجات الضوء من شقّ ضيّق.

ولكن من المثلّث الكبير، وبما 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:

$$\lambda = \frac{2ay}{D}$$

$$\lambda = \frac{2 \times 16 \times 10^{-6} \times 4 \times 10^{-2}}{2}$$

$$\lambda = 64 \times 10^{-8} = 640\text{ nm}$$

أُفكّر:

- إذا كان الهدب المعتم الأول ينتج عن فرق مسار بين الشعاعين مقداره $\frac{\lambda}{2}$، فما مقدار فرق المسار الذي ينتج عنه الهدب المعتم الثاني؟
- إذا كان الهدب المضيء الأول ينتج عن فرق مسار بين الشعاعين مقداره λ، فما مقدار فرق المسار الذي ينتج عنه الهدب المضيء الثاني؟

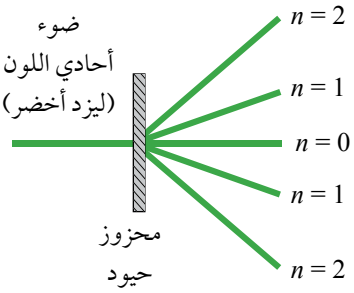
محزوز الحيود Diffraction Grating

لاحظتُ في موضوع التداخل، كيف جرى 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، كما يُبيّن الشكل (39/ أ).

(أ): محزوز الحيود.

حيود ضوء أحادي اللون في محزوز الحيود

عند سقوط ضوء أحادي اللون على محزوز الحيود؛ فإنّه ينفذ من الشقوق جميعها، ويحدث له حيود فيخرج من كلّ شقّ بعدّة اتّجاهات، كما في الشكل (39/ ب)، ثم تتداخل أشعّة الضوء كما يحدث في حالة الشقّين المتوازيين. وقد أُعطي رقم خاصّ لكلّ هدب مضيء ناتج عن 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 (39/ جـ) الذي يُبيّن نمط الحيود الناتج عن 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.

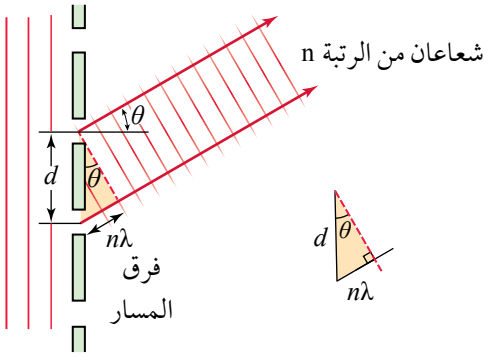


(ب): أشعّة الضوء عند حيودها.

(جـ): حيود شعاع ليزر.

الشكل (39): محزوز الحيود، وحيود ضوء أحادي اللون باستخدام محزوز الحيود.

كلّ بقعة مضيئة على الحاجز في الشكل (39/ 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). والبقة المضيئة الثانية التي رتبتها ($n = 2$)، فإنّ فرق المسار بين شعاعيها (2λ).بشكل عامّ، عند البقعة المضيئة التي رتبتها (n)؛ فإنّ فرق المسار بين الشعاعين يُساوي ($n\lambda$).



الشكل (40): فرق المسار بين الشعاعين الضوئيين في البقعة المضيئة من الرتبة (n).

أُلاحظ الشكل (40) 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:

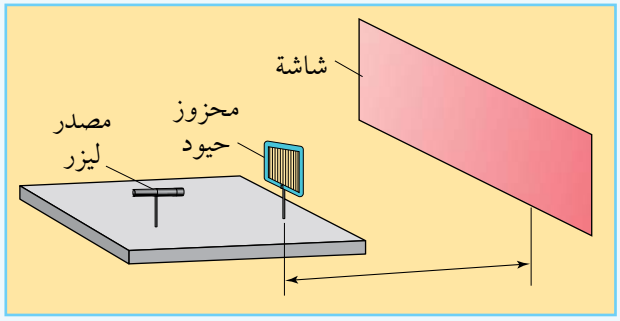
$$d = \frac{1}{450} = 2.2 \times 10^{-3}\text{ mm} = 2.2 \times 10^{-6}\text{ m}$$

$$\sin\theta_n = \frac{n\lambda}{d} = \frac{1 \times 650 \times 10^{-9}}{2.2 \times 10^{-6}} = 0.295$$

$$\theta_n = 17.16°$$

التجربة 3

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 كما هو مُبيّن في الشكل أعلاه.
2. أُثبّت محزوز الحيود بشكل عمودي على سطح طاولة أفقي مستخدمًا المشبك، بحيث 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 يمكن أن أرمز له 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:

$$(\theta = \sin\theta = \tan\theta)$$

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 الأبيض في محزوز الحيود

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 (41/ أ) صورة الحاجز عند تكوّن الأهداب المضيئة عليه.

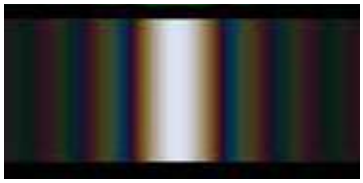
أُلاحظ في الشكل أنّ الهدب الأول لكلّ لون ينحرف بزاوية تختلف عن اللونين الآخرين، ما يعني أنّ زاوية الحيود تختلف باختلاف الطول الموجي. كما يُبيّن الشكل أنّ الزاوية تزداد بزيادة الطول الموجي، فاللون الأحمر له أكبر زاوية حيود، واللون الأزرق له أصغرها. يتكوّن الضوء الأبيض من مجموعة من الأطوال الموجية المختلفة تنتج عنها 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، كما يُبيّن الشكل (41/ ب). أستنتجُ من ذلك أنّ محزوز الحيود يعمل على تحليل الضوء الأبيض إلى مكوّناته، كما 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، كما يُبيّن الشكل (42)، ثمّ استخدام العلاقة السابقة لحساب الطول الموجي لكلّ لون.

(أ)



(ب)

الشكل (41): 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 (42): المطياف الضوئي.

تطبيقات على ظاهرتَي تداخل الضوء وحيوده

يُستخدم محزوز الحيود لتحليل الطيف الناتج عن التركيبات الذرية والجزيئية، وكذلك في تحليل أطياف النجوم لدراسة تركيبها وخصائصها الأخرى. كما يُستخدم 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، كما تكون إضاءتها أكثر شدّة.

الربط مع العلوم 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 كمحزوز حيود.

مراجعة الدرس

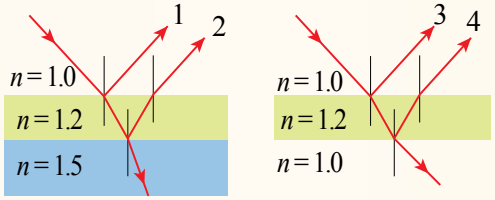
1. **الفكرة الرئيسة:** أُوضّح المقصود بكلّ من تداخل الضوء وحيوده، وأُبيّن الشروط التي يجب تحقّقها في مصدرين ضوئيين؛ كي يتكوّن نمط تداخل منتظم لموجاتهما.

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.



(ب) (أ)

6. أُوضّح ما يحدث لفرق الطور في موجات الضوء للأشعّة (1, 2, 3, 4)، عند انعكاسها عن السطحين العلوي والسفلي لكلّ غشاء، كما يُبيّن الشكلان المجاوران.

7. **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.

8. **أحسبُ:** في تجربة باستخدام محزوز حيود مكتوب عليه 250 خطّ في كل ملمتر، كانت زاوية الحيود التي يميل بها الهدب المضيء الثاني n_2 بمقدار (15°). ما مقدار الطول الموجي للضوء المستخدم في التجربة؟

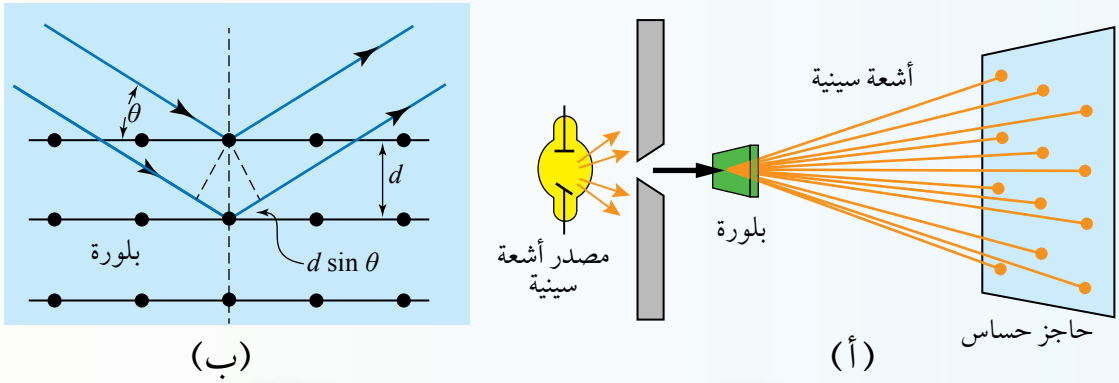
حيود الأشعّة السينية

الأشعّة السينية جزء من الطيف الكهرمغناطيسي، اكتشفها العالم وليام رونتجن عام 1895م، وتقع في منطقة التردّدات العالية ذات الأطوال الموجية القصيرة؛ إذ إنّ تردّدها أكبر من تردّد الأشعّة فوق البنفسجية، إلّا أنّه دون تردّد أشعّة غاما. والطول الموجي لموجات الأشعّة السينية يقع ضمن المدى (0.001-10 nm). تحدث ظاهرة الحيود لموجات الطيف الكهرمغناطيسي جميعها، بما في ذلك موجات الأشعّة السينية، وكلّما كان الطول الموجي أقصر نحتاج إلى محزوز حيود خطوطه أكثر تقاربًا، ولا يمكن الحصول على محزوز حيود يناسب الطول الموجي للأشعّة السينية؛ لذا، يجري إسقاط الأشعّة السينية على بلورة من الذرات لتعمل عمل محزوز الحيود؛ لأنّ المسافة بين الذرّات تتناسب مع الطول الموجي للأشعّة السينية.

استُخدمت تكنولوجيا حيود الأشعّة السينية خلال البلورات لدراسة التركيب الذري لبعض الجزيئات مثل جزيء (DNA) وجزيء الهيموغلوبين، وكذلك الفيروسات. وسخّر العلماء معرفتهم بتركيب الجزيئات في أبحاث تطوير العديد من الأدوية، كما أسهمت معرفتهم في التركيب الذرّي لكثير من المواد العضوية في تصميم موادّ جديدة وصناعتها.

عند إسقاط الأشعّة السينية على الذرّات، فإنّها تنعكس مرّتين: الأولى عن الطبقة الخارجية من الذرّات، والثانية عن الطبقة التي تليها، كما يحدث مع الضوء عند انعكاسه عن الأغشية الرقيقة، وهذا يُشبه حيود موجات الضوء خلال محزوز الحيود. ويحدث تداخل بنّاء وآخر هدّام نتيجة حيود الأشعّة السينية، فتتكوّن على حاجز حسّاس بقع مضيئة على خلفية معتمة، كما في الشكل (أ).

يُبيّن الشكل (ب) ما يحدث لموجات الأشعّة السينية بين ذرّات المادة؛ إذ إنّ المسافة (d) بين كلّ طبقتين من الذرّات تقابل سُمك الخطّ المعتم في محزوز الحيود، وبذلك ينتج فرق مسار بين الشعاعين المنعكسين مقداره ($2d \sin\theta$) وإذا كان الفرق مساويًا لعدد صحيح من الطول الموجي للأشعّة السينية ($n\lambda$)، فيحدث للشعاعين تداخل بنّاء.



أبحث ما القياسات التي يجب إجراؤها في تجربة حيود الأشعّة السينية عن بلورة معينة؛ لمعرفة المسافة بين ذرّتين متجاورتين في هذه البلورة؟

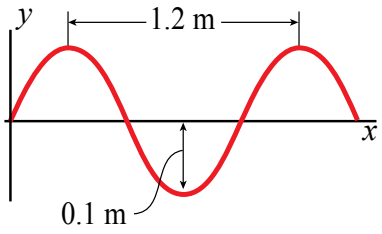
1. أضع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة في ما يأتي:

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 (12 s). مستعينًا بالشكل؛ فإنّ سرعة الموجة تساوي:



أ. (0.8 m/s)　　ب. (1.5 m/s)

جـ. (1.8 m/s)　　د. (2.4 m/s)

3. تنتقل موجة مستعرضة في حبل أفقي وفق العلاقة الآتية:

$$y(x,t) = 0.2 \sin (3x - 8t)$$

أيّ الجمل الآتية، تصف الموجة بصورة صحيحة؟

أ. السعة (0.2 m)، والتردد الزاوي (3 rad/s).

ب. السعة (0.2 m)، والرقم الموجي (3 rad/m).

جـ. التردد الزاوي (0.2 rad/s)، والسعة (3 m).

د. التردد الزاوي (8 rad/s)، والرقم الموجي (0.2 m).

4. تتكوّن الموجات الموقوفة وفق أكثر من نمط توافق في الخيط الواحد، نُميّزها بالرقم (n). أيّ 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.

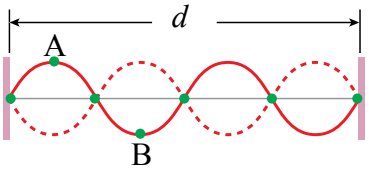
3. عندما أُحرّك رأسيًا بانتظام طرف حبل مشدود أفقيًّا بمعدل 3 مرّات في الثانية. كم سيكون الزمن الدوري للموجة المنتشرة؟ وهل يؤثّر عدد الاهتزازات في سرعة الموجة؟ أُبرّر إجابتي.

4. **أفسّر:**

أ. عندما تنتقل نبضة رأسية في حبل مشدود أفقيًّا، هل تنعكس دائمًا بشكل مقلوب؟ أُوضّح إجابتي.

ب. حبل طويل معلّق بالسقف، أمسكت بطرفه السفلي وحرّكته أفقيًّا بشكل منتظم. فتكوّنت موجات ثابتة. أُفسّر ذلك.

5. **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. **تنتشر موجة مستعرضة في حبل مشدود، وتُحقّق العلاقة الآتية:**

$$y(x, t) = 0.35 \sin (3\pi x - 10\pi t + \frac{1}{4}\pi)$$

إذ إنّ الوحدات المستخدمة هي متر وثانية. أُجيب عمّا يأتي:

أ. ما اتّجاه انتشار الموجة على محور (x)؟

ب. ما الإزاحة الرأسية لجزء مهتزّ من الحبل عند $(x = 0.1\ \text{m})$، $(t = 0\ \text{s})$؟

جـ. ما مقدار الطول الموجي والتردّد للموجة؟

د. ما مقدار ثابت الطور للموجة؟

7. **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؟

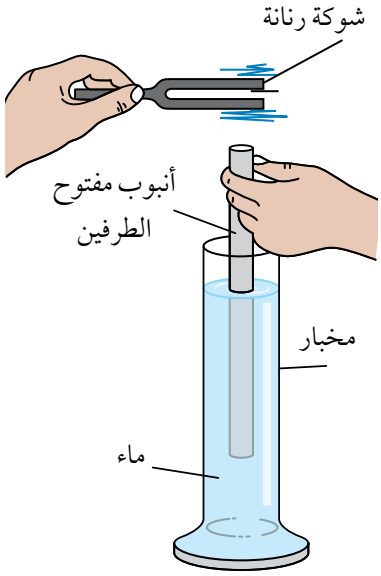
ب. عند تكوّن بطنين؛ ما المسافة بين عُقدتين متتاليتين؟ ما مقدار الطول الموجي؟

8. **أُقارن: لدى وسيم ناي مفتوح النهاية، ولدى شقيقه يوسف مزمار مغلق النهاية، إذا كانت الآلتان متساويتين في الطول. أيّ منهما يمكن استخدامها لعزف نغمة أكثر انخفاضًا بتوليدها موجات موقوفة ضمن التوافق الأول؟ أُوضّح إجابتي بالرسم.**

9. 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:

التردد (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.



10. تحاول رؤى استقصاء تردّدات التوافقات المختلفة في الأعمدة الهوائية المغلقة النهاية، والشكل المجاور يُبيّن وضعها أنبوبًا مفتوح الطرفين داخل مخبار فيه ماء، واستخدامها شوكة رنانة.

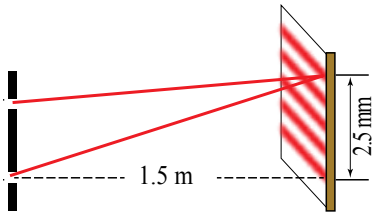
أ. كيف تتحكّم رؤى في طول عمود الهواء؟

ب. كيف تعلم بأنّ موجات موقوفة تولّدت في عمود الهواء؟

جـ. كيف يمكنها قياس الطول الموجي لموجات الصوت في الهواء في تجربتها هذه؟

11. 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.

12. أجرت مجموعة طالبات تجربة، فاستخدمن مصدرين ضوئيين متناغمين لتوليد نمط تداخل على حاجز، تفصل 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، كما في الشكل.



أ. أحسبُ الطول الموجي للضوء.

ب. ما القِيَم التي تتغيّر عند تقريب الحاجز من الشقّين؟

13. **حل مشكلات:** تُستخدم الخلايا الشمسية لتوليد الكهرباء من أشعّة الشمس. ويتكوّن سطحها العلوي من السيليكون ($n = 3.5$)، وهي تعكس الضوء بنسبة (30%). أُقدّم رأيًا أُبيّن فيه كيف يمكن زيادة كفاءة هذه الخلايا بزيادة الضوء الذي ينفذ داخلها، وتقليل الضوء المنعكس عنها؟

14. 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.

15. 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.

16. تُبيّن الصورة في الشكل المجاور نوعين من النظّارات الطبّية، الأولى عدساتها غير مطلية، والثانية عدساتها مطلية بطبقة رقيقة معامل انكسارها أقلّ من معامل انكسار الزجاج. أصف الاختلاف بين الصورتين، وأُفسّر سبب هذا الاختلاف.

الوحدة 6

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 حرارية 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 وقوانين الديناميكا الحرارية، تأثير كبير في كلّ ما يجري حولنا، وفي عمل كثير من الأجهزة التي نستخدمها في حياتنا اليومية.

الدرس الأول: حالات المادّة

States of Matter

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: قوانين الديناميكا الحرارية

The Laws of Thermodynamics

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

الدرس الثالث: التمدّد الحراري

Thermal Expansion

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 على أرضية المختبر.

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، بحيث يُمكن إدخال 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 درجة حرارته؟ 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 الحرارة 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	Poiling Point
الحرارة النوعية الكامنة للتصعيد (للتبخير)	Specific Latent Heat of Vaporization

مفاهيم أساسية في الديناميكا الحرارية

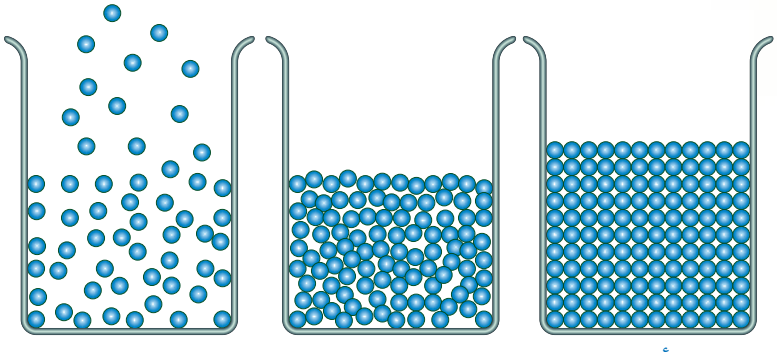
Basic Concepts in Thermodynamics

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 وغيرها. 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 إلى الشكل (1). ويوجد بين جزيئات المادّة الواحدة قوى تماسك تعمل على تماسكها وترابطها، تكون كبيرة في الحالة الصلبة، ومتوسّطة في الحالة السائلة، وصغيرة جدًّا في الغازات.



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

ويكون للمادّة الصلبة شكل وحجم ثابتان، وجزيئاتها متراصّة تتحرّك حركة اهتزازية في مواقعها، أمّا المادّة السائلة فلها حجم ثابت، وشكلها متغيّر حسب شكل الإناء الذي توضع فيه، وجزيئاتها أقلّ تراصًّا منها في الحالة الصلبة، وتتحرّك حركة اهتزازية وانتقالية عشوائية. وأخيرًا، يكون للمادّة الغازية شكل وحجم غير ثابتين، وجزيئاتها متباعدة بشكل كبير، وتتحرّك حركات عشوائية: اهتزازية، ودورانية، وانتقالية بسرعات أكبر كثيرًا من سرعات جزيئات الحالة السائلة. ويَستخدم نموذج الحركة الجزيئية فكرة أنّ جُسيمات الموادّ تسلك سلوك كرات صغيرة. وعند استخدام النموذج لتفسير سلوك الغازات؛ يُطلق عليه غالبًا اسم النظرية الحركية للغازات.

أتحقّق: علامَ ينصّ نموذج الحركة الجزيئية للمادّة؟

أُعدّ فيلمًا قصيرًا باستخدام صانع الأفلام (Movie maker) يعرض ترتيب جزيئات مادّة في حالاتها الثلاث: الصلبة والسائلة والغازية، وكيفية حركة جزيئاتها وفق نموذج الحركة الجزيئية.

درجة الحرارة والطاقة الحرارية
Temperature and Thermal Energy

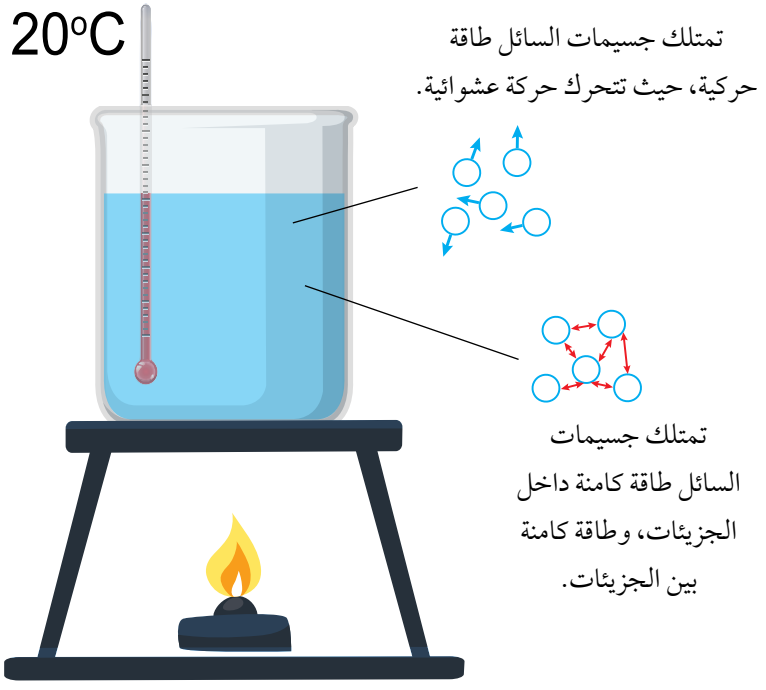
يُستخدم مصطلح درجة الحرارة؛ للتعبير عن مدى سخونة الأجسام أو برودتها. وتُحدّد درجة الحرارة اتّجاه انتقال الطاقة بين الأجسام عند اتصالها حراريًّا؛ إذ تنتقل الطاقة تلقائيًّا من الجسم الأعلى درجة حرارة إلى الجسم الأدنى درجة حرارة. فمثلًا، عندما أضع يدي في طريق الماء المتدفّق من الصنبور، أُحدّد أنّ الماء 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 تعتمد على توصيله الحراري، كما أنّه يُعطي

أُفكّر: عندما أقف حافي القدمين في الغرفة، واضعًا إحدى قدمَي على سجادة، والأُخرى على أرضية الغرفة، أشعرُ أنّ 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.

عبارة وصفية لدرجة الحرارة (مثلًا: ساخن، بارد، أسخن، أبرد،...)؛ لذا، يُستخدم مقياس درجة الحرارة Thermometer لقياس درجة الحرارة بشكل 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 يكسب طاقة أو يفقدها؛ إذ تمتلك هذه الجُسيمات طاقة حركية، وطاقة كامنة ناتجة عن القوى المتبادلة بين جُسيمات المادّة، أنظرُ إلى الشكل (2). فعندما يكسب جسم طاقة يزداد مقدار سرعة حركة جُسيماته العشوائية (الاهتزازية، الانتقالية، الدورانية)، أي تزداد طاقاتها الحركية، فترتفع درجة حرارته. إذن: لا بدّ من 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.



الشكل (2): الطاقة الحركية والطاقة الكامنة لجُسيمات سائل.

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

يوضّح الشكل (3) كأسَي شاي متماثلين لهما درجة الحرارة نفسها (T)؛ لذا، يكون متوسّط الطاقة الحركية للجُسيمات الموجودة في الكأسين متساويًا. وبما أنّ كتلة الشاي (ومن ثمّ عدد جُسيماته) في الكأس الموضّح في الشكل (3/ أ) أكبر منها في الكأس الموضّح 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؟

الحرارة والطاقة الحرارية Heat and Thermal Energy

عندما يفقد جسم طاقة أو يكسبها؛ تتغيّر درجة حرارته ما لم تتغيّر حالته الفيزيائية، أي إنّ طاقته الحرارية تتغيّر. فعندما 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.

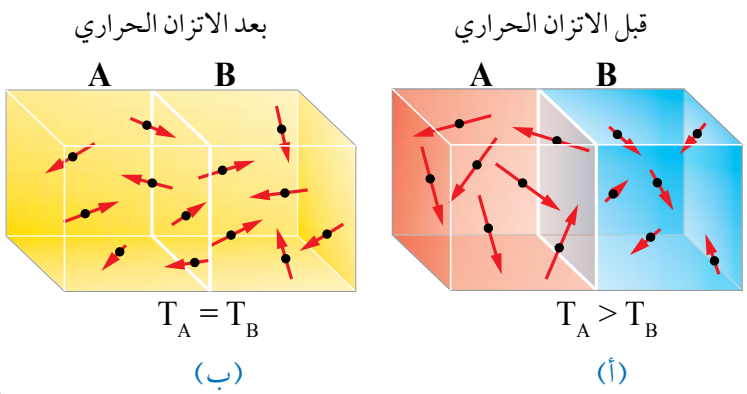
✓ **أتحقّق:** ما المقصود بالحرارة؟ ما وحدة قياسها حسب النظام الدولي للوحدات؟

الربط مع علم الأحياء

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 درجتّي 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 إلى 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 تغير 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 لمدد 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 كمّية الطاقة التي زوّدت بها 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.

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.

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**، وتُعرّف بأنّها كمّية الطاقة اللازمة لرفع درجة حرارة (1 kg) من المادّة بمقدار (1°C)، ورمزها c، 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، بينما 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)، بينما يحتاج (1 kg) من الماء إلى ما يقارب خمسة أضعاف هذه الطاقة لرفع درجة حرارته بمقدار (1 K)؛ لذا، ترتفع درجة حرارة الخرسانة ذات السعة الحرارية النوعية الأصغر بشكل أسرع من الماء ذي السعة الحرارية النوعية الأكبر على الرغم من تزويدهما بمعدّل الطاقة نفسه لكلّ وحدة مساحة، كما أنّها تبرد بشكل أسرع من الماء عند فقدهما معدّل الطاقة نفسه.

كما أُلاحظ 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

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 كما يأتي:

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)- كما يأتي:

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

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

(25°C)

الربط مع الحياة

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 غيرة 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 إلى 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.

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

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

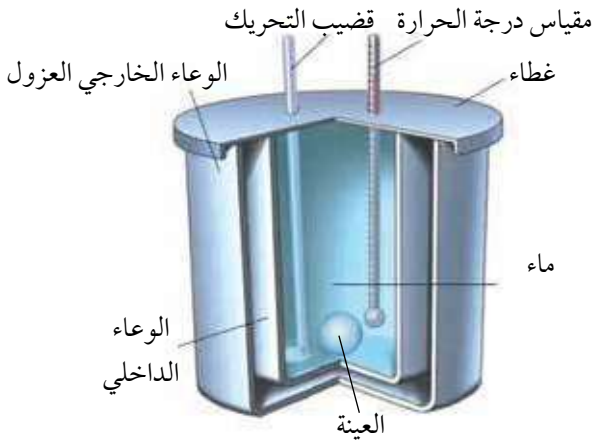
$$= 2.8 \times 10^3\ \text{s} = 46.67\ \text{min}$$

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.

3 . **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).



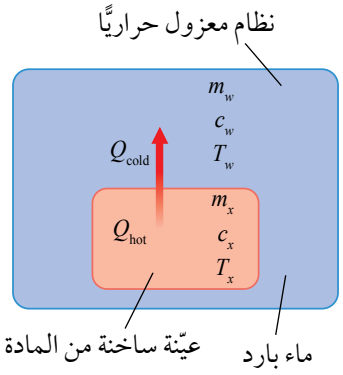
الشكل (7): مسعّر حراري بسيط لقياس السعة الحرارية النوعية لعيّنة من مادّة.

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 عدّة إجراءات وخطوات.

بما 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 إلى 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 النظام مكوّن من العيّنة (x) والماء (بإهمال الطاقة التي تكتسبها مادة المسعّر) فتكون الطاقة الكلية للنظام ثابتة، أي إنّ:

$$E_x + E_w = constant$$

وبما 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 عن 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. وبما أنّ النظام مغلق ومعزول ولا يُبذل شغل عليه؛ فإنّ التغيّر في الطاقة الحرارية لجزأي النظام ناتج عن انتقال الطاقة بينهما، ومقداره يساوي كمية الطاقة المنتقلة (Q)؛ لذا، يمكن التعبير عن تغيّر الطاقة الحرارية لكلّ من جزأي النظام بالعلاقة الآتية:

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

وبما 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 كما يأتي:

$$Q_x + Q_w = 0$$

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

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

✓ **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 كما يأتي:

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

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.

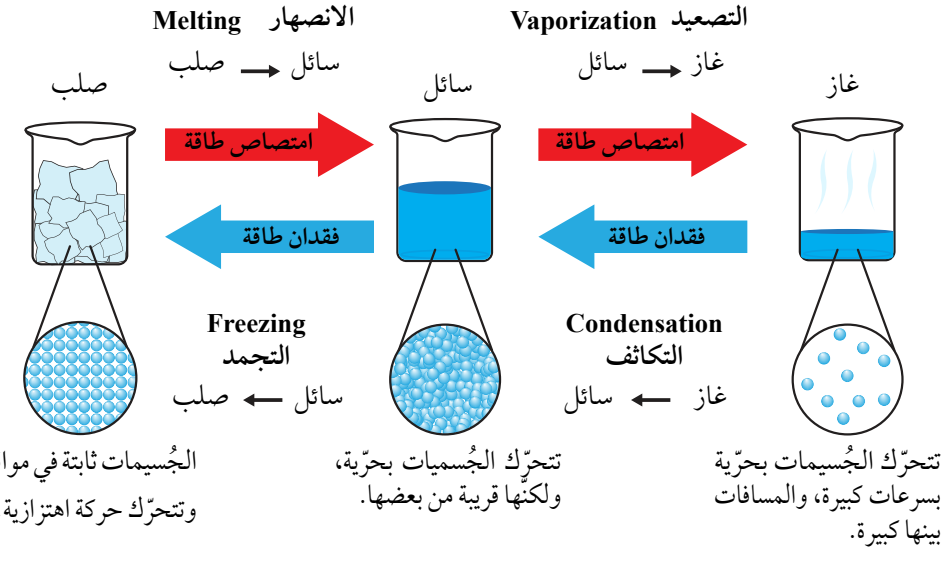
ب. السعة الحرارية النوعية لمادّة القالب.

حالات المادّة States of Matter

تُصنّف الموادّ حسب حالتها الفيزيائية إلى: صلبة، أو سائلة، أو غازية. تُسمّى هذه الحالات الثلاث الحالات الفيزيائية للمادّة، وهي الحالات الفيزيائية الأكثر شيوعًا للمادّة. وقد تعرّفتُ خصائص كلّ منها عند دراسة نموذج الحركة الجزيئية في بداية الدرس. يوجد حالة فيزيائية رابعة للمادّة تُسمّى البلازما (Plasma)، عند درجات الحرارة العالية جدًّا فقط؛ لذا، لن ندرسها هنا، على الرغم من أنّ معظم المادّة في الكون ومعظم النجوم مكوّنة من البلازما.

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 من حالة فيزيائية إلى حالة أُخرى، يُشار إلى هذا التغيّر عادة باسم تغيّر الحالة الفيزيائية Phase change، أنظرُ إلى 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 التغييرات 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

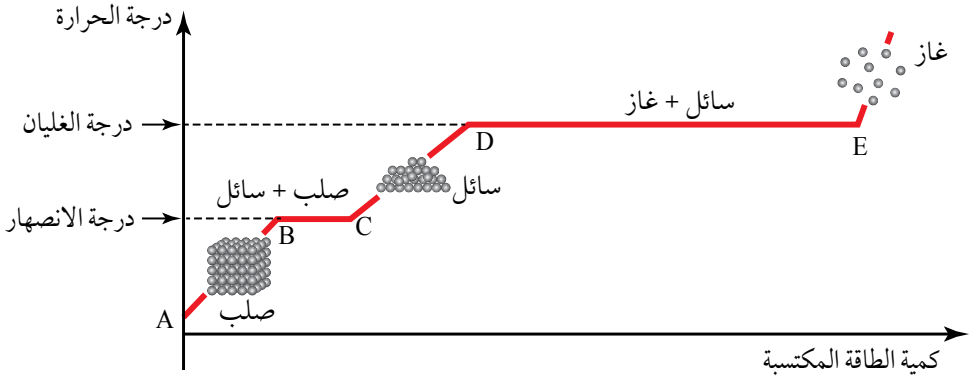
عند تزويد مادّة صلبة بالطاقة؛ ترتفع درجة حرارتها حتّى تصل إلى درجة حرارة محدّدة تثبت عندها، على الرغم من استمرار تزويدها بالطاقة، وأُلاحظ أنّ الحالة الفيزيائية للمادّة الصلبة تبدأ في التغيّر وتتحوّل إلى الحالة السائلة عند درجة الحرارة نفسها. تُسمّى درجة الحرارة التي تتغيّر عندها الحالة الفيزيائية للمادّة 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.

أُفكّر: عند درجة تجمّد الماء أو درجة انصهاره (درجة حرارة 0°C)، يوجد الماء في حالتية الصلبة والسائلة معًا. إذا أضفتُ (20 g) من الجليد عند درجة حرارة (0°C) إلى كأس عصير، فسيكون له تأثير تبريد على 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، كما يوضّح 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، كما أُلاحظ 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 عن بعضها. 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. تُسمّى درجة الحرارة التي تتغيّر عندها الحالة الفيزيائية للمادّة من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية

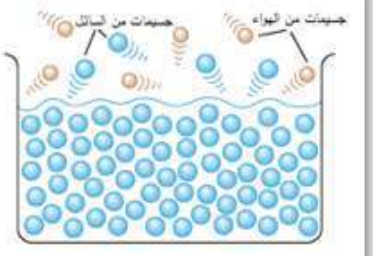
أُصمّم باستخدام برنامج السكراتش (Scratch) عرضًا يوضّح كيفية تغيّر حالة المادّة عند تزويدها بالطاقة مستعينًا بالشكل (10).

درجة الغليان Poiling point، وهي خاصّية فيزيائية للمادّة النقية، تتغيّر من مادّة إلى أُخرى حسب قوة الترابط بين جُسيماتها. أما 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 أعرفُ 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 جزيئاتها. 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 الحرارية التي تُزوّد للسائل في أثناء غليانه في كسر قوى الترابط بين الجزيئات التي تُبقي جزيئات السائل 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 عن ضغط الغلاف الجوي، بحيث تمكّن الجسيمات من مغادرة سطح السائل، أنظرُ إلى الشكل (11)؛ لذا، فإنّ كمية الطاقة اللازمة لتبخير كتلة محدّدة من مادّة ما، أكبر من كمّية الطاقة اللازمة لصهر الكتلة نفسها من المادّة نفسها.



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

تسمّى 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، كما 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 عن بعضها. وبعد تبخر المادّة السائلة كاملة 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 نقية عند درجة انصهارها؛ بالعلاقة الآتية: $Q_{\text{fusion}} = \pm mL_{\text{f}}$.

كما يُعبّر عن كمّية الطاقة اللازمة لتبخير (تصعيد) ($Q_{\text{vaporization}}$) كتلة (m) من مادّة سائلة نقية 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

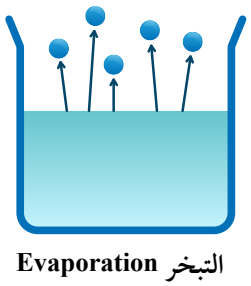
أتحقّق: ماذا أعني بقولي إنّ الحرارة النوعية الكامنة لتصعيد الرصاص (8.70×10^5 J/kg)؟

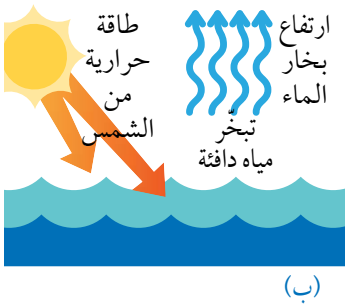
التبخّر والغليان Evaporation and Poiling

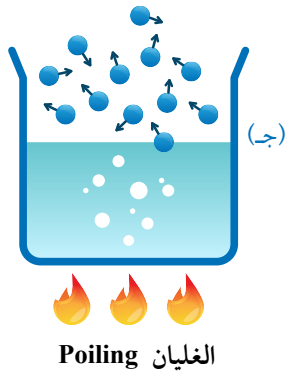
يخلط بعض الطلبة بين مفهومَي التبخّر والغليان؛ إذ يوجد فرق بينهما على الرغم من أنّهما يُمثّلان تغيّر حالة المادّة من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية، إلّا أنّ التبخّر Evaporation يحدث عند درجات الحرارة جميعها، وهي عملية بطيئة تحدث للجزيئات الموجودة على سطح السائل كونها أقلّ ارتباطًا ببقية جزيئات السائل مقارنة بارتباط الجزيئات داخل السائل؛ فعندما يمتلك الجزيء طاقة حركية كافية تكون عادة أكبر من متوسّط الطاقة الحركية لبقية جزيئات السائل فإنّه يتبخّر، أنظرُ إلى 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 إلى الشكل (12/ ب). أمّا الغليان Poiling فهو عملية تبخّر سريعة تحدث عندما يساوي ضغط البخار الضغط الجوي، وهي تحدث عند درجة حرارة محدّدة وهي درجة الغليان؛ إذ تمتلك جزيئات السائل طاقة كافية لمغادرة السائل بكمّيات كبيرة بما فيها الجزيئات داخلة، 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 ثم، تتحوّل إلى الحالة الغازية، وتخرج من السائل على شكل فقاعات. أنظرُ إلى الشكل (12/ جـ).

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







الشكل (12):
(أ) تبخّر الجزيئات التي على سطح السائل.
(ب) تبخّر جزيئات الماء من السطح بفعل التسخين الحراري من الشمس.
(جـ) تبخّر الجزيئات 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 أمام طلبة 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 كما يأتي:

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

بما 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 كما يأتي:

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

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

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

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:

$$Q_1 = Q_{\text{cooling}} + Q_{\text{condensation}}$$
$$= -3.015 \times 10^5 + (-1.13 \times 10^7)$$
$$= -1.16015 \times 107 \text{ J}$$

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

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

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 كما يأتي:

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

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

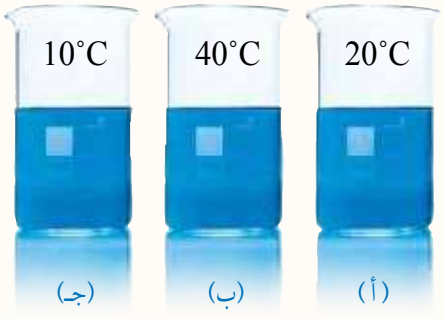
1. **الفكرة الرئيسة:** ما المقصود بدرجة الحرارة؟ ما الفرق بينها وبين الطاقة الحرارية؟

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 إيجابيّات استخدام مادّة صلبة ذات سَعة حرارية نوعية كبيرة في هذا التصميم للمدفأة وسلبيّاتها.

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 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، كما 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. بينما 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.
- أستنتجُ القانون الصفري في الديناميكا الحرارية.
- 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:

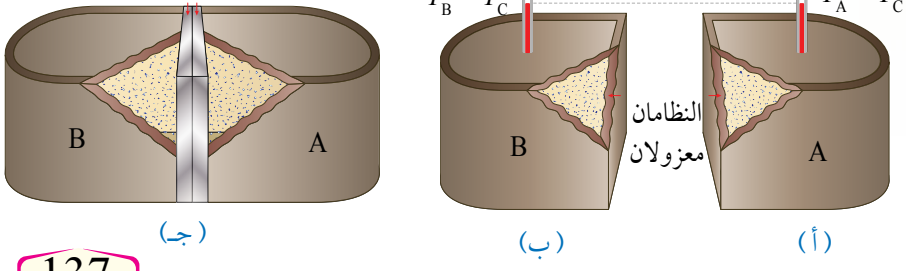
القانون الصفري في الديناميكا الحرارية
The Zeroth Law of Thermodynamics
الطاقة الداخلية Internal Energy
القانون الأول في الديناميكا الحرارية
The First Law of Thermodynamics
القانون الثاني في الديناميكا الحرارية
The Second Law of Thermodynamics

القانون الصفري في الديناميكا الحرارية
The Zeroth Law of Thermodynamics

درستُ سابقًا أنّه عند حدوث اتّصال حراري بين جسمين أو نظامين مختلفين في درجتَي حرارتيهما؛ فإنّ الطاقة تنتقل على شكل حرارة من الجسم الأعلى درجة حرارة إلى الجسم الأدنى درجة حرارة، حتى يُصبح لهما درجة الحرارة نفسها، وعندها يصبحان في حالة اتّزان حراري؛ إذ يتساوى معدلا انتقال الطاقة بين الجسمين؛ أي يكون مجموع الطاقة المنتقلة بينهما صفرًا خلال الفترة الزمنية نفسها.

يوضّح الشكل (14) ثلاثة أجسام: A وB وC. أُلاحظ أنّه لا يوجد اتّصال حراري بين الجسمين A وB في الشكلين (14/ أ) و(14/ ب)، ويُمثّل الجسم C فيهما مقياس درجة الحرارة. وأرغب في تحديد هل الجسمان A وB في حالة اتّزان حراري مع بعضهما أم لا؟

من أجل ذلك، أضع الجسم C في حالة اتّصال حراري مع الجسم A حتّى يصلا إلى الاتّزان الحراري، وأُدوّن درجة الحرارة T_C عند الاتّزان، كما هو موضّح في الشكل (14/ أ)، حيث $T_A = T_C$. ثم أُبعد الجسم C عن الجسم A وأضعه في حالة اتّصال حراري مع الجسم B، كما هو موضّح في الشكل (14/ ب)، ثم أُدوّن درجة الحرارة T'_C عند وصول النظام المكوّن من الجسمين إلى الاتّزان الحراري، حيث $T_B = T'_C$.



الشكل (14):
أ. الجسمان A وC في حالة اتّزان حراري.
ب. الجسمان B وC في حالة اتّزان حراري.
جـ. الجسمان A وB في حالة اتّزان حراري.

إذا كانت درجتا الحرارة $T_C = T_C'$ فأستنتجُ أنّ الجسمين A وB في حالة اتّزان حراري؛ أي إنّ $T_A = T_B$، وذلك بإهمال الطاقة المنتقلة بين كلّ من الجسمين A وB ومقياس درجة الحرارة (الجسم C) بوصفها صغيرة جدًّا ولا تؤثّر في القياسات. تُسمّى النتيجة السابقة – التي يُمكن تسميتها المسلّمة – **القانون الصفري في الديناميكا الحرارية (قانون الاتّزان)** **The Zeroth law of thermodynamics** الذي ينصّ على ما يأتي: "إذا وُجِد جسمان A وB منفصلان، وكلّ منهما في حالة اتّزان حراري مع جسم ثالث C؛ فإنّ الجسمين A وBسيكونان في حالة اتّزان حراري مع بعضهما عند اتصالهما حراريًّا". وقد سُمّي هذا الاسم لأنّ العلماء أدركوا بعد وضعهم القانونين الأول والثاني في الديناميكا الحرارية، أنّ هذه المسلّمة يجب صياغتها أوّلًا على شكل قانون.

تكمن أهمّية القانون الصفري في تقديمه تعريفًا لدرجة الحرارة، فحسب هذا القانون تُعرّف درجة الحرارة بأنّها خاصّية الجسم (النظام) التي تحدّد إذا كان الجسم في حالة اتّزان حراري مع أجسام أُخرى. فإذا كان جسمان في حالة اتّزان حراري مع بعضهما فيكون لهما درجة الحرارة نفسها، أمّا إذا كانت درجتا حرارتيهما مختلفتين، فلا يكونان في حالة اتّزان حراري مع بعضهما. أضف إلى ذلك، أنّ درجة الحرارة هي التي تُحدّد إذا كانت الطاقة ستنتقل بين جسمين في حالة اتّصال حراري أم لا.

أتحقّق: عدّة أنظمة معزولة حراريًّا: A, B, C, D. إذا علمتُ أنّ: $T_A = T_D$، و $T_A > T_C$، و $T_D = T_B$، فأُحدّد ثلاثة أنظمة تكون في حالة اتّزان حراري عند اتصالها حراريًّا.

أُصمّم باستخدام برنامج السكراتش (Scratch) عرضًا يوضّح القانون الصفري في الديناميكا الحرارية لعدّة أنظمة حرارية، ويوضّح أيّ هذه الأنظمة تكون في حالة اتّزان حراري معًا.

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.

يعنى القانون الأوّل في الديناميكا الحرارية بوصف الأنظمة التي يكون فيها تغيّر في الطاقة الداخلية فقط، وتُنقل الطاقة فيها عن طريق الحرارة أو الشغل أو الاثنين معًا؛ لذا يلزمني تعرّف الطاقة الداخلية، والعلاقة بين الشغل والحرارة، والعمليات الحرارية Thermodynamic processes، للتوصّل إلى هذا القانون وفهمه.

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 لجزيئاته، والناتجة عن حركتها الانتقالية والدورانية والاهتزازية، ولا ترتبط بحركة النظام الانتقالية؛ فمثلًا، الطاقة الداخلية لكرة قدم تُحلّق في الهواء ترتبط بالطاقة الحركية للجزيئات المكوّنة لها ولجُسيمات الهواء داخلها ولا علاقة لها بحركة الكرة. أمّا الطاقة الكامنة فجزء منها مختزن في الروابط الكيميائية التي تربط الذرات معًا لتكوين الجزيئات، والجزء الآخر مختزن على شكل طاقة وضع كهربائية مرتبطة بالقوى بين الجزيئات.

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 تقلّ المسافة بين جزيئاته، 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؟

العلاقات بين الحرارة والشغل والطاقة الداخلية

Relationships between 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 نتيجة زيادة في القوى التي تربط هذه الجُسيمات، أو ازدياد كلاهما معًا.

العلاقة بين الحرارة والطاقة الداخلية

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، كما هو موضّح في الشكل (15/ 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

(أ)

(ب)

الشكل (15):
(أ) زيادة الطاقة الداخلية ليديّ بتزويدهما بالطاقة.
(ب) أو عن طريق بذل شغل عليهما.

تغيّر حالته الفيزيائية. وتقلّ الطاقة الداخلية لجسم أو نظام عند فقده طاقة حرارية؛ إذ تفقد الأجسام طاقة إذا كانت درجة المحيط الخارجي أقلّ من درجة حرارتها.

العلاقة بين الشغل والطاقة الداخلية

كما يمكن 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 إلى الشكل (15/ ب). وهذا يزيد من الطاقة الداخلية في يديّ، ما يرفع درجة حرارتهما. كما يمكن تقليل الطاقة الداخلية لجسم أو نظام عن طريق بذله شغل. أسألُ: كيف يبذل الجسم شغلًا؟ أحيانًا أرى أسطوانة تحتوي على غاز مُسال، ويوجد جليد على جدارها الخارجي، كما هو موضّح في الشكل (16). 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.

الشكل (16): 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؟

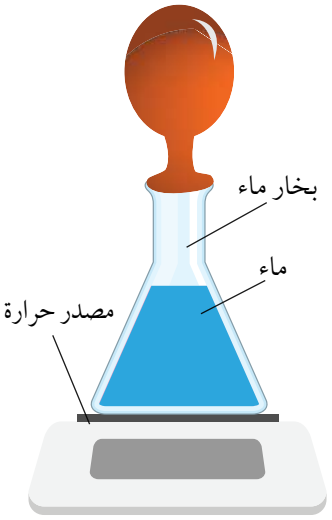
العلاقة بين الشغل والحرارة

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، كما يحدث عند ثني قطعة فلزّية. كذلك يُمكن للحرارة أن تؤدّي إلى بذل شغل؛ فقد لاحظتُ في الشكل (16) أنّ جزيئات السائل التي على السطح تكتسب طاقة منه فتتبخّر، وتبذل جزيئات 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، كما هو موضّح في الشكل (17) 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 شغل، 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 (17): تحوّل الطاقة المنتقلة على شكل حرارة الماء إلى بخار، فيبذل البخار شغلًا على الهواء الموجود خارج البالون في أثناء تمدّده.

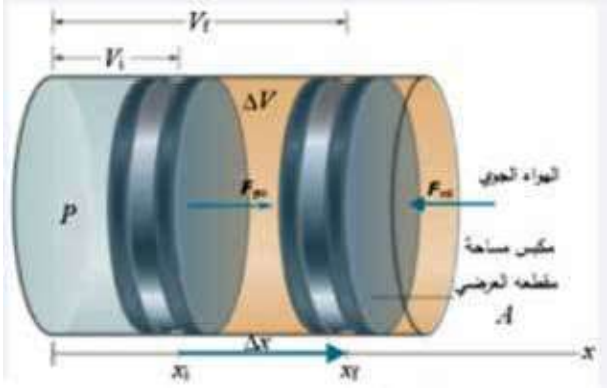
الشغل المبذول عند تغيّر حجم الغاز

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 (18) 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 لجزيئاته، فتؤثّر بقوّة إضافية في المكبس، الذي يستجيب لذلك بالحركة نحو اليمين.



الشكل (18): 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 عن 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 يُعطى الشغل المبذول على الغاز بالعلاقة:

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

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

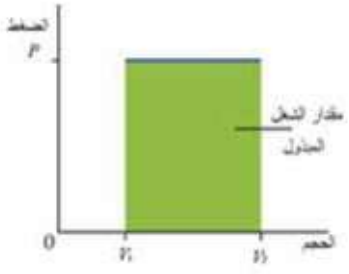
$$W = -PA\,\Delta x$$

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

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

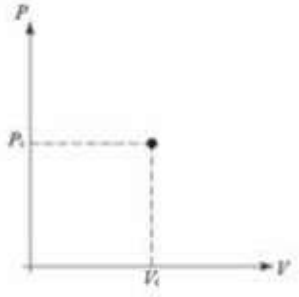
فعندما يتمدّد الغاز، يزداد حجمه، فتكون $\Delta V > 0$؛ لذا، فإنّ الشغل المبذول عليه $W < 0$. أمّا عندما يقلّ حجم الغاز فتكون $\Delta V < 0$؛ لذا، فإنّ الشغل المبذول عليه $W > 0$. أمّا الشغل الذي يبذله الغاز على محيطه الخارجي (W_{gas}) فيكون مساويًا لسالب الشغل الذي يبذله المحيط الخارجي على الغاز؛ أي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

يوضّح الشكل (19) 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 (19): 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.

أيضًا، يُمكنني 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 (18). إنّ الضغط الابتدائي للغاز المحصور (P_i)، وحجمه الابتدائي (V_i)، ويُمكنني تمثيلهما بنقطة على منحنى (الضغط – الحجم)، التي تمثّل الحالة الابتدائية للنظام، كما هو موضّح في الشكل (20).



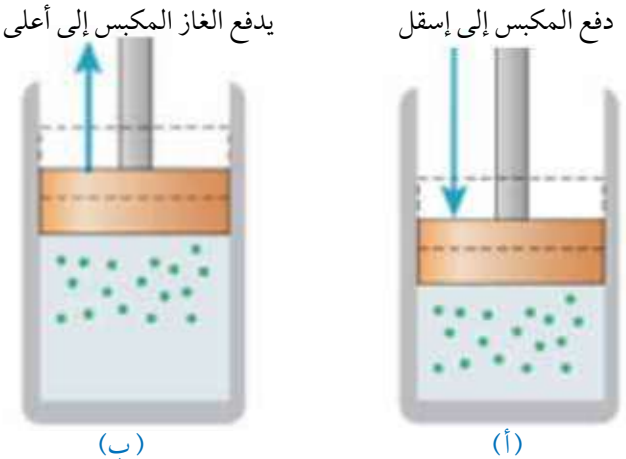
الشكل (20): منحنى (الضغط – الحجم) لغاز محصور في أسطوانة.

عندما أدفع مكبس الأسطوانة إلى الداخل، يقلّ حجم الغاز ويزداد ضغطه (ما لم يجرِ تبريده)، كما هو موضّح في الشكل (21/ 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، كما هو موضّح في الشكل (21/ 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)، كما هو موضح في الشكل (22).

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



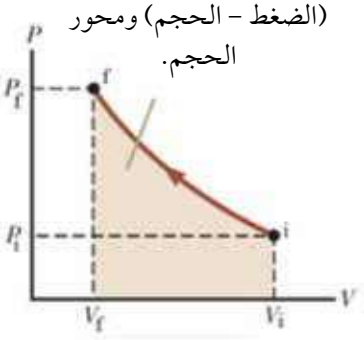
الشكل (21):
(أ) يقلّ حجم الغاز المحصور في أسطوانة عند بذل شغل عليه.
(ب) يزداد حجم الغاز المحصور في أسطوانة عند بذله شغلًا.

الشغل المبذول عند ضغط غاز يعتمد على المسار

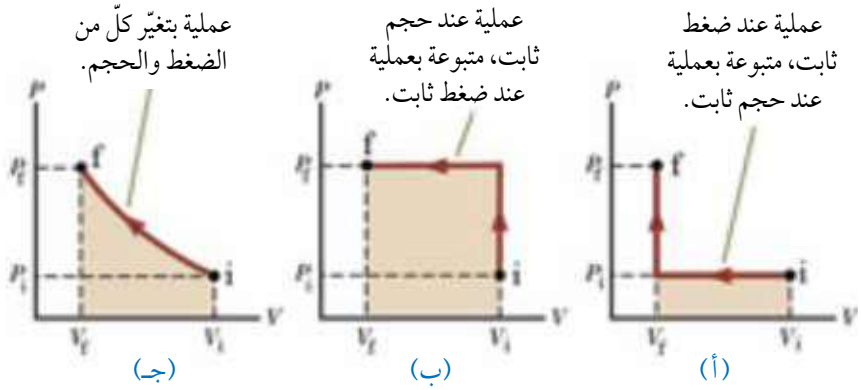
أُلاحظ من الشكل (22) أنّ الشغل المبذول في عملية ضغط غاز في أسطوانة يعتمد على المسار الذي يسلكه الغاز بين الحالتين: الابتدائية، والنهائية. ولتوضيح ذلك، أنظرُ إلى المسارات المختلفة التي يمكن سلوكها بين الحالتين: (i) و (f) في الشكل (23). في العملية الموضّحة في الشكل (23/ أ)، يُقلّل حجم الغاز أوّلًا من (V_i) 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 (23/ 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 (23/ 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، معرفة الاقتران $P(V)$؛ الذي يُبيّن تغيّر الضغط بدلالة الحجم، ومعرفة 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.

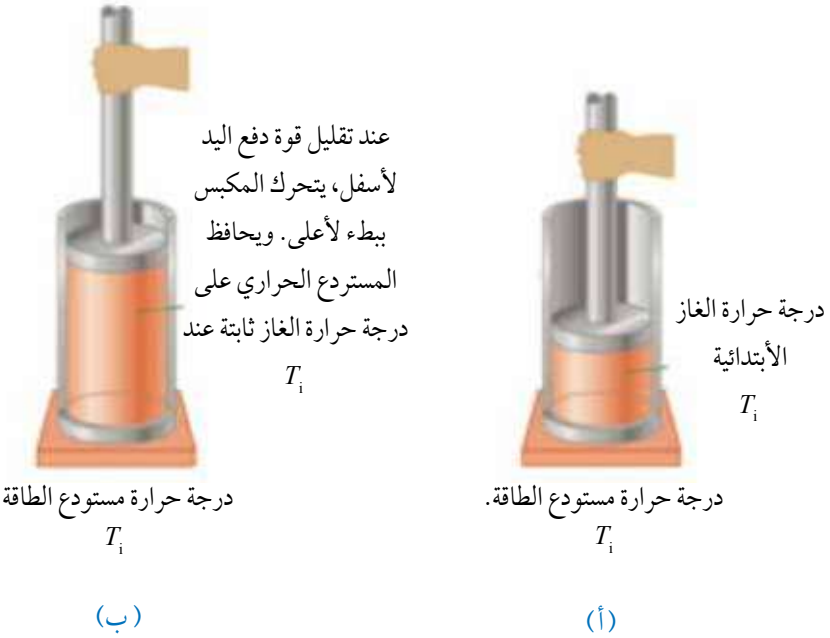


الشكل (23): منحنى (الضغط – الحجم) لعملية ضغط غاز ببطء من الحالة (i) إلى الحالة (f).



الشكل (23): يعتمد الشغل المبذول على غاز بين الحالتين: الابتدائية (i) والنهائية (f) على المسار الذي يسلكه الغاز بينهما.

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



الشكل (24):
(أ) اتصال حراري بين قاعدة الأسطوانة ومستودع الطاقة.
(ب) يتمدّد الغاز المحصور ويزداد حجمه.

الطاقة المتبادلة مع نظام تعتمد على المسار

يعتمد مقدار الطاقة (Q) التي يكتسبها نظام أو يفقدها أيضًا، على المسار الذي يسلكه النظام بين حالتيه: الابتدائية والنهائية. يوضّح الشكلان (25 - 24) غازًا مثاليًّا محصورًا داخل أسطوانة، ويكون للغاز في الشكلين مقادير الحجم الابتدائي ودرجة الحرارة والضغط نفسها. في الشكل (24/ أ)، الغاز معزول حراريًّا عن المحيط الخارجي باستثناء الجزء السفلي منه، الذي يكون في حالة اتّصال حراري مع مستودع 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) كما هو موضّح في الشكل (24/ 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 (25/ 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 (25/ ب) هذه الحالة النهائية للغاز. وأُلاحظ في هذه العملية أنّ الغاز لا يبذل شغلًا؛ لأنّه لا يؤثر بقوّة، فلا 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 (25)؛ لذا، فإنّ الحالتين الابتدائية والنهائية للغاز المثالي في الشكل (24) مماثلة تمامًا للحالتين الابتدائية والنهائية في الشكل (25) لكنّ المسارين مختلفان. في الحالة الأولى، يبذل الغاز شغلًا على المكبس، وتنتقل الطاقة ببطء إلى الغاز على شكل حرارة. 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، كما 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 كلّ 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 (25):
(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 مع الحياة

يوضّح الشكل (26) 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. وبما 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 (26): 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

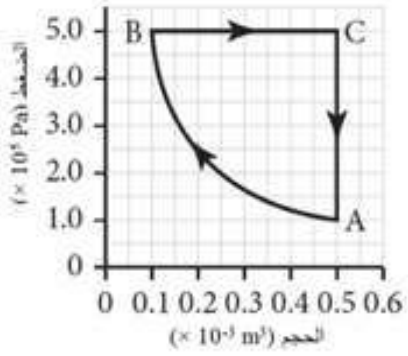
يوضّح الشكل (27) منحنى (الضغط-الحجم) لعيّنة من غاز محصور في أثناء مروره بدورة تغيّرات ABCA. أُجيب عمّا يأتي:

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 (27): 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.

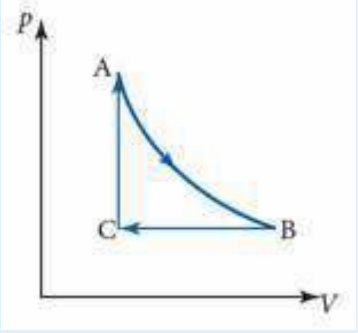
ب. قوّة ضغط الغاز المؤثّرة في المكبس في أثناء تمدّد الغاز إذا تحرّك المكبس إزاحة مقدارها (5.6 cm).

2. **أُحلّل:** يوضّح الشكل (28) 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 شغلًا؟



الشكل (28): 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 مرة. فإذا كانت الحرارة مائع، فإنّ المائع سيتدفّق كاملًا من الفلزّ في النهاية، ما يعني أنّه لن يصبح ساخنًا عند حفره.

اهتم العالم جول بعمل العالم رامفورد، حيث كان جول أول شخص بيّن أنّه يمكن تحويل الشغل الميكانيكي إلى حرارة. فقد صمم 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. أدّى 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 بوساطة قوّة خارجية، ويُعدّ هذا القانون نتاج تطبيق قانون حفظ الطاقة على نظام حراري، 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، بينما 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. تُزوّد 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 Thermodynamics 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؛ أي لا يتفاعل فيزيائيًّا مع المحيط الخارجي؛ فإنّه لا يحدث تبادل حراري 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 لمدّة (3 s)، بحيث 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. 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 (العلبة والغاز المحصور فيها) 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 إلى الشكل (29).

الشكل (29): تنخفض الطاقة الداخلية للهواء في البالون والأسطوانة مع تمدّده السريع؛ إذ يبذل الهواء شغلًا على المحيط الخارجي في أثناء تمدّد البالون.

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.

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 (30) بجعل المكبس حرّ الحركة، بحيث 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 (23/ أ)، والعملية الثانية في الشكل (23/ ب).

الشكل (30): القانون الأوّل في الديناميكا الحرارية؛ $\Delta U = Q + W$.

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. ويُعطى 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.

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 (30)، يضمن حدوث هذه العملية. ومن الأمثلة على العمليّات عند حجم ثابت العملية الثانية في الشكل (23/ أ)، والعملية الأولى في الشكل (23/ 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 كلّ الطاقة المنتقلة 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

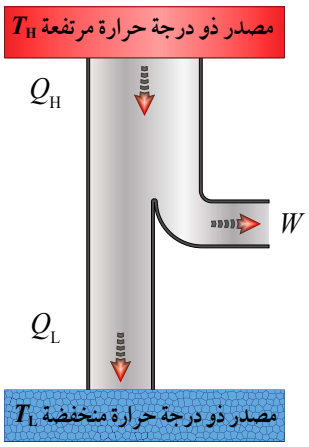
العملية عند درجة حرارة ثابتة Isothermal process هي عملية حرارية تحدث عند ثبات درجة الحرارة. ويمكن تنفيذ هذه العملية عن طريق غمر الأسطوانة الموضّحة في الشكل (30) في حمّام ماء وجليد، أو عن طريق وضع الأسطوانة في حالة اتّصال حراري مع مستودع طاقة ذي درجة حرارة ثابتة. ولاحظتُ هذه العملية في الخطوة (6) من التجربة 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.

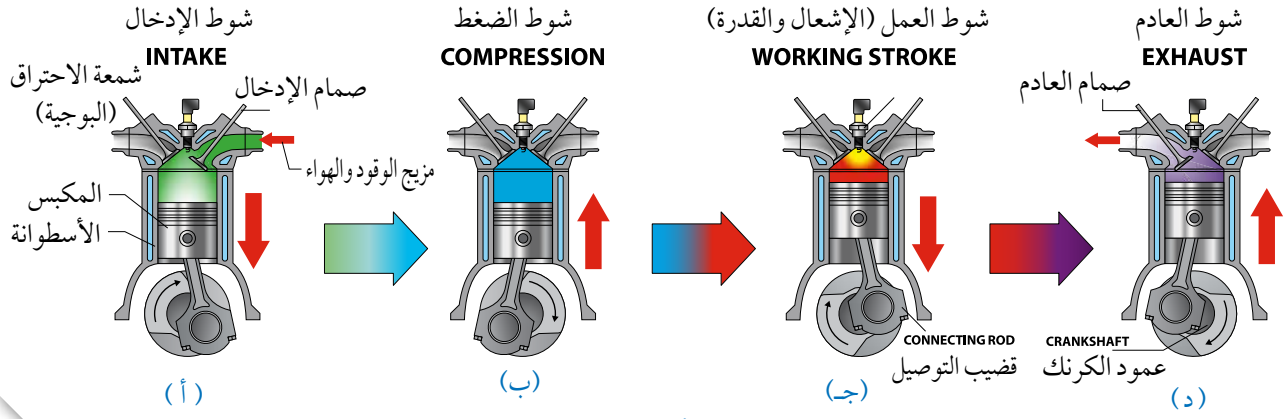
تطبيق: محرّك الاحتراق الداخلي Internal combustion engine

يُعدّ محرّك الاحتراق الداخلي Internal combustion engine الموجود في معظم المركبات مثالًا على الآلات الحرارية؛ إذ يعمل على تحويل الحرارة إلى شغل ميكانيكي. كما يُعدّ 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)، وتحوّل جزء منها إلى شغل ميكانيكي مفيد، وتُصرّف جزء منها (Q_L) إلى مستودع حراري ذي درجة حرارة منخفضة (T_L). أنظرُ إلى الشكل (31) الذي يوضّح رسمًا تخطيطيًّا لمحرّك حراري، ويكون مقدار مجموع الشغل المبذول مساويًا الفرق بين الطاقة المكتسبة من المصدر الحراري والطاقة المُصرّفة إلى المستودع الحراري؛ أي إنّ ($W = Q_H - Q_L$).



الشكل (31): محرّك حراري.

يوضّح الشكل (32) خطوات دورة كاملة من دورات محرّك بنزين ذي أربعة مراحل. ويوضّح الشكل (32/ 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،



الشكل (32): مراحل (أشواط) دورة كاملة لمحرّك بنزين.

كما هو موضّح في الشكل (32/ 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، كما هو موضّح في الشكل (32/ 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 يعمل على تحويل الحركة الخطّية للمكابس إلى حركة دورانية للإطارت 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، كما هو موضّح في الشكل (32/ 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 أمام طلبة 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.

$$\Delta U = Q + W$$

$$Q = \Delta U - W$$

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

$$= 25\ J$$

بما 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.

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

بما 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

1. 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؟

2. 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 ($2.2^{5} \times 10^{5}$ Pa)؛ فما مقدار الشغل المبذول على الغاز؟

القانون الثاني في الديناميكا الحرارية
The Second Law of Thermodynamics

يبيّن القانون الأوّل في الديناميكا الحرارية أنّ التغيّر في الطاقة الداخلية لنظام يمكن أن يحدث نتيجة انتقال الطاقة عن طريق الحرارة أو الشغل أو كليهما، وهو لا يُمانع تحوّل الطاقة المكتسبة كاملة إلى شغل. فمثلًا، لا يُمانع القانون الأوّل في الديناميكا الحرارية تصميم محرّك حراري (آلة تعمل بطريقة دورية) يكتسب الطاقة عن طريق الحرارة، ويطرد كمّية مساوية من الطاقة عن طريق بذله شغلًا. إضافة إلى ذلك، فقد درستُ أنّ القانون الأول في الديناميكا الحرارية يُعدّ تعبيرًا عن حفظ الطاقة، وهو لا يُميّز بين العمليّات التي تحدث تلقائيًّا، والعمليّات التي لا تحدث تلقائيًّا؛ إذ إنّ أنواعًا معينة فقط من عمليات تحويل الطاقة وعمليات نقلها تحدث في الطبيعة، على الرغم من وجود عمليّات كثيرة تكون الطاقة محفوظة فيها ولكنها لا تحدث في الطبيعة.

أمّا القانون الثاني في الديناميكا الحرارية فيُشير إلى أنه يستحيل تصميم محرّك حراري يكتسب الطاقة عن طريق الحرارة، ويطرد كمّية مساوية من الطاقة عن طريق بذله شغلًا، كما أنّه يُحدّد العمليّات التي تحدث تلقائيًّا، والعمليات التي لا تحدث تلقائيًّا. ومن الأمثلة على العمليات التي لا تتناقض مع القانون الأول في الديناميكا الحرارية إذا حدثت في أيّ من الاتجاهين، ولكنّها تحدث تلقائيًّا في الطبيعة في اتّجاه واحد فقط: أنّه عندما أضع جسمين مختلفين في درجة الحرارة في حالة اتّصال حراري معًا؛ فإنّ صافي الطاقة المنتقلة على شكل حرارة يكون دائمًا من الجسم الأعلى درجة حرارة إلى الجسم الأدنى درجة حرارة، ولن يحدث العكس تلقائيًّا، على الرغم من تحقّق قانون حفظ الطاقة فيها لو حدثت. وتُسمّى عملية غير عكسية؛ وهي العملية التي تحدث بشكل طبيعي في اتّجاه واحد فقط، وحدوثها في الاتّجاهين يتناقض مع القانون الثاني في الديناميكا الحرارية. إذن: يوضّح **القانون الثاني في الديناميكا الحرارية The second law of thermodynamics** العمليّات التي تحدث تلقائيًّا في الطبيعة والعمليات التي لا يمكن أن

تحدث تلقائيًّا، وقد صاغ العالم كلاوسياس Clausius هذه العبارة كما يأتي: "تنتقل الطاقة تلقائيًّا من الجسم الأعلى درجة حرارة إلى الجسم الأدنى درجة حرارة، ولا يُمكن أن تنتقل تلقائيًّا في الاتّجاه المعاكس".

كما تكمن أهمّية القانون الثاني في الديناميكا الحرارية، في إشارته إلى محدودية كفاءة المحرّكات الحرارية، وبالاستعانة بالشكل (31)، أُعرِّف كفاءة (*e*) Efficiency محرّك حراري بأنّها تساوي النسبة المئوية لصافي الشغل الذي يبذله المحرّك خلال دورة واحدة ($W = Q_H - Q_L$) إلى الطاقة المُدخلة إليه من المصدر الحراري ذي درجة الحرارة المرتفعة (Q_H) خلال الدورة نفسها:

$$e = \frac{W}{Q_H} \times 100\% = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} \times 100\%$$

عمليًّا، تُحوّل المحرّكات الحرارية جميعها جزءًا بسيطًا فقط من الطاقة المُدخلة (Q_H) إلى شغل ميكانيكي؛ لذا، تكون كفاءتها دائمًا أقلّ من 100%. فمثلًا، كفاءة محرك البنزين تُقارب 20%، بينما تتراوح كفاءة محرّكات الديزل من 35% إلى 40%.

أيضًا، توضّح المعادلة السابقة أنّ كفاءة المحرّك الحراري تساوي 100% فقط إذا كانت $Q_L = 0$؛ أي إنّه لا توجد طاقة تُطرد إلى مستودع الطاقة البارد، ويكون المحرّك الحراري مثاليًّا في هذه الحالة. ونظرًا لأنّ كفاءة المحرّكات الحقيقية أقلّ بكثير من 100%؛ فإنّ نموذج كلفن بلانك للقانون الثاني في الديناميكا الحرارية ينصّ على ما يأتي: "من المستحيل بناء محرّك حراري يعمل بطريقة دورية، يكون تأثيره الوحيد اكتساب الطاقة من مستودع طاقة، وتحويلها كاملة إلى شغل".

أستنتجُ ممّا سبق، أنّه في أثناء تشغيل محرّك حراري، لا يمكن أن يكون W مساويًا لـ Q_H، وأنّ بعض الطاقة Q_L يجب طرحه إلى المحيط الخارجي.

✓ **أتحقّق:** علامَ ينصّ القانون الثاني في الديناميكا الحرارية؟

التلوّث الحراري

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 بوساطة المياه أو الهواء. وعند طرح مياه التبريد الحارّة في البحار والبحيرات؛ فإنّها تعمل على رفع درجة حرارة هذه المياه والإخلال 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 تعمل على رفع درجة حرارة الغلاف الجوي الذي يؤثّر بدوره في المناخ. أيضًا، يؤدّي 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. **أُفسّر:** حسب القانون الثاني في الديناميكا الحرارية، لماذا لا تصل كفاءة المحرك الحراري إلى نسب مرتفعة قريبة من 90%؟ أُفسّر إجابتي.

6. **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.

7. **أُصدرُ حُكمًا:** في أثناء دراسة سيف هذا الدرس، قال: "يمكن صناعة محرّك يحوّل كامل الطاقة الحرارية إلى طاقة حركية حسب القانون الأول في الديناميكا الحرارية". أُناقش صحّة قول سيف.

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 للموادّ الصلبة
Coefficient of Linear Expansion of Solids

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 إلى الشكل (33/ أ). وقد يؤدّي إهمال تمدّد الأجسام إلى حدوث أضرار كبيرة، أنظرُ إلى الشكل (33/ ب).

الشكل (33):
أ. يعتمد مبدأ عمل مقياس درجة الحرارة على تمدّد السائل المستخدم فيه وتقلّصه بتغيّر درجة الحرارة.
ب. سبّبت درجات الحرارة المرتفعة تقوّس مسارات سكة الحديد نتيجة تمدّدها.

تفسير التمدّد الحراري للمواد
Explaining Thermal Expansion of Materials

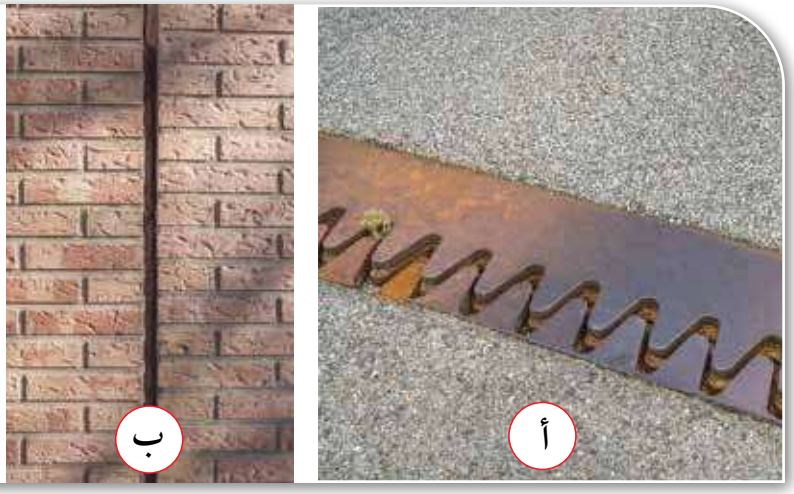
وفقًا لنموذج الحركة الجزيئية – الذي درستُه سابقًا – تتحرّك جُسيمات الموادّ الصلبة والسائلة حركة اهتزازية مستمرّة، إضافة إلى وجود حركة انتقالية لجُسيمات السوائل. وعند ارتفاع درجة حرارة هذه الموادّ يزداد مقدار سرعة جُسيماتها، فتتباعد بعضها قليلًا وتتمدّد. ويكون التمدّد الحراري للمواد السائلة أكبر منه للموادّ 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 وغيرها... للسماح لها بالتمدّد والتقلّص بحرّية عند تغيّر درجة الحرارة، من دون أن يؤدّي ذلك إلى تلفها أو انهيارها، أنظرُ إلى الشكل (34). تُسمّى الزيادة في طول سلك صلب رفيع عند رفع درجة حرارته التمدّد الطولي للموادّ الصلبة Thermal linear expansion of solids. تُظهر التجارب أنّ التغيّر في طول ساق أو سلك صلب رفيع (Δl) يتناسب طرديًّا مع التغيّر في درجة حرارته (ΔT)؛ فكلّما كان الارتفاع في درجة حرارته أكبر زاد مقدار التغيّر في طوله. كما يتناسب التمدّد

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



الشكل (34):
أ . يسمح فاصل التمدّد (الفراغ أو المادّة اللدّنة) في الجسر لمادّة الجسر وسطح الطريق، بالتمدّد في الأيام الشديدة الحرارة، والتقلّص في الأيام شديدة 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.

الطولي 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 ($1^\circ C$). 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 ($20^\circ C$).

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 لصغر معامل التمدّد الحراري يكون مقدار التمدّد صغيرًا.

أجد الطول النهائي لقضيب الفولاذ كما يأتي:

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

ب. أستخدمُ المعادلة السابقة نفسها لإيجاد مقدار التمدّد أو مقدار التقلّص. وبما أنّ الزيادة في طول قضيب الفولاذ كانت (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

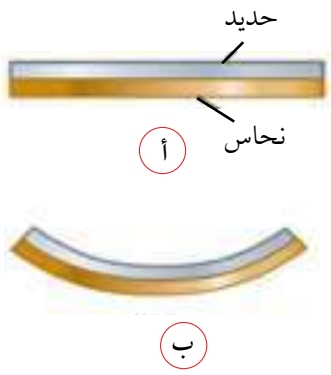
أحسبُ: مسطرة طولها (30 cm) مصنوعة من الفولاذ، تكون أكثر دقّة عند استخدامها عند درجة حرارة (20°C). بالاستعانة بالبيانات الواردة في الجدول (3)، أحسبُ مقدار طول المسطرة عند استخدامها عند درجة حرارة (35°C).

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

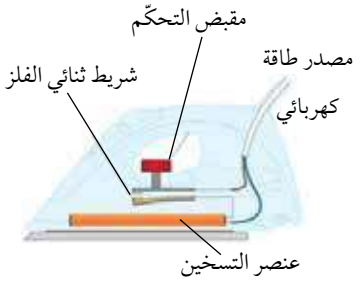
تطبيقات على التمدّد الطولي

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 إيجابيّات وسلبيّات. 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، وإلا 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 ومثبّتين معًا، يكون عادة من الحديد والنحاس، أنظرُ إلى الشكل (35/ أ). وعند تسخين الشريط يتمدّد النحاس بمقدار أكبر من تمدّد الحديد بسبب الاختلاف في معامل التمدّد الحراري الطولي للفلزّين، أنظرُ إلى الجدول (3)، وبما أنّ الشريطين مثبّتان معًا؛ فإنّ الشريط الثنائي الفلزّ ينحني نحو الحديد، بحيث يكون النحاس على السطح الخارجي للشريط، أنظرُ إلى الشكل (35/ ب). يُحافظ منظّم الحرارة على ثبات درجة حرارة الغرفة أو الجهاز الكهربائي المستخدم فيه. ويوضّح الشكل (36) 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 (35):
أ. شريط ثنائي الفلز من الحديد والنحاس بدرجة حرارة الغرفة.
ب. ينحني الشريط نحو الحديد عند تسخينه.



الشكل (36): يُستخدم الشريط الثنائي الفلزّ في منظّم الحرارة في المكواة الكهربائية.

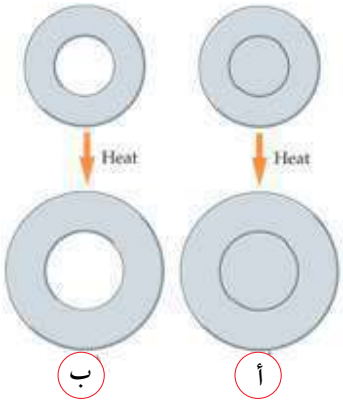
التمدّد الحراري السطحي Thermal Surface Expansion

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 إلى الشكل (37/ أ)، الذي يُبيّن تمدّد قرص فلزّي وازدياد نصف قطره عند رفع درجة حرارته بمقدار (ΔT)، بينما يُبيّن الشكل (37/ 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 فلزية رقيقة عند رفع درجة حرارتها؟

أبحثُ

يُستخدم الشريط الثنائي الفلزّ في منظّمات الحرارة في السخّانات الكهربائية. أبحثُ عن آليّة عمل منظّم الحرارة في السخّان الكهربائي ودور الشريط الثنائي الفلزّ في عمله، وأُعدّ عرضًا تقديميًّا أعرضه أمام طلبة الصفّ.

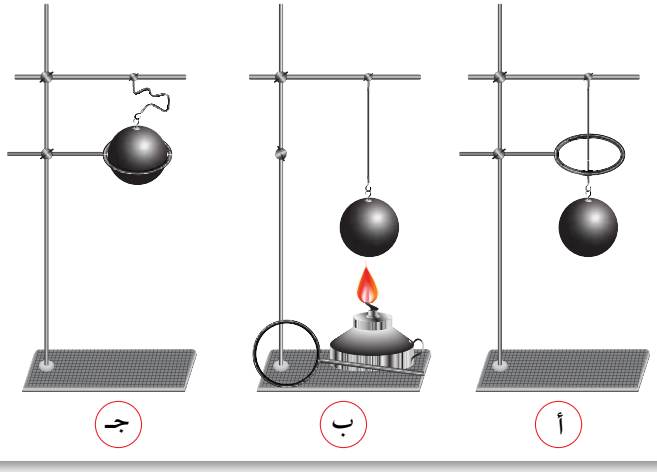


الشكل (37):
أ. يزداد نصف قطره القرص الفلزّي عند رفع درجة حرارته.
ب. يزداد نصف قطر التجويف عند رفع درجة حرارته.

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 (38) 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 (38):الشكل
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 مع الحياة

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... 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 كما هو موضّح في الشكل (40).

التمدّد الحراري الحجمي للسوائل

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

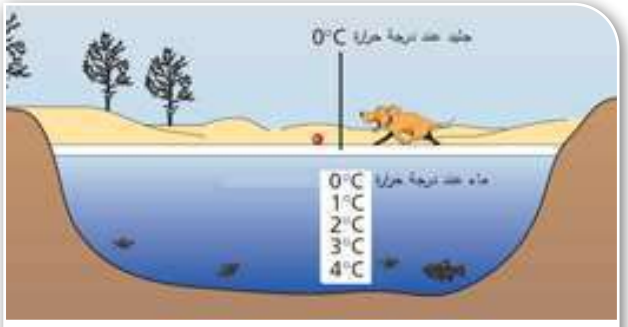
وعند تسخين أغلب السوائل يزداد حجمها وتقلّ كثافتها، حيث ($\rho = \frac{m}{V}$)، وعند تبريدها يقلّ حجمها فتزداد كثافتها. ويشذ عن هذا السلوك الماء بين درجتَي الحرارة (0°C) و (4°C).

شذوذ الماء

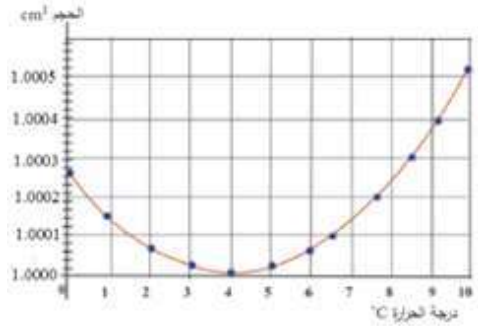
عند تبريد الماء إلى (4°C) فإنّه يتقلص، مشابهًا بذلك في سلوكه بقيّة السوائل. ولكن في أثناء تبريده من 4°C إلى 0°C فإنّه يتمدّد، مخالفًا بهذا السلوك سلوك بقية السوائل التي يقلّ حجمها باستمرار تبريدها حتّى تجمّدها. إذ يكون أقل حجم لكمّية من الماء (أكبر كثافة) عند (4°C). أنظرُ إلى الشكل (39). ويُطلق على سلوك 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، كما يُفسّر 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 (40): نتيجة شذوذ الماء؛ يتجمّد ماء البحيرة من أعلى إلى أسفل.



الشكل (39): عند تبريد الماء إلى ما دون (4°C) يزداد حجمه.

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 إناء زجاجيًّا مغلقًا بغطاء فلزّي. حاولت هدى فتح الغطاء الفلزّي لكنّها وجدت صعوبة في ذلك. بناءً على ما تعلمته في هذا الدرس أقترح طريقة على هدى تمكّنها من فتح الغطاء الفلزّي بسهولة. أُفسّر إجابتي.

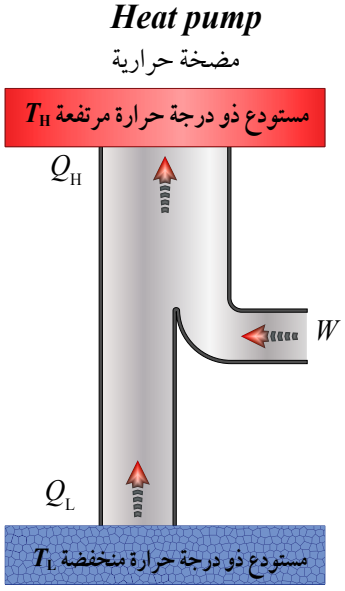
5 . **أُصدرُ حُكمًا:** في أثناء دراستي وزميلتي باسمة هذا الدرس، قالت: "يجب أن يكون معامل تمدّد مادّة حشو الأسنان أكبر من معامل تمدّد مينا الأسنان؛ كي تثبت الحشوة في السن ولا تسقط". أُناقش صحّة قول باسمة.

الثلّاجات Refrigerators

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

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)، كما هو موضّح 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 كاملًا إلى الحالة الغازية؛ إذ يدخل في الضاغط الذي يبذل شغلًا على الغاز فيُقلّل حجمه من دون حدوث أيّ تبادل حراري (عملية كاظمة)، بينما 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 ج)، 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.



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

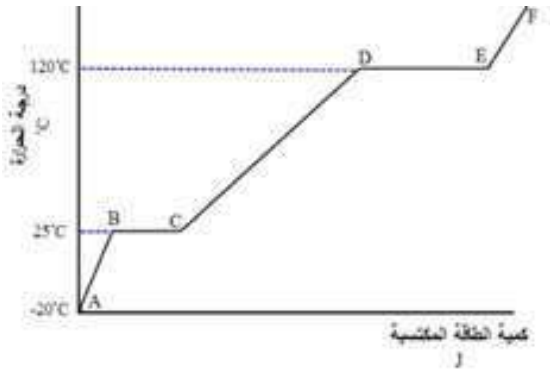
أبحث مستعينًا بمصادر المعرفة المناسبة، أبحثُ عن مبدأ عمل مكيّف هواء وآليّة عمله، وأُعدّ وأفراد مجموعتي تقريرًا مدعَّمًا بالصور يوضّح ذلك، وأُقارنه بمبدأ عمل الثلّاجة.

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) لفلز 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

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



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.

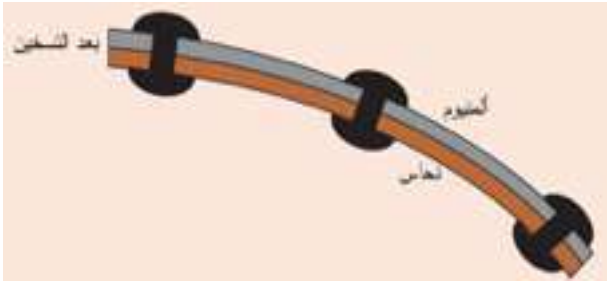
11. تُسمّى الطاقة التي تنتقل تلقائيًّا من الجسم الأعلى درجة حرارة إلى الجسم الأدنى درجة حرارة:
أ. الطاقة الحركية. ب. الطاقة الكامنة.
جـ. درجة الحرارة. د. الحرارة.

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 الحرارية في اتّجاه انتقالها التلقائي نفسه.
ب. نقل الطاقة الحرارية بعكس اتّجاه انتقالها التلقائي.
جـ. نقل الطاقة الحرارية 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 عن تعرّض شخص لكتلة معيّنة من بخار ماء بدرجة حرارة (100°C)، أشدّ من الحرق الناتج عن 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.

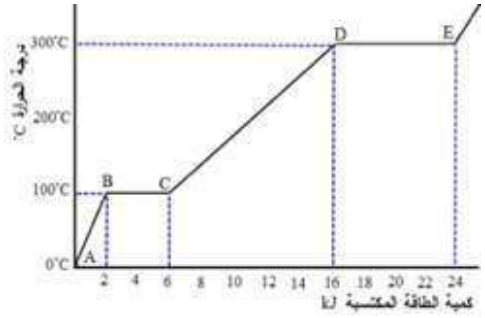
7. **أُحلّل: مصدر حراري يعمل بالوقود. إذا كانت كمّية الوقود المتوافرة فيه تولّد طاقة مقدارها (1.25 MJ) عند حرقها، فأحسبُ كتلة الماء التي يُمكن تسخينها من درجة حرارة (8°C) إلى درجة حرارة (100°C) بافتراض اكتساب الماء كامل الطاقة المتولّدة، والسعة الحرارية النوعية للماء (c_w = 4200 J/kg.K) تقريبًا.**

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 كما 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. **أُقارن بين عمليّات الديناميكا الحرارية من حيث كيفية تغيّر كلّ من: الحجم والضغط ودرجة الحرارة والطاقة الداخلية فيها.**

اسم العملية	الحجم	الضغط	درجة الحرارة	الطاقة الداخلية
عند حجم ثابت				
عند درجة حرارة ثابتة				
كاظمة				
عند ضغط ثابت				

11. أحسبُ: محرّك حراري يكتسب طاقة مقدارها (300 kJ) من مستودع الطاقة (Q_H)، ويطرد طاقة مقدارها (30 kJ) إلى مستودع الطاقة (Q_L). أحسبُ مقدار ما يأتي:

أ. الشغل الذي يبذله المحرّك الحراري.

ب. كفاء المحرّك الحراري.

12. 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:

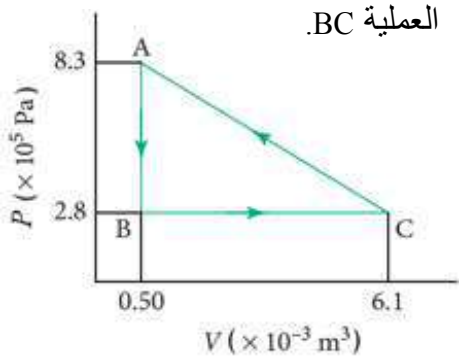
أ. ما مقدار الطاقة التي جرى تبادلها مع الغاز على شكل حرارة؟

ب. هل زُوّد الغاز بهذه الطاقة أم فقدها؟

13. أُفسّر البيانات: يوضّح الشكل أدناه منحنى (الضغط – الحجم) لنظام يتكوّن من عيّنة من غاز محصور تمرّ بعدّة عمليّات ديناميكا حرارية 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.



14. 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.

15. 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.

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

17. 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 ($100^\circ C$).

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 عن التقاء موجتين متّفقتين في الطور.
- **تداخل هدّام Destructive interference:** تداخل ناتج عن 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 (ω):** 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 الحراة 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.
- **رنين Resonance:** تأثير قوّة خارجية دورية ذات تردّد معيّن في نظام مهتزّ، يؤدي إلى زيادة سَعة اهتزازها؛ فتصبح قيمة عظمى عندما يتساوى تردّد القوّة الخارجية مع التردّد الطبيعي للنظام.
- **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°C)، رمزها c، وتُقاس بوحدة J/kg.K حسب النظام الدولي للوحدات.
- **شذوذ الماء Anomalous Behavior of Water :** سلوك الماء بين درجتَي حرارة (4°C) و(0°C)؛ إذ إنّه في أثناء تبريد الماء من 4°C إلى 0°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°C).
- **طاقة حرارية Thermal energy:** تُساوي 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 المحصلة عندها صفرًا في الأوقات جميعها.

- **فرق الطور Phase Difference :** اختلاف في شكل منحنى الموجة، ناتج عن 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 الحرارية المتبادلة مع النظام مضافًا إليها الشغل المبذول".
- **القانون الثاني في الديناميكا الحرارية The Second Law of Thermodynamics:** ينصّ على ما يأتي: "تنتقل الطاقة تلقائيًّا من الجسم الأعلى درجة حرارة إلى الجسم الأدنى درجة حرارة، ولا يُمكن أن تنتقل تلقائيًّا في الاتّجاه المعاكس".
- **القانون الصفري في الديناميكا الحرارية The Zeroth Law of Thermodynamics:** ينصّ على ما يأتي: "إذا وُجِد جسمان B و A منفصلان، وكلّ منهما في حالة اتّزان حراري مع جسم ثالث C، فإنّ الجسمين A و B سيكونان في حالة اتّزان حراري مع بعضهما عند اتّصالهما حراريًّا".
- **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 عن الموجتين، وهما منفردتان.
- **محزوز حيود Diffraction grating:** سلسلة من الفتحات المتوازية التي تفصلها مسافات متساوية يمرّ خلالها الضوء.
- **معامل التمدّد الطولي للموادّ الصلبة Coefficient of Linear Expansion of Solids:** 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 عن تراكب موجتين متساويتين في التردّد والطول الموجي والسعة، تنتقلان في اتّجاهين متعاكسين في الوسط نفسه.
- **موجة جيبية Sinusoidal Wave:** الموجة الذي 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.