



# الفيزياء

## الصف العاشر - كتاب الطالب

### الفصل الدراسي الثاني

10

#### فريق التأليف

موسى عطا الله الطراونة (رئيسًا)

خلدون سليمان المصاروه

أ.د. محمود إسماعيل الجاغوب

يحيى أحمد طواها

موسى محمود جرادات

شفاء طاهر عباس (منسقًا)

إضافة إلى جهود فريق التأليف، فقد جاء هذا الكتاب ثمرة جهود وطنية مشتركة من لجان مراجعة وتقييم علمية وتربوية ولغوية، ومجموعات مُركّزة من المعلمين والمُشرفين التربويين، وملاحظات مجتمعية من وسائل التواصل الاجتماعي، وإسهامات أساسية دقيقة من اللجنة الاستشارية والمجلس التنفيذي والمجلس الأعلى في المركز، ومجلس التربية والتعليم ولجانه المتخصصة.

#### الناشر

#### المركز الوطني لتطوير المناهج

يسر المركز الوطني لتطوير المناهج، ووزارة التربية والتعليم - إدارة المناهج والكتب المدرسية، استقبال آرائكم وملحوظاتكم على هذا الكتاب

عن طريق العناوين الآتية: هاتف: 4617304/5-8، فاكس: 4637569، ص. ب: 1930، الرمز البريدي: 11118،

أو بوساطة البريد الإلكتروني: scientific.division@moe.gov.jo

قررت وزارة التربية والتعليم تدرّس هذا الكتاب في مدارس المملكة الأردنية الهاشمية جميعها، بناءً على قرار المجلس الأعلى للمركز الوطني لتطوير المناهج في جلسته رقم (2020/7)، تاريخ 2020/12/1 م، وقرار مجلس التربية والتعليم رقم (2020/173) تاريخ 2020/12/17 م بدءاً من العام الدراسي 2020 / 2021 م.

© Harper Collins Publishers Limited 2020.

- Prepared Originally in English for the National Center for Curriculum Development. Amman - Jordan

- Translated to Arabic, adapted, customised and published by the National Center for Curriculum Development. Amman - Jordan

**ISBN: 978 - 9923 - 41 - 044 - 8**

المملكة الأردنية الهاشمية  
رقم الإيداع لدى دائرة المكتبة الوطنية  
(2020/8/2976)

373,19

الأردن. المركز الوطني لتطوير المناهج

الفيزياء: كتاب الطالب (الصف العاشر)/ المركز الوطني لتطوير المناهج - عمان: المركز، 2020

ج2(132) ص.

ر.إ.: 2020/8/2976

الوصفات: / الفيزياء / العلوم الطبيعية / التعليم الاعدادي / المناهج /

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

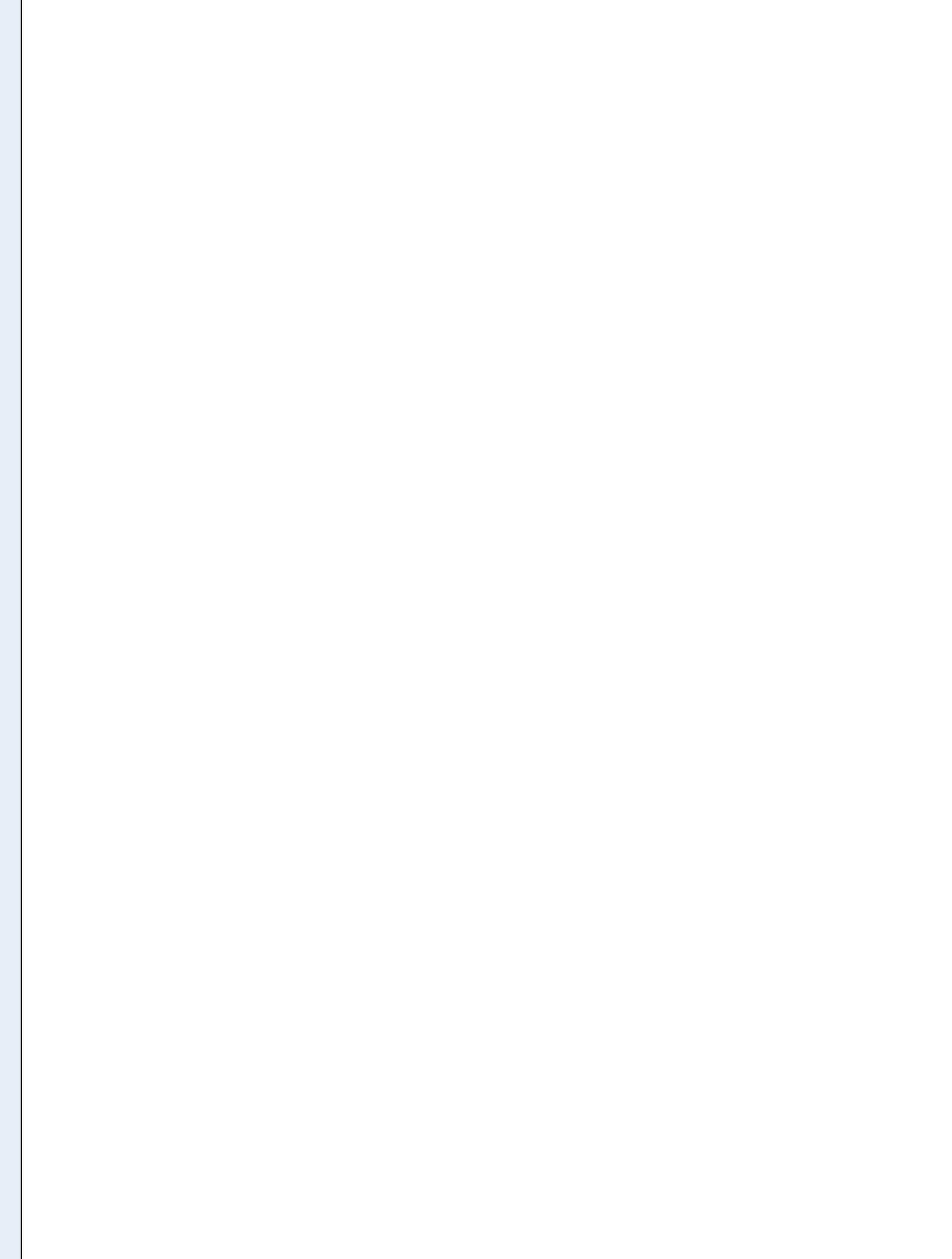
All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, sorted in retrieval system, or transmitted in any form by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior written permission of the publisher or a license permitting restricted copying in the 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.

## قائمة المحتويات

الموضوع	الصفحة
المقدمة	5
<b>الوحدة الرابعة: تطبيقات على قوانين نيوتن</b>	<b>7</b>
تجربة استهلاكية: الكتلة والوزن	9
الدرس الأول: الوزن وقانون الجذب العام (الكوني)	10
الدرس الثاني: تطبيقات على القوى	18
الدرس الثالث: القوة المركزية	42
<b>الوحدة الخامسة: الموائع</b>	<b>55</b>
تجربة استهلاكية: خصائص الموائع	57
الدرس الأول: الموائع الساكنة	58
الدرس الثاني: الموائع المتحركة	72
<b>الوحدة السادسة: الحركة الموجية</b>	<b>91</b>
تجربة استهلاكية: الموجات تنقل الطاقة ولا تنقل المادة	93
الدرس الأول: الموجات وصفاتها	94
الدرس الثاني: خصائص الحركة الموجية	111
مسرّد المصطلحات	128
قائمة المراجع	132



## المقدمة

انطلاقاً 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 معيماً للطلبة على الارتقاء بمستواهم المعرفي، ومجارة أقرانهم في الدول المتقدمة.

يُعدُّ هذا الكتاب واحداً 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 المتبعة عالمياً؛ لضمان انسجامها مع القيم الوطنية الراسخة، وتلبيتها لحاجات أبنائنا الطلبة والمعلمين.

روعي في تأليف الكتاب تقديم المعلومة العلمية الدقيقة وفق منهجية تقوم على السلاسة في العرض، والوضوح في التعبير، فضلاً عن الربط بين الموضوعات المطروحة في المراحل الدراسية السابقة واللاحقة، واعتماد منهجية التدرُّج في عرض موضوعات المادة، واستهلال وحداتها بأسئلة تُظهر علاقة علم الفيزياء بالظواهر من حولنا؛ ما يُحفِّز الطالب على الإفادة مما يتعلَّمه بغرفة الصف في تفسير مشاهدات يومية وظواهر طبيعية قد تُحدثُ أمامه، أو يشاهدها في التلفاز، أو يسمع عنها. وقد تضمَّنت كل وحدة نشاطاً إثرائياً يعتمد منحنى STEAM في التعليم الذي يُستعمل لدمج العلوم والتكنولوجيا والهندسة والفن والعلوم الإنسانية والرياضيات في أنشطة الكتاب المتنوعة، وفي قضايا البحث.

يتألَّف الكتاب من ثلاث وحدات دراسية، هي: تطبيقات على قوانين نيوتن، والموائع، والحركة الموجية. وقد ألحق به كتابٌ للأنشطة والتجارب العملية، يحتوي على جميع التجارب والأنشطة الواردة في كتاب الطالب؛ ليساعده على تنفيذها بسهولة، بإشراف المعلم، ومشاركة زملائه فيها، بما في ذلك رصد القراءات، وتحليلها، ثم مناقشتها، وصولاً إلى استنتاجات مبنية على أسس علمية سليمة. تضمَّن الكتاب أيضاً أسئلة تحاكي أسئلة الاختبارات الدولية؛ بُغية تعزيز فهم الطالب لموضوعات المادة، وتنمية التفكير الناقد لديه.

ونحن إذ نُقدِّم الطبعة الأولى (التجريبية) من هذا الكتاب، فإننا نأمل أن يُسهم في تحقيق الأهداف والغايات النهائية لبناء شخصية المُتعلِّم، وتنمية اتجاهات حُبِّ التعلُّم ومهارات التعلُّم المستمر، فضلاً عن تحسين الكتاب؛ بإضافة الجديد إلى المحتوى، والأخذ بملاحظات المعلمين، وإثراء أنشطته المتنوعة.

والله ولي التوفيق

المركز الوطني لتطوير المناهج

# تطبيقات على قوانين نيوتن

## Applications of Newton's Laws

### الوحدة

# 4

### أتأمل الصورة

أهمية علم الفيزياء في تصميم الطرق عند تصميم طريق فيه منعطف خطر، سواء في الطرق العادية أم في حلبات السباق، يُراعى أن يكون الطريق عند هذا المنعطف مائلاً في اتجاه مركز المسار الدائري الذي يشكّله المنعطف. لماذا يُصمَّم المنعطف بهذا الشكل؟ وهل لقوانين نيوتن دورٌ في هذا التصميم؟

## الفكرة العامة:

لقوانين نيوتن تطبيقات كثيرة ومتنوعة في حياتنا وأنشطتنا اليومية.

### الدرس الأول: الوزن وقانون الجذب العام (الكوني)

#### Weight and the Universal Gravitational Law

**الفكرة الرئيسية:** توجد قوة تجاذب بين أي كتلتين في الكون، يُمكن حسابها باستخدام قانون الجذب العام. فالأرض تؤثر بقوة جذب في الأجسام يكون اتجاهها نحو مركز الأرض، وتُعرف هذه القوة (بالوزن).

### الدرس الثاني: تطبيقات على القوى

#### Applications of Forces

**الفكرة الرئيسية:** تؤثر قوة الشد بواسطة الحبال والأسلاك، وتؤثر الأسطح بقوة عمودية في الأجسام الموضوعة عليها وتؤثر قوة الاحتكاك في حركة الأجسام، ومن الصعب ممارسة حياتنا اليومية من دونها.

### الدرس الثالث: القوة المركزية

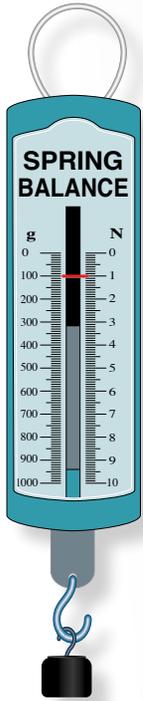
#### Centripetal Force

**الفكرة الرئيسية:** تؤثر قوة مركزية في الأجسام التي تتحرك حركة دائرية منتظمة. وللحركة الدائرية تطبيقات كثيرة في حياتنا اليومية.

## الكتلة والوزن

**المواد والأدوات:** ميزان نابضي مُدرج لقياس الكتلة والوزن، ثلاثة أثقالٍ مختلفة (100 g, 200 g, 300 g).

**إرشادات السلامة:** ارتداء المعطف، واستخدام النظارات الواقية للعينين، والحذر من سقوط الأجسام والأدوات على القدمين.



### خطوات العمل:

**1 ألاحظ:** أعلق الميزان النابضي رأسيًا في الهواء، ثم أعلق الثقل (100 g) في خطاف الميزان. ألاحظ قراءتي الكتلة والوزن على تدريج الميزان، وأدونهما.

**2 ألاحظ:** أكرر الخطوة السابقة بتعليق الثقل (200 g) في خطاف الميزان. ألاحظ قراءتي الكتلة والوزن على تدريج الميزان، وأدونهما.

**3 ألاحظ:** أكرر الخطوة (1) بتعليق الثقل (300 g) في خطاف الميزان. ألاحظ قراءتي الكتلة والوزن على تدريج الميزان، وأدونهما.

### التحليل والاستنتاج:

- 1 أفسر:** ما الذي تمثله كل قراءة من قراءتي الميزان؟ ما الفرق بينهما؟
- 2 أقرن** بين قراءتي الميزان في كل خطوة من الخطوات الثلاث السابقة، ماذا أستنتج؟
- 3 أحلل البيانات وأفسرها:** أقسم قراءة الوزن على قراءة الكتلة لكل خطوة من الخطوات الثلاث السابقة. هل يوجد نمط محدد؟ هل توجد علاقة تربط بينهما؟ ماذا أستنتج؟
- 4 أحلل البيانات وأفسرها:** اشتق علاقة للتحويل بين الكتلة والوزن.

## الكتلة والوزن Mass and Weight

مفهوما الكتلة والوزن مختلفان، وليس مترادفين كما نستخدمهما في حياتنا اليومية. وفي ما يأتي توضيح لكل منهما.

### الكتلة Mass

الكتلة Mass هي مقدار المادة الموجودة في جسم، وهي كمية قياسية، رمزها  $(m)$ ، وتُقاس بوحدة (kg) بحسب النظام الدولي للوحدات، وتعدُّ الكتلة مقياسًا للقصور الذاتي للجسم؛ أي مقياسًا لممانعته لأيّ تغيير في حالته الحركية. وكتلة الجسم ثابتة سواءً أكان الجسم ساكنًا أم متحرِّكًا بسرعة أقل بكثير من سرعة الضوء. كما تبقى كتلة الجسم ثابتة عند قياسها في مواقع مختلفة على سطح الأرض، أو على أيّ كوكبٍ آخر.

### الوزن Weight

يُعرف الوزن Weight بأنه قوة جذب الأرض للجسم، رمزُه  $(F_g)$ ، ويقاس بوحدة newton بحسب النظام الدولي للوحدات، وهو كمية متجهة، حيث يكون اتجاهه وزن أي جسم على سطح الأرض دائمًا رأسيًا نحو مركزها.

يعتمد وزن أي جسم عند موقع معيّن على سطح الأرض على كتلته، وعلى بُعده عن مركز الأرض، بخلاف الكتلة التي تبقى ثابتة. وأيضًا يتغير وزن الجسم من مكانٍ إلى آخر في الفضاء، ومن جرمٍ إلى آخر؛ فمثلًا، وزن جسم على سطح القمر يساوي سدس وزنه على سطح الأرض تقريبًا؛ نتيجة تغير مقدار تسارع الجاذبية.

### الفكرة الرئيسة:

توجد قوة تجاذب بين أيّ كتلتين في الكون، يُمكن حسابها باستخدام قانون الجذب العام. فالأرض تؤثر بقوة جذب في الأجسام يكون اتجاهها نحو مركز الأرض، وتُعرف هذه القوة (بالوزن).

### نتائج التعلم:

- أوضح الفرق بين الكتلة والوزن.
- أذكر نصّ قانون الجذب العام لنيوتن.
- أستنتج العلاقة بين قانون الجذب العام وقوة جذب الأرض للأجسام.
- أطبق بحلّ مسائل على الوزن، وقانون الجذب العام لنيوتن.

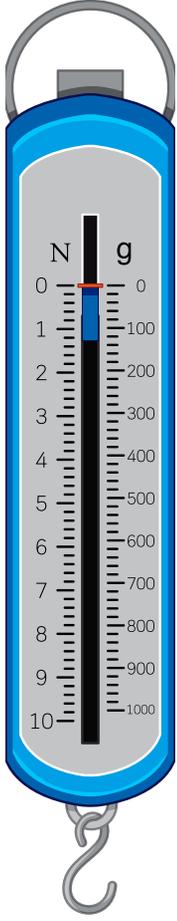
### المفاهيم والمصطلحات:

الكتلة Mass.

الوزن Weight.

قانون الجذب العام لنيوتن

Newton's Law of Universal Gravitation



الشكل (1): ميزان نابضيٌّ مُدرَّج لقياس الكتلة والوزن معًا.

وبعد تنفيذ التجربة الاستهلاكية توصلتُ إلى علاقةٍ بين وزن جسمٍ ( $F_g$ ) وكتلته ( $m$ ) بالقرب من سطح الأرض، حيثُ يُعطى وزن الجسم بالعلاقة:

$$F_g = mg$$

ويُمثِّل  $g$  تسارع السقوط الحرّ (تسارع الجاذبية الأرضية) في موقع وجود الجسم، ومقداره بالقرب من سطح الأرض يساوي  $9.80 \text{ m/s}^2$  تقريبًا، ويُقرَّب إلى  $10 \text{ m/s}^2$ ؛ للتبسيط عند إجراء العمليات الحسابية. ولسهولة التحويل بين الكتلة والوزن، تدرِّج بعض الموازين بحيث تُقيس الكتلة والوزن. أنظر الشكل (1) الذي يبين ميزانًا نابضيًّا.

✓ **أنحَقِّق:** ما الفرق بين الكتلة والوزن؟

## المثال 1

حبة تفاح كتلتها ( $150 \text{ g}$ )، أحسب وزنها على سطح:  
 أ. الأرض، حيثُ تسارع السقوط الحرّ على سطحها  $g = 10 \text{ m/s}^2$  تقريبًا.  
 ب. القمر، حيثُ تسارع السقوط الحرّ على سطحه  $g_M = 1.6 \text{ m/s}^2$  تقريبًا.  
 المعطيات:  $m = 150 \text{ g} = 0.15 \text{ kg}$ ،  $g = 10 \text{ m/s}^2$ ،  $g_M = 1.6 \text{ m/s}^2$   
 المطلوب:  $F_g = ?$ ،  $F_{gM} = ?$

**الحل:**

أ. تجذب الأرض حبة التفاح في اتجاه مركزها بقوة تسمى الوزن، يُحسب مقداره بالعلاقة:

$$F_g = mg \\ = 0.15 \times 10 = 1.5 \text{ N}$$

ب. يجذب القمر حبة التفاح في اتجاه مركزه بقوة تسمى الوزن، يُحسب مقداره بالعلاقة:

$$F_{gM} = mg_M \\ = 0.15 \times 1.6 = 0.24 \text{ N}$$

**أفكر:** هل توجد فروقات أخرى بين الكتلة والوزن؟ ناقش أفراد مجموعتي، وأستخدم مصادر المعرفة المتاحة للتوصل إلى فروقات أخرى بينهما.

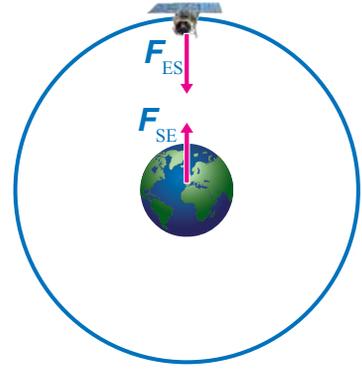
## لتدرِّب

في المثال السابق، أحسب وزن التفاحة على سطح كلٍّ من:

أ. المريخ، حيثُ:  $g_{\text{Mars}} = 3.7 \text{ m/s}^2$

ب. المشتري، حيثُ:  $g_{\text{Jupiter}} = 24.8 \text{ m/s}^2$

الشكل (2): تجذب الأرض (E) القمر الصناعي (S) بقوة ( $F_{ES}$ ) في اتجاه مركزها، ويجذب القمر الصناعي الأرض في اتجاه مركزه بقوة مساوية لقوة جذب الأرض له في المقدار، ومعاكسة لها في الاتجاه ( $F_{SE}$ ).



## قانون الجذب العام لنيوتن

### Newton's Law of Universal Gravitation

تجذب الأرض الأجسام الأخرى في اتجاه مركزها، سواء كانت على سطحها أو على بُعد منها، حيث تُعدُّ قوة الجاذبية الأرضية قوةً مجالٍ تؤثر في الأجسام عن بُعد. ويُعرَّف مجال الجاذبية الأرضية بأنه المنطقة المحيطة بالأرض، التي تظهر فيها آثار قوة جذب الأرض للأجسام، وتكون في اتجاه مركز الأرض دائماً.

وبحسب القانون الثالث لنيوتن فإن الأجسام الأخرى تجذب الأرض أيضاً في اتجاه مراكزها بقوى مساوية لقوى جذب الأرض لها، ولكن في اتجاه معاكس، أنظر الشكل (2).

توصّل نيوتن إلى أن قوة التجاذب بين أي جسمين تتناسب:

أ. طردياً مع حاصل ضرب كتلتي الجسمين عند ثبات المسافة بين مركزيهما:

$$F \propto m_1 m_2$$

فمثلاً، عند مضاعفة كتلتي جسمين مرتين تتضاعف قوة التجاذب

بينهما بمقدار أربعة أضعاف قيمتها الابتدائية، أنظر الشكل (3).

ب. عكسياً مع مربع المسافة بين مركزي الجسمين عند ثبات كتلتيهما، أي أن:

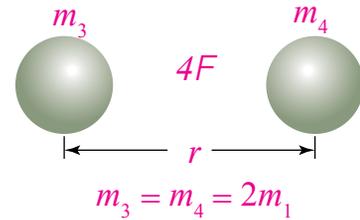
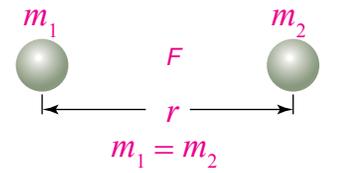
$$F \propto \frac{1}{r^2}$$

فمثلاً، عند مضاعفة المسافة بين مركزي جسمين مرتين، تصبح قوة

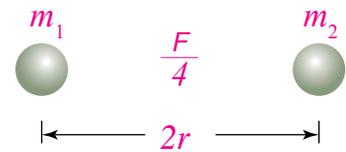
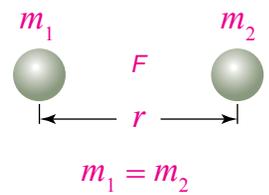
التجاذب بينهما ربع قيمتها الابتدائية، أنظر الشكل (4).

وتوصّل نيوتن إلى أن قوة التجاذب هذه لا يقتصر وجودها

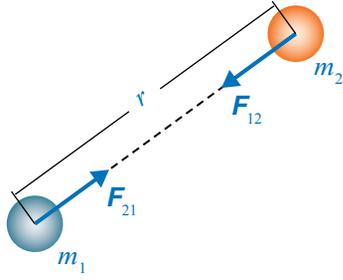
على الأرض، بل توجد بين جميع الأجسام في الكون. وقد صاغ



الشكل (3): تتناسب قوة التجاذب طردياً مع حاصل ضرب كتلتي الجسمين.



الشكل (4): تتناسب قوة التجاذب عكسياً مع مربع المسافة بين مركزي الجسمين.



الشكل (5): تؤثر قوة التجاذب الكتلي في اتجاه الخطّ الواصل بين مركزي الجسمين المتجاذبين.

سؤال: ماذا يحدث لمقدار كل من القوتين  $F_{21}$  و  $F_{12}$  عند مضاعفة مقدار  $m_2$  فقط؟

نيوتن ما سبق في قانونٍ سُمِّيَ قانونَ الجذبِ العامِّ (الكونيِّ) لنيوتن **Newton's Law of Universal Gravitation**، وينصُّ على أن: «كلَّ جسمين في الكون يتجاذبان بقوة يتناسب مقدارها طردياً مع حاصل ضرب كتلتيهما، وعكسياً مع مربع المسافة بين مركزيهما».

وتؤثر هذه القوة في اتجاه الخطّ الواصل بين مركزي الجسمين المتجاذبين، أنظر الشكل (5). ويُعبَّر عن قانون الجذب العامِّ رياضياً كما يأتي:

$$F = \frac{Gm_1 m_2}{r^2}$$

حيث:  $m_1$ ، و  $m_2$  كتلتا الجسمين المتجاذبين، و  $r$  المسافة بين مركزيهما، أما  $G$  فهو ثابت التناسب، ويُسمى ثابت الجذب العامِّ (الكونيِّ)، وبحسب النظام الدولي للوحدات، فإن مقدار الثابت  $G$  يساوي:

$$G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2$$

على الرغم من أن قوة التجاذب الكتلي من أضعف أنواع القوى الأساسية، إلا أنّها ذات أهمية كبيرة؛ فوجودها نستطيع أداء كثير من نشاطاتنا اليومية، ومن دونها نفقد التلامس مع سطح الأرض، ونطفو في الفضاء. وقوة التجاذب الكتلي مسؤولة أيضاً عن حركة القمر حول الأرض، وعن حركة كواكب مجموعتنا الشمسية وأجرامها حول الشمس. ومن خلالها نستطيع تفسير قوة التجاذب بين أي جسمين في الكون، وتفسير حركة الأقمار حول الكواكب، كما يمكن بواسطتها تفسير ظاهرتي المد والجزر.

✓ **أتحقّق:** علام ينصُّ قانون الجذب العامِّ لنيوتن؟

**أبحث:** القوى الأربع الأساسية:

- تُصنّف القوى في الكون إلى أربعة أنواع أساسية، هي:
- قوى التجاذب الكتلي (Gravitational Forces).
- القوى الكهرومغناطيسية (Electromagnetic Forces).
- القوى النووية القوية (Strong Nuclear Forces).
- القوى النووية الضعيفة (Weak Nuclear Forces).

أبحث في مصادر المعرفة الموثوقة والمتاحة ومنها شبكة الإنترنت عن هذه القوى من حيث: مدى كل منها، وترتيبها من الأقوى إلى الأضعف، وأعدّ عرضاً تقديمياً أعرضه أمام طلبة الصف.

## المثال 2

إذا كانت كتلة مريم (50 kg) وكتلة عائشة (60 kg)، والبعد بينهما (50 cm)، فأحسب مقدار:  
 أ . القوة التي تؤثر بها مريم في عائشة ( $F_{MA}$ )، وأحدّد اتجاهها.  
 ب . القوة التي تؤثر بها عائشة في مريم ( $F_{AM}$ )، وأحدّد اتجاهها.  
 المعطيات: نرمز إلى مريم بالرمز (M)، وإلى عائشة بالرمز (A).

$$m_M = 50 \text{ kg}, \quad m_A = 60 \text{ kg}, \quad r = 50 \text{ cm} = 0.50 \text{ m}$$

$$F_{MA} = ? , \quad F_{AM} = ?$$

الحل:

أ . نستخدم قانون الجذب العام لنيوتن لحساب مقدار قوة التجاذب الكتلي التي تؤثر بها مريم في عائشة.

$$\begin{aligned} F_{MA} &= \frac{Gm_M m_A}{r^2} \\ &= \frac{6.67 \times 10^{-11} \times 50 \times 60}{(0.5)^2} = \frac{2.001 \times 10^{-7}}{(0.5)^2} \\ &= 8.004 \times 10^{-7} \text{ N} \end{aligned}$$

وتكون هذه القوة في اتجاه مريم؛ حيث إنها قوة تجاذب دائماً.

ب . بحسب القانون الثالث لنيوتن، تكون قوة التجاذب الكتلي التي تؤثر بها عائشة في مريم مساوية في المقدار للقوة التي تؤثر بها مريم في عائشة، ومعاكسة لها في الاتجاه، أي أن:

$$F_{AM} = 8.004 \times 10^{-7} \text{ N}$$

وتكون هذه القوة في اتجاه عائشة. وبمقارنة هذه القوة بقوة جذب الأرض لكل منهما؛ يتضح لنا مدى صغر هذه القوة، وسبب عدم شعورنا بها.

### تمرين

**أستنتج:** في المثال السابق أجد النسبة بين قوة جذب الأرض لكل من مريم وعائشة، وقوة جذبهما لبعضهما. ماذا أستنتج؟

## تسارع الجاذبية الأرضية Gravitational Acceleration

يمكنُ حسابُ مقدارِ تسارعِ الجاذبيةِ الأرضيةِ (تسارعِ السقوطِ الحرِّ) باستخدامِ قانونِ الجذبِ العامِّ، والقانونِ الثاني لنيوتن كما يأتي:  
عندما يسقطُ جسمٌ كتلتهُ ( $m$ ) سقوطاً حرّاً بالقربِ من سطحِ الأرضِ فإنَّ تسارعهُ يساوي تسارعِ السقوطِ الحرِّ ( $g$ )، ويتأثرُ بقوةٍ محصلةٍ في أثناءِ سقوطِهِ تساوي وزنهُ ( $F_g$ )، تُحسبُ من القانونِ الثاني لنيوتن كما يأتي:

$$\begin{aligned}\Sigma F &= ma = mg \\ &= F_g\end{aligned}$$

ويكونُ وزنُ الجسمِ على سطحِ الأرضِ (أو بالقربِ منه) مساوياً لقوةِ التجاذبِ الكتلِّيِّ بين كتلةِ الجسمِ وكتلةِ الأرضِ؛ لذا:

$$\frac{Gmm_E}{r_E^2} = mg$$

حيثُ:  $r_E$  نصفُ قطرِ الأرضِ، و  $m_E$  كتلةُ الأرضِ.

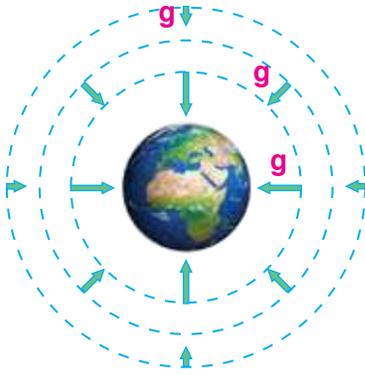
وبقسمةِ طرفي المعادلةِ على كتلةِ الجسمِ نحصلُ على المعادلةِ الآتيةِ لحسابِ تسارعِ السقوطِ الحرِّ على سطحِ الأرضِ أو قريباً منه:

$$g = \frac{Gm_E}{r_E^2}$$

وبتعويضِ قيمِ كلِّ من: ثابتِ الجذبِ العامِّ، وكتلةِ الأرضِ ( $5.98 \times 10^{24}$  kg) تقريباً، ومتوسطِ نصفِ قطرها ( $6.38 \times 10^6$  m) تقريباً، نحصلُ على قيمةِ تسارعِ السقوطِ الحرِّ بالقربِ من سطحِ الأرضِ:

$$\begin{aligned}g &= \frac{6.67 \times 10^{-11} \times 5.98 \times 10^{24}}{(6.38 \times 10^6)^2} \\ &= 9.80 \text{ m/s}^2\end{aligned}$$

ويكونُ اتجاهُ تسارعِ السقوطِ الحرِّ في اتجاهِ مركزِ الأرضِ دائماً. ويتضحُ من معادلةِ حسابِ تسارعِ السقوطِ الحرِّ أنَّه: بزيادةِ البُعدِ عن مركزِ الأرضِ يقلُّ مقدارُ تسارعِ السقوطِ الحرِّ، لذا؛ يتناقضُ وزنُ أيِّ جسمٍ في أثناءِ ابتعادهِ عن سطحِ الأرضِ. أنظرُ الشكلَ (6) الذي يوضحُ كيفَ يتغيرُ تسارعُ السقوطِ الحرِّ بتغيرِ البُعدِ عن سطحِ الأرضِ.



الشكلُ (6): تمثُّلُ الأسهمِ تسارعِ السقوطِ الحرِّ مقداراً واتجاهاً؛ حيثُ يقلُّ مقدارُهُ بالابتعادِ عن سطحِ الأرضِ، ويكونُ مقدارُهُ متساوياً عندَ جميعِ النقاطِ التي لها البُعدُ نفسه عن مركزِ الأرضِ.

ويُحسبُ تسارعُ السقوطِ الحرِّ للأرضِ عندَ أيِّ موقعٍ في الكونِ يبعدُ عن مركزها مسافةً  $r$  بالمعادلة الآتية:

$$g = \frac{Gm_E}{r^2}$$

ويُمكنُ استخدامُ هذه المعادلةِ لحسابِ تسارعِ السقوطِ الحرِّ على سطحِ أيِّ كوكبٍ؛ إذا عُلِمَ نصفُ قطره وكتلته.

✓ **أتحقَّقُ:** علامَ يعتمدُ تسارعُ السقوطِ الحرِّ على سطحِ أيِّ كوكبٍ؟

**أفكرُ:** عندَ مشاهدةِ روادِ الفضاءِ في مركباتهم أو خارجها؛ ألاحظُ أنَّهم يطفون داخلها أو في الفضاءِ، حيثُ يكونونَ في حالةٍ تُسمَّى انعدامُ الوزنِ. فهل يعني انعدامُ الوزنِ انعدامُ قوةِ الجاذبيةِ الأرضيةِ المؤثرةِ فيهم في موقعِ المركبةِ الفضائيةِ؟

### المثال 3

إذا علمتُ أنَّ كتلةَ القمرِ ( $7.35 \times 10^{22}$  kg) تقريباً، ونصفَ قطره ( $1.738 \times 10^6$  m) تقريباً، فأحسبُ مقدارَ:

أ . تسارعِ السقوطِ الحرِّ على سطحِ القمرِ.

ب . تسارعِ السقوطِ الحرِّ على سطحِ جرمٍ، كتلتهُ تساوي كتلةَ القمرِ، ونصفُ قطرهِ يساوي نصفِ قطرِ القمرِ.

المعطياتُ: نرُمزُ إلى القمرِ بالرمزِ (M)، والجرمِ بالرمزِ (A).

$$m_M = m_A = 7.35 \times 10^{22} \text{ kg}, \quad r_M = 1.738 \times 10^6 \text{ m}, \quad r_A = 2 r_M$$

المطلوبُ:  $g_M = ?$  ,  $g_A = ?$

**الحلُّ:**

أ . نستخدمُ معادلةَ حسابِ تسارعِ السقوطِ الحرِّ الآتية:

$$\begin{aligned} g_M &= \frac{Gm_M}{r_M^2} \\ &= \frac{6.67 \times 10^{-11} \times 7.35 \times 10^{22}}{(1.738 \times 10^6)^2} = 1.62 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

ب . نستخدمُ معادلةَ حسابِ تسارعِ السقوطِ الحرِّ الآتية:

$$\begin{aligned} g_A &= \frac{Gm_A}{r_A^2} \\ &= \frac{6.67 \times 10^{-11} \times 7.35 \times 10^{22}}{(2 \times 1.738 \times 10^6)^2} = 0.41 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

ألاحظُ تأثيرَ مضاعفةِ نصفِ القطرِ في نقصانِ مقدارِ التسارعِ بمقدارٍ كبيرٍ؛ لأنَّ التسارعَ يتناسبُ عكسياً معَ مربعِ نصفِ القطرِ.

## الربط مع الفلك

تدور الأقمار الصناعية على ارتفاعات مختلفة فوق سطح الأرض؛ حيث تتناسب هذه الارتفاعات مع وظيفة كل منها. ولكي يوضع هذا القمر في مداره المناسب حول الأرض يجب معرفة مقدار تسارع الجاذبية الأرضية عند هذا الارتفاع، وتحديد السرعة المناسبة المناسبة له في هذا المدار.

كتلة جُمان 70 kg، إذا علمت أن  $g = 10 \text{ m/s}^2$  و  $g_{\text{Moon}} = 1.6 \text{ m/s}^2$ ، تقريباً، فأحسب مقدار:

- وزنها على سطح الأرض.
- كتلتها على سطح القمر.
- وزنها على سطح القمر.

## مراجعة الدرس

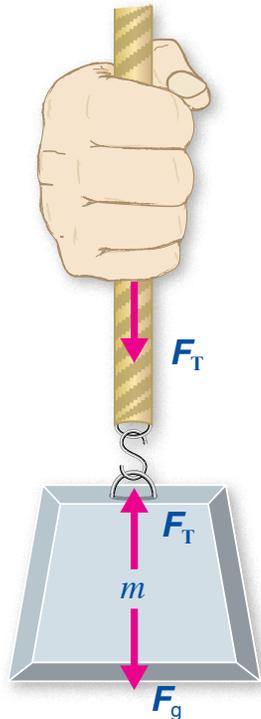
- الفكرة الرئيسية:** ما المقصود بالوزن؟ وعلام تعتمد قوة التجاذب الكتلي بين أي جسمين؟ وعلام يعتمد تسارع الجاذبية الأرضية؟
- أحلل:** كيف تتغير قوة التجاذب الكتلي بين جسمين:  $m_1$  و  $m_2$ ، المسافة بين مركزيهما  $r$ ، عند مضاعفة كل مما يأتي مرتين:
  - المسافة بين مركزيهما
  - كتلة الجسم الأول
  - كتلتي الجسمين معاً.
- أتوقع:** لو أصبحت كتلة الأرض ضعفي ما هي عليه، من دون تغيير نصف قطرها، فماذا يحدث لمقدار تسارع السقوط الحر ( $g$ ) قرب سطحها؟
- أستخدم المتغيرات:** على أي ارتفاع من سطح الأرض يكون مقدار تسارع الجاذبية الأرضية مساوياً لنصف مقداره على سطح الأرض؟
- أصدر حكماً:** في أثناء دراستي وزميلي هند لهذا الدرس، قالت: "إن مفهومَي الكتلة والوزن مترادفان، وهما يُعبّران عن الكمية الفيزيائية نفسها". أناقش صحة قول هند.
- التفكير الناقد:** إن تسارع الجاذبية على سطح القمر يساوي  $\frac{1}{6}$  تسارع الجاذبية على سطح الأرض تقريباً. هل يمكنني استنتاج أن كتلة القمر تساوي  $\frac{1}{6}$  كتلة الأرض؟ أوضّح إجابتي.

### قوة الشد Tension Force

قوة الشد Tension force هي قوة سحب تؤثر في جسم عن طريق سلك أو خيط أو حبل، رمزها  $F_T$ ، وتؤثر في اتجاه طول الخيط أو الحبل أو السلك. وللتبسيط عند التعامل مع المسائل التي تتضمن خيوطاً وحبالاً وأسلاكاً فإننا سنهمل كتلتها، ونعدّها غير قابلة للاستطالة.

أنظر الشكل (7)، الذي يوضح يد شخص يمسك حبلًا معلقًا في نهايته ثقل. إذا كان الثقل ساكنًا أو متحركًا بسرعة متجهة ثابتة، فإن القوة المحصلة المؤثرة فيه تساوي صفرًا - بحسب القانون الأول لنيوتن -، لذا يكون تسارعه صفرًا أيضًا.

تؤثر يد الشخص بقوة إلى أعلى في جزء الحبل الذي يمسكه، في حين يؤثر هذا الجزء من الحبل في يده بقوة شد إلى أسفل، وهما زوجا تأثير متبادل. كما يؤثر جزء الحبل المتصل بالثقل بقوة شد إلى أعلى في الثقل، في حين يؤثر الثقل في هذا الجزء من الحبل بقوة شد إلى أسفل، وهما أيضًا زوجا تأثير متبادل. ولا استقصاء قوة الشد أنفذ التجربة الآتية.



الشكل (7): تنتقل قوة الشد من يد الشخص إلى الثقل عن طريق الحبل، وتكون قوى الشد متساوية في جميع أجزاء الحبل عند إهمال كتلته.

### الفكرة الرئيسة:

تؤثر قوة الشد بواسطة الحبال والأسلاك، وتؤثر الأسطح بقوة عمودية في الأجسام الموضوعة عليها، وتؤثر قوة الاحتكاك في حركة الأجسام، ومن الصعب ممارسة حياتنا اليومية من دونها.

### نتائج التعلم:

- أوضح مفهوم كل من: قوة الشد، والقوة العمودية، وقوة الاحتكاك.
- أحسب مقدار القوة العمودية في أوضاع مختلفة.
- أستقصي العوامل التي تعتمد عليها قوة الاحتكاك بين جسمين.
- أفسر سبب نقصان قوة الاحتكاك عند بدء حركة جسم.
- أطور وسائل تقلل من الآثار السلبية لقوة الاحتكاك.
- أطبق بحل مسائل على قوى: الشد، والعمودية، والاحتكاك.

### المفاهيم والمصطلحات:

- قوة الشد Tension Force.
- القوة العمودية Normal Force.
- قوة الاحتكاك Friction Force.
- معامل الاحتكاك السكوني Coefficient of Static Friction.
- معامل الاحتكاك الحركي Coefficient of Kinetic Friction.

## التجربة 1

### قوة الشد



**المواد والأدوات:** خيطٌ خفيفٌ طوله (1 m)، ميزانان نابضيان (مقياسا قوة)، مكعبٌ خشبيٌّ مُزوّدٌ بخطّافٍ، مجموعةٌ أثقالٍ (100 g, 200 g, 300 g, 1 kg)، بكرّةٌ ملساءٌ، سطحٌ طاولةٍ أفقيٌّ، ورقٌ تنظيفٍ (منشفةٌ) لتنظيفِ سطحِ الطاولةِ وأسطحِ المكعبِ الخشبيِّ.

**إرشادات السلامة:** ارتداءُ المعطفِ، واستخدامُ النظاراتِ الواقيةِ للعينين، والحذرُ من سقوطِ الأجسامِ والأدواتِ على القدمين.

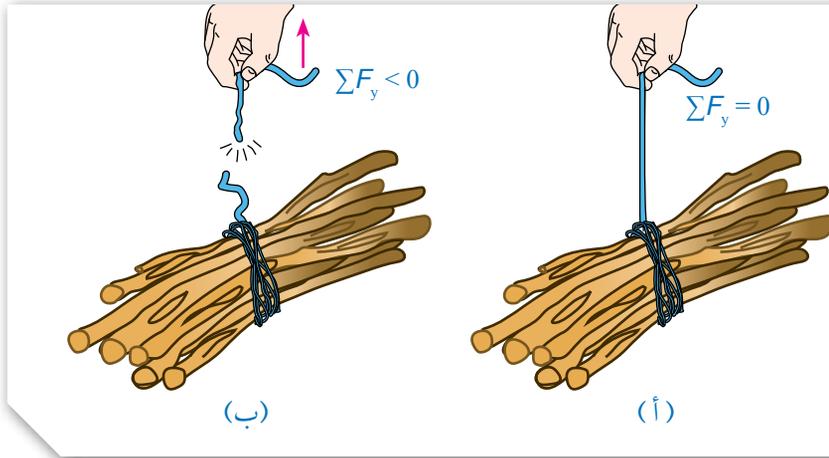
### خطوات العمل:

- 1 بالتعاون مع أفرادٍ مجموعتي، أنظّف أسطحَ المكعبِ الخشبيِّ وسطحَ الطاولةِ، وتأكدْ أنه أفقيٌّ، ثمّ أثبتْ الميزانَ الأولَ بخطّافِ المكعبِ الخشبيِّ، ثمّ أربطْ الخيطَ بخطّافِهِ، ثمّ أربطْ الطرفَ الثانيَ للخيطِ بالميزانِ الثانيِ مروراً بالبكرةِ. وأحرصْ على أن يكونَ الخيطُ الممتدُّ بينَ البكرةِ والمكعبِ أفقيّاً تماماً. وأضعُ الثقلَ (1 kg) فوقَ المكعبِ؛ لمنع انزلاقِهِ.
- 2 **الاحظ:** أعلّقْ الثقلَ (100 g) في خطّافِ الميزانِ الثانيِ، وأحرصْ على أن يبقى الثقلُ ساكناً ولا يهتزّ. أدوّنْ قراءتي الميزانين.
- 3 أكرّرُ الخطوةَ السابقةَ بتعليقِ الثقليين (200 g, 300 g): كلٌّ على حدةٍ، وأدوّنْ نتائجي.

### التحليل والاستنتاج:

1. **أقارنُ** بينَ مقدارَي قوتي الشدِّ المؤثرتين في طرفي الخيطِ في الخطوتين (2) و (3). ماذا ألاحظُ؟
2. **أستنتج:** ما العلاقةُ بينَ قوتي الشدِّ المؤثرتين في طرفي الخيطِ؟ أفسّرُ إجابتي.
3. **أقارنُ** نتائجَ مجموعتي بنتائجِ المجموعاتِ الأخرى، ماذا ألاحظُ؟ هل توصلتُ إلى تعميمٍ بخصوص قوى الشدِّ في الحبالِ والخيوطِ؟ أكتبُ تعميمي.

تكونُ قوتا الشدِّ المؤثرتانِ في طرفي حبلٍ أو سلكٍ متساويتين في المقدارِ، ومتعاكستين في الاتجاهِ. كما تكونُ قوى الشدِّ متساوية في جميعِ أجزاءِ الحبلِ أو الخيطِ أو السلكِ (عندَ إهمالِ كتلتهِ)، وهي مساويةٌ لوزنِ الثقلِ المُعلّقِ بهِ في حالِ كانتِ القوةُ المحصلةُ المؤثرةُ فيه صفراً؛ أي في حالةِ الاتزانِ السكونيِّ أو الاتزانِ الديناميكيِّ.



الشكل (8): (أ) قوة الشد في الخيط مساوية لوزن حزمة الحطب عندما تكون القوة المحصلة المؤثرة فيها صفرًا. (ب) وعند رفع الخيط إلى أعلى بشكل مفاجئ وبسرعة كبيرة قد ينقطع الخيط.

أنظر الشكل (8/أ) الذي يوضح حزمة حطبٍ مربوطةً بخيطٍ؛ حيث تكون قوة الشد في الخيط مساوية لوزن الحزمة عندما تكون ساكنةً أو متحركةً بسرعة متجهة ثابتة. أما عند تحريك الحزمة بتسارع كبير فإن الخيط قد ينقطع؛ لأن لكل حبلٍ أو سلكٍ قوة شدٍ عظمى يتحملها قبل أن ينقطع، أنظر الشكل (8/ب).

**أفكر:** في الشكل (8/ب)، عند رفع حزمة الحطب بشكل مفاجئ وبسرعة كبيرة قد ينقطع الخيط. أفسر ذلك. سؤال: كيف يمكن رفع حزمة الحطب دون أن ينقطع الخيط؟

✓ **أتحقق:** ما المقصود بقوة الشد؟

وما العلاقة بين قوتي الشد عند طرفي الحبل؟

الشكل (9): تُستخدم الحبال والأسلاك لنقل القوى عبر مساراتٍ منحنية في أنظمة الكوابح في الدراجات الهوائية.



### الفيزياء والحياة

تُستخدم الحبال والأسلاك لنقل القوة عبر مساراتٍ منحنية، مثل: أنظمة المكابح في الدراجات الهوائية. أنظر الشكل (9). وفي هذه الحالات يتم تغيير اتجاه القوة فقط، أما مقدارها فينقل عن طريق الحبل أو السلك دون تغيير، عند انعدام قوى الاحتكاك وإهمال كتلة الحبل أو السلك في هذه الأنظمة.

## المثال 4

دلو ماء كتلته وكتلة الماء الذي يحويه (10 kg)، مُعلَّق بحبل في الهواء، كما هو موضح في الشكل (10). إذا كان مقدار أكبر قوة شد ( $F_{T,max}$ ) يتحملها الحبل قبل أن ينقطع (150 N)، و  $g = 10 \text{ m/s}^2$ ، والدلو في حالة سكون، فأحسب مقدار ما يأتي:



أ. قوة الشد المؤثرة في الحبل.

ب. قوة الشد في الحبل إذا تحرك الدلو إلى أعلى بتسارع مقداره  $2 \text{ m/s}^2$ .

ج. أكبر تسارع يُمكن أن يتحرك به الدلو قبل أن ينقطع الحبل ( $a_{max}$ ).

المعطيات:  $m = 10 \text{ kg}$ ,  $v_i = 0 \text{ m/s}$ ,  $F_{T,max} = 150 \text{ N}$ ,  $g = 10 \text{ m/s}^2$ ,  $a = 2 \text{ m/s}^2$

المطلوب:  $F_{T,max} = ?$ ,  $a_{max} = ?$

الحل:

نرسم مخطط الجسم الحر للدلو.

أ. نطبق القانون الثاني لنيوتن على الدلو في اتجاه المحور  $y$ ؛ لحساب مقدار قوة الشد.

$$F_T - F_g = ma = 0$$

$$F_T = F_g = mg = 10 \times 10 = 100 \text{ N}$$

ب. نطبق القانون الثاني لنيوتن على الدلو في اتجاه المحور  $y$ ؛ لحساب مقدار قوة الشد.

$$F_T - F_g = ma$$

$$F_T = F_g + ma$$

$$= 100 + 10 \times 2 = 120 \text{ N}$$

ج. نطبق القانون الثاني لنيوتن على الدلو في اتجاه المحور  $y$ ؛ لإيجاد مقدار أكبر تسارع يُمكن أن يتحرك به الدلو.

$$F_{T,max} - F_g = ma_{max}$$

$$a_{max} = \frac{F_{T,max} - F_g}{m}$$

$$= \frac{150 - 100}{10} = 5 \text{ m/s}^2$$

## تمرين

يستخدم عبد الله دلو ماءً مربوطاً بحبل لرفع الماء من بئر. إذا كانت كتلة الدلو وهو مملوء بالماء (15 kg)، ومقدار أكبر قوة شد يتحملها الحبل قبل أن ينقطع (180 N)، والحبل مهمل الكتلة، وغير قابل للاستطالة، فأحسب مقدار:

أ. قوة الشد في الحبل إذا سحب عبد الله الدلو إلى أعلى بتسارع مقداره  $1.5 \text{ m/s}^2$ .

ب. أكبر تسارع يُمكن أن يُسحب به الدلو قبل أن ينقطع الحبل.

## القوة العمودية Normal Force

تُسمى قوة التلامس التي يؤثر بها جسمٌ في جسمٍ آخرٍ ملامسٍ له: القوة العمودية Normal force، رمزها  $F_N$ ، وتكون دائماً عموديةً على مستوى التلامس بين الجسمين. ويوضح الشكل (11) كيفية تغير القوة العمودية. في الشكل (11/أ)، يتزن الكتاب على سطح أفقي، تحت تأثير قوتين متعاكستين، هما: وزنه، والقوة العمودية، كما هو موضح في مخطط الجسم الحرّ أسفل الشكل. وبتطبيق القانون الثاني لنيوتن على الكتاب في اتجاه المحور  $y$ ، يمكن التوصل إلى أنهما متساويتان؛ حيث لا توجد حركة في اتجاه هذا المحور:

$$\sum F_y = 0$$

$$F_{N1} - F_g = 0$$

أما في الشكل (11/ب) فإن القوة العمودية المؤثرة في الكتاب أكبر من وزنه؛ حيث يتأثر الكتاب بقوتين إلى أسفل، هما: وزنه، وقوة دفع يد الشخص، بينما يدفع سطح الطاولة الكتاب إلى أعلى (القوة العمودية)، مثلما هو موضح في مخطط الجسم الحرّ. وبتطبيق القانون الثاني لنيوتن في اتجاه المحور  $y$ ، يمكن التوصل إلى أن:

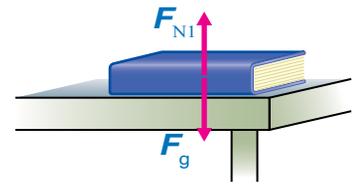
$$F_{N2} - (F + F_g) = ma = 0$$

حيث القوة المحصلة في اتجاه المحور  $y$  تساوي صفراً؛ لأنّ الكتاب في حالة اتزانٍ سكونيٍّ.

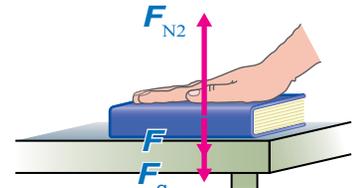
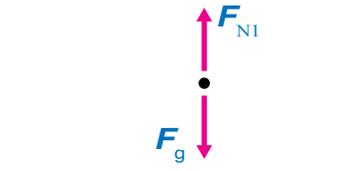
$$F_{N2} = F + F_g$$

يوضح الشكل (11/ج) حالة تكون فيها القوة العمودية المؤثرة في الكتاب أقل من وزنه؛ حيث يتأثر الكتاب بقوتين إلى أعلى، هما: القوة العمودية، وقوة الشد في الخيط، في حين يؤثر فيه وزنه بقوة إلى أسفل، كما هو موضح في مخطط الجسم الحرّ.

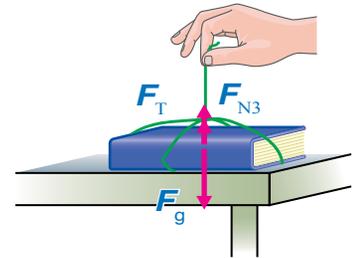
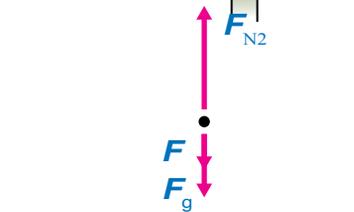
✓ **أتحقّق:** هل القوة العمودية المؤثرة في جسمٍ تساوي دائماً وزنه؟  
أفسّر إجابتي.



(أ)



(ب)



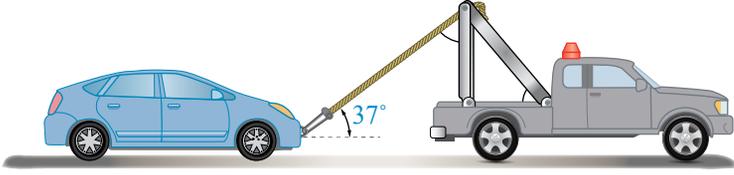
(ج)

الشكل (11): (أ) القوة العمودية المؤثرة في الكتاب تساوي وزنه. (ب) القوة العمودية أكبر من وزن الكتاب. (ج) القوة العمودية أقل من وزن الكتاب. (ملاحظة: الكتاب في حالة اتزانٍ سكونيٍّ في الأشكال الثلاثة.)

سؤال: أجد علاقةً لحساب القوة العمودية المؤثرة في الكتاب في الشكل (ج).

## المثال 5

تسحب رافعة سيارة كتلتها (900 kg) من السكون على طريقٍ أفقيٍّ أملس بقوة شدِّ مقدارها (2000 N) بحبلٍ يميلُ على الأفقيِّ بزاوية (37°)، كما هو موضَّح في الشكل (12). إذا علمتُ أنَّ الحبلَ مهملُ الكتلة، وغيرُ قابلٍ للاستطالة، و  $g = 10 \text{ m/s}^2$ ،  $\sin 37^\circ = 0.6$ ،  $\cos 37^\circ = 0.8$ ، فأحسبُ مقدارَ:



- المركبتين الأفقيَّة والعموديَّة لقوة الشدِّ في الحبل.
- القوة العموديَّة المؤثرة في السيارة.
- تسارع السيارة.

الشكل (12): رافعة تسحبُ سيارةً على طريقٍ أفقيٍّ.

المعطياتُ:

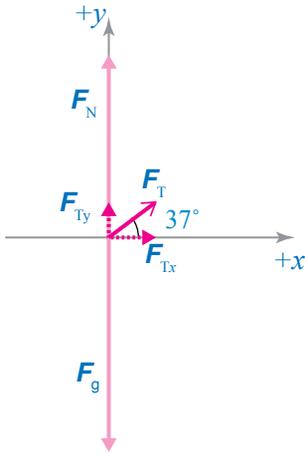
$$m = 900 \text{ kg}, \theta = 37^\circ, F_T = 2000 \text{ N}, g = 10 \text{ m/s}^2, \sin 37^\circ = 0.6, \cos 37^\circ = 0.8$$

المطلوبُ:

$$F_{Tx} = ?, F_{Ty} = ?, F_N = ?, a_x = ?$$

الحلُّ:

أرسمُ مخططَ الجسم الحرِّ للسيارة. مع اعتبارِ الاتجاهِ الموجبِ إلى اليمينِ (في اتجاهِ الحركة الأفقيَّة).



أ. لإيجادِ المُركبة الأفقيَّة لقوة الشدِّ في الحبلِ نستخدمُ العلاقة الآتية:

$$F_{Tx} = F_T \cos \theta = 2000 \cos 37^\circ = 2000 \times 0.8 = 1600 \text{ N}$$

لإيجادِ المُركبة العموديَّة لقوة الشدِّ في الحبلِ؛ نستخدمُ العلاقة الآتية:

$$F_{Ty} = F_T \sin \theta = 2000 \sin 37^\circ = 2000 \times 0.6 = 1200 \text{ N}$$

ب. لا توجدُ حركةٌ في اتجاهِ المحورِ الرأسيِّ؛ لذا تكونُ القوةُ المحصلةُ في اتجاهه صفرًا.

$$\sum F_y = 0$$

$$F_{Ty} + F_N - F_g = 0$$

$$F_N = F_g - F_{Ty}$$

$$\begin{aligned}
F_N &= mg - 1200 \\
&= (900)(10) - 1200 \\
&= 9000 - 1200 = 7800 \text{ N}
\end{aligned}$$

$$F_N = 7800 \text{ N, } +y$$

ألاحظ أن مقدار القوة العمودية أقل من مقدار الوزن.

ج. لإيجاد مقدار التسارع نستخدم العلاقة الآتية، مع مراعاة أن السطح الأفقي أملس:

$$\sum F_x = ma_x = F_{Tx}$$

$$ma_x = 1600 \text{ N}$$

$$a_x = \frac{1600}{900} = 1.78 \text{ m/s}^2$$

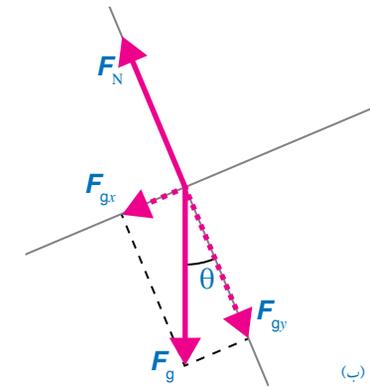
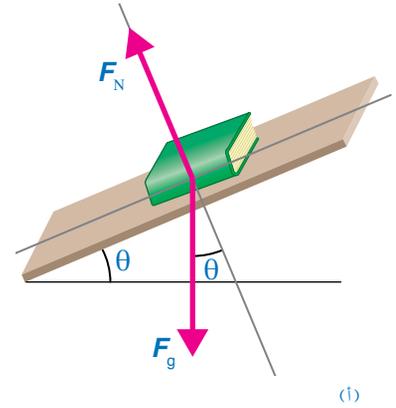
$$a_x = 1.78 \text{ m/s}^2, +x$$

### لتدريه

أعيد حلّ المثال السابق إذا أصبحت زاوية ميلان الحبل بالنسبة للأفقي  $(53^\circ)$ ، إذا علمت أن:  $g = 10 \text{ m/s}^2$ ,  $\sin 53^\circ = 0.8$ ,  $\cos 53^\circ = 0.6$ .

### • المستوى المائل Inclined Plane

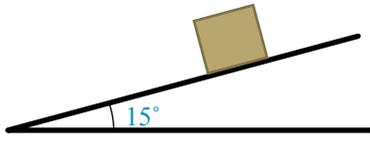
عند وضع جسم على مستوى مائل، فإن وزنه لا يؤثر عمودياً في سطح المستوى، بل يصنع زاوية معه، أنظر الشكل (13/أ)، الذي يوضح كتاباً موضوعاً على مستوى مائل، يميل على الأفقي بزاوية  $(\theta)$ . ومن المناسب في مثل هذه المسائل، اختيار محاور الإسناد بحيث يكون المحور  $(x)$  في اتجاه يوازي المستوى المائل، ويكون المحور  $(y)$  عمودياً عليه. لذا؛ يلزم تحليل وزن الجسم إلى مركبتين: إحداهما عمودية على المستوى المائل  $(F_{gy} = F_g \cos \theta)$ ، والأخرى موازية له  $(F_{gx} = F_g \sin \theta)$ ، أنظر الشكل (13/ب). وهنا تكون القوة العمودية أقل من وزن الجسم.



الشكل (13): (أ) كتاب موضوع على مستوى مائل. (ب) يبين مخطط الجسم حجر تحليل وزن الكتاب إلى مركبتين: مركبة عمودية على المستوى المائل، ومركبة موازية للمستوى المائل.

## المثال 6

ينزل صندوق كتلته (4 kg) إلى أسفل مستوى مائل أملس يميل على الأفقي بزاوية (15°)، كما هو موضح في الشكل (14). إذا علمت أن:  $g = 10 \text{ m/s}^2$ ,  $\sin 15^\circ = 0.26$ ,  $\cos 15^\circ = 0.97$ ، فأحسب مقدار:



الشكل (14): صندوق على مستوى مائل أملس.

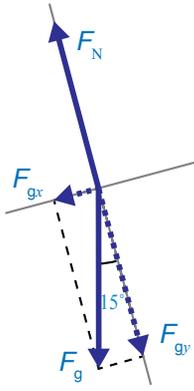
أ . القوة العمودية المؤثرة في الصندوق.

ب . تسارع الصندوق.

المعطيات:  $m = 4 \text{ kg}$ ,  $\theta = 15^\circ$ ,  $g = 10 \text{ m/s}^2$ ,  $\sin 15^\circ = 0.26$ ,  $\cos 15^\circ = 0.97$

المطلوب:  $F_N = ?$ ,  $a = ?$

الحل:



- نرسم مخطط الجسم الحر للصندوق، مع اختيار المحور  $x$  في اتجاه يوازي المستوى المائل، والمحور  $y$  عمودي عليه، مثلما هو موضح.
- اعتبار أن اتجاه انزلاق الصندوق إلى أسفل المستوى المائل هو الاتجاه الموجب ( $+x$ ).

• قبل البدء بحل المسألة نحلل وزن الصندوق إلى مركبتين متعامدتين:  $F_{gx}$  و  $F_{gy}$ ، مثلما هو موضح في مخطط الجسم الحر، وكما يأتي:

$$F_{gx} = F_g \sin \theta$$

$$= mg \sin 15^\circ = 4 \times 10 \times 0.26 = 10.4 \text{ N}$$

$$F_{gy} = F_g \cos \theta$$

$$= mg \cos 15^\circ = 4 \times 10 \times 0.97 = 38.8 \text{ N}$$

أ . نطبق القانون الثاني لنيوتن على الصندوق في اتجاه المحور  $y$ ؛ لإيجاد مقدار القوة العمودية المؤثرة فيه، مع مراعاة أنه لا توجد حركة في اتجاه هذا المحور.

$$\sum F_y = 0$$

$$F_N - F_{gy} = 0$$

$$F_N = F_{gy}$$

$$F_N = 38.8 \text{ N}$$

ب . ينزل الصندوق إلى أسفل المستوى المائل، ولحساب مقدار تسارعه نطبق القانون الثاني لنيوتن في اتجاه المحور  $x$ ، وباعتبار أن اتجاه الحركة هو الاتجاه الموجب.

$$\sum F_x = ma$$

$$F_{gx} = ma$$

$$a = \frac{F_{gx}}{m} = \frac{10.4}{4}$$

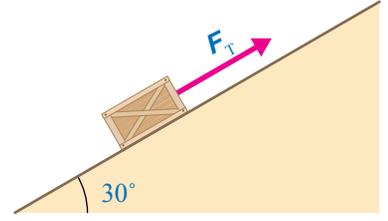
$$= 2.6 \text{ m/s}^2$$

## تمرين

يوضح الشكل (15) صندوقاً كتلته (20 kg)، يُسحبُ بحبلٍ غير قابلٍ للاستطالة إلى أعلى مستوى مائلٍ أملسٍ بسرعةٍ ثابتةٍ. إذا كان الحبل موازياً لسطح المستوى، وزاوية ميلان المستوى على الأفقي (30°)، و  $g = 10 \text{ m/s}^2$ ،  $\sin 30^\circ = 0.5$ ،  $\cos 30^\circ = 0.87$ ، فأحسب مقداراً:

أ . القوة العمودية المؤثرة في الصندوق.

ب . قوة الشد المؤثرة في الصندوق.



الشكل (15): صندوقٌ يُسحبُ بسرعةٍ متجهةٍ ثابتةٍ إلى أعلى مستوى مائلٍ.

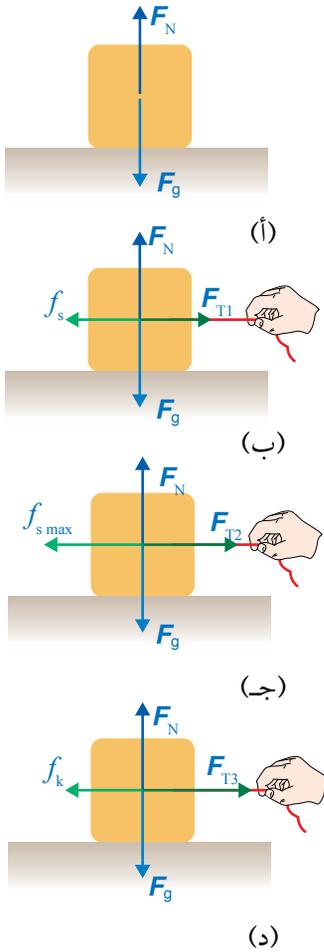
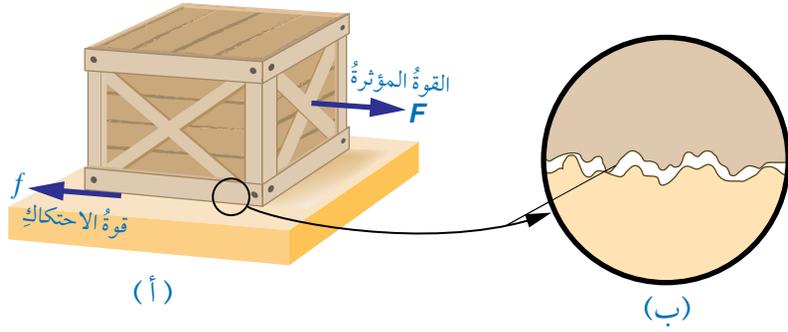
## قوة الاحتكاك Friction Force

عند دفع مكعبٍ خشبيٍّ على سطحٍ طاولةٍ أفقيٍّ ثم إفلاته، فإنه ينزلق عليه، ثم لا يلبث أن يتوقف. وبحسب القانون الأول لنيوتن، لا بد من وجود قوةٍ محصلةٍ أثرت في المكعب أدت إلى تغيير حالته الحركية. وبحسب القانون الثاني لنيوتن، يجب أن تؤثر هذه القوة المحصلة في الصندوق بعكس اتجاه حركته، وتعيقها.

تنشأ هذه القوى التي تعيق حركة الأجسام نتيجة حركة مادة صلبة بالنسبة إلى مادة صلبة، أو حركة مواد صلبة وموائع (سوائل وغازات) نسبة إلى بعضها، أو بين طبقات الموائع المتحركة. ومن أمثلة ذلك: انزلاق إطارات سيارة على سطح الطريق، وحركة غواصة داخل مياه البحر، وتحليق طائرة في الهواء، وانزلاق لوح تزلج على سطح الماء في رياضة التزلج.

سوف ندرس هنا حركة الأجسام الصلبة نسبة إلى بعضها، حيث تُسمى القوة المعيقة في هذه الحالة قوة الاحتكاك Friction force؛ وهي قوة تلامس تعيق حركة الأجسام الصلبة المتلامسة بعضها فوق بعض، وتُمنع حركتها، وتؤثر بشكلٍ موازٍ لسطحي التلامس بين الجسمين. وتنشأ هذه القوة بين سطحي الجسمين المتلامسين عند تحريك أو محاولة تحريك بعضهما فوق بعض، أنظر الشكل (16/أ). عند التأثير بقوة في الصندوق الموضح في الشكل (16/أ)؛ لمحاولة تحريكه على سطح أفقي خشن، تنشأ قوة احتكاك بين سطحيهما

الشكل (16): توضيح مبسّط لآلية حدوث الاحتكاك بين سطحَي تلامس جسمين. (أ) عند التأثير بقوة في الصندوق لتحريكه تنشأ قوة احتكاك معاكسة لاتجاه القوة المؤثرة. (ب) ويُظهر الفحص الدقيق للسطحين المتلامسين أنّهما خشنان.



الشكل (17): (أ)  $f_s = 0$ . (ب)  $f_s = F_{T1}$ . (ج) الصندوق على وشك الحركة ( $f_{s,max} = F_{T2}$ ). (د) بعد تحريك الصندوق تؤثر فيه قوة احتكاك حركي ( $f_k$ )، ويكون مقدارها أقل من مقدار قوة الاحتكاك السكوني العظمى.

المتلامسين، نتيجة خشونتهما، حيث يُظهر الفحص الدقيق للسطحين أنّهما خشنان، حتى لو بدا أنّهما أملسان عند لمسهما، انظر الشكل (16/ب). ولتحريك الصندوق يجب التأثير فيه بقوة دفع أو سحب لرفع نتوءات سطحه فوق نتوءات السطح السفلي؛ لكي يتخطّاهما من خلال الارتطام بها أو كسرها، أو كليهما معاً.

✓ **أتحقّق:** ما المقصود بقوة الاحتكاك؟ وفي أي اتجاه تؤثر؟

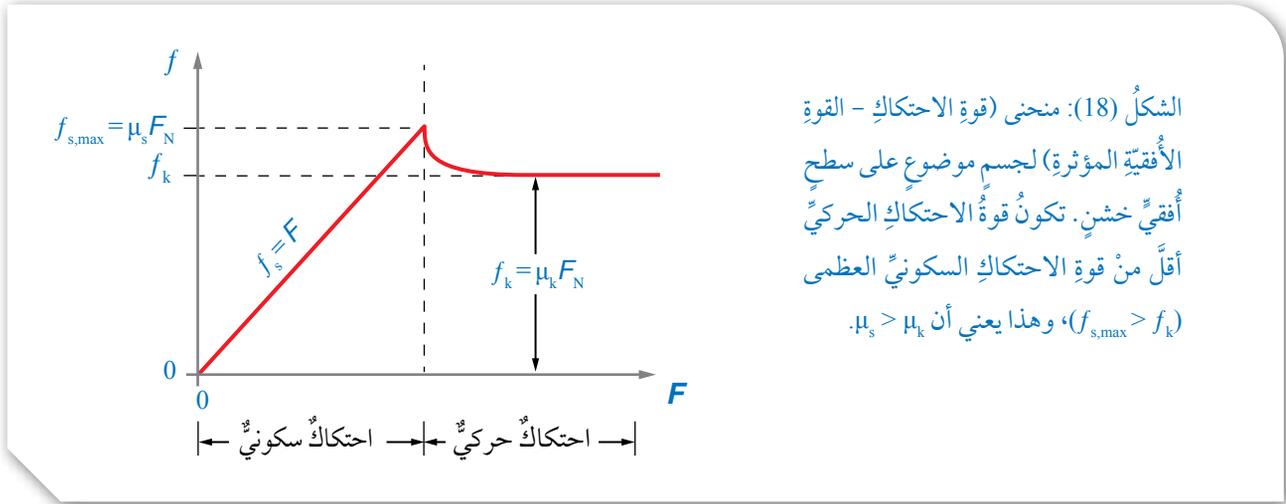
### قوتَا الاحتكاك: السكوني، والحركي Static and Kinetic Frictional Forces

هناك نوعان لقوة الاحتكاك: قوة الاحتكاك السكوني، وقوة الاحتكاك الحركي.

#### قوة الاحتكاك السكوني Static Frictional Force

هي قوة تُمانع حركة جسمين ساكنين متلامسين عند محاولة تحريك بعضهما فوق بعض. وتظهر هذه القوة استجابةً لقوة أخرى تحاول تحريك الجسم الساكن. ولفهم هذه القوة؛ انظر الشكل (17) الذي يبين صندوقاً على سطح أفقيّ خشن.

في الشكل (17/أ) الصندوق ساكن، ولا توجد قوة تحاول تحريكه؛ لذا لا توجد قوة احتكاك تؤثر فيه. أما في الشكل (17/ب) فتؤثر قوة شد أفقيّة صغيرة ( $F_{T1}$ ) في الصندوق جهة اليمين، غير أنّه ساكن لا يتحرك؛ أي أنّ القوة المحصلة المؤثرة فيه صفر، وبحسب

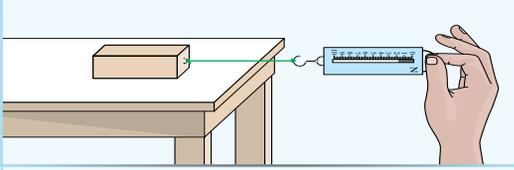


القانون الأول لنيوتن، لا بُدَّ من وجود قوة أفقية تؤثر في الصندوق، تكون معاكسة لاتجاه قوة الشد، وتساويها مقداراً. تُسمى هذه القوة قوة الاحتكاك السكوني Static frictional force، رمزها  $(f_s)$ ، تؤثر في سطحي جسمين متلامسين عندما لا يتحرك أحدهما بالنسبة إلى الآخر. بزيادة مقدار قوة الشد يزداد مقدار قوة الاحتكاك السكوني ما دام الصندوق ساكناً؛ حيثُ القوة المحصلة المؤثرة فيه تساوي صفراً. وعند زيادة مقدار قوة الشد في الشكل (17/ ج) يزداد أيضاً مقدار قوة الاحتكاك السكوني حتى يصل إلى قيمة عظمى، عندما يكون الجسم على وشك الحركة، تسمى قوة الاحتكاك السكوني العظمى  $(f_{s,max})$ . أنظر الشكل (18) الذي يوضح منحنى (قوة الاحتكاك - القوة الأفقية المؤثرة) لجسم موضوع على سطح أفقي خشبي. يبين الجزء الأول من المنحنى تأثير قوة الاحتكاك السكوني؛ حيثُ يزداد مقدار قوة الاحتكاك السكوني طردياً بزيادة مقدار القوة الأفقية المؤثرة في الجسم، حتى يصل إلى قيمة عظمى  $(f_{s,max})$ ، وألاحظُ أن قوة الاحتكاك السكوني تساوي القوة الأفقية المؤثرة في الجسم التي تحاول تحريكه في المقدار، وتعاكسها في الاتجاه. وعندما يصبح مقدار القوة الأفقية المؤثرة أكبر من القيمة العظمى لقوة الاحتكاك السكوني يبدأ الجسم الحركة، وعندها تؤثر فيه قوة الاحتكاك الحركي بدلاً من قوة الاحتكاك السكوني. علام تعتمد قوة الاحتكاك السكوني؟ للإجابة عن ذلك، أنفذ التجربة الآتية؛ لاستقصاء العوامل التي يعتمد عليها مقدار قوة الاحتكاك عملياً.

## التجربة 2

### العوامل التي تعتمد عليها قوة الاحتكاك السكوني وقوة الاحتكاك الحركي

المواد والأدوات: قطعة خشبية على شكل متوازي مستطيلات مَزوَّدة بخطاف، ثقلان مقدار كلٍّ منهما (200 g)، ميزان إلكتروني، خيط طوله (1 m) تقريباً، ورق تنظيف، ميزان نابضي، ورق تغليف بلاستيكي، ورق صنفرة، ورق (رقائق) ألومنيوم، ورقة رسم بياني.



**إرشادات السلامة:** ارتداء المعطف، واستخدام النظارات الواقية للعينين، والحذر من سقوط الأجسام والأدوات على القدمين..

#### خطوات العمل:

- 1 بالتعاون مع أفراد مجموعتي، أنظف أسطح القطعة الخشبية وسطح الطاولة، وتأكد أنه أفقي.
- 2 **أقيس** كتلة القطعة الخشبية ( $m_{\text{block}}$ )، وأدونها في جدول للمحاولة (1)، ثم اجعل أصغر أوجهها ملاصقاً لسطح الطاولة.
- 3 اربط أحد طرفي الخيط بخطاف القطعة الخشبية، وطرفه الآخر بخطاف الميزان النابضي، وأحرص على أن يكون الخيط الواصل بينهما أفقياً، وموازياً لمستوى سطح الطاولة.
- 4 **أقيس:** أسحب الميزان أفقياً ببطء بقوة صغيرة المقدار، ثم أزيدها تدريجياً، وفي أثناء ذلك يراقب أحد أفراد مجموعتي القطعة الخشبية، ويراقب آخر الميزان؛ لإعطاء إشارة بأخذ قراءته في اللحظة التي تبدأ فيها القطعة الانزلاق، وأدونها في عمود قوة الاحتكاك السكوني العظمى ( $f_{s,\text{max}}$ ) في جدول للمحاولة (1).
- 5 **أقيس:** أرجع القطعة الخشبية إلى موقعها الابتدائي، ثم أضع عليها ثقل (200 g)، وأكرر الخطوة السابقة، وأدوّن الكتلة الجديدة للقطعة الخشبية، وقراءة الميزان للمحاولة (2) في جدول.
- 6 **أقيس:** أكرر الخطوة السابقة مرة أخرى بإضافة ثقل (200 g) على سطح القطعة الخشبية، وأدوّن البيانات التي أحصل عليها للمحاولة (3) في الجدول (1).
- 7 **أستنتج:** أكرر التجربة باستخدام القطعة الخشبية نفسها دون وضع أثقال عليها؛ لتثبيت كتلتها، وتغيير وجهها الملامس لسطح الطاولة؛ لتغيير مساحة سطح التلامس (A)؛ لاستنتاج العلاقة بين مقدار قوة الاحتكاك السكوني ومساحة السطحين المتلامسين، ثم أدوّن البيانات في الجدول (2).
- 8 **أستنتج:** أكرر التجربة باستخدام القطعة الخشبية نفسها دون وضع أثقال عليها، وتغيير نوع مادة السطح الذي توضع عليه، بتغطية سطح الطاولة أسفل القطعة الخشبية بورق تغليف بلاستيكي، أو ورق صنفرة، أو ورق (رقائق) ألومنيوم، أو غيرها؛ لاستنتاج العلاقة بين مقدار قوة الاحتكاك السكوني وطبيعة السطحين المتلامسين، ثم أدوّن البيانات في الجدول (3).
- 9 **أصمّم تجربة** لدراسة العوامل التي تعتمد عليها قوة الاحتكاك الحركي بين سطحين، وذلك بأخذ قراءة الميزان عند حركة القطعة الخشبية بسرعة ثابتة تقريباً على سطح الطاولة الأفقي، وأدوّن بياناتي.

## التحليل والاستنتاج:

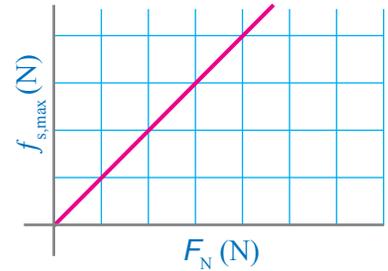
1. **أبرر** سبب اعتبار قوة الاحتكاك السكوني مساوية لقراءة الميزان النابضي (قوة الشد).
2. **أحسب** مقدار القوة العمودية ( $F_N$ ) لكل محاولة في الجدول (1)، وهي تساوي وزن القطعة الخشبية والأثقال التي عليها. لماذا؟
3. **أمثل بيانياً** العلاقة بين مقدار قوة الاحتكاك السكوني العظمى ( $f_{s,max}$ ) على المحور ( $y$ )، ومقدار القوة العمودية ( $F_N$ ) على المحور ( $x$ ) لبيانات الجدول (1). ما شكل هذه العلاقة؟ ماذا أستنتج؟
4. **أتوقع** ما الذي يمثله ميل المنحنى في السؤال السابق؟ ماذا أستنتج؟
5. **أحلل وأستنتج**: اعتماداً على نتائج الخطوات (4-8)، أستنتج العوامل التي تعتمد عليها قوة الاحتكاك السكوني العظمى بين سطحين متلامسين عند محاولة تحريك أحدهما بالنسبة إلى الآخر. أفسر إجابتي.
6. **أستنتج** العوامل التي تعتمد عليها قوة الاحتكاك الحركي بين سطحين؟ أفسر إجابتي.

استنتجت بعد تنفيذ التجربة السابقة أنه عند محاولة تحريك جسمين متلامسين أحدهما بالنسبة إلى الآخر، ينشأ بين سطحيهما المتلامسين قوة احتكاك سكوني يعتمد مقدارها على عاملين، هما:

أ. طبيعة السطحين المتلامسين (نوعاً مادتيهما)؛ فمثلاً مقدار قوة الاحتكاك السكوني بين المكعب الخشبي و سطح الطاولة الخشبي أكبر منه بين المكعب الخشبي ورقائق الألمنيوم. وبناءً على ذلك؛ يمكن تفسير سبب استخدام العاملين في المصانع والأماكن التي تكون أرضياتها مغطاة بالزيوت والسوائل، أحذية نعالها مصنوعة من المطاط؛ فانزلاق الأحذية ذات النعل المطاطي يكون أقل منه للأحذية ذات النعل الجلدي.

ب. مقدار القوة العمودية المؤثرة في الجسم؛ حيث يزداد مقدار قوة الاحتكاك السكوني بزيادة مقدار القوة العمودية. ويوضح الشكل (19) التناسب الطردي بين مقدار قوة الاحتكاك السكوني العظمى ( $f_{s,max}$ ) ومقدار القوة العمودية ( $F_N$ ). ولا تعتمد قوة الاحتكاك السكوني على مساحة سطح التلامس بين الجسمين، ولا على حجميهما، مقدارها عند أية لحظة يحقق المتباينة:

$$f_s \leq \mu_s F_N$$



الشكل (19): يتناسب مقدار قوة الاحتكاك السكوني العظمى طردياً مع مقدار القوة العمودية.

حيث يرمز  $(\mu_s)$  إلى معامل الاحتكاك السكوني **Coefficient of static friction**، وهو يعتمد على طبيعة السطحين المتلامسين. ويُعطى مقدار قوة الاحتكاك السكوني العظمى رياضياً بالعلاقة:

$$f_{s,max} = \mu_s F_N$$

ومن هذه العلاقة يُمكن تعريف معامل الاحتكاك السكوني  $(\mu_s)$  بأنه نسبة مقدار قوة الاحتكاك السكوني العظمى إلى مقدار القوة العمودية، وبما أنه نسبة قوى فليس له وحدة قياس.

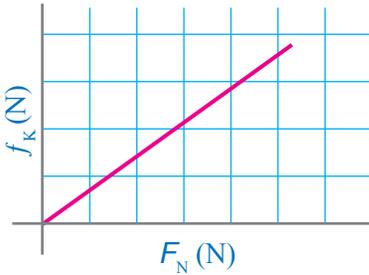
✓ **أتحقق:** علام تعتمد قوة الاحتكاك السكوني بين سطحين متلامسين؟ وما وحدة قياس معامل الاحتكاك السكوني؟

### قوة الاحتكاك الحركي Kinetic Frictional Force

يوضح الشكل (17/د) أن الصندوق يبدأ الحركة عندما يصبح مقدار قوة الشد المؤثرة فيه أكبر من مقدار قوة الاحتكاك السكوني العظمى، وتسمى قوة الاحتكاك المؤثرة في الجسم في أثناء حركته قوة الاحتكاك الحركي **Kinetic frictional force**، رمزها  $(f_k)$ ، تؤثر في سطحي جسمين متلامسين عندما يتحرك أحدهما بالنسبة إلى الآخر. وبالنظر إلى الشكل (18)، ألاحظ أن مقدار قوة الاحتكاك الحركي أقل من مقدار قوة الاحتكاك السكوني العظمى، وهذا ما توصلت إليه عملياً بعد تنفيذ التجربة السابقة؛ حيث مقدار القوة اللازمة لتحريك الجسم بسرعة متجهة ثابتة، والمحافظة على حركته أقل من مقدار القوة اللازمة لبدء حركته.

استنتجت بعد تنفيذ التجربة السابقة أن مقدار قوة الاحتكاك الحركي بين سطحي جسمين متلامسين يتحرك أحدهما بالنسبة إلى الآخر، يعتمد على عاملين - كما في حالة قوة الاحتكاك السكوني -، هما: طبيعة السطحين المتلامسين، ومقدار القوة العمودية المؤثرة في الجسم.

فمثلاً، تحريك مكعب خشبي على سطح طاولة خشبي أسهل من تحريكه على سطح من الخرسانة، وانزلاق إطارات السيارة على الطريق المغطى بالثلج أسهل بكثير منه على طريق جاف. ويوضح الشكل (20) التناسب الطردي بين مقدار قوة الاحتكاك الحركي  $(f_k)$  ومقدار القوة



الشكل (20): يتناسب مقدار قوة الاحتكاك الحركي طردياً مع مقدار القوة العمودية.

العمودية ( $F_N$ ). وكما في حالة الاحتكاك السكوني، لا تعتمد قوة الاحتكاك الحركي على مساحة سطح التلامس بين الجسمين، ولا على حجميهما.

وُجدَ عملياً أنَّ مقدار قوة الاحتكاك الحركي بين سطحَي جسمين متلامسين يتناسبُ طردياً مع مقدار القوة العمودية المتبادلة بينهما، ويمكنُ التعبيرُ عن ذلك رياضياً كما يأتي:

$$f_k = \mu_k F_N$$

حيثُ مقدارُ قوة الاحتكاك الحركي يساوي ناتج ضرب معامل الاحتكاك الحركي في مقدار القوة العمودية. ويرمزُ ( $\mu_k$ ) إلى معامل الاحتكاك الحركي **Coefficient of kinetic friction**، ويساوي نسبة مقدار قوة الاحتكاك الحركي إلى مقدار القوة العمودية، وهو يعتمدُ على طبيعة السطحين المتلامسين، وبما أنَّه نسبة قوَى فليس له وحدة قياس. يبينُ الجدولُ (1) معاملات الاحتكاك السكونية ومعاملات الاحتكاك الحركية التقريبية لسطوح مختلفة. وألاحظُ من الجدول أن معاملات الاحتكاك السكونية أكبرُ من نظيراتها الحركية للسطوح نفسها؛ أي أن  $\mu_s > \mu_k$ .

الجدولُ (1): القيمُ التقريبية لبعض معاملات الاحتكاك

نوعا السطحين المتلامسين	معامل الاحتكاك السكوني $\mu_s$	معامل الاحتكاك الحركي $\mu_k$
فولاذٌ فوق فولاذٍ (جافٌ)	0.8	0.6
فولاذٌ فوق فولاذٍ (مع الزيت)	0.15	0.05
مطاطٌ فوق خرسانية جافة	1.0	0.8
مطاطٌ فوق خرسانية مُبللة	0.5 – 0.7	0.3 – 0.5
مطاطٌ فوق ثلج	0.3	0.2
خشبٌ فوق خشبٍ	0.5	0.3
خشبٌ مشمّع (waxed wood) فوق ثلج	0.14	0.1
فلزٌ فوق خشبٍ	0.5	0.3
جليدٌ فوق جليدٍ	0.1	0.03
زجاجٌ فوق زجاجٍ	0.9	0.4
فولاذٌ فوق جليدٍ	0.4	0.02
الحذاء فوق الخشب	0.9	0.7
الحذاء فوق الجليد	0.1	0.05
مفاصلُ العظام بوجود السائل الزلالي	0.016	0.015

## المثال 7

وُضِعَ صندوقٌ كتلته (40 kg) على زلاجةٍ لسحبهِ على أرضيةٍ أفقيةٍ مغطاةٍ بالثلج. إذا علمتُ أنَّ قوةَ الشدِّ المؤثرة في الزلاجةَ أفقيةٌ تمامًا، ومعامل الاحتكاك السكوني بين الزلاجة والثلج (0.15)، ومعامل الاحتكاك الحركي بينهما (0.10)، وتسارع السقوط الحر (10 m/s<sup>2</sup>)، وبإهمال كتلة الزلاجة، فأحسب مقدار:

أ. أقل قوة يلزم التأثير بها في الزلاجة بحيث تكون على وشك الحركة.

ب. القوة اللازم التأثير بها في الزلاجة لتتحرك بسرعة متجهة ثابتة.

ج. تسارع الزلاجة إذا كانت القوة المحصلة المؤثرة فيها (20 N).

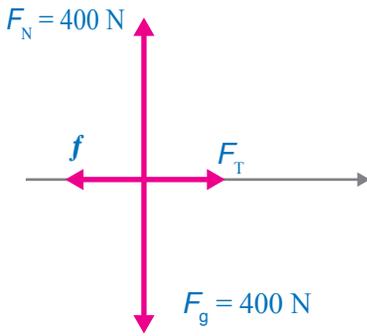
المعطيات:

$$m = 40 \text{ kg}, \mu_s = 0.15, \mu_k = 0.10, g = 10 \text{ m/s}^2, \Sigma F = 20 \text{ N}.$$

المطلوب:

$$f_{s,\max} = ?, F_T = ?, a = ?.$$

الحل:



أرسم مخطط الجسم الحر للزلاجة والصندوق معًا.

أ. مقدار أقل قوة يلزم التأثير بها في الزلاجة بحيث تكون على وشك الحركة يساوي مقدار قوة الاحتكاك السكوني العظمى ( $f_{s,\max}$ )، ولحسابها يلزم معرفة مقدار القوة العمودية، لذا؛ نطبق القانون الثاني لنيوتن في اتجاه المحور ( $y$ )، مع ملاحظة أنه لا توجد حركة في اتجاهه:

$$\Sigma F_y = ma_y = 0$$

$$F_N - F_g = 0$$

$$F_N = F_g = mg = (40)(10) = 400 \text{ N}$$

ثم نحسب مقدار قوة الاحتكاك السكوني العظمى، كما يأتي:

$$f_{s,\max} = \mu_s F_N = (0.15)(400) = 60 \text{ N}$$

ب. لكي تتحرك الزلاجة بسرعة متجهة ثابتة، يجب أن يكون مقدار قوة الشدِّ مساويًا لمقدار قوة الاحتكاك الحركي.

$$\Sigma F_x = F_T - f_k = 0$$

$$F_T = f_k = \mu_k F_N = (0.10)(400) = 40 \text{ N}$$

ألاحظ أن مقدار القوة اللازمة لجعل الزلاجة على وشك الحركة أكبر من مقدار القوة اللازمة للمحافظة على حركتها بسرعة متجهة ثابتة.

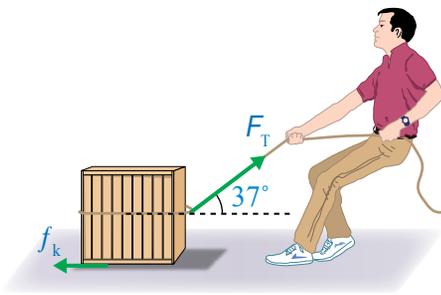
جـ . لحساب مقدار تسارع الزلاجة، نطبق القانون الثاني لنيوتن في اتجاه المحور (x):

$$\Sigma F_x = ma$$

$$20 = 40 \times a$$

$$a = \frac{20}{40} = 0.5 \text{ m/s}^2$$

## المثال 8



الشكل (21): سحب صندوق على أرضية أفقية خشنة.

يُسحب صندوق كتلته (50 kg) على أرضية أفقية خشنة بحبل يصنع زاوية (37°) على الأفقي، أنظر الشكل (21). إذا كان مقدار قوة الشد في الحبل (200 N)، وتسارع الصندوق بمقدار (1.3 m/s<sup>2</sup>)، والحبل مهمل الكتلة وغير قابل للاستطالة، و  $g = 10 \text{ m/s}^2$ ،  $\sin 37^\circ = 0.6$ ،  $\cos 37^\circ = 0.8$ ، فأحسب مقدار:

أ . قوة الاحتكاك الحركي المؤثرة في الصندوق.

ب . معامل الاحتكاك الحركي بين الصندوق والأرضية.

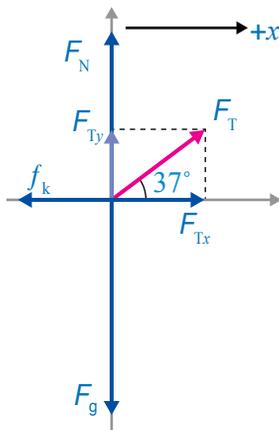
المعطيات:

$$m = 50 \text{ kg}, \theta = 37^\circ, F_T = 200 \text{ N}, a = 1.3 \text{ m/s}^2, \sin 37^\circ = 0.6, \cos 37^\circ = 0.8, g = 10 \text{ m/s}^2$$

المطلوب:

$$f_k = ? , \mu_k = ?$$

الحل:



- نرسم مخطط الجسم الحر للصندوق.
- قبل البدء بحل المسألة نحسب وزن الصندوق، ثم نحلل قوة الشد في الحبل إلى مركبتيهما، كما هو موضح في مخطط الجسم الحر، وعلى النحو الآتي:

$$F_g = mg = (50)(10) = 500 \text{ N}$$

$$F_{Tx} = F_T \cos \theta = (200) \cos 37^\circ = 200 \times 0.8 = 160 \text{ N}$$

$$F_{Ty} = F_T \sin \theta = (200) \sin 37^\circ = 200 \times 0.6 = 120 \text{ N}$$

أ . نطبّق القانونَ الثاني لنيوتن على الصندوق في اتجاه المحور  $x$ ؛ لإيجاد مقدار قوة الاحتكاك.

$$\sum F_x = ma$$

$$F_{Tx} - f_k = ma$$

وبجعل  $(f_k)$  موضوع القانون:

$$f_k = F_{Tx} - ma$$

$$= 160 - (50)(1.3) = 160 - 65$$

$$= 95 \text{ N}$$

مقدار قوة الاحتكاك الحركي (95 N)، وتؤثر في عكس اتجاه حركة الصندوق.

ب . لحساب معامل الاحتكاك الحركي، يلزم أولاً معرفة مقدار القوة العمودية، لذا؛ نطبّق القانونَ الثاني لنيوتن على الصندوق في اتجاه المحور  $y$ ؛ لإيجاد مقدارها، مع مراعاة أنه لا توجد حركة على هذا المحور.

$$\sum F_y = 0$$

$$F_N + F_{Ty} - F_g = 0$$

$$F_N = F_g - F_{Ty} = 500 - 120$$

$$= 380 \text{ N}$$

نستخدم معادلة الاحتكاك الحركي؛ لحساب مقدار معامل الاحتكاك، كما يأتي:

$$f_k = \mu_k F_N$$

$$\mu_k = \frac{f_k}{F_N} = \frac{95}{380} = 0.25$$

وللمقارنة بين حركة متزلج بوجود الاحتكاك، وبإهماله، أنظر  
المثال الآتي:

## المثال 9

يتزلج رياضيٌّ على منحدرٍ ثلجيٍّ يميلُ على الأفقيِّ بزاويةٍ  $(25^\circ)$ ، كما هوَ موضَّحٌ في الشكلِ (22). إذا علمتُ أنَّ كتلةَ الرياضيِّ (50 kg)، و  $g = 10 \text{ m/s}^2$ ،  $\sin 25^\circ = 0.42$ ،  $\cos 25^\circ = 0.91$ ،

فأحسبُ مقدارَ تسارعهِ في الحالتينِ الآتيتينِ:

أ. إذا كانَ المنحدرُ الثلجيُّ أملسًا.

ب. إذا كانَ معاملُ الاحتكاكِ الحركيِّ بينَ الزلاجةِ والثلجِ (0.10).

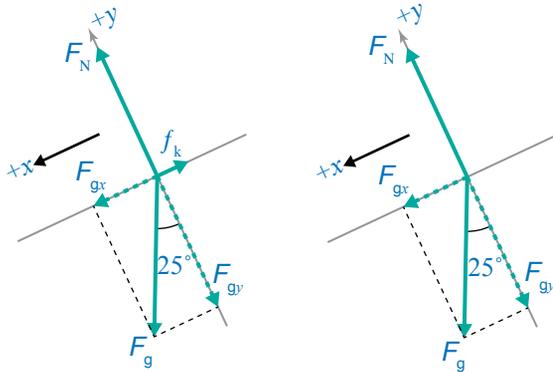
المعطياتُ:

$$m = 50 \text{ kg}, \theta = 25^\circ, g = 10 \text{ m/s}^2, \sin 25^\circ = 0.42, \cos 25^\circ = 0.91, \mu_k = 0.10$$

المطلوبُ:

$$a = ?$$

الحلُّ:



• نرسمُ مخططَ الجسمِ الحرِّ للمتزلجِ في حالةِ المنحدرِ الأملسِ (a)، والمنحدرِ الخشنِ (b)، معَ اختيارِ المحورِ  $x$  في اتجاهِ يوازيِ المستوى المائلِ، والمحورِ  $y$  عموديًّا عليه، مثلما هوَ موضَّحٌ.

• قبلَ البدءِ بحلِّ المسألةِ نحلُّ وزنَ المتزلجِ إلى مركبتينِ متعامدتينِ:  $F_{gx}$  و  $F_{gy}$ ، مثلما هوَ موضَّحٌ في مخططَي الجسمِ الحرِّ، وكما يأتي:

$$F_{gx} = F_g \sin \theta = mg \sin 25^\circ = 50 \times 10 \times 0.42 = 210 \text{ N}$$

$$F_{gy} = F_g \cos \theta = mg \cos 25^\circ = 50 \times 10 \times 0.91 = 455 \text{ N}$$

أ. أنظرُ مخططَ الجسمِ الحرِّ (a)، ثمَّ أطبِّقُ القانونَ الثانيَ لنيوتن على المتزلجِ الرياضيِّ في اتجاهِ

المحورِ  $x$ ؛ لحسابِ مقدارِ تسارعهِ:

$$\sum F_x = ma$$

$$F_{gx} = ma$$

$$a = \frac{F_{gx}}{m} = \frac{210}{50} = 4.2 \text{ m/s}^2$$

ب. أنظر مخطط الجسم الحر (b)، وألاحظ أنه توجد قوة احتكاكٍ حركيٍّ تؤثر في عكس اتجاه انزلاق المتزلج. لذا؛ يلزم بدايةً حساب مقدار قوة الاحتكاك الحركي، ومن أجل ذلك نحسب مقدار القوة العمودية المؤثرة في المتزلج بتطبيق القانون الثاني لنيوتن عليه في اتجاه المحور  $y$ ، مع مراعاة أنه لا توجد حركة في اتجاه هذا المحور.

$$\sum F_y = 0$$

$$F_N - F_{gy} = 0$$

$$F_N = F_{gy} = 455 \text{ N}$$

ثم نستخدم معادلة الاحتكاك الحركي لحساب مقدار قوة الاحتكاك:

$$f_k = \mu_k F_N$$

$$= (0.10)(455)$$

$$= 45.5 \text{ N}$$

ينزل المتزلج الرياضي إلى أسفل المنحدر الثلجي، ولحساب مقدار تسارعه نطبق القانون الثاني لنيوتن عليه في اتجاه المحور  $x$ ، مع اعتبار الاتجاه الموجب إلى أسفل المنحدر.

$$\sum F_x = ma$$

$$F_{gx} - f_k = ma$$

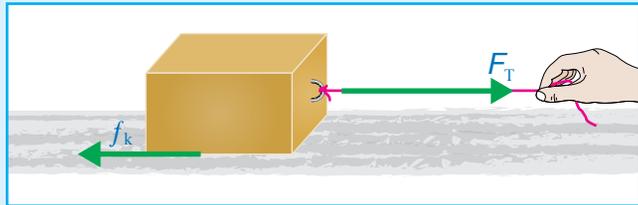
$$a = \frac{F_{gx} - f_k}{m} = \frac{210 - 45.5}{50}$$

$$= 3.3 \text{ m/s}^2$$

ألاحظ أن مقدار تسارع المتزلج الرياضي أكبر في حالة المنحدر الأملس.

### تمرين

أثرت قوة شد أفقية مقدارها (200 N) في اتجاه اليمين، في صندوق كتلته (50 kg)، يستقر على سطح أفقي خشبي، كما هو موضح في الشكل (23). إذا علمت أن معامل الاحتكاك الحركي (0.3)، تسارع السقوط الحر (10 m/s<sup>2</sup>)، فأحسب مقدار:



الشكل (23): صندوق ينزل على سطح أفقي خشبي.

- قوة الاحتكاك الحركي المؤثرة في الصندوق.
- القوة المحصلة المؤثرة في الصندوق.
- تسارع الصندوق.



الشكل (24): انزلاق سيارة على طريق مغطى بالثلج والجليد.

**الفيزياء والحياة:** تُصدرُ مديرتنا الأمن العام والدفاع المدني نشراتٍ توعويةً وتحذيراتٍ لسائقي المركبات عند تأثر المملكة بمنخفض جوي، من ضمنها تحذيرهم من خطر انزلاق المركبات على الطرقات عند سقوط الأمطار أو الثلوج؛ حيث تكون طبقة فاصلة بين إطار السيارة (وهو مطاط) وسطح الطريق، وهذا يقلل من مقدار كل من: معامل الاحتكاك السكوني ومعامل الاحتكاك الحركي بينهما؛ مما يؤدي إلى سهولة انزلاق إطارات السيارة على الطريق، ويزيد المسافة اللازمة لإيقاف السيارة، ويجعل قيادة السيارة والسيطرة عليها وتوجيهها أمرًا صعبًا، خاصة عند قيادتها بتهور، وعدم الالتزام بالإرشادات والشواخص المرورية، أنظر الشكل (24). لذا؛ يجب أخذ هذه التحذيرات والإرشادات بعين الاعتبار، وعدم قيادة السيارة إلا في حالة الضرورة القصوى في مثل هذه الظروف الجوية، وإذا لزم قيادتها وجب أخذ الحيط والحذر، والقيادة بتمهل، والتقيّد بتوجيهات الجهات الرسمية المسؤولة وإرشاداتها.

✓ **أتحقّق:** إذا علمت أن مقدار قوة الاحتكاك بين الخرسانة ونعل الحذاء المصنوع من المطاط أكبر منه بين الخرسانة والنعل المصنوع من الجلد، فأَيّ الحذاءين أختار للمشي في يوم ماطر؟ أفسّر إجابتي.

**أفكر:** عادة تُلف جنازير حول إطارات السيارات، وبخاصة سيارات الدفاع المدني في العواصف الثلجية. بناءً على ما تعلمته في هذا الدرس، ما الهدف من وضع هذه الجنازير حول إطارات السيارات؟ أفسّر إجابتي.

**أبحث:** لعلم الفيزياء دور مهم في عملية التحقيق المروري في الحوادث المرورية. أبحث في دور قسم التحقيق المروري التابع لمديرية الأمن العام في كيفية تحديد السيارة أو السيارات المُسببة لحدث ما، والمعلومات والبيانات التي يجمعها مندوب الحوادث. وأعد عرضاً تقديمياً عرضه أمام طلبة الصف.



## إيجابيات قوى الاحتكاك وسلبياتها

### Advantages and Disadvantages of Friction Forces

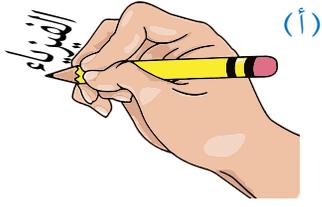
لقوى الاحتكاك تطبيقات وآثار كثيرة في حياتنا، بعضها مفيدٌ وضروريٌّ، وبعضها الآخر ضارٌّ ومزعجٌ لا بُدَّ من معالجته والتقليل منه.

#### إيجابيات قوى الاحتكاك Advantages of Friction Forces

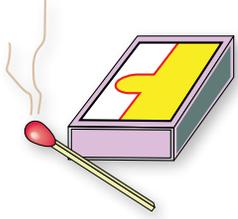
من التطبيقات والأنشطة التي يحتاج تنفيذها وجود قوى الاحتكاك: حركة المركبات؛ فعند انعدام قوى الاحتكاك بين إطارات المركبة وسطح الطريق، فإن الإطارات تدور في مكانها، فتبقى المركبة ساكنة. ونحتاج إلى قوى الاحتكاك للكتابة على الورق والسيبورة، وإشعال أعواد الثقاب، والمشي، أنظر الشكل (25). فقوة الاحتكاك السكوني تساعدنا في المشي، وتغيير اتجاه حركتنا؛ فعندما أدفعُ بقدمي سطح الأرض إلى الخلف فإن قوة الاحتكاك السكوني بينهما تؤثر بقوة في قدمي إلى الأمام في اتجاه حركتي، وتمنع انزلاقها نحو الخلف. وتوضح أهمية الاحتكاك السكوني عند محاولة المشي على سطوح ملساء أو زلقة، حيث يصعب ذلك.

#### سلبيات قوى الاحتكاك Disadvantages of Friction Forces

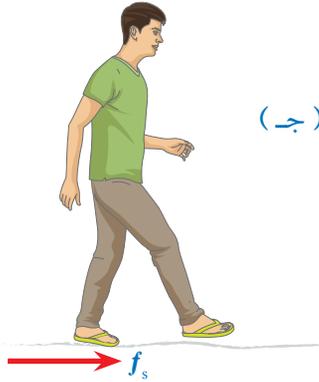
من الآثار السلبية لقوى الاحتكاك: أنها تسبب تآكل بعض المنتجات التي نستخدمها في حياتنا اليومية، مثل الأحذية، والملابس، وتسبب تآكل بطانة مكابح المركبات. بالإضافة إلى أنها تعيق انزلاق الأجسام بعضها فوق بعض، وتسبب تباطؤها؛ ما يتطلب التأثير فيها بقوة أكبر لتحريكها والمحافظة على استمراريتها مقارنةً بالقوة اللازمة لذلك على سطوح ملساء. وتجري معالجة بعض هذه الآثار والتقليل منها باستخدام العجلات، والتزييت، والتشحيم، أنظر الشكل (26).



(أ)



(ب)



(ج)

الشكل (25): قوى الاحتكاك ضرورية:

(أ) للكتابة على الورق، (ب) وإشعال عود الثقاب، (ج) والمشي.

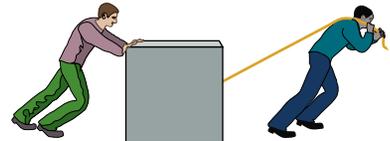
سؤال: لماذا لا يمكن المشي على أرضية زلقة؟ أفسر إجابتي.

الشكل (26): عند استخدام العجلات أصبح تحريك الصندوق في الشكل (ب) أسهل بكثير من تحريكه في الشكل (أ). (ج) تستخدم كرات البيليا (Ball bearings) لتسهيل حركة أجزاء الآلات وتقليل الاحتكاك. (د) يوضع الزيت في محرك السيارة للتقليل من قوى الاحتكاك.

سؤال: هل يلزم تشحيم كرات البيليا وتزييتها؟ أفسر إجابتي.



(د)



(أ)



(ب)



(ج)

**الفيزياء والطب:** تسمى المناطق التي تجمَع اثنيْنِ أو أكثر من العظام في جسم الإنسان المفاصلَ (Joints)، معظمُ المفاصل تكون متحركة؛ مما يسمح للعظام بالحركة. ونتوقع أن يوجد احتكاك عند هذه المفاصل؛ لأنها ترتبط مواد صلبة معًا. في الواقع تكون قوى الاحتكاك بين العظام في منطقة المفصل قليلة جدًا؛ لأنَّ سطوح العظام في منطقة المفصل مغطاة بغضاريف، إضافةً إلى وجود غشاء زلاحي يفرز مائعًا لزجًا يسمى السائل الزلاحي (Synovial fluid) داخل المفصل، إذ يُعدُّ هذا السائل بمنزلة مادة تشحيم، يقلل الاحتكاك، ويحمي العظام من التآكل.



الشكل (27): صورة بالأشعة السينية لمفصل ركبتي ملتهب مصاب بهشاشة عظام، ومفصل ركبتي صناعي.

عند تعرض المفصل للتلف يُستخدم مفصل صناعي (Artificial joint) مكانه، يُصنع من الفولاذ المقاوم للصدأ أو التيتانيوم، أو البلاستيك. ولهذه المفاصل الصناعية معاملات احتكاك صغيرة جدًا، تشبه المفاصل الطبيعية تقريبًا، أنظر الشكل (27). وتستخدم فيه مواد تشحيم صناعية، مثل المواد الهلامية (Gels)؛ لتقليل الاحتكاك. أيضًا توجد مواد لزجة طبيعية (أو مواد تشحيم Lubricants) في جسم الإنسان تقلل من قوى الاحتكاك داخل الأعضاء أو بينها. فمثلًا، يُساعد إفراز اللعاب في عملية البلع؛ إذ يقلل من احتكاك المواد الغذائية التي يجري تناولها مع جدران البلعوم والمريء، ويُسهل انزلاقها. كما يُساعد وجود مخاط لزج (Slippery mucus) بين أعضاء الجسم على حرية حركتها نسبةً إلى بعضها في أثناء حركة الإنسان، وفي أثناء عمليتي التنفس، وخفقان القلب.

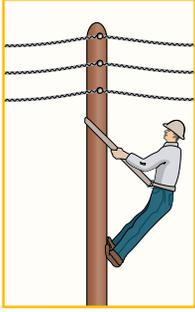
✓ **أتحقَّق:** أذكر ثلاث إيجابيات لقوة الاحتكاك، وثلاث سلبيات.

**أبحثُ:** لقوى الاحتكاك آثارٌ إيجابية، وآثارٌ سلبية. أبحث في مصادر المعرفة الموثوقة والمتاحة ومنها شبكة الإنترنت عن المزيد من إيجابيات قوى الاحتكاك وسلبياتها، وعن كيفية معالجة سلبياتها وتقليل آثارها. وأعدُّ عرضًا تقديميًا أعرضه أمام طلبة الصف.

## مراجعةُ الدرس

1. **الفكرةُ الرئيسةُ:** ما المقصودُ بكلِّ من: قوةُ الشدِّ، القوةُ العمودية، قوةُ الاحتكاكِ؟ وهل وجودُ الاحتكاكِ إيجابيٌّ أم سلبِيٌّ؟ أفسِّرْ إجابتي.

2. **أحلِّلْ وأستنتج:** يوضِّحُ الشكلُ المجاورُ تسلُّقَ عاملِ صيانةٍ في شركةِ الكهرباءِ لعمودِ كهرباءٍ؛ إذ ينتعلُ حذاءً بمواصفاتٍ خاصةٍ، وأيضًا يستخدمُ حزامًا أحدُ طرفيهِ ملتفٌ حولَ خصره، وطرفهُ الآخرُ ملتفٌ حولَ العمودِ.



- أ. أرسمُ مخططَ الجسمِ الحرِّ لعاملِ الصيانةِ، مسمِّيًا القوى المؤثرةَ فيه.  
 ب. **أفسِّر:** هل يعتمدُ هذا العاملُ في صعودهِ العمودَ على قوةِ الاحتكاكِ السكونيِّ أم الحركيِّ؟ أفسِّرْ إجابتي.  
 ج. أحدِّدْ موقعينِ في الشكلِ تؤثرُ فيهما قوةُ الاحتكاكِ في العاملِ، وأوضِّحْ أهميتهما.

3. **أطبِّق:** يبيِّنُ الشكلُ المجاورُ ميزانًا نابضيًّا معلقًا في نهايتهِ ثقلٌ ( $m$ )، كتلتهُ ( $10 \text{ kg}$ ). إذا علمتُ أن  $g = 10 \text{ m/s}^2$ ، فأجدُ قراءةَ الميزانِ في الحالاتِ الآتية:



- أ. إذا كانَ الثقلُ ساكنًا.  
 ب. إذا تحركَ الثقلُ والميزانُ إلى أعلى بسرعةٍ متجهةٍ ثابتةٍ.  
 ج. إذا تحركَ الثقلُ والميزانُ إلى أعلى بتسارعٍ مقدارهُ ( $1 \text{ m/s}^2$ ).  
 د. إذا تحركَ الثقلُ والميزانُ إلى أسفلَ بتسارعٍ مقدارهُ ( $1 \text{ m/s}^2$ ).

4. **أحسب:** صندوقٌ كتلتهُ ( $30 \text{ kg}$ ). أحسبُ مقدارَ القوةِ العموديةِ المؤثرةِ فيه عندما يكونُ مستقرًّا على:

- أ. سطحٍ أفقيٍّ.  
 ب. مستوًى مائلٍ يميلُ عن الأفقِ بزاويةٍ ( $20^\circ$ ).

5. **التفكيرُ الناقدُ:** في أثناءِ دراستي وزميلتي شيماءَ لموضوعِ قوى الاحتكاكِ، قالت: «إنَّ زيادةَ عرضِ إطارِ السيارةِ يزيدُ من قوةِ الاحتكاكِ المؤثرةِ فيها؛ لذا ينبغي على السائقينَ استخدامَ إطاراتٍ أقلَّ عرضًا؛ لتقليلِ احتكاكِها بالطريقِ». أناقشُ صحَّةَ قولِ شيماءَ بناءً على ما تعلمتُه في هذا الدرسِ.

## القوة المركزية والحركة الدائرية المنتظمة

### Centripetal Force and Uniform Circular Motion

درست في الوحدة (2) الحركة الدائرية المنتظمة، وعرفت أنها حركة جسم أو جسيم بسرعة ثابتة المقدار في مسارٍ دائري نصف قطره ( $r$ ) حول محور، ويُحدّد موقعه بالنسبة إلى هذا المحور (محور الدوران). وأن متجه السرعة المماسية عند أيّة نقطة على المسار يكون مماسياً للمسار عند تلك النقطة، ومتعامداً مع متجه الموقع الخاص بها.

هل يلزم تأثير قوة محصلة في الجسم؛ لكي يتحرك حركة دائرية منتظمة؟

للإجابة عن ذلك؛ أنظر سيارات السباق الموضحة في الشكل (28) عند المنعطف. ألاحظ أن كل سيارة تتحرك في مسارٍ منحني عند المنعطف، وهو يمثل جزءاً من دائرة، وبحسب القانون الأول لنيوتن، تتحرك السيارات في مسارٍ مستقيم بسرعة ثابتة ما لم تؤثر فيها قوة محصلة، وبما أن مساراتها غير مستقيمة؛ فهي تتأثر بقوة محصلة.

لندرس حركة إحدى هذه السيارات عند المنعطف، ونفترض أنها تتحرك بسرعة مماسية ثابتة مقداراً. إن اتجاه هذه السرعة يتغير بشكل مستمر، ويدل تغيرها على وجود تسارع، وبحسب القانون الثاني لنيوتن، فإن وجود التسارع يعني وجود قوة محصلة تؤثر فيها.

#### الفكرة الرئيسة:

تؤثر قوة مركزية في الأجسام التي تتحرك حركة دائرية. وللحركة الدائرية تطبيقات كثيرة في حياتنا اليومية.

#### نتائج التعلم:

- أستنتج أن الحركة الدائرية لجسم تتطلب تأثير قوة فيه باستمرار، نحو مركز المسار الدائري.
- أستقصي العوامل التي يعتمد عليها مقدار القوة المركزية.
- أطبق بحل مسائل على القوة المركزية.

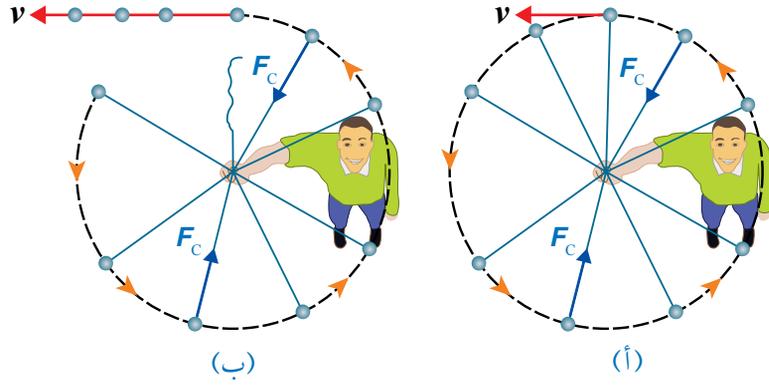
#### المفاهيم والمصطلحات:

القوة المركزية Centripetal Force

الشكل (28): لكي يتحرك السيارات في المنعطف، يلزم تأثير قوة محصلة فيها نحو مركز المسار الدائري الذي يشكله المنعطف.



الشكل (29): منظر علويّ لكرةٍ مربوطةٍ  
بنهاية خيطٍ تتحركُ حركةً دائريةً منتظمةً  
في مسارٍ دائريٍّ أفقيٍّ.  
(أ) تؤثرُ قوةٌ مركزيةٌ في الكرة نحو مركز  
مسارها الدائريِّ. (ب) عند انقطاع الخيط  
تندعمُ القوةُ المركزيةُ، وتتحركُ الكرةُ في  
اتجاه سرعتها المماسية للمسار الدائريِّ  
عند نقطة انقطاع الخيط.

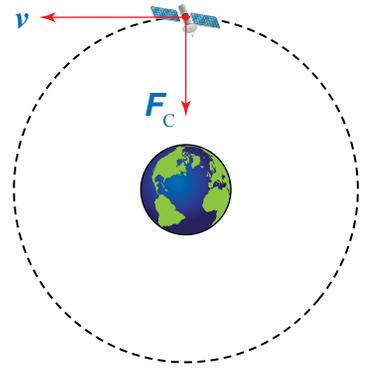


### القوة المركزية ومنشؤها Centripetal Force and Its Origin

ما القوة المحصلة؟ وما مصدرها؟ للإجابة عن ذلك؛ أنظرُ  
الشكل (29/أ)، الذي يوضحُ كرةً كتلتها ( $m$ )، مربوطةً بنهاية خيطٍ  
طوله ( $l$ )، تتحركُ حركةً دائريةً منتظمةً في مسارٍ دائريٍّ أفقيٍّ تقريباً،  
بسرعةٍ مماسيةٍ ثابتةٍ مقداراً ( $v$ ). بحسبِ القانونِ الأولِ لنيوتن تميلُ  
الكرةُ إلى الحركةِ في مسارٍ مستقيمٍ مماسيٍّ للمسارِ الدائريِّ؛ بسببِ  
قصورها الذاتيِّ. وللمحافظةِ على استمرارِ حركتها حركةً دائريةً  
منتظمةً يلزمُ تأثيرُ قوةٍ محصلةٍ فيها نحو مركزِ المسارِ الدائريِّ، يكونُ  
اتجاهها عمودياً على اتجاه سرعتها المماسية، تُسمى القوةُ المركزيةُ  
Centripetal force، رمزها ( $F_c$ )، تُسببُ تغييراً في سرعتها المتجهة، أي  
تُكسبها تسارعاً مركزياً. وإذا انقطع الخيطُ عند نقطةٍ معينةٍ على المسارِ  
الدائريِّ ستتحركُ الكرةُ في مسارٍ مستقيمٍ مماسياً للمسارِ الدائريِّ عند  
تلك النقطة، بحسبِ القانونِ الأولِ لنيوتن. أنظرُ الشكل (29/ب).

والسؤال: هل القوة المركزية نوعٌ جديدٌ من أنواع القوى؟ وما منشأُ  
هذه القوة؟ إنَّ القوةَ المركزيةَ ليستُ نوعاً جديداً من القوى، وإنما هي  
اسمٌ يُطلقُ على القوةِ المحصلةِ المؤثرةِ عمودياً على متجهِ السرعةِ  
المماسيةِ لجسمٍ متحركٍ في مسارٍ دائريٍّ.  
أما أصلُ هذه القوةِ ومنشؤها فيعتمدُ على الحالةِ الفيزيائيةِ الواقعةِ  
قيدَ الدراسةِ. فمثلاً، القوةُ المركزيةُ المسببةُ لدورانِ القمرِ الصناعيِّ في  
مدارٍ حولَ الأرضِ ناتجةٌ عن قوةِ تجاذبٍ كتليٍّ بين القمرِ والأرضِ.

ويكون اتجاه سرعة القمر الصناعي عند أيّ موقع في مساره في اتجاه المماسّ لذلك الموقع. أنظر الشكل (30) الذي يوضح متجهي السرعة المماسية والقوة المركزية.

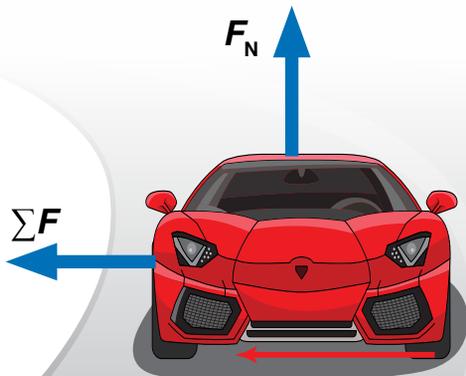


الشكل (30): القوة المركزية هي قوة التجاذب الكتلي بين الأرض والقمر الصناعي، وتؤثر عمودياً على اتجاه سرعة القمر.

والقوة المركزية المسببة لدوران الإلكترونات حول النواة ناتجة عن قوة جذب كهروسكونية بين النواة والإلكترونات. وقوى الشد في الحبال والأسلاك المتصلة بأجسام تتحرك حركة دائرية مثال على قوى مركزية. والقوة المركزية المؤثرة في الملابس الموضوعة في مجففة الملابس ناتجة عن القوة العمودية التي تؤثر بها جدران المجففة فيها.

إن القوة المركزية التي تمنع سيارة السباق الموضحة في الشكل (31) من الانزلاق خارج المنعطف خلال مسار السباق، هي قوة جانبية منشؤها قوة الاحتكاك السكوني بين إطاراتها وسطح الطريق، تؤثر نحو مركز الدائرة التي يُعد المنعطف جزءاً منها. ويستقي سائقو سيارات السباق ومصمموها القيم القصوى لهذه القوة للحصول على أكبر سرعات ممكنة عند المنعطفات؛ للمنافسة على صدارة السباقات. وعند انعدام قوة الاحتكاك السكوني، كأن يكون الطريق مغطى بالجليد أو الزيت، فإنه وبحسب القانون الأول لنيوتن في الحركة سوف تتحرك السيارة بسرعة ثابتة مقداراً في مسار مستقيم مماسي للمسار الدائري عند موقع انعدام القوة المركزية.

✓ **أتحقّق:** ما القوة المركزية؟ وهل القوة المركزية نوع جديد من القوى؟ أفسّر إجابتي.



الشكل (31): القوة المركزية هي قوة الاحتكاك السكوني بين إطارات السيارة وسطح الطريق، وتؤثر نحو مركز المسار الدائري، عمودياً على اتجاه سرعة السيارة.

## حساب القوة المركزية Calculating Centripetal Force

يُكتب القانون الثاني لنيوتن في الحركة في حال ثبات الكتلة في الصورة:

$$\Sigma F = ma$$

وفي حالة الحركة الدائرية المنتظمة، فإن القوة المحصلة نحو مركز الدوران تساوي القوة المركزية ( $\Sigma F = F_c$ )؛ لذا يُمكن كتابة معادلة حساب مقدار القوة المركزية لجسم يتحرك حركة دائرية منتظمة في مسارٍ دائريٍّ نصف قطره ( $r$ )، وبسرعةٍ مماسيةٍ ( $v$ )، وتسارعٍ مركزيٍّ ( $a_c$ )، كما يأتي:

$$F_c = ma_c = m \frac{v^2}{r}$$

ويكون مقدار القوة المركزية ثابتاً في الحركة الدائرية المنتظمة، واتجاهها عمودياً على متجه السرعة المماسية. ولاستقصاء العوامل التي يعتمد عليها مقدار القوة المركزية اللازم التأثير بها في جسمٍ لكي يتحرك حركةً دائريةً منتظمةً؛ أنفذ التجربة الإثرائية (العوامل التي يعتمد عليها مقدار القوة المركزية) الواردة في كتاب الأنشطة والتجارب العملية.

واعتماداً على معادلة حساب القوة المركزية، يُمكن التوصل إلى أن مقدار القوة المركزية المؤثرة في جسم كتلته ( $m$ ) يتحرك حركةً دائريةً منتظمةً - يعتمد على:

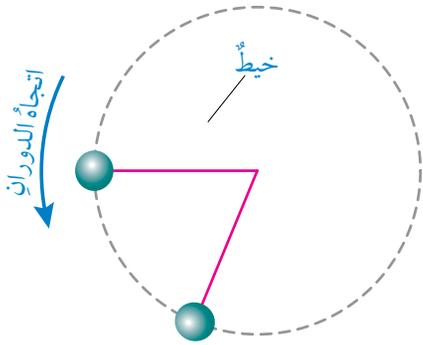
أ. نصف قطر المسار الدائري عند ثبات مقدار السرعة المماسية؛ حيث يلزم التأثير بقوة مركزية أكبر لجعل الجسم يتحرك في مسارٍ دائريٍّ نصف قطره أصغر. ففي الشكل (29)، يزداد مقدار القوة المركزية اللازمة لحركة الكرة في مسارٍ دائريٍّ أفقيٍّ بنقصان نصف قطر المسار الدائري عند ثبات مقدار السرعة المماسية. وبما أن قوة الشد في الخيط هي القوة المركزية، وتوجد قيمة قصوى لمقدار قوة الشد التي يتحملها الخيط قبل أن ينقطع، فيكون هنالك حدوداً لنصف قطر المسار.

ب. مربع مقدار السرعة المماسية عند ثبات نصف قطر المسار الدائري، حيث يلزم التأثير بقوة مركزية أكبر لجعل الجسم يتحرك في مسارٍ دائريٍّ بسرعةٍ أكبر. ففي الشكل (29)، يزداد مقدار القوة المركزية اللازمة لحركة الكرة في المسار الدائري الأفقي بزيادة مقدار سرعتها المماسية عند ثبات نصف قطر مسارها الدائري، ويكون هنالك حدوداً لمقدار السرعة المماسية.

✓ **أتتحقق:** علام يعتمد مقدار القوة المركزية اللازم التأثير بها في جسم يتحرك حركةً دائريةً منتظمةً؟

**أمُخَر:** عندما يجلس شخص في سيارة تتحرك خلال منعطفٍ حادٍّ، فإنه يشعر أنه توجد قوة تدفعه إلى خارج المنعطف نحو باب السيارة، حيث يُسميها بعض الأشخاص قوة طاردة مركزية Centrifugal force. وعندما تُدور كرةً مربوطةً بنهاية خيطٍ في مسارٍ دائريٍّ أفقيٍّ تشعر أنه توجد قوة تؤثر فيها خارج المسار. هل هذه القوة حقيقية، أم قوة وهمية؟ أفسر إجابتي.

**ملاحظة:** يُساعد رسم مخطط الجسم الحر لراكب السيارة أو الكرة في استقصاء حقيقة هذه القوة.



الشكل (32): منظرٌ علويٌّ لكرةٍ مربوطةٍ في نهاية خيطةٍ.

كرةٌ كتلتها (50 g) مربوطةٌ في نهاية خيطةٍ طولها (100 cm)، تتحركُ حركةً دائريةً منتظمةً في مسارٍ دائريٍّ أفقيٍّ، كما هو موضحٌ في الشكل (32). فإذا علمتُ أنَّ الزمنَ الدوريَّ للكرة (0.5 s)، فأحسبُ مقدارَ:

- سرعتها المماسية.
- تسارعها المركزي.
- القوة المركزية فيها.
- قوة الشد في الخيطة.

المعطيات:

$$m = 50 \text{ g} = 0.05 \text{ kg}, r = l = 100 \text{ cm} = 1 \text{ m}, T = 0.5 \text{ s}$$

المطلوب:

$$v = ?, a_c = ?, F_c = ?, F_T = ?$$

الحل:

أ . لإيجاد مقدار السرعة المماسية نستخدمُ العلاقة الآتية: ، علمًا بأن طول المسار الدائري يساوي  $(2\pi r)$ :

$$v = \frac{2\pi r}{T} \\ = \frac{2(3.14)(1)}{0.5} = 12.6 \text{ m/s}$$

ب . لإيجاد مقدار التسارع المركزي نستخدمُ العلاقة الآتية:

$$a_c = \frac{v^2}{r} \\ = \frac{(12.6)^2}{1} = 158.8 \text{ m/s}^2$$

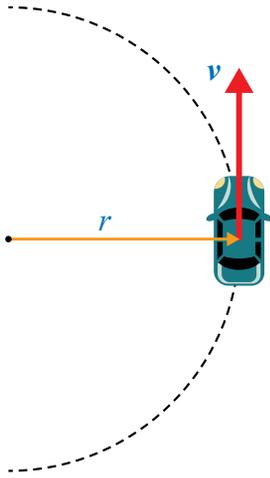
ج . لإيجاد مقدار القوة المركزية نستخدمُ العلاقة الآتية:

$$F_c = m a_c \\ = (0.05)(158.8) \\ = 7.9 \text{ N}$$

د . قوة الشد في الخيطة هي نفسها القوة المركزية:

$$F_T = F_c = 7.9 \text{ N}$$

## المثال 11



الشكل (33): منظرٌ علويٌّ لسيارةٍ تتحركُ في مسارٍ دائريٍّ.

تتحركُ سيارةٌ كتلتها  $(1.5 \times 10^3 \text{ kg})$  في مسارٍ دائريٍّ نصف قطره  $(50 \text{ m})$  بسرعةٍ ثابتةٍ مقدارها  $(15 \text{ m/s})$ ، كما هو موضَّحُ في الشكل (33). إذا كان معامل الاحتكاك السكوني بين إطارات السيارة وسطح الطريق  $(0.8)$ ، وسطح الطريق أفقيًّا، فأحسب مقدار:

- التسارع المركزي للسيارة.
- القوة المركزية المؤثرة في السيارة.
- أكبر سرعة يمكن أن تتحرك بها السيارة دون أن تنزلق.

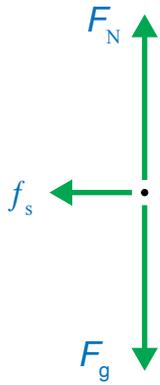
المعطيات:

$$m = 1.5 \times 10^3 \text{ kg}, r = 50 \text{ m}, v = 15 \text{ m/s}, \mu_s = 0.8$$

المطلوب:

$$a_c = ?, F_c = ?, v_{\max} = ?$$

الحل:



بدايةً، أرسمُ مخططَ الجسم الحرِّ للسيارة، حيثُ تؤثرُ فيها القوى الآتية: وزنها  $(F_g)$  رأسياً إلى أسفل، والقوة العمودية  $(F_N)$  التي يؤثرُ بها سطح الطريق الأفقيُّ في السيارة وتكونُ رأسياً إلى أعلى، وقوة الاحتكاك السكوني  $(f_s)$  بين إطارات السيارة وسطح الطريق، وتكونُ نحوَ مركزِ المسارِ الدائريِّ، وقوة دفعِ محركِ السيارة إلى الأمام في اتجاهِ الحركة، وقوة احتكاكٍ حركيٍّ بين السيارة والهواء في عكس اتجاهِ الحركة. ورُسمت القوى المؤثرة عمودياً على اتجاهِ الحركة فقط في مخططِ الجسم الحرِّ للتبسيط.

أ. لإيجاد مقدار التسارع المركزي للسيارة؛ نستخدمُ العلاقة الآتية:

$$a_c = \frac{v^2}{r} = \frac{(15)^2}{50} = \frac{225}{50} \\ = 4.5 \text{ m/s}^2$$

ب. لإيجاد مقدار القوة المركزية المؤثرة في السيارة؛ نستخدمُ العلاقة الآتية:

$$F_c = ma_c = (1.5 \times 10^3)(4.5) \\ = 6.75 \times 10^3 \text{ N}$$

جـ. لإيجاد مقدار أكبر سرعة؛ يجب بدايةً حساب قوة الاحتكاك السكوني العظمى المؤثرة في السيارة، ومن أجل ذلك يجب إيجاد القوة العمودية المؤثرة في السيارة مع ملاحظة أن سطح الطريق أفقي. لذا، نطبق القانون الثاني لنيوتن في اتجاه المحور  $y$ ، مع ملاحظة أنه لا توجد حركة في اتجاهه.

$$\sum F_y = ma_y = 0$$

$$F_N - F_g = 0$$

$$F_N = F_g = mg = (1.5 \times 10^3)(10) \\ = 1.5 \times 10^4 \text{ N}$$

ثم نحسب مقدار قوة الاحتكاك السكوني العظمى المؤثرة في السيارة، وهي منشأ القوة المركزية..

$$f_{s,\max} = \mu_s F_N = (0.8)(1.5 \times 10^4) \\ = 1.2 \times 10^4 \text{ N} = F_C$$

سوف تتحرك السيارة في المسار الدائري بأكبر سرعة ممكنة إذا كانت قوة الاحتكاك السكوني العظمى المؤثرة فيها مساوية للقوة المركزية؛ أي أن:

$$F_C = f_{s,\max}$$

$$\frac{mv_{\max}^2}{r} = 1.2 \times 10^4$$

$$v_{\max}^2 = \frac{r \times 1.2 \times 10^4}{m} = \frac{(50)(1.2 \times 10^4)}{1.5 \times 10^3} = 400$$

$$v_{\max} = 20 \text{ m/s}$$

## تمرين

1. في المثال 10، أحسب مقدار أكبر سرعة مماسية يمكن أن تتحرك بها الكرة إذا علمت أن مقدار أكبر قوة شد يتحملها الخيط قبل أن ينقطع تساوي (10 N).
2. سيارة كتلتها  $(1.5 \times 10^3 \text{ kg})$ ، تتحرك في مسار دائري نصف قطره (90 m) بسرعة ثابتة مقدارها (50 km/h). إذا كان معامل الاحتكاك السكوني بين إطارات السيارة وسطح الطريق (0.6)، وسطح الطريق أفقي، فأحسب مقدار:
  - أ. القوة المركزية المؤثرة في السيارة.
  - ب. أكبر سرعة يمكن أن تتحرك بها السيارة على هذا الطريق دون أن تنزلق.

## مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** ما المقصود بالقوة المركزية؟ وهل هي نوعٌ جديدٌ من القوى؟ أفسر إجابتي.
2. **أستخدم المتغيرات:** متوسط نصف قطر مدار القمر حول الأرض ( $3.8 \times 10^8$  m) تقريباً، وسرعته المماسية المتوسطة ( $1.0 \times 10^3$  m/s)، وكتلته ( $7.3 \times 10^{22}$  kg) تقريباً.
  - أ. **أحسب** زمنه الدوري في مداره.
  - ب. **أحسب** مقدار تسارعه المركزي.
  - ج. ما منشأ القوة المركزية المؤثرة فيه، واللازمة لدورانه في مداره؟
  - د. **أحسب** مقدار القوة المركزية المؤثرة فيه.
3. **أستخدم المتغيرات:** سيارة كتلتها ( $1.1 \times 10^3$  kg)، تتحرك بسرعة ( $12$  m/s) في منعطف نصف قطره ( $25$  m).
  - أ. **أحسب** مقدار التسارع المركزي للسيارة.
  - ب. **أحسب** مقدار القوة المركزية المؤثرة في السيارة.
  - ج. ما منشأ القوة المركزية المؤثرة في السيارة؟
  - د. **أحسب** مقدار أكبر سرعة مماسية يمكن أن تتحرك بها السيارة في هذا المنعطف؛ إذا كان مقدار قوة الاحتكاك السكوني العظمى المؤثرة نحو مركز المنعطف ( $8$  kN).
4. **أحسب:** قمرٌ صناعيٌ كتلته ( $5.5 \times 10^2$  kg)، يدور حول الأرض على ارتفاع ( $2.1 \times 10^3$  km) من سطح الأرض. إذا كان الزمن الدوري للقمر ساعتين وتسع دقائق، ونصف قطر الأرض ( $6.38 \times 10^3$  km)، فأحسب مقدار:
  - أ. السرعة المماسية للقمر.
  - ب. القوة المركزية المؤثرة في القمر.
5. **أصدر حكماً:** في أثناء دراستي وزميلتي فاتنَ لموضوع القوة المركزية، قالت: «يجب على سائق سيارة السباق التي تتحرك على طريق أفقي لمنعطف - زيادة مقدار سرعة السيارة؛ لزيادة مقدار القوة المركزية المؤثرة فيها، وبالتالي المحافظة على استقرارها وعدم انزلاقها». أناقش صحة قول فاتن.

تصمَّم المنعطفات الحادَّة في مسارات سباقات الدراجات والسيارات؛ بحيث تكون مائلة. والطرق العامة، أيضًا تُصمَّم بحيث تتضمن قدرًا من الميلان عند المنعطفات، خاصةً الخطرة منها. فما أهمية هذا التصميم؟

عندما تدخل سيارة منعطفًا طريقه أفقي فإن قوة الاحتكاك السكوني الجانبي بين إطاراتها وسطح الطريق توفر القوة المركزية اللازمة لحركتها فيه دون أن تنزلق خارج المنعطف. فلا يمكن أن تتحرك السيارة في منعطف أفقي إلا بوجود قوة احتكاك جانبي تؤثر نحو مركز المنعطف.

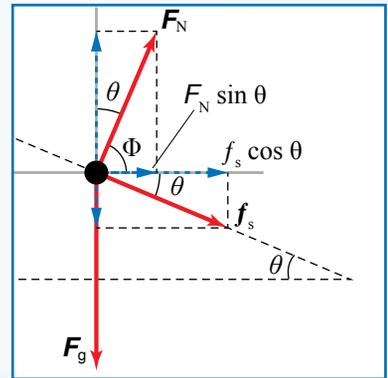
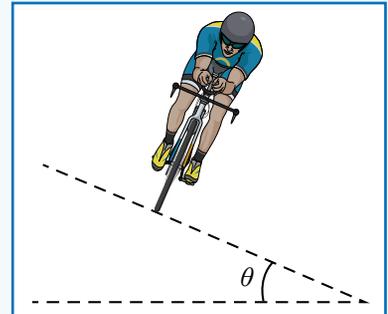
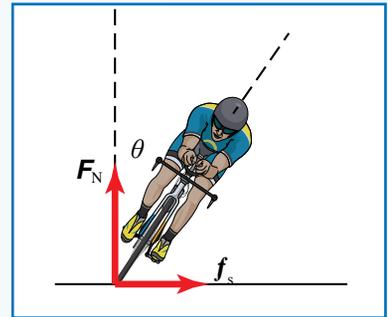
كذلك عندما تدخل دراجة هوائية منعطفًا، فإن راكبها يدير مقودها لبدء الاستدارة في المنعطف، فتوفر قوة الاحتكاك الجانبي القوة المركزية نحو مركز المسار الدائري الذي يُشكِّله المنعطف.

إذا زادت سرعة السيارة أو الدراجة في المنعطف يزداد مقدار القوة المركزية اللازمة لإبقائها داخله، وضمان عدم انزلاقها خارجة. وإذا زادت سرعتها بحيث أصبحت القوة المركزية اللازمة لإبقائها داخل المنعطف أكبر من القيمة العظمى لقوة الاحتكاك السكوني الجانبي، فإنها ستنزلق خارج المنعطف، وقد يسقط راكب الدراجة. من أجل ذلك تُصمَّم المنعطفات بشكل مائل، فما فائدة ذلك؟

عند دخول دراجة منعطفًا يميل بزاوية  $(\theta)$  على الأفقي، فإن القوة العمودية المؤثرة فيها، لها مركبة أفقية نحو مركز المسار الدائري الذي يُشكِّله المنعطف، لذا؛ فهي تساهم في القوة المركزية إضافةً إلى قوة الاحتكاك السكوني الجانبي. وهذا يعني أن السيارات والدراجات يمكن أن تتحرك بسرعات أكبر في المنعطفات المائلة قبل أن تنزلق إطاراتها مقارنةً بالمنعطفات غير المائلة. وتُعطي القوة المركزية في حالة المنعطفات المائلة بالعلاقة:

$$\frac{mv^2}{r} = F_N \sin \theta + f_s \cos \theta$$

وتجدر الإشارة إلى أن تلك المنعطفات تُمكن السيارات من التحرك فيها حتى في حالة انعدام قوة الاحتكاك؛ نتيجةً لوجود مركبة للقوة العمودية نحو مركز المنعطف، التي توفر القوة المركزية المطلوبة لضمان الحركة الدائرية.

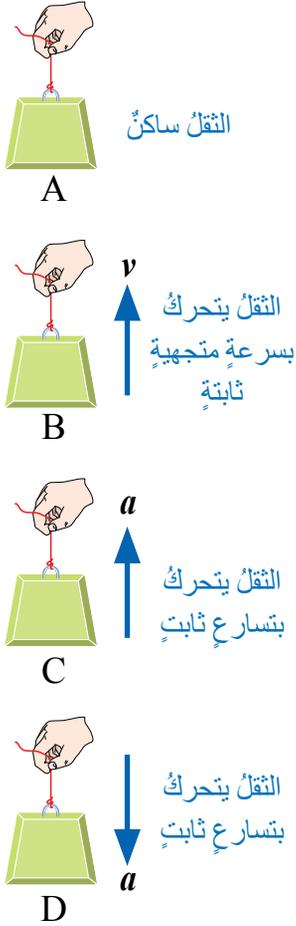


**أبدن** مستعيناً بمصادر المعرفة الموثوقة والمتاحة ومنها شبكة الإنترنت، أبحث عن منعطفات مُصمَّمة بشكل مائل في منطقتي، وأعدُّ وأفرد مجموعتي تقريراً مدعماً بالصور عن مزايا هذه المنعطفات. كذلك أبحث - بمساعدة أفراد مجموعتي - عن منعطفات خطيرة لم تُصمَّم بشكل مائل، وأكتب رسالةً إلى الجهات المسؤولة - بوساطة إدارة مدرستي - أشرح لهم ضرورة إعادة تصميم هذا المنعطف ليصبح مائلاً، وأوضح فيها أهمية ذلك في تقليل حوادث السيارات والحفاظ على حياة المواطنين وممتلكاتهم.

## مراجعة الوحدة

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

1. قوة ناتجة عن تلامس جسمين، وتكون دائماً عمودية على مستوى التلامس بينهما، إنها:  
أ. القوة العمودية ب. قوة الشد ج. الوزن د. قوة التجاذب الكتلّي
2. القوة العمودية المؤثرة في صندوق كتلته (20 kg) يستقر على سطح طاولة أفقي هي:  
أ. 20 N بشكل مواز لسطح الطاولة.  
ب. 20 N إلى أعلى عمودياً على سطح الطاولة.  
ج. 200 N بشكل مواز لسطح الطاولة.  
د. 200 N إلى أعلى عمودياً على سطح الطاولة.



توضّح الأشكال المجاورة ثقلاً مقدارُه (10 kg) معلقاً في الهواء في إحدى نهايتي خيطٍ خفيفٍ غير قابلٍ للاستطالة، ويُمسكُ شخصٌ طرفه الآخر. أستعينُ بهذه الأشكالٍ للإجابة عن الأسئلة 3 - 5:

3. شكلان قوتا الشدّ فيهما متساوية، وتساوي وزنَ الثقل، هما:  
أ. A و B ب. B و C ج. A و C د. A و D

4. في أيّ الأشكال قوة الشدّ في الحبل هي الأكبر؟

- أ. A ب. B ج. C د. D

5. في أيّ الأشكال قوة الشدّ في الحبل هي الأصغر؟

- أ. A ب. B ج. C د. D

6. القوة التي تجذب الأرضُ بها الجسمَ تسمى:

- أ. قوة الشدّ ب. قوة الاحتكاك ج. الوزن د. القوة العمودية

يتحرك قمرٌ صناعيٌّ حول الأرض حركةً دائريةً منتظمةً في مدارٍ دائريٍّ، ويوضح الشكل المجاور القمر الصناعي عند أحد مواقعه في المدار. أستعينُ بالشكل للإجابة عن الأسئلة 7 - 10.

7. القوة المحصلة المؤثرة في القمر الصناعي هي:

- أ. قوة عمودية، في اتجاه A ب. قوة مماسية، في اتجاه B ج. قوة طردٍ مركزيٍّ، في اتجاه C د. قوة مركزية، في اتجاه D

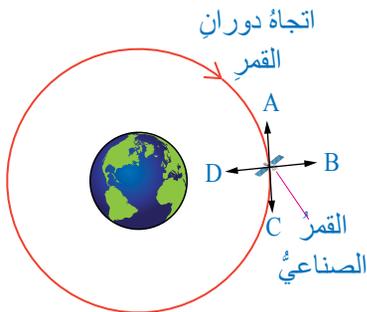
8. إذا انعدمت القوة المؤثرة في القمر الصناعي، فإنه سيتحرك في اتجاه السهم:

- أ. A ب. B ج. C د. D

9. منشأ القوة المحصلة المؤثرة في القمر الصناعي هو قوة:

- أ. احتكاك ب. قوة عمودية ج. تجاذبٍ كتليٍّ د. شدّ

10. إذا تضاعفت المسافة بين مركزي الأرض والقمر الصناعي مرتين،



فإن قوة التجاذب الكتلي بينهما:

أ. تصبح ربع قيمتها الابتدائية. ب. تتضاعف أربع مرات.

ج. تصبح نصف قيمتها الابتدائية. د. تتضاعف مرتين.

11. مسبار (مجس) فضائي (space probe) على بُعد معين من الأرض. إذا كان وزن جسم موجود في المسبار (3.5 N)، وتسرّع السقوط الحر في موقع المسبار ( $7 \text{ m/s}^2$ )، فإن كتلة هذا الجسم ووزنه على سطح الأرض على الترتيب:

أ. 3.5 N، 0.5 kg ب. 5 N، 0.5 kg ج. 3.5 N، 2 kg د. 20 N، 2 kg

12. يوضح الشكل المجاور منظرًا علويًا لسيارة تتحرك في مسار دائري أفقي

بسرعة ثابتة مقدارًا. بناءً على ما سبق؛ فأَيُّ الجمل الآتية صحيحة؟

أ. القوة المحصلة المؤثرة في السيارة تساوي صفرًا؛ لأنها تتحرك

بسرعة ثابتة.

ب. القوة المحصلة المؤثرة في السيارة لا تساوي صفرًا، وتؤثر فيها

نحو خارج المسار.

ج. القوة المحصلة المؤثرة في السيارة لا تساوي صفرًا، وتؤثر فيها

نحو مركز المسار.

د. القوة المحصلة المؤثرة في السيارة لا تساوي صفرًا، وتؤثر فيها

في اتجاه حركتها.

13. أيُّ الأشكال الموضحة في الشكل المجاور يُمثّل اتجاه تسارع الجاذبية

الأرضية؟

أ. A ب. B ج. C د. D

14. تستقر سيارة كتلتها ( $1.5 \times 10^3 \text{ kg}$ ) على طريق أفقي خشن. عند محاولة

سائقها تشغيلها لم يعمل المحرك، فساعدته شخص ودفع السيارة بقوة

أفقية مقدارها (400 N)، ولم يستطع تحريكها. أيُّ القوى الآتية تساوي

مقدار قوة دفع هذا الشخص:

أ. قوة الاحتكاك السكوني التي يؤثر بها سطح الطريق في قدمي الشخص.

ب. قوة الجاذبية المؤثرة في السيارة.

ج. القوة العمودية المؤثرة في السيارة.

د. قوة الاحتكاك الحركي التي يؤثر بها سطح الطريق في قدمي الشخص.

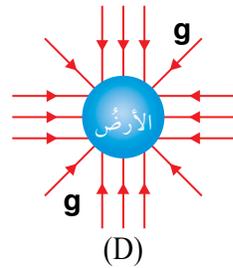
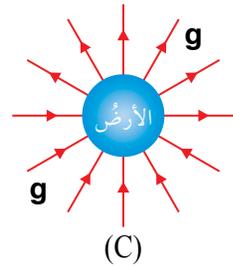
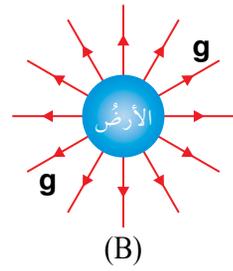
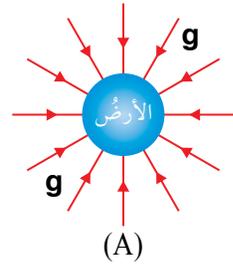
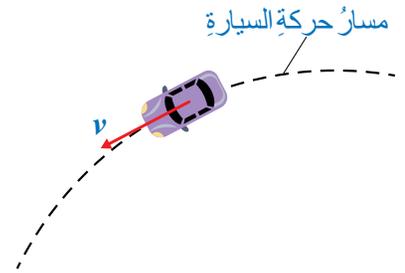
2. **أفسّر:** في أي اتجاه يؤثر التسارع المركزي؟ وهل يؤدي إلى تغيير مقدار

السرعة المماسية؟ أفسّر إجابتي.

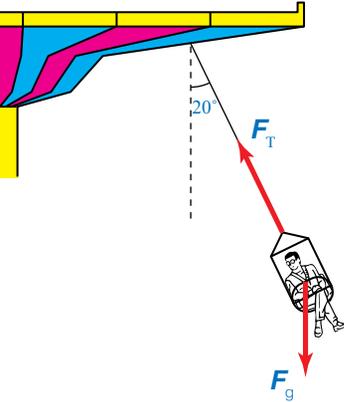
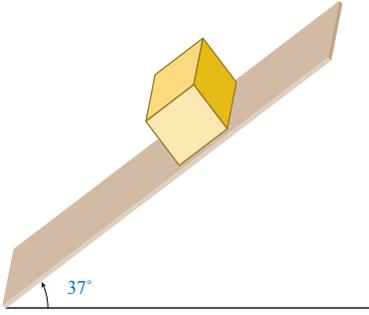
3. **أحدّد** منشأ القوة التي تسبب الحركة الدائرية للأجسام الآتية:

أ. حركة الأرض في مدار حول الشمس.

ب. حركة الملابس في حوض التجفيف الأسطواني في غسالة (أي مجففة الملابس).



## مراجعة الوحدة



ج . حركة كرة مربوطة في نهاية خيط في مسار دائري أفقي .  
د . حركة الإلكترون حول النواة .

4. **أحسب:** صندوق كتلته (2 kg)، ينزلق على مستوى مائل أملس، يميل على الأفقي بزاوية (37°)، كما هو موضح في الشكل المجاور. إذا علمت أن  $\sin 37^\circ = 0.6$ ،  $\cos 37^\circ = 0.8$ ، فأحسب:

أ . القوة العمودية المؤثرة في الصندوق. ب . تسارع الصندوق.  
5. **أحسب:** يدور قمر صناعي لتحديد المواقع (GPS) حول الأرض في مدار ارتفاعه  $(2.02 \times 10^7 \text{ m})$  فوق سطحها. إذا علمت أن كتلته  $(1.6 \times 10^3 \text{ kg})$ ، فأحسب:  
أ . قوة التجاذب الكلي بين القمر الصناعي والأرض.  
ب . تسارع الجاذبية الأرضية في موقع القمر الصناعي.  
6. **تفكير ناقد:** تزداد سيارات السباق بإطارات مسطحة (slick)؛ للسباق على طرق جافة، بينما تزداد بإطارات بها أخاديد للسباق على طرق مبتلة. أنظر الشكل المجاور.

أ . **أفسر** سبب استخدام كل نوع.  
ب . بما أن الاحتكاك يعتمد على طبيعة السطحين المتلامسين، فما أهمية الأخاديد في إطارات السيارة؟

7. **أحسب:** إذا علمت أن كتلة المشتري  $(1.9 \times 10^{27} \text{ kg})$  تقريبًا، ونصف قطره  $(7.15 \times 10^7 \text{ m})$  تقريبًا، فأحسب مقدار:  
أ . تسارع السقوط الحر على سطح المشتري.

ب . وزن هدى على سطح المشتري، إذا علمت أن كتلتها (60 kg).  
8. **أحلل:** يجلس راكب على كرسي أفعوانية معلق بسلسلة مهمة الكتلة متصلة بقرص دوار، كما هو موضح في الشكل المجاور. إذا علمت أن الأفعوانية تتحرك حركة دائرية منتظمة، وكتلة الراكب والكرسي (95 kg)، ونصف قطر المسار الدائري الذي يتحرك به الراكب والكرسي (4.5 m)، وتصنع السلسلة زاوية (20°) بالنسبة إلى الرأس، فأحسب مقدار:  
أ . قوة الشد في السلسلة.

ب . السرعة المماسية للراكب في الكرسي.  
9. **قمر صناعي** كتلته (135 kg) يدور في مدار منخفض حول الأرض على ارتفاع (250 km) من سطحها. إذا كان الزمن الدوري له (90 min)، وبافتراض أن مساره دائري؛ فأجب عما يأتي:

أ . **أحسب** مقدار السرعة المماسية للقمر الصناعي في مداره.  
ب . **أحسب** مقدار التسارع المركزي للقمر الصناعي.  
ج . **أحسب** مقدار القوة المركزية المؤثرة فيه.  
د . **أصف** منشأ القوة المركزية المؤثرة في القمر الصناعي.

10. **أحثلن:** في إحدى الألعاب الرياضية يدور لاعب مطرقة كتلتها (7.26 kg) متصلة بإحدى نهايتي سلسلة طولها (1.21 m) في مسار دائري أفقي، كما هو موضح في الشكل المجاور. واللاعب الفائز هو الذي يرميها إلى أبعد مسافة ممكنة. فإذا دار لاعب حول نفسه وهو ممسك بالطرف الحر للسلسلة على بُعد (0.64 m) من محور دورانه، وأكمل دورة كاملة خلال (0.55 s)، وبافتراض أن اللاعب حرك السلسلة والمطرقة في مسار دائري أفقي في أثناء دورانه، فأحسب مقدار:

أ. السرعة المماسية للمطرقة.

ب. القوة المركزية المؤثرة في المطرقة قبيل إفلاتها.

11. **أحسب:** تتحرك سيارة كتلتها ( $9 \times 10^2$  kg) في مسار دائري نصف قطره (70 m) بسرعة ثابتة مقداراً. إذا كان معامل الاحتكاك السكوني بين إطارات السيارة وسطح الطريق (0.70)، والقوة المركزية المؤثرة فيها ( $2.5 \times 10^3$  N)، وسطح الطريق أفقي، فأحسب مقدار:

أ. التسارع المركزي للسيارة.

ب. السرعة المماسية للسيارة.

ج. أكبر سرعة يمكن أن تتحرك بها السيارة على هذا الطريق دون أن تنزلق.

12. **أحسب:** يبين الشكل المجاور لعبة الحصان الدوار (دوامة الخيل) (carousel)، في إحدى مدن الألعاب؛ حيث تتحرك حركة دائرية منتظمة حول محور دوران. فإذا ركب طفل كتلته (30 kg) أحد الأحصنة الموجودة على اللعبة، وكان بعده عن محور الدوران (3 m)، والحصان يتم دورة كاملة كل (20 s)، فأحسب مقدار كل من:

أ. السرعة المماسية للطفل.

ب. القوة المركزية المؤثرة في الطفل.

ج. السرعة المماسية للطفل عندما يجلس على حصان آخر يبعد عن محور الدوران (4 m).

13. حلقت في أحد العروض الجوية إحدى طائرات سلاح الجو الملكي الأردني كتلتها ( $1.2 \times 10^4$  kg)، في مسار دائري أفقي نصف قطره (1 km)، بحيث أتمت الطائرة دورتين خلال (1 min). أجب عما يأتي:

أ. **أحسب** مقدار سرعتها المماسية.

ب. **أحسب** مقدار تسارعها المركزي.

ج. **أحسب** مقدار القوة المركزية المؤثرة في الطيار؛ إذا علمت أن كتلته (70 kg).

د. **أقارن** مقدار التسارع المركزي المؤثر في الطيار بتسارع السقوط الحر على سطح الأرض، ماذا أستنتج؟



# الموائع Fluids

## الوحدة

# 5

### أتأمل الصورة

قال الله تعالى: ﴿ وَمِنْ آيَاتِهِ الْجَوَارِ الْمُنشآتُ فِي الْبَحْرِ كَالْأَعْلَامِ ﴾. (سورة الرحمن، الآية 24)  
تعدُّ السفنُ والبواخرُ من آياتِ الله تعالى الدالة على قدرته وسلطانه، وهي من وسائلِ النقلِ البحريةِ الرئيسةِ والمهمّةِ؛ حيثُ تُستخدَمُ في عملياتِ نقلِ الركابِ والسياحِ و شحنِ البضائعِ والنفطِ بينَ الدولِ عبرَ البحارِ والمحيطاتِ، وتصلُ حمولتها إلى مئاتِ آلافِ الأطنانِ، ومع ذلكَ تطفو فوقَ سطحِ الماءِ ولا تغرقُ، فما الذي يجعلُ تلكَ السفنَ والبواخرَ تطفو على سطحِ الماءِ رغمَ أنها مصنوعةٌ من فلزِّ الحديدِ الذي لا يطفو على سطحِ الماءِ؟

## الفكرة العامة:

تختلف الموائع (السوائل والغازات) الساكنة عن الموائع المتحركة في خصائصها وسلوكها والمعادلات التي تصف حركتها، وكلاهما يلعب دوراً مهماً وحيوياً في حياتنا، إضافة إلى تطبيقاتها العملية في مختلف المجالات والتخصصات.

### الدرس الأول: الموائع الساكنة Static Fluids

**الفكرة الرئيسية:** يؤثر المائع الساكن في الأجسام المغمورة فيه كلياً أو جزئياً بقوة دفع تُسمى قوة الطفو.

### الدرس الثاني: الموائع المتحركة Fluids in Motion

**الفكرة الرئيسية:** للموائع المتحركة خصائص وسلوكات وتطبيقات خاصة بها، يمكن تفسيرها عن طريق معادلة الاستمرارية ومعادلة برنولي.

## تجربة استعلاية



### خصائص الموائع

**المواد والأدوات:** كأسان شفافتان، ماصة، مشرط، ورقتا رقائق ألومنيوم متماثلتان، ماء.  
**إرشادات السلامة:** الحذر في التعامل مع الأدوات الزجاجية والحادة.  
**خطوات العمل:** بالتعاون مع أفراد مجموعتي، أنفذ الخطوات الآتية:  
**الجزء الأول:**

- 1 ألاحظ:** أملأ الكأس الزجاجية بالماء، ثم أطوي إحدى رقائق الألومنيوم عدة طيات؛ حتى تصبح على شكل مكعب أو كرة مصمتة وأضعها على سطح الماء كما في الشكل، وألاحظ ما يحدث لها.
- 2 أصمم:** من رقيقة الألومنيوم الثانية شكلاً مجوفاً على شكل قارب بسيط مثلاً، وأضعه على سطح الماء. أدون ملاحظاتي حول ما يحدث للقارب.



### الجزء الثاني:

- 1 أضيف كمية من الماء في الكأس، وأستخدم المشرط في قطع الماصة إلى نصفين؛ بحيث يبقى نصفها معلقين معاً، وأثنيها لتكون الزاوية بين نصفيها قائمة تقريباً. أضع النصف الأول من الماصة في الكأس بشكل رأسي، بحيث ينغمر جزء منه في الماء، والنصف الثاني بشكل أفقي، كما في الشكل.**
- 2 ألاحظ:** أنفخ في الطرف الأيسر للماصة الأفقية، وأدون ملاحظاتي حول حركة الماء داخل الماصة الرأسية، وعند فوهتها.
- 3 أقارن:** أكرر الخطوة (2) ولكن بالنفخ بقوة أكبر لزيادة سرعة الهواء في الماصة الأفقية، وأدون ملاحظاتي حول الفرق بين نتائج الخطوات.

### التحليل والاستنتاج:

- 1 أحلل:** هل اختلف متوسط كثافة القارب عن كثافة رقيقة الألومنيوم التي صنع منها القارب؟ أوضح ذلك.
- 2 أفسر:** (تغرق رقيقة الألومنيوم الأولى في الماء وتستقر في قعر الكأس بينما تطفو الأخرى فوقه رغم أن وزن كل من الرقاقتين نفسه)، ما السبب؟
- 3 أتنبأ:** ماذا سيحدث للقارب إذا وضعنا بعض الأثقال الخفيفة فوقه؟
- 4 أحدد اتجاه حركة الماء في الماصة الرأسية عند النفخ في الماصة الأفقية؟**
- 5 هل حدث فرق بين ضغط الهواء فوق سطح الماء في الكأس، وضغطه في الماصة الرأسية بعد نفخ الهواء؟ أوضح ذلك.**
- 6 أصف ما يحدث للماء في كل من الكأس والماصة الرأسية وعند فوهتها في الخطوات (2) و(3)؟ وما علاقة ذلك بفرق ضغط الهواء؟**

### الموائج Fluids

المادة في حالتها الطبيعية تكون على إحدى ثلاث حالات: (الصلبة أو السائلة، أو الغازية)، وتتميز المادة في الحالتين السائلة والغازية عنها في الحالة الصلبة بخاصيتي الجريان (الانسياب)، وتغيير شكلها إذا أثرت فيها قوى خارجية؛ لأن قوى التماسك بين جزيئاتها ضعيفة مقارنة بالحالة الصلبة. ويُطلق على المواد التي تتصف بخاصيتي القدرة على الجريان وتغيير الشكل (الموائج Fluids).

إن دراسة الموائج (السوائل والغازات) لها أهمية كبيرة في حياتنا اليومية يمكن ملاحظتها بسهولة؛ فالهواء تحلق فيه الطائرات والمناطيد، والماء تطفو على سطحه السفن والبواخر، والدم يجري في أوردتنا وشرابيننا، إضافة إلى تطبيقات الموائج في مجموعة واسعة من التخصصات الهندسية والطبية والأرصاد الجوية، وتخصصي الفيزياء وعلم الأحياء. وتقسّم الموائج من حيث حالتها الحركية إلى قسمين هما: الموائج السكونية Static fluids والموائج المتحركة Fluids in motion

عندما تشاهد باخرة تطفو على سطح الماء، كما في الشكل (1)، قد تتساءل: ما القوة التي يؤثر بها الماء في السفينة لتطفو على سطح البحر؟

#### الفكرة الرئيسة:

يؤثر المائع الساكن في الأجسام المغمورة فيه كلياً أو جزئياً، بقوة دفع رأسياً إلى أعلى تُسمى قوة الطفو.

#### نتائج التعلم:

- أوضح المفاهيم المتعلقة بالموائج الساكنة.
- أوظف التجارب العملية في التحقق من قاعدة أرخميدس.

#### المفاهيم والمصطلحات:

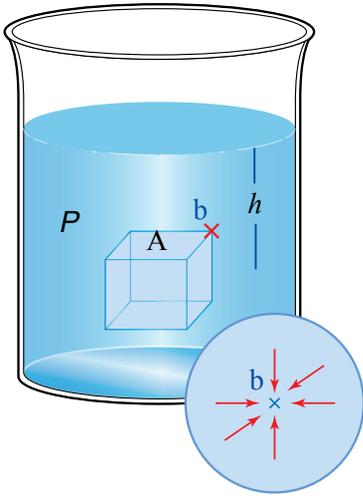
- الموائج Fluids
- ضغط المائع Fluid Pressure
- قوة الطفو Buoyant Force
- قاعدة أرخميدس Archimedes' Principle
- مقياس كثافة السوائل Hydrometer

تحقق: ما المقصود بالموائج؟

الشكل (1): باخرة تطفو

على سطح الماء.

## ضغط المائع Fluid's Pressure



الشكل (2): الضغط داخل المائع.

تعلمت في صفوف سابقة أن الضغط  $P$  (Pressure) قوة عمودية  $F$  تؤثر في وحدة المساحة  $A$  ووحدة قياسه في النظام الدولي SI هي باسكال  $(Pa = N/m^2)$ ، وتعلمت أيضًا أن المائع يؤثر بضغط في جميع الاتجاهات على النقاط أو الأجسام داخله ويُعطى بالعلاقة:

$$P = \rho_f gh$$

حيث:  $h$ : ارتفاع عمود المائع فوق تلك النقطة.

$\rho_f$ : كثافة المائع.

$g$ : تسارع السقوط الحر.

أي أن ضغط المائع المتجانس (كثافته ثابتة) عند أية نقطة داخله يتناسب طرديًا مع كل من عمق النقطة داخل المائع، وكثافة المائع وتسارع السقوط الحر. وحسب العلاقة أعلاه فإن جميع النقاط التي تقع على العمق نفسه تحت سطح المائع يكون الضغط عندها له القيمة نفسها وفي جميع الاتجاهات. فلو تخيلنا مكعبًا وهميًا مغمورًا في مائع متجانس كالماء مثلًا كما في الشكل (2)، فإن ضغط المائع  $P$  المؤثر إلى أسفل عند أية نقطة على سطح المكعب العلوي هو نفسه ضغط المائع عند النقطة  $b$  ( $P = \rho_f gh$ ).

**أفكر:** ضغط الماء المؤثر في السطح الأفقي للمكعب لا يعتمد على مساحته  $A$ ؟

### لتدرب

أجد ضغط الماء المؤثر في سمكة على عمق 20 m تحت سطح البحر (كثافة ماء البحر  $1024 \text{ kg m}^{-3}$ ).

✓ **أنتحق:** هل يتغير ضغط سائل معين عند نقطة ما فيه بتغير ارتفاع موقع السائل عن سطح الأرض؟ وضح إجابتك.

## قوة الطفو ( $F_B$ ) Buoyant Force

وزن الأجسام المغمورة في المائع يبدو أقل من وزنها في الهواء؛ فمن السهل مثلاً رفع حجر من داخل الماء إلى سطح الماء كما في الشكل (أ/3)، وفجأة يبدو الجسم أثقل عند رفعه خارج سطح الماء، وتجد صعوبة في رفعه. كذلك فإن السباحة في مياه البحر الميت المالحة جداً كما في الشكل (ب/3)، تكون أكثر سهولة من السباحة في مياه البرك أو حتى مياه البحار الأخرى الأقل ملوحة. وفي كلتا الحالتين تؤثر قوة جذب الأرض إلى أسفل في كل من الحجر وجسمك، بينما يؤثر الماء بقوة دفع إلى أعلى في تلك الأجسام. ما طبيعة هذه القوة؟ ومن أين تنشأ؟ وما العوامل التي تعتمد عليها؟



الشكل (أ/3): سحب حجر مغمور في الماء.

ضغط المائع لا يؤثر فقط في السطح العلوي للمكعب (على عمق  $h_1$ ) وإنما يؤثر في جميع جوانب المكعب بما فيها السطح السفلي للمكعب (على عمق  $h_2$ ) كما في الشكل (4)؛ على النحو الآتي:

$$P_1 = \rho_f g h_1 \quad \text{الضغط في السطح العلوي}$$

$$P_2 = \rho_f g h_2 \quad \text{الضغط في السطح السفلي}$$

وفرق الضغط بين سطحي المكعب السفلي والعلوي  $\Delta P$ :

$$\Delta P = \rho_f g (h_2 - h_1) = \rho_f g \Delta h$$

وبما أن الضغط هو القوة التي يؤثر بها المائع في وحدة المساحة  $(P = \frac{F}{A})$ ، فإن:

القوة المؤثرة عمودياً في السطح العلوي للمكعب  $F_1$ :

$$F_1 = P_1 \times A = \rho_f g h_1 A, -y$$

القوة المؤثرة عمودياً في السطح السفلي للمكعب  $F_2$ :

$$F_2 = P_2 \times A = \rho_f g h_2 A, +y$$

وبالتالي؛ فإن محصلة القوى  $F$  التي يؤثر بها المائع (قوة دفع المائع)

في المكعب تساوي:

$$F = F_2 - F_1$$

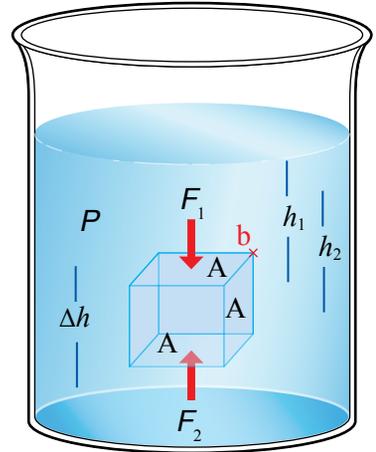
$$= \rho_f g A (h_2 - h_1)$$

$$= \rho_f g A (\Delta h)$$

لكن حجم المكعب  $V$  يساوي:  $V = A (\Delta h)$

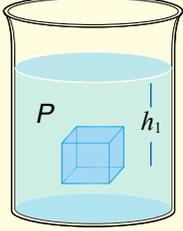


الشكل (ب/3): السباحة في البحر الميت.



الشكل (4): القوى المؤثرة في مكعب داخل السائل.

**أفكر:** أعلل: محصلة القوى التي يؤثرُ بها المائعُ في الجوانب العمودية للمكعب المغمور في المائع- كما في الشكل - تساوي صفرًا؟

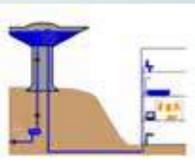


### الفيزياء والحياة

برج المياه هو خزان مائي يبني على ارتفاع عالٍ من أجل الاحتفاظ بموارد مائية وتوليد الضغط على نظام توزيع المياه. يتغير الضغط كلما ارتفع خزان المياه؛ فلكل 10.2 سنتيمتر من الارتفاع يتغير الضغط بمقدار 1 كيلو باسكال حسب العلاقة:

$$\Delta P = \rho g \Delta h$$

وهو ما يكفي لتوفير الضغط اللازم لمتطلبات نظام لتوزيع المياه على طوابق المبنى. ويستخدم البرج في عدد من المدارس والجامعات والمستشفيات وغيرها؛ ويمثل الشكل أدناه صورة لبرج المياه في مدينة الحسين الطبية في العاصمة عمان.



أي أن قوة دفع المائع المؤثرة رأسيًا إلى أعلى في المكعب تساوي

$$F = \rho_f V g$$

حيثُ:

$\rho_f$ : كثافة المائع.

$V$ : حجم المكعب.

وتُسمى محصلة القوى التي يؤثرُ بها المائعُ في الجسم المغمور

فيه كليًا أو جزئيًا رأسيًا إلى أعلى قوة الطفو (Buoyant force ( $F_B$ ))

نلاحظ أن قوة الطفو تم اشتقاقها نظريًا باستخدام قوانين نيوتن

لحالة خاصة، وهي مكعب مغمور في الماء ولكنها تطبق على الأجسام

بأشكالها المختلفة (منتظمة أو غير منتظمة) المغمورة في أي مائع،

وتنشأ قوة الطفو بسبب فرق في الضغط بين أعلى الجسم المغمور في

المائع وأسفله بغض النظر عن عمق المائع أو شكل الجسم.

✓ **أتحقّق:** ما العوامل التي تعتمد عليها قوة الطفو؟

### قاعدة أرخميدس Archimedes' Principle

العالم اليوناني أرخميدس توصل إلى معادلة قوة الطفو السابقة

نفسها ولكن عن طريق التجربة قبل ذلك بفترة طويلة، وعُرفت في ما

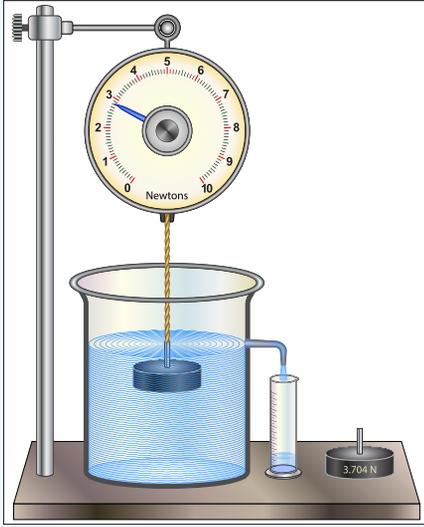
بعد بقاعدة أرخميدس. ولدراسة العوامل التي تعتمد عليها قوة الطفو

(قوة دفع المائع) عمليًا، وللتحقّق كذلك من قاعدة أرخميدس عمليًا؛

أجري التجربة الآتية:

## التجربة ١

### قوة الطفو وقاعدة أرخميدس



**المواد والأدوات:** قطعتان متماثلتان في الحجم إحداهما فلزية كالألومنيوم مثلاً، وأخرى خشبية، مخبر مدرج، ميزان إلكتروني، ميزان نابضي، ورق إزاحة، سائلان مختلفان في الكثافة (ماء، جليسرين).

**إرشادات السلامة:** الحذر من سكب السوائل على الأرضية؛ حتى لا تصبح زلقة، وفي التعامل مع الأدوات الزجاجية.

**خطوات العمل:** بالتعاون مع أفراد مجموعتي، أنفذ الخطوات الآتية:

- 1 **أقيس** كلاً من كتلة المخبر المدرج فارغاً ( $m_1$ )، باستخدام الميزان الإلكتروني ووزن قطعة الألومنيوم في الهواء باستخدام الميزان النابضي  $F_g$ ، ثم أدون النتائج.
- 2 **أبدأ** بملء دورق الإزاحة بالماء وأتوقف مباشرة قبل أن يبدأ الماء بالانسكاب من فتحة الدورق.
- 3 **الاحظ:** أضع المخبر المدرج تحت فتحة الدورق، ثم أنزل قطعة الألومنيوم المعلقة بالميزان ببطء في الماء حتى تنغمر كلياً، وألاحظ انسكاب الماء في المخبر أثناء ذلك، كما في الشكل، وأقيس وزن القطعة في الماء ( $F'_g$ ) وأدون النتيجة.
- 4 **أقيس** كتلة المخبر والماء المنسكب فيه (الماء المزاج) معاً ( $m_2$ ) باستخدام الميزان الإلكتروني، وأدون القراءة.
- 5 **أحسب** النقصان في وزن القطعة ( $F_g - F'_g$ ) ووزن الماء المزاج  $F_{gf} = (m_2 - m_1)g$
- 6 **أكرر** الخطوات السابقة مستخدماً سائلاً آخر غير الماء مثل الجليسرين، وأدون النتائج.
- 7 **أكرر** الخطوات (1-5) مستخدماً القطعة الخشبية بدلاً من الألومنيوم، مع الانتباه إلى أن الخشب لا ينغمر كلياً، وأدون النتائج.

### التحليل والاستنتاج:

1. **أقارن** بين النقصان في وزن القطعة وبين وزن السائل المزاج.
2. **أحلل:** عند تغيير كثافة السائل، ما التغيير الذي حدث لكل من: النقصان في وزن القطعة، ووزن السائل المزاج؟
3. **أصف** العلاقة بين قوة الطفو وكل من: النقصان في وزن القطعة، ووزن السائل المزاج.
4. **أصف** التغيير في وزن السائل المزاج عند استخدامي قطعة الخشب؟ ما العلاقة بين وزن السائل المزاج ووزن القطعة في الهواء.
5. **أتوقع** ما يحدث لكل من حجم السائل المزاج ووزنه - عند استخدامي قطعة ألومنيوم ذات حجم أكبر.

ربما توصلت مما سبق إلى العوامل التي تعتمد عليها قوة الطفو وهي:

- كثافة المائع المزاح  $\rho_f$ : العلاقة طردية.
- حجم المائع المزاح  $V_f$ : العلاقة طردية.
- تسارع السقوط الحر  $g$ : العلاقة طردية.

صاغ العالم أرخميدس النتائج التجريبية التي توصل إليها على

شكل قاعدة علمية سُميت قاعدة أرخميدس Archimedes' principle وتنص على ما يأتي:

«قوة الطفو المؤثرة في الجسم المغمور كلياً أو جزئياً في مائع تساوي وزن المائع المزاح».

وبصورة أخرى: «الجسم المغمور كلياً أو جزئياً في مائع يخسر من وزنه بمقدار وزن المائع المزاح»، أنظر الشكل (5).

ويُعبّر عنها بالرموز على الصورة الآتية:

$$F_B = F_{gf} = m_f g = \rho_f V_f g$$

$$= F_g - F'_g$$

حيثُ

$F_{gf}$ : وزن المائع المزاح.

$F_g$ : وزن الجسم الحقيقي (الناشئ عن جذب الأرض للجسم)،

ويساوي:  $F_g = m_o g = \rho_o V_o g$

$m_o$ : كتلة الجسم،  $\rho_o$ : كثافة الجسم،  $V_o$ : حجم الجسم.

$m_f$ : كتلة الماء المزاح.

$F'_g$ : وزن الجسم في المائع = محصلة قوتي الطفو والوزن

الحقيقي للجسم ( $F'_g = F_g - F_B$ )، ويُسمى الوزن الظاهري

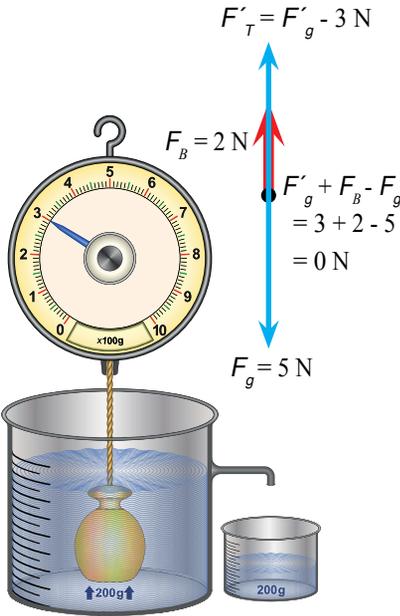
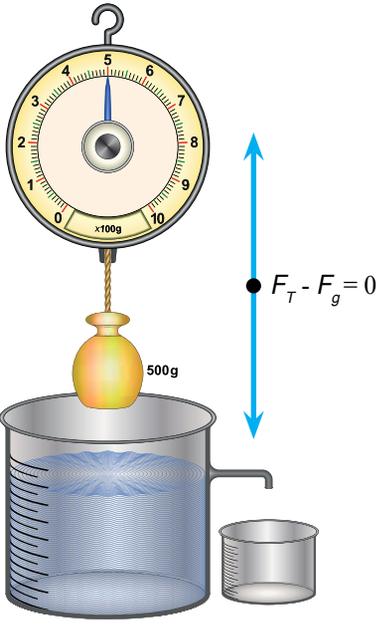
ويساوي قوة الشد في الحبل ( $F'_T = F'_g$ ) كما في

الشكل (5).

تُطبق قاعدة أرخميدس على جميع الأجسام المغمورة بغض

النظر عن شكل الجسم ونوع المائع.

✓ **أتحقّق:** أذكر نص قاعدة أرخميدس بالكلمات، وأعبّر عنها بالرموز.



الشكل (5): قاعدة أرخميدس.

## المثال ١

غواصة Atlantis XII أسطوانية الشكل حجمها  $250 \text{ m}^3$  تقريبًا. تحمل السياح إلى أعماق تصل إلى 30 مترًا؛ لمشاهدة الشعاب المرجانية في سواحل المكسيك. باعتبار كثافة مياه البحر  $1024 \text{ kg m}^{-3}$ ؛

**أحسب:**

أ. ضغط الماء عند هذا العمق.

ب. قوة الطفو.

المعطيات:  $\rho_f = 1024 \text{ kg m}^{-3}$  ،  $h = 30 \text{ m}$  ،  $V_o = 250 \text{ m}^3$

المطلوب:  $P = ?$  ،  $F_B = ?$

**الحل:**

$$P = \rho_f gh = 1024 \times 10 \times 30 = 3.07 \times 10^5 \text{ Pa} \quad . \quad \text{أ}$$

$$F_B = \rho_f V_f g \quad , \quad V_f = V_o \quad . \quad \text{ب}$$

$$= 1024 \times 250 \times 10 = 2.56 \times 10^6 \text{ N}$$



من المفيد مقارنة القوى المؤثرة في الأجسام المغمورة كلياً في المائع مع تلك المؤثرة في الأجسام المغمورة جزئياً (الطافية على سطح المائع)، على النحو الآتي:

**الأجسام المغمورة كلياً في المائع (الانغمار الكلي)**

عندما يُغمَر جسم ما (كالحجر مثلاً) كما في الشكل (6) فإن:

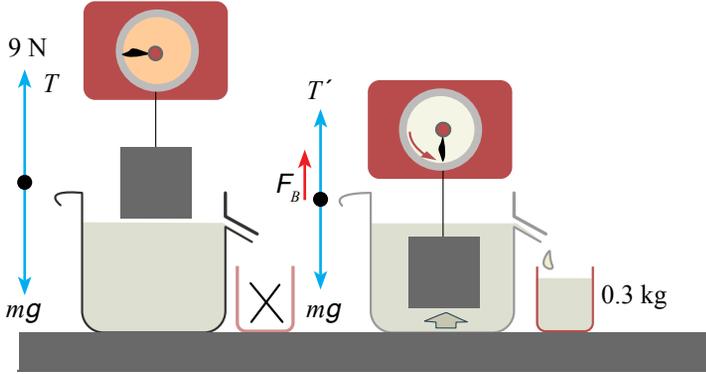
- حجم الجسم يساوي حجم المائع المزاح  $V_o = V_f$
- قاعدة أرخميدس:

$$F_B = F_{gf} = F_g - F'_g$$

الشكل (6): حجر مغمور كلياً في الماء، بينما تطفو قطعة الفلين فوق سطح الماء.

## المثال 2

قامت مارية بإجراء تجربةٍ للتحقق من قاعدة أرخميدس، اعتمادًا على البيانات المبينة في الشكل (7) وباعتبار كثافة الماء  $1000 \text{ kg m}^{-3}$ ؛ أجد:



الشكل (7): تجربة قاعدة أرخميدس.

- قوة الطفو.
- قراءة الميزان بعد غمر الجسم في الماء.
- حجم الجسم.

المعطيات:

$$F_g = 9 \text{ N} ، m_f = 0.3 \text{ kg}$$

المطلوب:

$$F_B = ? ، F'_g = ? ، V_o = ?$$

الحل:

أ . قوة الطفو:

$$F_B = m_f g = 0.3 \times 10 = 3 \text{ N}$$

ب . قراءة الميزان بعد غمر الجسم في الماء

$$F_B = F_g - F'_g$$

$$3 = 9 - F'_g \rightarrow F'_g = 6 \text{ N}$$

ج . حجم الجسم  $V_o$ :

$$F_B = \rho_f V_f g$$

$$3 = 1000 \times V_f \times 10$$

$$V_f = 3 \times 10^{-4} \text{ m}^3 = V_o$$

## لتدرك

كرة فلزية وزنها في الهواء  $10 \text{ N}$  غُمرت في الماء فخرست من وزنها  $3.5 \text{ N}$ ، باعتبار كثافة الماء  $1000 \text{ kg m}^{-3}$ ؛ أجد:

- قوة الطفو.
- وزن الكرة في الماء.
- كثافة مادة الكرة.

## الأجسام الطافية على سطح المائع (الانغمار الجزئي)

عند وضع كرة قدم في مائع (مثل الماء) كما في الشكل (8)، فإن جزءاً منها يطفو على سطح المائع، أي أن حجم السائل المزاح  $V_f$  يساوي حجم الجزء المغمور من الجسم وهو أقل من حجم الجسم.

وفي هذه الحالة فإن:

وزن الجسم في المائع (الوزن الظاهري) يساوي صفراً ( $F'_g = 0$ )، وبالتالي؛ فإن:

قوة الطفو = وزن السائل المزاح = وزن الجسم الحقيقي

$$F_B = F_{gf} = F_g - F'_g = F_g - 0 = F_g$$

والجدول (1) يلخص حالات خاصة لقاعدة أرخميدس.



الشكل (8): قوة الطفو المؤثرة في كرة قدم تطفو على سطح الماء.

### الجدول (1): حالات قاعدة أرخميدس

حالة الجسم	حجم السائل المزاح $V_f$	قوة الطفو $F_B$	اتجاه محصلة القوى	الحالة
ينغمر ويهبط في المائع	$V_f = V_0$	$F_B < F_g$	$-y$	$\rho_o > \rho_f$
يبقى معلقاً في المائع	$V_f = V_0$	$F_B = F_g$	$\Sigma F = 0$	$\rho_o = \rho_f$
يطفو جزء منه فوق سطح المائع	$V_f =$ حجم الجزء المغمور من الجسم	$F_B = F_g$	$\Sigma F = 0$	$\rho_o < \rho_f$

## المثال 3

كرة مطاطية حجمها  $0.004 \text{ m}^3$  وكثافتها مادتها  $970 \text{ kg m}^{-3}$ ، ووضعت في سائل كثافته  $1200 \text{ kg m}^{-3}$ ، أحسب حجم الجزء المغمور من الكرة.

المعطيات:  $V_0 = 0.004 \text{ m}^3$ ،  $\rho_o = 970 \text{ kg m}^{-3}$ ،  $\rho_f = 1200 \text{ kg m}^{-3}$

المطلوب: حجم الجزء المغمور من الكرة.

الحل:

بما أن كثافة الكرة أقل من كثافة السائل؛ فإن الكرة تنغمر جزئياً في السائل.

$$F_B = F_g \quad \text{نطبق العلاقة:}$$

$$\rho_f V_f g = \rho_o V_0 g \rightarrow \rho_f V_f = \rho_o V_0$$

$$1200 \times V_f = 970 \times 0.004 \rightarrow V_f = 0.0032 \text{ m}^3$$

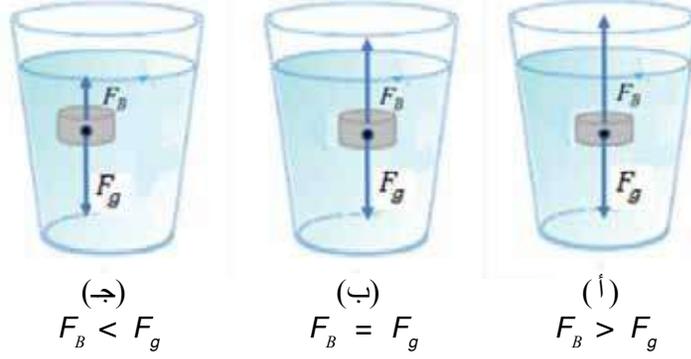
حجم السائل المزاح = حجم الجزء المغمور من الكرة =  $0.0032 \text{ m}^3$

## المثال 4

وُضِعَتْ ثلاثةُ أجسامٍ متماثلةٍ تمامًا داخلَ ثلاثِ كؤوسٍ مملوءةٍ بسوائلٍ مختلفةٍ، وتُركت حرةً الحركة، ومُثِّلَتْ قوتا الطفو ووزن الجسم بأسهُم، كما في الشكل (9). أجب عما يأتي:

أ . أرتب السوائل في الكؤوس تنازليًا حسب كثافتها.

ب. أصف حركة الأجسام.



الشكل (9): القوى المؤثرة في أجسام مغمورة في الماء

المعطيات:

التمثيل البياني لكل من وزن الجسم الحقيقي وقوة الطفو.

المطلوب:

ترتيب السوائل تنازليًا حسب الكثافة، ووصف حركة كل جسم في السائل.

الحل:

أ . الترتيب التنازلي:  $\rho$  (أ) أكبر من  $\rho$  (ب) أكبر من  $\rho$  (ج)، وذلك من خلال المقارنة بين قوة الطفو ووزن الجسم في كل حالة.

ب . محصلة القوى في الجسم (أ) إلى أعلى؛ لأن قوة الطفو أكبر من وزن الجسم ( $F_B > F_g$ ) وبالتالي؛ سيتحرك الجسم إلى أعلى بتسارع حتى يطفو جزء منه ليستقر على سطح الماء، أما الجسم (ب) فيبقى معلقًا في الماء؛ لأن ( $F_B = F_g$ ) بينما الجسم (ج) سيتحرك إلى أسفل بتسارع لأن ( $F_B < F_g$ )، ليستقر في قاع الكأس.

## المثال 5



الشكل (10): قاربٌ ينقلُ عددًا من المهاجرين.

قاربٌ مطاطيٌّ كتلته  $200 \text{ kg}$  ومتوسطُ كثافته  $100 \text{ kg m}^{-3}$  ينقلُ عددًا من المهاجرين، كما في الشكل (10)، إذا علمتُ أنَّ كثافةَ ماءِ البحرِ  $1024 \text{ kg m}^{-3}$  فأجدُ كتلةَ أكبرِ حمولةٍ يمكنُ وضعها فوقَ سطحِ القاربِ؛ بحيثُ يبقى طافيًا (حافةُ القاربِ العلويةُ عندَ سطحِ الماءِ تمامًا).

المعطياتُ:  $m' = 200 \text{ kg}$  ،  $\rho_o = 100 \text{ kg m}^{-3}$  ،  $\rho_f = 1024 \text{ kg m}^{-3}$

المطلوبُ: كتلةُ الحمولةِ  $m = ?$

الحلُّ:

حجمُ الجزءِ المغمورِ من القاربِ في هذه الحالةِ يساوي حجمَ القاربِ ( $V_o$ )، وبالتالي؛ فإنَّ حجمَ السائلِ المزاحِ يساوي حجمَ القاربِ:

$$V_f = V_o = \frac{m'}{\rho_o} = \frac{200}{100} = 2 \text{ m}^3$$

$$F_B = F_g \quad \text{نطبقُ العلاقة:}$$

$$\rho_f V_f g = (m + m') g$$

$$1024 \times 2 = (m + 200) \rightarrow m = 1848 \text{ kg}$$

برأيك هل هذه الحمولةُ آمنةٌ؟

## المثال 6

بالونٌ قطره  $0.4 \text{ m}$  يحوي غازَ الهيليوم، وهو متزنٌ في الهواء، فإذا علمتُ أنَّ كثافةَ الهيليوم  $0.179 \text{ kg m}^{-3}$  فأجدُ قوةَ الطفوِ (أهملُ كتلةَ مادةِ البالونِ).

المعطياتُ:  $r = 0.2 \text{ m}$  ،  $\rho_o = 0.179 \text{ kg m}^{-3}$  ،  $g = 10 \text{ m/s}^2$

المطلوبُ:  $F_B = ?$

الحلُّ:

$$V_o = \frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{4}{3} \times 3.14 \times (0.2)^3 = 0.33 \text{ m}^3 \quad \text{حجمُ البالونِ:}$$

$$F_B = F_g = \rho_o V_o g = 0.179 \times 0.33 \times 10 = 0.59 \text{ N} \quad \text{قوةُ الطفوِ:}$$

## تطبيقات قاعدة أرخميدس

### Applications of Archimedes' Principle

قاعدة أرخميدس لها تطبيقات كثيرة ومتنوعة، وفي ما يأتي بعض تلك التطبيقات في حياتنا اليومية:

#### السفينة Ship

كيف تطفو السفينة على سطح الماء وهي مصنوعة من الحديد في حين يغرق مسمار الحديد في الماء؟

عندما تطفو السفينة على سطح البحر تكون قوة الطفو مساوية لوزنها؛ لذا تُصنع السفينة بحيث تحوي تجويفاً كبيراً يزيد من حجمها ويقلل من متوسط كثافتها؛ ليصبح أقل من كثافة الماء، وعند إنزال السفينة إلى الماء فإن حجم الماء المزاح - والمساوي لحجم الجزء المغمور من السفينة - يزداد بالتدرج فتزداد تبعاً لذلك قوة الطفو حسب قاعدة أرخميدس (قوة الطفو تساوي وزن الماء المزاح) إلى أن تصبح قوة الطفو مساوية لوزن السفينة كما في الشكل (11)، عند تلك اللحظة يتوقف ازدياد حجم الجزء المغمور من السفينة لتطفو على سطح الماء؛ حيث محصلة القوى المؤثرة عليها تساوي صفراً.

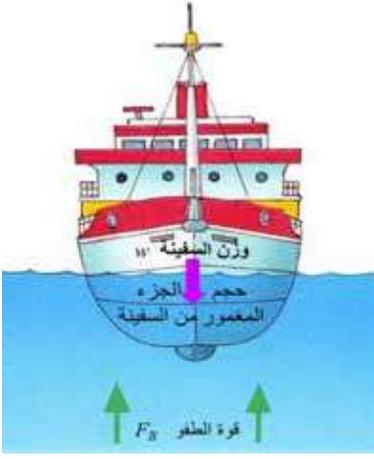
#### الغواصة Submarine

هي سفينة متخصصة يمكنها الغوص والتنقل تحت سطح الماء على أعماق مختلفة، وبإمكانها أن تطفو، أنظر الشكل (12). وتحوي الغواصة خزانات كبيرة يجري إدخال الماء إليها أو إخراجها منها، فيزداد متوسط كثافتها أو يقل لتصبح قوة الطفو إما أكبر من وزن الغواصة فتطفو وإما أقل فتتهبط أو مساوية فتبقى معلقة على عمق ثابت في الماء. وتستخدم الغواصة للأغراض العسكرية وللأغراض المدنية كذلك، مثل: الأبحاث العلمية والسياحة.

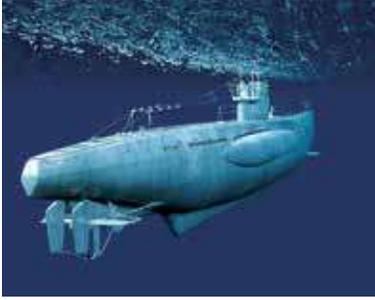
#### مقياس كثافة السوائل Hydrometer

أداة تُستخدم لقياس كثافة السائل؛ مثل: قياس كثافة الحليب، وكثافة محلول بطارية السيارة، وغيرها.

يوضع الأنبوب في السائل المراد قياس كثافته فيطفو ليستقر عند تدرج محدد يمثل كثافة السائل، أنظر الشكل (13)، وكلما زادت كثافة

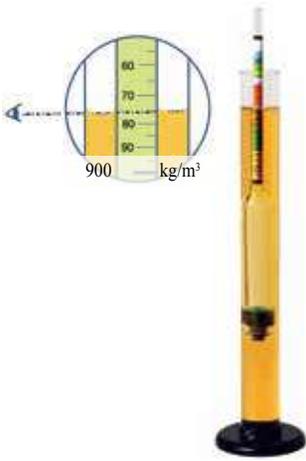


الشكل (11): سفينة تطفو على سطح البحر، والقوى المؤثرة فيها.



الشكل (12): غواصة في أعماق المياه.

**أفكر:** تطفو السفينة بشكل أكبر في المياه المالحة منها في المياه العذبة؟



الشكل (13): قياس كثافة البنزين باستخدام مقياس كثافة السوائل.

السائل ازدادت قوة الطفو ليرتفع المقياس في السائل إلى أعلى بشكل أكبر. كم تبلغ كثافة البنزين في الشكل؟ ويُفضّل استخدام المقياس الإلكتروني، كما في الشكل (14)؛ لأنه أكثر دقة وسهولة في الاستخدام.



الشكل (14): مقياس كثافة سوائل إلكتروني.

### المنطاد Balloon

تُستخدم المناطق في أغراضٍ مختلفةٍ مثل: السياحة والرياضة والرصد الجوي؛ حيث يتسارع المنطاد إلى أعلى، ويرتفع في الهواء عندما يكون وزنه أقل من قوة الطفو المؤثرة فيه من قبل الهواء المحيط به. وفي حال كانت قوة الطفو أقل من وزنه يتسارع إلى أسفل ويهبط. متى يبقى معلقاً في الهواء؟

تُصنّف المناطق حسب نوعية الغاز المحمّل بها؛ فمثلاً: المنطاد الغازي الذي يكون مملوءاً بغاز أخف من الهواء الجوي، كغاز الهيليوم أو الهيدروجين؛ مثلما في الشكل (15). وهناك نوع آخر يُستخدم حالياً بشكل كبير، وهو منطاد الهواء الساخن، أنظر الشكل (16)، حيث يجري التحكم بصعوده أو هبوطه من خلال تقليل درجة حرارة الهواء داخله، أو زيادتها.

وتوجد تطبيقات أخرى كثيرة تعتمد على قاعدة أرخميدس مثل: العوامية الميكانيكية المستخدمة في خزانات المياه، وحركة الأسماك صعوداً وهبوطاً في الماء من خلال الحويصلات الهوائية، والسباحة وغيرها.



الشكل (15): منطاد مملوء بالغاز.



الشكل (16): منطاد الهواء الساخن.

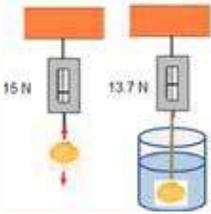
✓ **أتحقّق:** كيف يمكن التحكم بصعود كل مما يأتي وهبوطه:

1. منطاد الهواء الساخن.
2. الغواصة.

**أفكر:** لماذا يرتفع البالون في الهواء بتسارع أكبر في الأجواء الباردة مقارنةً بتسارعه في الأجواء الساخنة؟

## مراجعة الدرس

1. أفسرُ كلاً مما يأتي:
  - أ. بعضُ الأجسام تطفو فوق سطح الماء، وبعضها يبقى معلقاً، وبعض آخر ينغمرُ ليستقرَّ في الأسفل.
  - ب. السباحة في البحر الميت أسهلُّ بكثيرٍ منها في المياه العذبة.
2. ثلاثة مجسماتٍ متماثلةٍ في الحجم (زجاج، مطاط، سيليكون) كثافة كلٍّ منها على الترتيب  $2.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  ،  $9.7 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$  ،  $1.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  ووضعت داخل حوض جليسرين كثافته  $1.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ . أجب عما يأتي:
  - أ. أقرن بين قوة الطفو المؤثرة في كل مجسم.
  - ب. أقرن بين مقدار تسارع كل مجسم، واتجاهه.
3. السبب والنتيجة: ماذا يحدث في كل حالة مما يأتي:
  - أ. تفريغ خزانات المياه من الغواصة.
  - ب. تقليل درجة حرارة الهواء داخل المنطاد.
  - ج. زيادة حجم التجويف في السفينة.
4. أحسب: قاربٌ مطاطيٌّ يطفو نصف حجمه فوق سطح البحر، فإذا علمت أن كثافة مياه البحر  $1024 \text{ kg m}^{-3}$  فأجد متوسط كثافة القارب.
5. وجدت نورٌ قطعةً نقديةً قديمةً لونها أصفر تشبه الذهب، أرادت التأكد من أن القطعة مصنوعة من الذهب؛ فعلقت القطعة بميزانٍ نابضيٍّ حساسٍ فكانت قراءة الميزان  $15 \text{ N}$  (في الهواء) كما في الشكل، وعند غمرها في الماء أصبحت قراءة الميزان  $13.7 \text{ N}$ ، أجب عما يأتي:
  - أ. أرسم مخطط الجسم الحر للقطعة بعد غمرها في الماء.
  - ب. أحسب قوة الطفو.
  - ج. أصدر حكماً: هل القطعة النقدية مصنوعة من الذهب؟



### المائع المثالي Ideal Fluid

تساءل ربّما عن كثير من المشاهدات والمواقف الحياتية والتطبيقات المتعلقة بحركة الموائع وسلوكها؛ فمثلاً إذا كان طول خرطوم المياه - أثناء ريّ نباتات حديقتك المنزلية - غير كافٍ للوصول المياه إلى مسافة أبعد لشمول مساحة أكبر؛ فإنك بسهولة تضغط بإصبعك لإغلاق جزء من فوهة الخرطوم، مثلما في الشكل (17).

ستتناول في هذا الدرس حركة الموائع وخصائصها ومعادلاتها والتطبيقات المتعلقة بها إضافة إلى تفسير المشاهدات والمواقف الحياتية المختلفة.

### خصائص الموائع المتحركة

يمكن التمييز بين نوعين رئيسيين من جريان الموائع؛ هما: الجريان المنتظم، والجريان غير المنتظم.

الشكل (17): سلوك الماء المتدفق قبل الضغط على فوهة الخرطوم، وبعده

### الفكرة الرئيسة:

للموائع المتحركة خصائص وسلوكات وتطبيقات خاصة بها يمكن تفسيرها عن طريق معادلة الاستمرارية وقاعدة برنولي.

### نتائج التعلم:

- أوضح المفاهيم المتعلقة بالموائع المتحركة.
- أستقصي خصائص المائع المثالي والعوامل المؤثرة في حركته.
- أوظف التجارب العملية في التحقق من مبدأ برنولي.
- أوظف معرفته بالمفاهيم والعلاقات الخاصة بحركة الموائع في حل مسائل حسابية، وتفسير مواقف حياتية متعلقة بها.
- أوظف التجارب العملية في تعرف خصائص الموائع المتحركة وتطبيقاتها.

### المفاهيم والمصطلحات:

- المائع المثالي Ideal Fluid
- الجريان المنتظم Steady Flow
- غير لزج Nonviscous
- غير قابل للانضغاط Incompressible
- غير دوامي Irrotational
- معدل التدفق الحجمي Volume Flow Rate
- معادلة الاستمرارية Continuity Equation
- معادلة برنولي Bernoulli's Equation
- مقياس فنتوري Venturi Meter
- خط الجريان Flow Line



الشكل (18): الجريان المنتظم والجريان المضطرب لجزيئات الدخان المنبعثة عند إطفاء الشمعة.



الشكل (20): أ. جريان الماء المنتظم وغير المنتظم. ب. خطوط جريان الماء المنتظم وغير المنتظم.

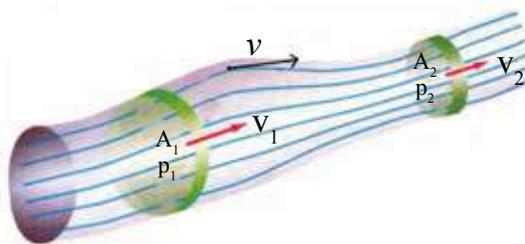
المائع الذي تكون سرعة جزيئاته عند نقطة معينة فيه ثابتة لا تتغير مع الزمن، ولكنها يمكن أن تتغير من نقطة إلى أخرى، يسمى جرياناً منتظماً **Steady Flow** أو انسيابياً. مثلما هو مبين في الجزء السفلي من الشكل (18) حيث تنساب جزيئات الدخان أو المائع في مسارات منتظمة تُمثل بخطوط، كل خط منها يسمى خط الجريان **Flow Line** وهو خط يمثل مسار جزيئات المائع عند جريانها. ويمكننا تصور جريان المائع في أنبوب يسمى أنبوب الجريان سواء كان حقيقياً مثل خرطوم الماء أو افتراضياً مثل التيار الهوائي أو المائي. وتُمثل خطوط جريان المائع المنتظم كما في الشكل (19)، حيث تمتاز تلك الخطوط بخصائص عدة، منها:

- أنها لا تتقاطع.

- كثافتها (عدد خطوط الجريان التي تمر عمودياً بوحدة المساحة (A)) تزداد بزيادة سرعة المائع ( $v_2 > v_1$ ).
- المماس لأية نقطة على خط الجريان يحدد اتجاه سرعة جزيء المائع اللحظية ( $v$ ) عند تلك النقطة.

يبقى جريان المائع منتظماً ما لم تتجاوز سرعته قيمة معينة تسمى السرعة الحدية؛ فإن تجاوزها يتحول جريان المائع من جريان منتظم إلى جريان غير منتظم **Irregular Flow**. وهو جريان تتغير سرعة المائع عند نقطة ما فيه مع الزمن، كما هو مبين في كل من الجزء العلوي من الشكل (18) وفي الشكل (20/أ)، أما خطوط الجريان المنتظم وغير المنتظم فتظهر في الشكل (20/ب)؛ حيث تغير جريان المائع عند وضع الكرة أمام مجراه ليتحول جريانه من جريان منتظم (أمام الكرة وعلى جانبيها) إلى جريان غير منتظم (خلف الكرة).

الشكل (19): خطوط الجريان المنتظم في أنبوب الجريان.



ولتسهيلِ دراسةِ حركةِ الموائعِ وَضَعَ العلماءُ أربعةَ افتراضاتٍ لخصائصِ أساسيةٍ للمائعِ المتحركِ، تصفُ سلوكَهُ أثناءَ جريانهِ وهي:

### 1. جريانٌ منتظمٌ **Steady flow**.

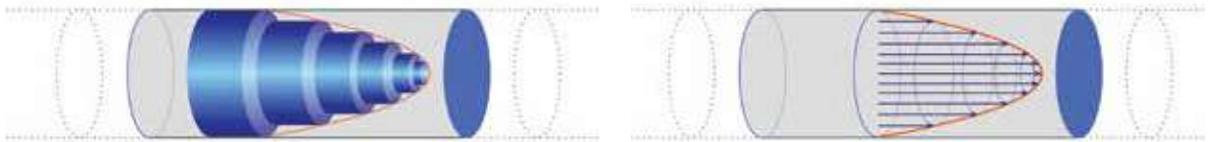
### 2. مائعٌ غيرٌ قابلٌ للانضغاطِ **Incompressible**.

المائعُ الذي تبقى كثافتهُ ثابتةً ولا تتغيرُ أثناءَ جريانهِ يعدُّ مائعاً غيرَ قابلٍ للانضغاطِ **Incompressible fluid**، أما المائعُ الذي تتغيرُ كثافتهُ، تحتَ تأثيرِ قوةٍ مثلاً، فيعدُّ مائعاً قابلاً للانضغاطِ **compressible fluid**.

### 3. غيرٌ لزجٌ **Nonviscous**.

خلالَ جريانِ السائلِ تنسابُ طبقاتُهُ بالنسبةِ إلى بعضها كما في الشكلِ (21)، وتعدُّ لزوجةُ السائلِ مقياساً لمقاومةِ طبقاتِ المائعِ لهذهِ الحركةِ، فكلّما زادتْ لزوجةُ المائعِ قلتْ قابليتهُ للجريانِ؛ وبذلكَ تنخفضُ سرعتهُ؛ فمثلاً لتحريكِ كميةٍ من العسلِ بسرعةٍ ما في أنبوبِ الجريانِ نحتاجُ إلى قوةٍ أكبرَ من التي نحتاجها لتحريكِ الكميةِ نفسها من الماءِ، وبالسرعةِ نفسها. يجدرُ الذكرُ بأنَّ تأثيرَ اللزوجةِ في جريانِ السائلِ يقابلهُ تأثيرُ قوةِ الاحتكاكِ في انزلاقِ جسمٍ على سطحٍ خشنٍ. فزيادةُ لزوجةِ الدمِ مثلاً قد تؤدي إلى زيادةِ مخاطِرِ الإصابةِ بالجلطاتِ الدموية عندَ الإنسانِ؛ حيثُ يصعبُ جريانُ الدمِ داخلَ الشرايينِ فيُعطى المريضُ أدويةً تقللُ لزوجةَ الدمِ (وهي أدويةٌ مميعةٌ).

لذا؛ يمكنُ تعريفُ المائعِ غيرِ اللزجِ **Nonviscous fluid** بأنَّهُ المائعُ الذي لا يوجدُ قوى احتكاكِ بينَ طبقاتِهِ أثناءَ جريانهِ.



الشكلُ (21): طبقاتُ المائعِ وخطوطُ جريانهِ.

#### 4. غير دوامي Irrotational.

عندما تدور جميع جزيئات المائع حول مركز أو محور دورانٍ إضافةً إلى حركتها الانتقالية فإنَّ جريانَ المائع يكون دوامياً، مثال ذلك حركة جزيئات الهواء التي ينتج عنها أعاصير مدمرة وحركة جزيئات الماء التي ينتج عنها دوامات بحرية خطيرة، كما في الشكل (22)، أما الجريان الذي لا تدور جزيئاته حول مركز دورانٍ فيسمى الجريان غير الدوامي Irrotational flow.

إنَّ المائع الذي يتصف بالخصائص الأربع (جريانه منتظم، غير قابل للانضغاط، غير لزج، غير دوامي) يسمى المائع المثالي Ideal fluid، ولا يوجد في الواقع مائع مثالي يتصف بهذه الخصائص الأربع؛ وإنما هو نموذج افترضه العلماء يساعد ويُسهل دراسة المائع الحقيقي Real fluid أي المائع الذي لا يتصف بخاصية أو أكثر من خصائص المائع المثالي.

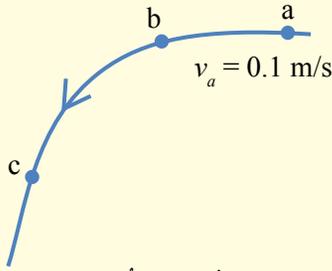
✓ **أتحقق:** ما الخاصية التي يمتلكها المائع المتحرك في الحالات الآتية:  
أ. كثافته ثابتة لا تتغير أثناء جريانه.

ب. توجد قوى احتكاك (قوى مقاومة) بين طبقاته أثناء جريانه.

ج. لا تدور جزيئاته حول مركز دورانٍ أثناء جريانه.

ولا استقصاءً بعض من خصائص الموائع؛ ستجري النشاط الآتي:

**أفكر:** يمثل الشكل خطَّ جريانٍ منتظمٍ لمائع، وسرعة جزيء الماء لحظة مروره بالنقطة (a)  $0.1 \text{ m/s}$ ، بناءً على ما تقدم؛ أجب عما يأتي:



أ. كم تبلغ سرعة جزيء آخر من الماء لحظة مروره بالنقطة (a) بعد 4 ثوانٍ من مرور الجزيء الأول؟

ب. هل سرعة جزيء المائع عند مروره بالنقاط b و c هي نفسها عند مروره بالنقطة (a)؟



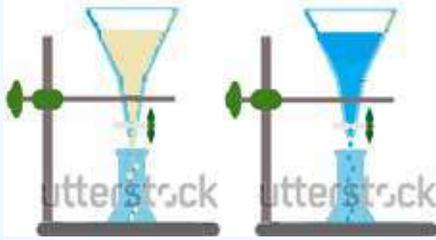
(ب)



(أ)

الشكل (22): التيارات الدوامية في جزيئات: أ. الهواء. ب. الماء.

### خصائص الموائع المتحركة



**المواد والأدوات:** أربعة أقماعٍ شفافةٍ مع صنوبرٍ، محقنان طبيان، خرطوم شفافةٍ طوله مترٌ واحدٌ تقريباً، ساعتاً إيقافٍ، ماءً، جليسرينٌ، كأسانِ فارغتان، بذورٌ جافةٌ صغيرة الحجم، حجرٌ.

**إرشادات السلامة:** الحذر من سكب السوائل على الأرضية؛ حتى لا تصبح زلقةً، والحذر في التعامل مع الأدوات الزجاجية.

**خطوات العمل:** بالتعاون مع أفراد مجموعتي، أنفذ الخطوات الآتية:

- 1 **أحضِرْ** قمعين متماثلين، وأضعُ كلاً منهما على حاملٍ كما في الشكل، وأغلقُ كلاً منهما باستخدام الصنبور أو السدادة، وأضعُ أسفل كلٍّ من القمعين كأساً فارغاً، ثمَّ أسكبُ كميةً من الماء في القمع الأول، وأسكبُ كميةً أخرى من الجليسرينٍ ممتلئةً لكمية الماء في الحجم في القمع الثاني (يمكن استخدام مخبارٍ مدرجٍ).
- 2 **أقيس:** أفتحُ صنوبرَ كلٍّ من القمعين في اللحظة نفسها بالتزامن مع تشغيل ساعتَي الإيقاف، وأدونُ الفترة الزمنية لإفراغ محتوى كلِّ قمعٍ.
- 3 **ألاحظ:** أحضرُ محقنين، وأملأُ نصفَ المحقن الأول بالماء باستخدام الضاغطة، ونصفَ المحقن الثاني بالهواء، وأغلقُ كلاً منهما بسدادةٍ أو بإصبعي، وأضغطُ الماء والهواء في كلٍّ من المحقنين، وأسجلُ ملاحظاتي حول تغير حجم كلٍّ من الهواء والماء.
- 4 أصلُ طرفَ الخرطوم بالقمع، وأرفعُ القمعَ إلى أعلى مسافةٍ رأسيةٍ مقدارها 30 cm تقريباً، وأتركُ باقيَ الخرطوم مستقيماً ما أمكن على طاولة المختبر؛ بحيثُ يصبُّ طرفه الآخرُ في كأسٍ فارغٍ.
- 5 **ألاحظ:** أبدأُ بسكب الماء في القمع ونثرِ بذورٍ صغيرة الحجم فيه لتجري في الخرطوم، وأسجلُ ملاحظاتي حول حركة الماء من خلال حركة البذور عبرَ الخرطوم، أضغُ حجراً أو كرةً أمام مجرى الماء عند خروجه من الأنبوب، وألاحظُ حركة البذور أمام الحجر وخلفه. هل تلاحظ دورانَ البذور حول مركز دورانٍ أو محور دورانٍ؟

### التحليل والاستنتاج:

1. **استنتج** الخاصية التي توصلت إليها في الخطوة (2) وأقارنُها بين حالتَيْها في كلٍّ من المائعين؟
2. **استنتج** الخاصية التي توصلت إليها في الخطوة (3) وأقارنُ بين حالتَيْها في كلٍّ من المائعين؟
3. **أقارنُ** بين حركة البذور أثناء مرورها في الخرطوم وأمام الحجر وخلفه؟ متى يكون الجريان غير منتظم؟ ومتى يكون منتظماً؟ ما الخصائص التي استنتجتها لجريان الماء في الخطوة (5)؟
4. **أتوقع** ما يحدث لعجلة قابلة للدوران إذا وضعت في مجرى الماء خلف الحجر؟

## معادلة الاستمرارية Continuity Equation



الشكل (23): نقصان مساحة مقطع أنبوب جريان الماء أثناء سقوطه.

نلاحظ الكثير من المشاهدات في حياتنا اليومية؛ مثل حركة المياه المتدفقة من فوهة الخرطوم بعد الضغط عليه في الشكل (17) بدايةً الدرس، وتدفق الماء من مضخة رشّ المزروعات، ونقصان قطر أنبوب جريان الماء المتدفق من الصنبور أثناء سقوطه في الشكل (23)؛ حيث تزداد سرعة الماء أثناء سقوطه فتقل مساحة مقطع الأنبوب. فما العلاقة التي تربط بين مساحة مقطع أنبوب الجريان وسرعة مرور المياه فيه؟

لنفترض أن مائعاً مثاليًا يجري في أنبوب مفتوح الطرفين ومساحة مقطعه العرضي متغيرة - كما في الشكل (24). وبما أن المائع المثالي غير قابل للانضغاط فإن كتلة المائع  $m_1$  التي تعبر مساحة مقطع معين  $A_1$  من الأنبوب بسرعة  $v_1$  تساوي كتلة المائع  $m_2$  التي تعبر مساحة مقطع آخر  $A_2$  من الأنبوب بسرعة  $v_2$  في الفترة الزمنية  $\Delta t$  نفسها، أي أن:

$$m_1 = m_2$$

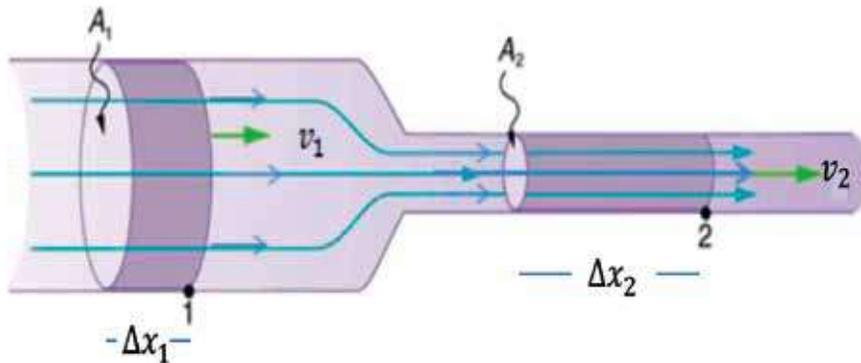
وبما أن  $V = A\Delta x$  ،  $m = \rho_f V$  : المسافة التي يقطعها المائع في الفترة الزمنية  $(\Delta t)$  فإن:

$$\rho_1 A_1 \Delta x_1 = \rho_2 A_2 \Delta x_2$$

وبقسمة طرفي المعادلة على  $\Delta t$ ، وحيث إن  $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$  فإن:

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2$$

الشكل (24): جريان مائع مثالي في أنبوب جريان أفقي، مساحة مقطعه متغيرة.



وحيث إن كثافة المائع ثابتة ( $\rho_1 = \rho_2$ )؛ لأنه لا انضغاطي، فإن:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

هذه المعادلة تُسمى معادلة الاستمرارية **Continuity equation**

ويُعبَّر عنها بالكلمات كما يأتي: «حاصل ضرب مساحة المقطع العرضي لأنبوب جريان المائع في سرعة المائع عند ذلك المقطع يساوي مقدارًا ثابتًا ( $Av = \text{constant}$ )». ويمثل المقدار  $Av$  معدل

التدفق الحجمي  $\frac{V}{\Delta t}$  **Volume flow rate** وهو حجم المائع الذي يعبر مساحة مقطع معين من الأنابيب في وحدة الزمن:

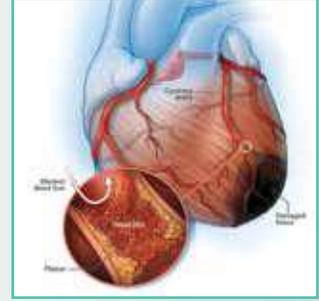
$$Av = \frac{V}{\Delta t}$$

ووحدة قياسه  $m^3/s$  في النظام الدولي للوحدات.

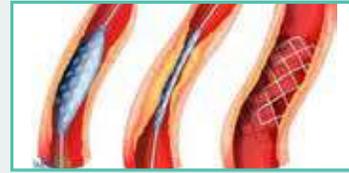
معادلة الاستمرارية تعبير رياضي عن مبدأ حفظ الكتلة، وتنطبق على أي مقطع من أنبوب الجريان، وليس شرطاً عند طرفيه. وتكمن أهمية معادلة الاستمرارية في أنها تصف حركة المائع عند مروره في أنبوب جريان تتغير مساحة مقطعه؛ فعندما ينتقل المائع من أنبوب واسع (مساحة مقطعه كبيرة) إلى أنبوب ضيق (مساحة مقطعه صغيرة) تزداد سرعة المائع لضمان مرور الحجم نفسه من المائع في الزمن نفسه. وتفسر معادلة الاستمرارية كثيراً من المشاهدات مثل تدفق مياه النهر بسرعة أكبر في الأماكن التي يضيق فيها مجرى النهر عن تلك التي يتسع فيها المجرى. والآن هل يمكن الإجابة على التساؤل الذي ورد بداية الدرس المتعلق بالضغط على فوهة خرطوم مياه الري؛ لوصول المياه إلى مسافة أكبر.

✓ **أتحقق:** ما العوامل التي يعتمد عليها معدل تدفق المائع من مقطع ما في أنبوب الجريان؟

## الفيزياء والطب



عند حدوث انسداد جزئي أو كلي لبعض الشرايين التي تغذي عضلة القلب؛ نتيجة تراكم المواد الدهنية على جدران الشرايين الداخلية مسببة تضيقاً في الشرايين، كما يبدو في الشكل: تزداد سرعة تدفق الدم في تلك الشرايين حسب معادلة الاستمرارية، فيلجأ الأطباء إلى إجراء عملية القسطرة لتوسعة تلك الشرايين باستخدام البالون وتركيب شبكات أحياناً، لذا؛ يُنصح بتناول غذاء صحي وإجراء فحوصات مخبرية دورية للكوليسترول والدهون في الدم.



**أفكر:** أفسر ما يأتي:

- زيادة سرعة الماء المتدفق من خرطوم المياه عند الضغط على فوهته؟
- بقصان اتساع مجرى الماء في الشكل (23) أثناء سقوطه نحو الأسفل؟

## المثال 6

يضخ قلب الإنسان الدم إلى الشرايين التي تتفرع إلى شعيرات، فإذا علمت أن الدم يتدفق بسرعة  $5 \times 10^{-2} \text{ m/s}$  في شريانٍ مساحةً مقطعية  $6 \text{ mm}^2$ ، يتفرع إلى شعيراتٍ متماثلةٍ مساحةً مقطع كل شعيرة منها  $0.3 \text{ mm}^2$  وسرعة تدفق الدم في كل منها  $2 \times 10^{-3} \text{ m/s}$  أجد:

أ . معدل تدفق الدم في الشريان؟

ب . عدد الشعيرات التي تفرعت من الشريان؟

المعطيات:  $A_1 = 6 \text{ mm}^2 = 6 \times 10^{-6} \text{ m}^2$  ،  $v_1 = 5 \times 10^{-2} \text{ m/s}$

$A_2 = 0.3 \text{ mm}^2 = 3 \times 10^{-7} \text{ m}^2$  ،  $v_2 = 2 \times 10^{-3} \text{ m/s}$

المطلوب:  $V/\Delta t = ?$  ، عدد الشعيرات  $N = ?$

الحل:

أ . معدل التدفق:

$$V/\Delta t = A_1 v_1 = (6 \times 10^{-6})(5 \times 10^{-2}) = 3 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$$

ب . عدد الشعيرات  $N$ :

سرعة تدفق الدم في كل شعيرة ( $v_2$ ) متساوية؛ لأن مساحة مقطع الشعيرات متساوية.  
معدل التدفق في الشريان = مجموع معدل التدفق في الشعيرات

$$A_1 v_1 = N(A_2 v_2)$$

$$3 \times 10^{-7} = N \times (3 \times 10^{-7})(2 \times 10^{-3})$$

$$N = \frac{3 \times 10^{-7}}{6 \times 10^{-10}} = 500$$

نلاحظ أن سرعة اندفاع الدم في الشعيرات الدموية صغيرة (قليلة) جدًا مقارنةً مع سرعته في الشريان، الأمر الذي يتيح حدوث عمليات تبادل الغازات (الأكسجين وثنائي أكسيد الكربون) مع الخلايا والأنسجة، إضافة إلى تزويدها بالمواد الغذائية، وهذه من حِكَمِ الله عزَّ وجلَّ.

## المثال 7



الشكل (25): تدفق شلالات نياجارا.

يتدفق الماء في شلالات نياجارا كما في الشكل (25)، وعند لحظة معينة يتدفق بمعدل  $5525 \text{ m}^3/\text{s}$  من مجرى عرضه  $670 \text{ m}$  وعمق الماء فيه تقريباً  $2 \text{ m}$ ، أحسب:

أ. سرعة الماء المتدفق عند تلك اللحظة.

ب. حجم الماء المتدفق في 5 دقائق.

المعطيات:  $h = 2 \text{ m}$  ،  $l = 670 \text{ m}$  ،  $\frac{V}{\Delta t} = 5525 \text{ m}^3/\text{s}$

المطلوب:  $V = ?$  ،  $v = ?$

الحل:

أ. مساحة المقطع العرضي لمجرى الماء كما في الشكل:

$$A = l \times h = 2 \times 670 = 1340 \text{ m}^2$$

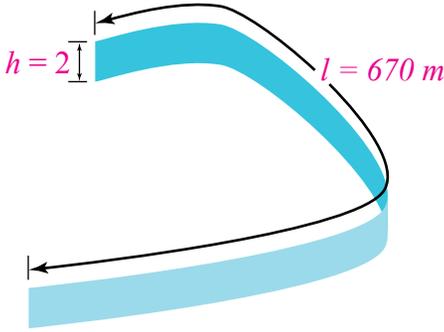
لإيجاد سرعة تدفق الماء نستخدم المعادلة الآتية:

$$Av = \frac{V}{\Delta t}$$

$$1340 \times v = 5525 \rightarrow v = \frac{5525}{1340} \cong 4 \text{ m/s}$$

ب. حجم الماء المتدفق في 5 دقائق:

$$\frac{V}{5 \times 60} = 5525 \rightarrow V = 1657500 \text{ m}^3$$



## تمرين

أنبوب ماء نصف قطره  $0.02 \text{ m}$  يتدفق فيه الماء بمعدل  $1.25 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  يضيق ليصبح نصف قطره  $0.01 \text{ m}$ ، أحسب:

أ. سرعة تدفق الماء في الجزء الواسع من الأنبوب؟

ب. سرعة تدفق الماء في الجزء الضيق من الأنبوب؟

ج. حجم الماء المتدفق من الجزء الضيق في  $20 \text{ s}$ ؟

## معادلة برنولي Bernoulli's Equation

ربّما تستغربُ وتتساءلُ: كيفَ لطائرةٍ مثلَ الإيربصِ كتلتها تزيدُ عنَ 300 tons أنَ تطيرَ في الهواءِ؟ وما الذي يجعلُ كرةَ التنسِ ترتفعُ إلى أعلى في الهواءِ داخلَ الكأسِ عندَ تسليطِ تيارٍ هوائيٍّ أفقيٍّ (يؤدي إلى زيادةٍ سرعةِ الهواءِ) فوقَ سطحِ الكأسِ، كما في الشكلِ (26)؟ العالمُ الفيزيائيُّ السويسريُّ دانيال برنولي (1700 - 1782) درسَ العلاقةَ بينَ ضغطِ المائعِ وسرعتهِ وارتفاعه.

نفترضُ أنَ مائعًا مثاليًا يجري عبرَ أنبوبٍ يتغيرُ كلُّ من مساحةِ مقطعه العرضيِّ وارتفاعه عن سطح الأرض، كما في الشكلِ (27)، فإنَّ المعادلةَ التي تربطُ بينَ ضغطِ المائعِ وسرعتهِ وارتفاعه اشتقَّها العالمُ برنولي، وهي تطبيقٌ لمبدأ حفظِ الطاقةِ على المائعِ المثاليِّ، وسُمِّيتْ تلكَ المعادلةُ بمعادلةِ برنولي **Bernoulli's equation** وتنصُّ على:

«أنَّ مجموعَ الضغطِ والطاقةِ الميكانيكيةِ (طاقةِ الوضعِ + طاقةِ الحركةِ) لوحدةِ الحجمِ يساوي مقدارًا ثابتًا» عندَ جميعِ النقاطِ على طولِ مجرى المائعِ المثاليِّ.

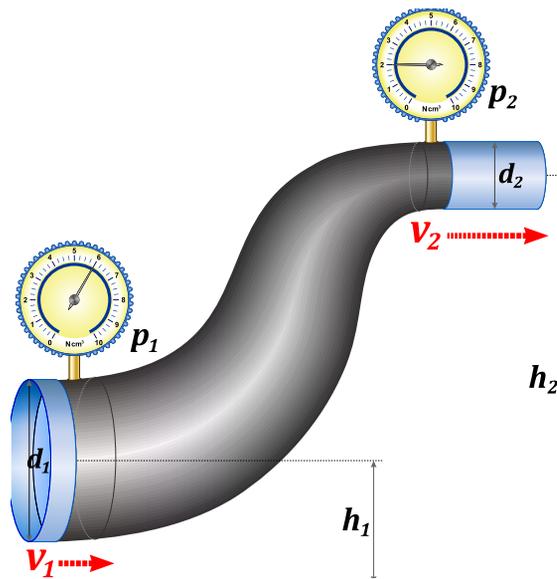
ويُعبرُ عنها رياضياً على النحو الآتي:

$$P + \frac{1}{2} \rho_f v^2 + \rho_f gh = Constant$$



الشكلُ (26): ارتفاعُ كرةِ التنسِ في الهواءِ عندَ تسليطِ تيارٍ هوائيٍّ فوقَ الكأسِ أفقيًا.

الشكلُ (27): جريانُ المائعِ في أنبوبٍ تتغيرُ مساحةُ مقطعه وارتفاعه.



عند مقارنة موقعين: (1 و 2) على مجرى السائل نحصل على:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho_f v_1^2 + \rho_f g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho_f v_2^2 + \rho_f g h_2$$

حيث:

$P_1$ : ضغط المائع عند الموقع الأول.

$P_2$ : ضغط المائع عند الموقع الثاني.

$\rho_f$ : كثافة المائع.

$v_1$ : سرعة المائع في الموقع الأول.

$v_2$ : سرعة المائع في الموقع الثاني.

$h_1$ : ارتفاع مركز الأنبوب في الموقع الأول عن مستوى مرجعي (سطح الأرض مثلاً).

$h_2$ : ارتفاع مركز الأنبوب في الموقع الثاني عن المستوى المرجعي نفسه في الموقع الأول.

$g$ : تسارع السقوط الحر.

$(\frac{1}{2} \rho_f v^2)$ : طاقة الحركة لوحدة الحجم

$$\frac{\frac{1}{2} m v^2}{V} = \frac{1}{2} \rho_f v^2, \quad \frac{m}{V} = \rho_f$$

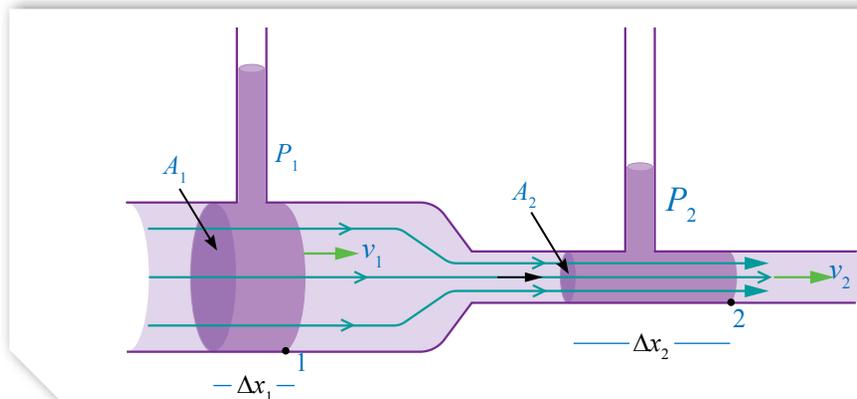
$(\rho_f g h)$ : طاقة الوضع لوحدة الحجم

$$\frac{m g h}{V} = \rho_f g h, \quad \frac{m}{V} = \rho_f$$

و على اعتبار المثال الآتي حالة خاصة؛ عندما يكون أنبوب الجريان

أفقياً ( $h_1 = h_2$ )، كما في الشكل (28) فإن معادلة برنولي تؤول إلى:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho_f v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho_f v_2^2$$



الشكل (28): نقصان الضغط بزيادة سرعة المائع.

**أفكر:** أفسر ارتفاع كرة التنس في الهواء عند تسليط تيار هوائي فوقها في الشكل (26).

وبحسب معادلة الاستمرارية فإن سرعة المائع  $v_2$  في الأنبوب ذي القطر الأصغر تكون أكبر من سرعة المائع  $v_1$  في الأنبوب ذي القطر الأكبر، وبناءً على المعادلة السابقة يكون الضغط  $P_2$  أقل من الضغط  $P_1$  بمعنى: «يقل ضغط المائع كلما ازدادت سرعته» كما في الشكل (28)، وهذه حالة خاصة من معادلة برنولي، وحقيقة مهمة يمكن من خلالها تفسير كثير من المشاهدات والظواهر الحياتية. ما الدليل على أن  $(P_2 < P_1)$  في الشكل (28)؟

✓ **أتحقق:** أذكر نص معادلة برنولي عن المائع المثالي، وأعبر عنها بصورة رياضية.

## المثال 8

يجري الماء في خرطوم أفقي بسرعة  $v = 3 \text{ m/s}$ ، فإذا كان ضغط الماء في الخرطوم  $1.4 \times 10^5 \text{ Pa}$  وعند تقليل قطر الخرطوم هبط ضغط الماء ليصبح  $1.1 \times 10^5 \text{ Pa}$ ، أحسب:

أ. سرعة الماء عبر الجزء الضيق من الخرطوم؟

ب. نسبة مساحة مقطع الجزء الضيق إلى مساحة الجزء الواسع من الخرطوم؟

المعطيات:  $\rho_f = 10^3 \text{ kg/m}^3$  ،  $P_2 = 1.1 \times 10^5 \text{ Pa}$  ،  $P_1 = 1.4 \times 10^5 \text{ Pa}$  ،  $v_1 = 3 \text{ m/s}$

المطلوب:  $v_2 = ?$  ،  $\frac{A_2}{A_1} = ?$

**الحل:**

أ. بما أن أنبوب الجريان أفقي فإن:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho_f v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho_f v_2^2$$

$$1.4 \times 10^5 + \frac{1}{2} \times 10^3 \times 3^2 = 1.1 \times 10^5 + \frac{1}{2} \times 10^3 \times v_2^2$$

$$v_2 = \sqrt{69} = 8.3 \text{ m/s}$$

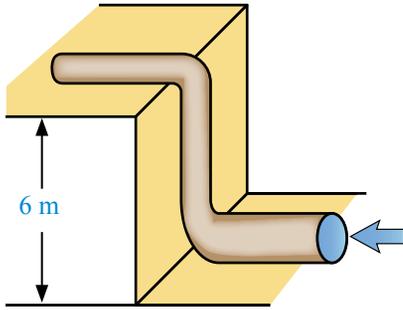
ب. نطبق معادلة الاستمرارية:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{A_2}{A_1}$$

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{3}{8.3} = 0.36$$

## المثال 9



الشكل (29): ضخ المياه إلى الطابق الثاني.

يتم تشغيل نظام تدفئة مركزية لتسخين المياه في منزل مكون من طابقين باستخدام مضخة في الطابق الأرضي تضخ الماء بسرعة  $0.5 \text{ m/s}$  خلال أنبوب نصف قطره  $2 \text{ cm}$  تحت ضغط  $3 \times 10^5 \text{ Pa}$  إلى الطابق الثاني الذي يرتفع مسافة  $6 \text{ m}$  عن المضخة، كما في الشكل (29)؛ ليتدفق الماء من أنبوب نصف قطره  $1.2 \text{ cm}$ . أحسب:

أ . سرعة تدفق الماء في الأنبوب في الطابق الثاني.

ب . ضغط الماء في الأنبوب في الطابق الثاني.

المعطيات:  $v_1 = 0.5 \text{ m/s}$  ،  $P_1 = 3 \times 10^5 \text{ Pa}$  ،  $r_1 = 2 \text{ cm}$  ،  $r_2 = 1.2 \text{ cm}$  ،  $\rho_f = 10^3 \text{ kg/m}^3$  ،  $h_1 = 0 \text{ m}$  ،  $h_2 = 6 \text{ m}$

المطلوب:  $P_2 = ?$  ،  $v_2 = ?$

الحل:

أ . نستخدم معادلة الاستمرارية:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

$$v_2 = \frac{A_1 v_1}{A_2} = \frac{\pi r_1^2}{\pi r_2^2} v_1 = \frac{(0.02)^2}{(0.012)^2} \times 0.5 = 1.39 \text{ m/s}$$

ب . نستخدم معادلة برنولي:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho_f v_1^2 + \rho_f g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho_f v_2^2 + \rho_f g h_2$$

$$P_2 = P_1 + \frac{1}{2} \rho_f (v_1^2 - v_2^2) + \rho_f g (h_1 - h_2)$$

$$P_2 = 3 \times 10^5 + \frac{1}{2} \times 10^3 \times (0.5^2 - 1.39^2) + 10^3 \times 10 \times (0 - 6)$$

$$= 2.39 \times 10^5 \text{ Pa}$$

## تمرين

أنبوب تزويد يرتفع عن سطح الأرض مسافة رأسية مقدارها  $3 \text{ m}$  ومعدل تدفق السائل فيه  $2 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$  يتصل بأنبوب على سطح الأرض نصف قطره  $1.5 \text{ cm}$  وضغط السائل فيه  $3 \times 10^5 \text{ Pa}$  ، فإذا علمت أن كثافة السائل  $2000 \text{ kg/m}^3$  ، فأحسب:

أ . سرعة السائل المتدفق من الأنبوب السفلي.

ب . ضغط السائل في أنبوب التزويد العلوي.

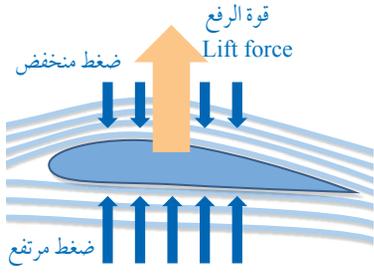
## تطبيقات على معادلة برنولي

### Applications of Bernoulli's Equation

معادلة برنولي تُطبَّق في مواقف وأوضاعٍ عديدةٍ، وتفسَّر كثيرًا من الظواهر والمشاهدات الحياتية المختلفة؛ نتناول منها ما يأتي:

#### أجنحة الطائرة **Airplane Wings**

**قوة الرفع Lift force:** تُستخدم معادلة برنولي عند تصميم أجنحة الطائرات، عن طريق تصميم شكل الجناح الانسيابي ليكون سطح الجناح العلوي منحنياً (محدباً)، وسطحه السفلي شبه مستوي؛ كما في الشكل (30) الذي يمثل مقطعاً عرضياً للجناح، وعندما يتحرك الجناح عبر الهواء ينساب الهواء فوق الجناح بسرعة أكبر من انسيابه تحت الجناح، وبالتالي، فإن ضغط الهواء فوق الجناح أقل من ضغطه أسفل الجناح حسب معادلة برنولي، وبذلك تتولد قوة الرفع **Lift force** ( $F_L$ )، وهي القوة المتولدة نتيجة فرق الضغط بين أسفل الجناح وأعلى، والتي تدفع بأجنحة الطائرة نحو الأعلى.

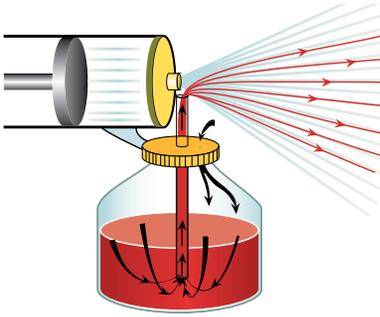


الشكل (30): صورة جناح الطائرة وخطوط الجريان حول مقطع عرضي له.

سؤال على الشكل: علام يدل تزاخم خطوط جريان الهواء فوق الجناح؟

#### المِرذاذ **Atomizer**

يتكون المِرذاذ من أنبوب أفقي واسع ينتهي بأنبوب ضيق يمر فوق أنبوب آخر رأسي؛ الجزء السفلي منه مغمور في السائل والجزء العلوي يتصل مع الأنبوب الأفقي الضيق، كما في الشكل (31). يعتمد عمل المِرذاذ على اندفاع الهواء من الأنبوب الواسع إلى الأنبوب الضيق فتزداد سرعته حسب معادلة الاستمرارية، وينخفض ضغطه حسب معادلة برنولي أي أن ضغط الهواء عند فوهة الأنبوب الرأسي أقل من ضغط الهواء داخل الوعاء الزجاجي؛ مما يؤدي إلى اندفاع السائل إلى أعلى، ليختلط مع الهواء المندفَع من الأنبوب الأفقي، ويتشتت على شكل رذاذ ناعم من القطرات. تعمل كثير من الأجهزة والأدوات بالطريقة الموضحة في الشكل ووفق استخداماتها؛ مثل: زجاجات العطور، ومرشات الطلاء، ومرشات المنظفات، وفي مازج السيارة (الكاربوريتر).



الشكل (31): المِرذاذ.

سؤال على الشكل: ما فائدة الفتحة في أعلى القارورة؟

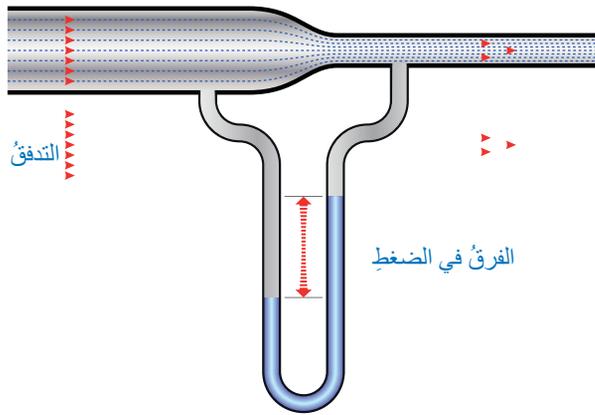
## مقياسُ فنتوري Meter Venturi

مقياسُ فنتوري Venturi meter جهازٌ يُستخدمُ لقياسِ سرعةٍ ومعدّلِ تدفقِ الموائعِ في الأنابيبِ بتطبيقِ معادلةِ برنولي؛ وهو أنبوبٌ مفتوحُ الطرفين، محتقِقٌ (ضيقٌ) في وسطه، وعندَ مرورِ المائعِ في الاختناقِ (ضيقِ الوسط) تزدادُ سرعتهُ فيقلُّ ضغطه، علل ذلك.

ويتم قياسُ سرعةٍ ومعدّلِ تدفقِ المائعِ عن طريقِ قياسِ الفرقِ بينَ ضغطِ المائعِ في الأنبوبِ وضغطه في اختناقِ الأنبوبِ، كما هو مبينٌ في الشكلِ (32). والصورةُ المبيّنةُ في الشكلِ (33) تُظهرُ الاستخدامَ العمليَّ لمقياسِ فنتوري

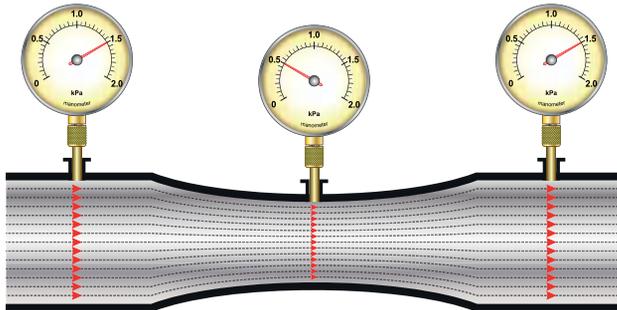


الشكلُ (33): مقياسُ فنتوري في إحدى محطاتِ المياهِ.

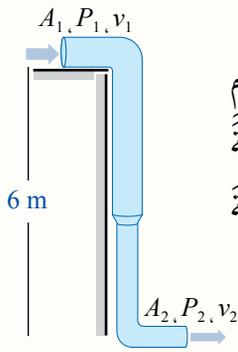


الشكلُ (32): أشكالٌ مختلفةٌ لمقياسِ فنتوري.

سؤال: ما الفرقُ بينَ مقياسي فنتوري في الشكلِ؟



## مراجعة الدرس



ب. ما النصيحة التي تقدمها لأصحاب تلك المنازل لحل تلك المشكلة؟

3. **أستخدم المتغيرات:** يتدفق الماء من ارتفاع 6 m عن سطح الأرض - باستخدام مضخة - عبر أنبوب متغير مساحة المقطع كما في الشكل، فإذا علمت أن مساحة مقطع الطرف العلوي للأنبوب  $0.2 \text{ m}^2$ ، وضغط الماء فيه  $1.5 \times 10^5 \text{ Pa}$  ومساحة مقطع الطرف السفلي للأنبوب  $0.05 \text{ m}^2$ ، وسرعة الماء فيه  $4 \text{ m/s}$  فأجد:

أ. سرعة الماء في الطرف العلوي للأنبوب.

ب. ضغط الماء في الطرف السفلي للأنبوب.

ج. حجم الماء المتدفق من الطرف السفلي للأنبوب خلال دقيقتين.

4. **أقارن:** يمثل الشكل أنبوب جريان مساحة مقطعه غير

منتظمة. عند جريان المائع في الأنبوب أجيب عما يأتي:

أ. أوضح كيف تتغير سرعة المائع في الأنبوب.

ب. أقارن بين ارتفاع المائع في كل أنبوب من الأنابيب العمودية الثلاثة.

5. **أحسب:** يتفرع الشريان الأبهر البطني إلى فرعين رئيسيين يُسمى

كل منهما الشريان الحرقفي كما في الشكل، إذا علمت أن قطر

الشريان الأبهر  $2 \text{ cm}$  وسرعة جريان الدم عبره  $0.2 \text{ m/s}$  وقطر

كل من الشريانيين الحرقفيين  $1 \text{ cm}$  (باعتبارهما متماثلين).

فأحسب:

أ. معدل تدفق الدم في كل من الشريين الثلاثة.

ب. سرعة تدفق الدم في الشريان الحرقفي.



## الغاطس Draft Mark

الغاطس Draft mark هو تدرّيج رقمي يشير إلى المسافة الرأسية بين سطح الماء وأسفل هيكل السفينة، ويحدد الغاطس عمق المياه التي يمكن للسفينة أو الزورق أن يبحر فيها بأمان، أنظر الشكل (34). وقد يُستخدم الغاطس أيضًا لتحديد وزن الشحنة الموجودة على السفينة بحساب إجمالي المزاح واستخدام قاعدة أرخميدس. أما خط التحميل Load Line فهو علامة خاصة توضع على وسط السفينة تشير إلى الحمولة الآمنة للسفينة بما فيها وزن هيكل السفينة والبضائع المحملة والأشخاص الموجودين على متنها. ويجب على جميع السفن التي يبلغ طولها 24 مترًا أو أكثر أن يكون لديها علامة خط تحميل، أنظر الشكل (35)، حيث تمّ التوصل إلى اتفاقية دولية للتطبيق العالمي لخطوط التحميل؛ من أجل الحد من مخاطر إبحار السفن؛ ذلك أن العديد من الحوادث البحرية حدثت بسبب الحمولة الزائدة للسفن.



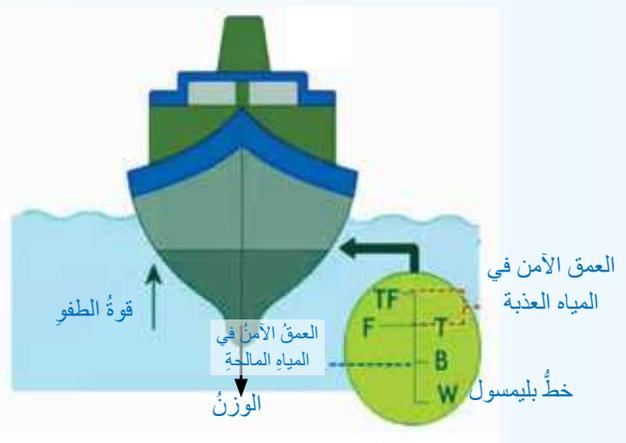
الشكل (34): تدرّيج الغاطس في السفينة.

نظرًا لأن طفو السفينة وعمرها يعتمدان إلى حد كبير على نوع الماء وكثافته - حيث تتغير قوة الطفو تبعًا لذلك - فليس مقبولاً من الناحية العملية تحديد حدّ عائم قياسي للسفينة في جميع الأوقات والأماكن. لهذا السبب؛ فإنّ خطّ التحميل مثلًا لسفينة تبحر في الشتاء في شمال المحيط الأطلسي يختلف عنه عندما تبحر السفينة في المناطق الاستوائية صيفًا وكذلك الأمر بالنسبة إلى المياه المالحة والمياه العذبة.

وهناك علامة تُسمّى خطّ بليمسول Plimsoll Line تشير إلى أقصى حمولة آمنة للسفينة في ظروف التشغيل المختلفة.

الشكل (35): خطّ التحميل في السفينة

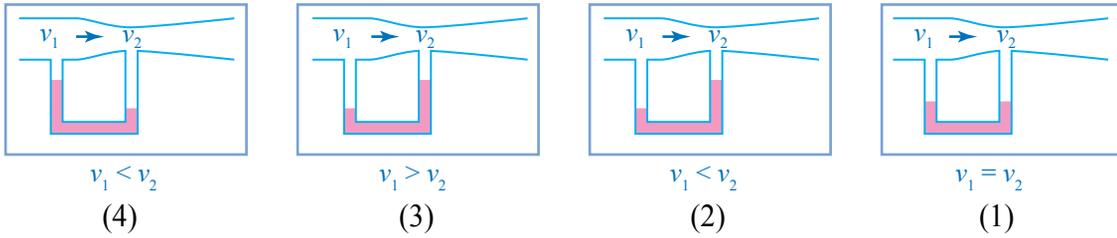
**أبحاث** مستعينًا بمصادر المعرفة المناسبة، أبحث عن أسباب غرق بعض السفن، مثل: التايتانيك، وعلاقة ذلك بقوة الطفو والحمولة، ثمّ أكتب تقريرًا عن ذلك، وأقرؤه أمام الطلبة في غرفة الصفّ يتبعه مناقشة مع معلمي وزملائي الطلبة



## مراجعة الوحدة

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

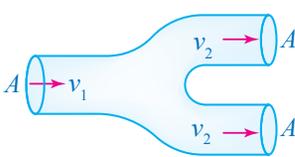
- وحدة قياس معدل التدفق الحجمي للمائع هي:
  - $m^3$
  - $m^3 s$
  - $m^3/s$
  - $m^2/s$
- أي مما يأتي يُعد تطبيقاً أو مثالاً على قاعدة أرخميدس:
  - مقياس فنتوري.
  - مقياس كثافة السوائل.
  - المرذاذ.
  - أجنحة الطائرة.
- من خصائص المائع المثالي التي تميزه عن المائع الحقيقي أنه:
  - لزج.
  - انضغاطي.
  - غير دوامي.
  - جريانه غير منتظم.
- قوة الطفو لسبيكة وزنها في الهواء 600 N ووزنها في الماء 200 N تساوي:
  - 800 N
  - 600 N
  - 400 N
  - 200 N
- عند هبوب الرياح بشكل أفقي فوق فتحة مدخنة، كيف يتأثر الدخان الصاعد في المدخنة:
  - يرتفع الدخان بسرعة أكبر في المدخنة.
  - يرتفع الدخان بسرعة أقل في المدخنة.
  - ج. يندفع الدخان إلى الأسفل في المدخنة.
  - لا يتأثر الدخان الصاعد في المدخنة.
- أي الأشكال الآتية يمثل ما يحدث للمائع عند جريانه في مقياس فنتوري:
  - الشكل (1).
  - الشكل (2).
  - الشكل (3).
  - الشكل (4).



- أ. الشكل (1). ب. الشكل (2). ج. الشكل (3). د. الشكل (4).

- ما الذي يحدث لكل من وزن المنطاد وقوة الطفو عند تسخين الهواء داخل المنطاد:
  - يقل وزن المنطاد، وتزداد قوة الطفو.
  - يقل وزن المنطاد، وتبقى قوة الطفو ثابتة.
  - يزداد وزن المنطاد، وتزداد قوة الطفو.
  - يقل وزن المنطاد، وتقل قوة الطفو.
- عند انتقال السفينة من الماء العذب إلى ماء البحر، فإن كلاً من قوة الطفو وحجم الجزء المغمور من السفينة بعد اتزانها في مياه البحر مقارنةً بالمياه العذبة، على الترتيب:
  - تبقى القوة ثابتة، يقل الحجم.
  - تبقى القوة ثابتة، يزداد الحجم.
  - تزداد القوة، يبقى الحجم ثابتاً.
  - تزداد القوة، يقل الحجم.

- أي العبارات الآتية صحيحة بالنسبة إلى جسم يطفو على سطح السائل:
  - حجم السائل المزاح يساوي حجم الجسم.
  - وزن السائل المزاح يساوي وزن الجسم في السائل.
  - قوة الطفو أكبر من وزن السائل المزاح.
  - حجم السائل المزاح يساوي حجم الجزء المغمور من الجسم.



- أنبوب جريان مساحة مقطعه  $A$  وسرعة جريان المائع فيه  $v_1$ ، تفرع إلى أنبوبين مساحة مقطع كل منهما  $A$  كما في الشكل، في أي من الأنبوبين - سرعة المائع  $v_2$  تساوي:
  - $4v_1$
  - $2v_1$
  - $v_1$
  - $\frac{1}{2} v_1$

2. **أقارن** بين قوة الطفو والوزن الحقيقي في كل من التطبيقات والحالات الآتية:  
 أ. القارب وهو طاف على سطح البحر.  
 ب. الغواصة أثناء هبوطها تحت الماء.  
 ج. المنطاد أثناء صعوده للأعلى في الهواء.

3. **أحلل**: الزمن اللازم لملء كأس ماء من خرطوم مياه 30 s، وعند الضغط على فوهة الخرطوم تضاعفت سرعة تدفق الماء من الخرطوم. كم من الوقت يلزم لملء الكأس نفسها؟

4. **أحسب**: وضعت كرة قدم متوسط كثافتها  $15 \text{ kg m}^{-3}$  على سطح سائل فانغمز ربع حجمها في السائل، أحسب كثافة السائل.

5. **أحلل**: اعتمادًا على البيانات المبينة في الشكل وباعتبار كثافة الماء  $10^3 \text{ kg m}^{-3}$  أجد:

أ. وزن السائل المزاج. ب. قوة الطفو.  
 ج. وزن الجسم الحقيقي. د. أرسم مخطط الجسم الحر للجسم المعلق.

6. **أفسر** ما يأتي:

أ. قوة الطفو لجسم مغمور كليًا في سائل لا تتغير بتغير عمق الجسم تحت سطح السائل.

ب. عند وضع بالونين متماثلين حجمًا في الهواء؛ أحدهما مملوء بغاز الهيليوم والآخر بغاز الهيدروجين؛ فإن قوة الطفو في كل منهما متساوية.

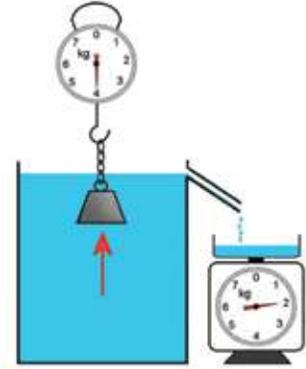
7. يمثل الشكل المجاور خطوط جريان الهواء حول جناح الطائرة، اعتمادًا عليه أجب عما يأتي:

أ. في أية منطقة حول الجناح تتقارب خطوط الجريان؟  
 ب. ما العلاقة بين تقارب خطوط الجريان، وكل من سرعة الهواء وضغطه؟  
 ج. ما اسم المعادلة التي تفسر قوة الرفع في أجنحة الطائرة؟  
 د. ما سبب تولد قوة الرفع في جناح الطائرة؟  
 هـ. كيف يمكن زيادة قوة الرفع؟

8. **أحل مشكلات**: متزلج كتلته  $50 \text{ kg}$  يريد أن يستخدم لوحًا خشبيًا كثافته  $600 \text{ kg m}^{-3}$  وسماكته  $10 \text{ cm}$  كما في الشكل، إذا علمت أن كثافة ماء البحر  $1024 \text{ kg m}^{-3}$  فأجد أقل مساحة للوح الخشب تمكن المتزلج من استخدامه دون أن يغرق؟

9. **أحسب**: أنبوب نفط أفقي سرعة جريان السائل فيه  $20 \text{ m/s}$  يضيق ليصبح قطره نصف قطر الأنبوب الرئيس، ويقل ضغط السائل فيه ليصبح  $2 \times 10^5 \text{ Pa}$ ، باعتبار كثافة السائل  $800 \text{ kg m}^{-3}$  أجد:

أ. سرعة جريان النفط في الأنبوب الواسع.  
 ب. ضغط النفط في الأنبوب الرئيس.



# الحركة الموجية

## Wave Motion

# الوحدة

# 6



### أتأمل الصورة

يعمل العلماء في بناء نموذج متطور يمكنهم من حصاد الطاقة الهائلة التي تحملها موجات البحار، والتي تشكل مصدر طاقة متجددة لا ينضب، إضافة إلى كونها طاقة نظيفة مقارنة ببعض موارد الطاقة الأخرى. وقد صمم العلماء جهازاً يكتف الموجات ويركزها في مكان ضيق، قبل أن تُحوّل من طاقة حركية إلى طاقة كهربائية.

ما نوع الطاقة التي تحملها موجات البحر، وعلى ماذا تعتمد؟

## الفكرة العامة:

دراسة الحركة الموجية وسلوك الموجات تساعدنا في فهم كثير من الظواهر والمواقف الحياتية المتعلقة بالصوت والضوء؛ فالصوت والضوء ينتقلان على شكل موجات تشبه موجات الماء، حيث يمكن وصفها بمعرفة طولها الموجي وترددها وسعتها وسرعة انتشارها.

### الدرس الأول: الموجات وصفاتها

#### Waves and their Characteristics

**الفكرة الرئيسية:** الموجات تنقل الطاقة ولا تنقل المادة، وندرك ذلك بحواسنا المختلفة؛ فنحن نشاهد موجات البحر وهي تنقل الطاقة الحركية لقارب يرسو على الشاطئ، بينما لا تنقل الماء نحو الشاطئ، وإن موجات الصوت والضوء تنقل الطاقة أيضًا.

### الدرس الثاني: خصائص الحركة الموجية

#### Properties of Wave Motion

**الفكرة الرئيسية:** للموجات المختلفة سلوك محدد يظهر في تطبيقات حياتية كثيرة عند انتقالها خلال الوسط الواحد، أو بين وسطين مختلفين، مثل: الانعكاس والانكسار والتداخل والحيود والاستقطاب.

## الموجات تنقل الطاقة ولا تنقل المادة



**المواد والأدوات:** نابضان فلزيان طويلان: أحدهما رفيع والآخر عريض، منصّب فلزيّ، حلقة فلزية، شريط قماشّي ملون.

**إرشادات السلامة:** الحذر من سقوط الأجسام والأدوات على القدمين.  
**خطوات العمل:**

- 1 أثبت المنصّب الفلزيّ كما في الشكل مع تثبيت قاعدته بأجسام ثقيلة، ووضع الحلقة الفلزية حول ساق المنصّب.
- 2 أربط النابض الرفيع (أ) من منتصفه مع الحلقة الفلزية باستخدام الشريط القماشّي الملون.

- 3 **أجرب:** أمسك طرف النابض بيدي وأطلب من زميلي أن يمسك الطرف الثاني ويثبت يده، وأحرك الطرف الذي بيدي للأعلى وللأسفل بشكل منتظم، وأراقب حركة الشريط الملون، ثم أدوّن ملاحظاتي في الجدول.
- 4 أغير من سرعة حركة يدي للأعلى وللأسفل، وأراقب حركة الشريط الملون وأدوّن ملاحظاتي في الجدول.
- 5 أجعل مدى حركة يدي للأعلى وللأسفل أكبر وأوسع من السابق، ثم **ألاحظ** حركة الحلقة الفلزية، وأدوّن ملاحظاتي.

- 6 **أجرب:** أضع وأفراد مجموعتي النابض العريض (ب) على الأرض، ثم أحرك يدي لتصنع أو تحدث تضاعطات وتخلخلات متتالية بينما يثبت زميلي الطرف الآخر، ثم ألاحظ كيف ينتقل التخلخل خلال النابض.

## التحليل والاستنتاج:

- 1 أصف شكل حركة النابض، محدداً مصدر الطاقة اللازمة لهذه الحركة.
- 2 **أفسر** سبب حركة الحلقة الفلزية، موضحاً كيف انتقلت الطاقة الحركية إليها.
- 3 **أقارن** بين اتجاه حركة الحلقة الفلزية واتجاه انتشار الموجة في الحبل.
- 4 أفرق بين حركة دقائق الوسط في كل من نوعي الموجات الطولية والمستعرضة.
- 5 **أستنتج:** ما الطرائق التي يمكن بها زيادة الطاقة المنقولة في المدة الزمنية نفسها خلال الحركة الموجية؟

## الموجة The wave

تساعدنا دراسة الفيزياء في فهم الظواهر من حولنا. ومن بين التطبيقات اليومية والظواهر الطبيعية التي نشاهدها كثيراً في حياتنا: الموجات والحركة الموجية. تنتشر الموجات على سطح الماء، كما في الشكل (1)، وتنتقل الموجات في حبل مشدود أو نابض، كما توجد أنواع أخرى من الموجات يمكننا الإحساس بها دون أن نراها مثل موجات الصوت، وموجات الضوء.

تُعرف الموجة Wave في الفيزياء بأنها اضطراب أو اهتزاز ينتقل من مكان إلى آخر، وتعدُّ الموجة وسيلة لنقل الطاقة، ومع أن الاضطراب يتسبب في حدوث اهتزاز لدقائق الوسط الناقل للموجة، إلا أن هذه الدقائق لا تنتقل من موقع إلى آخر مثل الطاقة. وقد شاهدنا ذلك يحدث لأجزاء النابض في التجربة الاستهلاكية، حيث كانت تهتز للأعلى وللأسفل، لكنها لم تنتقل باتجاه انتقال الطاقة في النابض. تتولد الموجات في الوسط نتيجة اهتزاز المصدر المولد للموجات، ثم ينتقل الاهتزاز من المصدر خلال الوسط الناقل.

الشكل (1): موجات الماء على سطح البحر.

### الفكرة الرئيسة:

الموجات تنقل الطاقة ولا تنقل المادة، وندرك ذلك بحواسنا المختلفة؛ فنحن نشاهد موجات البحر وهي تنقل الطاقة الحركية لقارب يرسو على الشاطئ، بينما لا تنقل الماء نحو الشاطئ. وإن موجات الصوت والضوء تنقل الطاقة أيضاً.

### نتائج التعلم:

- أوضح صفات الموجات والمفاهيم المتعلقة بكل منها.
- أوظف معرفته بالمفاهيم المتعلقة بالموجات وصفاتها في حل مسائل حسابية، وفي تفسير ظواهر ومشاهدات يومية.
- أمثل رسومات بيانية تتعلق بصفات الموجات، ويحلها.
- أوظف التجربة العملية في تعريف صفات الموجات.
- أتوصل إلى أن الصوت موجة طولية تعتمد صفاتها على الوسط الذي تنتشر فيه.
- أتوصل إلى أن موجات (الراديو) والضوء والأشعة السينية لها أطوال موجية مختلفة ضمن طيف الموجات الكهرومغناطيسية.

### المفاهيم والمصطلحات:

- موجة Wave
- موجة طولية Longitudinal Wave
- موجة مستعرضة Transverse Wave
- طول موجي Wave Length
- سعة الموجة Wave Amplitude
- تردد Frequency
- زمن دوري Period
- سرعة الموجة Speed of a Wave
- عتبة السمع Threshold of Hearing
- شدة الموجة Wave Intensity

## أنواع الموجات Types of Waves

يُحدّد نوع الموجات بناءً على اتجاه اهتزاز دقائق الوسط؛ إذ تصنّف الموجات إلى نوعين رئيسيين هما: موجات مستعرضة وموجات طولية.

### الموجات المستعرضة Transverse Waves

تُسمى الموجة التي يكون اتجاه اهتزاز جزيئات الوسط الناقل لها متعامداً مع اتجاه انتشارها موجة مستعرضة Transverse wave، مثل موجات سطح الماء والموجات التي تنتقل في نابض أو حبل مشدود، كما لاحظت في التجربة الاستهلاكية. وتنتشر الموجات المستعرضة في الأوساط الصلبة والسائلة، بينما لا يمكنها الانتقال خلال الغازات. مع أنّ بعض الموجات المستعرضة مثل موجات الضوء يمكنها الانتقال في الفراغ.

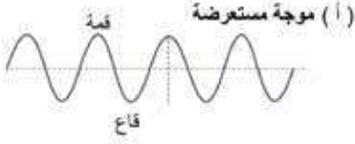
يبين الشكل (أ/2) انتشار الموجات المستعرضة في حبل باتجاه أفقي مع امتداد الحبل، لاحظ اهتزاز أجزاء الحبل في اتجاه المحور العمودي على شكل قمم وقيعان متتالية.

### الموجات الطولية Longitudinal Waves

تُسمى الموجة التي يكون فيها اتجاه اهتزاز جزيئات الوسط الناقل لها باتجاه انتشار الموجة نفسها موجة طولية Longitudinal wave، ومثل ذلك موجات الصوت وبعض أنواع الموجات التي تنتقل في النابض على شكل تضاعط وتخلخل، كما لاحظت في النابض العريض في النشاط التمهيدي. وينتشر هذا النوع من الموجات في الأوساط جميعها؛ الصلبة والسائلة والغازية. يبين الشكل (ب/2) انتشار الموجات الطولية في نابض، لاحظ كيف ينتشر التضاعط والتخلخل على طول النابض، التضاعط منطقة تتقارب فيها جزيئات الوسط، بينما تكون الجزيئات أكثر تباعدًا في منطقة التخلخل.

### صفات الموجة Characteristics of a Wave

للموجات جميعها - مهما اختلفت أنواعها - صفات مشتركة، نميز بها الحركة الموجية Wave motion، وهي الطريقة التي تنتشر بها



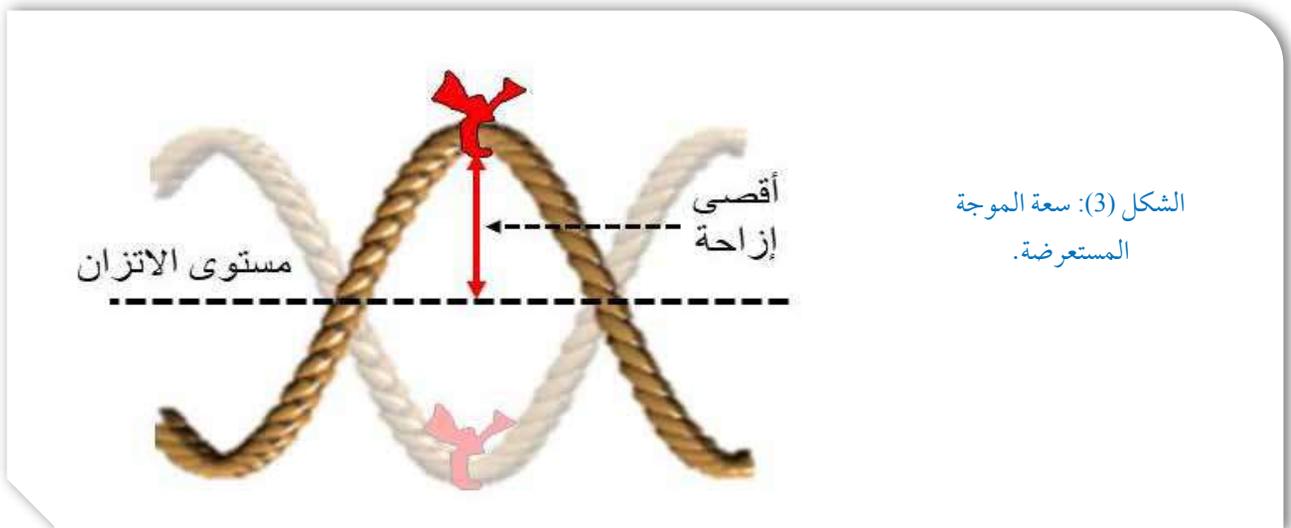
الشكل (2): الموجات المستعرضة والموجات الطولية.

الموجات في الأوساط المختلفة، وتختلف باختلاف أنواع الموجات سواءً أكانت مستعرضة أم طولية. وهذه الصفات هي:

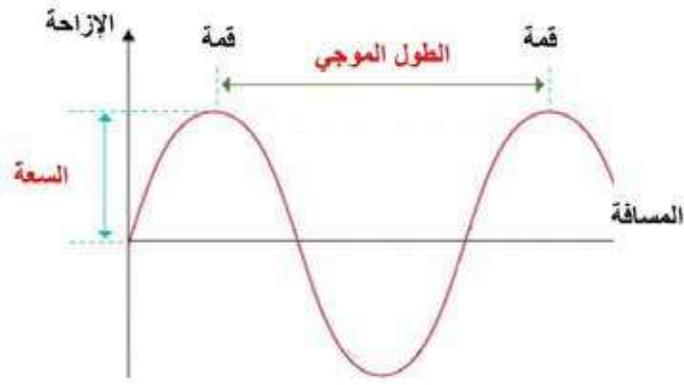
### سعة الموجة Wave Amplitude

لاحظنا في نوعي الموجات المستعرضة والطولية أن دقات الوسط تتحرك باتجاهين متعاكسين على طرفي موقع اتزانها؛ أي أنها تهتز، وقد يبدو هذا الاهتزاز أكثر وضوحاً في الموجات المستعرضة؛ فعند انتقال موجة مستعرضة في حبل مشدود، نجد أن العلامة المثبتة على الحبل، كما يبينها الشكل (3) تُغير موقعها باستمرارٍ بالنسبة إلى موقع اتزانها (موقع الاتزان هو نقطة على الحبل المشدود أفقياً بشكلٍ مستقيم في حالة عدم انتقال أي موجة خلاله)، ويمثل هذا التغير في الموقع الإزاحة التي تحدث لدقائق الحبل عند تلك العلامة، وتتغير هذه الإزاحة باستمرارٍ مع مرور الزمن. وتُعرف أقصى إزاحة تحدثها الموجة لدقائق الوسط الناقل بالنسبة إلى موقع اتزانها بأنها سعة الموجة **Wave amplitude**، ويرمز إليها على الشكل بالرمز (A). كما تُعرف شدة الموجة **Wave intensity** بأنها نسبة الطاقة التي تنقلها الموجة إلى وحدة المساحة التي يتعامد معها اتجاه انتشار الموجة. وهي تزداد بزيادة طاقة المصدر، وتقل بزيادة البعد عنه. لذلك فإن سعة الموجة تتناسب طردياً مع شدتها.

✓ **أتحقّق:** من أين تحصل الموجات على طاقتها؟



الشكل (4): الطول الموجي للموجة المستعرضة.



### طول الموجة Wave Length

توصف الموجات أيضًا باستخدام مفهوم الطول الموجي Wave length، وهو المسافة بين قمتين متتاليتين، كما في الشكل (4)، أو هو المسافة بين قاعين متتاليتين، ويُرمز إليه بالحرف اليوناني ( $\lambda$  - لامدا). وبصورة عامة فإن المسافة بين أي نقطتين متناظرتين ومتتاليتين على الموجة تساوي الطول الموجي.

### التردد Frequency

تتوالى الموجات عند استمرار انتقالها خلال الوسط بشكل متماثل، ويطلق على تكرار الموجات المتماثلة التردد Frequency، وهو عدد الموجات الكاملة ( $n$ ) التي تعبر نقطة ثابتة في الوسط خلال ثانية واحدة. ويُرمز إليه بالحرف اللاتيني ( $f$ )، أما وحدة قياس التردد فهي هيرتز (Hz)، وتكافئ ( $s^{-1}$ )، ويُستخدم أيضًا مفهوم الزمن الدوري Period للتعبير عن المدة الزمنية اللازمة لعبور موجة كاملة واحدة نقطة ثابتة في الوسط. ويُرمز إلى الزمن الدوري بالرمز ( $T$ )، ووحدة قياسه هي ( $s$ ). ويرتبط التردد بالزمن الدوري للعلاقة الرياضية الآتية:

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

✓ **أنحَقِّقْ:** كيف يمكنني التمييز بين الموجات المستعرضة والموجات الطولية؟

## المثال 1

يهتز جسمٌ وهو يلامسُ سطحَ الماءِ فيصدرُ عنه (12) موجةً مستعرضةً في مدةٍ زمنيةٍ مقدارها (3 s)، وتنتشرُ على سطحِ الماءِ. أحسبُ كلاً من: الزمنِ الدوريِّ والترددِ.

المعطياتُ: (t = 3 s)، (n = 12)

المطلوبُ: (T = ?)، (f = ?)

الحلُّ:

$$T = \frac{t}{n} = \frac{3}{12} = 0.25 \text{ s}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.25} = 4 \text{ s}^{-1}$$

تصدرُ الموجاتُ عن مصدرٍ مهتزٍّ، وترددُها يساوي ترددَ هذا المصدرِ، فالترددُ لا يعتمدُ على نوعِ الوسطِ، أيُّ أنه عندَ انتقالِ موجةٍ ترددها (5 Hz) بينَ وسطينِ مختلفينِ، فإنَّ ترددها لا يتغيرُ، ويبقى (5 Hz).

### سرعةُ الموجةِ Speed of a Wave

تُحسبُ سرعةُ الموجةِ بقسمةِ المسافةِ (s) التي تقطعُها على الزمنِ الكليِّ (t) اللازمِ لقطعِ تلكِ المسافةِ، وتُعطى سرعةُ الموجةِ بالعلاقةِ الرياضيةِ الآتية:

$$v = \frac{s}{t}$$

وتتناسبُ سرعةُ الموجةِ (v) طردياً معَ ترددها (f)، لأنَّه بزيادةِ سرعةِ انتقالِ الموجةِ يزدادُ عددُ الموجاتِ الكاملةِ التي تعبرُ نقطةً معينةً في الثانيةِ الواحدةِ؛ أيُّ يزدادُ الترددُ، ويُمثلُ ذلكَ التناسبُ كما يأتي:

$$f \propto v$$

وعندَ مقارنةِ موجتينِ تنتقلانِ في وسطٍ بالسرعةِ نفسها، حيثُ تمتلكُ إحداهما طولاً موجياً أكبرَ منَ الأخرى، نجدُ أنَّ الموجةَ ذاتَ الطولِ الموجيِّ الأكبرِ تنتقلُ بترددٍ أقلِّ، في حينِ تنتقلُ الموجةُ التي هي أقصرُ بترددٍ أكبرٍ؛ أيُّ أنَّ الطولَ الموجيِّ يتناسبُ عكسياً معَ الترددِ. ويُمثلُ ذلكَ رياضياً كما يأتي:

$$f \propto \frac{1}{\lambda}$$

مما سبق نتوصل إلى علاقة رياضية ترتبط فيها سرعة الموجة بكل من ترددها وطولها الموجي، وتنص على أن: سرعة الموجة تساوي حاصل ضرب التردد في الطول الموجي، وهي:

$$v = f\lambda$$

## المثال 2

يمسك صبي بطرف حبل مشدود ويحركه للأعلى والأسفل بتردد مقداره 5 Hz، إذا كان طول الموجة الواحدة يساوي 0.4 m، فأجد سرعة انتقال الموجات في الحبل:

المعطيات: ( $\lambda = 0.4 \text{ m}$ )، ( $f = 5 \text{ Hz}$ )

المطلوب: ( $v = ?$ )

الحل:

$$v = f\lambda = 5 \times 0.4 = 2 \text{ m/s}$$

## لتدرب

تنتقل موجة مستعرضة على سطح الماء بسرعة (12 m/s)، إذا علمت أن طولها يساوي 1.5 m، فأجد ترددها.

تختلف سرعات الموجات باختلاف أنواعها، فمثلاً، تختلف سرعة موجات الماء عن سرعة موجات الصوت. والجدول (1) يبين بعض الأمثلة على تغير سرعة الموجة باختلاف نوعها.

الجدول (1): تغير سرعة الموجات باختلاف كل من نوع الموجات ووسط انتقالها.

السرعة (m/s)	نوع الموجات والوسط الذي تنتقل خلاله
343	موجات الصوت في الهواء عند مستوى سطح البحر ودرجة حرارة (20°C).
1500	موجات الصوت في ماء البحر عند عمق (4 m) ودرجة حرارة (20°C).
4750	موجات الصوت في الصخور.
$2.00 \times 10^8$	موجات الضوء في الألياف البصرية الزجاجية.
$3.00 \times 10^8$	موجات الضوء في الهواء أو الفراغ (c).

ألاحظُ من الجدول السابق أيضًا أنَّ سرعةَ الموجة الواحدة تختلفُ من وسطٍ إلى آخر، وألاحظُ اختلافَ سرعة انتقالِ موجاتِ الصوتِ في الهواءِ عن سرعة انتقالها في ماء البحر، وحيثُ إنَّ ترددَ هذه الموجاتِ يساوي ترددَ مصدرها ولا يتغيرُ عند انتقالها من وسطٍ إلى آخر، فإنَّ التغيرَ في سرعتها ينتجُ عن تغير طولها الموجي. وتُعدُّ سرعة الموجاتِ الكهرومغناطيسية في الفراغ إحدى الثوابت الكونية، ويُرمزُ إليها بالرمز (c).

✓ **أتحقَّقُ:** توصفُ الموجةُ بترددِها وسرعتها وطولها الموجي. أيُّ من هذه الكميات تتغيرُ عند انتقالِ الموجة من وسطٍ إلى آخر مختلفٍ في خصائصه؟

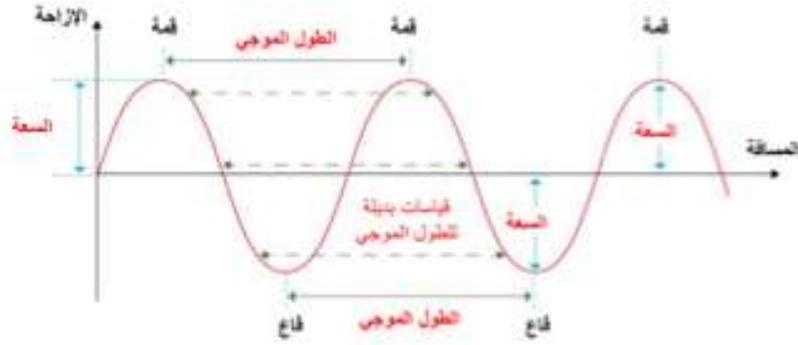
### تمثيل الموجات بيانيًا Graphical Representations of Waves

عند معرفتك للمزيد عن الموجات وانتشارها، ستجدُ أنه من المفيد تمثيل الحركة الموجية بيانيًا؛ سواءً أكانت موجاتٍ مستعرضة أم موجاتٍ طولية، ويمكنك ذلك بطريقتين، في الأولى يتمُّ رسم المنحنى البياني؛ اعتمادًا على المسافة التي تقطعها الموجة، وفي الطريقة الثانية يكون التمثيل بالنسبة إلى الزمن، ولا بدَّ من التفريق بين الطريقتين.

#### منحنى الإزاحة - المسافة Displacement - Distance Graph

عند رمي حجرٍ في بركة ماء، تتولد موجاتٌ مستعرضة تنتشرُ على سطح الماء على شكلٍ دوائرٍ مركزها نقطة سقوط الحجر. لو قمتُ بالتقاطِ صورةٍ ثابتة لمشهد تلك الموجات عند لحظة زمنية محددة، فإنَّ المشهد يبدو كالمنحنى المبين في الشكل (5)، الذي يمثل العلاقة بين إزاحة جزيئات الماء للأعلى أو للأسفل مع البعد عن موقع سقوط الحجر، حيثُ يمثلُ البعد عن المركز على محور (x) ووحدة قياسه (m)، والإزاحة بالنسبة إلى مستوى اتزان سطح الماء على محور (y) ووحدة قياسها (m).

الشكل (5): العلاقة البيانية بين إزاحة جزيئات سطح الماء والبعد عن مركز انتشار الموجات عند لحظة محددة.



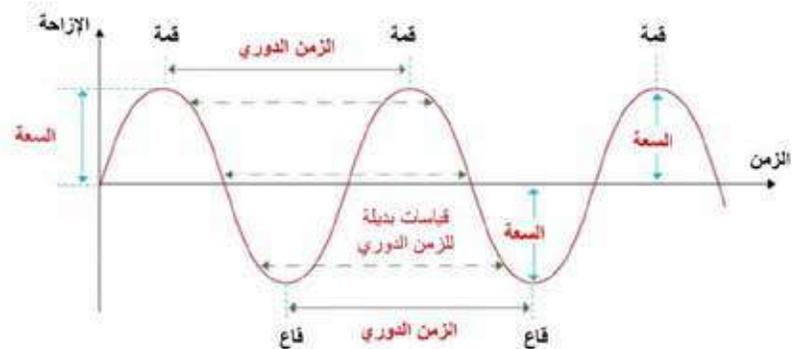
يفيد المنحنى في معرفة كل من: الطول الموجي وهو المسافة الأفقية بين قمتين متتاليتين، أو قاعين متتاليتين، والسعة - وهي أكبر إزاحة رأسية لجزيئات الماء بالنسبة إلى مستوى اتزانها- وكذلك معرفة مواقع القمم والقيعان المتتالية على سطح الماء عند لحظة زمنية محددة.

### منحنى (الإزاحة - الزمن - Displacement - Time Graph)

بالرجوع إلى مشهد الموجات الناتجة عن رمي الحجر في بركة الماء، وتحديد نقطة معينة على سطح الماء على بُعد ثابت من مركز انتشار الموجات، ثم وضع قطعة فلين عند هذه النقطة ومراقبتها، نجد أن قطعة الفلين تتحرك للأعلى وللأسفل بشكل منتظم مع مرور الزمن، وعند تمثيل العلاقة بين إزاحة قطعة الفلين والزمن نحصل على المنحنى المبين في الشكل (6).

✓ **أتحقق:** أوضح المقصود بسعة الموجة لموجات طولية تنتقل أفقياً في نابض.

الشكل (6): العلاقة البيانية بين إزاحة جزيئات سطح الماء والزمن عند موقع على بُعد ثابت من مركز انتشار الموجات.



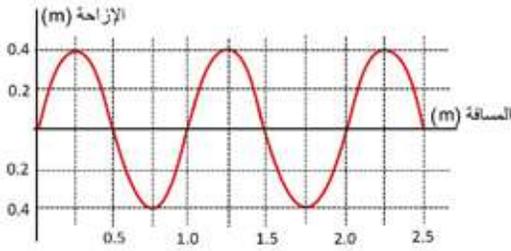
يفيدُ المنحنى في معرفة كلِّ من:

- الزمن الدوري للحركة الموجية: وهو الفرقُ في الزمن بينَ قمتين متتاليتين، أو قاعين متتاليتين.
- السعة: وهي أكبرُ إزاحةٍ رأسيةٍ تُحدثها قطعةُ الفلين بالنسبة إلى مستوى اتزانها على سطح الماء.
- عدد القمم والقيعان التي تحدثُ لقطعةِ الفلين خلالَ مدةٍ زمنيةٍ محددةٍ.

### ملاحظة

نلاحظُ من الشكلين السابقين (5،6) تماثلاً في تعريفِ الطولِ الموجيِّ والزمنِ الدوريِّ وفي تمثيلهما على المنحنى. الطولُ الموجيُّ هو مسافةٌ بينَ نقطتين منفصلتين، تُقاسُ في لحظةٍ زمنيةٍ محددةٍ، كما في الشكل (5). والزمنُ الدوريُّ هو مدةٌ زمنيةٌ بينَ لحظتين منفصلتين، تُقاسُ في نقطةٍ محددةٍ، كما في الشكل (6).

## المثال 3



الشكل (7): العلاقة بينَ إزاحةِ أجزاءِ الحبلِ والبعدِ عن المصدرِ.

تنتشر موجاتٌ مستعرضةٌ في حبلٍ ممدودٍ بشكلٍ أفقيٍّ، وفي لحظةٍ زمنيةٍ محددةٍ رُسمتِ العلاقةُ بينَ إزاحةِ أجزاءِ الحبلِ وبُعدِ كلِّ جزءٍ عن مصدرِ الاهتزاز، فكانت كما في الشكل (7). معتمداً على الرسم، أجدُ كلاً من:

الطولِ الموجيِّ، السعة، عددِ الموجاتِ الكاملة.

المعطيات: الشكلُ المجاورُ.

المطلوبُ: الطولُ الموجيُّ، السعة، عددُ الموجاتِ الكاملة.

الحلُّ:

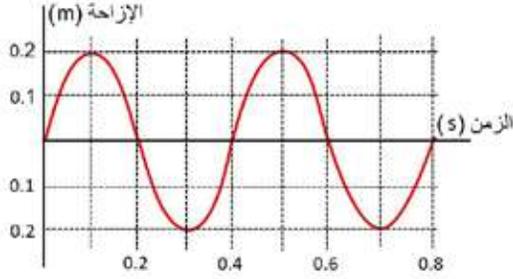
$$\lambda = 1.25 - 0.25 = 1.0 \text{ m} \quad \text{الطولُ الموجيُّ}$$

$$A = 0.4 \text{ m} \quad \text{السعة}$$

$$n = 2 \quad \text{عددُ الموجاتِ الكاملة}$$

## المثال 4

تنتشر موجات مستعرضة على سطح الماء، وتحدث اهتزازاً في قطعة فلين على بُعد  $(x)$  من مصدر الموجات، مثلت العلاقة بين الإزاحة الرأسية لقطعة الفلين والزمن بيانياً، فكانت كما في الشكل (8). معتمداً على الرسم، أجد كلاً من:  
الزمن الدوري، التردد، السعة.



الشكل (8): العلاقة بين إزاحة جزيئات سطح الماء والزمن.

المعطيات: الشكل المجاور.

المطلوب: الزمن الدوري، التردد، السعة.

الحل:

$$T = 0.5 - 0.1 = 0.4 \text{ s} \quad \text{الزمن الدوري:}$$

$$A = 0.2 \text{ m} \quad \text{السعة:}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.4} = 2.5 \text{ s}^{-1} \quad \text{التردد:}$$

## موجات الصوت Sound Waves

ينتج الصوت عن اهتزاز مصدر الصوت، وينتقل الاهتزاز إلى دقائق الوسط المحيط، فينتشر في الاتجاهات جميعها على شكل موجات طولية. عند اهتزاز وتر مشدود في الهواء، فإنه يتحرك باتجاهين متعاكسين فيؤثر في جزيئات الهواء المحيطة به مُحدثاً فيها مجموعة من التضاعطات (ضغط الهواء المرتفع) والتخلخلات (ضغط الهواء المنخفض) المتتالية التي تنتشر في الهواء ناقلة الصوت من الوتر إلى أذن السامع. وتختلف الأصوات بعضها عن بعض في الطول الموجي والتردد والسعة، ونتيجة لذلك يمكننا تمييز الأصوات المختلفة.

## جهازة الصوت Loudness

يُعبّر عن علو الصوت أو انخفاضه بجهازة الصوت Loudness وهو مقياس لاستجابة الأذن للصوت، ويمكن التعبير عن هذه الصفة بمستوى شدة الصوت Sound Intensity level الذي يُقاس بوحدة ديسيبل (dB). وتعتمد جهازة الصوت على سعة موجاته، وعلى شدته عند ثبوت التردد.

الجدول (2): مقارنة بين شدة الصوت ومستوى شدة الصوت لبعض الأصوات المألوفة.

مستوى شدة الصوت (dB)	شدة الصوت (Watt/m <sup>2</sup> )	مصدر الصوت
0	$1 \times 10^{-12}$	عتبة السمع عند تردد (Hz 1000)
10	$1 \times 10^{-11}$	حفيف أوراق الشجر
60	$1 \times 10^{-6}$	المحادثة العادية
120	1	شاحنة كبيرة
140	$1 \times 10^2$	طائرة نفاثة

بعض الآلات كالمنشار أو الطائرة يكون مستوى شدة صوتها عاليًا؛ لأن موجاته تحمل الكثير من الطاقة، وتكون سعتها كبيرة، في حين يكون لحفيف أوراق الشجر أو الهمس في الحديث مستوى شدة صوت منخفض، لأن موجاته تحمل القليل من الطاقة، وسعتها صغيرة، ويعود الاختلاف في مستوى الشدة إلى طاقة المصدر. يقع مستوى شدة الصوت المسموع لدى الإنسان ضمن المجال (0 – 180 dB)، ويمثل المستوى (0 dB) عتبة السمع Threshold of hearing لدى الإنسان، وهي أدنى مستوى شدة للصوت يمكن للإنسان سماعه. وتعد الأصوات التي يزيد مستوى شدتها على (120 dB) ضارة بالأذن. وللتمييز بين شدة الصوت ومستوى شدته، أنظر الجدول (2) الذي يتضمن بعض الأمثلة على بعض الأصوات المألوفة التي نسمعها كثيرًا.

✓ **أنتحق:** أوضح المقصود بعتبة السمع لدى الإنسان السليم.

### درجة الصوت Pitch of Sound

يُسمى إحساسنا بتردد الصوت درجة الصوت Pitch، فنحن نميز بين الأصوات الحادة والأصوات الغليظة عندما نصغي لبعض الآلات الموسيقية، كالتي في الشكل (9)؛ فالآلات الموسيقية صغيرة الحجم مثل الناي يصدر عنها موجات صوتية قصيرة وعالية التردد، فيكون صوتها حادًا (درجته عالية)، بينما يصدر عن الآلات الموسيقية كبيرة الحجم مثل البوق. موجات صوتية طويلة ومنخفضة التردد، فيكون صوتها غليظًا (درجته منخفضة).



الشكل (9): تختلف الآلات الموسيقية الهوائية في درجة الصوت.

**أفكر:** يمكن للإنسان العادي أن يتحدث بصوت يقع تردده بين (3 kHz - 85 Hz)، فما أهميته سماعه لترددات أخرى تزيد على التردد الذي يتحدث به؟

### الربط مع الحياة:

معظمنا يكون سعيداً بسماع صوته الذي يألفه، لكن عندما يستمع أحدنا لتسجيل صوته عبر أجهزة التسجيل المختلفة، ربما يشعر بالحرج. إذ إن كلاً منا اعتاد على سماع صوته عندما تنتقل موجاته الصوتية خلال عظام الجمجمة إلى الأذنين (وليس خلال الهواء كما هو الحال عند سماع صوته المسجل)؛ حيث تصبح سرعته أكبر منها في الهواء، ويختلف الطول الموجي نتيجة لذلك. كيف يسمع الآخرون صوتي؟ يسمعونه كما أسمعُه أنا عندما أتحدث؟ أم كما أسمعُه من جهاز التسجيل؟

**أفكر:** تُنفخ بعض البالونات بغاز الهيليوم كي ترتفع في الهواء. عندما يستنشق شخص غاز الهيليوم من البالون ثم يتحدث، نلاحظ أن صوته يصبح مختلفاً إلى درجة كبيرة. ما الذي يحدثه غاز الهيليوم في صوت الشخص؟

يمكننا سماع مجال واسع من الترددات الصوتية عن طريق حاسة السمع لدينا، فالترددات التي تحس بها أذن الإنسان سليم السمع تقع في المتوسط ضمن المجال (20 Hz - 20 kHz). ومع تقدم العمر يفقد الإنسان قدرته على سماع الترددات العالية التي تزيد على (14 kHz).

### سرعة الصوت Speed of Sound

نستمع في كثير من المناسبات الوطنية مثل يوم الاستقلال، وفي الأفراح والمناسبات الخاصة بمشاهدة عروض الألعاب النارية، وكثيراً ما يلفت انتباهنا سماع الصوت متأخراً بمدة زمنية عن رؤيتنا الوميض، ويُعد هذا دليلاً ملموساً على سرعة الصوت، وهي تساوي في الهواء (340 m/s) تقريباً، وتقل كثيراً عن سرعة الضوء، ومقدارها  $(3 \times 10^8 \text{ m/s})$ . تتأثر سرعة موجات الصوت بطبيعة الوسط الناقل، فهي كبيرة في الوسط غير القابل للانضغاط، وتقل في الأوساط القابلة للانضغاط. لذلك نجد أن سرعة الصوت في الصخور والماء أكبر منها في الهواء، كما لاحظنا في الجدول (1)، وذلك لأن الصخور والماء وسطحان غير قابلين للانضغاط، بينما يمكن بسهولة ضغط الهواء. تتأثر سرعة الصوت بكثافة الوسط الذي ينتقل فيه. عند انتشار الصوت في الهواء، على سبيل المثال، فإن سرعته تزداد كلما قلت كثافة الهواء، وحيث إن كثافة الهواء تقل بارتفاع درجة الحرارة، نجد أن سرعة الصوت في الهواء تزداد بارتفاع درجة حرارته. وينتقل الصوت في الغازات قليلة الكثافة بسرعة أكبر من سرعته في الهواء.

### المثال 5

تنتقل موجات الصوت في الهواء بسرعة 340 m/s، إذا علمت أن ترددها يساوي 425 Hz؛ فما طولها الموجي؟

المعطيات:  $(v = 340 \text{ m/s})$ ،  $(f = 425 \text{ Hz})$

المطلوب:  $\lambda = ?$

الحل:

$$v = f\lambda$$

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{340}{425} = 0.8 \text{ m}$$

## الموجات الميكانيكية والموجات الكهرمغناطيسية

### Mechanical Waves and Electromagnetic Waves

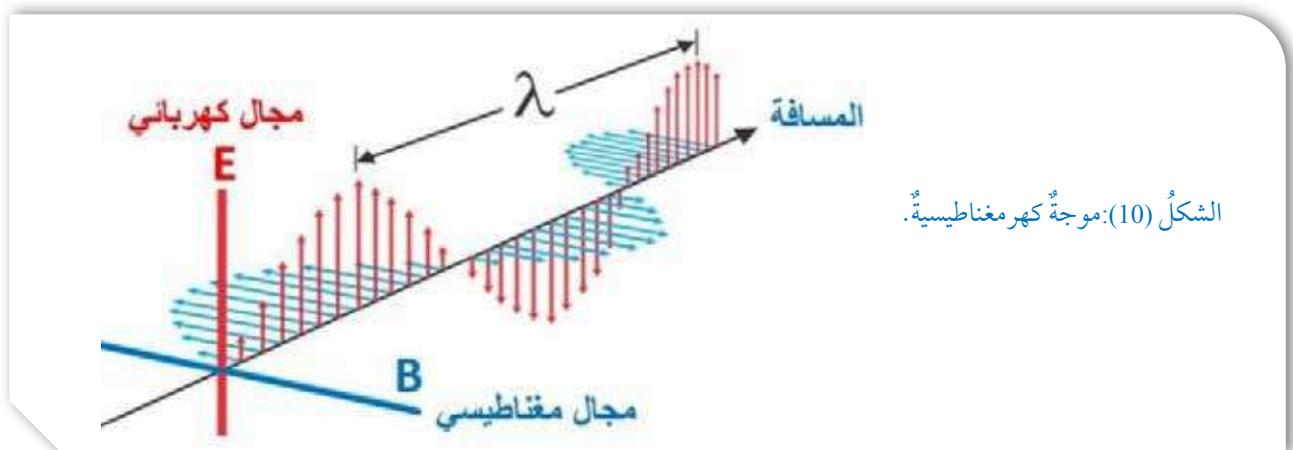
قُسمت الموجات عند بدايةِ الدرسِ من حيث اتجاه الاهتزاز الذي تحدثه عند انتشارها إلى نوعين: موجاتٍ مستعرضةٍ، وموجاتٍ طوليةٍ، إلا أنه يوجد تقسيمٌ آخرٌ للموجاتٍ من حيث طبيعة الأوساط التي تنتشر فيها، وتأثيرها في هذه الأوساط؛ فهي تُقسّم إلى نوعين:

### الموجات الميكانيكية Mechanical Waves

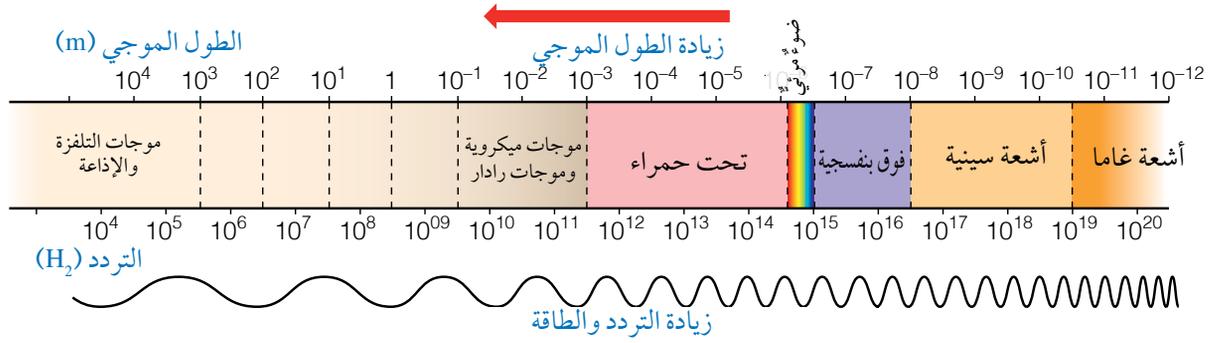
تحتاج كل من موجات الماء والصوت والناقص وبعض الموجات الأخرى إلى وسطٍ تنتشر خلاله؛ إذ إنها تسبب اهتزازاً ميكانيكياً في جزيئات هذا الوسط، فهي تنقل الطاقة الميكانيكية خلال الوسط. لذلك فهي تُسمى موجات ميكانيكية. ونلاحظ أن هذه الموجات يمكن أن تكون مستعرضة أو طولية.

### الموجات الكهرمغناطيسية Electromagnetic Waves

للإشعاع الكهرمغناطيسي طبيعتان: جسيمية وموجية؛ فهو ينتقل على شكل موجاتٍ مستعرضةٍ تُسمى موجاتٍ كهرمغناطيسيةٍ Electromagnetic waves، لا تحتاج وسطاً مادياً لتحدث اهتزازاً في جزيئاته؛ لأنها تتكون، كما يبين الشكل (10) من مجالين متعامدين: أحدهما كهربائي (E)، والآخر مغناطيسي (B)، يتذبذب كل منهما بشكل عمودي على الآخر، وكلاهما عمودي على اتجاه انتشار الموجة الكهرمغناطيسية. وبذلك فإن الطاقة التي تنقلها الموجات الكهرمغناطيسية طاقة كهربائية وطاقة مغناطيسية.



الشكل (10): موجة كهرمغناطيسية.



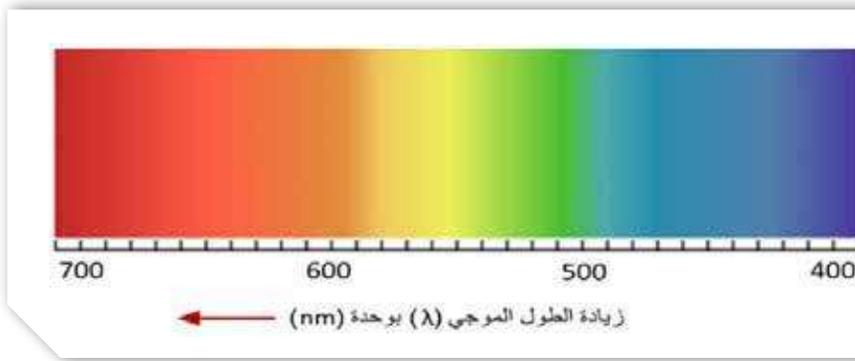
الشكل (11): مكونات الطيف الكهرمغناطيسي.

تحصل موجات الإشعاع الكهرمغناطيسي على طاقتها من مصدرها الذي يتكون من جسيمات مشحونة (مثل الإلكترونات) تهتز بتردد محدد ( $f$ ) حول مركز اتزانها، ويكون لكل موجة كهرومغناطيسية تردد ( $f$ ) مساو لتردد مصدرها وطول موجي ( $\lambda$ ) خاص بها. تنتقل موجات الإشعاع الكهرمغناطيسي جميعها في الفراغ بسرعة ثابتة، هي سرعة الضوء ( $c = 299,792,458 \text{ m/s}$ )، وقيمتها التقريبية في الفراغ هي ( $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ). ولا تختلف كثيرا سرعتها في الهواء عنها في الفراغ، إلا أن هذه السرعة تقل كثيرا عند انتقال الموجات الكهرمغناطيسية المختلفة في الأوساط المادية الأخرى مثل الزجاج أو الماء. ويرتبط الطول الموجي للإشعاع الكهرمغناطيسي مع تردده وفق العلاقة السابقة، التي استعملت في حالة الموجات الميكانيكية، مع استبدال سرعة الضوء في الفراغ ( $c$ ) بسرعة الموجة ( $v$ )، بحيث تصبح العلاقة:

$$c = f\lambda$$

تشكل موجات الإشعاع الكهرمغناطيسي ما يُعرف بالطيف الكهرمغناطيسي، وهو مجال واسع من الأطوال الموجية المختلفة لهذه الموجات، التي تختلف في خصائصها. ويبين الشكل (11) المكونات الرئيسة للطيف الكهرمغناطيسي.

ألاحظ أن مكونات الطيف الكهرمغناطيسي مرتبة تصاعدياً من اليمين إلى اليسار حسب أطوالها الموجية، وهي: موجات أشعة غاما، موجات الأشعة السينية، موجات الأشعة فوق البنفسجية، موجات الضوء المرئي، موجات الأشعة تحت الحمراء، الموجات الميكروية،



الشكل (12): الأطوال  
الموجية المختلفة لمركبات  
الضوء المرئي.

ثمَّ أكبرها طولاً موجياً موجات التلغزة والموجات الإذاعية، وهي في الوقت نفسه مرتبة من اليسار إلى اليمين تصاعدياً حسب ترددها وطاقته، حيث تُعدُّ أشعة غاما أعلاها طاقةً وترددًا.

✓ **أتحقَّق:** أيُّ الموجات الآتية تحمل طاقة أكبر من غيرها؟ أيُّها أكبرها ترددًا؟ أيُّها أكبرها طولاً موجياً؟  
(موجات الأشعة تحت الحمراء، موجات الرادار، موجات الأشعة فوق البنفسجية).

يشكل الضوء المرئي جزءاً صغيراً من الطيف الكهرومغناطيسي، وهذا الجزء هو ما تراه عين الإنسان، وتنحصر الأطوال الموجية للضوء المرئي بين (400 nm - 700 nm)، ويمكن تمييز سبعة ألوان منها، ويبيِّن الشكل (12) الأطوال الموجية لهذه الألوان، إذ يُعدُّ الضوء البنفسجيُّ أكبرها ترددًا وطاقته وأصغرها طولاً موجياً، في حين أنَّ الضوء الأحمر أكبرها طولاً موجياً وأصغرها ترددًا وطاقته.

ألاحظُ من الشكل أنَّ أصغر طول موجيِّ تراه عين الإنسان: حوالي (400 nm) للضوء البنفسجيِّ، وأكبر طول موجيِّ تراه: حوالي (700 nm) للضوء الأحمر. وباستخدام البادئات الملحقة في وحدات النظام الدوليِّ، فإنَّ:  $(700 \text{ nm} = 700 \times 10^{-9} \text{ m} = 7 \times 10^{-7} \text{ m})$ .

✓ **أتحقَّق:** أستخرج من الشكلين السابقين ما يأتي:  
اسم الموجات التي لها ترددٌ مقداره  $(1 \times 10^{13} \text{ Hz})$ .  
اسم الموجات التي لها طولٌ موجيٌّ مقداره  $(1 \times 10^{-9} \text{ m})$ .  
لون الضوء المرئي الذي له طولٌ موجيٌّ مقداره (560 nm).

## المثال 6

يسير الضوء المرئي بجميع مركباته في الفراغ بسرعة  $3 \times 10^8$  m/s مع أنه لكل لون من ألوان الضوء تردداً مختلفاً، إذا علمت أن تردد الضوء الأصفر 530 THz فما طول موجة الضوء الأصفر في الهواء؟

المعطيات:  $(c = 3 \times 10^8$  m/s)،  $(f = 5.3 \times 10^{14}$  Hz)

المطلوب:  $\lambda = ?$

الحل:

$$c = f\lambda$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{5.3 \times 10^{14}} = 5.7 \times 10^{-7} \text{ m}$$

### تطبيقات الموجات الكهرومغناطيسية

#### Applications of Electromagnetic Waves

تختلف استخدامات الموجات الكهرومغناطيسية في التطبيقات التكنولوجية والحياتية باختلاف خصائص كل منها، مثل: التردد والطول الموجي والطاقة التي تحملها كل موجة، وقدرتها على الاختراق، وخصائص الوسط الذي تسير فيه، ومن بين هذه الاستخدامات استخدام الأشعة السينية في مجالات مختلفة، مثل: الطب والصناعة والمجالات العسكرية والأمنية.

تستخدم الأشعة السينية في تصوير العظام والأعضاء الداخلية للجسم؛ فهي تحمل طاقة كبيرة تساعد على اختراق طبقات الجسم. ألاحظ الشكل (13).

تستخدم الأشعة السينية أيضاً في مجالات صناعية للكشف عن عيوب الصناعات ونقاط الضعف في الهياكل الفلزية.

وفي المجالات الأمنية، مثل فحص حقائب المسافرين في المطارات، أو على شكل بوابات يدخل خلالها المسافرون للكشف عن الأجسام والمواد التي قد يخفيها بعضهم. ألاحظ الشكل (14).



الشكل (13): تصوير الأسنان باستخدام الأشعة السينية.



الشكل (14): فحص الحقائب في المطارات.

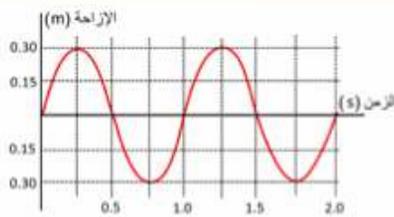
**أبحاث** في شبكة الإنترنت عن استخدام الموجات الأخرى من موجات الطيف الكهرومغناطيسي، ثم تبادل مجموعات الطلبة ما توصلت إليه من استخدامات في ما بينها.

## مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسية:** أصف كلاً من نوعي الموجات: المستعرضة والطولية، وأذكر مثلاً على كل نوع.
2. أوضح المقصود بكل من:
  - الطول الموجي، السعة، التردد، الزمن الدوري.
3. **أقارن:** بين الموجات: الميكانيكية والكهرومغناطيسية من حيث: طبيعة الوسط الناقل، ونوع الطاقة المنقولة، وطريقة الاهتزاز.
4. تتابع سارة برنامجاً تلفزيونياً للهواة على قناة فضائية، وتستمع إلى صديقها سالي وهي تعزف قيثارتها في بث مباشر. أعدد نوع الموجات إن كانت مستعرضة أو طولية في الفقرات الآتية:
  - أ. اهتزاز أوتار قيثارة سالي.
  - ب. موجات الصوت المنبعثة من القيثارة إلى جهاز الميكروفون.
  - ج. موجات الراديو للقناة التلفزيونية المنبعثة من القمر الصناعي.
  - د. موجات الصوت المنبعثة خلال الهواء من سماعة التلفاز إلى أذني سارة.
  - هـ. موجات الصوت التي تنتقل خلال جدار غرفة سارة إلى الغرفة المجاورة.
5. **أقارن:** بين الموجات الكهرومغناطيسية المبيّنة في الجدول الآتي:

الموجات	الطول الموجي	التردد	السرعة في الفراغ	مرئية/ غير مرئية
الميكروية				
الضوء الأزرق				
فوق البنفسجية				

6. **أحسب:** موجتان كهرومغناطيسيتان؛ الطول الموجي للأولى ( $\lambda_1 = 3.0 \times 10^{-5} \text{ m}$ )، والطول الموجي للثانية ( $\lambda_2 = 1.5 \times 10^{-9} \text{ m}$ )، تنتقلان معاً في الهواء. أجد ما يأتي:
  - أ. سرعة انتقال كل موجة في الهواء.
  - ب. تردد كل موجة.
  - ج. أعدد موقع كل منهما في الطيف الكهرومغناطيسي.
7. **أحلل:** الشكل التالي يمثل إزاحة جزيئات الوسط بالنسبة إلى الزمن عند انتقال موجة طولية فيه. أستخرج من الشكل كلاً من: الزمن الدوري، والسعة، ثم أحسب التردد.



## انعكاس الموجات وانكسارها

### Reflection and Refraction of Waves

تظهر خاصيتنا انعكاس الموجات وانكسارها بوضوح في كثير من الظواهر الصوتية والضوئية. إن صدى الصوت الذي نسمعه بفارق زمني عن الصوت الأصلي ناتج عن ظاهرة انعكاس موجات الصوت عن جدار أو جبل أو أي حاجز آخر. وصورنا التي نراها في المرآة وزجاج النافذة والمسطحات المائية ناتجة عن ظاهرة انعكاس موجات الضوء عن السطوح الملساء العاكسة. كما أن الموجات التلفزيونية التي ترسلها الأقمار الصناعية تنعكس عن أطباق مقعرة وتتجمع في جهاز صغير يلتقط تلك الموجات، التي تحول في النهاية إلى صور نشاهدتها على شاشة التلفاز. كيف تحدث كل من ظاهرتي انعكاس الموجات وانكسارها؟

سوف نتوصل باستخدام حوض الموجات في التجربة الآتية إلى خاصيتي انعكاس موجات الماء وانكسارها، وإلى شروط حدوث كل منهما. وحوض الموجات جهاز يتكون في أبسط أشكاله من حوض زجاجي أو بلاستيكي شفاف، توضع فيه كمية من الماء بارتفاع مناسب، ويثبت مصدر ضوئي تحت الحوض، فيظهر خيال مكبر للحركة الموجية المتكونة في الحوض على السقف، ويمكن استخدام مرآة تساعد في تكوين الخيال على شاشة مثبتة بشكل رأسي. ويؤد الحوض بملحقات متعددة لتوليد أشكال مختلفة من الموجات؛ بهدف دراسة خصائص موجات سطح الماء.

✓ **أتحقق:** أوضح عملية انعكاس موجات الصوت وموجات الضوء بذكر مثال على كل حالة.

#### الفكرة الرئيسة:

للموجات المختلفة سلوك محدد يظهر في تطبيقات حياتية كثيرة عند انتقالها خلال الوسط الواحد، أو بين وسطين مختلفين، مثل: الانعكاس والانكسار والتداخل والحيود والاستقطاب.

#### نتائج التعلم:

- أصمم تجربة عملية ليصف عددًا من الظواهر الموجية مثل: تراكب موجتين باتجاهين متعاكسين، وانعكاس موجات سطح الماء عن حاجز.
- أستقصي عمليًا شروط حدوث حيود موجات الماء.
- أطور نموذجًا ليحدد خصائص الموجات: التداخل، الحيود، الانكسار، الاستقطاب.
- أنفذ تجارب عملية ليوضح ظاهرة تأثير دوبلر.
- أوظف تجارب عملية في معرفة خصائص الموجات: الانعكاس، الانكسار، الحيود، التداخل.

#### المفاهيم والمصطلحات:

- انعكاس Reflection
- انكسار Refraction
- حوض موجات Ripple Tank
- تراكب الموجات Superposition of Waves
- تداخل Interference
- حيود Diffraction
- استقطاب Polarization
- تأثير دوبلر Doppler Effect

# التجربة 1

## استقصاء خاصيتي انعكاس الموجات وانكسارها



المواد والأدوات: حوض الموجات وملحقاته، شاشة عرض، مصدر ضوء.

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

### خطوات العمل:

- 1 أركب حوض الموجات بوضع أفقي، وأثبت مصدر الإضاءة في مكانه الصحيح للحصول على خيال واضح على السقف، بمساعدة المعلم وأعضاء مجموعتي.
- 2 أضع كمية ماء في الحوض حتى ارتفاع مناسب لا يقل عن 3 cm تقريباً.
- 3 **أجرب:** أركب المحرك الكهربائي المولّد للاهتزازات، وأشغله بحيث يُصدر موجات دائرية، وأراقب أنا وأفراد مجموعتي انتشارها في الحوض. ثم أكرر الخطوة لتوليد موجات مستقيمة. وأدون الملاحظات في الجدول.
- 4 أثبت حاجزاً في منتصف الحوض بشكل قطري، ثم أشغل مولد الموجات المستقيمة، وأراقب انعكاس الموجات عن الحاجز. وأدون الملاحظات في الجدول.
- 5 **أجرب:** أزيل الحاجز وأضع في منتصف الحوض لوحاً زجاجياً شفافاً لا يزيد سمكه عن 2 cm بحيث يبقى مغموراً بالماء بشكل كلي، وحافته موازية لحافة الحوض، وأراقب ما يحدث للموجات المستقيمة، وأدون الملاحظات.
- 6 أكرر الخطوة (5)، لكن بعد تدوير اللوح الزجاجي؛ بحيث تصبح حافته غير موازية لحافة الحوض. وأدون الملاحظات.
- 7 **أرسم** الأنماط التي حصلت عليها في الخطوات السابقة أسفل الجدول الآتي:

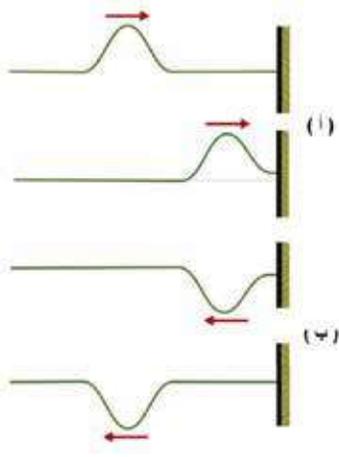
وصف الملاحظات	الملحقات	الإجراء
	محرك كهربائي	موجات دائرية
	محرك كهربائي ومسطرة	موجات مستقيمة
	حاجز رأسي	موجات مستقيمة
	لوح زجاجي شفاف مواز	موجات مستقيمة
	لوح زجاجي شفاف غير مواز	موجات مستقيمة

### التحليل والاستنتاج:

- 1 أصف نمط كل من الموجات الدائرية والموجات المستقيمة وانتشارها.
- 2 أصف ما حدث للموجات المستقيمة عند مواجهتها للحاجز الرأسي. ماذا تُسمى هذه الظاهرة؟
- 3 أصف ما حدث للموجات المستقيمة عند مرورها فوق اللوح الزجاجي في الحالتين (الخطوة 5 والخطوة 6). ماذا تُسمى هذه الظاهرة؟
- 4 **استنتج** ما الذي تغير من صفات الموجة (الطول الموجي، أم التردد، أم السرعة، أم الاتجاه) في الحالات السابقة؟
- 5 **أفسر** سبب تغير سرعة الموجات على سطح الماء عند عبورها منطقة ضحلة.

## انعكاسُ الموجاتِ Reflection of Waves

ظاهرةُ انعكاسِ موجاتِ الماءِ على سطحِ بركةٍ منَ الظواهرِ الموجيةِ المألوفةِ في حياتنا، وكذلك انعكاسُ موجاتِ الصوتِ والضوءِ. وقد لاحظنا عندَ تنفيذِ النشاطِ السابقِ أنَّ الموجاتِ المنتشرةِ على سطحِ الماءِ تغيرَ اتجاهها عندَ مواجهتها حاجزاً في طريقِ انتشارها، ولقد لاحظنا أيضاً أنَّ الموجةَ المنعكسةَ حافظتْ على صفاتها، عندما لم تتغير خصائصُ الوسطِ الذي تنتقلُ خلاله. وكما هي الموجاتُ في الماءِ، فإنَّ أنواعَ الموجاتِ الأخرى مثل: موجاتِ النابضِ والحبلِ أو الموجاتِ الصوتيةِ، أو الضوئيةِ جميعها تنعكسُ بطريقةٍ مشابهةٍ. وانعكاسُ الموجةِ **Wave reflection** هو عمليةُ سقوطِ الموجةِ على جسمٍ أو حاجزٍ ثمَّ ارتدادها عنه باتجاهٍ مختلفٍ.



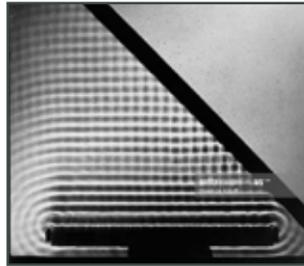
الشكل (15): انعكاسُ النبضةِ في حبلٍ.

عندَ إرسالِ نبضةٍ موجيةٍ واحدةٍ خلالَ حبلٍ بعدَ تثبيتِ طرفه الثاني في الجدارِ أو في مقبضِ البابِ، وإحداثِ اهتزازةٍ واحدةٍ في طرفه الحرِّ، فإننا نلاحظُ أنَّ هذه النبضةَ ترتدُّ عنِ الجدارِ وتنتقلُ باتجاهٍ معاكسٍ منَ الجدارِ إلى الطرفِ الحرِّ للحبلِ، كما يبيِّنُ الشكلُ (15).

تنتقلُ النبضةُ باتجاهِ اليمينِ كما في المرحلةِ (أ)، وعندَ اقترابها منَ نقطةِ التثبيتِ على الجدارِ، فإنَّ الحبلَ يؤثرُ في الجدارِ بقوةٍ نحوَ الأعلى، وحسبَ القانونِ الثالثِ في الحركةِ لنيوتن، فإنَّ الجدارَ يؤثرُ في الحبلَ بقوةٍ ردِّ فعلٍ نحوَ الأسفلِ، ويحدثُ فيه نبضةً جديدةً مقلوبةً تنتقلُ عائداً (راجعاً) نحوَ اليسارِ، كما في المرحلةِ (ب)؛ أي أنها تنعكسُ.

تنعكسُ موجاتُ سطحِ الماءِ الدائريةُ عنِ الحاجزِ على شكلِ أقواسٍ دائريةٍ يقعُ مركزها الوهميُّ خلفَ الحاجزِ، كما يبيِّنُ الشكلُ (16/أ)، بينما يبيِّنُ الشكلُ (16/ب) انعكاسَ موجاتٍ مستقيمةٍ، كالتي شاهدناها في التجربة السابقة.

الشكل (16): انعكاسُ موجاتِ سطحِ الماءِ الدائريةِ والمستقيمةِ.



(ب)



(أ)

كما يحدثُ انعكاسُ الموجاتِ المستعرضةِ على سطحِ الماءِ، أو في الحبلِ والناضِ، فإنَّ جميعَ الموجاتِ المستعرضةِ الأخرى تنعكسُ بالطريقةِ نفسها، ومثالُ ذلكَ موجاتُ الضوءِ وباقي الموجاتِ الكهرومغناطيسيةِ. ويحدثُ الشيءُ نفسهُ بالنسبةِ إلى الموجاتِ الطوليةِ، فإنَّها تنعكسُ أيضًا عندما تواجهُ حاجزًا يعترضُ طريقَ انتشارِها، ومثالُ ذلكَ انعكاسُ موجاتِ الصوتِ عندَ الحواجزِ المختلفةِ كالمباني والجبالِ.

### انكسارُ الموجاتِ Refraction of Waves

ظاهرةُ انكسارِ الموجاتِ هي الظاهرةُ الشائعةُ الثانيةُ إضافةً إلى ظاهرةِ الانعكاسِ، ويُعرَّفُ انكسارُ الموجةِ **Wave refraction** بأنه انحرافُ اتجاهِ انتشارِ الموجاتِ عندَ اجتيازِها الحدِّ الفاصلِ بينَ سطَينِ مختلفينِ في خصائصهما. وقد لاحظنا ذلكَ بوضوحٍ في النشاطِ السابقِ، حيثُ أدى وجودُ لوحٍ زجاجٍ شفافٍ داخلِ الحوضِ إلى اختلافِ سمكِ الماءِ، وتكوُن نتيجةً ذلكَ وسطانِ مختلفانِ نتجَ عنهما انكسارُ موجاتِ الماءِ؛ أي تغييرٌ في اتجاهِ انتشارِها. ويتنجُ الانكسارُ عن اختلافِ الطولِ الموجيِّ معَ بقاءِ الترددِ ثابتاً عندَ الحدِّ الفاصلِ بينَ سطَينِ مختلفينِ في الخصائصِ. وباستخدامِ العلاقةِ:  $(v = f \lambda)$  فإنَّ سرعةَ انتشارِ الموجاتِ تتغيرُ منَ وسطٍ إلى آخرٍ نتيجةً لاختلافِ الطولِ الموجيِّ. ألاحظُ أنَّ الطولَ الموجيِّ في الشكلِ (17) هو المسافةُ بينَ كلِّ خطَينِ مضيئينِ، أو بينَ كلِّ خطَينِ مظلمينِ، ويبيِّنُ الشكلُ النتيجةَ التي حصلنا عليها في النشاطِ السابقِ، وهو نقصانُ الطولِ الموجيِّ الذي أدى إلى الانكسارِ.



الشكل (17): انكسارُ موجاتِ سطحِ الماءِ المستويةِ.

✓ **أتحقَّقُ:** ما سببُ حدوثِ انكسارِ لموجاتِ الماءِ عندَ مرورِها فوقَ لوحٍ زجاجيٍّ موضوعٍ في قاعِ الحوضِ؟

### لتمرِّبْ

بالرجوعِ إلى الشكلِ (17). إذا كان الترددُ (8 Hz)، وكانت المسافةُ بينَ كلِّ خطَينِ مضيئينِ في الوسطِ الأولِ (5 cm)، وفي الوسطِ الثاني (3 cm). فأحسبُ سرعةَ الموجاتِ في كلِّ منَ الوسطَينِ.

## التداخل والحيود Interference and Diffraction

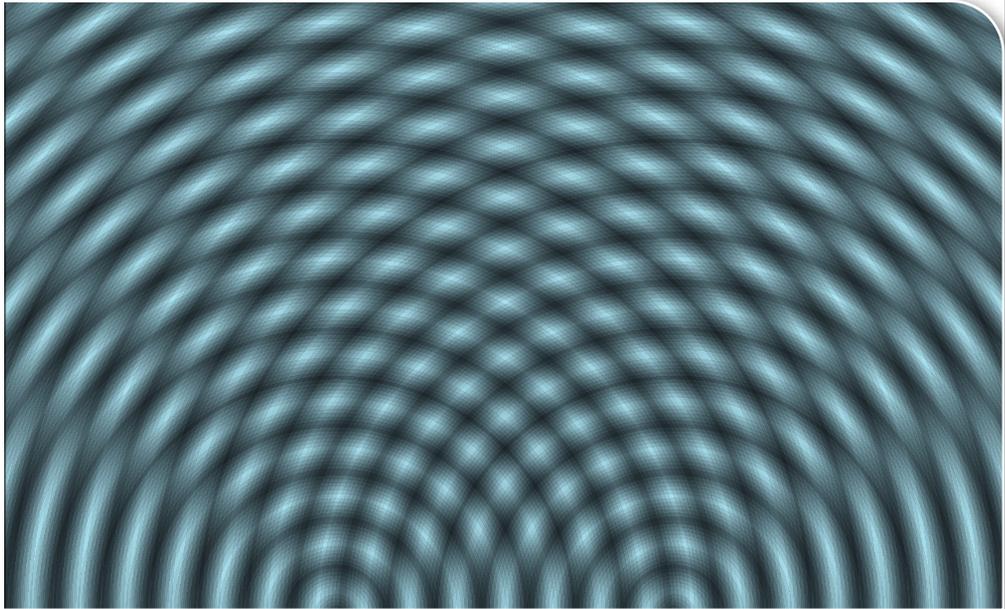
### التداخل Interference

تحدث ظاهرة تداخل الموجات عندما تلتقي موجتان أو أكثر في لحظة واحدة عند نقطة محددة، فتحدث هذه الموجات -مجتمعة- إزاحة محصلة لجزيئات الوسط الذي تنتقل خلاله. فالتداخل **Interference**: التقاء مسارين من الحركة الموجية بحيث ينتج عن التقاء القمم والقيعان نمطاً محدداً.

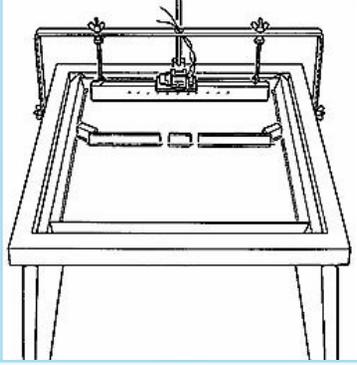
وعندما تلتقي موجتان متماثلتان (لهما التردد نفسه والطول الموجي نفسه) ومن النوع نفسه، فإن عملية التداخل تكون منتظمة. ويبيّن الشكل (18) نمط تداخل منتظم يتكوّن عند التقاء موجات ناتجة عن مصدرين متجاورين ومتماثلين على سطح الماء. وحتى تتلاشى الإزاحة تماماً عند التقاء قمة موجة مع قاع موجة أخرى يجب أن تكون الموجتان متساويتين في السعة. ومثال على ذلك يحدث تداخل هدام وتداخل بناءً بين موجات الصوت التي تصدر عن سماعتين موصولتين مع مصدر واحد يولد الاهتزازات.

لتكوين نمط تداخل منتظم عملياً، ولدراسة الحيود Diffraction وهو ظاهرة أخرى متعلقة بالحركة الموجية، نفّذ التجربة الآتية:

الشكل (18): تداخل  
الموجات من  
مصدرين متماثلين  
على سطح الماء.



### استقصاء خاصيتي تداخل الموجات وحيودها



المواد والأدوات: حوض الموجات وملحقاته (مصدر ضوء ومجموعة حواجز).

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

خطوات العمل:

- 1 أركب حوض الموجات بوضع أفقي وأثبت مصدر الإضاءة في مكانه الصحيح بمساعدة معلمي وأعضاء مجموعتي.
- 2 أضع كمية ماء مناسبة في الحوض حتى ارتفاع لا يقل عن 3 cm تقريباً.
- 3 أثبت المحرك الكهربائي المولد للاهتزازات فوق المسطرة الخاصة وأشغله بحيث يصدر موجات مستقيمة، وأراقب حركة تقدم هذه الموجات في الحوض.
- 4 أضع حاجزاً يحتوي على فتحتين على بُعد (15 cm) أمام المسطرة، كما في الشكل، وأراقب عبور الموجات المستقيمة من كلا الفتحتين، وأغير من سرعة المحرك للحصول على شكل واضح، ثم أدون الملاحظات على النمط المتكون بعد الفتحتين.
- 5 أعدل الحاجز في الخطوة السابقة بحيث يحتوي على فتحة واحدة ضيقة، ثم أدون الملاحظات على النمط المتكون. ثم أغير اتساع الفتحة وأراقب ما يحدث للموجات مرة أخرى.
- 6 أرسم الأنماط التي حصلت عليها في الخطوتين (4,5) السابقتين.

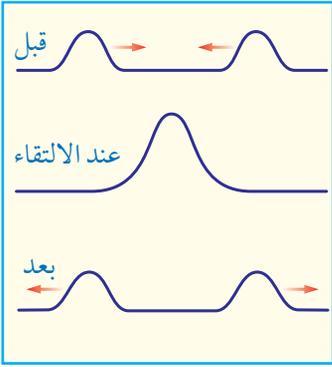
#### التحليل والاستنتاج:

1. أفسر أهمية وجود فتحتين في الحاجز في الخطوة (4)؟ وما التغيير الذي حصل للموجات بعد الحاجز؟
2. أصف ما حدث للموجات المستقيمة بعد تجاوزها الحاجز الذي يحتوي على فتحتين، وأذكر اسم هذه العملية.
3. أصف ما حدث للموجات المستقيمة بعد تجاوزها الحاجز الذي يحتوي على فتحة ضيقة، وأذكر اسم هذه العملية.
4. أستنتج: عندما تتجاوز الموجات المستقيمة حاجزاً فيه فتحة، فإنها تنفذ منه وتكمل مسيرها على هيئة موجات دائرية، أي أنها تحيد عن اتجاهها، وتلتف حول الحاجز قليلاً. ما العلاقة بين حيود الموجات واتساع الفتحة؟

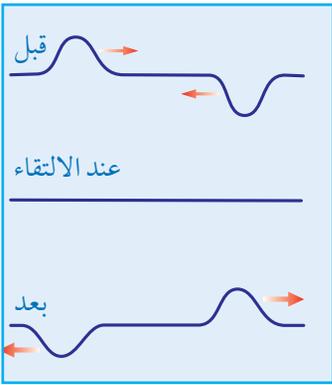
بعد أن لاحظت نمط التداخل المنتظم في التجربة السابقة، ربّما تسأل كيف يحدث التداخل وما الذي يؤدي إلى ظهور هذا النمط المنتظم؟ تعود ظاهرة التداخل إلى إحدى الخصائص الموجية التي تُعرف بمبدأ تراكّب الموجات **Principle of Superposition of Waves** وهو أن الإزاحة الكلية التي تحدث لجزيئات الوسط تساوي ناتج الجمع المتجهي للإزاحات الناتجة عن التقاء الموجات عند النقطة نفسها. كيف يحدث التراكّب؟



(أ)



(ب)



(ج)

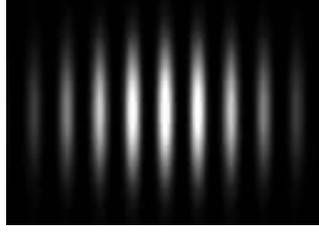
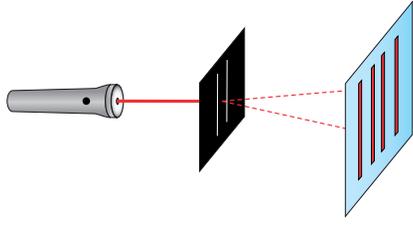
الشكل (19): تراكّب الموجات.

عند مرور موجة مستعرضة في نابض باتجاه اليمين، ومرور موجة مستعرضة أخرى في النابض نفسه باتجاه اليسار، فإن الموجتين ستلتقيان في مكان واحد عند لحظة زمنية معينة، ويعمل تأثير الموجتين في دقائق النابض عند لحظة التقائهما بشكل مشترك فيظهر النابض بصورة مختلفة عن أي من الموجتين، والنتيجة جمع التأثير المشترك للموجتين معاً في جزيئات الوسط الذي تنتقل خلاله. يحدث التراكّب بين موجتين في حال انتقالهما باتجاهين متعاكسين، أو بالاتجاه نفسه عندما تلحق إحداهما بالأخرى، كما يحدث أيضاً بين موجتين أو أكثر عند التقائهما مهما كان اتجاه كل منهما. يوضح الشكل (19/أ) مثلاً بسيطاً على تراكّب الموجات، حيث تلتقي موجات دائرية على سطح الماء في حوض.

ويبين الشكل (19/ب) أيضاً قمتي موجتين تسيران باتجاهين متعاكسين قبل التقائهما، وعند حدوث التراكّب ثم بعد ابتعادهما، لاحظ أنه ينتج عن الأثر المشترك للقمتين لحظة تراكّبهما قمة مضاعفة، وينتج عن هذا التراكّب تداخل بناءً *Constructive interference*.

ويبين الشكل (19/ج) أن تراكّب قمة مع قاع ينتج عنه انعدام للإزاحة، وتختفي الموجتان في لحظة تراكّبهما، ويُسمى هذا التراكّب تداخلًا هدامًا *Destructive interference*.

نلاحظ من الشكل السابق أن كلاً من الموجتين المترابكتين بعد التراكّب تعود إلى شكلها السابق الذي كانت عليه قبل التراكّب. ويُشترط لحدوث تراكّب الموجات أن تكون من النوع نفسه، فلا يمكن أن يحدث تراكّب بين موجتين إحداهما طولية والأخرى مستعرضة، فلا يحدث بين موجة صوتية وأخرى كهرومغناطيسية.



الشكل (20): (أ): غشاء فقاعة صابون. (ب): نمط تداخل موجات ضوء الشمس. (ج): تجربة تداخل موجات ضوء الليزر.

تحدث ظاهرة التداخل في جميع أنواع الموجات، فموجات الصوت تداخل وتنشأ عن تداخلها أنماط تتألف من مناطق تزداد فيها شدة الصوت، ومناطق أخرى ينعدم فيها الصوت. كما يمكن رؤية بعض الأنماط الناتجة عن تداخل موجات الضوء على غشاء فقاعة صابون مثلما يبين الشكل (20/أ). وهناك تجارب عملية يمكننا من رؤية بعض أنماط التداخل لموجات الضوء. يوضح الشكل (20/ب) تداخل موجات ضوء الشمس بعد عبوره من شقين صغيرين متجاورين، بينما يظهر الشكل (20/ج) رسمًا توضيحيًا للتداخل الناتج عن ضوء ليزر أحمر عند مروره من شقين. ويكون نمط التداخل منتظمًا بحيث يكرر نفسه عندما تكون الموجات المتداخلة متساوية في الطول الموجي.

يحدث التداخل أيضًا بين الموجات التي لا تتساوى في التردد والطول الموجي، أو أنها صادرة عن مصدرين غير متمثلين، لكن النمط الناتج عن ذلك لا يكون منتظمًا.

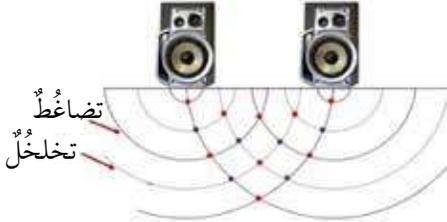
✓ **أتحقّق:**

- متى يكون التداخل بناءً؟ ومتى يكون هدامًا؟
- ما الشرط اللازم توافره حتى يحدث تراكب لموجتين تتقلان في وسط واحد؟

**أفكر:** عند النظر إلى المنشور الزجاجي وعند النظر إلى فقاعة الصابون، في الحالتين نلاحظ مركبات الطيف المرئي الملونة، أو جزءًا منها. ما الاختلاف بين الحالتين؟

## المثال 7

وُضِعَت سَمَاعَتَانِ مُتَصِلَتَانِ مَعَ المَصْدِرِ نَفْسِهِ، بِحَيْثُ تَفْصِلُهُمَا مَسَافَةٌ (1 m) تَقْرِيبًا، فَحَدَثَ تَدَاخُلٌ بَيْنَ المَوْجَاتِ الصَّادِرَةِ عَنِ السَّمَاعَتَيْنِ مَعًا، كَمَا يَبِينُ الشَّكْلُ (21). أَحَدُ نِقَاطِ التَّدَاخُلِ البِنَاءِ وَالهَدَامِ، وَأَبْيَنُ مَا يَحْدُثُ لِلسَّوْتِ عِنْدَ كُلِّ مِنْهَا.



الشكل (21): التداخل المنتظم بين موجات الصوت المتماثلة.

المعطيات: الشكل.

المطلوب: التعليق على الشكل.

الحل:

الخطوط المتصلة على الشكل تمثل مناطق تضاعف، والخطوط المتقطعة تمثل مناطق تخلخل. بعض النقاط الحمراء ناتجة عن تقاطع خطين متصلين (تضاعف مع تضاعف)؛ فهي تمثل تضاعفًا مضاعفًا. وبعض النقاط الحمراء الأخرى ناتجة عن تقاطع خطين متقطعين (تخلخل مع تخلخل)؛ فهي تمثل تخلخلًا مضاعفًا. وتكون شدة الصوت عند النقاط الحمراء جميعها أكبر ما يمكن. النقاط الزرقاء جميعها ناتجة عن تقاطع خط متصل مع خط متقطع (تضاعف مع تخلخل)؛ فهي تمثل انعدامًا للموجات، أي اختفاء الصوت.



الشكل (22): حيود موجات سطح الماء عند نفاذها من فتحة واسعة وأخرى ضيقة.

## الحيود Diffraction

الحيود هو ظاهرة انحراف الموجات عن اتجاهها عند نفاذها خلال الفتحات الضيقة، أو بالقرب من حواف الحواجز، وهي ظاهرة تحدث لمختلف أنواع الموجات، مثل: موجات الماء والصوت والضوء، وقد لاحظت حيود الموجات المنتشرة على سطح الماء في التجربة السابقة عند نفاذها خلال فتحة في حاجز. ويكون الحيود واضحًا عندما يكون اتساع الفتحة التي تمر من خلالها الموجات مقاربًا لمقدار طولها الموجي.

يبين الشكل (22) نمطين مختلفين لحيود موجات مستقيمة على سطح الماء عند نفاذها من فتحتين مختلفتين في حاجزين، وسبب الاختلاف في نمطي الحيود ناتج عن الاختلاف في اتساع الفتحة التي عبرت خلالها الموجات.

نلاحظ أحياناً تكوّن أهدابٍ تداخلٍ مضيئةٍ وأخرى مظلمةٍ عندما ننظرُ إلى حاجزٍ يسقطُ عليه ضوءٌ صادرٌ عن فتحةٍ ضيقةٍ، وتكونُ هذه الأهدابُ ناتجةً عن حيودِ موجاتِ الضوء عندَ نفاذِها خلالَ هذه الفتحةِ أو بالقربِ منَ الحوافِّ الحادةِ للأجسامِ الصغيرةِ؛ فعندَ مرورِ الضوءِ خلالَ ثقبِ إبرِةٍ خياطةٍ مثلاً، أو بالقربِ منَ حافةِ جسمٍ دقيقٍ آخرَ، ثمَّ سقوطه على حاجزٍ، فإننا نرى بوضوحٍ أهدابَ التداخلِ المتكونةَ على الحاجزِ الناتجةً عن حيودِ الضوء. والشكلُ (23) يبينُ حيودَ ضوءٍ أحمرٍ عندَ مروره خلالَ ثقبِ إبرِةٍ خياطةٍ.



الشكلُ (23): حيودُ موجاتِ الضوءِ الأحمرِ عندَ مرورها منَ ثقبِ إبرِةٍ خياطةٍ.

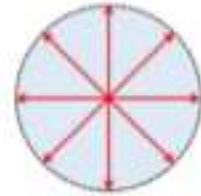
### الاستقطابُ Polarization

ترتبطُ خاصيةُ الاستقطابِ بالموجاتِ المستعرضةِ فقط، فهي تتعلقُ باتجاهِ اهتزازِ جزيئاتِ الوسطِ عندما يكونُ متعامداً معَ اتجاهِ انتشارِ الموجةِ. فالموجاتُ المستعرضةُ بجميعِ أنواعها يمكنُ استقطابُها، في حين لا يمكنُ استقطابُ الموجاتِ الطولية. ويعدُّ الاستقطابُ الذي نلاحظُه لموجاتِ الضوءِ المرئيِّ دليلاً على أنَّ الموجاتِ الكهرمغناطيسيةَ جميعها مستعرضةٌ. في الموجاتِ المستقطبةِ يكونُ اهتزازُ جزيئاتِ الوسطِ في بُعدٍ واحدٍ يتعامدُ معَ اتجاهِ انتشارِ الموجةِ، بينما في الموجاتِ غيرِ المستقطبةِ تهتزُّ هذه الجزيئاتُ في أبعادٍ عدَّةٍ جميعها متعامدةٌ معَ اتجاهِ انتشارِ الموجةِ.

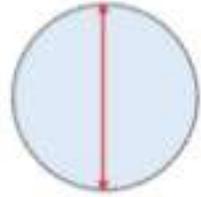
لذلك يُعرَّفُ الاستقطابُ Polarization بأنه عمليةُ انتقاءِ موجةٍ مستعرضةٍ تُحدثُ اهتزازاً في جزيئاتِ الوسطِ في بُعدٍ واحدٍ فقط منَ بينِ حزمةِ موجاتٍ يكونُ الاهتزازُ فيها باتجاهاتٍ عدَّةٍ، جميعها متعامدةٌ معَ اتجاهِ انتشارِ الموجاتِ.

يبينُ الشكلُ (أ/24) موجاتٍ غيرِ مستقطبةٍ تهتزُّ منَ خلالها دقائقُ الوسطِ باتجاهاتٍ مختلفةٍ، إذ تمثلُ الأسهمُ اتجاهاتِ الاهتزازِ، أما اتجاهُ انتشارِ الموجاتِ فيكونُ عمودياً على سطحِ الورقةِ، داخلاً فيها أو خارجاً منها. في حين يبينُ الشكلُ (ب/24) موجاتٍ مستقطبةً استقطاباً رأسياً، ويبينُ الشكلُ (ج/24) موجاتٍ مستقطبةً استقطاباً أفقياً.

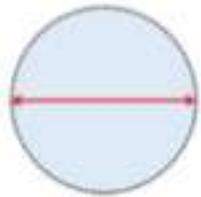
**أفكر:** عندما يُناديني زميلي من خلفِ سورٍ مرتفعٍ، فإنني أسمعُ صوتهُ، لكني لا أراه. لماذا؟



الشكلُ (أ/24): موجاتٌ غيرُ مستقطبةٍ.

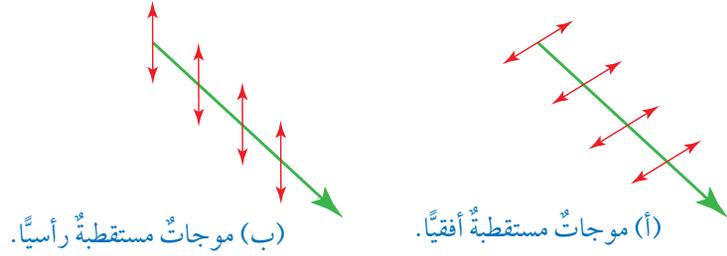


الشكلُ (ب/24): استقطابُ رأسيّ.



الشكلُ (ج/24): استقطابُ أفقيّ.

الشكل (25): تحديد مستوى استقطاب الموجات الكهرمغناطيسية.



(ب) موجات مستقطبة رأسيًا.

(أ) موجات مستقطبة أفقيًا.

### الفيزياء والتكنولوجيا

عند سقوط ضوء الشمس غير المستقطب على سطح الماء أو الزجاج أو الطريق بزاوية معينة، فإنه ينعكس مستقطبًا باتجاه واحد يوازي السطح العاكس، كما في الشكل (25/أ).

عند استخدام نظارة شمسية ذات محور استقطاب رأسي، فإنها تمتص نسبة كبيرة من الضوء المستقطب استقطابًا أفقيًا وهو المنعكس عن الأرض، لكنها تسمح للضوء غير المستقطب بالوصول إلى العين؛ مما يقلل من وهج الانعكاسات المزعجة.

نعلم أن الموجة الكهرمغناطيسية تتكون من مركبتين متعامدتين إحداهما ناتجة عن اهتزاز في المجال الكهربائي، والأخرى عن اهتزاز في المجال المغناطيسي، ويتم تحديد مستوى الاستقطاب في الموجات الكهرمغناطيسية على أنه المستوى الذي يهتز فيه المجال الكهربائي فقط. يبين الشكل (25/أ) موجة مستقطبة أفقيًا، ويبين الشكل (25/ب) موجة مستقطبة رأسيًا.

كثير من مصادر الضوء، مثل بعض مصابيح الليزر والشاشات الرقمية (LED) يكون الضوء الصادر عنها مستقطبًا، في حين يكون ضوء المصباح العادي وضوء الشمس غير مستقطب، وأيضًا تُستخدم بعض النظارات الشمسية التي تعمل على استقطاب الضوء لتخفيف شدة الأضواء المنعكسة عن الطرق والمسطحات المائية.

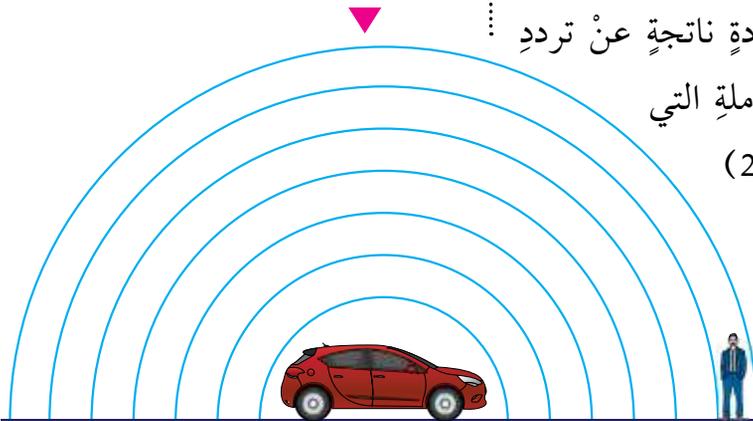
✓ **أتحقّق:** ما المقصود بعملية استقطاب الموجات؟ ولماذا تُستقطب موجات الضوء، ولا تُستقطب موجات الصوت؟

### تأثير دوبلر Doppler Effect

عند سماعك صوت منبه سيارة متوقفة عن الحركة، وأنت تقف بالقرب منها، فإنك تسمعه بدرجة صوت محددة ناتجة عن تردد هذا الصوت، وهو عدد الموجات الصوتية الكاملة التي يصدرها المنبه في الثانية الواحدة. يبين الشكل (26) الموجات الصوتية الصادرة عن منبه سيارة في حالة وقوف، وهي تصل إلى المستمع، إذ تمثل الأفراس مناطق التضغوط المتتالية في الهواء.

الشكل (26): موجات صوت

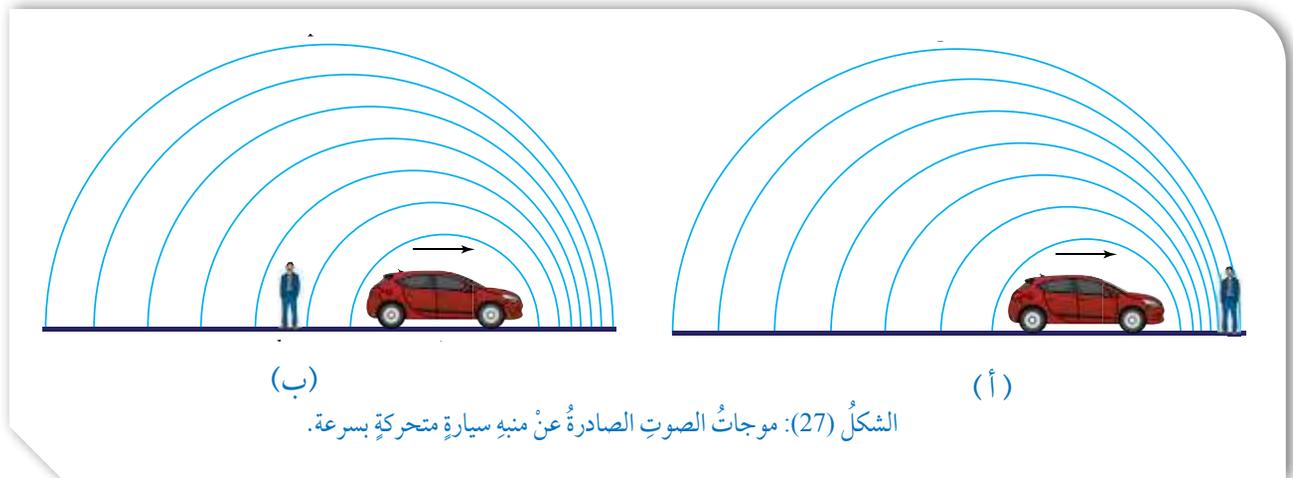
منبه سيارة متوقفة.



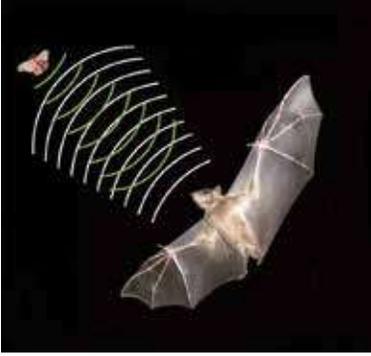
لتساءل: ما الذي سيحدث لو كانت السيارة تُصدر صوت المنبه وهي متحركة بسرعة نحو السامع؟ إنَّ منبه السيارة لم يتغير وسيبقى يُصدر الصوت بالتردد نفسه والطول الموجي نفسه، وكذلك سرعة الصوت في الهواء لن تتغير؛ لأنها تعتمد على خصائص الهواء. لكن بسبب حركة السيارة فإن موجات الصوت في الجهة الأمامية سوف تتقارب من بعضها، أي أن الطول الموجي للموجات التي بين السيارة والسامع سوف يقصر، كما في الشكل (27/أ). وستصل مزيد من الموجات إلى أذن السامع في الثانية الواحدة، وهذا يدركه السامع على صورة زيادة في درجة الصوت، أي أن التردد الذي يصل إلى أذن السامع يكون أكبر من تردد مصدر الصوت (المنبه).

ويحدث عكس ذلك عندما تُصدر سيارة صوت منبه وهي تتحرك مبتعدة عن السامع، كما في الشكل (27/ب)، حيث ستصل التضاعطات إلى أذن السامع متباعدة عن بعضها، أي ستحدث زيادة في الطول الموجي، فيصبح التردد المسموع أقل من تردد المصدر، وهذا سوف يدركه السامع على صورة نقصان في درجة صوت المنبه. تُعرف هذه الظاهرة بتأثير دوبلر **Doppler effect**، وهو التغير الظاهري في تردد الموجة نتيجة وجود حركة نسبية بين مصدر الصوت والسامع. وتأثير دوبلر يحدث في الموجات الأخرى؛ الميكانيكية والكهرمغناطيسية.

**أفكر:** في تأثير دوبلر يحدث تغير ظاهري في تردد الموجة عند وصولها إلى المراقب نتيجة حركة المصدر أو المراقب. كيف لهذا أن يحدث دون أن يتغير تردد المصدر؟



## تطبيقات على تأثير دوبلر Doppler Effect Applications



الشكل (28): خفاش يطارده فريسته.

• الخفاش: يعتمد الخفاش على الموجات فوق الصوتية في إيجاد طريقه أو تعقب فريسته؛ فهو يرسل موجات فوق صوتية تصل إلى جسم الفريسة ثم ترتد عنها، فيحدد الخفاش موقع الفريسة، ثم يحدد سرعتها من فرق التردد بين الموجتين المرسلتين والمنعكسة، كما يوضح الشكل (28).

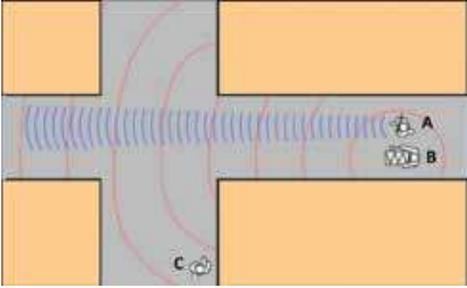
• الرادار: على غرار الطريقة التي وهبها الله تعالى للخفاش، ابتكر الإنسان تقنية الرادار، الذي يرسل موجات كهرومغناطيسية قصيرة (ميكروية) ثم تنعكس عن جسم الهدف الذي قد يكون طائرة في الجو أو سيارة على الطريق، وبمعرفة الفرق بين تردد الموجات المرسلية، وتردد الموجات المرتدة عن الهدف يجري حساب سرعة الهدف المتحرك.

• التصوير فوق الصوتي: حيث تُستخدم موجات فوق صوتية في تصوير أماكن يصعب الوصول إليها مثل قيعان البحار، وكذلك في الطب لقياس سرعة الدم في الأوعية الدموية داخل جسم الإنسان.

• دراسة تطور الكون: لاحظ علماء الفلك أن كثيراً من المجرات يميل طيفها الضوئي القادم إلى الأرض نحو اللون الأحمر؛ ما يعني أن تردد الضوء الذي يصل منها إلى الأرض أقل من التردد الذي ترسله، ولن يحدث هذا إلا عندما يكون مصدر الضوء متحركاً بسرعة كبيرة مبتعداً عن الأرض، حسب تأثير دوبلر. وبذلك؛ افترض العلماء أن مجرات الكون ما زالت تتحرك مبتعدة عن بعضها منذ بدء الكون، وتعرف هذه الفرضية بتمدد الكون.

## مراجعةُ الدرس

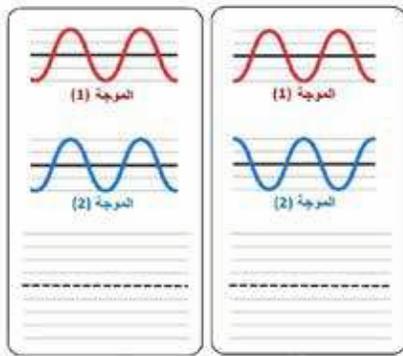
1. **الفكرةُ الرئيسةُ:** أذكرُ خصائصَ الموجاتِ التي ترتبطُ بكثيرٍ من الظواهرِ الطبيعيةِ.
2. أوضح المقصودَ بكلِّ من: تراكبِ الموجاتِ واستقطابِها.
3. **أقارنُ:** بينَ عمليتي انعكاسِ الموجاتِ المستعرضةِ التي تنتشرُ على سطحِ الماءِ، وانكسارِها.
4. **أحدّدُ:** أيُّ من العملياتِ الآتيةِ تحدثُ في الموجاتِ المستعرضةِ ولا تحدثُ في الموجاتِ الطولية: التداخلُ، الحيودُ، الاستقطابُ.



5. **أفسّرُ:** بينما كنتُ أقفُ في الموقعِ (C) بالقربِ من تقاطعِ شارعينِ، كما في الشكلِ المجاورِ، سمعتُ صوتَ فرقةِ موسيقيةِ، العازفُ (A) يعزفُ القِرْبَةَ التي تُصدرُ صوتًا حادًا طولُهُ الموجيُّ قصيرٌ (اللونُ الأزرقُ)، والعازفُ (B) يقرعُ الطبلَ الذي يُصدرُ صوتًا غليظًا طولُهُ الموجيُّ كبيرٌ (اللونُ الأحمرُ). أيُّ الصوتينِ أسمعُ؟ ولماذا؟

6. أبينُ أهميةَ استخدامِ السائقِ للنظاراتِ الشمسيةِ التي تعملُ على استقطابِ الضوءِ بشكلٍ رأسيٍّ؛ خاصةً عندما يقودُ سيارتهُ في النهارِ، ويتعرّضُ إلى وهجٍ كبيرٍ ناتجٍ عن انعكاسِ ضوءِ الشمسِ عن السطوحِ الأفقيةِ.

7. **تفكيرٌ ناقِدٌ:** وضعَ العلماءُ نظرياتٍ عدّةً تصفُ تطورَ الكونِ، منها نظريةُ الانفجارِ العظيمِ التي تفترضُ أنّ المجراتِ ما زالتٍ تتحركُ متباعدةً عن بعضها بسرعةٍ كبيرةٍ. معتمداً على معرفتي بمكوناتِ الطيفِ المرئيِّ وتردداتها، ومعرفتي بتأثيرِ دوبلر في الحركةِ الموجيةِ. أصفُ ما يحدثُ للضوءِ القادمِ إلى الأرضِ من مجرةٍ تتحركُ مبتعدةً عن الأرضِ.



الحالةُ (ب)

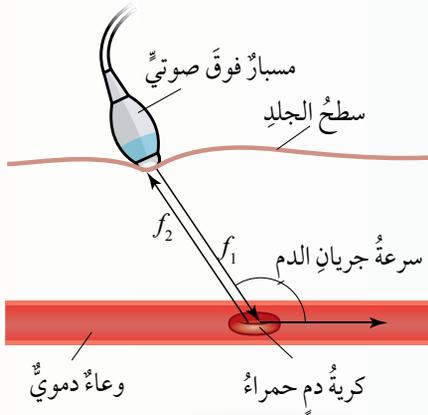
الحالةُ (أ)

8. **أرسمُ:** أكملُ الشكلَ المجاورَ برسمِ الموجةِ الناتجةِ عن تراكبِ الموجتينِ (1,2) في كلِّ من الحالتينِ (أ، ب)، ثمَّ أكتبُ تحتَ كلِّ حالةٍ إن كانَ التراكبُ بناءً أو هدامًا.

يمتاز الطب الحديث عن الماضي بقلّة اعتماده على العمليات الجراحية؛ فكثيرٌ من الحالات المرضية الصعبة أصبحت تعالج باستخدام تقنيات حديثة، يُعدُّ التصوير الصوتي واحداً من التقنيات غير الجراحية التي تُستخدم في الطب الحديث، وفيه تُستخدم الموجات فوق الصوتية لتصوير ما في داخل الجسم. والموجات فوق الصوتية هي موجات صوتية يزيد ترددها عن الحد الأعلى لحاسة السمع عند الإنسان (20 kHz)، ولها قدرة على اختراق أنسجة الجسم اللينة (الجلد والعضلات والدهون).

من بين الاستخدامات الطبية الكثيرة للموجات فوق الصوتية تقنية قياس سرعة الدم، بهدف تتبع الدورة الدموية داخل أنسجة الجسم المختلفة، للبحث عن الانسداد والتضييق في الأوعية الدموية. حيث يتدفق الدم في الأوردة بسرعة متوسطة ثابتة تقريباً، بينما تتأثر سرعته في الشرايين بضربات القلب، وتكون هذه السرعات بالنسبة إلى الإنسان السليم معلومة لدى الأطباء، وعندما يحدث تغير ملحوظ في سرعة الدم، فإن هذا يعني وجود تضييق أو انسداد جزئي في الوريد أو الشريان.

يبين الشكل المجاور طريقة استخدام الموجات فوق الصوتية لقياس سرعة الدم، حيث يُستخدم مسبار خاص لإرسال موجات فوق صوتية ترددها معلوم ( $f_1$ )، ثم يلتقط الموجة فوق الصوتية المنعكسة بتردد مختلف ( $f_2$ )، علماً أن هذه الموجة تنعكس عن كريات الدم الحمراء داخل الوعاء الدموي.



وسبب تغير التردد هو تأثير دوبلر نتيجة الحركة النسبية بين كرية الدم والمسبار. ويعمل جهاز حاسوب خاص بحساب سرعة الدم بالاعتماد على معرفة الفرق وتحديده بين ترددي الموجتين، وسرعة الموجات فوق الصوتية داخل أنسجة الجسم اللينة التي تساوي (1500 m/s). ثم يرى الطبيب إن كانت سرعة تدفق الدم في الوعاء الدموي اعتيادية أم لا.

**أبحاث** في كتب الفيزياء، أو في شبكة الإنترنت عن إجابات الأسئلة الآتية:

- أي الحيوانات تسمع موجات فوق صوتية؟ وأيها تسمع موجات تحت سمعية؟
- هل يمكن استخدام الموجات فوق الصوتية لقياس سرعة جريان الدم في الأوعية الدموية داخل الدماغ؟ علّل إجابتك.
- عند استخدام المسبار فوق الصوتي لقياس سرعة الدم في الأوعية الدموية، ولكي تكون النتائج صحيحة، فإنه يجب أن يبقى المسبار ملاصقاً لجلد الإنسان ولا يتعد عنه. ما سبب ذلك؟
- احسب الطول الموجي لموجات فوق صوتية ترددها (24 MHz)، عندما تنتقل في الهواء، ثم احسب طولها الموجي عندما تنتقل داخل أنسجة الجسم اللينة.

## 1. أضع دائرةً حول رمز الإجابة الصحيحة لكل جملة مما يأتي:

1. المقصود بالتخلخل في الحركة الموجية، هو منطقة:
  - أ . منخفضة الضغط تنشأ في الوسط عند مرور موجات مستعرضة خلاله.
  - ب . مرتفعة الضغط تنشأ في الوسط عند مرور موجات مستعرضة خلاله.
  - ج . منخفضة الضغط تنشأ في الوسط عند مرور موجات طولية خلاله.
  - د . مرتفعة الضغط تنشأ في الوسط عند مرور موجات طولية خلاله.
2. حركة جزيء الهواء عند مرور الصوت خلاله حركة:
  - أ . اهتزازية باتجاه يتعامد مع اتجاه انتشار الموجة.
  - ب . دائرية في مستوى اتجاه انتشار الموجة.
  - ج . انتقالية ينتقل فيها باتجاه انتشار الموجة.
  - د . اهتزازية باتجاه يوازي اتجاه انتشار الموجة.
3. متى تزداد سرعة الصوت في الهواء؟
  - أ . بزيادة سعة الموجة الصوتية.
  - ب . بزيادة طاقة مصدر الصوت.
  - ج . بانخفاض درجة حرارة الهواء.
  - د . بارتفاع درجة حرارة الهواء.
4. تنتقل موجتان مستعرضتان في حبلٍ وتلتقيان عند نقطة في لحظة ما، فإن الظاهرة التي تحدث هي:
  - أ . تراكب الموجتين معاً، وحصول إزاحة واحدة.
  - ب . تلاشي للموجتين، وانعدام الإزاحة.
  - ج . انعكاس الموجة الأكبر سعة عن الموجة الأصغر سعة.
  - د . انعكاس الموجة الأصغر سعة عن الموجة الأكبر سعة.
5. التردد الظاهري لصوت منبه سيارة إسعافٍ متحركة بسرعة إلى الأمام، يكون كما يأتي:
  - أ . أمامها أصغر من تردد المصدر، وخلفها أكبر من تردد المصدر.
  - ب . أمامها أكبر من تردد المصدر، وخلفها أصغر من تردد المصدر.
  - ج . مساوياً لتردد المصدر أمام السيارة وخلفها.
  - د . أكبر من تردد المصدر أمام السيارة وخلفها.

## مراجعة الوحدة



2. **تفكير ناقد:** عند توصيل حبلين مختلفين في مساحة المقطع والمتانة، كما يبين الشكل المجاور، ثم إرسال نبضة في الحبل الرفيع. أبين ما يحدث لها عندما تصل إلى نقطة التقاء الحبلين، مفسراً إجابتي.

3. **أحسب:** موجتان كهربائيتان تنتقلان معاً في الهواء؛ الطول الموجي للأولى ( $\lambda_1 = 8.0 \times 10^{-4} \text{ m}$ )، والطول الموجي للثانية ( $\lambda_2 = 2.4 \times 10^{-2} \text{ m}$ ). أجد ما يأتي:

أ. تردد كل موجة، علماً أن سرعتهما في الهواء ( $3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ ).

ب. ما الذي يحدث لكل من: الطول الموجي والتردد عند انتقال الموجتين في الماء؟ علماً أن سرعة الموجات الكهربائية مغناطيسية في الماء أقل منها في الهواء.

ج. أحدد موقع كل منهما في الطيف الكهرومغناطيسي.

4. وُضِعَ حاجزٌ معتمٌ فيه شقان رفيعان أمام مصدرٍ ضوئيٍّ، ثم وُضِعَتْ شاشةٌ بعدَ الحاجزِ، فظهرت على الشاشة خطوطٌ مضيئةٌ، كما في الشكل. أجب عما يأتي:

أ. ما اسم هذه الظاهرة؟

ب. ما الذي تمثله الخطوط المضيئة؟

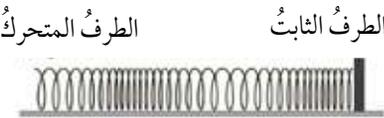
ج. ما الذي تمثله الخطوط المظلمة؟

5. تتحرك سيارة إسعافٍ بسرعةٍ نحو اليمين وهي تصدر صوتٍ منبهٍ، متجهةً نحو فتاةٍ تقفُ في الموقع (A)، وتتجاوز عن شابٍ يسيرُ في الموقع (B)، كما في الشكل.

أصف درجة الصوت الذي يسمعه كلٌ من الفتاة والشاب وسائق سيارة الإسعاف. أفسر إجابتي، ذاكراً الخصيصة الموجية التي اعتمدت عليها في إجابتي.

6. أذكر استخداماً تكنولوجياً واحداً يعتمد على تأثير دوبلر لكل من: الموجات فوق الصوتية والموجات الكهرومغناطيسية.

7. **أحلل:** الشكل المجاور يمثل موجاتٍ طوليةً تنتقل في نابض. أبين على الرسم كلاً من: اتجاه انتشار الموجات، اتجاه إزاحة حلقات النابض، الطول الموجي، اتجاه انتقال الطاقة.



## مسرّد المصطلحات

- **استقطاب (Polarization):** عملية انتقاء موجة مستعرضة تحدث اهتزازاً في جزيئات الوسط في بُعدٍ واحدٍ فقط من بين حزمة موجات يكون الاهتزاز فيها باتجاهاتٍ عدّة، جميعها متعامدةً مع اتجاه انتشار الموجات.
- **انعكاس (Reflection):** عملية سقوط الموجة على جسمٍ أو حاجزٍ ثم ارتدادها عنه باتجاهٍ مختلفٍ.
- **انكسار (Refraction):** انحراف اتجاه انتشار الموجات عند اجتيازها الحدّ الفاصل بين وسطين مختلفين في خصائصهما.
- **تأثير دوبلر (Doppler Effect):** التغير الظاهري في تردد الموجة نتيجة وجود حركة نسبية بين مصدر الصوت والسامع.
- **تداخل (Interference):** عملية التقاء مسارين من الحركة الموجية؛ بحيث ينتج عن التقاء القمم والقيعان نمطاً محدداً.
- **تردد (Frequency):** عدد الموجات الكاملة التي تعبر نقطة ثابتة في الوسط خلال ثانية واحدة.
- **جريان منتظم (Steady Flow):** جريان المائع الذي تكون سرعته جزيئاته عند نقطة معينة فيه ثابتة لا تتغير مع الزمن، ولكنها يمكن أن تتغير من نقطة إلى أخرى.
- **حوض موجات (Ripple Tank):** حوض شفاف توضع فيه كمية من الماء، ويُجهز بمحرك كهربائي مهتز وملحقات أخرى لتوليد الموجات ودراسة حركتها.
- **حيود (Diffraction):** ظاهرة انحراف الموجات عن اتجاهها عند نفاذها خلال الفتحات الضيقة أو قريباً من حواف الحواجز.
- **خط الجريان (Flow Line):** خط وهمي يمثل مسار جزيئات المائع عند جريانها.
- **زمن دوري (Period):** المدة الزمنية اللازمة لعبور موجة كاملة واحدة نقطة ثابتة في الوسط.
- **سرعة الموجة (Speed of a Wave):** ناتج قسمة المسافة (s) التي تقطعها الموجة على الزمن الكلي (t) اللازم لقطع تلك المسافة.
- **سعة الموجة (Wave Amplitude):** أقصى إزاحة تحدثها الموجة لدقائق الوسط الناقل بالنسبة إلى موقع اتزانها.

- **شدة الموجة (Wave Intensity):** نسبة الطاقة التي تنقلها الموجة إلى وحدة المساحة التي يتعامد معها اتجاه انتشار الموجة.
- **ضغط المائع (Fluid Pressure):** القوة العمودية التي يؤثر بها المائع عمودياً في الأجسام، أو النقاط داخله في وحدة المساحة.
- **طول موجي (Wave Length):** المسافة بين قمتين متتاليتين، أو المسافة بين قاعين متتاليين، ويرمز إليه بالحرف اليوناني ( $\lambda$  - لامدا).
- **عتبة السمع (Threshold of Hearing):** مستوى الصوت (0 dB)، وهو أدنى مستوى صوت يمكن للإنسان سماعه.
- **غير دوامي (Irrotational):** جريان المائع الذي لا تدور جزيئاته حول مركز دوران.
- **غير قابل للانضغاط (Incompressible):** المائع الذي تبقى كثافته ثابتة؛ لا تتغير أثناء جريانه.
- **غير لزج (Nonviscous):** المائع الذي لا يوجد قوى احتكاك بين طبقاته أثناء جريانه.
- **قاعدة أرخميدس (Archimedes' Principle):** قوة الطفو المؤثرة في الجسم المغمور كلياً أو جزئياً في مائع تساوي وزن المائع المزاح.
- **قانون الجذب العام لنيوتن (The Universal Gravitation Law):** ينص على أن: "كل جسمين في الكون يتجاذبان بقوة يتناسب مقدارها طردياً مع حاصل ضرب كتلتيهما وعكسياً مع مربع المسافة بين مركزيهما"، وتؤثر هذه القوة في اتجاه الخطّ الواصل بين مركزي الجسمين المتجاذبين.
- **قوة احتكاك (Friction Force):** قوة تلامس تُعيق حركة الأجسام الصلبة المتلامسة بعضها فوق بعض وتُمانع حركتها، وتؤثر بشكل مواز لسطحي التلامس بين الجسمين. وتنشأ هذه القوة بين سطحي الجسمين المتلامسين عند تحريك بعضهما فوق بعض، أو محاولة ذلك.
- **قوة الاحتكاك السكوني (Static Frictional Force):** قوة تؤثر في سطحي جسمين متلامسين عندما لا يتحرك أحدهما بالنسبة إلى الآخر، رمزها ( $f_s$ ).
- **قوة الاحتكاك الحركي (Kinetic Frictional Force):** قوة تؤثر في سطحي جسمين متلامسين عندما يتحرك بعضهما فوق بعض، رمزها ( $f_k$ ).

- **قوة الطفو (Buoyant Force):** محصلة القوى التي يؤثرُ بها المائعُ في الجسمِ المغمورِ فيه كلياً أو جزئياً رأسياً لأعلى.
- **قوة شدّ (Tension Force):** قوةٌ سحبٍ تؤثرُ في جسمٍ من خلالِ سلكٍ أو خيطٍ أو حبلٍ، رمزها  $(F_T)$ ، وتؤثرُ في اتجاهِ طولِ الخيطِ أو الحبلِ أو السلكِ.
- **قوة عمودية (Normal Force):** قوةٌ تلامسٍ يؤثرُ بها جسمٌ في جسمٍ آخرٍ ملامسٍ له، رمزها  $(F_N)$ ، وتكونُ دائماً عموديةً على مستوى التلامسِ بينَ الجسمينِ.
- **قوة مركزية (Centripetal Force):** القوةُ المحصلةُ التي تؤثرُ في جسمٍ يتحركُ حركةً دائريةً منتظمةً نحوَ مركزِ مسارهِ الدائريِّ، رمزها  $(F_c)$ ، تُسببُ تغييراً في سرعتهِ المتجهة، أي تُكسبه تسارعاً مركزياً.
- **كتلة (Mass):** مقدارُ المادةِ الموجودةِ في جسمٍ ما، وهي كميةٌ قياسيةٌ، رمزها  $(m)$ ، وتُقاسُ بوحدة  $(kg)$  بحسبِ النظامِ الدوليِّ للوحداتِ.
- **مائع مثالي (Ideal Fluid):** المائعُ الذي يتصفُ بالخصائصِ الأربعِ الآتية: جريانهُ منتظمٌ، وغيرُ قابلٍ للانضغاطِ، وغيرُ لزجٍ، وغيرُ دواميِّ.
- **مبدأ تراكب الموجات (Principle of Superposition of Waves):** الإزاحةُ الكليةُ التي تحدثُ لجزيئاتِ الوسطِ تساوي ناتجَ الجمعِ المتجهيِّ للإزاحاتِ الناتجةِ عن التقاءِ الموجاتِ عندَ النقطةِ نفسها.
- **مستوى الصوت (Loudness of Sound):** مدى علوِّ الصوتِ أو انخفاضه، ويتناسبُ مع مقدارِ الطاقةِ التي تحملها موجاتُ الصوتِ، ويُقاسُ بوحدةِ ديسيبل  $(dB)$ .
- **معادلة الاستمرارية (Continuity Equation):** حاصلُ ضربِ مساحةِ المقطعِ العرضيِّ لأنبوبِ جريانِ المائعِ في سرعةِ المائعِ عندَ ذلكَ المقطعِ يساوي مقداراً ثابتاً.
- **معادلة برنولي (Bernoulli's Equation):** مجموعُ الضغطِ والطاقةِ الميكانيكيةِ لوحدةِ الحجمِ يساوي مقداراً ثابتاً. (الطاقة الميكانيكية هي مجموع طاقتي الوضع والحركة)
- **معامل الاحتكاك الحركي (Coefficient of Kinetic Friction):** يساوي نسبةً مقدارِ قوةِ الاحتكاكِ الحركيِّ إلى مقدارِ القوةِ العمودية، رمزه  $(\mu_k)$ ، وهو يعتمدُ على طبيعةِ السطحينِ المتلامسينِ، وبما أنَّه نسبةٌ قوى فليس له وحدة قياس.

- **معامل الاحتكاك السكوني (Coefficient of Static Friction):** يساوي نسبة مقدار قوة الاحتكاك السكوني العظمى إلى مقدار القوة العمودية، رمزه  $(\mu_s)$ ، ويعتمد على طبيعة السطحين المتلامسين، وبما أنه نسبة قوى فليس له وحدة قياس.
- **معدل التدفق الحجمي (Volume Flow Rate):** حجم المائع الذي يعبر مساحة مقطع معين من الأنبوب في وحدة الزمن.
- **مقياس فنتوري (Venturi Meter):** جهاز يُستخدم لقياس سرعة تدفق الموائع في الأنابيب بتطبيق معادلة برنولي.
- **مقياس كثافة السوائل (Hydrometer):** أداة تُستخدم لقياس كثافة السائل بالاعتماد على قاعدة أرخميدس.
- **موائع (Fluids):** المواد التي تتصف بخاصية القدرة على الجريان وتغيير شكلها، وتشمل السوائل والغازات.
- **موجة (Wave):** اضطراب أو اهتزاز ينتقل من مكان إلى آخر، وتعد الموجة وسيلة لنقل الطاقة.
- **موجة طولية (Longitudinal Wave):** الموجة التي يكون فيها اتجاه اهتزاز جزيئات الوسط الناقل لها باتجاه انتشار الموجة نفسها.
- **موجة مستعرضة (Transverse Wave):** الموجة التي يكون اتجاه اهتزاز جزيئات الوسط الناقل لها متعامداً مع اتجاه انتشارها.
- **وزن (Weight):** قوة جذب الأرض للجسم، رمزه  $(F_g)$ ، ويُقاس بوحدة نيوتن newton بحسب النظام الدولي للوحدات، وهو كمية متجهة، حيث يكون اتجاه وزن أي جسم على سطح الأرض دائماً رأسياً إلى أسفل نحو مركزها.

## قائمة المراجع

1. Avijit Lahiri, **BASIC PHYSICS: PRINCIPLES AND CONCEPTS**, Avijit Lahiri, 2018
2. David Halliday, **Robert Resnick**, Jearl Walker, Fundamentals of Physics, Wiley; 11 edition 2018.
3. Douglas C. Giancoli, Physics: **Principles with Applications**, Addison Wesley, 6th edition, 2009.
4. Gurinder Chadha, **A Level Physics a for OCR**, A Level Physics a for OCR, 2015.
5. Hugh D. Young , Roger A. Freedman, **University Physics with Modern Physics**, Pearson; 14 edition (February 24, 2015)
6. Michael Smyth, Lynn Pharaoh, Richard Grimmer, Chris Bishop and Carol Davenport, **Cambridge International AS & A Level Physics**, HarperCollins Publishers Limited 2020
7. Paul A. Tipler, Gene Mosca, **Physics for Scientists and Engineers**, W. H. Freeman; 6th edition, 2007.
8. Paul G. Hewitt, **Conceptual Physics**, Pearson; 14th edition, 2015.
9. R. Shankar, **Fundamentals of Physics I: Mechanics, Relativity, and Thermodynamics**, Yale University Press; Expanded Edition, 2019.
10. Raymond A. Serway , John W. Jewett, **Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics**, Cengage Learning; 009 edition, 2015.
11. Raymond A. Serway, Chris Vuille, **College Physics**, Cengage Learning; 11 edition, 2017.
12. Roger Muncaster, **A Level Physics**, Oxford University Press; 4th edition, 2014.
13. Steve Adams, **Advanced Physics**, Oxford University Press, USA; 2nd UK ed. Edition, 2013.
14. Tom Duncan, **Advanced Physics**, Hodder Murray; 5th edition, 2000.