المملكة الأردنية الهاشمية
وزارة التربية والتعليم

المركز الوطني لتطوير المناهج
National Center for Curriculum Development

# الفيزياء

## الصف العاشر - كتاب الطالب

## الفصل الدراسي الثاني

10

المملكة الأردنية الهاشمية
وزارة التربية والتعليم

المركز الوطني لتطوير المناهج
National Center for Curriculum Development

# الفيزياء

## الصف العاشر - كتاب الطالب

### الفصل الدراسي الثاني

10


فريق التأليف

موسى عطا الله الطراونة (رئيسًا)

أ.د. محمود إسماعيل الجاغوب — خلدون سليمان المصاروه

موسى محمود جرادات — يحيى أحمد طواها

شفاء طاهر عباس (منسقًا)


منهاجي
متعة التعليم الهادف


الناشر: المركز الوطني لتطوير المناهج

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

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

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

قـرَّرت وزارة التربيـة والتعليـم تدريـس هذا الكتـاب في مدارس المملكـة الأردنية الهاشـمية جميعها، بنـاءً على قـرار المجلس الأعلى للمركـز الوطنـي لتطوير المناهج في جلسـته رقـم (2020/7)، تاريخ 2020/12/1 م، وقـرار مجلس التربية والتعليـم رقم (2020/173)، تاريـخ 2020/12/17 م، بـدءًا من العام الـدراسي 2020 / 2021 م.

© HarperCollins 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 - 286 - 2**

المملكة الأردنية الهاشمية
رقم الإيداع لدى دائرة المكتبة الوطنية:
(2022/4/1869)

375,001

الأردن. المركز الوطني لتطوير المناهج

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

(132) ص.

ر.إ.: 2022/4/1869

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

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

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

**الطبعة الأولى** 1441 هـ / 2020 م
**أعيدت طباعته** 2021 م – 2023 م

# قائمةُ المحتوياتِ


الموضوعُ ..... الصفحـةُ

المقدمةُ ..... 5

**الوحدةُ الرابعةُ: تطبيقاتٌ على قوانينِ نيوتن ..... 7**

تجربةٌ استهلاليةٌ: الكتلةُ والوزنُ ..... 9

**الدرسُ الأولُ**: الوزنُ وقانونُ الجذبِ العامُّ (الكونيُّ) ..... 10

**الدرسُ الثاني**: تطبيقاتٌ على القوى ..... 18

**الدرسُ الثالث**: القوةُ المركزيةُ ..... 42

**الوحدةُ الخامسةُ: الموائعُ ..... 55**

تجربةٌ استهلاليةٌ: خصائصُ الموائعِ ..... 57

**الدرسُ الأولُ**: الموائعُ الساكنةُ ..... 58

**الدرسُ الثاني**: الموائعُ المتحركةُ ..... 72

**الوحدةُ السادسةُ: الحركةُ الموجيةُ ..... 91**

تجربةٌ استهلاليةٌ: الموجاتُ تنقلُ الطاقةَ ولا تنقلُ المادةَ ..... 93

**الدرسُ الأولُ**: الموجاتُ وصفاتُها ..... 94

**الدرسُ الثاني**: خصائصُ الحركةِ الموجيةِ ..... 111

مسردُ المصطلحاتِ ..... 128

جدولُ الاقتراناتِ المثلثيةِ ..... 131

قائمةُ المراجعِ ..... 132

بسم الله الرحمن الرحيم

# المقدمةُ

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

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

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

يتألَّف الفصل الدراسي الثاني من الكتاب من ثلاث وحدات دراسية، هي: تطبيقات على قوانين نيوتن، والموائع، والحركة الموجية. وقد أُلحق به كتابٌ للأنشطة والتجارب العملية، يحتوي على جميع التجارب والأنشطة الواردة في كتاب الطالب؛ ليساعده على تنفيذها بسهولة، بإشراف المعلِّم/ المعلِّمة، ومشاركة زملائه/ زميلاته فيها، بما في ذلك رصد القراءات، وتحليلها، ثم مناقشتها، وصولًا إلى استنتاجات مبنية على أسس علمية سليمة. تضمَّنَ الكتابُ أيضًا أسئلة تحاكي أسئلة الاختبارات الدولية؛ بُغْيَةَ تعزيز فهم الطالب لموضوعات المادة، وتنمية التفكير الناقد لديه.

ونحن إذ نُقدِّم هذه الطبعة من الكتاب، فإنّا نأمل أنْ يُسهِم في تحقيق الأهداف والغايات النهائية لبناء شخصية المُتعلِّم، وتنمية اتجاهات حُبِّ التعلُّم ومهارات التعلُّم المستمر، فضلًا عن تحسين الكتاب؛ بإضافة الجديد إلى المحتوى، والأخذ بملاحظات المعلِّمين والمعلِّمات، وإثراء أنشطته المتنوعة.

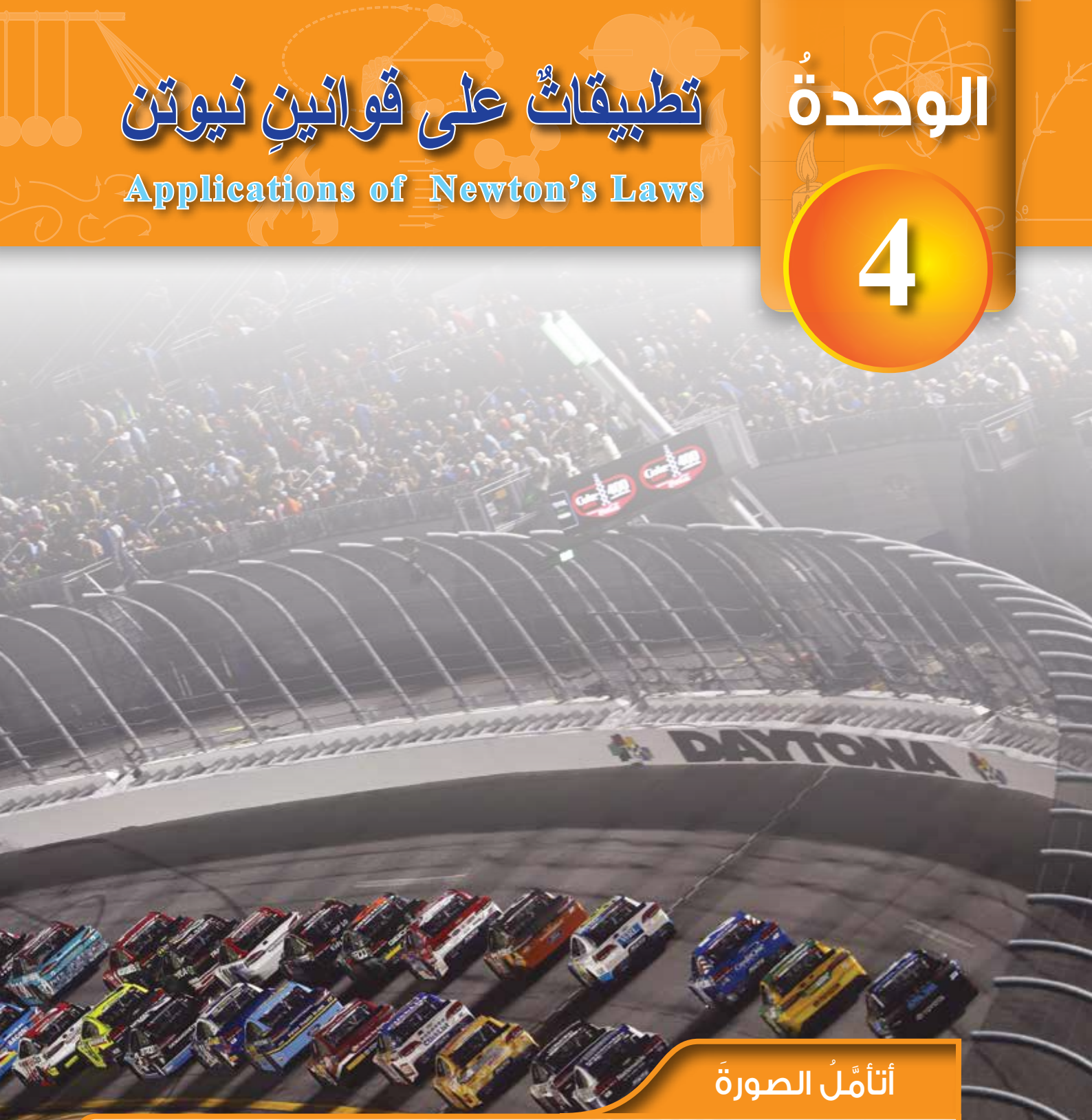
**والله ولي التوفيق**

المركز الوطني لتطوير المناهج

# الوحدةُ 4

# تطبيقاتٌ على قوانينِ نيوتن

# Applications of Newton's Laws




## أتأمَّلُ الصورةَ

**أهميةُ علمِ الفيزياءِ في تصميمِ الطرقِ**

عندَ تصميمِ طريقٍ فيهِ منعطفٌ خطرٌ، سواءٌ في الطرقِ العاديةِ أمْ في حلباتِ السباقِ، يُراعى أنْ يكونَ الطريقُ عندَ هذا المنعطفِ مائلًا في اتجاهِ مركزِ المسارِ الدائريِّ الذي يشكّلُهُ المنعطفُ.

لماذا يُصمَّمُ المنعطفُ بهذا الشكلِ؟ وهلْ لقوانينِ نيوتن دورٌ في هذا التصميمِ؟

## الفكرةُ العامةُ:

لقوانينِ نيوتن تطبيقاتٌ كثيرةٌ ومتنوعةٌ في حياتِنا وأنشطتِنا اليوميةِ.

**الدرسُ الأولُ: الوزنُ وقانونُ الجذبِ العامُّ (الكونيُّ)**

**الفكرةُ الرئيسةُ:** توجدُ قوةُ تجاذبٍ بينَ أيِّ كتلتينِ في الكونِ، يُمكنُ حسابُها باستخدامِ قانونِ الجذبِ العامِّ. فالأرضُ تؤثرُ بقوةِ جذبٍ في الأجسامِ يكونُ اتجاهُها نحوَ مركزِ الأرضِ، وتُعرَفُ هذه القوةُ بالوزنِ.

**الدرسُ الثاني: تطبيقاتٌ على القوى**

**الفكرةُ الرئيسةُ:** تؤثرُ قوةُ الشدِّ بوساطةِ الحبالِ والأسلاكِ، وتؤثرُ الأسطحُ بقوةٍ عموديةٍ في الأجسامِ الموضوعةِ عليْها وتؤثرُ قوةُ الاحتكاكِ في حركةِ الأجسامِ، ومنَ الصعبِ ممارسةُ حياتِنا اليوميةِ منْ دونِها.

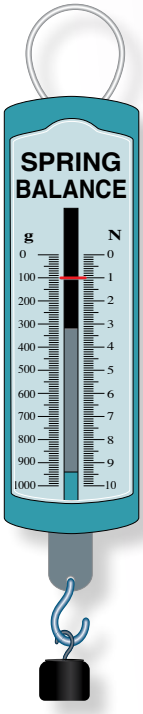
**الدرسُ الثالثُ: القوةُ المركزيةُ**

**الفكرةُ الرئيسةُ:** تؤثرُ قوةٌ مركزيةٌ في الأجسامِ التي تتحركُ حركةً دائريةً منتظمةً. وللحركةِ الدائريةِ تطبيقاتٌ كثيرةٌ في حياتِنا اليوميةِ.

# الكتلةُ والوزنُ

**الموادُّ والأدواتُ:** ميزانٌ نابضيٌّ مُدرَّجٌ لقياسِ الكتلةِ والوزنِ، ثلاثةُ أثقالٍ مختلفةٍ (100 g, 200 g, 300 g).

**إرشاداتُ السلامةِ:** ارتداءُ المعطفِ، واستخدامُ النظاراتِ الواقيةِ للعينينِ، والحذرُ منْ سقوطِ الأجسامِ والأدواتِ على القدمينِ.



**خطواتُ العملِ:**

1. **أُلاحظُ:** أُعلِّقُ الميزانَ النابضيَّ رأسيًّا في الهواءِ، ثمَّ أُعلِّقُ الثقلَ (100 g) في خطّافِ الميزانِ. أُلاحظُ قراءتيْ الكتلةِ والوزنِ على تدريجِ الميزانِ، وأدوِّنُهُما.
2. **أُلاحظُ:** أُكرِّرُ الخطوةَ السابقةَ بتعليقِ الثقلِ (200 g) في خطّافِ الميزانِ. أُلاحظُ قراءتيْ الكتلةِ والوزنِ على تدريجِ الميزانِ، وأدوِّنُهُما.
3. **أُلاحظُ:** أُكرِّرُ الخطوةَ (1) بتعليقِ الثقلِ (300 g) في خطّافِ الميزانِ. أُلاحظُ قراءتيْ الكتلةِ والوزنِ على تدريجِ الميزانِ، وأدوِّنُهُما.

## التحليلُ والاستنتاجُ:

1. **أُفسِّرُ:** ما الذي تُمثِّلُهُ كلُّ قراءةٍ منْ قراءتيْ الميزانِ؟ ما الفرقُ بينَهُما؟
2. **أُقارنُ** بينَ قراءتيْ الميزانِ في كلِّ خطوةٍ منَ الخطواتِ الثلاثِ السابقةِ، ماذا أستنتجُ؟
3. **أحلّلُ البياناتِ وأُفسِّرُها:** أُقسِّمُ قراءةَ الوزنِ على قراءةِ الكتلةِ لكلِّ خطوةٍ منَ الخطواتِ الثلاثِ السابقةِ. هلْ يوجدُ نمطٌ محدَّدٌ؟ هلْ توجدُ علاقةٌ تربطُ بينَهُما؟ ماذا أستنتجُ؟
4. **أحلّلُ البياناتِ وأفسِّرُها:** أشتقُّ علاقةً رياضيةً تربطُ بينَ الكتلةِ والوزنِ.

**الفكرةُ الرئيسةُ:**

توجدُ قوةُ تجاذبٍ بينَ أيِّ كتلتينِ في الكونِ، يُمكنُ حسابُها باستخدامِ قانونِ الجذبِ العامِّ. فالأرضُ تؤثرُ بقوةِ جذبٍ في الأجسامِ يكونُ اتجاهُها نحوَ مركزِ الأرضِ، وتُعرَفُ هذه القوةُ بالوزنِ.

**نتاجاتُ التعلُّمِ:**

- أوضِّحُ الفرقَ بينَ الكتلةِ والوزنِ.
- أذكرُ نصَّ قانونِ الجذبِ العامِّ لنيوتن.
- أستنتجُ العلاقةَ بينَ قانونِ الجذبِ العامِّ وقوةِ جذبِ الأرضِ للأجسامِ.
- أطبِّقُ بحلِّ مسائلَ على الوزنِ، وقانونِ الجذبِ العامِّ لنيوتن.

**المفاهيمُ والمصطلحاتُ:**

الكتلةُ Mass

الوزنُ Weight

قانونُ الجذبِ العامُّ لنيوتن
Newton's Law of Universal Gravitation

## الكتلةُ والوزنُ Mass and Weight

مفهوما الكتلةِ والوزنِ مختلفانِ، وليسا مترادفينِ كما نستخدمهُما في حياتِنا اليوميةِ. وفي ما يأتي توضيحٌ لكلٍّ منهُما.

### الكتلةُ Mass

**الكتلةُ Mass** هيَ مقدارُ المادةِ الموجودةِ في جسمٍ، وهيَ كميةٌ قياسيةٌ، رمزُها ($m$)، وتُقاسُ بوحدةِ (kg) بحَسَبِ النظامِ الدوليِّ للوحداتِ، وتُعدُّ الكتلةُ مقياسًا للقصورِ الذاتيِّ للجسمِ؛ أي مقياسًا لممانعتِهِ لأيِّ تغييرٍ في حالتِهِ الحركيةِ. وتبقى كتلةُ الجسمِ ثابتةً عندَ قياسِها في مواقعَ مختلفةٍ على سطحِ الأرضِ، أوْ على أيِّ كوكبٍ آخر.

### الوزنُ Weight

يُعرف **الوزنُ Weight** بأنَّهُ قوةُ جذبِ الأرضِ للجسمِ، رمزُهُ ($F_g$)، ويقاسُ بوحدةِ newton بحسَبِ النظامِ الدوليِّ للوحداتِ، وهوَ كميةٌ متجهةٌ، حيثُ يكونُ اتجاهُ وزنِ أيِّ جسمٍ على سطحِ الأرضِ دائمًا رأسيًّا نحوَ مركزِها.

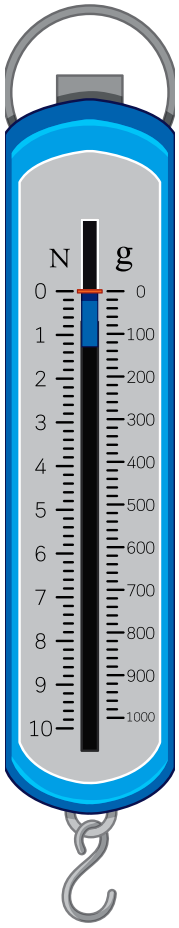
يعتمدُ وزنُ أيِّ جسمٍ عندَ موقعٍ معيَّنٍ على سطحِ الأرضِ على كتلتِهِ، وعلى بُعدِهِ عنْ مركزِ الأرضِ، بخلافِ الكتلةِ التي تبقى ثابتةً. وأيضًا يتغيرُ وزنُ الجسمِ منْ مكانٍ إلى آخرَ في الفضاءِ، ومنْ جِرمٍ إلى آخرَ؛ فمثلًا، وزنُ جسمٍ على سطحِ القمرِ يساوي سُدسَ وزنِهِ على سطحِ الأرضِ تقريبًا؛ نتيجةَ تغيرِ مقدارِ تسارعِ الجاذبيةِ.

وبعدَ تنفيذِ التجربةِ الاستهلاليةِ توصلتُ إلى علاقةٍ بينَ وزنِ جسمٍ ($F_g$) وكتلتِهِ ($m$) بالقربِ منْ سطحِ الأرضِ، حيثُ يُعطى وزنُ الجسمِ بالعلاقةِ:

$$F_g = mg$$

ويُمثِّلُ $g$ تسارعَ السقوطِ الحرِّ (تسارعَ الجاذبيةِ الأرضيةِ) في موقعِ وجودِ الجسمِ، ومقدارُهُ بالقربِ منْ سطحِ الأرضِ يساوي $9.80\ m/s^2$ تقريبًا، ويُقرَّبُ إلى $10\ m/s^2$؛ للتبسيطِ عندَ إجراءِ العملياتِ الحسابيةِ. ولسهولةِ التحويلِ بينَ الكتلةِ والوزنِ، تدرَّجُ بعضُ الموازينِ بحيثُ تقيسُ الكتلةَ والوزنَ. أنظرُ الشكلَ (1) الذي يبينُ ميزانًا نابضيًّا.

✓ **أتحقَّقُ:** ما الفرقُ بينَ الكتلةِ والوزنِ؟




الشكلُ (1): ميزانٌ نابضيٌّ مُدرَّجٌ لقياسِ الكتلةِ والوزنِ معًا.

## المثالُ ١

حبةُ تفاحٍ كتلتُها (150 g)، أحسبُ وزنَها على سطحِ:

أ . الأرضِ، حيثُ تسارعُ السقوطِ الحرِّ على سطحِها $g = 10\ m/s^2$ تقريبًا.

ب. القمرِ، حيثُ تسارعُ السقوطِ الحرِّ على سطحِهِ $g_M = 1.6\ m/s^2$ تقريبًا.

**المعطياتُ:** $m = 150\ g = 0.15\ kg$ ,$g = 10\ m/s^2$ , $g_M = 1.6\ m/s^2$

**المطلوبُ:** $F_g = ?$ , $F_{gM} = ?$

**الحلُّ:**

أ . تجذبُ الأرضُ حبةَ التفاحِ في اتجاهِ مركزِها بقوةٍ تسمّى الوزنَ، يُحسبُ مقدارُهُ بالعلاقةِ:

$$F_g = mg$$
$$= 0.15 \times 10 = 1.5\ N$$

ب. يجذبُ القمرُ حبةَ التفاحِ في اتجاهِ مركزِهِ بقوةٍ تسمّى الوزنَ، يُحسبُ مقدارُهُ بالعلاقةِ:

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

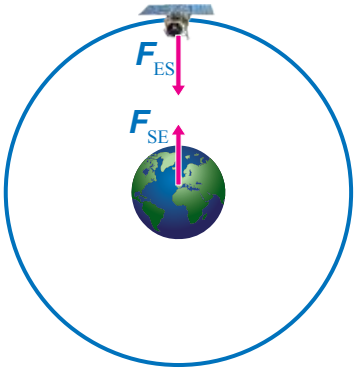
**أفكِّرُ:** هلْ توجدُ فروقاتٌ أُخرى بينَ الكتلةِ والوزنِ؟ أناقشُ أفرادَ مجموعتي، وأستخدمُ مصادرَ المعرفةِ المتاحةَ للتوصلِ إلى فروقاتٍ أخرى بينَهُما.

### تمرينٌ

في المثالِ السابقِ، أحسبُ وزنَ التفاحةِ على سطحِ كلٍّ منَ:

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

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




الشكلُ (2): تجذبُ الأرضُ (E) القمرَ الصناعيَّ (S) بقوةٍ ($F_{ES}$) في اتجاهِ مركزِها، ويجذبُ القمرُ الصناعيُّ الأرضَ في اتجاهٍ مركزُهُ بقوةٍ مساويةٍ لقوةِ جذبِ الأرضِ لهُ في المقدارِ، ومعاكسةٍ لَها في الاتجاهِ ($F_{SE}$).

## قانونُ الجذبِ العامُّ لنيوتن

## Newton's Law of Universal Gravitation

تجذبُ الأرضُ الأجسامَ في اتجاهِ مركزِها، سواءً أكانتْ على سطحِها أوْ على بُعدٍ منْها، حيثُ تُعدُّ قوةُ الجاذبيةِ الأرضيةِ قوةَ مجالٍ تؤثرُ في الأجسامِ عنْ بُعدٍ. ويُعرَّفُ مجالُ الجاذبيةِ الأرضيةِ بأنَّهُ المنطقةُ المحيطةُ بالأرضِ، التي تظهرُ فيها آثارُ قوةِ جذبِ الأرضِ للأجسامِ، وتكونُ في اتجاهِ مركزِ الأرضِ دائمًا.

وبحسبِ القانونِ الثالثِ لنيوتن فإنَّ الأجسامَ الأخرى تجذبُ الأرضَ أيضًا في اتجاهِ مراكزِها بقوًى مساويةٍ لقوى جذبِ الأرضِ لها، ولكنْ في اتجاهٍ معاكسٍ، أنظرُ الشكلَ (2).

تَوصَّلَ نيوتن إلى أنَّ قوةَ التجاذبِ بينَ أيِّ جسميْنِ تتناسبُ:

أ . طرديًّا معَ حاصلِ ضربِ كتلتيِ الجسمينِ عندَ ثباتِ المسافةِ بينَ مركزيْهِما:

$$F \propto m_1 m_2$$

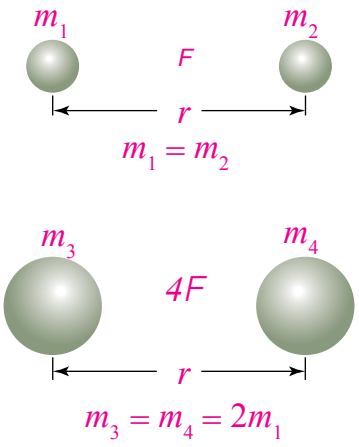
فمثلًا، عندَ مضاعفةِ كتلتيْ جسميْنِ مرتينِ تتضاعفُ قوةُ التجاذبِ بينهُما بمقدارِ أربعةِ أضعافِ قيمتِها الابتدائيةِ، أنظرُ الشكلَ (3).

ب. عكسيًّا معَ مربعِ المسافةِ بينَ مركزيْ الجسميْنِ عندَ ثباتِ كتلتيْهِما ، أيْ أنَّ:

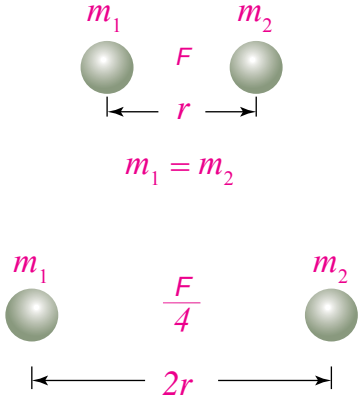
$$F \propto \frac{1}{r^2}$$

فمثلًا، عندَ مضاعفةِ المسافةِ بينَ مركزيْ جسميْنِ مرتينِ، تصبحُ قوةُ التجاذبِ بينهُما ربعَ قيمتِها الابتدائيةِ، أنظرُ الشكلَ (4).

وتوصَّلَ نيوتن إلى أنَّ قوةَ التجاذبِ هذهِ لا يقتصرُ وجودُها على الأرضِ، بلْ توجدُ بينَ جميعِ الأجسامِ في الكونِ. وقدْ صاغَ




الشكلُ (3): تتناسبُ قوةُ التجاذبِ طرديًّا معَ حاصلِ ضربِ كتلتيِ الجسميْنِ.




الشكلُ (4): تتناسبُ قوةُ التجاذبِ عكسيًّا معَ مربعِ المسافةِ بينَ مركزيْ الجسميْنِ.

نيوتن ما سبقَ في قانونٍ سُمّيَ **قانونَ الجذبِ العامَّ (الكونيَّ) لنيوتن Newton's Law of Universal Gravitation**، وينصُّ على أنَّ: «كلَّ جسميْنِ في الكونِ يتجاذبانِ بقوةٍ يتناسبُ مقدارُها طرديًّا معَ حاصلِ ضربِ كتلتيْهِما، وعكسيًّا معَ مربعِ المسافةِ بينَ مركزيْهِما».

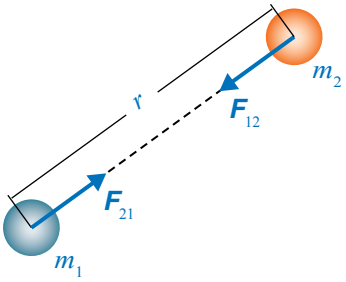
وتؤثرُ هذهِ القوةُ في اتجاهِ الخطِّ الواصلِ بينَ مركزَي الجسميْنِ المتجاذبيْنِ، أنظرُ الشكلَ (5). ويُعبَّرُ عنْ قانونِ الجذبِ العامِّ رياضيًّا كما يأتي:

$$F = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$$

حيثُ: $m_1$، و $m_2$ كتلتا الجسميْنِ المتجاذبيْنِ، و $r$ المسافةُ بينَ مركزيْهِما، أما G فهوَ ثابتُ التناسبِ، ويُسمّى ثابتَ الجذبِ العامِّ (الكونيِّ)، وبحسبِ النظامِ الدوليِّ للوحداتِ، فإنَّ مقدارَ الثابتِ G يساوي:

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

على الرغمِ منْ أنَّ قوةَ التجاذبِ الكتليِّ منْ أضعفِ أنواعِ القوى الأساسيةِ، إلا أنَّها ذاتُ أهميةٍ كبيرةٍ؛ فبوجودِها نستطيعُ أداءَ كثيرٍ منْ نشاطاتِنا اليوميةِ، ومنْ دونِها نفقدُ التلامسَ معَ سطحِ الأرضِ، ونطفو في الفضاءِ. وقوةُ التجاذبِ الكتليِّ مسؤولةٌ أيضًا عن حركةِ القمرِ حولَ الأرضِ، وعنْ حركةِ كواكبِ مجموعتِنا الشمسيةِ وأجرامِها حولَ الشمسِ. ومن خلالِها نستطيعُ تفسيرَ قوةِ التجاذبِ بينَ أيِّ جسميْنِ في الكونِ، وتفسيرَ حركةِ الأقمارِ حولَ الكواكبِ، كما يمكنُ بوساطتِها تفسيرُ ظاهرتيْ المدِّ والجزرِ.




الشكلُ (5): تؤثرُ قوةُ التجاذبِ الكتليِّ في اتجاهِ الخطِّ الواصلِ بينَ مركزَي الجسمينِ المتجاذبينِ.

ماذا يحدثُ لمقدارِ كلٍّ منَ القوتينِ $F_{12}$ و $F_{21}$ عندَ مضاعفةِ مقدارِ $m_2$ فقطْ؟

✓ **أتحقَّقُ:** علامَ ينصُّ قانونُ الجذبِ العامُّ لنيوتن؟

**أبحثُ: القوى الأربعُ الأساسيةُ:**

تُصنَّفُ القوى في الطبيعةِ إلى أربعةِ أنواعٍ أساسيةٍ، هيَ:

- قوةُ التجاذبِ الكتليِّ (Gravitational Force).
- القوةُ الكهرمغناطيسيةُ (Electromagnetic Force).
- القوةُ النوويةُ القويةُ (Strong Nuclear Force).
- القوةُ النوويةُ الضعيفةُ (Weak Nuclear Force).

أبحثُ في مصادرِ المعرفةِ الموثوقةِ والمتاحةِ ومنها شبكةُ الإنترنتِ عنْ هذهِ القوى منْ حيثُ: مدى كلٍّ منْها، وترتيبُها منَ الأقوى إلى الأضعفِ، وأعدُّ عرضًا تقديميًّا أعرضهُ أمامَ طلبةِ الصفِّ.

## المثالُ 2

إذا كانتْ كتلةُ مريمَ (50 kg)، وكتلةُ عائشةَ (60 kg)، والبعدُ بينهُما (50 cm)، فأحسبُ مقدارَ:

أ . القوةِ التي تؤثرُ بها مريمُ في عائشةَ ($F_{MA}$)، وأُحدِّدُ اتجاهَها.

ب . القوةِ التي تؤثرُ بها عائشةُ في مريمَ ($F_{AM}$)، وأُحدِّدُ اتجاهَها.

**المعطياتُ:** نرمز إلى مريمَ بالرمزِ (M)، وإلى عائشةَ بالرمزِ (A).

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

**المطلوبُ:** $F_{MA} = ?$ ، $F_{AM} = ?$

**الحلُّ:**

أ . نستخدمُ قانونَ الجذبِ العامَّ لنيوتن لحسابِ مقدارِ قوةِ التجاذبِ الكتليِّ التي تؤثرُ بها مريمُ في عائشةَ.

$$F_{MA} = \frac{G m_M m_A}{r^2}$$

$$= \frac{6.67 \times 10^{-11} \times 50 \times 60}{0.50} = \frac{2.001 \times 10^{-7}}{0.50}$$

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

وتكونُ هذهِ القوةُ في اتجاهِ مريمَ؛ حيثُ إنَّها قوةُ تجاذبٍ دائمًا.

ب . بحسبِ القانونِ الثالثِ لنيوتن، تكونُ قوةُ التجاذبِ الكتليِّ التي تؤثرُ بها عائشةُ في مريمَ مساويةً في المقدارِ للقوةِ التي تؤثرُ بها مريمُ في عائشةَ، ومعاكسةً لها في الاتجاهِ، أيْ أنَّ:

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

وتكونُ هذهِ القوةُ في اتجاهِ عائشةَ. وبمقارنةِ هذهِ القوةِ بقوةِ جذبِ الأرضِ لكلٍّ منهُما؛ يتضحُ لنا مدى صغرِ هذهِ القوةِ، وسببُ عدمِ شعورِنا بِها.

### تمرينٌ

**أستنتجُ:** في المثالِ السابقِ أجدُ النسبةَ بينَ قوةِ جذبِ الأرضِ لكلٍّ منْ مريمَ وعائشةَ، وقوةِ جذبهما لبعضهما. ماذا أستنتجُ؟

## تسارعُ الجاذبيةِ الأرضيةِ Gravitational Acceleration

يمكنُ حسابُ مقدارِ تسارعِ الجاذبيةِ الأرضيةِ (تسارعُ السقوطِ الحرِّ) باستخدامِ قانونِ الجذبِ العامِّ، والقانونِ الثاني لنيوتن كما يأتي:

عندَما يسقطُ جسمٌ كتلتُهُ ($m$) سقوطًا حرًّا بالقربِ منْ سطحِ الأرضِ فإنَّ تسارعَهُ يساوي تسارعَ السقوطِ الحرِّ ($g$)، ويتأثرُ بقوةٍ محصلةٍ في أثناءِ سقوطِهِ تساوي وزنَهُ ($F_g$)، تُحسبُ منَ القانونِ الثاني لنيوتن كما يأتي:

$$\sum F = ma = mg$$
$$= F_g$$

ويكونُ وزنُ الجسمِ على سطحِ الأرضِ (أوْ بالقربِ منهُ) مساويًا لقوةِ التجاذبِ الكتليِّ بينَ كتلةِ الجسمِ وكتلةِ الأرضِ؛ لذا:

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

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

وبقسمةِ طرفيْ المعادلةِ على كتلةِ الجسمِ نحصلُ على المعادلةِ الآتيةِ لحسابِ تسارعِ السقوطِ الحرِّ على سطحِ الأرضِ أوْ قريبًا منهُ:

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

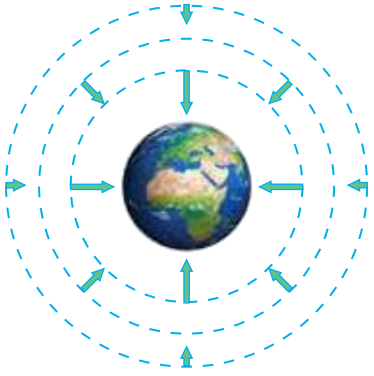
وبتعويضِ قيمِ كلٍّ منْ: ثابتِ الجذبِ العامِّ، وكتلةِ الأرضِ ($5.98 \times 10^{24}$ kg) تقريبًا، ومتوسطِ نصفِ قطرِها ($6.38 \times 10^{6}$ m) تقريبًا، نحصلُ على قيمةِ تسارعِ السقوطِ الحرِّ بالقربِ منْ سطحِ الأرضِ:

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

ويكونُ اتجاهُ تسارعِ السقوطِ الحرِّ في اتجاهِ مركزِ الأرضِ دائمًا.

ويتضحُ منْ معادلةِ حسابِ تسارعِ السقوطِ الحرِّ أنَّهُ: بزيادةِ البُعدِ عنْ مركزِ الأرضِ يقلُّ مقدارُ تسارعِ السقوطِ الحرِّ، لذا؛ يتناقصُ وزنُ أيِّ جسمٍ في أثناءِ ابتعادِهِ عنْ سطحِ الأرضِ. أنظرُ الشكلَ (6) الذي يوضحُ كيفَ يتغيرُ تسارعُ السقوطِ الحرِّ بتغيرِ البعدِ عنْ سطحِ الأرضِ.

أصممُ باستخدامِ برنامجِ السكراتشِ (Scratch) عرضًا يوضحُ قانونَ الجذبِ العامَّ لنيوتن، ثمَّ أشاركهُ زملائي/ زميلاتي في الصفِّ.



الشكلُ (6): تمثّلُ الأسهمُ تسارعَ السقوطِ الحرِّ مقدارًا واتجاهًا؛ حيثُ يقلُّ مقدارُهُ بالابتعادِ عنْ سطحِ الأرضِ، ويكونُ مقدارُهُ متساويًا عندَ جميعِ النقاطِ التي لَها البعدُ نفسُهُ عنْ مركزِ الأرضِ.

**أُفكِّرُ:** عندَ مشاهدةِ روّادِ الفضاءِ في مركباتهِم أو خارجَها؛ ألاحظُ أنَّهُمْ يطفونَ داخلَها أوْ في الفضاءِ، حيثُ يكونونَ في حالةٍ تُسمّى انعدامَ الوزنِ. فهل يعني انعدامُ الوزنِ انعدامَ قوةِ الجاذبيةِ الأرضيةِ المؤثرةِ فيهِمْ في موقعِ المركبةِ الفضائيةِ؟

ويُحسبُ تسارعُ السقوطِ الحرِّ للأرضِ عندَ أيِّ موقعٍ في الكونِ يبعدُ عنْ مركزِها مسافةَ $r$ بالمعادلةِ الآتيةِ:

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

ويُمكنُ استخدامُ هذهِ المعادلةِ لحسابِ تسارعِ السقوطِ الحرِّ على سطحِ أيِّ كوكبٍ؛ إذا عُلِمَ نصفُ قطرهِ وكتلتُهُ.

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

## المثالُ 3

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

أ . تسارعِ السقوطِ الحرِّ على سطحِ القمرِ.

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

**المعطياتُ:** نرمزُ 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 . أستخدمُ معادلةَ حسابِ تسارعِ السقوطِ الحرِّ الآتيةَ:

$$g_M = \frac{Gm_M}{r_M^{\,2}}$$

$$= \frac{6.67 \times 10^{-11} \times 7.35 \times 10^{22}}{(1.738 \times 10^{6})^2} = 1.62\ \text{m/s}^2$$

ب . أستخدمُ معادلةَ حسابِ تسارعِ السقوطِ الحرِّ الآتيةَ:

$$g_A = \frac{Gm_A}{r_A^{\,2}}$$

$$= \frac{6.67 \times 10^{-11} \times 7.35 \times 10^{22}}{(2 \times 1.738 \times 10^{6})^2} = 0.41\ \text{m/s}^2$$

أُلاحظُ تأثيرَ مضاعفةِ نصفِ القُطرِ في نقصانِ مقدارِ التسارعِ بمقدارٍ كبيرٍ؛ لأنَّ التسارعَ يتناسبُ عكسيًّا معَ مربعِ نصفِ القطرِ.

## تمرينٌ

كتلةُ جُمانَ 70 kg، إذا علمتُ أنَّ $g = 10\ \text{m/s}^2$ و $g_{\text{Moon}} = 1.6\ \text{m/s}^2$، تقريبًا، فأحسبُ مقدارَ:

أ . وزنِها على سطحِ الأرضِ.

ب . كتلتِها على سطحِ القمرِ.

جـ . وزنِها على سطحِ القمرِ.

**الربطُ بالفلكِ**

تدورُ الأقمارُ الصناعيةُ على ارتفاعاتٍ مختلفةٍ فوقَ سطحِ الأرضِ؛ حيثُ تتناسبُ هذهِ الارتفاعاتُ معَ وظيفةِ كلٍّ منْها. ولكيْ يوضعَ هذا القمرُ في مدارِهِ المناسبِ حولَ الأرضِ يجبُ معرفةُ مقدارِ تسارعِ الجاذبيةِ الأرضيةِ عندَ هذا الارتفاعِ، وتحديدُ السرعةِ المماسيةِ المناسبةِ لهُ في هذا المدارِ.

# مراجعةُ الدرسِ

1. **الفكرةُ الرئيسةُ:** ما المقصودُ بالوزنِ؟ وعلامَ تعتمدُ قوةُ التجاذبِ الكتليِّ بينَ أيِّ جسميْنِ؟ وعلامَ يعتمدُ تسارعُ الجاذبيةِ الأرضيةِ؟

2. **أُحلّلُ:** كيفَ تتغيرُ قوةُ التجاذبِ الكتليِّ بينَ جسميْنِ: $m_1$ وَ $m_2$، المسافةُ بينَ مركزيْهِما $r$، عندَ مضاعفةِ كلٍّ ممّا يأتي مرّتينِ:

أ. المسافةِ بينَ مركزيْهِما ب. كتلةِ الجسمِ الأولِ جـ. كتلتيْ الجسميْنِ معًا

3. **أتوقعُ:** لو أصبحتْ كتلةُ الأرضِ ضعفَيْ ما هيَ عليْهِ، منْ دونِ تغيُّرِ نصفِ قطرِها، فماذا يحدثُ لمقدارِ تسارعِ السقوطِ الحرِّ ($g$) قربَ سطحِها؟

4. **أستخدمُ المتغيراتِ:** على أيِّ ارتفاعٍ منْ سطحِ الأرضِ يكونُ مقدارُ تسارعِ الجاذبيةِ الأرضيةِ مساويًا لنصفِ مقدارِهِ على سطحِ الأرضِ؟

5. **أُصدرُ حُكمًا:** في أثناءِ دراستي وزميلتي هندَ لهذا الدرسِ، قالتْ: "إنَّ مفهومَيْ الكتلةِ والوزنِ مترادفانِ، وهُما يُعبِّرانِ عنِ الكميةِ الفيزيائيةِ نفسِها". أناقشُ صحةَ قولِ هندَ.

6. **التفكيرُ الناقدُ:** إنَّ تسارعَ الجاذبيةِ على سطحِ القمرِ يساوي $\frac{1}{6}$ تسارعِ الجاذبيةِ على سطحِ الأرضِ تقريبًا. هل يمكنُني استنتاجُ أنَّ كتلةَ القمرِ تساوي $\frac{1}{6}$ كتلةِ الأرضِ؟ أوضِّحُ إجابتي.

**الفكرةُ الرئيسةُ:**

تؤثرُ قوةُ الشدِّ بوساطةِ الحبالِ والأسلاكِ، وتؤثرُ الأسطحُ بقوةٍ عموديةٍ في الأجسامِ الموضوعةِ عليْها، وتؤثرُ قوةُ الاحتكاكِ في حركةِ الأجسامِ، ومنَ الصعبِ ممارسةُ حياتِنا اليوميةِ منْ دونِها.

**نتاجاتُ التعلُّمِ:**

- أُوضِّحُ مفهومَ كلٍّ منَ: قوةِ الشدِّ، والقوةِ العموديةِ، وقوةِ الاحتكاكِ.
- أحسبُ مقدارَ القوةِ العموديةِ في أوضاعٍ مختلفةٍ.
- أستقصي العواملَ التي تعتمدُ عليْها قوةُ الاحتكاكِ بينَ جسميْنِ.
- أُفسِّرُ سببَ نقصانِ قوةِ الاحتكاكِ عندَ بدءِ حركةِ جسمٍ.
- أُطوِّرُ وسائلَ تقللُ منَ الآثارِ السلبيةِ لقوةِ الاحتكاكِ.
- أطبِّقُ بحلِّ مسائلَ على قوى: الشدِّ، والعموديةِ، والاحتكاكِ.

**المفاهيمُ والمصطلحاتُ:**

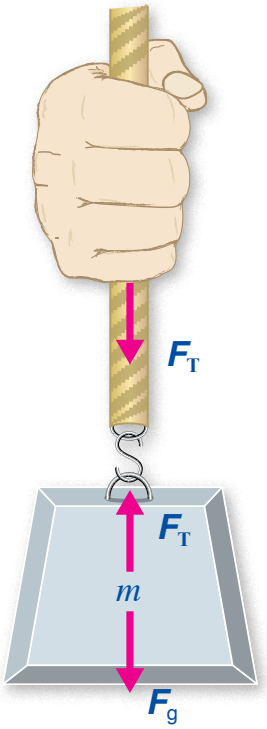
| | |
|---|---|
| قوةُ الشدِّ | Tension Force |
| القوةُ العموديةُ | Normal Force |
| قوةُ الاحتكاكِ | Friction Force |
| معاملُ الاحتكاكِ السكونيِّ | Coefficient of Static Friction |
| معاملُ الاحتكاكِ الحركيِّ | Coefficient of Kinetic Friction |

## قوةُ الشدِّ Tension Force

**قوةُ الشدِّ Tension Force** هيَ قوةُ سحبٍ تؤثرُ في جسمٍ عنْ طريقِ سلكٍ أو خيطٍ أو حبلٍ، رمزُها $F_T$، وتؤثرُ في اتجاهِ طولِ الخيطِ أوِ الحبلِ أوِ السلكِ. وللتبسيطِ عندَ التعاملِ معَ المسائلِ التي تتضمنُ خيوطًا وحبالًا وأسلاكًا فإننا سنهملُ كتلَها، ونعدُّها غيرَ قابلةٍ للاستطالةِ.

أنظرُ الشكلَ (7)، الذي يوضحُ يدَ شخصٍ يُمسكُ حبلًا معلّقًا في نهايتِهِ ثقلٌ. إذا كانَ الثقلُ ساكنًا أوْ متحركًا بسرعةٍ متجهةٍ ثابتةٍ، فإنَّ القوةَ المحصلةَ المؤثرةَ فيهِ تساوي صفرًا، لذا يكونُ تسارعُهُ صفرًا أيضًا.

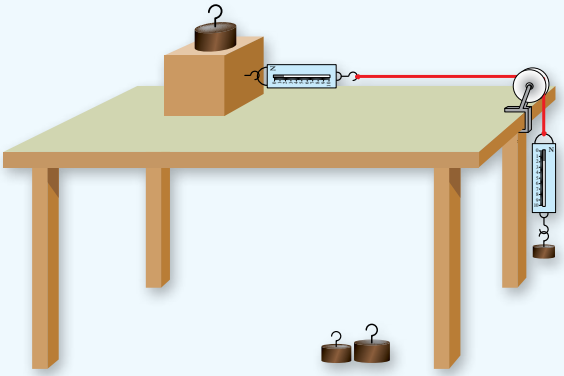
تؤثرُ يدُ الشخصِ بقوةٍ إلى أعلى في جزءِ الحبلِ الذي يُمسكهُ، في حينِ يؤثرُ هذا الجزءُ منَ الحبلِ في يدِهِ بقوةِ شدٍّ إلى أسفلَ، وهما زوجا تأثيرٍ متبادلٍ. كما يؤثرُ جزءُ الحبلِ المتصلُ بالثقلِ بقوةِ شدٍّ إلى أعلى في الثقلِ، في حينِ يؤثرُ الثقلُ في هذا الجزءِ منَ الحبلِ بقوةِ شدٍّ إلى أسفلَ، وهما أيضًا زوجا تأثيرٍ متبادلٍ. ولاستقصاءِ قوةِ الشدِّ أُنفِّذُ التجربةَ الآتيةَ.




الشكلُ (7): تنتقلُ قوةُ الشدِّ منْ يدِ الشخصِ إلى الثقلِ عنْ طريقِ الحبلِ، وتكونُ قوى الشدِّ متساويةً في جميعِ أجزاءِ الحبلِ عندَ إهمالِ كتلتِهِ.

# التجربةُ 1

## قوةُ الشدِّ



**المـوادُّ والأدواتُ:** خيـطٌ خفيـفٌ طولُـهُ (1 m)، ميزانـانِ نابضيـانِ (مقياسـا قـوةٍ)، مكعـبٌ خشـبيٌّ مُـزوَّدٌ بخطّافٍ، مجموعـةُ أثقـالٍ (100 g, 200 g, 300 g, 1 kg)، بَكَـرةٌ ملسـاءُ، سـطحُ طاولـةٍ أُفقـيٌّ، ورقُ تنظيـفٍ (منشـفةٌ) لتنظيـفِ سـطحِ الطاولـةِ وأسـطحِ المكعـبِ الخشـبيِّ.

**إرشاداتُ السلامةِ:** ارتداءُ المعطفِ، واستخدامُ النظاراتِ الواقيةِ للعينينِ، والحذرُ منْ سقوطِ الأجسامِ والأدواتِ على القدمينِ.

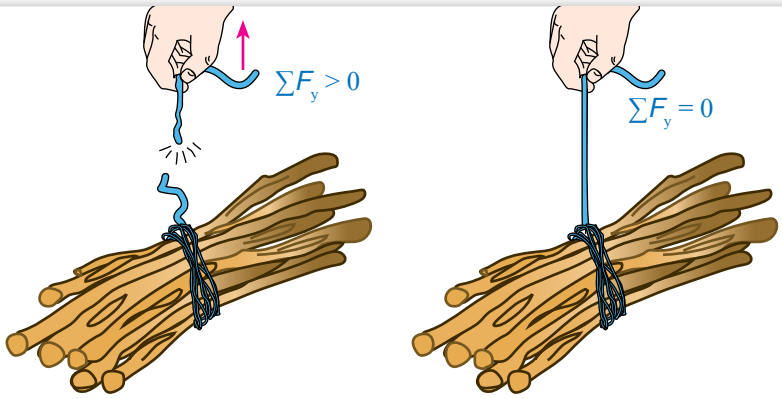
**خُطواتُ العملِ:**

1. بالتعـاونِ مـع أفـرادِ مجموعتـي، أُنظِّـفُ أسـطحَ المكعـبِ الخشـبيِّ وسـطحَ الطاولـةِ، وأتأكَّـدُ أنَّـهُ أُفقـيٌّ، ثمَّ أُثبِّـتُ الميـزانَ الأولَ بخطّـافِ المكعـبِ الخشـبيِّ، ثمَّ أربـطُ الخيطَ بخطّافِـهِ، ثمَّ أربطُ الطـرفَ الثانيَ للخيطِ بالميـزانِ الثانـي مـرورًا بالبكَـرةِ. وأحـرصُ علـى أنْ يكونَ الخيطُ الممتدُّ بينَ البكَرةِ والمكعـبِ أُفقيًّا تمامًا. وأضـعُ الثقلَ (1 kg) فـوقَ المكعبِ؛ لمنـعِ انزلاقِهِ.
2. **ألاحـظُ:** أُعلِّـقُ الثقلَ (100 g) فـي خطّـافِ الميـزانِ الثانـي، وأحرصُ على أنْ يبقـى الثقلُ سـاكنًا ولا يهتزَّ. أُدوِّنُ قراءتَـيْ الميزانينِ.
3. أُكرِّرُ الخطوةَ السابقةَ بتعليقِ الثقلينِ (200 g, 300 g): كلٍّ على حدةٍ، وأدوّنُ نتائجي.

**التحليلُ والاستنتاجُ:**

1. **أقارنُ** بينَ مقداريْ قوتيْ الشدِّ المؤثرتينِ في طرفيْ الخيطِ في الخطوتينِ (2) و (3). ماذا ألاحظُ؟
2. **أستنتجُ:** ما العلاقةُ بينَ قوتيْ الشدِّ المؤثرتينِ في طرفيْ الخيطِ؟ أُفسِّر إجابتي.
3. **أُقارنُ** نتائـجَ مجموعتـي بنتائـجِ المجموعـاتِ الأخـرى، مـاذا أُلاحـظُ؟ هلْ توصلـتُ إلـى تعميـمٍ بخصـوصِ قـوى الشـدِّ فـي الحبـالِ والخيـوطِ؟ أكتـبُ تعميمي.

تكونُ قوتا الشدِّ المؤثرتانِ في طرفي حبلٍ أوْ سلكٍ متساويتينِ في المقدارِ، ومتعاكستينِ في الاتجاهِ. كما تكون قوى الشدِّ متساويةً في جميعِ أجزاءِ الحبلِ أوِ الخيطِ أوِ السلكِ (عندَ إهمالِ كتلتِهِ)، وهيَ مساويةٌ لوزنِ الثقلِ المُعلّقِ بِهِ في حالِ كانَتِ القوةُ المحصلةُ المؤثرةُ فيهِ صفرًا؛ أيْ في حالةِ الاتزانِ السكونيِّ أوِ الاتزانِ الديناميكيِّ.




الشكلُ (8): (أ) قوةُ الشدِّ في الخيطِ مساويةٌ لوزنِ حزمةِ الحطبِ عندَما تكونُ القوةُ المحصلةُ المؤثرةُ فيها صفرًا. (ب) وعندَ رفعِ الخيطِ إلى أعلى بشكلٍ مفاجئٍ وبسرعةٍ كبيرةٍ قدْ ينقطعُ الخيطُ.

أنظرُ الشكلَ (8/ أ) الذي يوضحُ حزمةَ حطبٍ مربوطةً بخيطٍ؛ حيثُ تكونُ قوةُ الشدِّ في الخيطِ مساويةً لوزنِ الحزمةِ عندَما تكونُ ساكنةً أوْ متحركةً بسرعةٍ متجهةٍ ثابتةٍ. أما عندَ تحريكِ الحزمةِ بتسارعٍ كبيرٍ فإنَّ الخيطَ قدْ ينقطعُ؛ لأنَّ لكلِّ خيطٍ أوْ سلكٍ قوةَ شدٍّ عظمى يتحمَّلُها قبلَ أنْ ينقطعَ، أنظرُ الشكلَ (8/ ب).

**أفكِّرُ:** في الشكلِ (8/ب)، عندَ رفعِ حزمةِ الحطبِ بشكلٍ مفاجئٍ وبسرعةٍ كبيرةٍ قد ينقطعُ الخيطُ. **أُفسِّرُ** ذلكَ.

**سؤالٌ:** كيفَ يمكنُ رفعُ حزمةِ الحطبِ منْ دونِ أنْ ينقطعَ الخيطُ؟

✓ **أتحقَّقُ:** ما المقصودُ بقوةِ الشدِّ؟ وَما العلاقةُ بينَ قوتي الشدِّ عندَ طرفيْ الخيطِ؟

الشكلُ (9): تُستخدَمُ الحبالُ والأسلاكُ لنقلِ القوى عبرَ مساراتٍ منحنيةٍ في أنظمةِ الكوابحِ في الدراجاتِ الهوائيةِ.

**الفيزياءُ والحياةُ**

تُستخدمُ الحبالُ والأسلاكُ لنقلِ القوةِ عبرَ مساراتٍ منحنيةٍ، مثلِ: أنظمةِ المكابحِ في الدراجاتِ الهوائيةِ. أنظرُ الشكلَ (9). وفي هذهِ الحالاتِ يتمُّ تغييرُ اتجاهِ القوةِ فقطْ، أما مقدارُها فيُنقَلُ عنْ طريقِ الحبلِ أوِ السلكِ من دونِ تغييرٍ، عندَ انعدامِ قوى الاحتكاكِ وإهمالِ كتلةِ الحبلِ أوِ السلكِ في هذهِ الأنظمةِ.

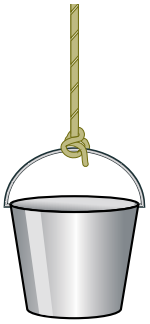
## المثالُ 4

دلوُ ماءٍ كتلته وكتلةُ الماءِ الذي يحويهِ (10 kg)، مُعلّقٌ بحبلٍ في الهواءِ، كما هوَ موضحٌ في الشكلِ (10). إذا كانَ مقدارُ أكبرِ قوةِ شدٍّ ($F_{T,max}$) يتحملُها الحبلُ قبلَ أنْ ينقطعَ (150 N)، و $g = 10\ m/s^2$، والدلوُ في حالةِ سكونٍ، فأحسبُ مقدارَ ما يأتي:

أ . قوةُ الشدِّ المؤثرةُ في الحبلِ.

ب. قوةُ الشدِّ في الحبلِ إذا تحركَ الدلوُ إلى أعلى بتسارعٍ مقدارُهُ $2\ m/s^2$.

جـ. أكبرُ تسارعٍ يُمكنُ أنْ يتحركَ بهِ الدلوُ قبلَ أنْ ينقطعَ الحبلُ ($a_{max}$).



الشكل (10): دلوُ ماءٍ مُعلّقٌ بحبلٍ.

**المعطياتُ:** $m = 10\ kg, v_i = 0\ m/s, F_{Tmax} = 150\ N, g = 10\ m/s^2, a = 2\ m/s^2$

**المطلوبُ:** $F_T = ?, a_{max} = ?$

**الحلُّ:**

أرسمُ مخططَ الجسمِ الحرِّ للدلوِ.

أ . أطبقُ القانونَ الثانيَ لنيوتن على الدلوِ في اتجاهِ المحورِ $y$؛ لحسابِ مقدارِ قوةِ الشدِّ.

$$F_T - F_g = ma = 0$$

$$F_T = F_g = mg = 10 \times 10 = 100\ N$$

ب . أطبقُ القانونَ الثانيَ لنيوتن على الدلوِ في اتجاهِ المحورِ $y$؛ لحسابِ مقدارِ قوةِ الشدِّ.

$$F_T - F_g = ma$$

$$F_T = F_g + ma$$

$$= 100 + 10 \times 2 = 120\ N$$

جـ . أطبقُ القانونَ الثانيَ لنيوتن على الدلوِ في اتجاهِ المحورِ $y$؛ لإيجادِ مقدارِ أكبرِ تسارعٍ يُمكنُ أنْ يتحركَ بهِ الدلوُ.

$$F_{Tmax} - F_g = ma_{max}$$

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

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

## تمرينٌ

يستخدمُ عبدُ اللّهِ دلوَ ماءٍ مربوطًا بحبلٍ لرفعِ الماءِ منْ بئرٍ. إذا كانتْ كتلةُ الدلوِ وهوَ مملوءٌ بالماءِ (15 kg)، ومقدارُ أكبرِ قوةِ شدٍّ يتحمّلُها الحبلُ قبلَ أنْ ينقطعَ (180 N)، والحبلُ مهملُ الكتلةِ، وغيرُ قابلٍ للاستطالةِ، فأحسبُ مقدارَ:

أ . قوةِ الشدِّ في الحبلِ إذا سحبَ عبدُ اللّهِ الدلوَ إلى أعلى بتسارعٍ مقدارُهُ $1.5\ m/s^2$ .

ب. أكبرِ تسارعٍ يُمكنُ أنْ يُسحبَ بهِ الدلوُ قبلَ أنْ ينقطعَ الحبلُ.

## القوةُ العموديةُ Normal Force

تُسمّى قوةُ التلامسِ التي يؤثرُ بها جسمٌ في جسمٍ آخرَ ملامسٍ لهُ: **القوةَ العموديةَ Normal Force**، رمزُها $F_N$، وتكونُ دائمًا عموديةً على مستوى التلامسِ بينَ الجسميْنِ. ويوضح الشكلُ (11) كيفيةَ تغيرِ القوةِ العموديةِ. في الشكلِ (11/ أ)، يتزنُ الكتابُ على سطحٍ أفقيٍّ، تحتَ تأثيرِ قوتيْنِ متعاكستيْنِ، هُما: وزنُهُ، والقوةُ العموديةُ، كما هوَ موضحٌ في مخططِ الجسمِ الحرِّ أسفلَ الشكلِ. وبتطبيقِ القانونِ الثاني لنيوتن على الكتابِ في اتجاهِ المحورِ $y$، يمكنُ التوصلُ إلى أنَّهُما متساويتانِ؛ حيثُ لا توجدُ حركةٌ في اتجاهِ هذا المحورِ:

$$\sum F_y = 0$$

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

أما في الشكلِ (11/ ب) فإنَّ القوةَ العموديةَ المؤثرةَ في الكتابِ أكبرُ منْ وزنِهِ؛ حيثُ يتأثرُ الكتابُ بقوتيْنِ إلى أسفلَ، هُما: وزنُهُ، وقوةُ دفعِ يدِ الشخصِ، بينَما يدفعُ سطحُ الطاولةِ الكتابَ إلى أعلى (القوةُ العموديةُ)، مثلَما هوَ موضحٌ في مخططِ الجسمِ الحرِّ. وبتطبيقِ القانونِ الثاني لنيوتن في اتجاهِ المحورِ $y$، يُمكنُ التوصلُ إلى أنَّ:

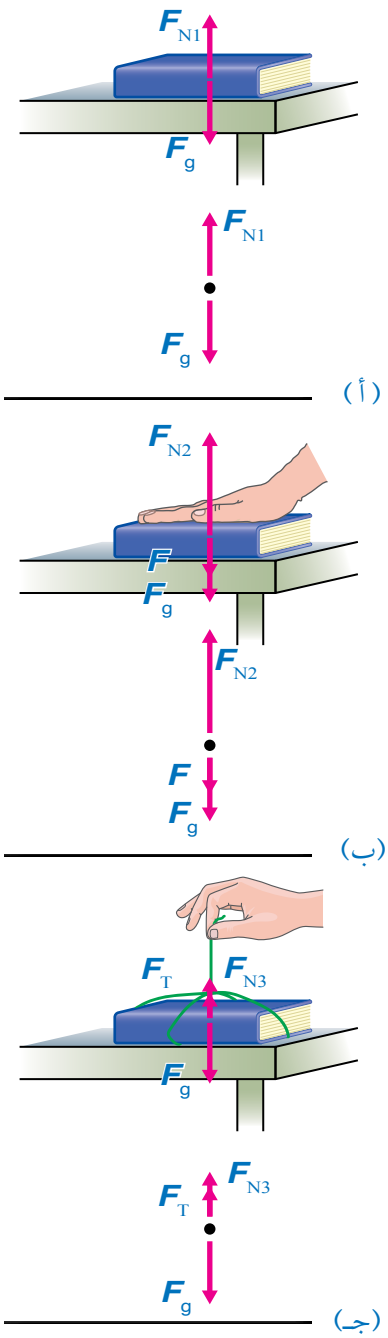
$$F_{N2} - (F + F_g) = ma = 0$$

حيثُ القوةُ المحصلةُ في اتجاهِ المحورِ $y$ تساوي صفرًا؛ لأنَّ الكتابَ في حالةِ اتزانٍ سكونيٍّ.

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

يوضحُ الشكلُ (11/ جـ) حالةً تكونُ فيها القوةُ العموديةُ المؤثرةُ في الكتابِ أقلَّ منْ وزنِهِ؛ حيثُ يتأثرُ الكتابُ بقوتيْنِ إلى أعلى، هُما: القوةُ العموديةُ، وقوةُ الشدِّ في الخيطِ، في حينِ يؤثرُ فيهِ وزنُهُ بقوةٍ إلى أسفلَ، كما هوَ موضحٌ في مخططِ الجسمِ الحرِّ.

✓ **أتحقَّقُ:** هلِ القوةُ العموديةُ المؤثرةُ في جسمٍ تساوي دائمًا وزنَهُ؟ أفسِّرُ إجابتي.




الشكلُ (11): (أ) القوةُ العموديةُ المؤثرةُ في الكتابِ تساوي وزنَهُ. (ب) القوةُ العموديةُ أكبرُ منْ وزنِ الكتابِ. (جـ) القوةُ العموديةُ أقلُّ منْ وزنِ الكتابِ. (ملاحظةٌ: الكتابُ في حالةِ اتزانٍ سكونيٍّ في الأشكالِ الثلاثةِ.)

**أجدُ** علاقةً لحسابِ القوةِ العموديةِ المؤثرةِ في الكتابِ في الشكلِ (جـ).

## المثالُ 5

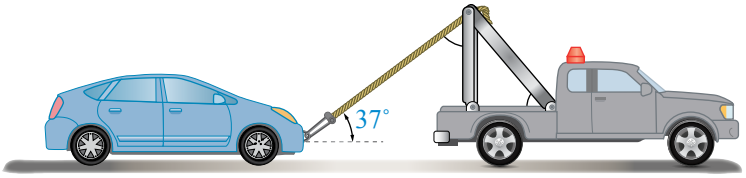
تسحبُ رافعةٌ سيارةً كتلتُها (900 kg) منَ السكونِ على طريقٍ أفقيٍّ أملسَ بقوةِ شدٍّ مقدارُها (2000 N) بحبلٍ يميلُ على الأفقيِّ بزاويةِ (37°)، كما هوَ موضَّحٌ في الشكلِ (12).

إذا علمتُ أنَّ الحبلَ مهملُ الكتلةِ، وغيرُ قابلٍ للاستطالةِ، و $\cos 37^\circ = 0.8$، $\sin 37^\circ = 0.6$، $g = 10\ \text{m/s}^2$، فأحسبُ مقدارَ:

أ . المركبتيْنِ الأفقيةِ والعموديةِ لقوةِ الشدِّ في الحبلِ.

ب. القوةِ العموديةِ المؤثرةِ في السيارةِ.

جـ. تسارعِ السيارةِ.




الشكلُ (12): رافعةٌ تسحبُ سيارةً على طريقٍ أُفقيٍّ.

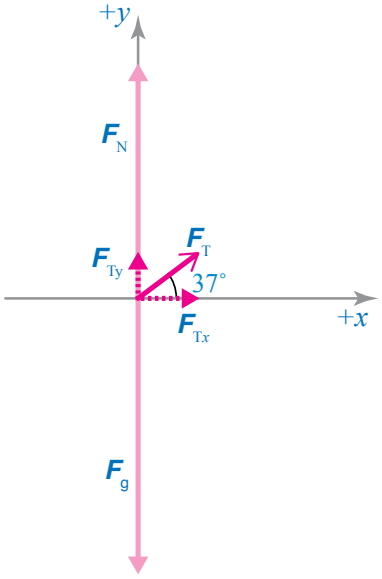
**المعطياتُ:**

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

**المطلوبُ:**

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

**الحلُّ:**




أرسمُ مخططَ الجسمِ الحُرِّ للسيارةِ. معَ اعتبارِ الاتجاهِ الموجبِ إلى اليمينِ (في اتجاهِ الحركةِ الأفقيةِ).

أ . لإيجادِ المُركّبةِ الأفقيةِ لقوةِ الشدِّ في الحبلِ أستخدمُ العلاقةَ الآتيةَ:

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

لإيجادِ المُركّبةِ العموديةِ لقوةِ الشدِّ في الحبلِ؛ أستخدمُ العلاقةَ الآتيةَ:

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

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

$$\sum F_y = 0$$

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

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

$$F_N = mg - 1200$$
$$= (900)(10) - 1200$$
$$= 9000 - 1200 = 7800 \text{ N}$$
$$\boldsymbol{F}_N = 7800 \text{ N}, +y$$

أُلاحظُ أنَّ مقدارَ القوةِ العموديةِ أقلُّ منْ مقدارِ الوزنِ.

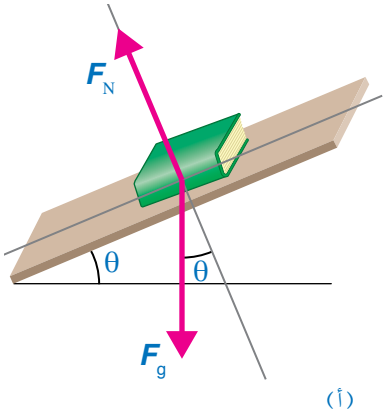
جـ . لإيجادِ مقدارِ التسارعِ أستخدمُ العلاقةَ الآتيةَ، معَ مراعاةِ أنَّ السطحَ الأفقيَّ أملسُ:

$$\sum F_x = ma_x = F_{Tx}$$
$$ma_x = 1600 \text{ N}$$
$$a_x = \frac{1600}{900} = 1.78 \text{ m/s}^2$$
$$\boldsymbol{a}_x = 1.78 \text{ m/s}^2, +x$$

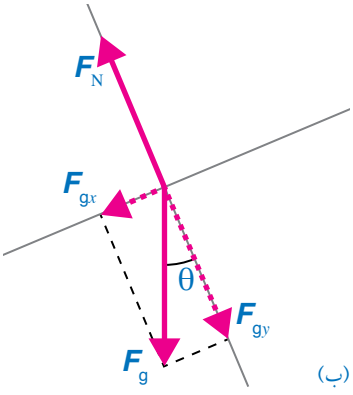
**تمرينٌ**

أعيدُ حلَّ المثالِ السابقِ إذا أصبحتْ زاويةُ ميلانِ الحبلِ بالنسبةِ للأفقيِّ (53°)، إذا علمتُ أنَّ:

$g = 10 \text{ m/s}^2$, $\sin 53^\circ = 0.8$, $\cos 53^\circ = 0.6$




(أ)




(ب)

الشكلُ (13): (أ) كتابٌ موضوعٌ على مستوًى مائلٍ. (ب) يبينُ مخططُ الجسمِ الحرِّ تحليلَ وزنِ الكتابِ إلى مُركّبتيْنِ: مُركَّبةٍ عموديةٍ على المستوى المائلِ، ومُركَّبةٍ موازيةٍ للمستوى المائلِ.

## • المستوى المائلُ Inclined Plane

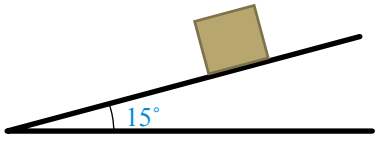
عندَ وضعِ جسمٍ على مستوًى مائلٍ، فإنَّ وزنَهُ لا يؤثرُ عموديًّا في سطحِ المستوى، بلْ يصنعُ زاويةً معَهُ، أنظرُ الشكلَ (13/ أ)، الذي يوضحُ كتابًا موضوعًا على مستوًى مائلٍ، يميلُ على الأفقيِّ بزاويةِ (θ). ومنَ المناسبِ في مثلِ هذهِ المسائلِ، اختيارُ محاورِ الإسنادِ بحيثُ يكونُ المحورُ ($x$) في اتجاهٍ يوازي المستوى المائلَ، و يكونُ المحورُ ($y$) عموديًّا عليْهِ. لذا؛ يلزمُ تحليلُ وزنِ الجسمِ إلى مُركَّبتيْنِ: إحداهُما عموديةٌ على المستوى المائلِ ($F_{gy} = F_g \cos\theta$)، والأخرى موازيةٌ لهُ ($F_{gx} = F_g \sin\theta$)، أنظرُ الشكلَ (13/ ب). وهنا تكونُ القوةُ العموديةُ أقلَّ منْ وزنِ الجسمِ.

## المثالُ 6

ينزلقُ صندوقٌ كتلتُهُ (4 kg) إلى أسفلِ مستوًى مائلٍ أملسَ يميلُ على الأفقيِّ بزاويةِ (15°)، كما هوَ موضحٌ في الشكلِ (14). إذا علمتُ أنَّ: $\cos 15^\circ = 0.97$، $\sin 15^\circ = 0.26$، $g = 10\ \text{m/s}^2$، فأحسبُ مقدارَ:

أ . القوةِ العموديةِ المؤثرةِ في الصندوقِ.

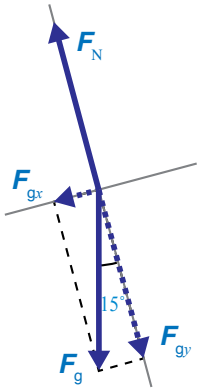
ب. تسارعِ الصندوقِ.




الشكل (14): صندوقٌ على مستوًى مائلٍ أملسَ.

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

**المطلوبُ:** $F_N = ?,\ a = ?$




**الحلُّ:**

- أرسمُ مخططَ الجسمِ الحرِّ للصندوقِ، مع اختيارِ المحورِ $x$ في اتجاهٍ يوازي المستوى المائلَ، والمحورُ $y$ عموديٌّ عليْهِ، مثلَما هوَ موضحٌ.
- أعتبرُ أنَّ اتجاهَ انزلاقِ الصندوقِ إلى أسفلِ المستوى المائلِ هوَ الاتجاهُ الموجبُ $(+x)$.
- قبلَ البدءِ بحلِّ المسألةِ أحلِّلُ وزنَ الصندوقِ إلى مُركّبتيْنِ متعامدتيْنِ: $F_{gx}$ و $F_{gy}$، مثلَما هوَ موضحٌ في مخططِ الجسمِ الحرِّ، 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 . أطبِّقُ القانونَ الثانيَ لنيوتن على الصندوقِ في اتجاهِ المحورِ $y$؛ لإيجادِ مقدارِ القوةِ العموديةِ المؤثرةِ فيهِ، مع مراعاةِ أنَّهُ لا توجدُ حركةٌ في اتجاهِ هذا المحورِ.

$$\sum F_y = 0$$
$$F_N - F_{gy} = 0$$
$$F_N = F_{gy}$$
$$F_N = 38.8\ \text{N}$$

ب . ينزلقُ الصندوقُ إلى أسفلِ المستوى المائلِ، ولحسابِ مقدارِ تسارعِهِ أطبِّقُ القانونَ الثاني لنيوتن في اتجاهِ المحورِ $x$، وأعتبرُ أنَّ اتجاهَ الحركةِ هوَ الاتجاهُ الموجبُ.

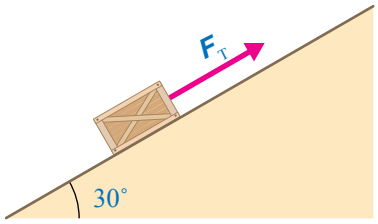
$$\sum F_x = ma$$
$$F_{gx} = ma$$
$$a = \frac{F_{gx}}{m} = \frac{10.4}{4}$$
$$= 2.6\ \text{m/s}^2$$

**تمرينٌ**

يوضحُ الشكلُ (15) صندوقًا كتلتُهُ (20 kg)، يُسحبُ بحبلٍ غيرِ قابلٍ للاستطالةِ إلى أعلى مستوًى مائلٍ أملسَ بسرعةٍ ثابتةٍ. إذا كانَ الحبلُ موازيًا لسطحِ المستوى، وزاويةُ ميلانِ المستوى على الأفقيِّ (30°)، و $\cos 30^\circ = 0.87$ ،$\sin 30^\circ = 0.5$ ،$g = 10\ m/s^2$، فأحسبُ مقدارَ:

أ . القوةِ العموديةِ المؤثرةِ في الصندوقِ.

ب. قوةِ الشدِّ المؤثرةِ في الصندوقِ.




الشكلُ (15): صندوقٌ يُسحبُ بسرعةٍ متجهةٍ ثابتةٍ إلى أعلى مستوًى مائلٍ.

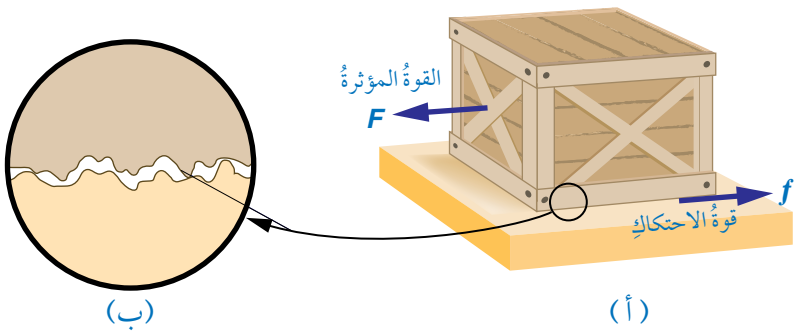
## قوةُ الاحتكاكِ Friction Force

عندَ دفعِ مكعبٍ خشبيٍّ على سطحِ طاولةٍ أُفقيٍّ ثمَّ إفلاتِهِ، فإنَّهُ ينزلقُ عليْهِ، ثمَّ لا يلبثُ أنْ يتوقفَ. وبحسبِ القانونِ الأولِ لنيوتن، لا بدَّ منْ وجودِ قوةٍ محصلةٍ أثّرتْ في المكعبِ أدَّتْ إلى تغييرِ حالتِهِ الحركيةِ. وبحسبِ القانونِ الثاني لنيوتن، يجبُ أنْ تؤثرَ هذهِ القوةُ المحصلةُ في الصندوقِ بعكسِ اتجاهِ حركتِهِ، وتعيقَها.

تنشأُ هذهِ القوى التي تُعيق حركةَ الأجسامِ نتيجةَ حركةِ مادةٍ صلبةٍ بالنسبةِ إلى مادةٍ صلبةٍ، أوْ حركةِ موادَّ صلبةٍ وموائعَ (سوائلَ وغازاتٍ) نسبةً إلى بعضِها، أوْ بينَ طبقاتِ الموائعِ المتحركةِ. ومنْ أمثلةِ ذلكَ: انزلاقُ إطاراتِ سيارةٍ على سطحِ الطريقِ، وحركةُ غواصةٍ داخلَ مياهِ البحرِ، وتحليقُ طائرةٍ في الهواءِ، وانزلاقُ لوحِ تزلجٍ على سطحِ الماءِ في رياضةِ التزلجِ.

سوفَ أدرسُ هنا حركةَ الأجسامِ الصلبةِ نسبةً إلى بعضِها، حيثُ تُسمّى القوةُ المعيقةُ في هذهِ الحالةِ **قوةَ الاحتكاكِ Friction Force**؛ وهيَ قوةُ تلامسٍ تعيقُ حركةَ الأجسامِ الصلبةِ المتلامسةِ بعضِها فوقَ بعضٍ، وتُمانعُ حركتَها، وتؤثرُ بشكلٍ موازٍ لسطحَيْ التلامسِ بينَ الجسمينِ. وتنشأُ هذهِ القوةُ بينَ سطحَيْ الجسمينِ المتلامسينِ عندَ تحريكِ أوْ محاولةِ تحريكِ بعضِهما فوقَ بعضٍ، أنظرُ الشكلَ (16/ أ). عندَ التأثيرِ بقوةٍ في الصندوقِ الموضحِ في الشكلِ (16/ أ)؛ لمحاولةِ تحريكِهِ على سطحٍ أُفقيٍّ خشنٍ، تنشأُ قوةُ احتكاكٍ بينَ سطحيْهِما

أعدُّ فيلمًا قصيرًا باستخدامِ برنامجِ صانعِ الأفلامِ (movie maker) يوضحُ قوةَ الاحتكاكِ، وأحرصُ على أنْ يشتملَ الفيلمُ على مفهومِ كلٍّ منْ: قوةِ الاحتكاكِ السكونيِّ، وقوةِ الاحتكاكِ الحركيِّ، وعلى صورٍ لأمثلةٍ توضيحيةٍ، ثمَّ أشاركُهُ زملائي/ زميلاتي في الصفِّ.




الشكلُ (16): توضيحٌ مُبسَّطٌ لآليةِ حدوثِ الاحتكاكِ بينَ سطحَيْ تلامسِ جسمينِ. (أ) عندَ التأثيرِ بقوةٍ في الصندوقِ لتحريكِهِ تنشأُ قوةُ احتكاكٍ معاكسةٌ لاتجاهِ القوةِ المُؤثرةِ. (ب) ويُظهرُ الفحصُ الدقيقُ للسطحينِ المتلامسينِ أنَّهُما خشنانِ.

المتلامسينِ، نتيجةَ خشونتِهما، حيثُ يُظهرُ الفحصُ الدقيقُ للسطحين أنَّهُما خشنانِ، حتّى لوْ بدا أنَّهُما أملسانِ عندَ لمسِهما، أنظرُ الشكلَ (16/ ب). ولتحريكِ الصندوقِ يجبُ التأثيرُ فيهِ بقوةِ دفعٍ أوْ سحبٍ لرفعِ نتوءاتِ سطحِهِ فوقَ نتوءاتِ السطحِ السفليِّ؛ الأمرُ الذي يُقلِّلُ مِنْ تداخلِ نتوءاتِ السطحَينِ؛ وهذا بدورِهِ يؤدّي إلى نُقصانٍ في مقدارِ قوَّةِ الاحتكاكِ الحركيِّ مقارنةً بالقيمةِ العُظْمى لقوَّةِ الاحتكاكِ السكونيِّ.

✓ **أتحقَّقُ:** ما المقصودُ بقوةِ الاحتكاكِ؟ وفي أيِّ اتجاهٍ تؤثرُ؟

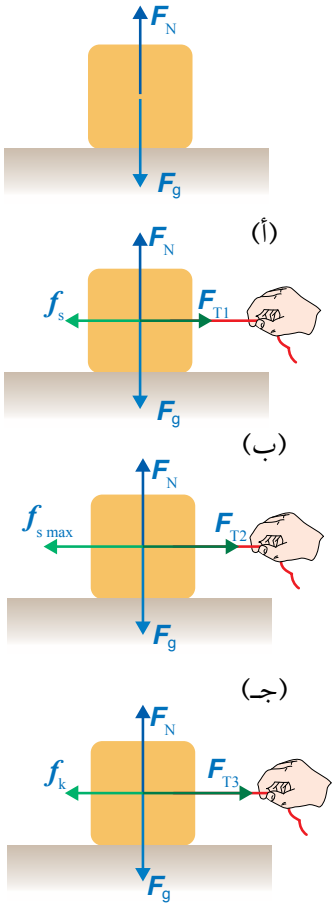
## قوتا الاحتكاكِ: السكونيِّ، والحركيِّ Static and Kinetic Forces of Friction

هناكَ نوعانِ لقوةِ الاحتكاكِ: قوةُ الاحتكاكِ السكونيِّ، وقوةُ الاحتكاكِ الحركيِّ.

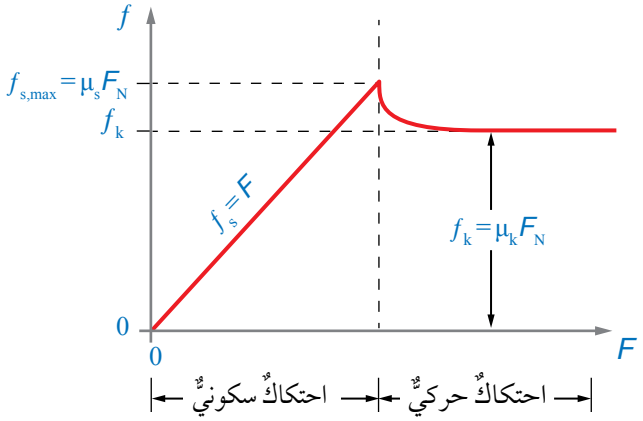
### قوةُ الاحتكاكِ السكونيِّ Static Force of Friction

هيَ قوةٌ تُمانعُ حركةَ جسمينِ ساكنينِ متلامسينِ عندَ محاولةِ تحريكِ بعضِهما فوقَ بعضٍ. وتَظهرُ هذهِ القوةُ استجابةً لقوةٍ أخرى تحاولُ تحريكَ الجسمِ الساكنِ. ولفهمِ هذهِ القوةِ؛ أنظرُ الشكلَ (17) الذي يبينُ صندوقًا على سطحٍ أفقيٍّ خشنٍ.

في الشكلِ (17/أ) الصندوقُ ساكنٌ، ولا توجدُ قوةٌ تحاولُ تحريكَهُ؛ لذا لا توجدُ قوةُ احتكاكٍ تؤثرُ فيهِ. أما في الشكلِ (17/ ب) فتؤثرُ قوةُ شدٍّ أفقيَّةٌ صغيرةٌ ($F_{T1}$) في الصندوقِ جهةَ اليمينِ، غيرَ أنَّهُ ساكنٌ لا يتحركُ؛ أي أنَّ القوةَ المحصلةَ المؤثرةَ فيهِ صفرٌ، وبحسبِ




الشكلُ (17): (أ) $f_s = 0$. (ب) $f_s = F_{T1}$. (جـ) الصندوقُ على وشكِ الحركةِ ($f_{s,max} = F_{T2}$). (د) بعدَ تحرُّكِ الصندوقِ تؤثرُ فيهِ قوةُ احتكاكٍ حركيٍّ ($f_k$)، ويكونُ مقدارُها أقلَّ منْ مقدارِ قوةِ الاحتكاكِ السكونيِّ العظمى.




الشكلُ (18): منحنى (قوةِ الاحتكاكِ – القوةِ الأُفقيّةِ المؤثرةِ) لجسمٍ موضوعٍ على سطحٍ أُفقيٍّ خشنٍ. تكونُ قوةُ الاحتكاكِ الحركيِّ أقلَّ منْ قوةِ الاحتكاكِ السكونيِّ العظمى $(f_{s,max} > f_k)$، وهذا يعني أن $\mu_s > \mu_k$.

القانونِ الأولِ لنيوتن، لا بُدَّ منْ وجودِ قوةٍ أفقيةٍ تؤثرُ في الصندوقِ، تكونُ معاكسةً لاتجاهِ قوةِ الشدِّ، وتُساويها مقدارًا. تُسمّى هذهِ القوةُ **قوةَ الاحتكاكِ السكونيِّ Static Force of Friction**، رمزُها $(f_s)$، تؤثرُ في سطحَيْ جسمينِ متلامسينِ عندَما لا يتحركُ أحدُهما بالنسبةِ إلى الآخرِ.

بزيادةِ مقدارِ قوةِ الشدِّ يزدادُ مقدارُ قوةِ الاحتكاكِ السكونيِّ ما دامَ الصندوقُ ساكنًا؛ حيثُ القوةُ المحصلةُ المؤثرةُ فيهِ تساوي صفرًا. وعندَ زيادةِ مقدارِ قوةِ الشدِّ في الشكلِ (17/ جـ) يزدادُ أيضًا مقدارُ قوةِ الاحتكاكِ السكونيِّ حتّى يصلَ إلى قيمةٍ عظمى، عندَما يكونُ الجسمُ على وشْكِ الحركةِ، تسمّى قوةَ الاحتكاكِ السكونيِّ العظمى $(f_{s,max})$.

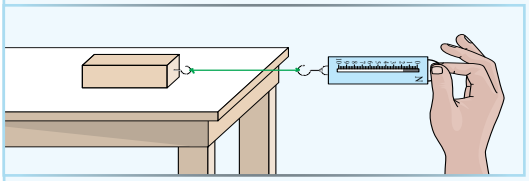
أنظر الشكلَ (18) الذي يوضحُ منحنى (قوةِ الاحتكاكِ – القوةِ الأُفقية المؤثرةِ) لجسمٍ موضوعٍ على سطحٍ أُفقيٍّ خشنٍ. يبينُ الجزءُ الأولُ منَ المنحنى تأثيرَ قوةِ الاحتكاكِ السكونيِّ؛ حيثُ يزدادُ مقدارُ قوةِ الاحتكاكِ السكونيِّ طرديًّا بزيادةِ مقدارِ القوةِ الأُفقيّة المؤثرةِ في الجسمِ، حتى يصلَ إلى قيمةٍ عظمى $(f_{s,max})$، وألاحظُ أنَّ قوةَ الاحتكاكِ السكونيِّ تساوي القوةَ الأفقيّةَ المؤثرةَ في الجسمِ التي تحاولُ تحريكَهُ في المقدارِ، وتعاكسُها في الاتجاهِ. وعندَما يصبحُ مقدارُ القوةِ الأفقيَّةِ المؤثرةِ أكبرَ منَ القيمةِ العظمى لقوةِ الاحتكاكِ السكونيِّ يبدأُ الجسمُ الحركةَ، وعندَها تؤثرُ فيهِ قوةُ الاحتكاكِ الحركيِّ بدلًا منْ قوةِ الاحتكاكِ السكونيِّ.

علامَ تعتمدُ قوةُ الاحتكاكِ السكونيِّ؟ للإجابةِ عنْ ذلكَ، أنفِّذُ التجربةَ الآتيةَ؛ لاستقصاءِ العواملِ التي يعتمدُ عليْها مقدارُ قوةِ الاحتكاكِ عمليًّا.

# التجربةُ 2

## العواملُ التي تعتمدُ عليْها قوةُ الاحتكاكِ السكونيِّ وقوةُ الاحتكاكِ الحركيِّ

**الموادُّ والأدواتُ:** قطعةٌ خشبيةٌ على شكلِ متوازي مستطيلاتٍ مُزوَّدةٌ بخطّافٍ، ثِقْلانِ مقدارُ كلٍّ منهُما (200 g)، ميزانٌ إلكترونيٌّ، خيطٌ طولهُ (1 m) تقريبًا، ورقُ تنظيفٍ، ميزانٌ نابضيٌّ، ورقُ تغليفٍ بلاستيكيٌّ، ورقُ صنفرةٍ، ورقُ (رقائقُ) ألمنيومٍ، ورقةُ رسمٍ بيانيٍّ.



**إرشاداتُ السلامةِ:** ارتداءُ المعطفِ، واستخدامُ النظاراتِ الواقيةِ للعينينِ، والحذرُ منْ سقوطِ الأجسامِ والأدواتِ على القدمينِ.

**خطواتُ العملِ:**

1. بالتعاونِ معَ أفرادِ مجموعتي، أنظفُ أسطُحَ القطعةِ الخشبيةِ وسطحَ الطاولةِ، وأتأكدُ أنَّهُ أُفقيٌّ.
2. **أقيسُ** كتلةَ القطعةِ الخشبيةِ ($m_{block}$)، وأدوِّنُها في الجدولِ (1) للمحاولةِ (1)، ثمَّ أجعلُ أصغرَ أوجُهِها ملامسًا لسطحِ الطاولةِ.
3. أربطُ أحدَ طرفَيْ الخيطِ بخطّافِ القطعةِ الخشبيةِ، وطرفَهُ الآخرَ بخطافِ الميزانِ النابضيِّ، وأحرصُ على أنْ يكونَ الخيطُ الواصلُ بينهُما أُفقيًّا، وموازيًا لمستوى سطحِ الطاولةِ.
4. **أقيسُ:** أسحبُ الميزانَ أُفقيًّا ببطْءٍ بقوةٍ صغيرةِ المقدارِ، ثمَّ أزيدُها تدريجيًّا، وفي أثناءِ ذلكَ يراقبُ أحدُ أفرادِ مجموعتي القطعةَ الخشبيةَ، ويراقبُ آخرُ الميزانَ؛ لإعطاءِ إشارةٍ بأخذِ قراءتهِ في اللحظةِ التي تبدأُ فيها القطعةُ الانزلاقَ، وأُدوِّنُها في عمودِ قوةِ الاحتكاكِ السكونيِّ العظمى ($f_{s,max}$) في الجدولِ (1) للمحاولةِ (1).
5. **أقيسُ:** أُرجعُ القطعةَ الخشبيةَ إلى موقعِها الابتدائيِّ، ثمَّ أضعُ عليْها ثقلَ (200 g)، وأُكرِّرُ الخطوةَ السابقةَ، وأُدوِّنُ الكتلةَ الجديدةَ للقطعةِ الخشبيةِ، وقراءةَ الميزانِ للمحاولةِ (2) في الجدولِ (1).
6. **أقيسُ:** أُكرِّرُ الخطوةَ السابقةَ مرةً أُخرى بإضافةِ ثقلِ (200 g) على سطحِ القطعةِ الخشبيةِ، وأُدوِّنُ البياناتِ التي أحصلُ عليْها للمحاولةِ (3) في الجدولِ (1).
7. **أستنتجُ:** أُكرِّرُ التجربةَ باستخدامِ القطعةِ الخشبيةِ نفسِها دونَ وضعِ أثقالٍ عليها؛ لتثبيتِ كتلتِها، وتغييرِ وجهِها الملامسِ لسطحِ الطاولةِ؛ لتغييرِ مساحةِ سطحِ التلامسِ ($A$)؛ لاستنتاجِ العلاقةِ بينَ مقدارِ قوةِ الاحتكاكِ السكونيِّ ومساحةِ السطحينِ المتلامسينِ، ثمَّ أُدوِّنُ البياناتِ في الجدولِ (2).
8. **أستنتجُ:** أُكرِّرُ التجربةَ باستخدامِ القطعةِ الخشبيةِ نفسِها دونَ وضعِ أثقالٍ عليها، وتغييرِ نوعِ مادةِ السطحِ الذي توضعُ عليْهِ، بتغطيةِ سطحِ الطاولةِ أسفلَ القطعةِ الخشبيةِ بورقِ تغليفٍ بلاستيكيٍّ، أوْ ورقِ صنفرةٍ، أوْ ورقِ (رقائقِ) ألمنيومٍ، أوْ غيرِها؛ لاستنتاجِ العلاقةِ بينَ مقدارِ قوةِ الاحتكاكِ السكونيِّ وطبيعةِ السطحينِ المتلامسينِ، ثمَّ أُدوِّنُ البياناتِ في الجدولِ (3).
9. **أُصمِّمُ تجربةً** لدراسةِ العواملِ التي تعتمدُ عليْها قوةُ الاحتكاكِ الحركيِّ بينَ سطحينِ، وذلكَ بأخذِ قراءةِ الميزانِ عندَ حركةِ القطعةِ الخشبيةِ بسرعةٍ ثابتةٍ تقريبًا على سطحِ الطاولةِ الأُفقيِّ، وأُدوِّنُ بياناتي.

**التحليلُ والاستنتاجُ:**

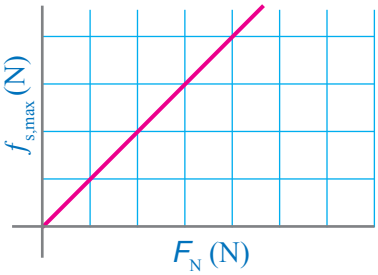
1. **أُبرِّرُ** سببَ اعتبارِ قوةِ الاحتكاكِ السكونيِّ مساويةً لقراءةِ الميزانِ النابضيِّ (قوةُ الشدِّ).
2. **أحسبُ** مقدارَ القوةِ العموديةِ ($F_N$) لكلِّ محاولةٍ في الجدولِ (1)، وهيَ تساوي وزنَ القطعةِ الخشبيةِ والأثقالَ التي عليْها. لماذا؟
3. **أُمثِّلُ بيانيًّا** العلاقةَ بينَ مقدارِ قوةِ الاحتكاكِ السكونيِّ العظمى ($f_{s,max}$) على المحورِ ($y$)، ومقدارِ القوةِ العموديةِ ($F_N$) على المحورِ ($x$) لبياناتِ الجدولِ (1). ما شكلُ هذهِ العلاقةِ؟ ماذا أستنتجُ؟
4. **أتوقَّعُ** ما الذي يمثلهُ ميلُ المنحنى في السؤالِ السابقِ؟ ماذا أستنتجُ؟
5. **أحلِّلُ وأستنتجُ:** اعتمادًا على نتائجِ الخطواتِ (4-8)، أستنتجُ العواملَ التي تعتمدُ عليْها قوةُ الاحتكاكِ السكونيِّ العظمى بينَ سطحينِ متلامسينِ عندَ محاولةِ تحريكِ أحدِهما بالنسبةِ إلى الآخرِ. أُفسِّرُ إجابتي.
6. **أستنتجُ** العواملَ التي تعتمدُ عليْها قوةُ الاحتكاكِ الحركيِّ بينَ سطحينِ. أُفسِّرُ إجابتي.

استنتجتُ بعدَ تنفيذِ التجربةِ السابقةِ أنَّهُ عندَ محاولةِ تحريكِ جسمينِ متلامسينِ أحدُهما بالنسبةِ إلى الآخرِ، ينشأُ بينَ سطحيْهِما المتلامسينِ قوةُ احتكاكٍ سكونيٍّ يعتمدُ مقدارُها على عاملينِ، هما:

أ. طبيعةُ السطحينِ المتلامسينِ (نوعا مادّتيْهِما)؛ فمثلًا مقدارُ قوةِ الاحتكاكِ السكونيِّ بينَ المكعبِ الخشبيِّ وسطحِ الطاولةِ الخشبيِّ أكبرُ منهُ بينَ المكعبِ الخشبيِّ ورقائقِ الألمنيومِ. وبناءً على ذلكَ؛ يمكنُ تفسيرُ سببِ استخدامِ العاملينَ في المصانعِ والأماكنِ التي تكونُ أرضياتُها مُغطاةً بالزيوتِ والسوائلِ، أحذيةً نعالُها مصنوعةٌ منَ المطاطِ؛ فانزلاقُ الأحذيةِ ذاتِ النعلِ المطاطيِّ يكونُ أقلَّ منهُ للأحذيةِ ذاتِ النعلِ الجلديِّ.

ب. مقدارُ القوةِ العموديةِ المؤثرةِ في الجسمِ؛ حيثُ يزدادُ مقدارُ قوةِ الاحتكاكِ السكونيِّ بزيادةِ مقدارِ القوةِ العموديةِ. ويوضحُ الشكلُ (19) التناسبَ الطرديَّ بينَ مقدارِ قوةِ الاحتكاكِ السكونيِّ العظمى ($f_{s,max}$) ومقدارِ القوةِ العموديةِ ($F_N$). ولا تعتمدُ قوةُ الاحتكاكِ السكونيِّ على مساحةِ سطحَيْ التلامسِ بينَ الجسمينِ، ومقدارُها عندَ أيةِ لحظةٍ يحققُ المتباينةَ:

$$f_s \leq \mu_s F_N$$




الشكلُ (19): يتناسبُ مقدارُ قوةِ الاحتكاكِ السكونيِّ العظمى طرديًّا معَ مقدارِ القوةِ العموديةِ.

حيثُ يرمزُ ($\mu_s$) إلى **معاملِ الاحتكاكِ السكونيِّ Coefficient of Static Friction**، وهوَ يعتمدُ على طبيعةِ السطحينِ المتلامسينِ. ويُعطى مقدارُ قوةِ الاحتكاكِ السكونيِّ العظمى رياضيًّا بالعلاقةِ:

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

ومنْ هذهِ العلاقةِ يُمكنُ تعريفُ معاملِ الاحتكاكِ السكونيِّ ($\mu_s$) بأنَّهُ نسبةُ مقدارِ قوةِ الاحتكاكِ السكونيِّ العظمى إلى مقدارِ القوةِ العموديةِ، وبما أنَّهُ نسبةُ قوًى فليسَ لهُ وحدةُ قياسٍ.

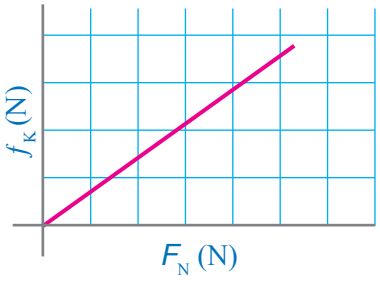
✓ **أتحقَّقُ:** علامَ تعتمدُ قوةُ الاحتكاكِ السكونيِّ بينَ سطحينِ متلامسينِ؟ وما وحدةُ قياسِ معاملِ الاحتكاكِ السكونيِّ؟

## قوةُ الاحتكاكِ الحركيِّ Kinetic Force of Friction

يوضحُ الشكلُ (17/ د) أنَّ الصندوقَ يبدأُ الحركةَ عندَما يصبحُ مقدارُ قوةِ الشدِّ المؤثرةِ فيهِ أكبرَ منْ مقدارِ قوةِ الاحتكاكِ السكونيِّ العظمى، وتسمّى قوةُ الاحتكاكِ المؤثرةُ في الجسمِ في أثناءِ حركتهِ **قوةَ الاحتكاكِ الحركيِّ Kinetic Force of Friction**، رمزُها ($f_k$)، تؤثرُ في سطحَيْ جسمينِ متلامسينِ عندَما يتحركُ أحدُهُما بالنسبةِ إلى الآخرِ. وبالنظرِ إلى الشكلِ (18)، ألاحظُ أنَّ مقدارَ قوةِ الاحتكاكِ الحركيِّ أقلُّ منْ مقدارِ قوةِ الاحتكاكِ السكونيِّ العظمى، وهذا ما توصلتُ إليهِ عمليًّا بعدَ تنفيذِ التجربةِ السابقةِ؛ حيثُ مقدارُ القوةِ اللازمةِ لتحريكِ الجسمِ بسرعةٍ متجهةٍ ثابتةٍ والمحافظةِ على حركتهِ أقلُّ منْ مقدارِ القوةِ اللازمةِ لبدءِ حركتهِ.

استنتجتُ بعدَ تنفيذِ التجربةِ السابقةِ أنَّ مقدارَ قوةِ الاحتكاكِ الحركيِّ بينَ سطحَيْ جسمينِ متلامسينِ يتحركُ أحدُهما بالنسبةِ إلى الآخرِ، يعتمدُ على عاملينِ – كما في حالةِ قوةِ الاحتكاكِ السكونيِّ –، هُما: طبيعةُ السطحينِ المتلامسينِ، ومقدارُ القوةِ العموديةِ المؤثرةِ في الجسمِ.

فمثلًا، تحريكُ مكعبٍ خشبيٍّ على سطحِ طاولةٍ خشبيٍّ أسهلُ من تحريكهِ على سطحٍ منَ الخرسانةِ، وانزلاقُ إطاراتِ السيارةِ على الطريقِ المغطى بالثلجِ أسهلُ بكثيرٍ منهُ على طريقٍ جافٍّ. ويوضحُ الشكلُ (20) التناسبَ الطرديَّ بينَ مقدارِ قوةِ الاحتكاكِ الحركيِّ ($f_k$) ومقدارِ القوةِ




الشكلُ (20): يتناسبُ مقدارُ قوةِ الاحتكاكِ الحركيِّ طرديًّا معَ مقدارِ القوةِ العموديةِ.

العموديةِ ($F_N$). وكما في حالةِ الاحتكاكِ السكونيِّ، لا تعتمدُ قوةُ الاحتكاكِ الحركيِّ على مساحةِ سطحَيْ التلامسِ بينَ الجسمينِ.

وُجِدَ عمليًّا أنَّ مقدارَ قوةِ الاحتكاكِ الحركيِّ بينَ سطحَيْ جسمينِ متلامسينِ يتناسبُ طرديًّا معَ مقدارِ القوةِ العموديةِ المتبادلةِ بينهُما، ويمكنُ التعبيرُ عنْ ذلكَ رياضيًّا كما يأتي:

$$f_k = \mu_k F_N$$

حيثُ مقدارُ قوةِ الاحتكاكِ الحركيِّ يساوي ناتجَ ضربِ معاملِ الاحتكاكِ الحركيِّ في مقدارِ القوةِ العموديةِ. ويرمزُ ($\mu_k$) إلى **معاملِ الاحتكاكِ الحركيِّ Coefficient of Kinetic Friction**، ويساوي نسبةَ مقدارِ قوةِ الاحتكاكِ الحركيِّ إلى مقدارِ القوةِ العموديةِ، وهوَ يعتمدُ على طبيعةِ السطحينِ المتلامسينِ، وبما أنَّهُ نسبةُ قوًى فليسَ لهُ وحدةُ قياسٍ.

يبينُ الجدولُ (1) معاملاتِ الاحتكاكِ السكونيةَ ومعاملاتِ الاحتكاكِ الحركيةَ التقريبيةَ لسطوحٍ مختلفةٍ. وأُلاحظُ منَ الجدولِ أنَّ معاملاتِ الاحتكاكِ السكونيةَ أكبرُ منْ نظيراتِها الحركيةِ للسطوحِ نفسِها؛ أيْ أنَّ $\mu_s > \mu_k$.

الجدولُ (1): القيمُ التقريبيةُ لبعضِ معاملاتِ الاحتكاكِ

| نوعا السطحينِ المتلامسينِ | معاملُ الاحتكاكِ السكونيِّ $\mu_s$ | معاملُ الاحتكاكِ الحركيِّ $\mu_k$ |
|---|---|---|
| فولاذٌ فوقَ فولاذٍ (جافٌّ) | 0.8 | 0.6 |
| فولاذٌ فوقَ فولاذٍ (معَ الزيتِ) | 0.15 | 0.05 |
| مطاطٌ فوقَ خرسانةٍ جافةٍ | 1.0 | 0.8 |
| مطاطٌ فوقَ خرسانةٍ مُبللةٍ | 0.5 – 0.7 | 0.3 – 0.5 |
| مطاطٌ فوقَ ثلجٍ | 0.3 | 0.2 |
| خشبٌ فوقَ خشبٍ | 0.5 | 0.3 |
| خشبٌ مشمَّعٌ (waxed wood) فوقَ ثلجٍ | 0.14 | 0.1 |
| فلزٌّ فوقَ خشبٍ | 0.5 | 0.3 |
| جليدٌ فوقَ جليدٍ | 0.1 | 0.03 |
| زجاجٌ فوقَ زجاجٍ | 0.9 | 0.4 |
| فولاذٌ فوقَ جليدٍ | 0.4 | 0.02 |
| الحذاءُ فوقَ الخشبِ | 0.9 | 0.7 |
| الحذاءُ فوقَ الجليدِ | 0.1 | 0.05 |
| مفاصلُ العظامِ بوجودِ السائلِ الزلاليِّ | 0.016 | 0.015 |

## المثالُ 7

وُضِعَ صندوقٌ كتلتهُ (40 kg) على زلّاجةٍ لسحبهِ على أرضيةٍ أُفقيةٍ مغطاةٍ بالثلجِ. إذا علمتُ أنَّ قوةَ الشدِّ المؤثرةَ في الزلاجةِ أُفقيةٌ تمامًا، ومعاملَ الاحتكاكِ السكونيِّ بينَ الزلّاجةِ والثلجِ (0.15)، ومعاملَ الاحتكاكِ الحركيِّ بينهُما (0.10)، وتسارعَ السقوطِ الحرِّ ($10\ m/s^2$)، وبإهمالِ كتلةِ الزلاجةِ، فأحسبُ مقدارَ:

أ . القوةِ التي يلزمُ التأثير بها في الزلّاجةِ بحيثُ تكونُ على وشكِ الحركةِ.

ب. القوةِ التي يلزمُ التأثيرُ بها في الزلّاجةِ لتتحركَ بسرعةٍ متجهةٍ ثابتةٍ.

جـ. تسارعِ الزلّاجةِ إذا كانتِ القوةُ المحصلةُ المؤثرةُ فيها (20 N).

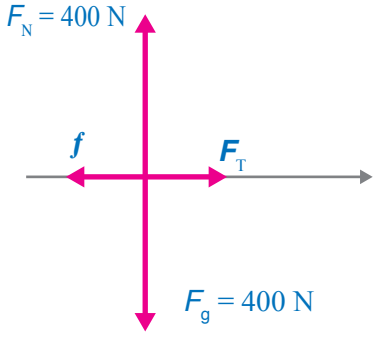
**المعطياتُ:**

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

**المطلوبُ:**

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

**الحلُّ:**




أرسمُ مخططَ الجسمِ الحرِّ للزلّاجةِ والصندوقِ معًا.

أ . مقدارُ القوةِ التي يلزمُ التأثيرُ بها في الزلّاجةِ بحيثُ تكونُ على وشكِ الحركةِ يساوي مقدارَ قوةِ الاحتكاكِ السكونيِّ العظمى ($f_{s,max}$)، ولحسابِها يلزمُ معرفةُ مقدارِ القوةِ العموديةِ، لذا؛ أطبّقُ القانونَ الثانيَ لنيوتن في اتجاهِ المحورِ ($y$)، معَ ملاحظةِ أنَّهُ لا توجدُ حركةٌ في اتجاههِ:

$$\sum F_y = ma_y = 0$$
$$F_N - F_g = 0$$
$$F_N = F_g = mg = (40)(10) = 400\ N$$

ثمَّ أحسبُ مقدارَ قوةِ الاحتكاكِ السكونيِّ العظمى، كما يأتي:

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

ب . لكَيْ تتحركَ الزلاجةُ بسرعةٍ متجهةٍ ثابتةٍ، يجبُ أنْ يكونَ مقدارُ قوةِ الشدِّ مساويًا لمقدارِ قوةِ الاحتكاكِ الحركيِّ.

$$\sum F_x = F_T - f_k = 0$$
$$F_T = f_k = \mu_k F_N = (0.10)(400) = 40\ N$$

أُلاحظُ أنَّ مقدارَ القوةِ اللازمةِ لجعلِ الزلّاجةِ على وشكِ الحركةِ أكبرُ منْ مقدارِ القوةِ اللازمةِ للمحافظةِ على حركتِها بسرعةٍ متجهةٍ ثابتةٍ.

جـ . لحسابِ مقدارِ تسارعِ الزلّاجةِ، أطبّقُ القانونَ الثانيَ لنيوتن في اتجاهِ المحور ($x$):

$$\sum F_x = ma$$

$$20 = 40 \times a$$

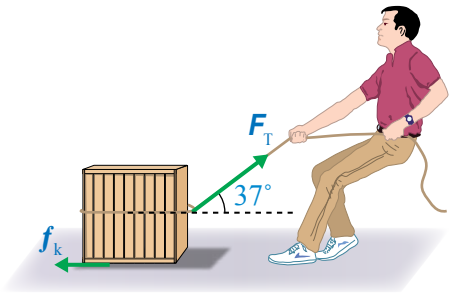
$$a = \frac{20}{40} = 0.5 \text{ m/s}^2$$

## المثالُ 8

يُسحبُ صندوقٌ كتلتهُ (50 kg) على أرضيةٍ أُفقيةٍ خشنةٍ بحبلٍ يَصنعُ زاويةَ (37°) على الأُفقيِّ، أنظرُ الشكلَ (21). إذا كانَ مقدارُ قوةِ الشدِّ في الحبلِ (200 N)، وتسارَعَ الصندوقِ بمقدارِ ($1.3 \text{ m/s}^2$)، والحبلُ مهملُ الكتلـةِ وغيرُ قابلٍ للاستطالةِ، و $g = 10 \text{ m/s}^2$، $\sin 37° = 0.6$، $\cos 37° = 0.8$، فأحسبُ مقدارَ:

أ . قوةِ الاحتكاكِ الحركيِّ المؤثرةِ في الصندوقِ.

ب. معاملِ الاحتكاكِ الحركيِّ بينَ الصندوقِ والأرضيةِ.



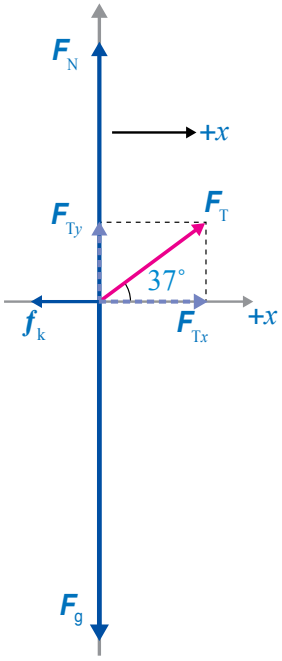

الشكلُ (21): سحبُ صندوقٍ على أرضيةٍ أُفقيةٍ خشنةٍ.

**المعطياتُ:**

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

**المطلوبُ:**

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




**الحلُّ:**

- أرسمُ مخططَ الجسمِ الحرِّ للصندوقِ.
- قبلَ البدءِ بحلِّ المسألةِ أحسبُ وزنَ الصندوقِ، ثمَّ أحلل قوةَ الشدِّ في الحبلِ إلى مركّبتيْها، كما هوَ موضحٌ في مخططِ الجسمِ الحرِّ، وعلى النحوِ الآتي:

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

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

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

أ . أطبّقُ القانونَ الثانيَ لنيوتن على الصندوقِ في اتجاهِ المحورِ $x$؛ لإيجادِ مقدارِ قوةِ الاحتكاكِ.

$$\sum F_x = ma$$

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

وبجعلِ $(f_k)$ موضوعَ القانونِ:

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

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

$$= 95 \text{ N}$$

مقدارُ قوةِ الاحتكاكِ الحركيِّ (95 N)، وتؤثرُ في عكسِ اتجاهِ حركةِ الصندوقِ.

ب . لحسابِ معاملِ الاحتكاكِ الحركيِّ، يلزمُ أولًا معرفةُ مقدارِ القوةِ العموديةِ، لذا؛ أطبّقُ القانونَ الثانيَ لنيوتن على الصندوقِ في اتجاهِ المحورِ $y$؛ لإيجادِ مقدارِها، معَ مراعاةِ أنَّهُ لا توجدُ حركةٌ على هذا المحورِ.

$$\sum F_y = 0$$

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

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

$$= 500 - 120$$

$$= 380 \text{ N}$$

أستخدمُ معادلةَ الاحتكاكِ الحركيِّ؛ لحسابِ مقدارِ معاملِ الاحتكاكِ، كما يأتي:

$$f_k = \mu_k F_N$$

$$\mu_k = \frac{f_k}{F_N}$$

$$= \frac{95}{380} = 0.25$$

الشكلُ (22): انزلاقُ رياضيٍّ على منحدرٍ ثلجيٍّ.

## المثالُ 9

يتزلجُ رياضيٌّ على منحدرٍ ثلجيٍّ يميلُ على الأفقيِّ بزاويةِ (25°)، كما هوَ موضحٌ 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 تسارعِهِ في الحالتينِ الآتيتينِ:

أ. إذا كانَ المنحدرُ الثلجيُّ أملسَ.

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

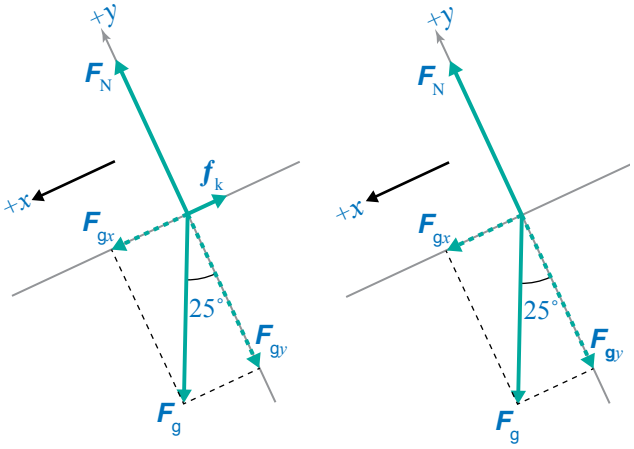
**المعطياتُ:**

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

**المطلوبُ:**

$a = ?$

**الحلُّ:**




- أرسمُ مخططَ الجسم الحرِّ للمتزلجِ في حالةِ المنحدرِ الأملسِ (أ)، والمنحدرِ الخشنِ (ب)، معَ اختيارِ المحورِ $x$ في اتجاهٍ يوازي المستوى المائلَ، والمحورُ $y$ عموديٌّ عليْهِ، مثلَما هوَ موضحٌ.
- قبلَ البدءِ بحلِّ المسألةِ أحلّلُ وزنَ المتزلج إلى مركّبتينِ متعامدتينِ: $F_{gx}$ و $F_{gy}$، مثلَما هوَ موضحٌ في مخططَيِ 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 (أ)، ثمَّ أُطبِّقُ القانونَ الثانيَ لنيوتن على المتزلجِ الرياضيِّ في اتجاهِ المحورِ $x$؛ لحسابِ مقدارِ تسارعِهِ:

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

ب. أنظرُ مخططَ الجسمِ الحرِّ (ب)، وأُلاحظُ أنَّهُ توجدُ قوةُ احتكاكٍ حركيٍّ تؤثرُ في عكسِ اتجاهِ انزلاقِ المتزلجِ. لذا؛ يلزمُ بدايةً حسابُ مقدارِ قوةِ الاحتكاكِ الحركيِّ، ومنْ أجلِ ذلكَ أحسبُ مقدارَ القوةِ العموديةِ المؤثرةِ في المتزلجِ بتطبيقِ القانونِ الثاني لنيوتن عليهِ في اتجاهِ المحورِ $y$، معَ مراعاةِ أنَّهُ لا توجدُ حركةٌ في اتجاهِ هذا المحورِ.

$$\sum F_y = 0$$
$$F_N - F_{gy} = 0$$
$$F_N = F_{gy} = 455 \text{ N}$$

ثمَّ أستخدمُ معادلةَ الاحتكاكِ الحركيِّ لحسابِ مقدارِ قوةِ الاحتكاكِ:

$$f_k = \mu_k F_N$$
$$= (0.10)(455)$$
$$= 45.5 \text{ N}$$

ينزلقُ المتزلجُ الرياضيُّ إلى أسفلِ المنحدرِ الثلجيِّ، ولحسابِ مقدارِ تسارعِه أطبّقُ القانونَ الثانيَ لنيوتن عليْهِ في اتجاهِ المحورِ $x$، معَ اعتبارِ الاتجاهِ الموجبِ إلى أسفلِ المنحدرِ.

$$\sum F_x = ma$$
$$F_{gx} - f_k = ma$$
$$a = \frac{F_{gx} - f_k}{m} = \frac{210 - 45.5}{50}$$
$$= 3.3 \text{ m/s}^2$$

أُلاحظُ أنَّ مقدارَ تسارعِ المتزلجِ الرياضيِّ أكبرُ في حالةِ المنحدرِ الأملسِ.

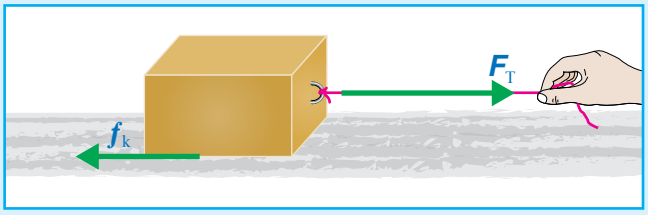
## تمرينٌ

أثَّرَتْ قُوَّةُ شدٍّ أفقيةٌ مقدارُها (200 N) في اتجاهِ اليمينِ، في صندوقٍ كتلتُهُ (50 kg)، يستقرُّ على سطحٍ أفقيٍّ خشنٍ، كما هو موضحٌ في الشكلِ (23). إذا علمتُ أنَّ معاملَ الاحتكاكِ الحركيِّ (0.3)، وتسارعَ السقوطِ الحرِّ ($10 \text{ m/s}^2$)، فأحسبُ مقدارَ:

أ. قوةِ الاحتكاكِ الحركيِّ المؤثرةِ في الصندوقِ.

ب. القوةِ المحصلةِ المؤثرةِ في الصندوقِ.

جـ. تسارُعِ الصندوقِ.




الشكلُ (23): صندوقٌ ينزلقُ على سطحٍ أفقيٍّ خشنٍ.

الشكلُ (24): انزلاقُ سيارةٍ على طريقٍ مغطًّى بالثلجِ والجليدِ.

**أُفكِّرُ:** عادةً تُلَفُّ جنازيرُ حولَ إطاراتِ السياراتِ، وبخاصةٍ سياراتُ الدفاعِ المدنيِّ في العواصفِ الثلجيةِ. بناءً على ما تعلمتُهُ في هذا الدرسِ، ما الهدفُ منْ وضعِ هذهِ الجنازيرِ حولَ إطاراتِ السياراتِ؟ أفسِّرُ إجابتي.

**الفيزياءُ والحياةُ:** تُصدرُ مديريتا الأمنِ العامِّ والدفاعِ المدنيِّ نشراتٍ توعويةً وتحذيراتٍ لسائقي المركباتِ عندَ تأثرِ المملكةِ بمنخفضٍ جويٍّ، منْ ضمنِها تحذيرُهُمْ منْ خطرِ انزلاقِ المركباتِ على الطرقاتِ عندَ سقوطِ الأمطارِ أو الثلوجِ؛ حيثُ تتكونُ طبقةٌ فاصلةٌ بينَ إطارِ السيارةِ (وهوَ مطاطٌ) وسطحِ الطريقِ، وهذا يقللُ منْ مقدارِ كلٍّ مِنْ: معاملِ الاحتكاكِ السكونيِّ ومعاملِ الاحتكاكِ الحركيِّ بينهُما؛ ما يؤدي إلى سهولةِ انزلاقِ إطاراتِ السيارةِ على الطريقِ، ويزيدُ المسافةَ اللازمةَ لإيقافِ السيارةِ، ويجعلُ قيادةَ السيارةِ والسيطرةَ عليها وتوجيهَها أمرًا صعبًا، خاصةً عندَ قيادتِها بتهوُّرٍ، وعدمِ الالتزامِ بالإرشاداتِ والشواخصِ المروريةِ، أنظرُ الشكلَ (24). لذا؛ يجبُ أخذُ هذهِ التحذيراتِ والإرشاداتِ بعينِ الاعتبارِ، وعدمُ قيادةِ السيارةِ إلا في حالةِ الضرورةِ القصوى في مثلِ هذهِ الظروفِ الجويةِ، وإذا لزم قيادتُها وجبَ أخذُ الحيطةِ والحذرِ، والقيادةُ بتمهُّلٍ، والتقيُّدُ بتوجيهاتِ الجهاتِ الرسميةِ المسؤولةِ وإرشاداتِها.

✓ **أتحقَّقُ:** إذا علمتُ أنَّ مقدارَ قوةِ الاحتكاكِ بينَ الخرسانةِ ونعلِ الحذاءِ المصنوعِ منَ المطاطِ أكبرُ منهُ بينَ الخرسانةِ والنعلِ المصنوعِ منَ الجلدِ، فأيَّ الحذاءينِ أختارُ للمشيِ في يومٍ ماطرٍ؟ أُفسِّرُ إجابتي.

**أبحثُ:** لعلمِ الفيزياءِ دورٌ مهمٌّ في عمليةِ التحقيقِ المروريِّ في الحوادثِ المروريةِ. أبحثُ في دورِ قسمِ التحقيقِ المروريِّ التابعِ لمديريةِ الأمنِ العامِّ في كيفيةِ تحديدِ السيارةِ أوِ السياراتِ المُسبِّبةِ لحادثٍ ما، والمعلوماتِ والبياناتِ التي يجمعُها مندوبُ الحوادثِ. وأُعدُّ عرضًا تقديميًّا أعرضهُ أمامَ طلبةِ الصفِّ.

## إيجابياتُ قوى الاحتكاكِ وسلبياتُها
## Advantages and Disadvantages of Friction Forces

لقوى الاحتكاكِ تطبيقاتٌ وآثارٌ كثيرةٌ في حياتِنا، بعضُها مفيدٌ وضروريٌّ، وبعضُها الآخرُ ضارٌّ ومزعجٌ لا بُدَّ منْ معالجتِهِ والتقليلِ منهُ.

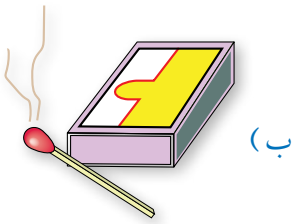
### إيجابياتُ قوى الاحتكاكِ Advantages of Friction Forces

منَ التطبيقاتِ والأنشطةِ التي يحتاجُ تنفيذُها وجودَ قوى الاحتكاكِ: حركةُ المركباتِ؛ فعندَ انعدامِ قوى الاحتكاكِ بينَ إطاراتِ المركبةِ وسطحِ الطريقِ، فإنَّ الإطاراتِ تدورُ في مكانِها، فتبقى المَركبةُ ساكنةً. ونحتاجُ إلى قوى الاحتكاكِ للكتابةِ على الورقِ والسبورةِ، وإشعالِ أعوادِ الثقابِ، والمشيِ، أنظرُ الشكلَ (25). فقوةُ الاحتكاكِ السكونيِّ تساعدُنا في المشيِ، وتغييرِ اتجاهِ حركتِنا؛ فعندَما أدفعُ بقدمي سطحَ الأرضِ إلى الخلفِ فإنَّ قوةَ الاحتكاكِ السكونيِّ بينهُما تؤثرُ بقوةٍ في قدمي إلى الأمامِ في اتجاهِ حركتي، وتمنعُ انزلاقَها نحوَ الخلفِ. وتتضحُ أهميةُ الاحتكاكِ السكونيِّ عندَ محاولةِ المشيِ على سطوحٍ ملساءَ أوْ زلقةٍ، حيثُ يصعبُ ذلكَ.

### سلبياتُ قوى الاحتكاكِ Disadvantages of Friction Forces

منَ الآثارِ السلبيةِ لقوى الاحتكاكِ: أنَّها تُسبِّبُ تآكلَ بعضِ المنتجاتِ التي نستخدمُها في حياتِنا اليوميةِ، مثلِ: الأحذيةِ، والملابسِ، وتُسبِّبُ تآكلَ بطانةِ مكابحِ المركباتِ. بالإضافةِ إلى أنَّها تعيقُ انزلاقَ الأجسامِ بعضِها فوقَ بعضٍ، وتُسبِّبُ تباطؤَها؛ ما يتطلبُ التأثيرَ فيها بقوةٍ أكبرَ لتحريكِها والمحافظةَ على استمراريةِ حركتِها مقارنةً بالقوةِ اللازمةِ لذلكَ على سطوحٍ ملساءَ. وتجري معالجةُ بعضِ هذهِ الآثارِ والتقليلُ منْها باستخدامِ العجلاتِ، والتزييتِ، والتشحيمِ، أنظرُ الشكلَ (26).

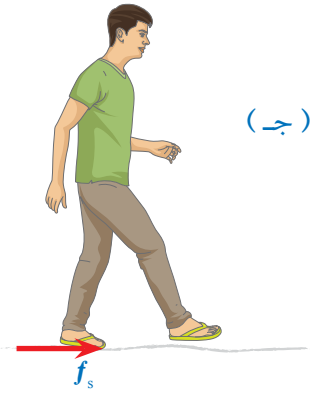
(أ)



(ب)



(جـ)




الشكلُ (25): قوى الاحتكاكِ ضروريةٌ: (أ) للكتابةِ على الورقِ، (ب) وإشعالِ عودِ الثقابِ، (جـ) والمشيِ.

**لماذا** لا يمكنُ المشيُ على أرضيةٍ زلقةٍ؟ أُفسِّرُ إجابتي.

(ب) (أ)

(د)

(جـ)

الشكلُ (26): عندَ استخدامِ العجلاتِ أصبحَ تحريكُ الصندوقِ في الشكلِ (ب) أسهلَ بكثيرٍ منْ تحريكِهِ في الشكلِ (أ). (جـ) تستخدمُ كراتُ البيليا (Ball Bearings) لتسهيلِ حركةِ أجزاءِ الآلاتِ وتقليلِ الاحتكاكِ. (د) يوضعُ الزيتُ في محركِ السيارةِ للتقليلِ من قوى الاحتكاكِ.

**هلْ** يلزمُ تشحيمُ كراتِ البيليا وتزييتُها؟ أفسِّرُ إجابتي.

**الفيزياءُ والطبُّ:** تسمّى المناطقُ التي تجمعُ اثنينِ أوْ أكثرَ منَ العظامِ في جسمِ الإنسانِ المفاصلَ (Joints)، معظمُ المفاصلِ تكونُ متحركةً؛ ما يسمحُ للعظامِ بالحركةِ. وأتوقّعُ أنَّهُ يوجدُ احتكاكٌ عندَ هذهِ المفاصلِ؛ لأنَّها تربطُ موادَّ صلبةً معًا. في الواقعِ تكونُ قوى الاحتكاكِ بينَ العظامِ في منطقةِ المفصلِ قليلةً جدًّا؛ لأنَّ سطوحَ العظامِ في منطقةِ المفصلِ مغطاةٌ بغضاريفَ، إضافةً إلى وجودِ غشاءٍ زلاليٍّ يفرزُ مائعًا لزجًا يسمّى السائلَ الزلاليَّ (Synovial Fluid) داخلَ المفصلِ، إذْ يُعدُّ هذا السائلُ بمنزلةِ مادةِ تشحيمٍ، يقللُ الاحتكاكَ، ويحمي العظامَ منَ التآكلِ.

عندَ تعرضِ المفصلِ للتلفِ يُستخدمُ مفصلٌ صناعيٌّ (Artificial Joint) مكانَهُ، يُصنعُ منَ الفولاذِ المقاومِ للصدأِ أوِ التيتانيومِ، أوِ البلاستيكِ. ولهذهِ المفاصلِ الصناعيةِ معاملاتُ احتكاكٍ صغيرةٌ جدًّا، تشبه المفاصلَ الطبيعيةَ تقريبًا، أنظرُ الشكلَ (27). وتُستخدمُ فيهِ موادُّ تشحيمٍ صناعيةٌ، مثلُ الموادِّ الهلاميةِ (Gels)؛ لتقليلِ الاحتكاكِ.

أيضًا توجدُ موادُّ لزجةٌ طبيعيةٌ (أوْ موادُّ تشحيمٍ Lubricants) في جسمِ الإنسانِ تقلّلُ منْ قوى الاحتكاكِ داخلَ الأعضاءِ أوْ بينَها. فمثلًا، يُساعدُ إفرازُ اللعابِ في عمليةِ البلعِ؛ إذ يُقلّلُ منَ احتكاكِ الموادِّ الغذائيةِ التي يجري تناولُها معَ جدرانِ البلعومِ والمريءِ، ويُسهّلُ انزلاقَها. كما يُساعدُ وجودُ مخاطٍ لزجٍ (Slippery Mucus) بين أعضاءِ الجسمِ على حريةِ حركتِها نسبةً إلى بعضِها في أثناءِ حركةِ الإنسانِ، وفي أثناءِ عمليتيْ التنفسِ، وخفقانِ القلبِ.

✓ **أتحقَّقُ:** أذكرُ ثلاثَ إيجابياتٍ لقوةِ الاحتكاكِ، وثلاثَ سلبياتٍ.

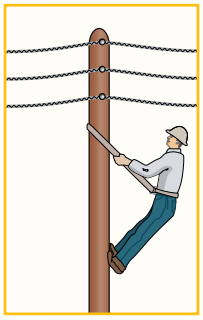
الشكلُ (27): صورةٌ بالأشعةِ السينيةِ لمفصلِ ركبةٍ ملتهبٍ مصابٍ بهشاشةِ عظامٍ، ومفصلِ ركبةٍ صناعيٍّ.

**أبحثُ:** لقوى الاحتكاكِ آثارٌ إيجابيةٌ، وآثارٌ سلبيةٌ. أبحثُ في مصادرِ المعرفةِ الموثوقةِ والمتاحةِ ومنها شبكةُ الإنترنتِ عن المزيدِ منْ إيجابياتِ قوى الاحتكاكِ وسلبياتِها، وعنْ كيفيةِ معالجةِ سلبياتِها وتقليلِ آثارِها. وأُعدُّ عرضًا تقديميًّا أعرضهُ أمامَ طلبةِ الصفِّ.

# مراجعةُ الدرسِ

1. **الفكرةُ الرئيسةُ:** ما المقصودُ بكلٍّ منْ: قوةِ الشدِّ، القوةِ العموديةِ، قوةِ الاحتكاكِ؟ وهلْ وجودُ الاحتكاكِ إيجابيٌّ أمْ سلبيٌّ؟ أُفسِّرُ إجابتي.

2. **أُحلِّلُ وأستنتجُ:** يوضّحُ الشكلُ المجاورُ تسلُّقَ عاملِ صيانةٍ في شركةِ الكهرباءِ لعمودِ كهرباءَ؛ إذْ ينتعلُ حذاءً بمواصفاتٍ خاصةٍ، وأيضًا يستخدمُ حزامًا أحدُ طرفيْهِ ملتفٌّ حولَ خصرِهِ، وطرفهُ الآخرُ ملتفٌّ حولَ العمودِ.



أ. أرسمُ مخططَ الجسمِ الحرِّ لعاملِ الصيانةِ، مسمّيًا القوى المؤثرةَ فيهِ.

ب. **أُفسِّرُ:** هلْ يعتمدُ هذا العاملُ في صعودِهِ العمودَ على قوةِ الاحتكاكِ السكونيِّ أمِ الحركيِّ؟ أُفسِّرُ إجابتي.

جـ. أُحددُ موقعيْنِ في الشكلِ تؤثرِ فيهما قوةُ الاحتكاكِ في العاملِ، وأوضِّحُ أهميتَهُما.

3. **أُطبِّقُ:** يبينُ الشكلُ المجاورُ ميزانًا نابضيًّا معلقًا في نهايتِهِ ثقلٌ ($m$)، كتلتهُ (10 kg). إذا علمتُ أنَّ $g = 10\ m/s^2$، فأجدُ قراءةَ الميزانِ في الحالاتِ الآتيةِ:

أ. إذا كانَ الثقلُ ساكنًا.

ب. إذا تحركَ الثقلُ والميزانُ إلى أعلى بسرعةٍ متجهةٍ ثابتةٍ.

جـ. إذا تحركَ الثقلُ والميزانُ إلى أعلى بتسارعٍ مقدارهُ ($1\ m/s^2$).

د. إذا تحركَ الثقلُ والميزانُ إلى أسفلَ بتسارعٍ مقدارهُ ($1\ m/s^2$).

4. **أحسبُ:** صندوقٌ كتلتهُ (30 kg). أحسبُ مقدارَ القوةِ العموديةِ المؤثرةِ فيهِ عندَما يكونُ مستقرًّا على:

أ. سطحٍ أفقيٍّ.

ب. مستوًى مائلٍ يميلُ عنِ الأفقِ بزاويةٍ ($20°$).

5. **التفكيرُ الناقدُ:** في أثناءِ دراستي وزميلتي شيماءَ لموضوعِ قوى الاحتكاكِ، قالتْ: «إنَّ زيادةَ عرضِ إطارِ السيارةِ يزيدُ منْ قوةِ الاحتكاكِ المؤثرةِ فيها؛ لذا ينبغي على السائقينَ استخدامُ إطاراتٍ أقلَّ عَرضًا؛ لتقليلِ احتكاكِها بالطريقِ». أُناقشُ صحَّةَ قولِ شيماءَ بناءً على ما تعلمتُهُ في هذا الدرسِ.

# القوةُ المركزيةُ
Centripetal Force

**الفكرةُ الرئيسةُ:**

تؤثرُ قوةٌ مركزيةٌ في الأجسامِ التي تتحركُ حركةً دائريةً. وللحركةِ الدائريةِ تطبيقاتٌ كثيرةٌ في حياتِنا اليوميةِ.

**نتاجاتُ التعلُّمِ:**

- أستنتجُ أنَّ الحركةَ الدائريةَ لجسمٍ تتطلبُ تأثيرَ قوةٍ فيهِ باستمرارٍ، نحوَ مركزِ المسارِ الدائريِّ.
- أستقصي العواملَ التي يعتمدُ عليْها مقدارُ القوةِ المركزيةِ.
- أُطبِّقُ بحلِّ مسائلَ على القوةِ المركزيةِ.

**المفاهيمُ والمصطلحاتُ:**

القوةُ المركزيةُ Centripetal Force

## القوةُ المركزيةُ والحركةُ الدائريةُ المنتظمةُ
## Centripetal Force and Uniform Circular Motion

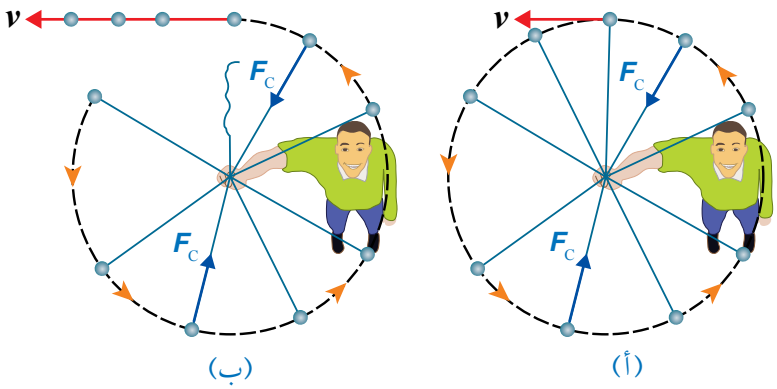
درستُ في الوحدةِ (2) الحركةَ الدائريةَ المنتظمةَ، وعرفتُ أنَّها حركةُ جسمٍ بسرعةٍ ثابتةِ المقدارِ في مسارٍ دائريٍّ نصفُ قطرهِ ($r$) حولَ محورٍ، ويُحدَّدُ موقعهُ بالنسبةِ إلى هذا المحورِ (محورِ الدورانِ). وعرفتُ أنَّ متجهَ السرعةِ المماسيةِ عندَ أيَّةِ نقطةٍ على المسارِ يكونُ مماسيًّا للمسارِ عندَ تلكَ النقطةِ، ومتعامدًا معَ متجهِ الموقعِ الخاصِّ بِها.

هلْ يلزمُ تأثيرُ قوةٍ محصلةٍ في الجسمِ؛ لكَيْ يتحركَ حركةً دائريةً منتظمةً؟

للإجابةِ عنْ ذلكَ؛ أنظرُ سياراتِ السباقِ الموضحةَ في الشكلِ (28) عندَ المنعطفِ. أُلاحظُ أنَّ كلَّ سيارةٍ تتحركُ في مسارٍ منحنٍ عندَ المنعطفِ، وهوَ يُمثِّلُ جزءًا منْ دائرةٍ، وبحسبِ القانونِ الأولِ لنيوتن، تتحركُ السياراتُ في مسارٍ مستقيمٍ بسرعةٍ ثابتةٍ ما لمْ تؤثرْ فيها قوةٌ محصلةٌ، وبما أنَّ مساراتِها غيرُ مستقيمةٍ؛ فهيَ تتأثرُ بقوةٍ محصلةٍ.

سأدرسُ حركةَ إحدى هذهِ السياراتِ عندَ المنعطفِ، وأفترضُ أنَّها تتحركُ بسرعةٍ مماسيةٍ ثابتةٍ مقدارًا. إنَّ اتجاهَ هذهِ السرعةِ يتغيرُ بشكلٍ مستمرٍّ، ويدلُّ تغيرُها على وجودِ تسارعٍ، وبحسبِ القانونِ الثاني لنيوتن، فإنَّ وجودَ التسارعِ يعني وجودَ قوةٍ محصلةٍ تؤثرُ فيها.

الشكلُ (28): لكَيْ تتحركَ السياراتُ في المنعطفِ، يلزمُ تأثيرُ قوةٍ محصلةٍ فيها نحوَ مركزِ المسارِ الدائريِّ الذي يُشكِّلُهُ المنعطفُ.




الشكلُ (29): منظرٌ علويٌّ لكرةٍ مربوطةٍ بنهايةِ خيطٍ تتحركُ حركةً دائريةً منتظمةً في مسارٍ دائريٍّ أُفقيٍّ.
(أ) تؤثرُ قوةٌ مركزيةٌ في الكرةِ نحوَ مركزِ مسارِها الدائريِّ. (ب) عندَ انقطاعِ الخيطِ تنعدمُ القوةُ المركزيةُ، وتتحركُ الكرةُ في اتجاهِ سرعتِها المماسيةِ للمسارِ الدائريِّ عندَ نقطةِ انقطاعِ الخيطِ.

## القوةُ المركزيةُ ومنشؤُها Centripetal Force and its Origin

يوضِحُ الشكلَ (29/ أ) كرةً كتلتُها ($m$)، مربوطةً بنهايةِ خيطٍ طولهُ ($l$)، تتحركُ حركةً دائريةً منتظمةً في مسارٍ دائريٍّ أُفقيٍّ تقريبًا، بسرعةٍ مماسيةٍ ثابتةٍ مقدارًا ($v$). بحسبِ القانونِ الأولِ لنيوتن تميلُ الكرةُ إلى الحركةِ في مسارٍ مستقيمٍ مماسيٍّ للمسارِ الدائريِّ؛ بسببِ قصورِها الذاتيِّ. وللمحافظةِ على استمرارِ حركتِها حركةً دائريةً منتظمةً يلزمُ تأثيرُ قوةٍ محصلةٍ فيها نحوَ مركزِ المسارِ الدائريِّ، يكونُ اتجاهُها عموديًّا على اتجاهِ سرعتِها المماسيةِ، تُسمّى **القوةَ المركزيةَ Centripetal Force**، رمزُها ($F_C$)، تُسبِّبُ تغيُّرًا في سرعتِها المتجهةِ، أي تُكسبُها تسارعًا مركزيًّا. وإذا انقطعَ الخيطُ عندَ نقطةٍ معينةٍ على المسارِ الدائريِّ ستتحركُ الكرةُ في مسارٍ مستقيمٍ مماسيًّا للمسارِ الدائريِّ عندَ تلكَ النقطةِ، بحسبِ القانونِ الأولِ لنيوتن. أنظرُ الشكلَ (29/ ب).

والسؤالُ: هلِ القوةُ المركزيةُ نوعٌ جديدٌ منْ أنواعِ القوى؟ وما منشأُ هذهِ القوةِ؟ إنَّ القوةَ المركزيةَ ليستْ نوعًا جديدًا منَ القوى، وإنَّما هيَ اسمٌ يُطلقُ على القوةِ المحصلةِ المؤثرةِ عموديًّا على متجهِ السرعةِ المماسيةِ لجسمٍ متحركٍ في مسارٍ دائريٍّ.

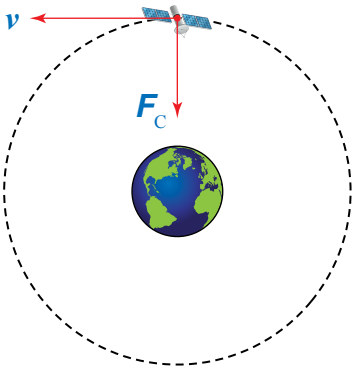
أما أصلُ هذهِ القوةِ ومنشؤُها فيعتمدُ على النظامِ قيدَ الدراسةِ. فمثلًا، القوةُ المركزيةُ المسبِّبةُ لدورانِ القمرِ الصناعيِّ في مدارٍ حولَ الأرضِ ناتجةٌ عنْ قوةِ تجاذبٍ كتليٍّ بينَ القمرِ والأرضِ.

أصممُ باستخدامِ برنامجِ السكراتشِ (Scratch) عرضًا يوضحُ القوةَ المركزيةَ ومنشأَها، ثمَّ أشاركهُ زملائي/ زميلاتي في الصفِّ.

ويكونُ اتجاهُ سرعةِ القمرِ الصناعيِّ عندَ أيِّ موقعٍ في مسارهِ في اتجاهِ المماسِّ لذلكَ الموقعِ. أنظرُ الشكلَ (30) الذي يوضحُ متجهَيْ السرعةِ المماسيةِ والقوةِ المركزيةِ.

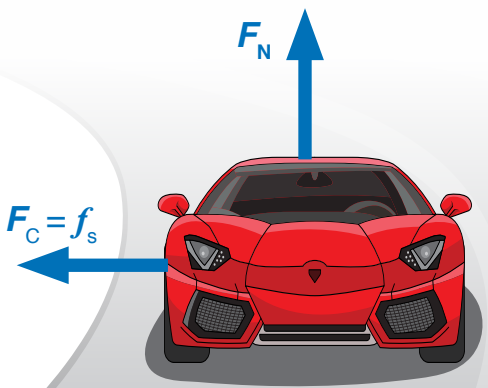
والقوةُ المركزيةُ المسبِّبةُ لدورانِ الإلكتروناتِ حولَ النواةِ ناتجةٌ عنْ قوةِ جذبٍ كهرسكونيةٍ بينَ النواةِ والإلكتروناتِ. وقوى الشدِّ في الحبالِ والأسلاكِ المتصلةِ بأجسامٍ تتحركُ حركةً دائريةً مثالٌ على قوًى مركزيةٍ. والقوةُ المركزيةُ المؤثرةُ في الملابسِ الموضوعةِ في مجفِّفةِ الملابسِ ناتجةٌ عنِ القوةِ العموديةِ التي تؤثرُ بها جدرانُ المُجفِّفةِ فيها.

إنَّ القوةَ المركزيةَ التي تمنعُ سيارةَ السباقِ الموضحةَ في الشكلِ (31) منَ الانزلاقِ خارجَ المنعطفِ خلالَ مسارِ السباقِ، هيَ قوةٌ جانبيةٌ منشؤُها قوةُ الاحتكاكِ السكونيِّ بينَ إطاراتِها وسطحِ الطريقِ، تؤثرُ نحوَ مركزِ الدائرةِ التي يُعدُّ المنعطفُ جزءًا منْها. ويستقصي سائقو سياراتِ السباقِ ومصمِّموها القيمَ القصوى لهذهِ القوةِ للحصولِ على أكبرِ سرعاتٍ ممكنةٍ عندَ المنعطفاتِ؛ للمنافسةِ على صدارةِ السباقاتِ. وعندَ انعدامِ قوةِ الاحتكاكِ السكونيِّ، كأنْ يكونَ الطريقُ مغطًّى بالجليدِ أوِ الزيتِ، فإنَّهُ وبحسبِ القانونِ الأولِ لنيوتن في الحركةِ سوفَ تتحركُ السيارةُ بسرعةٍ ثابتةٍ مقدارًا في مسارٍ مستقيمٍ مماسيٍّ للمسارِ الدائريِّ عندَ موقعِ انعدامِ القوةِ المركزيةِ.




الشكلُ (30): القوةُ المركزيةُ هيَ قوةُ التجاذبِ الكتليِّ بينَ الأرضِ والقمرِ الصناعيِّ، وتؤثرُ عموديًّا على اتجاهِ سرعةِ القمرِ.

✓ **أتحقَّقُ:** ما القوةُ المركزيةُ؟ وهلِ القوةُ المركزيةُ نوعٌ جديدٌ منَ القوى؟ أُفسِّرُ إجابتي.




الشكلُ (31): القوةُ المركزيةُ هيَ قوةُ الاحتكاكِ السكونيِّ بينَ إطاراتِ السيارةِ وسطحِ الطريقِ، وتؤثرُ نحوَ مركزِ المسارِ الدائريِّ، عموديًّا على اتجاهِ سرعةِ السيارةِ.

## حسابُ القوةِ المركزيةِ Calculating Centripetal Force

يُكتبُ القانونُ الثاني لنيوتن في الحركةِ في حالِ ثباتِ الكتلةِ في الصورةِ:

$$\sum \boldsymbol{F} = m\boldsymbol{a}$$

وفي حالةِ الحركةِ الدائريةِ المنتظمةِ، فإنَّ القوةَ المحصلةَ نحوَ مركزِ الدورانِ تساوي القوةَ المركزيةَ ($\sum F = F_C$)؛ لذا يُمكنُ كتابةُ معادلةِ حسابِ مقدارِ القوةِ المركزيةِ المؤثِّرةِ في جسمٍ يتحركُ حركةً دائريةً منتظمةً في مسارٍ دائريٍّ نصفُ قطرهِ ($r$)، وبسرعةٍ مماسيةٍ ($v$)، وتسارعٍ مركزيٍّ ($a_C$)، كما يأتي:

$$F_C = ma_C = m\frac{v^2}{r}$$

ويكونُ مقدارُ القوةِ المركزيةِ ثابتًا في الحركةِ الدائريةِ المنتظمةِ، واتجاهُها عموديًّا على متجهِ السرعةِ المماسيةِ. ولاستقصاءِ العواملِ التي يعتمدُ عليْها مقدارُ القوةِ المركزيةِ اللازمِ التأثيرُ بها في جسمٍ لكَيْ يتحركَ حركةً دائريةً منتظمةً؛ أُنفِّذُ التجربةَ الإثرائيـةَ (القوَّةُ المركزيـةُ في الحركةِ الدائريةِ المنتظمةِ) الواردةَ في كتابِ الأنشطـةِ والتجاربِ العمليةِ.

واعتمادًا على معادلةِ حسابِ القوةِ المركزيةِ، يُمكنُ التوصلُ إلى أنَّ مقدارَ القوةِ المركزيةِ المؤثرةِ في جسمٍ كتلتهُ ($m$) يتحركُ حركةً دائريةً منتظمةً- يعتمدُ على:

أ. نصفِ قطرِ المسارِ الدائريِّ عندَ ثباتِ مقدارِ السرعةِ المماسيةِ؛ حيثُ يلزمُ التأثيرُ بقوةٍ مركزيةٍ أكبرَ لجعلِ الجسمِ يتحركُ في مسارٍ دائريٍّ نصفُ قطرهِ أصغرُ. ففي الشكلِ (29)، يزدادُ مقدارُ القوةِ المركزيةِ اللازمةِ لحركةِ الكرةِ في مسارٍ دائريٍّ أُفقيٍّ بنقصانِ نصفِ قطرِ المسارِ الدائريِّ عندَ ثباتِ مقدارِ السرعةِ المماسيةِ. وبما أنَّ قوةَ الشدِّ في الخيطِ هيَ القوةُ المركزيةُ، وتوجدُ قيمةٌ قصوى لمقدارِ قوةِ الشدِّ التي يتحملُها الخيطُ قبلَ أنْ ينقطعَ، فيكونُ هنالكَ حدودٌ لنصفِ قطرِ المسارِ.

ب. مربعِ مقدارِ السرعةِ المماسيةِ عندَ ثباتِ نصفِ قطرِ المسارِ الدائريِّ، حيثُ يلزمُ التأثيرُ بقوةٍ مركزيةٍ أكبرَ لجعلِ الجسمِ يتحركُ في مسارٍ دائريٍّ بسرعةٍ أكبرَ. ففي الشكلِ (29)، يزدادُ مقدارُ القوةِ المركزيةِ اللازمةِ لحركةِ الكرةِ في المسارِ الدائريِّ الأُفقيِّ بزيادةِ مقدارِ سرعتِها المماسيةِ عندَ ثباتِ نصفِ قطرِ مسارِها الدائريِّ، ويكونُ هنالكَ حَدودٌ لمقدارِ السرعةِ المماسيةِ.

✓ **أتحقَّقُ:** علامَ يعتمدُ مقدارُ القوةِ المركزيةِ اللازمِ التأثيرُ بِها في جسمٍ يتحركُ حركةً دائريةً منتظمةً؟

**أُفكِّرُ:** عندَما يجلسُ شخصٌ في سيارةٍ تتحركُ خلالَ منعطفٍ حادٍّ، فإنَّهُ يشعرُ أنَّهُ توجدُ قوةٌ تدفعهُ إلى خارجِ المنعطفِ نحوَ بابِ السيارةِ، حيثُ يُسمّيها بعضُ الأشخاصِ قوةً طاردةً مركزيةً Centrifugal Force. وعندَما تُدوِّرُ كرةً مربوطةً بنهايةِ خيطٍ في مسارٍ دائريٍّ أُفقيٍّ تشعرُ أنَّهُ توجدُ قوةٌ تؤثرُ فيها خارجَ المسارَ. هلْ هذهِ القوةُ حقيقيةٌ، أمْ قوةٌ وهميةٌ؟ أُفسِّرُ إجابتي.

**ملاحظةٌ:** يُساعدُ رسمُ مخططِ الجسمِ الحرِّ لراكبِ السيارةِ أوِ الكرةِ في استقصاءِ حقيقةِ هذهِ القوةِ.

## المثالُ 10

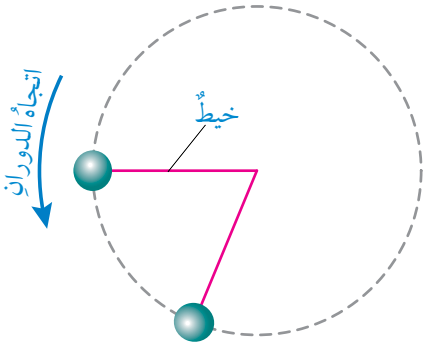
كرةٌ كتلتُها (50 g) مربوطةٌ في نهايةِ خيطٍ طولهُ (100 cm)، تتحركُ حركةً دائريةً منتظمةً في مسارٍ دائريٍّ أفقيٍّ، كما هوَ موضحٌ في الشكلِ (32). فإذا علمتُ أنَّ الزمنَ الدوريَّ للكرةِ (0.5 s)، فأحسبُ مقدارَ:

أ . سرعتِها المماسيةِ.

ب . تسارعِها المركزيِّ.

جـ. القوةِ المركزيةِ المؤثرةِ فيها.

د . قوةِ الشدِّ في الخيطِ.




الشكلُ (32): منظرٌ علويٌّ لكرةٍ مربوطةٍ في نهايةِ خيطٍ.

**المعطياتُ:**

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

**المطلوبُ:**

$$v = ?,\ a_C = ?,\ F_C = ?,\ F_T = ?$$

**الحلُّ:**

أ . لإيجادِ مقدارِ السرعةِ المماسيةِ أستخدمُ العلاقةَ الآتيةَ، علمًا بأنَّ طولَ المسارِ الدائريِّ يساوي $(2\pi r)$:

$$v = \frac{2\pi r}{\text{T}}$$

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

ب . لإيجادِ مقدارِ التسارعِ المركزيِّ أستخدمُ العلاقةَ الآتيةَ:

$$a_C = \frac{v^2}{r}$$

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

جـ . لإيجادِ مقدارِ القوةِ المركزيةِ أستخدمُ العلاقةَ الآتيةَ:

$$F_C = m\,a_C$$

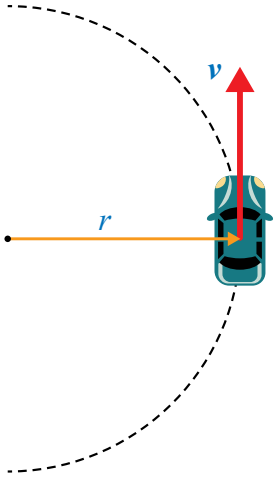
$$= (0.05)(158.8)$$

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

د . قوةُ الشدِّ في الخيطِ هي نفسُها القوةُ المركزيةُ:

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

## المثالُ 11




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

تتحركُ سيارةٌ كتلتُها ($1.5 \times 10^3$ kg) في مسارٍ دائريٍّ نصفُ قطرِهِ (50 m) بسرعةٍ ثابتةٍ مقدارُها (15 m/s)، كما هوَ موضحٌ في الشكلِ (33). إذا كانَ معاملُ الاحتكاكِ السكونيِّ بينَ إطاراتِ السيارةِ وسطحِ الطريقِ (0.8)، وسطحُ الطريقِ أُفقيٌّ، فأحسبُ مقدارَ:

أ . التسارعِ المركزيِّ للسيارةِ.

ب . القوةِ المركزيةِ المؤثرةِ في السيارةِ.

جـ. أكبرِ سرعةٍ يمكنُ أنْ تتحركَ بها السيارةُ منْ دونِ أنْ تنزلقَ.

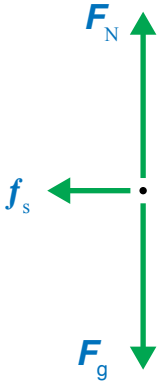
**المعطياتُ:**

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

**المطلوبُ:**

$$a_C = ?, F_C = ?, v_{max} = ?$$

**الحلُّ:**




بدايةً، أرسمُ مخططَ الجسمِ الحرِّ للسيارةِ، حيثُ تؤثرُ فيها القوى الآتيةُ: وزنُها ($F_g$) رأسيًّا إلى أسفلَ، والقوةُ العموديةُ ($F_N$) التي يؤثِّرُ بِها سطحُ الطريقِ الأُفقيُّ في السيارةِ وتكونُ رأسيًّا إلى أعلى، وقوةُ الاحتكاكِ السكونيِّ ($f_s$) بينَ إطاراتِ السيارةِ وسطحِ الطريقِ، وتكونُ نحوَ مركزِ المسارِ الدائريِّ، وقوةُ دفعِ محركِ السيارةِ إلى الأمامِ في اتجاهِ الحركةِ، وقوةُ احتكاكٍ حركيٍّ بينَ السيارةِ والهواءِ في عكسِ اتجاهِ الحركةِ. ورُسمتِ القوى المؤثرةُ عموديًّا على اتجاهِ الحركةِ فقطْ في مخططِ الجسمِ الحرِّ للتبسيطِ.

أ . لإيجادِ مقدارِ التسارعِ المركزيِّ للسيارةِ؛ أستخدمُ العلاقةَ الآتيةَ:

$$a_C = \frac{v^2}{r} = \frac{(15)^2}{50} = \frac{225}{50}$$

$$= 4.5 \text{ m/s}^2$$

ب . لإيجادِ مقدارِ القوةِ المركزيةِ المؤثرةِ في السيارةِ؛ أستخدمُ العلاقةَ الآتيةَ:

$$F_C = ma_C = (1.5 \times 10^3)(4.5)$$

$$= 6.75 \times 10^3 \text{ N}$$

جـ. لإيجادِ مقدارِ أكبرِ سرعةٍ؛ يجبُ بدايةً حسابُ قوةِ الاحتكاكِ السكونيِّ العظمى المؤثرةِ في السيارةِ، ومنْ أجلِ ذلكَ يجبُ إيجادُ القوةِ العموديةِ المؤثرةِ في السيارةِ معَ ملاحظةِ أنَّ سطحَ الطريقِ أفقيٌّ. لذا؛ أطبق القانونَ الثانيَ لنيوتن في اتجاهِ المحورِ $y$، معَ ملاحظةِ أنَّهُ لا توجدُ حركةٌ في اتجاههِ.

$$\sum F_y = ma_y = 0$$

$$F_N - F_g = 0$$

$$F_N = F_g = mg = (1.5 \times 10^3)(10)$$

$$= 1.5 \times 10^4 \text{ N}$$

ثمَّ أحسبُ مقدارَ قوةِ الاحتكاكِ السكونيِّ العظمى المؤثرةِ في السيارةِ، وهيَ منشأُ القوةِ المركزيةِ.

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

$$= 1.2 \times 10^4 \text{ N} = F_C$$

سوفَ تتحركُ السيارةُ في المسارِ الدائريِّ بأكبرِ سرعةٍ ممكنةٍ إذا كانتْ قوةُ الاحتكاكِ السكونيِّ العظمى المؤثرةُ فيها مساويةً للقوةِ المركزيةِ؛ أيْ أنَّ:

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

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

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

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

## تمرينٌ

1. في المثالِ 10، أحسبُ مقدارَ أكبرِ سرعةٍ مماسيةٍ يُمكنُ أنْ تتحركَ بِها الكرةُ إذا علمتُ أنَّ مقدارَ أكبرِ قوةِ شدٍّ يتحملُها الخيطُ قبلَ أنْ ينقطعَ تُساوي (10 N).
2. سيارةٌ كتلتُها ($1.5 \times 10^3$ kg)، تتحركُ في مسارٍ دائريٍّ نصفُ قطرهِ (90 m) بسرعةٍ ثابتةٍ مقدارُها (50 km/h). إذا كانَ معاملُ الاحتكاكِ السكونيِّ بينَ إطاراتِ السيارةِ وسطحِ الطريقِ (0.6)، وسطحُ الطريقِ أفقيٌّ، فأحسبُ مقدارَ:
   أ. القوةِ المركزيةِ المؤثرةِ في السيارةِ.
   ب. أكبرِ سرعةٍ يمكنُ أنْ تتحركَ بِها السيارةُ على هذا الطريقِ منْ دونِ أنْ تنزلقَ.

# مراجعةُ الدرسِ

1. **الفكرةُ الرئيسةُ:** ما المقصودُ بالقوةِ المركزيةِ؟ وهلْ هيَ نوعٌ جديدٌ منَ القوى؟ أُفسِّرُ إجابتي.
2. **أستخدمُ المتغيراتِ:** متوسطُ نصفِ قطرِ مدارِ القمرِ حولَ الأرضِ ($3.8 \times 10^8$ m) تقريبًا، وسرعتهُ المماسيةُ المتوسطةُ ($1.0 \times 10^3$ m/s)، وكتلتهُ ($7.3 \times 10^{22}$ kg) تقريبًا.
   أ. **أحسبُ** زمنَهُ الدوريَّ في مدارِهِ.
   ب. **أحسبُ** مقدارَ تسارعِهِ المركزيِّ.
   جـ. ما منشأُ القوةِ المركزيةِ المؤثرةِ فيهِ، واللازمةِ لدورانِهِ في مدارِهِ؟
   د. **أحسبُ** مقدارَ القوةِ المركزيةِ المؤثرةِ فيهِ.
3. **أستخدمُ المتغيراتِ:** سيارةٌ كتلتُها ($1.1 \times 10^3$ kg)، تتحركُ بسرعةِ (12 m/s) في منعطفٍ نصفُ قطرِهِ (25 m).
   أ. **أحسبُ** مقدارَ التسارعِ المركزيِّ للسيارةِ.
   ب. **أحسبُ** مقدارَ القوةِ المركزيةِ المؤثرةِ في السيارةِ.
   جـ. ما منشأُ القوةِ المركزيةِ المؤثرةِ في السيارةِ؟
   د. **أحسبُ** مقدارَ أكبرِ سرعةٍ مماسيةٍ يمكنُ أنْ تتحركَ بِها السيارةُ في هذا المنعطفِ؛ إذا كانَ مقدارُ قوةِ الاحتكاكِ السكونيِّ العظمى المؤثرةِ نحوَ مركزِ المنعطفِ (8 kN).
4. **أحسبُ:** قمرٌ صناعيٌّ كتلتهُ ($5.5 \times 10^2$ kg)، يدورُ حولَ الأرضِ على ارتفاعِ ($2.1 \times 10^3$ km) منْ سطحِ الأرضِ. إذا كانَ الزمنُ الدوريُّ للقمرِ ساعتينِ وتسعَ دقائقَ، ونصفُ قطرِ الأرضِ ($6.38 \times 10^3$ km)، فأحسبُ مقدارَ:
   أ. السرعةِ المماسيةِ للقمرِ.
   ب. القوةِ المركزيةِ المؤثرةِ في القمرِ.
5. **أُصدرُ حُكمًا:** في أثناءِ دراستي وزميلتي فاتنَ لموضوعِ القوةِ المركزيةِ، قالتْ: «يجبُ على سائقِ سيارةِ السباقِ التي تتحركُ على طريقٍ أُفقيٍّ لمنعطفٍ – زيادةُ مقدارِ سرعةِ السيارةِ؛ لزيادةِ مقدارِ القوةِ المركزيةِ المؤثرةِ فيها، وبالتالي المحافظةُ على استقرارِها وعدمِ انزلاقِها». أُناقشُ صحةَ قولِ فاتنَ.

# المنعطفاتُ المائلةُ Banked Turns

تصمَّمُ المنعطفاتُ الحادَّةُ في مساراتِ سباقاتِ الدراجاتِ والسياراتِ؛ بحيثُ تكونُ مائلةً. والطرقُ العامةُ، أيضًا تُصمَّمُ بحيثُ تتضمَّنُ قدرًا منَ الميلانِ عندَ المنعطفاتِ، خاصةً الخطرةَ منْها. فما أهميةُ هذا التصميمِ؟

عندَما تدخلُ سيارةٌ منعطفًا طريقُهُ أفقيٌّ فإنَّ قوةَ الاحتكاكِ السكونيِّ الجانبيةَ بينَ إطاراتِها وسطحِ الطريقِ توفِّرُ القوةَ المركزيةَ اللازمةَ لحركتِها فيهِ دونَ أنْ تنزلقَ خارجَ المنعطفِ. فلا يمكنُ أنْ تتحركَ السيارةُ في منعطفٍ أُفقيٍّ إلا بوجودِ قوةِ احتكاكٍ جانبيةٍ تؤثرُ نحوَ مركزِ المنعطفِ.

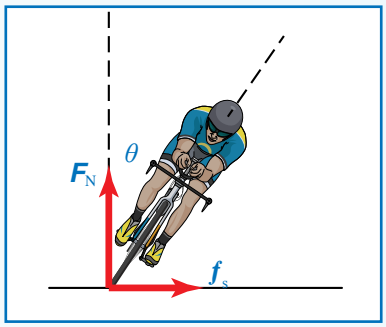
كذلكَ عندَما تدخلُ دراجةٌ هوائيةٌ منعطفًا، فإنَّ راكبَها يديرُ مقودَها لبدءِ الاستدارةِ في المنعطفِ، فتوفِّرُ قوةُ الاحتكاكِ الجانبيةُ القوةَ المركزيةَ نحوَ مركزِ المسارِ الدائريِّ الذي يُشكِّلُهُ المنعطفُ.

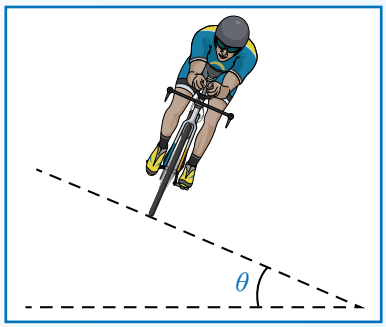
إذا زادتْ سرعةُ السيارةِ أوِ الدراجةِ في المنعطفِ يزدادُ مقدارُ القوةِ المركزيةِ اللازمةِ لإبقائِها داخلَهُ، وضمانِ عدمِ انزلاقِها خارجَهُ. وإذا زادتْ سرعتُها بحيثُ أصبحتِ القوةُ المركزيةُ اللازمةُ لإبقائِها داخلَ المنعطفِ أكبرَ منَ القيمةِ العظمى لقوةِ الاحتكاكِ السكونيِّ الجانبيةِ، فإنَّها ستنزلقُ خارجَ المنعطفِ، وقدْ يسقطُ راكبُ الدراجةِ. منْ أجلِ ذلكَ تُصمَّمُ المنعطفاتُ بشكلٍ مائلٍ، فما فائدةُ ذلكَ؟

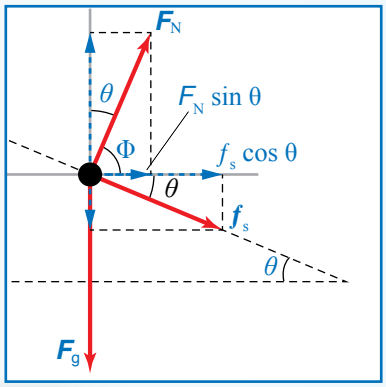
عندَ دخولِ دراجةٍ منعطفًا يميلُ بزاويةٍ (θ) على الأفقيِّ، فإنَّ القوةَ العموديةَ المؤثرةَ فيها، لها مركَّبةٌ أفقيةٌ نحوَ مركزِ المسارِ الدائريِّ الذي يُشكِّلُهُ المنعطفُ، لذا؛ فهيَ تُساهمُ في القوةِ المركزيةِ إضافةً إلى قوةِ الاحتكاكِ السكونيِّ الجانبيةِ. وهذا يعني أنَّ السياراتِ والدراجاتِ يمكنُ أنْ تتحركَ بسرعاتٍ أكبرَ في المنعطفاتِ المائلةِ قبلَ أنْ تنزلقَ إطاراتُها مقارنةً بالمنعطفاتِ غيرِ المائلةِ. وتُعطى القوةُ المركزيةُ في حالةِ المنعطفاتِ المائلةِ بالعلاقةِ:

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

وتجدرُ الإشارةُ إلى أنَّ تلكَ المنعطفاتِ تُمكِّنُ السياراتِ منَ التحركِ فيها حتّى في حالةِ انعدامِ قوةِ الاحتكاكِ؛ نتيجةً لوجودِ مُركّبةٍ للقوةِ العموديةِ نحوَ مركزِ المنعطفِ، التي توفرُ القوةَ المركزيةَ المطلوبةَ لضمانِ الحركةِ الدائريةِ.



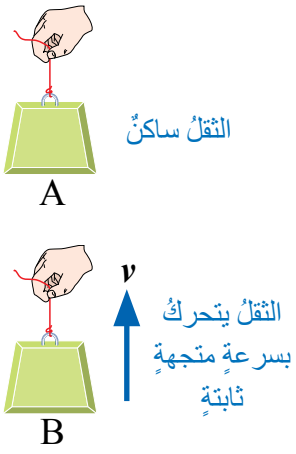

**أبحث** مستعينًا بمصادرِ المعرفةِ الموثوقةِ والمتاحةِ ومنْها شبكةُ الإنترنتِ، أبحثُ عنْ منعطفاتٍ مُصمَّمةٍ بشكلٍ مائلٍ في منطقتي، وأُعدُّ وأفرادَ مجموعتي تقريرًا مدعَّمًا بالصورِ عنْ مزايا هذهِ المنعطفاتِ. كذلكَ أبحثُ – بمساعدةِ أفرادِ مجموعتي – عنْ منعطفاتٍ خطرةٍ لمْ تُصمَّمْ بشكلٍ مائلٍ، وأكتبُ رسالةً إلى الجهاتِ المسؤولةِ – بوساطةِ إدارةِ مدرستي – أشرحُ لهمْ ضرورةَ إعادةِ تصميمِ هذا المنعطفِ ليُصبحَ مائلًا، وأُوضِّحُ فيها أهميةَ ذلكَ في تقليلِ حوادثِ السياراتِ والحفاظِ على حياةِ المواطنينَ وممتلكاتِهِمْ.

**ملاحظةٌ:** أينَما يلزمُ أعتبرُ: $g = 10\ m/s^2$، $g_M = 1.6\ m/s^2$، $m_E = 5.98 \times 10^{24}\ kg$، $G = 6.67 \times 10^{-11}\ N.m^2/kg^2$، $r_E = 6.38 \times 10^6\ m$ ما لمْ يُذكَرْ غيرُ ذلكَ.

**1. أضعُ دائرةً حولَ رمزِ الإجابةِ الصحيحةِ لكلِّ جملةٍ ممّا يأتي:**

1. قوةٌ ناتجةٌ عنْ تلامسِ جسميْنِ، وتكونُ دائمًا عموديةً على مستوى التلامسِ بينهُما، إنَّها:
أ. القوةُ العموديةُ ب. قوةُ الشدِّ جـ. الوزنُ د. قوةُ التجاذبِ الكتليِّ

توضِّحُ الأشكالُ المجاورةُ ثقلًا مقدارهُ (10 kg) معلَّقًا في الهواءِ في إحدى نهايتيْ خيطٍ خفيفٍ غيرِ قابلٍ للاستطالةِ، ويُمسكُ شخصٌ طرفَهُ الآخرَ. أستعينُ بهذهِ الأشكالِ للإجابةِ عنِ الأسئلةِ 2 - 4:



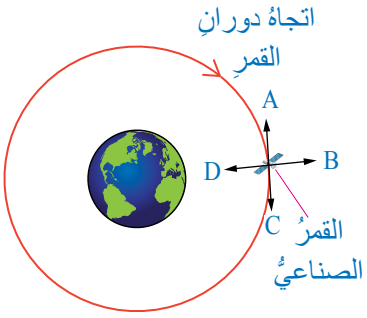

2. شكلانِ قوتا الشدِّ فيهما متساويةٌ، وتساوي وزنَ الثقلِ، هما:
أ. A و B ب. B و C جـ. A و C د. A و D

3. في أيِّ الأشكالِ قوةُ الشدِّ في الحبلِ هيَ الأكبرُ؟
أ. A ب. B جـ. C د. D

4. في أيِّ الأشكالِ قوةُ الشدِّ في الحبلِ هيَ الأصغرُ؟
أ. A ب. B جـ. C د. D

5. القوةُ الّتي تجذبُ الأرضُ بها الجسمَ تسمّى:
أ. قوةَ الشدِّ ب. قوةَ الاحتكاكِ جـ. الوزنَ د. القوةَ العموديةَ

يتحركُ قمرٌ صناعيٌّ حولَ الأرضِ حركةً دائريةً منتظمةً في مدارٍ دائريٍّ، ويوضحُ الشكلُ المجاورُ القمرَ الصناعيَّ عندَ أحدِ مواقعهِ في المدارِ. أستعينُ بالشكلِ للإجابةِ عنِ الأسئلةِ 6 - 9:




6. القوةُ المحصلةُ المؤثرةُ في القمرِ الصناعيِّ هيَ:
أ. قوةٌ عموديةٌ، في اتجاهِ A ب. قوةٌ مماسيةٌ، في اتجاهِ B
جـ. قوةُ طردٍ مركزيٍّ، في اتجاهِ C د. قوةٌ مركزيةٌ، في اتجاهِ D

7. إذا انعدمتِ القوةُ المؤثرةُ في القمرِ الصناعيِّ، فإنَّهُ سيتحركُ في اتجاهِ السهمِ:
أ. A ب. B جـ. C د. D

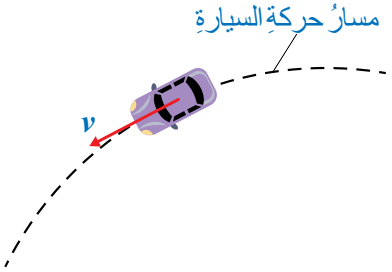
8. منشأُ القوةِ المحصلةِ المؤثرةِ في القمرِ الصناعيِّ هوَ:
أ. قوةُ احتكاكٍ ب. قوةٌ عموديةٌ
جـ. قوةُ تجاذبٍ كتليٍّ د. قوةُ شدٍّ

9. إذا تضاعفتِ المسافةُ بينَ مركزيْ الأرضِ والقمرِ الصناعيِّ مرتيْنِ، فإنَّ قوةَ التجاذبِ الكتليِّ بينهُما:
أ. تصبحُ ربعَ قيمتِها الابتدائيةِ. ب. تتضاعفُ أربعَ مراتٍ.
جـ. تصبحُ نصفَ قيمتِها الابتدائيةِ. د. تتضاعفُ مرّتيْنِ.

10. مسبارٌ (مجسٌّ) فضائيٌّ (space probe) على بُعدٍ معيَّنٍ منَ الأرضِ. إذا كانَ وزنُ جسمٍ موجودٍ في المسبارِ (3.5 N)، وتسارعُ السقوطِ الحرِّ في موقعِ المسبارِ ($7\ m/s^2$)، فإنَّ كتلةَ هذا الجسمِ ووزنَهُ على سطحِ الأرضِ على الترتيبِ:

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

11. يوضحُ الشكلُ المجاورُ منظرًا علويًّا لسيارةٍ تتحركُ في مسارٍ دائريٍّ أُفقيٍّ بسرعةٍ ثابتةٍ مقدارًا. بناءً على ما سبقَ؛ فأيُّ الجملِ الآتيةِ صحيحةٌ؟



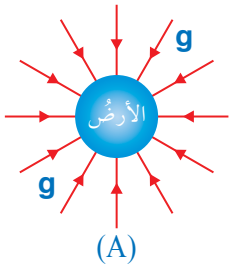

أ. القوةُ المحصلةُ المؤثرةُ في السيارةِ تساوي صفرًا؛ لأنَّها تتحركُ بسرعةٍ ثابتةٍ.

ب. القوةُ المحصلةُ المؤثرةُ في السيارةِ لا تساوي صفرًا، وتؤثرُ فيها نحوَ خارجِ المسارِ.

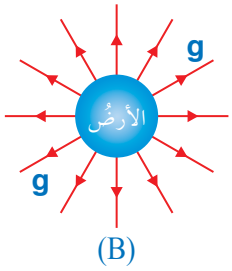
جـ. القوةُ المحصلةُ المؤثرةُ في السيارةِ لا تساوي صفرًا، وتؤثرُ فيها نحوَ مركزِ المسارِ.

د. القوةُ المحصلةُ المؤثرةُ في السيارةِ لا تساوي صفرًا، وتؤثرُ فيها في اتجاهِ حركتِها.

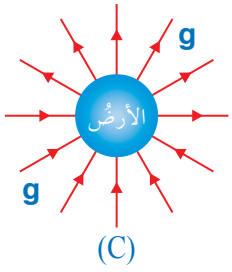
12. أيُّ الأشكالِ الموضحةِ في الشكلِ المجاورِ يُمثِّلُ اتجاهَ تسارعِ الجاذبيةِ الأرضيةِ؟



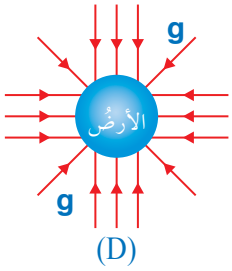
(A)



(B)



(C)



(D)

أ. A ب. B جـ. C د. D

13. تستقرُّ سيارةٌ كتلتُها ($1.5 \times 10^3\ kg$) على طريقٍ أُفقيٍّ خشنٍ. عندَ محاولةِ سائقِها تشغيلَها لمْ يعملِ المحركُ، فساعدهُ شخصٌ ودفعَ السيارةَ بقوةٍ أُفقيةٍ مقدارُها (400 N)، ولمْ يستطعْ تحريكَها. أيُّ القوى الآتيةِ تساوي مقدارَ قوةِ دفعِ هذا الشخصِ:

أ. قوةُ الاحتكاكِ السكونيِّ التي يؤثرُ بها سطحُ الطريقِ في قدمَيِ الشخصِ.

ب. قوةُ الجاذبيةِ المؤثرةُ في السيارةِ.

جـ. القوةُ العموديةُ المؤثرةُ في السيارةِ.

د. قوة الاحتكاكِ الحركيِّ التي يؤثرُ بِها سطحُ الطريقِ في قدمَيِ الشخصِ.

**2. أُفسِّرُ: في أيِّ اتجاهٍ يؤثرُ التسارعُ المركزيُّ؟ وهلْ يؤدي إلى تغيرِ مقدارِ السرعةِ المماسيةِ؟ أُفسِّرُ إجابتي.**

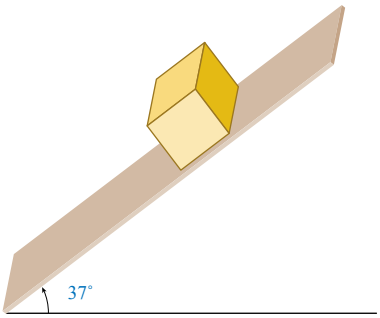
**3. أُحدِّدُ منشأَ القوةِ التي تسبِّبُ الحركةَ الدائريةَ للأجسامِ الآتيةِ:**

أ. حركةُ الأرضِ في مدارٍ حولَ الشمسِ.

ب. حركةُ الملابسِ في حوضِ التجفيفِ الأسطوانيِّ في غسّالةٍ (أيْ مُجفِّفةِ الملابسِ).

جـ. حركةُ كرةٍ مربوطةٍ في نهايةِ خيطٍ في مسارٍ دائريٍّ أُفقيٍّ.

د. حركةُ الإلكترونِ حولَ النواةِ.




4. **أحسبُ: صندوقٌ كتلتهُ (2 kg)، ينزلقُ على مستوًى مائلٍ أملسَ، يميلُ على الأفقيِّ بزاويةِ (37°)، كما هوَ موضحٌ في الشكلِ المجاورِ. إذا علمتُ أنَّ $\cos 37^\circ = 0.8$، $\sin 37^\circ = 0.6$، فأحسبُ:**

أ . القوةَ العموديةَ المؤثرةَ في الصندوقِ. ب . تسارعَ الصندوقِ.

5. **أحسبُ: يدورُ قمرٌ صناعيٌّ لتحديدِ المواقعِ (GPS) حولَ الأرضِ في مدارٍ ارتفاعهُ ($2.02 \times 10^7$ m) فوقَ سطحِها. إذا علمتُ أنَّ كتلتَهُ ($1.6 \times 10^3$ kg)، فأحسبُ:**

أ . قوةَ التجاذبِ الكتليِّ بينَ القمرِ الصناعيِّ والأرضِ.

ب . تسارعَ الجاذبيةِ الأرضيةِ في موقعِ القمرِ الصناعيِّ.

6. **تفكيرٌ ناقدٌ: تُزوَّدُ سياراتُ السباقِ بإطاراتٍ مسطحةٍ (slick)؛ للسباقِ على طرقٍ جافةٍ، بينَما تُزوَّدُ بإطاراتٍ بِها أخاديدُ للسباقِ على طرقٍ مبتلةٍ. أنظرُ الشكلَ المجاورَ.**

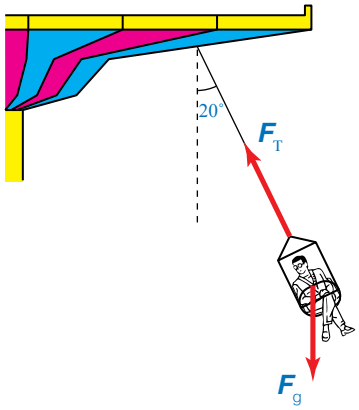
أ . **أُفسِّرُ** سببَ استخدامِ كلِّ نوعٍ.

ب . بما أنَّ الاحتكاكَ يعتمدُ على طبيعةِ السطحيْنِ المتلامسيْنِ، فما أهميةُ الأخاديدِ في إطاراتِ السيارةِ؟

7. **أحسبُ: إذا علمتُ أنَّ كتلةَ المشتري ($1.9 \times 10^{27}$ kg) تقريبًا، ونصفَ قطرِهِ ($7.15 \times 10^7$ m) تقريبًا، فأحسبُ مقدارَ:**

أ . تسارعِ السقوطِ الحرِّ على سطحِ المشتري.

ب . وزنِ هدى على سطحِ المشتري، إذا علمتُ أنَّ كتلتَها (60 kg).




8. **أحلّلُ: يجلسُ راكبٌ على كرسيٍّ أُفعوانيةٍ معلقٍ بسلسلةٍ مهملةِ الكتلةِ متصلةٍ بقرصٍ دوّارٍ، كما هوَ موضحٌ في الشكلِ المجاورِ. إذا علمتُ أنَّ الأُفعوانيةَ تتحركُ حركةً دائريةً منتظمةً، وكتلةَ الراكبِ والكرسيِّ (95 kg)، ونصفَ قطرِ المسارِ الدائريِّ الذي يتحركُ بهِ الراكبُ والكرسيُّ (4.5 m)، وتَصنعُ السلسلةُ زاويةَ (20°) بالنسبةِ إلى الرأسيِّ، فأحسبُ مقدارَ:**

أ . قوةِ الشدِّ في السلسلةِ.

ب . السرعةِ المماسيةِ للراكبِ في الكرسيِّ.

9. **قمرٌ صناعيٌّ كتلتهُ (135 kg) يدورُ في مدارٍ منخفضٍ حولَ الأرضِ على ارتفاعِ (250 km) منْ سطحِها. إذا كانَ الزمنُ الدوريُّ لهُ (90 min)، وبافتراضِ أنَّ مسارَهُ دائريٌّ؛ فأجيبُ عمّا يأتي:**

أ . **أحسبُ** مقدارَ السرعةِ المماسيةِ للقمرِ الصناعيِّ في مدارِهِ.

ب . **أحسبُ** مقدارَ التسارعِ المركزيِّ للقمرِ الصناعيِّ.

جـ . **أحسبُ** مقدارَ القوةِ المركزيةِ المؤثرةِ فيهِ.

د . **أصفُ** منشأَ القوةِ المركزيةِ المؤثرةِ في القمرِ الصناعيِّ.

**10. أُحلّلُ: في إحدى الألعابِ الرياضيةِ يدوِّرُ لاعبٌ مطرقةً كتلتُها (7.26 kg) متصلةً بإحدى نهايتيْ سلسلةٍ طولُها (1.21 m) في مسارٍ دائريٍّ أُفقيٍّ، كما هوَ موضحٌ في الشكلِ المجاورِ. واللاعبُ الفائزُ هوَ الذي يرميها إلى أبعدِ مسافةٍ ممكنةٍ. فإذا دارَ لاعبٌ حولَ نفسهِ وهوَ ممسكٌ بالطرفِ الحرِّ للسلسلةِ على بُعدِ (0.64 m) منْ محورِ دورانهِ، وأكملَ دورةً كاملةً خلالَ (0.55 s)، وبافتراضِ أنَّ اللاعبَ حركَ السلسلةَ والمطرقةَ في مسارٍ دائريٍّ أُفقيٍّ في أثناءِ دورانهِ، فأحسبُ مقدارَ:**

أ . السرعةِ المماسيةِ للمطرقةِ.

ب . القوةِ المركزيةِ المؤثرةِ في المطرقةِ قبيلَ إفلاتِها.

**11. أحسبُ: تتحركُ سيارةٌ كتلتُها ($9 \times 10^2$ kg) في مسارٍ دائريٍّ نصفُ قطرهِ (70 m) بسرعةٍ ثابتةٍ مقدارًا. إذا كانَ معاملُ الاحتكاكِ السكونيِّ بينَ إطاراتِ السيارةِ وسطحِ الطريقِ (0.70)، والقوةُ المركزيةُ المؤثرةُ فيها ($2.5 \times 10^3$ N)، وسطحُ الطريقِ أفقيٌّ، فأحسبُ مقدارَ:**

أ . التسارعِ المركزيِّ للسيارةِ.

ب . السرعةِ المماسيةِ للسيارةِ.

جـ . أكبرِ سرعةٍ يمكنُ أنْ تتحركَ بها السيارةُ على هذا الطريقِ منْ دونِ أنْ تنزلقَ.

**12. أحسبُ: يُبينُ الشكلُ المجاورُ لعبةَ الحصانِ الدوّارِ (دوّامةِ الخيلِ) (carousel)، في إحدى مدنِ الألعابِ؛ حيثُ تتحركُ حركةً دائريةً منتظمةً حولَ محورِ دورانٍ. فإذا ركبَ طفلٌ كتلتهُ (30 kg) أحدَ الأحصنةِ الموجودةِ على اللعبةِ، وكانَ بُعدهُ عنْ محورِ الدورانِ (3 m)، والحصانُ يُتمُّ دورةً كاملةً كلَّ (20 s)، فأحسبُ مقدارَ كلٍّ منْ:**

أ . السرعةِ المماسيةِ للطفلِ.

ب . القوةِ المركزيةِ المؤثرةِ في الطفلِ.

جـ . السرعةِ المماسيةِ للطفلِ عندَما يجلسُ على حصانٍ آخرَ يبعدُ عنْ محورِ الدورانِ (4 m).

**13. حلّقتْ في أحدِ العروضِ الجويةِ إحدى طائراتِ سلاحِ الجوِّ الملكيِّ الأُردنيِّ كتلتُها ($1.2 \times 10^4$ kg)، في مسارٍ دائريٍّ أُفقيٍّ نصفُ قطرهِ (1 km)، بحيثُ أتمَّتِ الطائرةُ دورتيْنِ خلالَ (1 min). أجيبُ عمّا يأتي:**

أ . أحسبُ مقدارَ سرعتِها المماسيةِ.

ب . أحسبُ مقدارَ تسارعِها المركزيِّ.

جـ . أحسبُ مقدارَ القوةِ المركزيةِ المؤثرةِ في الطيارِ؛ إذا علمتُ أنَّ كتلتَهُ (70 kg).

د . أُقارنُ مقدارَ التسارعِ المركزيِّ المؤثرِ في الطيارِ بتسارعِ السقوطِ الحرِّ على سطحِ الأرضِ، ماذا أستنتجُ؟

# الوحدةُ 5

# الموائــعُ
# Fluids

## أتأمَّلُ الصورةَ

**قالَ اللّهُ تعالى:** ﴿ وَلَهُ ٱلْجَوَارِ ٱلْمُنشَـَٔاتُ فِى ٱلْبَحْرِ كَٱلْأَعْلَـٰمِ ﴿٢٤﴾ ﴾. (سورةُ الرحمنِ، الآيةُ 24)

تُعدُّ السفنُ والبواخرُ منْ آياتِ اللهِ تعالى الدالةِ على قدرتهِ وسلطانهِ، وهيَ منْ وسائلِ النقلِ البحريةِ الرئيسةِ والمهمةِ؛ حيثُ تُستخدَمُ في عملياتِ نقلِ الركابِ والسياحِ وشحنِ البضائعِ والنفطِ بينَ الدولِ عبرَ البحارِ والمحيطاتِ، وتصلُ حمولتُها إلى مئاتِ آلافِ الأطنانِ، ومعَ ذلكَ تطفو فوقَ سطحِ الماءِ ولا تغرقُ، فما الذي يجعلُ تلكَ السفنَ والبواخرَ تطفو على سطحِ الماءِ رغمَ أنَّها مصنوعةٌ منْ فلزِّ الحديدِ الذي لا يطفو على سطحِ الماءِ؟

## الفكرةُ العامةُ:

تختلفُ الموائعُ (السوائلُ والغازاتُ) الساكنةُ عنِ الموائعِ المتحركةِ في خصائصِها وسلوكِها والمعادلاتِ التي تصفُ حركتَها، وكلاهُما يلعبُ دورًا مهمًّا وحيويًّا في حياتِنا، إضافةً إلى تطبيقاتِها العمليةِ في مختلفِ المجالاتِ والتخصصاتِ.

### الدرسُ الأولُ: الموائعُ الساكنةُ

**الفكرةُ الرئيسةُ:** يؤثرُ المائعُ الساكنُ في الأجسامِ المغمورةِ فيهِ كليًّا أوْ جزئيًّا بقوةِ دفعٍ تُسمّى قوةَ الطفْوِ.

### الدرسُ الثاني: الموائعُ المتحركةُ

**الفكرةُ الرئيسةُ:** للموائعِ المتحركةِ خصائصُ وسلوكاتٌ وتطبيقاتٌ خاصةٌ بِها، يمكنُ تفسيرُها عنْ طريقِ معادلةِ الاستمراريةِ ومعادلةِ برنولي.

# خصائصُ الموائعِ

**الموادُّ والأدواتُ:** كأسانِ شفافتانِ، ماصةٌ، مشرطٌ، ورقتا رقائقِ ألمنيومٍ متماثلتانِ، ماءٌ.

**إرشاداتُ السلامةِ:** الحذرُ في التعاملِ معَ الأدواتِ الزجاجيةِ والحادةِ.

**خطواتُ العملِ:** بالتعاونِ معَ أفرادِ مجموعتي، أنفذُ الخطواتِ الآتيةَ:

**الجزءُ الأولُ:**

1. **ألاحظُ:** أملأُ الكأسَ الزجاجيةَ بالماءِ، ثم أطوي إحدى رقائقِ الألمنيومِ طياتٍ عدةً؛ حتى تصبحَ على شكلِ مكعبٍ أوْ كرةٍ مصمتةٍ وأضعُها على سطحِ الماءِ وألاحظُ ما يحدثُ لَها.
2. **أصممُ** منْ رقاقةِ الألمنيومِ الثانيةِ شكلًا مجوفًا على شكلِ قاربٍ بسيطٍ مثلًا كما في الشكلِ، وأضعهُ على سطحِ الماءِ. أدونُ ملاحظاتي حولَ ما يحدثُ للقاربِ.

**الجزءُ الثاني:**

1. أضيفُ كميةً منَ الماءِ في الكأسِ، وأستخدمُ المشرطَ في قطعِ الماصّةِ إلى نصفيْنِ؛ بحيثُ يبقى نصفاها معلقيْنِ معًا، وأثنيها لتكونَ الزاويةُ بينَ نصفيْها قائمةً تقريبًا. أضعُ النصفَ الأولَ من الماصةِ في الكأسِ بشكلٍ رأسيٍّ، بحيثُ ينغمرُ جزءٌ منهْ في الماءِ، والنصفُ الثاني بشكلٍ أفقيٍّ، كما في الشكلِ.
2. **ألاحظُ:** أنفخُ في الطرفِ الأيسرِ للماصةِ الأفقيةِ، وأدونُ ملاحظاتي حولَ حركةِ الماءِ داخلَ الماصةِ الرأسيةِ، وعندَ فوهتِها.
3. **أقارنُ:** أكررُ الخطوةَ (2) ولكنْ بالنفخِ بقوةٍ أكبرَ لزيادةِ سرعةِ الهواءِ في الماصةِ الأفقيّةِ، وأدونُ ملاحظاتي حولَ الفرقِ بينَ نتائجِ الخطوتيْنِ.

**التحليلُ والاستنتاجُ:**

1. **أحللُ:** هلِ اختلفَ متوسطُ كثافةِ القاربِ عنْ كثافةِ رقاقةِ الألمنيومِ التي صُنِعَ منْها القاربُ؟ أوضِّحُ ذلكَ.
2. **أفسرُ:** (تغرقُ رقاقةُ الألمنيومِ الأولى في الماءِ وتستقرُّ في قعرِ الكأسِ، بينَما تطفو الأخرى فوقَهُ رغمَ أنَّ وزنَ كلٍّ منَ الرقاقتيْنِ نفسُهُ)، ما السببُ؟
3. **أتنبأُ:** ماذا سيحدثُ للقاربِ إذا وضعْنا بعضَ الأثقالِ الخفيفةِ فوقَهُ؟
4. أحددُ اتجاهَ حركةِ الماءِ في الماصةِ الرأسيةِ عندَ النفخِ في الماصةِ الأفقيةِ.
5. هلْ حدثَ فرقٌ بينَ ضغطِ الهواءِ فوقَ سطحِ الماءِ في الكأسِ، وضغطهِ في الماصةِ الرأسيةِ بعدَ نفخِ الهواءِ؟ أُوَضِّحُ ذلكَ.
6. **أصفُ** ما يحدثُ للماءِ في كلٍّ منَ الكأسِ والماصةِ الرأسيةِ وعندَ فوهتِها في الخطوتيْنِ (2) و(3). وما علاقةُ ذلكَ بفرقِ ضغطِ الهواءِ؟

**الفكرةُ الرئيسةُ:**

يؤثرُ المائعُ الساكنُ في الأجسامِ المغمورةِ فيهِ كليًّا أوْ جزئيًّا، بقوةِ دفعٍ رأسيًّا إلى أعلى تُسمّى قوةَ الطفوِ.

**نتاجاتُ التعلُّمِ:**

- أوضِّحُ المفاهيمَ المتعلقةَ بالموائعِ الساكنةِ.
- أوظِّفُ التجاربَ العمليةَ في التحققِ منْ قاعدةِ أرخميدس.

**المفاهيمُ والمصطلحاتُ:**

| | |
|---|---|
| الموائعُ | Fluids |
| ضغطُ المائعِ | Fluid Pressure |
| قوةُ الطفوِ | Buoyant Force |
| قاعدةُ أرخميدس | Archimedes' Principle |
| مقياسُ كثافةِ السوائلِ | Hydrometer |

## الموائعُ Fluids

المادةُ في حالتِها الطبيعيةِ تكونُ على إحدى ثلاثِ حالاتٍ: (الصلبةِ أوِ السائلةِ، أوِالغازيةِ)، وتتميزُ المادةُ في الحالتيْنِ السائلةِ والغازيةِ عنْها في الحالةِ الصلبةِ بخاصيتَيْ الجريانِ (الانسيابِ)، وتغييرِ شكلِها إذا أثرتْ فيها قوًى خارجيةٌ؛ لأنَّ قوى التماسكِ بينَ جزيئاتِها ضعيفةٌ مقارنةً بالحالةِ الصلبةِ. ويُطلَقُ على الموادِّ التي تتصفُ بخاصيتَيْ القدرةِ على الجريانِ وتغييرِالشكلِ **الموائعُ Fluids**.

إنَّ دراسةَ الموائعِ (السوائلِ والغازاتِ) لَها أهميةٌ كبيرةٌ في حياتِنا اليوميةِ يمكنُ ملاحظتُها بسهولةٍ؛ فالهواءُ تحلقُ فيهِ الطائراتُ والمناطيدُ، والماءُ تطفو على سطحهِ السفنُ والبواخرُ، والدمُ يجري في أوردتِنا وشرايينِنا، إضافةً إلى تطبيقاتِ الموائعِ في مجموعةٍ واسعةٍ منَ التخصصاتِ الهندسيةِ والطبيةِ والأرصادِ الجويةِ، وتخصصَيْ الفيزياءِ والعلومِ الحياتيةِ. وتقسمُ الموائعُ منْ حيثُ حالتُها الحركيةُ إلى قسميْنِ هُما: **الموائعُ السكونيةُ Static Fluids والموائعُ المتحركةُ Fluids in Motion.**

عندَما تشاهدُ باخرةً تطفو على سطحِ الماءِ، كما في الشكلِ (1)، قدْ تتساءلُ: ما القوةُ التي يؤثرُ بِها الماءُ في السفينةِ لتطفوَ على سطحِ البحرِ؟

✓ **أتحقَّقُ:** ما المقصودُ بالموائعِ؟

الشكلُ (1): باخرةٌ تطفو على سطحِ الماءِ.

## ضغطُ المائعِ Fluid Pressure

تعلمتُ في صفوفٍ سابقةٍ أنَّ **الضغطَ** $P$ **(Pressure)** قوةٌ عموديةٌ $F$ تؤثرُ في وحدةِ المساحةِ $A$ ووحدةُ قياسِهِ في النظامِ الدوليِّ SI هيَ باسكال Pascal ($Pa = N/m^2$)، وتعلمتُ أيضًا أنَّ المائعَ يؤثرُ بضغطٍ في جميعِ الاتجاهاتِ على النقاطِ أوِ الأجسامِ داخلَهُ ويُعطى بالعلاقةِ:

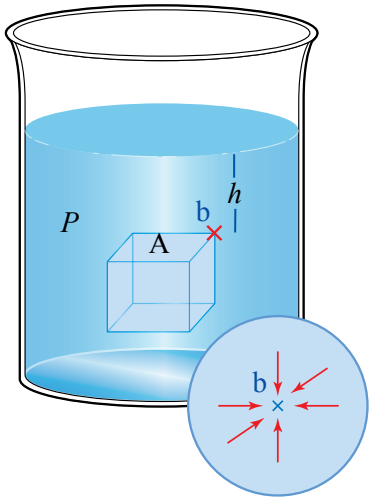
$$P = \rho_f gh$$

حيثُ: $h$ : ارتفاعُ عمودِ المائعِ فوقَ تلكَ النقطةِ.

$\rho_f$ : كثافةُ المائعِ.

$g$ : تسارعُ السقوطِ الحرِّ.

أيْ أنَّ **ضغطَ المائعِ Fluid Pressure** المتجانسِ (كثافتهُ ثابتةٌ) عندَ أيةِ نقطةٍ داخلَهُ يتناسبُ طرديًّا مع كلٍّ منْ عمقِ النقطةِ داخلَ المائعِ، وكثافةِ المائعِ وتسارعِ السقوطِ الحرِّ. وحسبَ العلاقةِ أعلاهُ فإنَّ جميعَ النقاطِ التي تقعُ على العمقِ نفسِهِ تحتَ سطحِ المائعِ يكونُ الضغطُ عندَها لهُ القيمةُ نفسُها وفي جميعِ الاتجاهاتِ. فلو تخيّلتُ مكعبًا وهميًّا مغمورًا في مائعٍ متجانسٍ كالماءِ مثلًا كما في الشكلِ (2)، فإنَّ ضغطَ المائعِ $P$ المؤثرَ إلى أسفلَ عندَ أيةِ نقطةٍ على سطحِ المكعبِ العلويِّ هوَ نفسهُ ضغطُ المائعِ عندَ النقطةِ b ($P = \rho_f gh$).




الشكلُ (2): الضغطُ داخلَ المائعِ.

**أفكّرُ:** ضغطُ الماءِ المؤثرُ في السطحِ الأفقيِّ للمكعبِ لا يعتمدُ على مساحتهِ $A$. أفسرُ ذلكَ.

**تمرينٌ**

أجدُ ضغطَ الماءِ المؤثرَ في سمكةٍ على عمقِ 20 m تحتَ سطحِ البحرِ (كثافةُ ماءِ البحرِ $1024\ kg\ m^{-3}$ ، $g = 10\ m\ s^{-2}$).

✓ **أتحقَّقُ:** هلْ يتغيرُ ضغطُ سائلٍ معينٍ عندَ نقطةٍ ما فيهِ بتغيرِ ارتفاعِ موقعِ السائلِ عنْ سطحِ الأرضِ؟ أوضّحُ إجابتي.

## قوةُ الطفوِ Buoyant Force ($F_B$)

وزنُ الأجسامِ المغمورةِ في المائعِ يبدو أقلَّ منْ وزنِها في الهواءِ؛ فمنَ السهلِ مثلًا رفعُ حجرٍ منْ داخلِ الماءِ إلى سطحِ الماءِ كما في الشكلِ (3/أ)، وفجأةً يبدو الجسمُ أثقلَ عندَ رفعِهِ خارجَ سطحِ الماءِ، وتجدُ صعوبةً في رفعِهِ. كذلكَ فإنَّ السباحةَ في مياهِ البحرِ الميتِ المالحةِ جدًّا كما في الشكلِ (3/ب)، تكونُ أكثرَ سهولةً منَ السباحةِ في مياهِ البركِ أوْ حتّى مياهِ البحارِ الأخرى الأقلِّ ملوحةً. وفي كلتا الحالتيْنِ تؤثرُ قوةُ جذبِ الأرضِ إلى أسفلَ في كلٍّ منَ الحجرِ وجسمِكَ، بينَما يؤثرُ الماءُ بقوةِ دفعٍ إلى أعلى في تلكَ الأجسامِ. ما طبيعةُ هذهِ القوةِ؟ ومنْ أينَ تنشأُ؟ وما العواملُ التي تعتمدُ عليْها؟

الشكلُ (3/ أ): سحبُ حجرٍ مغمورٍ في الماءِ.

الشكلُ (3/ ب): السباحةُ في البحرِ الميتِ.

ضغطُ المائعِ لا يؤثرُ فقطْ في السطحِ العلويِّ للمكعبِ (على عمقِ $h_1$) وإنَّما يؤثرُ في جميعِ جوانبِ المكعبِ بما فيها السطحُ السفليُّ للمكعبِ (على عمقِ $h_2$) كما في الشكلِ (4)؛ على النحوِ الآتي:

الضغطُ في السطحِ العلويِّ: $P_1 = \rho_f g h_1$

الضغطُ في السطحِ السفليِّ: $P_2 = \rho_f g h_2$

وفرقُ الضغطِ بينَ سطحَيِ المكعبِ السفليِّ والعلويِّ $\Delta P$:

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

وبما أنَّ الضغطَ هوَ القوةُ التي يؤثرُ بِها المائعُ في وحدةِ المساحةِ ($P = \frac{F}{A}$)، فإنَّ:

القوةَ المؤثرةَ عموديًّا في السطحِ العلويِّ للمكعبِ $F_1$:

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

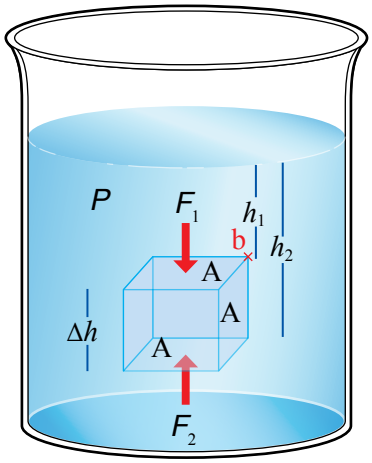
القوةَ المؤثرةَ عموديًّا في السطحِ السفليِّ للمكعبِ $F_2$:

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

وبالتالي؛ فإنَّ محصلةَ القوى $F$ التي يؤثرُ بِها المائعُ (قوةَ دفعِ المائعِ) في المكعبِ تساوي:

$$\begin{aligned} F &= F_2 - F_1 \\ &= \rho_f g A(h_2 - h_1) \\ &= \rho_f g A(\Delta h) \end{aligned}$$

لكنَّ حجمَ المكعبِ $V$ يُعطى بالعلاقةِ: $V = A\,(\Delta h)$




الشكلُ (4): القوى المؤثرةُ في مكعبٍ داخلَ السائلِ.

أيْ أنَّ قوةَ دفعِ المائعِ المؤثرةَ رأسيًّا إلى أعلى في المكعبِ تساوي:

$$F = \rho_f V g$$

حيثُ:

$\rho_f$ : كثافةُ المائعِ.

$V$ : حجمُ المكعبِ.

وتُسمّى محصلةُ القوى التي يؤثرُ بِها المائعُ في الجسمِ المغمورِ فيهِ كليًّا أوْ جزئيًّا رأسيًّا إلى أعلى **قوةَ الطفوِ** ($F_B$) **Buoyant Force**.

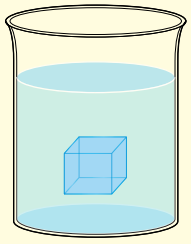
ألاحظُ أنَّ قوةَ الطفوِ تمَّ اشتقاقُها نظريًّا باستخدامِ قوانينِ نيوتن لحالةٍ خاصةٍ، وهيَ مكعبٌ مغمورٌ في الماءِ ولكنَّها تطبَّقُ على الأجسامِ بأشكالِها المختلفةِ (منتظمةً أوْ غيرَ منتظمةٍ) المغمورةِ في أيِّ مائعٍ، وتنشأُ قوةُ الطفوِ بسببِ فرقٍ في الضغطِ بينَ أعلى الجسمِ المغمورِ في المائعِ وأسفلِهِ بغضِّ النظرِ عنْ عمقِ المائعِ أوْ شكلِ الجسمِ.

✓ **أتحقَّقُ:** ما العواملُ التي تعتمدُ عليْها قوةُ الطفوِ؟

## قاعدةُ أرخميدس Archimedes' Principle

العالمُ اليونانيُّ أرخميدس توصلَ إلى معادلةِ قوةِ الطفوِ السابقةِ نفسِها ولكنْ عنْ طريقِ التجربةِ قبلَ ذلكَ بفترةٍ طويلةٍ، وعُرِفَتْ في ما بعدُ بقاعدةِ أرخميدس. ولدراسةِ العواملِ التي تعتمدُ عليها قوةُ الطفوِ (قوةُ دفعِ المائعِ) عمليًّا، وللتحققِ كذلكَ منْ قاعدةِ أرخميدس عمليًّا؛ أُجري التجربةَ الآتيةَ:

**أُفكِّرُ:** أعللُ: محصلةُ القوى التي يؤثرُ بِها المائعُ في الجوانبِ العموديةِ للمكعبِ المغمورِ في المائعِ- كما في الشكلِ - تساوي صفرًا.

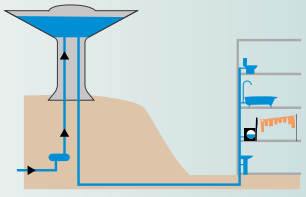


**الفيزياءُ والحياةُ**

برجُ المياهِ هوَ خزّانٌ مائيٌّ يُبنى على ارتفاعٍ عالٍ منْ أجلِ الاحتفاظِ بمواردَ مائيةٍ، وتوليدِ الضغطِ على نظامِ توزيعِ المياهِ. يتغيرُ الضغطُ كلَّما ارتفعَ خزّانُ المياهِ؛ فلكلِّ 10.2 cm منَ الارتفاعِ يتغيرُ الضغطُ بمقدارِ 1 kPa تقريبًا حسبَ العلاقةِ:

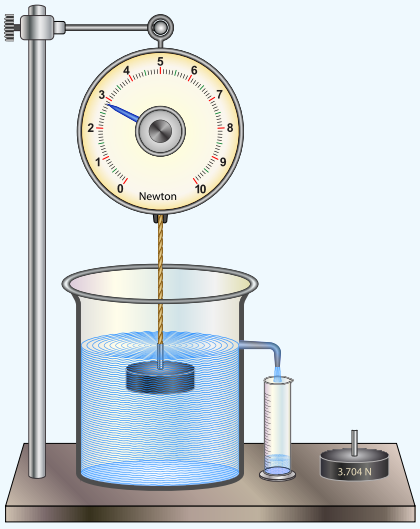
$$\Delta P = \rho g \Delta h$$

وهوَ ما يكفي لتوفيرِ الضغطِ اللازمِ لمتطلباتِ نظامٍ لتوزيعِ المياهِ على طوابقِ المبنى. ويُستخدَمُ البرجُ في عددٍ منِ المدارسِ والجامعاتِ والمستشفياتِ وغيرِها؛ ويمثِّلُ الشكلُ أدناهُ صورةً لبرجِ المياهِ في مدينةِ الحسينِ الطبيةِ في العاصمةِ عمّانَ.



# التجربةُ 1

## قوةُ الطفوِ وقاعدةُ أرخميدس




**المـوادُّ والأدواتُ:** قطعتـانِ متماثلتانِ في الحجمِ إحداهُما فلزيةٌ كالألمنيومِ مثـلًا، وأخرى خشـبيةٌ، مخبارٌ مـدرجٌ، ميزانٌ إلكترونـيٌّ، ميزانٌ نابضيٌّ، دورقُ إزاحةٍ، سـائلانِ مختلفانِ في الكثافةِ (ماءٌ، جليسـرينٌ).

**إرشـاداتُ السـلامةِ:** الحذرُ منْ سكبِ السوائلِ على الأرضيةِ؛ حتى لا تصبحَ زلقـةً، وفي التعاملِ مـع الأدواتِ الزجاجيةِ.

**خطواتُ العملِ:** بالتعاونِ مع أفرادِ مجموعتي، أنفذُ الخطواتِ الآتيةَ:

1. **أقيـسُ** كلًّا مـنْ كتلـةِ المخبـارِ المـدرجِ فارغًا ($m_1$)، باسـتخدامِ الميـزانِ الإلكترونـيِّ ووزنِ قطعـةِ الألمنيومِ فـي الهـواءِ باسـتخدامِ الميـزانِ النابضـيِّ $F_g$، ثـمَّ أدوِّنُ النتائـجَ فـي الجدولِ.
2. أبدأُ بملْءِ دورقِ الإزاحةِ بالماءِ وأتوقفُ مباشرةً قبلَ أنْ يبدأَ الماءُ بالانسكابِ منْ فتحةِ الدورقِ.
3. **ألاحظُ:** أضـعُ المخبـارَ المـدرجَ تحـتَ فتحةِ الـدورقِ، ثمَّ أُنزلُ قطعـةَ الألمنيـومِ المعلَّقةَ بالميـزانِ ببطْءٍ في المـاءِ حتـى تنغمـرَ كليًّـا، وألاحـظُ انسـكابَ المـاءِ فـي المخبـارِ أثنـاءَ ذلـكَ، كمـا فـي الشـكلِ، وأقيـسُ وزنَ القطعـةِ فـي المـاءِ ($F'_g$) وأدوِّنُ النتيجـةَ فـي الجدولِ.
4. **أقيـسُ** كتلـةَ المخبـارِ والمـاءِ المنسـكبِ فيـهِ (المـاءِ المُـزاحِ) معًـا ($m_2$) باسـتخدامِ الميـزانِ الإلكترونـيِّ، وأدوِّنُ النتيجـةَ فـي الجـدولِ.
5. **أحسبُ** النقصانَ في وزنِ القطعةِ ($F_g - F'_g$) ووزنِ الماءِ المزاحِ $F_{gf} = (m_2 - m_1)\, g$
6. أكررُ الخطواتِ السابقةَ مستخدمًا سائلًا آخرَ غيرَ الماءِ مثلَ الجليسرينِ، وأدونُ النتائجَ في الجدولِ.
7. أكـررُ الخطـواتِ (1-6) مسـتخدمًا القطعـةَ الخشـبيةَ بـدلًا مـنَ الألمنيـومِ، مـعَ الانتبـاهِ إلـى أنَّ الخشـبَ لا ينغمـرُ كليًّـا، وأدونُ النتائـجَ فـي الجـدولِ.

**التحليلُ والاستنتاجُ:**

1. **أقارنُ** بينَ النقصانِ في وزنِ القطعةِ وبينَ وزنِ السائلِ المزاحِ.
2. **أحللُ:** عندَ تغييرِ كثافةِ السائلِ، ما التغيرُ الذي حدثَ لكلٍّ منَ: النقصانِ في وزنِ القطعةِ، ووزنِ السائلِ المزاحِ؟
3. **أصفُ** العلاقةَ بينَ قوةِ الطفوِ وكلٍّ منَ: النقصانِ في وزنِ القطعةِ، ووزنِ السائلِ المزاحِ.
4. **أصفُ** التغيرَ في وزنِ السائلِ المزاحِ عندَ استخدامي قطعةَ الخشبِ، ما العلاقةُ بينَ وزنِ السائلِ المزاحِ ووزنِ القطعةِ في الهواءِ؟
5. **أتوقعُ** ما يحدثُ لكلٍّ منْ حجمِ السائلِ المزاحِ ووزنِهِ عندَ استخدامي قطعةَ ألمنيومٍ ذاتَ حجمٍ أكبرَ.

ربَّما توصلتَ مما سبقَ إلى العواملِ التي تعتمدُ عليْها قوةُ الطفوِ وهيَ:

- كثافةُ المائعِ المزاحِ $\rho_f$ : العلاقةُ طرديةٌ.
- حجمُ المائعِ المزاحِ $V_f$ : العلاقةُ طرديةٌ.
- تسارعُ السقوطِ الحرِّ $g$ : العلاقةُ طرديةٌ.

صاغَ العالمُ أرخميدس النتائجَ التجريبيةَ التي توصَّلَ إليْها على شكلِ قاعـدةٍ علميـةٍ سُمّـيتْ **قاعدةَ أرخميدس** **Archimedes' Principle** وتنصُّ على ما يأتي:

«قوةُ الطفوِ المؤثرةُ في الجسمِ المغمورِ كليًّا أوْ جزئيًّا في مائعٍ تساوي وزنَ المائعِ المزاحِ».

وبصورةٍ أخرى: «الجسمُ المغمورُ كليًّا أوْ جزئيًّا في مائعٍ يخسرُ منْ وزنِهِ بمقدارِ وزنِ المائعِ المزاحِ»، أنظرُ الشكلَ (5).

ويُعبَّرُ عنْها بالرموزِ على الصورةِ الآتيةِ:

$$F_B = F_{gf} = m_f g = \rho_f V_f g$$
$$= F_g - F'_g$$

حيثُ

$F_{gf}$ : وزنُ المائعِ المزاحِ.

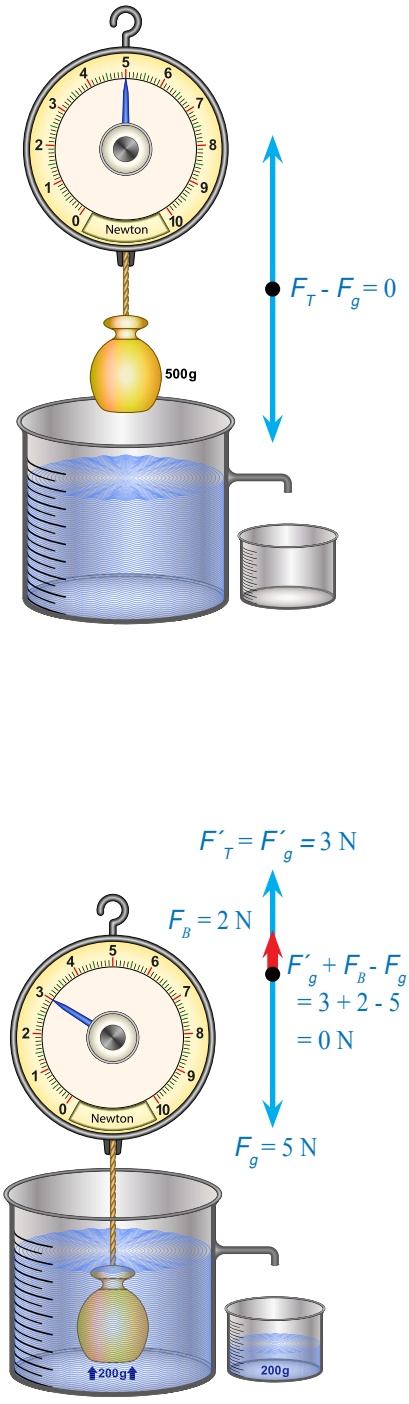
$F_g$ : وزنُ الجسمِ الحقيقيِّ (الناشئُ عنْ جذبِ الأرضِ للجسمِ)، ويساوي: $F_g = m_o g = \rho_o V_0 g$

$m_o$ : كتلةُ الجسمِ، $\rho_o$ : كثافةُ الجسمِ، $V_o$ : حجمُ الجسمِ.

$m_f$ : كتلةُ الماءِ المزاحِ.

$F'_g$ : وزنُ الجسمِ في المائعِ = محصلةَ قوتَيْ الطفوِ والوزنِ الحقيقيِّ للجسمِ ($F'_g = F_g - F_B$)، ويُسمّى الوزنَ الظاهريَّ ويساوي قوةَ الشدِّ في الحبلِ $F'_T$ ($F'_T = F'_g$) كما في الشكلِ (5).

تُطبَّقُ قاعدةُ أرخميدس على جميعِ الأجسامِ المغمورةِ بغضِّ النظرِ عنْ شكلِ الجسمِ ونوعِ المائعِ.




الشكلُ (5): قاعدةُ أرخميدس.

✓ **أتحقَّقُ**: أذكرُ نصَّ قاعدةِ أرخميدس بالكلماتِ، وأعبرُ عنْها بالرموزِ.

## المثالُ 1

غواصةُ Atlantis XII أسطوانيةُ الشكلِ حجمُها $250\ m^3$ تقريبًا. تحملُ السياحَ إلى أعماقٍ تصلُ إلى $30\ m$؛ لمشاهدةِ الشعابِ المرجانيةِ في سواحلِ المكسيكِ. باعتبارِ كثافةِ مياهِ البحرِ $1024\ kg\ m^{-3}$، أحسبُ:

أ. ضغطَ الماءِ عندَ هذا العمقِ.

ب. قوةَ الطفوِ.

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

**المطلوبُ:** $P = ?$ ، $F_B = ?$

**الحلُّ:**

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

ب. $F_B = \rho_f V_f g$ ، $V_f = V_o$

$= 1024 \times 250 \times 10 = 2.56 \times 10^6\ N$

منَ المفيدِ مقارنةُ القوى المؤثرةِ في الأجسامِ المغمورةِ كليًّا في المائعِ معَ تلكَ المؤثرةِ في الأجسامِ المغمورةِ جزئيًّا (الطافيةِ على سطحِ المائعِ)، على النحوِ الآتي:

### الأجسامُ المغمورةُ كليًّا Fully Submerged Objects

عندَ وضعِ جسمٍ ما في مائعٍ؛ كثافتُهُ أكبرُ منْ كثافةِ المائعِ (مثلِ الحجرِ في الماءِ) فإنَّهُ يهبطُ ويستقرُّ أسفلَ الماءِ، بينَما يبقى جسمٌ آخرُ كثافتُهُ مُساويةٌ كثافةَ المائعِ (مثلِ الكرةِ) معلَّقًا فيهِ كما في الشكلِ (6). وفي هاتينِ الحالتيْنِ فإنَّ:

- حجمَ الجسمِ يساوي حجمَ المائعِ المزاحِ $V_o = V_f$
- قاعدةَ أرخميدس:

جسمٌ مستقرٌّ أسفلَ المائعِ: $F_B = F_{gf} = F_g - F'_g$

جسمٌ معلَّقٌ في المائعِ: وزنُ الجسمِ في المائعِ (الوزنُ الظاهريُّ) يساوي صفرًا $(F'_g = 0)$

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

الشكلُ (6): حجرٌ مغمورٌ كليًّا في الماءِ، بينَما تبقى الكرةُ معلقةً داخلَ الماءِ.

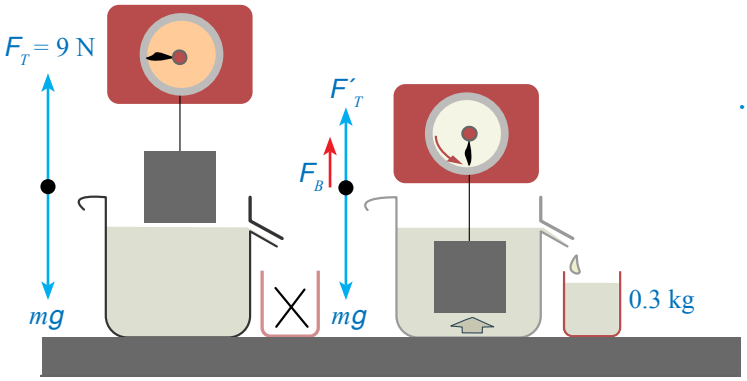
## المثالُ 2

قامتْ ماريةُ بإجراءِ تجربةٍ للتحققِ منْ قاعدةِ أرخميدس، اعتمادًا على البياناتِ المبينةِ في الشكلِ (7) وباعتبارِ كثافةِ الماءِ $1000\ kg\ m^{-3}$؛ أجدُ:

أ . قوةَ الطفوِ.

ب. قراءةَ الميزانِ بعدَ غمرِ الجسمِ في الماءِ.

حـ. حجمَ الجسمِ.




الشكل (7): تجربة قاعدة أرخميدس.

**المعطياتُ:**

$F_g = 9$ N ، $m_f = 0.3$ kg

**المطلوبُ:**

$F_B = ?$ ، $F'_g = ?$ ، $V_o = ?$

**الحلُّ:**

أ . قوةُ الطفوِ:

$$F_B = m_f g = 0.3 \times 10 = 3\ N$$

ب . قراءةُ الميزانِ بعدَ غمرِ الجسمِ في الماءِ:

$$F_B = F_g - F'_g$$

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

جـ . حجمُ الجسمِ $V_o$:

$$F_B = \rho_f V_f g$$

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

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

### تمرينٌ

كرةٌ فلزيةٌ وزنُها في الهواءِ 10 N غُمرتْ في الماءِ فخسرتْ من وزنِها 3.5 N، باعتبارِ كثافةِ الماءِ $1000\ kg\ m^{-3}$ أجدُ:

أ . قوةَ الطفوِ.

ب . وزنَ الكرةِ في الماءِ.

جـ . كثافةَ مادةِ الكرةِ.

أصممُ باستخدامِ برنامجِ السكراتشِ (Scratch) عرضًا يوضحُ حركةَ الأجسامِ المغمورةِ كليًّا في المائعِ، ثمَّ أشاركهُ زملائي/ زميلاتي في الصفِّ.

الشكلُ (8): قوةُ الطفوِ المؤثرةُ في كرةِ قدمٍ تطفو على سطحِ الماءِ.

## الأجسامُ الطافيةُ Floating Objects

عندَ وضعِ جسمٍ ما في مائعٍ كثافتهُ أقلُّ منْ كثافةِ المائعِ (مثلَ كرةِ القدمِ في الماءِ) كما في الشكلِ (8)، فإن جُزءًا منْها يطفو على سطحِ المائعِ، أيْ أنَّ حجمَ السائلِ المزاحِ $V_f$ يساوي حجمَ الجزءِ المغمورِ منَ الجسمِ وهوَ أقلُّ منْ حجمِ الجسمِ.

وفي هذهِ الحالةِ فإنَّ:

وزنَ الجسمِ في المائعِ (الوزنُ الظاهريُّ) يساوي صفرًا ($F'_g = 0$).

قوةَ الطفوِ = وزنَ السائلِ المزاحِ= وزنَ الجسمِ الحقيقيَّ

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

والجدولُ (1) يلخصُ حالاتٍ خاصةً لقاعدةِ أرخميدس.

**الجدولُ (1): حالاتُ قاعدةِ أرخميدس**

| الحالةُ | اتجاهُ محصلةِ القوى | قوةُ الطفوِ $F_B$ | حجمُ السائلِ المزاحِ $V_f$ | حالةُ الجسمِ |
|---|---|---|---|---|
| $\rho_o > \rho_f$ | $-y$ | $F_B < F_g$ | $V_f = V_o$ | ينغمرُ ويهبطُ في المائعِ |
| $\rho_o = \rho_f$ | $\Sigma F = 0$ | $F_B = F_g$ | $V_f = V_o$ | يبقى معلقًا في المائعِ |
| $\rho_o < \rho_f$ | $\Sigma F = 0$ | $F_B = F_g$ | $V_f$ = حجمَ الجزءِ المغمورِ منَ الجسمِ | يطفو جزءٌ منهُ فوقَ سطحِ المائعِ |

## المثالُ 3

كرةٌ مطاطيةٌ حجمُها $0.004\ m^3$ وكثافةُ مادتِها $970\ kg\ m^{-3}$، وُضِعتْ في سائلٍ كثافتهُ $1200\ kg\ m^{-3}$، أحسبُ حجمَ الجزءِ المغمورِ منَ الكرةِ.

**المعطياتُ:** $V_o = 0.004\ m^3$ ، $\rho_o = 970\ kg\ m^{-3}$ ، $\rho_f = 1200\ kg\ m^{-3}$

**المطلوبُ:** حجمُ الجزءِ المغمورِ منَ الكرةِ.

**الحلُّ:**

بما أنَّ كثافةَ الكرةِ أقلُّ منْ كثافةِ السائلِ؛ فإنَّ الكرةَ تنغمرُ جزئيًّا في السائلِ.

أطبِّقُ العلاقةَ: $F_B = F_g$

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

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

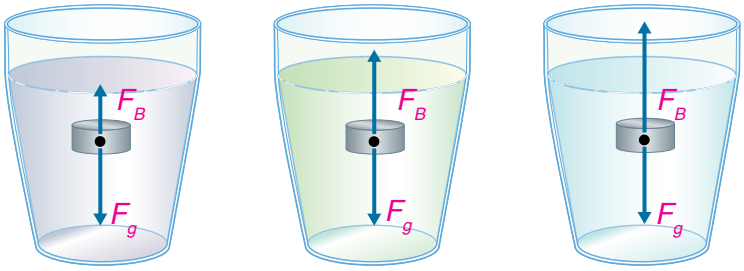
حجمُ السائلِ المزاحِ = حجمَ الجزءِ المغمورِ منَ الكرةِ = $0.0032\ m^3$

## المثالُ 4

وُضِعَتْ ثلاثةُ أجسامٍ متماثلةٍ تمامًا داخلَ ثلاثِ كؤوسٍ مملوءةٍ بسوائلَ مختلفةٍ، وتُركتْ حرةَ الحركةِ، ومُثِّلتْ قوتا الطفوِ ووزنِ الجسمِ بأسهُمٍ، كما في الشكلِ (9). أجيبُ عمّا يأتي:

أ . أرتبُ السوائلَ في الكؤوسِ تنازليًّا حسبَ كثافتِها.

ب. أصفُ حركةَ الأجسامِ.




(أ) $F_B > F_g$ (ب) $F_B = F_g$ (جـ) $F_B < F_g$

الشكلُ (9): القوى المؤثرةُ في أجسامٍ مغمورةٍ في الماءِ

**المعطياتُ:**

مخطَّطُ الجسمِ الحرِّ لكلِّ جسمٍ.

**المطلوبُ:**

ترتيبُ السوائلِ تنازليًّا حسبَ الكثافةِ، ووصفُ حركةِ كلِّ جسمٍ في السائلِ.

**الحلُّ:**

أ . الترتيبُ التنازليُّ: كثافةُ السائلِ في الكأسِ (أ)، كثافةُ السائلِ في الكأسِ (ب)، كثافةُ السائلِ في الكأسِ (جـ)، وذلكَ منْ خلالِ المقارنةِ بينَ قوى الطفوِ في الحالاتِ الثلاثِ.

ب . محصلةُ القوى المؤثرةِ في الجسمِ (أ) إلى أعلى؛ لأنَّ قوةَ الطفوِ أكبرُ منْ وزنِ الجسمِ ($F_B > F_g$) وبالتالي؛ سيتحركُ الجسمُ إلى أعلى بتسارعٍ حتى يطفوَ جزءٌ منهُ ليستقرَّ على سطحِ الماءِ، أما الجسمُ (ب) فيبقى معلقًا في الماءِ؛ لأنَّ ($F_B = F_g$)، بينَما الجسمُ (جـ) سيتحركُ إلى أسفلَ بتسارعٍ؛ لأنَّ ($F_B < F_g$)، ليستقرَّ في قاعِ الكأسِ.

## المثالُ 5

قاربٌ مطاطيٌّ كتلتهُ 200 kg ومتوسطُ كثافتهِ $100\ kg\ m^{-3}$ ينقلُ عددًا منَ المهاجرينَ، كما في الشكلِ (10)، إذا علمتُ أنَّ كثافةَ ماءِ البحرِ $1024\ kg\ m^{-3}$ فأجدُ كتلةَ أكبرِ حمولةٍ يمكنُ وضعُها فوقَ سطحِ القاربِ؛ بحيثُ يبقى طافيًا (أفترضُ أنَّ حافةَ القاربِ العلويةَ عندَ سطحِ الماءِ تمامًا).

الشكلُ (10): قاربٌ ينقلُ عددًا منَ المهاجرينَ.

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

**المطلوبُ :** كتلةُ الحمولةِ $m = ?$

**الحلُّ:**

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

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

أطبِّقُ العلاقةَ: $F_B = F_g$

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

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

هلْ هذهِ الحمولةُ آمنةٌ؟ أبرّرُ رأيي.

## المثالُ 6

مُلئَ بالونٌ بغازِ الهيليومِ، وتُرِكَ في الهواءِ، فإذا علمتُ أنَّ كثافةَ الهواءِ $1.29\ kg\ m^{-3}$، وقطرَ البالونِ 0.4 m فأجدُ قوةَ الطفوِ.

**المعطياتُ:** $r = 0.2\ m$ ، $\rho_{air} = 1.29\ kg\ m^{-3}$ ، $g = 10\ m/s^2$

**المطلوبُ:** $F_B = ?$

**الحلُّ:**

حجمُ البالونِ: $V_o = \frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{4}{3} \times 3.14 \times (0.2)^3 = 0.033\ m^3$

قوةُ الطفوِ: $F_B = \rho_{air} V_o g = 1.29 \times 0.033 \times 10 = 0.43\ N$

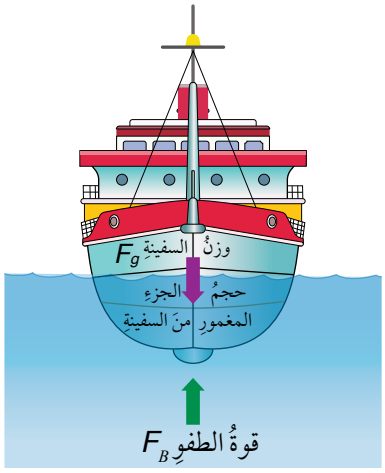
## تطبيقاتُ قاعدةِ أرخميدس Applications of Archimedes' Principle

قاعدةُ أرخميدس لَها تطبيقاتٌ كثيرةٌ ومتنوعةٌ، وفي ما يأتي بعضُ تلكَ التطبيقاتِ في حياتِنا اليوميةِ:

### السفينةُ Ship

كيفَ تطفو السفينةُ على سطحِ الماءِ وهيَ مصنوعةٌ منَ الحديدِ في حينِ يغرقُ مسمارُ الحديدِ في الماءِ؟

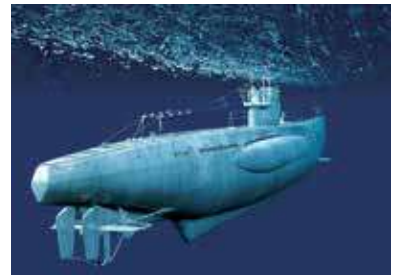
عندَما تطفو السفينةُ على سطحِ البحرِ تكونُ قوةُ الطفوِ مساويةً لوزنِها؛ لذا تُصنَعُ السفينةُ بحيثُ تحوي تجويفًا كبيرًا يزيدُ منْ حجمِها ويقلِّلُ منْ متوسطِ كثافتِها؛ ليصبحَ أقلَّ منْ كثافةِ الماءِ، وعندَ إنزالِ السفينةِ إلى الماءِ فإنَّ حجمَ الماءِ المزاحِ ـ المساوي لحجمِ الجزءِ المغمورِ منَ السفينةِ ـ يزدادُ بالتدريجِ فتزدادُ تبعًا لذلكَ قوةُ الطفوِ حسبَ قاعدةِ أرخميدس(قوةُ الطفوِ تساوي وزنَ الماءِ المزاحِ) إلى أنْ تصبحَ قوةُ الطفوِ مساويةً لوزنِ السفينةِ كما في الشكلِ(11)، ويتوقفُ ازديادُ حجمِ الجزءِ المغمورِ منَ السفينةِ لتطفوَ على سطحِ الماءِ؛ حيثُ محصلةُ القوى المؤثرةِ عليْها تساوي صفرًا.




الشكلُ (11): سفينةٌ تطفو على سطحِ البحرِ، والقوى المؤثرةُ فيها.

### الغواصةُ Submarine

سفينةٌ متخصصةٌ يمكنُها الغوصُ والتنقلُ تحتَ سطحِ الماءِ على أعماقٍ مختلفةٍ، وبإمكانِها أنْ تطفوَ، أنظرُ الشكلَ (12). وتحوي الغواصةُ خزاناتٍ كبيرةً يجري إدخالُ الماءِ إليْها أوْ إخراجهُ منْها، فيزدادُ متوسطُ كثافتِها أوْ يقلُّ لتصبحَ قوةُ الطفوِ إما أكبرَ منْ وزنِ الغواصةِ فتطفو وإما أقلَّ فتهبطُ أوْ تظلُّ مساويةً لقوةِ الطفوِ فتبقى معلقةً على عمقٍ ثابتٍ في الماءِ. وتُستخدَمُ الغواصةُ للأغراضِ العسكريةِ وللأغراضِ المدنيةِ كذلكَ، مثلَ: الأبحاثِ العلميةِ والسياحةِ.



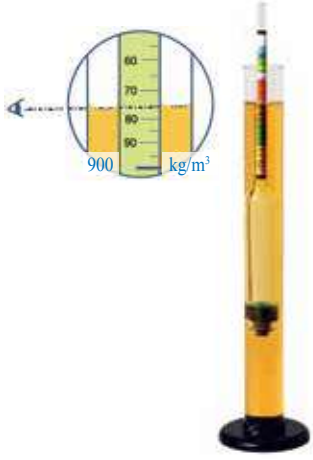
الشكلُ (12):غواصةٌ في أعماقِ المياهِ.

**أفكّرُ:** لماذا تطفو السفينةُ بشكلٍ أكبرَ في المياهِ المالحةِ منْها في المياهِ العذبةِ؟

### مقياسُ كثافةِ السوائلِ Hydrometer

يعرف **مقياسُ كثافةِ السوائلِ Hydrometer** بأنه أداة تُستخدَمُ لقياسِ كثافةِ السائلِ؛ مثلِ: قياسِ كثافةِ الحليبِ، وكثافةِ محلولِ بطاريةِ السيارةِ، وغيرِها.

يوضعُ الأنبوبُ في السائلِ المرادِ قياسُ كثافتهِ فيطفو ليستقرَّ عندَ تدريجٍ محددٍ يمثلُ كثافةَ السائلِ، أنظرُ الشكلَ (13)، وكلَّما زادتْ كثافةُ




الشكلُ (13): قياسُ كثافةِ البنزينِ باستخدامِ مقياسِ كثافةِ السوائلِ.

السائلِ ازدادتْ قوةُ الطفوِ ليرتفعَ المقياسُ في السائلِ إلى أعلى بشكلٍ أكبرَ. كمْ تبلغُ كثافةُ البنزينِ في الشكلِ (13)؟

ويُفضَّلُ استخدامُ المقياسِ الإلكترونيِّ، كما في الشكلِ (14)؛ لأنَّهُ أكثرُ دقةً وسهولةً في الاستخدامِ.

الشكلُ (14): مقياسُ كثافةِ سوائلَ إلكترونيٌّ.

## المنطادُ Balloon

تُستخدَمُ المناطيدُ في أغراضٍ مختلفةٍ مثلِ: السياحةِ والرياضةِ والرصدِ الجويِّ؛ حيثُ يتسارعُ المنطادُ إلى أعلى، ويرتفعُ في الهواءِ عندَما يكونُ وزنهُ أقلَّ منْ قوةِ الطفوِ المؤثرةِ فيهِ منْ قبلِ الهواءِ المحيطِ بهِ. وفي حالِ كانتْ قوةُ الطفوِ أقلَّ منْ وزنهِ يتسارعُ إلى أسفلَ ويهبطُ. متى يبقى معلقًا في الهواءِ؟

الشكلُ (15): منطادٌ مملوءٌ بالغازِ.

تُصنَّفُ المناطيدُ حسبَ نوعيةِ الغازِ المُحمَّلِ بها؛ فمثلًا: المنطادُ الغازيُّ الذي يكونُ مملوءًا بغازٍ أخفَّ منَ الهواءِ الجويِّ، كغازِ الهيليومِ أوِ الهيدروجينِ؛ مثلَما في الشكلِ (15). وهناكَ نوعٌ آخرُ يُستخدَمُ حاليًّا بشكلٍ كبيرٍ، وهوَ منطادُ الهواءِ السّاخنِ، أنظرُ الشكلَ (16)، حيثُ يجري التحكمُ بصعودهِ أوْ هبوطهِ منْ خلالِ تقليلِ درجةِ حرارةِ الهواءِ داخلَهُ، أوْ زيادتِها.

الشكلُ (16): منطادُ الهواءِ السّاخنِ.

وتوجدُ تطبيقاتٌ أخرى كثيرةٌ تعتمدُ على قاعدةِ أرخميدس مثلَ: العوامةِ الميكانيكيةِ المستخدمةِ في خزاناتِ المياهِ، وحركةِ الأسماكِ صعودًا وهبوطًا في الماءِ منْ خلالِ الحويصلاتِ الهوائيةِ، والسباحةِ وغيرِها.

**أتحقَّقُ:** كيفَ يمكنُ التحكمُ بصعودِ كلٍّ مما يأتي وهبوطهِ:

1. منطادُ الهواءِ الساخنِ.
2. الغواصةُ.

**أفكِّرُ:** لماذا يرتفعُ البالونُ في الهواءِ بتسارعٍ أكبرَ في الأجواءِ الباردةِ مقارنةً بتسارعهِ في الأجواءِ الحارةِ؟

# مراجعةُ الدرسِ

1. **الفكرةُ الرئيسةُ:** لماذا تطفو بعضُ الأجسامِ فوقَ سطحِ الماءِ، وبعضُها يبقى معلقًا، وبعضٌ آخرُ ينغمرُ ليستقرَّ في الأسفلِ؟

2. ثلاثةُ مجسماتٍ متماثلةٍ في الحجمِ (A ، B ، C) كثافةُ كلٍّ منْها على الترتيبِ $2.5 \times 10^3\ kg/m^3$ ، $9.7 \times 10^2\ kg/m^3$ ، $1.3 \times 10^3\ kg/m^3$ وُضِعتْ داخلَ حوضِ جليسرينٍ كثافتهُ $1.3 \times 10^3\ kg/m^3$. بناءً على ما سبقَ أجيبُ عما يأتي:

أ . **أقارنُ** بينَ قوى الطفوِ المؤثرةِ في المجسّماتِ الثلاثةِ لحظةَ إفلاتِها.

ب. **أقارنُ** بينَ القوى المحصلةِ المؤثرةِ في المجسماتِ الثلاثةِ لحظةَ إفلاتِها.

3. **السببُ والنتيجةُ:** ماذا يحدثُ في كلِّ حالةٍ مما يأتي:

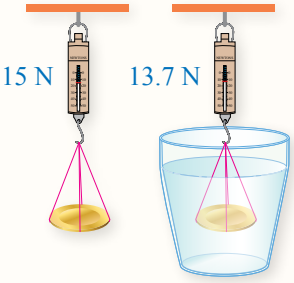
أ . تفريغُ خزاناتِ المياهِ منَ الغواصةِ.

ب. تقليلُ درجةِ حرارةِ الهواءِ داخلَ المنطادِ.

جـ. زيادةُ حجمِ التجويفِ في السفينةِ.

4. **أحسبُ:** قاربٌ مطاطيٌّ يطفو نصفُ حجمهِ فوقَ سطحِ البحرِ، فإذا علمتُ أنَّ كثافةَ مياهِ البحرِ $1024\ kg\ m^{-3}$ فأجدُ متوسطَ كثافةِ القاربِ.

5. وجدتْ نورُ قطعةً نقديةً قديمةً لونُها أصفرُ تشبهُ الذهبَ، أرادتِ التأكدَ منْ أنَّ القطعةَ مصنوعةٌ منَ الذهبِ؛ فعلقتِ القطعةَ بميزانٍ نابضيٍّ حساسٍ فكانتْ قراءةُ الميزانِ 15.0 N (في الهواءِ) كما في الشكلِ، وعندَ غمرِها في الماءِ أصبحتْ قراءةُ الميزانِ 13.7 N، أجيبُ عمّا يأتي:

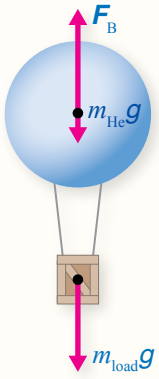



أ . أرسمُ مخططَ الجسمِ الحرِّ للقطعةِ بعدَ غمرِها في الماءِ.

ب. **أحسبُ** قوةَ الطفوِ.

جـ. **أصدرُ حكمًا:** هلِ القطعةُ النقديةُ مصنوعةٌ منَ الذهبِ؟

علمًا بأنَّ كثافةَ الذهبِ $(19.3 \times 10^3\ kg\ m^{-3})$، وكثافةَ الماءِ $(10^3\ kg\ m^{-3})$.




6. **أحسبُ:** بالونٌ مملوءٌ بغازِ الهيليومِ، ما أقلُّ حجمٍ للبالونِ ليتمكنَ منْ رفعِ ثلاثةِ أشخاصٍ مجموعُ كتلهِمْ يساوي 180 kg، علمًا بأنَّ كتلةَ السلةِ التي تحملهُمْ معَ كتلةِ مادةِ البالونِ تساوي 30 kg، وكثافةَ الهواءِ $1.29\ kg\ m^{-3}$ وكثافةَ الهيليومِ $0.179\ kg\ m^{-3}$؟

**الفكرةُ الرئيسةُ:**

للموائعِ المتحركةِ خصائصُ وسلوكاتٌ وتطبيقاتٌ خاصةٌ بها، يمكنُ تفسيرُها عنْ طريقِ معادلةِ الاستمراريةِ وقاعدةِ برنولي.

**نتاجاتُ التعلُّمِ:**

- أوضحُ المفاهيمَ المتعلقةَ بالموائعِ المتحركةِ.
- أستقصي خصائصَ المائعِ المثاليِّ والعواملَ المؤثرةَ في حركتِهِ.
- أوظفُ التجاربَ العمليةَ في التحققِ منْ مبدأِ برنولي.
- أوظفُ معرفتي بالمفاهيمِ والعلاقاتِ الخاصةِ بحركةِ الموائعِ في حلِّ مسائلَ حسابيةٍ، وتفسيرِ مواقفَ حياتيةٍ متعلقةٍ بها.
- أوظفُ التجاربَ العمليةَ في تعرفِ خصائصِ الموائعِ المتحركةِ وتطبيقاتِها.

**المفاهيمُ والمصطلحاتُ:**

| | |
|---|---|
| الجريانُ المنتظمُ | Regular(Steady) Flow |
| خطُّ الجريانِ | Flow Line |
| الجريان غير الدوّامي | Irrotational Flow |
| مائعٌ غيرُ قابلٍ للانضغاطِ | Incompressible Fluid |
| مائعٌ غيرُ لزجٍ | Nonviscous Fluid |
| المائعُ المثاليُّ | Ideal Fluid |
| معادلةُ الاستمراريةِ | Continuity Equation |
| معدلُ التدفقِ الحجميِّ | Volume Flow Rate |
| معادلةُ برنولي | Bernoulli's Equation |
| مقياسُ فنتوري | Venturi Meter |

## خصائصُ الموائعِ المتحركةِ Properties of Fluids in Motion

تتساءلُ ربَّما عنْ كثيرٍ منَ المشاهداتِ والمواقفِ الحياتيةِ والتطبيقاتِ المتعلقةِ بحركةِ الموائعِ وسلوكِها؛ فمثلًا إذا كانَ طولُ خرطومِ المياهِ- أثناءَ ريِّ نباتاتِ حديقتكَ المنزليةِ- غيرَ كافٍ لوصولِ المياهِ إلى مسافةٍ أبعدَ لشمولِ مساحةٍ أكبرَ؛ فإنكَ بسهولةٍ تضغطُ بإصبعكَ لإغلاقِ جزءٍ منْ فوهةِ الخرطومِ، مثلَما في الشكلِ (17).

سنتناولُ في هذا الدرسِ حركةَ الموائعِ وخصائصَها ومعادلاتِها، والتطبيقاتِ المتعلقةَ بها إضافةً إلى تفسيرِ المشاهداتِ والمواقفِ الحياتيةِ المختلفةِ. ومنْ أبرزِ خصائصِ الموائعِ المتحركةِ:

### الجريانُ Flow

يمكنُ التمييزُ بينَ نوعيْنِ رئيسيْنِ منْ جريانِ الموائعِ؛ هما: الجريانُ المنتظمُ، والجريانُ غيرُ المنتظمِ.

الشكلُ (17): سلوكُ الماءِ المتدفقِ قبلَ الضغطِ على فوهةِ الخرطومِ، وبعدَهُ.

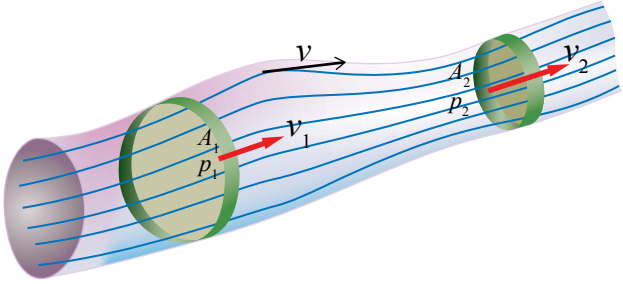
المائعُ الذي تكونُ سرعةُ جزيئاتهِ عندَ نقطةٍ معينةٍ فيهِ ثابتةً لا تتغيرُ معَ الزمنِ، ولكنَّها يمكنُ أنْ تتغيرَ منْ نقطةٍ إلى أخرى، يسمّى **جريانًا منتظمًا** **Regular (Steady) Flow** أوِ انسيابيًّا. مثلَما هوَ مبينٌ في الجزءِ السفليِّ منَ الشكلِ (18) حيثُ تنسابُ جزيئاتُ الدخانِ أوِ المائعِ في مساراتٍ منتظمةٍ تُمَثَّلُ بخطوطٍ، كلُّ خطٍّ منْها يسمّى **خطَّ الجريانِ** **Flow Line** وهوَ خطٌّ يمثلُ مسارَ جزيئاتِ المائعِ عندَ جريانِها. ويمكنُنا تصورُ جريانِ المائعِ في أنبوبٍ يسمّى أنبوبَ الجريانِ سواءٌ كانَ حقيقيًّا مثلَ خرطومِ الماءِ أوِ افتراضيًّا مثلَ التيارِ الهوائيِّ أوِ المائيِّ. وتُمثَّلُ خطوطُ الجرَيانِ المنتظمِ لمائعٍ كما في الشكلِ (19)، حيثُ تمتازُ تلكَ الخطوطُ بخصائصَ عدةٍ، منْها:

- أنَّها لا تتقاطعُ.
- كثافتُها (عددُ خطوطِ الجريانِ التي تمرُّ عموديًّا بوحدةِ المساحةِ $(A)$) تزدادُ بزيادةِ سرعةِ المائعِ $(v_2 > v_1)$.
- المماسُّ لأيّةِ نقطةٍ على خطِّ الجريانِ يحددُ اتجاهَ سرعةِ جزيْءِ المائعِ اللحظيةِ $(v)$ عندَ تلكَ النقطةِ.

يبقى جريانُ المائعِ منتظمًا ما لمْ تتجاوزْ سرعتُهُ قيمةً معينةً تسمّى السرعةَ الحرجةَ؛ فإنْ تجاوزَها يتحولُ جريانَ المائعِ منْ جريانٍ منتظمٍ إلى **جريانٍ غيرِ منتظمٍ** **Irregular Flow**. وهوَ جريانٌ تتغيرُ سرعةُ المائعِ عندَ نقطةٍ ما فيهِ معَ الزمنِ، كما هوَ مبينٌ في كلٍّ منَ الجزءِ العلويِّ منَ الشكلِ (18) وفي الشكلِ (20/ أ)، أما خطوطُ الجريانِ المنتظمِ وغيرِ المنتظمِ فتظهرُ في الشكلِ (20/ ب)؛ حيثُ تغيَّرَ جريانُ المائعِ عندَ وضعِ الكرةِ أمامَ مجراهُ ليتحولَ جريانهُ منْ جريانٍ منتظمٍ ( أمامَ الكرةِ وعلى جانبيْها) إلى جريانٍ غيرِ منتظمٍ (خلفَ الكرةِ).

الشكلُ (18): الجريانُ المنتظمُ والجريانُ غيرُ المنتظمِ لجزيئاتِ الدخانِ المنبعثةِ عندَ إطفاءِ الشمعةِ.

الشكلُ (20):
أ. الجريانُ المنتظمُ والجريانُ غيرُ المنتظمِ للماءِ.
ب. خطوطُ الجريانِ المنتظمِ والجريانِ غيرِ المنتظمِ للماءِ.




الشكلُ (19): خطوطُ الجريانِ المنتظمِ في أنبوبِ الجريانِ.

(أ)

(ب)

الشكلُ (21): التياراتُ الدوّاميّةُ في جزيئاتِ: أ. الهواءِ. ب. الماءِ.

عندَما تدورُ جميعُ جزيئاتِ المائعِ حولَ مركزٍ أوْ محورِ دورانٍ إضافةً إلى حركتِها الانتقاليةِ فإنَّ جريانَ المائعِ يكونُ دوّاميًّا، مثالُ ذلكَ حركةُ جزيئاتِ الهواءِ التي ينتجُ عنْها أعاصيرُ مدمرةٌ وحركةُ جزيئاتِ الماءِ التي ينتجُ عنْها دوّاماتٌ بحريةٌ خطرةٌ، كما في الشكلِ (21)، أما الجريانُ الذي لا تدورُ جزيئاتهُ حولَ مركزِ دورانٍ فيسمّى **الجريانَ غيرَ الدواميِّ Irrotational Flow.**

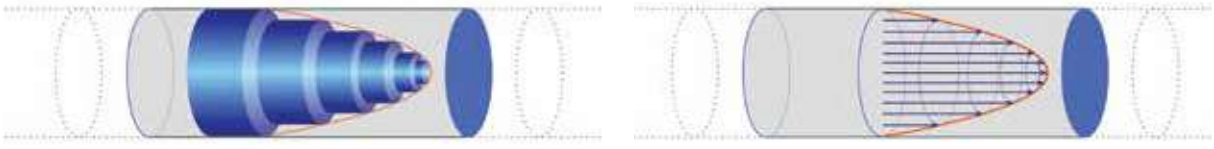
## القابليةُ للانضغاطِ Compressibility

المائعُ الذي تبقى كثافتهُ ثابتةً ولا تتغيرُ تحتَ تأثيرِ قوةٍ يعدُّ **مائعًا غيرَ قابلٍ للانضغاطِ Incompressible Fluid**، أما المائعُ الذي تتغيرُ كثافتهُ، يعدُّ **مائعًا قابلًا للانضغاطِ Compressible Fluid.**

## اللزوجةُ Viscosity

خلالَ جريانِ السائلِ تنسابُ طبقاتُهُ بالنسبةِ إلى بعضِها كما في الشكلِ (22)، وتعدُّ لزوجةُ السائلِ مقياسًا لمقاومةِ طبقاتِ المائعِ لهذهِ الحركةِ، فكلَّما زادتْ لزوجةُ المائعِ قلَّتْ قابليتهُ للجريانِ؛ وبذلكَ

أعدُّ فيلمًا قصيرًا باستخدامِ برنامجِ صانعِ الأفلامِ (movie maker) يبينُ خصائصَ المائعِ المثاليِّ، وأحرصُ على أنْ يشتملَ الفيلمُ على مفهومِ كلٍّ منَ: الجريانِ المنتظمِ، والجريانِ غيرِ الدوّاميِّ، وانعدامِ اللزوجةِ، وعدمِ القابليةِ للانضغاطِ، وعلى صورٍ متحركةٍ لأمثلةٍ توضيحيةٍ، ثمَّ أشاركهُ زملائي/ زميلاتي في الصفِّ.



الشكلُ (22): طبقاتُ المائعِ وخطوطُ جريانهِ.

تنخفضُ سرعتهُ؛ فمثلًا لتحريكِ كميةٍ منَ العسلِ بسرعةٍ ما في أنبوبِ الجريانِ نحتاجُ إلى قوةٍ أكبرَ منَ التي نحتاجُها لتحريكِ الكميةِ نفسِها منَ الماءِ، وبالسرعةِ نفسِها. يجدرُ الذكرُ بأنَّ تأثيرَ اللزوجةِ في جريانِ السائلِ يقابلهُ تأثيرُ قوةِ الاحتكاكِ في انزلاقِ جسمٍ على سطحٍ خشنٍ. فزيادةُ لزوجةِ الدمِ مثلًا قدْ تؤدي إلى زيادةِ مخاطرِ الإصابةِ بالجلطاتِ الدمويةِ عندَ الإنسانِ؛ حيثُ يصعبُ جريانُ الدمِ داخلَ الشرايينِ فيُعطى المريضُ أدويةً تقللُ لزوجةَ الدمِ (وهيَ أدويةٌ مميعةٌ).

لذا؛ يمكنُ تعريفُ **المائعِ غيرِ اللزجِ Nonviscous Fluid** بأنَّهُ المائعُ الذي لا يوجدُ قوى احتكاكٍ بينَ طبقاتِهِ أثناءَ جريانِهِ.

## المائعُ المثاليُّ Ideal Fluid

ولتسهيلِ دراسةِ حركةِ الموائعِ افترضَ العلماءُ **مائعًا مثاليًّا Ideal Fluid** يتصفُ بالخصائصِ الآتيةِ:

- جريانُهُ منتظمٌ.
- غيرُ قابلٍ للانضغاطِ.
- غيرُ لزجٍ.
- غيرُ دوّاميٍّ.

ولا يوجدُ في الواقعِ مائعٌ مثاليٌّ يتصفُ بهذهِ الخصائصِ الأربعِ؛ وإنَّما هوَ نموذجٌ افترضهُ العلماءُ يساعدُ ويُسهّلُ دراسةَ مائعٍ لا يتصفُ بخاصيةٍ أوْ أكثرَ منْ خصائصِ المائعِ المثاليِّ.

**أتحقَّقُ:** ما الخاصيةُ التي يمتلكُها المائعُ المتحركُ في الحالاتِ الآتيةِ:

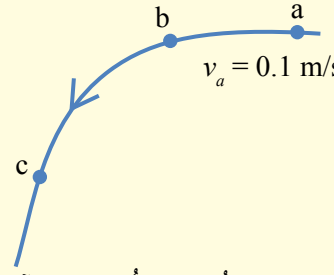
أ. كثافتهُ ثابتةٌ لا تتغيرُ أثناءَ جريانِهِ.

ب. توجدُ قوى احتكاكٍ (قوى مقاومةٍ) بينَ طبقاتِهِ أثناءَ جريانِهِ.

جـ. لا تدورُ جزيئاتهُ حولَ مركزِ دورانٍ أثناءَ جريانِهِ.

ولاستقصاءِ بعضٍ منْ خصائصِ الموائعِ؛ أُجري التجربةَ الآتيةَ:

**أفكِّرُ:** يمثلُ الشكلُ خطَّ جريانٍ منتظمٍ لمائعٍ، فإذا كانتْ سرعةُ أحدِ جزيئاتِ المائعِ لحظةَ مرورِهِ بالنقطةِ $(a)$ تساوي 0.1 m/s، بناءً على ما تقدمَ؛ أجيبُ عمّا يأتي:

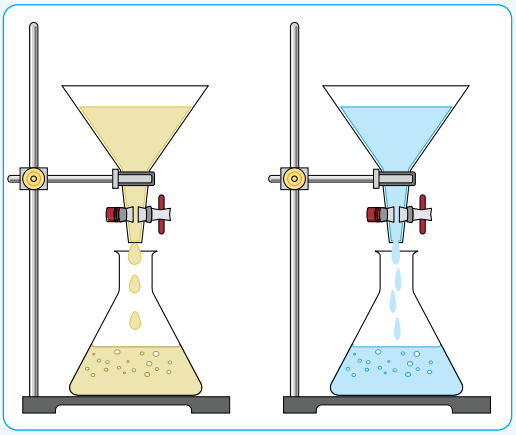



أ. كمْ تبلغُ سرعةُ جزيءٍ آخرَ منَ المائعِ لحظةَ مرورِهِ بالنقطةِ $(a)$ بعدَ (4 s) منْ مرورِ الجزيءِ الأولِ؟

ب. هلْ سرعةُ جزيءِ المائعِ عندَ مرورِهِ بالنقاطِ b و c هيَ نفسُها عندَ مرورِهِ بالنقطةِ $(a)$؟

# التجربةُ 2

## خصائصُ الموائعِ المتحركةِ



**الموادُّ والأدواتُ:** قمعانِ شفافانِ معَ صنبورٍ، محقنانِ طبيانِ، خرطومٌ شفافٌ طولهُ (1 m) تقريبًا، ساعتا إيقافٍ، ماءٌ، جليسرينٌ، كأسانِ فارغتانِ، بذورٌ جافةٌ صغيرةُ الحجمِ، حجرٌ.

**إرشاداتُ السلامةِ:** الحذرُ منْ سكبِ السوائلِ على الأرضيةِ؛ حتى لا تصبحَ زلقةً، والحذرُ في التعاملِ معَ الأدواتِ الزجاجيةِ.

**خطواتُ العملِ:** بالتعاونِ معَ أفرادِ مجموعتي، أنفذُ الخطواتِ الآتيةَ:

1. أحضرُ قمعينِ متماثلينِ، وأضعُ كلًّا منهُما على حاملٍ كما في الشكلِ، وأغلقُ كلًّا منهُما باستخدامِ الصنبورِ أوِ السدادةِ، وأضعُ أسفلَ كلٍّ منَ القمعينِ كأسًا فارغةً، ثمَّ أسكبُ كميةً منَ الماءِ في القمعِ الأولِ، وأسكبُ كميةً أخرى منَ الجليسرينِ مماثلةً لكميةِ الماءِ في الحجمِ في القمعِ الثاني (يمكنُ استخدامُ مخبارٍ مدرجٍ).
2. **أقيسُ:** أفتحُ صنبورَ كلٍّ منَ القمعينِ في اللحظةِ نفسِها بالتزامنِ معَ تشغيلِ ساعتيْ الإيقافِ، وأدونُ الفترةَ الزمنيةَ لإفراغِ محتوى كلِّ قمعٍ.
3. **ألاحظُ:** أحضرُ محقنينِ، وأملأُ نصفَ المحقنِ الأولِ بالماءِ باستخدامِ الضاغطِ، ونصفَ المحقنِ الثاني بالهواءِ، وأغلقُ كلًّا منهُما بسدادةٍ أو بإصبعي، وأضغطُ الماءَ والهواءَ في كلٍّ منَ المحقنينِ، وأدوِّنُ ملاحظاتي حولَ تغيرِ حجمِ كلٍّ منَ الهواءِ والماءِ.
4. أصلُ طرفَ الخرطومِ بالقمعِ، وأرفعُ القمعَ إلى أعلى مسافةٍ رأسيةٍ مقدارُها (30 cm) تقريبًا، وأترك باقيَ الخرطومِ مستقيمًا ما أمكنَ على طاولةِ المختبرِ؛ بحيثُ يصبُّ طرفُهُ الآخرُ في كأسٍ فارغةٍ.
5. **ألاحظُ:** أبدأُ بسكبِ الماءِ في القمعِ ونثرِ بذورٍ صغيرةِ الحجمِ فيه لتجريَ في الخرطومِ، وأدوِّنُ ملاحظاتي حولَ حركةِ الماءِ منْ خلالِ حركةِ البذورِ عبرَ الخرطومِ، أضعُ حجرًا أوْ كرةً أمامَ مجرى الماءِ عندَ خروجهِ منَ الأنبوبِ، وألاحظُ حركةَ البذورِ أمامَ الحجرِ وخلفَهُ. هلْ تلاحظُ دورانَ البذورِ حولَ مركزِ دورانٍ أوْ محورِ دورانٍ؟

**التحليلُ والاستنتاجُ:**

1. **أستنتجُ** الخاصيةَ التي توصلتُ إليْها في الخطوةِ (2) وأقارنُها بينَ حالتيْها في كلٍّ من المائعين.
2. **أستنتجُ** الخاصيةَ التي توصلتُ إليْها في الخطوةِ (3) وأقارنُ بينَ حالتيْها في كلٍّ من المائعين.
3. **أقارنُ** بينَ حركةِ البذورِ أثناءَ مرورِها في الخرطومِ وأمامَ الحجرِ وخلفَهُ. متى يكونُ الجريانُ غيرَ منتظمٍ؟ ومتى يكونُ منتظمًا؟ ما الخصائصُ التي استنتجتُها لجريانِ الماءِ في الخطوةِ (5)؟
4. **أتوقعُ** ما يحدثُ لعجلةٍ قابلةٍ للدورانِ إذا وُضِعتْ في مجرى الماءِ خلفَ الحجرِ.

## معادلةُ الاستمراريةِ Continuity Equation

نلاحظُ الكثيرَ منَ المشاهداتِ في حياتِنا اليوميةِ؛ مثلَ حركةِ المياهِ المتدفقةِ منْ فوهـةِ الخرطومِ بعدَ الضغطِ عليْـهِ في الشكلِ (17) بدايةَ الدرسِ، وتدفقِ الماءِ منْ مضخةِ رشِّ المزروعاتِ، ونقصانِ قطرِ أنبوبِ جريانِ الماءِ المتدفقِ منَ الصنبورِ أثناءَ سقوطِهِ في الشكلِ (23)؛ حيثُ تزدادُ سرعةُ الماءِ أثناءَ سقوطِهِ فتقلُّ مساحةُ مقطعِ الأنبوبِ. فما العلاقةُ التي تربطُ بينَ مساحةِ مقطعِ أنبوبِ الجريانِ وسرعةِ مرورِ المياهِ فيهِ؟

الشكلُ (23): نقصانُ مساحةِ مقطعِ أنبوبِ جريانِ الماءِ أثناءَ سقوطه.

لنفترضْ أنَّ مائعًا مثاليًّا يجري في أنبوبٍ مفتوحِ الطرفينِ ومساحةُ مقطعِهِ العرضيِّ متغيرةٌ كما في الشكلِ (24). وبما أنَّ المائعَ المثاليَّ غيرُ قابلٍ للانضغاطِ فإنَّ كتلةَ المائعِ $m_1$ التي تعبرُ مساحةَ مقطعٍ معينٍ $A_1$ منَ الأنبوبِ بسرعةِ $v_1$ تساوي كتلةَ المائعِ $m_2$ التي تعبرُ مساحةَ مقطعٍ آخرَ $A_2$ منَ الأنبوبِ بسرعةٍ $v_2$ في الفترةِ الزمنيةِ $\Delta t$ نفسِها، أيْ أنَّ:

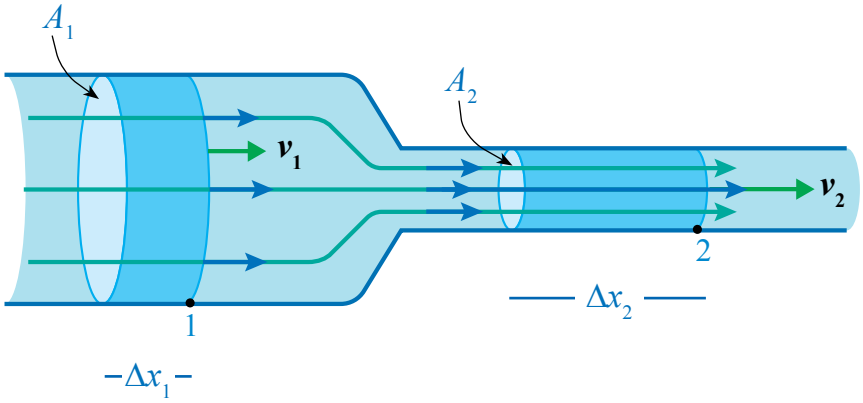
$$m_1 = m_2$$

وبما أنَّ $m = \rho_f V$ ، $V = A\Delta x$ ($\Delta x$: المسافةُ التي يقطعُها المائعُ في الفترةِ الزمنيةِ $\Delta t$) فإنَّ:

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

وبقسمةِ طرفيْ المعادلةِ على $\Delta t$، وحيثُ إنَّ $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ فإنَّ:

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




الشكلُ (24): جريانُ مائعٍ مثاليٍّ في أنبوبِ جريانٍ أفقيٍّ، مساحةُ مقطعِهِ متغيرةٌ.

وحيث إنَّ كثافةَ المائعِ ثابتةٌ ($\rho_1 = \rho_2$)؛ لأنَّهُ غيرُ قابلٍ للانضغاطِ، فإنَّ:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

هذهِ المعادلةَ تُسمّى **معادلةَ الاستمراريةِ** **Continuity Equation** ويُعبَّرُ عنْها بالكلماتِ كما يأتي: «حاصلُ ضربِ مساحةِ المقطعِ العرضيِّ لأنبوبِ جريانِ المائعِ في سرعةِ المائعِ عندَ ذلكَ المقطعِ يساوي مقدارًا ثابتًا ($A\,v = constant$) للمائعِ المثاليِّ». ويمثلُ المقدارُ $Av$ **معدلَ التدفقِ الحجميِّ** **Volume Flow Rate** $\frac{V}{\Delta t}$ وهوَ حجمُ المائعِ الذي يَعبُرُ مساحةَ مقطعٍ معينٍ منَ الأنبوبِ في وحدةِ الزمنِ:

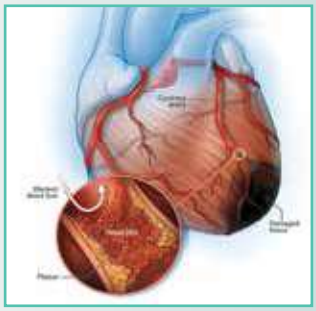
$$A\,v = \frac{V}{\Delta t}$$

ووحدةُ قياسهِ $m^3/s$ في النظامِ الدوليِّ للوحداتِ.

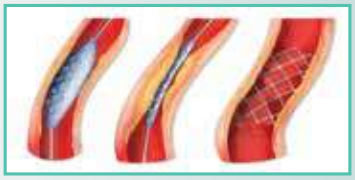
معادلةُ الاستمراريةِ تعبيرٌ رياضيٌّ عنْ مبدأِ حفظِ الكتلةِ، وتنطبقُ على أيِّ مقطعٍ منَ أنبوبِ الجريانِ، وليسَ شرطًا عندَ طرفيْهِ. وتكمنُ أهميةُ معادلةِ الاستمراريةِ في أنَّها تصفُ حركةَ المائعِ عندَ مرورهِ في أنبوبِ جريانٍ تتغيرُ مساحةُ مقطعهِ؛ فعندَما ينتقلُ المائعُ منْ أنبوبٍ واسعٍ (مساحةُ مقطعهِ كبيرةٌ) إلى أنبوبٍ أضيقَ (مساحةُ مقطعهِ صغيرةٌ) تزدادُ سرعةُ المائعِ لضمانِ مرورِ الحجمِ نفسهِ منَ المائعِ في الزمنِ نفسهِ. وتفسرُ معادلةُ الاستمراريةِ كثيرًا منَ المشاهداتِ مثلَ تدفقِ مياهِ النهرِ بسرعةٍ أكبرَ في الأماكنِ التي يضيقُ فيها مجرى النهرِ عنْ تلكَ التي يتسعُ فيها المجرى. والآنَ هلْ يمكنُ الإجابةُ على التساؤلِ الذي وردَ بدايةَ الدرسِ المتعلقِ بالضغطِ على فوهةِ خرطومِ مياهِ الريِّ؛ لوصولِ المياهِ إلى مسافةٍ أكبرَ؟

✓ **أتحقَّقُ:** ما العواملُ التي يعتمدُ عليْها معدلُ التدفقِ الحجميِّ في أنبوبِ الجريانِ؟

**الفيزياءُ والطبُّ**



عندَ حدوثِ انسدادٍ جزئيٍّ أوْ كليٍّ لبعضِ الشرايينِ التي تغذّي عضلةَ القلبِ؛ نتيجةَ تراكمِ الموادِّ الدهنيةِ على جدرانِ الشرايينِ الداخليةِ مسببةً تضيُّقًا في الشرايين، كما يبدو في الشكلِ: تزدادُ سرعةُ تدفقِ الدمِ في تلكَ الشرايينِ حسبَ معادلةِ الاستمراريةِ، فيلجأُ الأطباءُ إلى إجراءِ عمليةِ القسطرةِ لتوسعةِ تلكَ الشرايينِ باستخدامِ البالونِ وتركيبِ شبكاتٍ أحيانًا، لذا؛ يُنصحُ بتناولِ غذاءٍ صحيٍّ واجراءِ فحوصاتٍ مخبريةٍ دوريةٍ للكوليسترولِ والدهونِ في الدمِ.



**أُفكِّرُ:** أفسّرُ ما يأتي:

أ. زيادةُ سرعةِ الماءِ المتدفقِ من خرطومِ المياهِ عندَ الضغطِ على فوهتهِ.

ب. نقصانُ اتساعِ مجرى الماءِ في الشكلِ (23) أثناءَ سقوطهِ نحوَ الأسفلِ.

## المثالُ 7

يضخُّ قلبُ الإنسانِ الدمَ إلى الشرايينِ التي تتفرعُ إلى شعيراتٍ، فإذا علمتُ أنَّ الدمَ يتدفقُ بسرعةِ $5 \times 10^{-2}$ m/s في شريانٍ مساحةُ مقطعهِ $6$ mm$^2$، يتفرعُ إلى شعيراتٍ متماثلةٍ مساحةُ مقطعِ كلِّ شُعيرةٍ منْها $0.3$ mm$^2$ وسرعةُ تدفقِ الدمِ في كلٍّ منْها $2 \times 10^{-3}$ m/s أجدُ:

أ . معدلَ التدفقِ الحجميِّ للدمِ في الشريانِ.

ب. عددَ الشعيراتِ التي تفرعتْ منَ الشريانِ.

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

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

**المطلوبُ:** $\frac{V}{\Delta t} = ?$ ، عددُ الشعيراتِ $N = ?$

**الحلُّ:**

أ . معدلُ التدفقِ الحجميِّ:

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

ب . عددُ الشعيراتِ $N$:

سرعةُ تدفقِ الدمِ في كلِّ شعيرةٍ $(v_2)$ متساويةٌ؛ لأنَّ مساحةَ مقطعِ الشعيراتِ متساويةٌ.

معدلُ التدفقِ في الشريانِ = مجموعَ معدلِ التدفقِ في الشعيراتِ.

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

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

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

$$N = 500$$

ألاحظُ أنَّ سرعةَ اندفاعِ الدمِ في الشعيراتِ الدمويةِ صغيرةٌ (قليلةٌ) جدًّا مقارنةً معَ سرعتهِ في الشريانِ، الأمرُ الذي يتيحُ حدوثَ عملياتِ تبادلِ الغازاتِ (الأكسجينِ وثاني أكسيدِ الكربونِ) معَ الخلايا والأنسجةِ، إضافةً إلى تزويدِها بالموادِّ الغذائيةِ، وهذهِ منْ حِكَمِ اللّٰهِ عزَّوجلَّ.

## المثالُ 8

يتدفقُ الماءُ في شلالاتِ نياجارا كما في الشكلِ (25)، وعندَ لحظةٍ معينةٍ يتدفقُ بمعدلِ $5525\ m^3/s$ منْ مجرًى عرضهُ $670\ m$ وعمقُ الماءِ فيهِ تقريبًا $2\ m$، أحسبُ:

أ . سرعةَ الماءِ المتدفقِ عندَ تلكَ اللحظةِ.

ب. حجمَ الماءِ المتدفقِ في $5\ min$.

الشكلُ (25): تدفقُ شلالاتِ نياجارا.

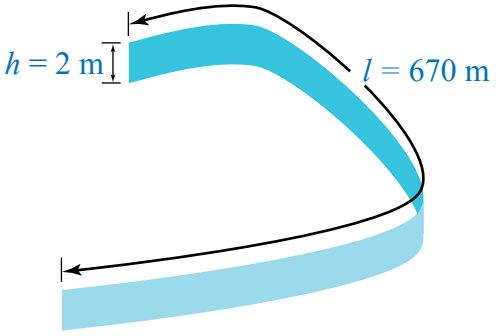
**المعطياتُ:** $\frac{V}{\Delta t} = 5525\ m^3/s$ ، $l = 670\ m$ ، $h = 2\ m$

**المطلوبُ:** $v = ?$ ، $V = ?$

**الحلُّ:**

أ . مساحةُ المقطعِ العرضيِّ لمجرى الماءِ كما في الشكلِ

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




لإيجادِ سرعةِ تدفقِ الماءِ أستخدمُ المعادلةَ الآتيةَ:

$$A\ v = \frac{V}{\Delta t}$$

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

ب . حجمُ الماءِ المتدفقِ في $(5\ min)$:

$$\frac{V}{5 \times 60} = 5525 \rightarrow V = 1.657 \times 10^6\ m^3$$

## تمرينٌ

أنبوبُ ماءٍ نصفُ قطرهِ $0.02\ m$ يتدفقُ فيهِ الماءُ بمعدلِ $1.25 \times 10^{-3}\ m^3/s$ يضيقُ ليصبحَ نصفُ قطرهِ $0.01\ m$، أحسبُ:

أ . سرعةَ تدفقِ الماءِ في الجزءِ الواسعِ منَ الأنبوبِ.

ب . سرعةَ تدفقِ الماءِ في الجزءِ الضيقِ منَ الأنبوبِ.

جـ . حجمَ الماءِ المتدفقِ منَ الجزءِ الضيقِ في $20\ s$.

## معادلةُ برنولي Bernoulli's Equation

ربَّما تستغربُ وتتساءلُ: كيفَ لطائرةٍ مثلَ الإيربصِ كتلتُها تزيدُ عنْ 300 tons أنْ تطيرَ في الهواءِ؟ وما الذي يجعلُ كرةَ التنسِ ترتفعُ إلى أعلى في الهواءِ داخلَ الكأسِ عندَ تسليطِ تيارٍ هوائيٍّ أفقيٍّ (يؤدي إلى زيادةِ سرعةِ الهواءِ) فوقَ سطحِ الكأسِ، كما في الشكلِ (26)؟

العالمُ الفيزيائيُّ السويسريُّ دانيال برنولي (1700 - 1782) درسَ العلاقةَ بينَ ضغطِ المائعِ وسرعتِهِ وارتفاعِهِ.

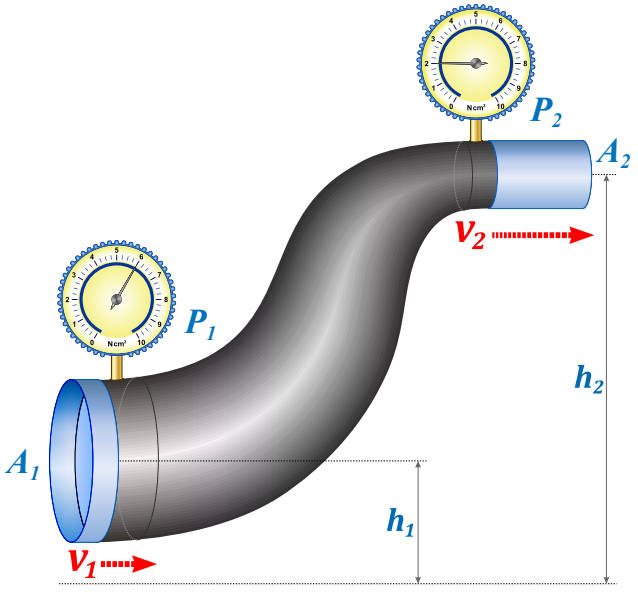
أفترضُ أنَّ مائعًا مثاليًّا يجري عبرَ أنبوبٍ يتغيرُ كلٌّ منْ مساحةِ مقطعِهِ العرضيِّ وارتفاعِهِ عنْ سطحِ الأرضِ، كما في الشكلِ (27)، فإنَّ المعادلةَ التي تربطُ بينَ ضغطِ المائعِ وسرعتِهِ وارتفاعِهِ اشتقَّها العالمُ برنولي، وهيَ تطبيقٌ لمبدأِ حفظِ الطاقةِ على المائعِ المثاليِّ، وسُمِّيتْ تلكَ المعادلةُ **بمعادلةِ برنولي Bernoulli's Equation** وتنصُّ على:

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

ويُعبَّرُعنها رياضيًّا على النحوِ 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 أُفقيًّا.




الشكلُ (27): جريانُ المائعِ في أنبوبٍ تتغيرُ مساحةُ مقطعِهِ وارتفاعهُ.

عندَ مقارنةِ موقعينِ: (1 و 2) على مجرى السائلِ نحصلُ على:

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

**حيثُ:**

$P_1$ : ضغطُ المائعِ عندَ الموقعِ الأولِ.

$P_2$ : ضغطُ المائعِ عندَ الموقعِ الثاني.

$\rho_f$ : كثافةُ المائعِ.

$v_1$ : سرعةُ المائعِ في الموقعِ الأولِ.

$v_2$ : سرعةُ المائعِ في الموقعِ الثاني.

$h_1$ : ارتفاعُ مركزِ الأنبوبِ في الموقعِ الأولِ عنْ مستوًى مرجعيٍّ (سطحُ الأرضِ مثلًا).

$h_2$ : ارتفاعُ مركزِ الأنبوبِ في الموقعِ الثاني عنِ المستوى المرجعيِّ نفسهِ في الموقعِ الأولِ.

$g$ : تسارعُ السقوطِ الحرِّ.

$(\frac{1}{2}\rho_f v^2)$ : طاقةُ الحركةِ لوحدةِ الحجومِ

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

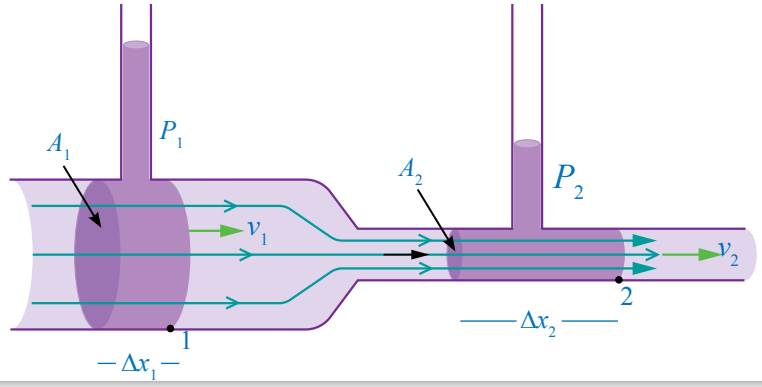
$(\rho_f gh)$ : طاقةُ الوضعِ لوحدةِ الحجومِ

$$\frac{mgh}{V} = \rho_f gh \ , \ \frac{m}{V} = \rho_f$$

و على اعتبارِ المثالِ الآتي حالةً خاصةً؛ عندَما يكونُ أنبوبُ الجريانِ أفقيًّا $(h_1 = h_2)$، كما في الشكلِ (28) فإنَّ معادلةَ برنولي تؤولُ إلى:

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

أعدُّ فيلمًا قصيرًا باستخدامِ برنامجِ صانعِ الأفلامِ (movie maker) يوضحُ معادلةَ برنولي، وأحرصُ على أنْ يشتملَ الفيلمُ على حالاتٍ مختلفةٍ لتطبيقِ معادلةِ برنولي في الحياةِ اليوميةِ، وعلى صورٍ متحركةٍ لأمثلةٍ توضيحيةٍ، ثمَّ أشاركهُ زملائي/ زميلاتي في الصفِّ.




الشكلُ (28): نقصانُ الضغطِ بزيادةِ سرعةِ المائعِ.

وبحسبِ معادلةِ الاستمراريةِ فإنَّ سرعةَ المائعِ $v_2$ في الأنبوبِ ذي القطرِ الأصغرِ تكونُ أكبرَ منْ سرعةِ المائعِ $v_1$ في الأنبوبِ ذي القطرِ الأكبرِ، وبناءً على المعادلةِ السابقةِ يكونُ الضغطُ $P_2$ أقلَّ منَ الضغطِ $P_1$ بمعنى: «**يقلُّ ضغطُ المائعِ كلَّما ازدادتْ سرعتهُ**» كما في الشكلِ (28)، وهذهِ حالةٌ خاصةٌ منْ معادلةِ برنولي، وحقيقةٌ مهمةٌ يمكنُ منْ خلالِها تفسيرُ كثيرٍ منَ المشاهداتِ والظواهرِ الحياتيةِ. ما الدليلُ على أنَّ $(P_2 < P_1)$ في الشكلِ (28)؟

**أُفكِّرُ:** أفسِّرُ ارتفاعَ كرةِ التنسِ في الهواءِ عندَ تسليطِ تيارٍ هوائيٍّ فوقَها في الشكلِ (26).

✓ **أتحقَّقُ:** أذكرُ نصَّ معادلةِ برنولي عنِ المائعِ المثاليِّ، وأُعبِّرُ عنْها بصورةٍ رياضيةٍ.

## المثالُ 9

يجري الماءُ في خرطومٍ أفقيٍّ بسرعةِ $v_1 = 3\ \text{m/s}$، فإذا كانَ ضغطُ الماءِ في الخرطومِ $1.4 \times 10^5\ \text{Pa}$ وعندَ تقليلِ قطرِ الخرطومِ هبطَ ضغطُ الماءِ ليصبحَ $1.1 \times 10^5\ \text{Pa}$ ، أحسبُ:

أ . سرعةَ الماءِ عبرَ الجزءِ الضيقِ منَ الخرطومِ.

ب. نسبةَ مساحةِ مقطعِ الجزءِ الضيقِ إلى مساحةِ الجزءِ الواسعِ منَ الخرطومِ.

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

**المطلوبُ:** $v_2 = ?$ ، $\dfrac{A_2}{A_1} = ?$

**الحلُّ:**

أ . بما أنَّ أنبوبَ الجريانِ أفقيٌّ فإنَّ:

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

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

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

ب. أطبِّقُ معادلةَ الاستمراريةِ:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

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

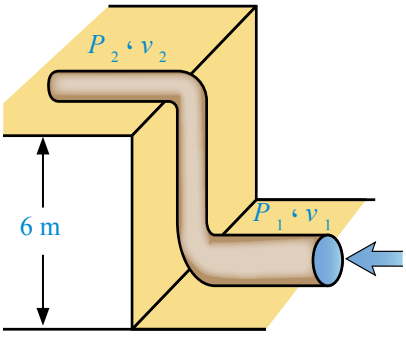
$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{3}{8.3} = 0.36$$

## المثالُ 10

يتمُّ تشغيلُ نظامِ تدفئةٍ مركزيةٍ لتسخينِ المياهِ في منزلٍ مكونٍ منْ طابقيْنِ باستخدامِ مضخةٍ في الطابقِ الأرضيِّ تضخُّ الماءَ بسرعةِ 0.5 m/s خلالَ أنبوبٍ نصفُ قطرهِ 2 cm تحتَ ضغطِ $3 \times 10^5$ Pa إلى الطابقِ الثاني الذي يرتفعُ مسافةَ 6 m عنِ المضخةِ، كما في الشكلِ (29)؛ ليتدفقَ الماءُ منْ أنبوبٍ نصفُ قطرهِ 1.2 cm . أحسبُ:

أ . سرعةَ تدفقِ الماءِ في الأنبوبِ في الطابقِ الثاني.

ب. ضغطَ الماءِ في الأنبوبِ في الطابقِ الثاني.




الشكلُ (29): ضخُّ المياهِ إلى الطابقِ الثاني.

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

**المطلوبُ:** $v_2 = ?$ ، $P_2 = ?$

**الحلُّ:**

أ . أستخدمُ معادلةَ الاستمراريةِ:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

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

ب. أستخدمُ معادلةَ برنولي:

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

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

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

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

## تمرينٌ

أنبوبُ تزويدٍ نصفُ قطرهِ 4 cm يرتفعُ عنْ سطحِ الأرضِ مسافةً رأسيةً مقدارُها 3 m ومعدلُ تدفقِ السائلِ فيهِ $2 \times 10^{-3}$ m$^3$/s يتصلُ بأنبوبٍ على سطحِ الأرضِ نصفُ قطرهِ 1.5 cm وضغطُ السائلِ فيهِ $3 \times 10^5$ Pa ، فإذا علمتُ أنَّ كثافةَ السائلِ 2000 kg/m$^3$ ، فأحسبُ مِقدارَ ما يأتي:

أ . سرعةُ السائلِ المتدفقِ منَ الأنبوبِ السفليِّ.

ب . ضغطُ السائلِ في أنبوبِ التزويدِ العلويِّ.

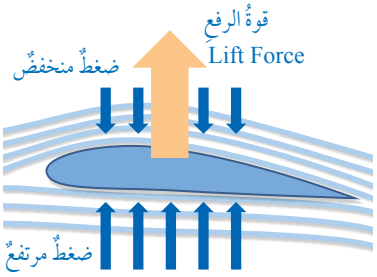
## تطبيقاتٌ على معادلةِ برنولي

## Applications of Bernoulli's Equation

معادلةُ برنولي تُطبَّقُ في مواقفَ وأوضاعٍ عديدةٍ، وتفسرُ كثيرًا منَ الظواهرِ والمشاهداتِ الحياتيةِ المختلفةِ؛ نتناولُ منْها ما يأتي:

### أجنحةُ الطائرةِ Airplane Wings

**قوةُ الرفعِ Lift Force:** تُستخدَمُ معادلةُ برنولي عندَ تصميمِ أجنحةِ الطائراتِ، عنْ طريقِ تصميمِ شكلِ الجناحِ الانسيابيِّ ليكونَ سطحُ الجناحِ العلويُّ منحنيًا (محدبًا)، وسطحهُ السفليُّ شبهَ مستوٍ؛ كما في الشكلِ (30) الذي يمثلُ مقطعًا عرضيًّا للجناحِ، وعندَما يتحركُ الجناحُ عبرَ الهواءِ ينسابُ الهواءُ فوقَ الجناحِ بسرعةٍ أكبرَ منَ انسيابِهِ تحتَ الجناحِ، وبالتالي، فإنَّ ضغطَ الهواءِ فوقَ الجناحِ أقلُّ منْ ضغطِهِ أسفلَ الجناحِ حسبَ معادلةِ برنولي، وبذلكَ تتولدُ **قوةُ الرفعِ Lift Force** ($F_L$)، وهيَ القوةُ المتولدةُ نتيجةَ فرقِ الضغطِ بينَ أسفلِ الجناحِ وأعلاهُ، وهيَ التي تدفعُ بأجنحةِ الطائرةِ نحوَ الأعلى.

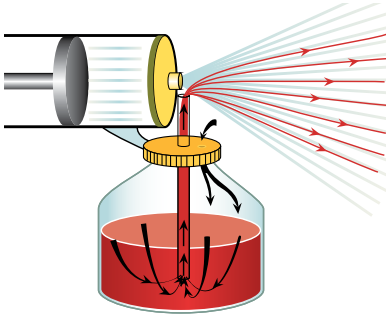



الشكلُ (30): صورةُ جناحِ الطائرةِ وخطوطِ الجريانِ حولَ مقطعٍ عرضيٍّ لهُ.

**علامَ** يدلُّ تزاحمُ خطوطِ جريانِ الهواءِ فوقَ الجناحِ؟

### المِرْذاذُ Atomizer

يتكونُ المرذاذُ منْ أنبوبٍ أفقيٍّ واسعٍ ينتهي بأنبوبٍ ضيقٍ يمرُّ فوقَ أنبوبٍ آخرَ رأسيٍّ؛ الجزءُ السفليُّ منهُ مغمورٌ في السائلِ والجزءُ العلويُّ يتصلُ معَ الأنبوبِ الأفقيِّ الضيقِ، كما في الشكلِ (31). يعتمدُ عملُ المرذاذِ على اندفاعِ الهواءِ منَ الأنبوبِ الواسعِ إلى الأنبوبِ الضيقِ فتزدادُ سرعتهُ حسبَ معادلةِ الاستمراريةِ، وينخفضُ ضغطهُ حسبَ معادلةِ برنولي أيْ أنَّ ضغطَ الهواءِ عندَ فوهةِ الأنبوبِ الرأسيِّ أقلُّ منْ ضغطِ الهواءِ داخلَ الوعاءِ الزجاجيِّ؛ ما يؤدي إلى اندفاعِ السائلِ إلى أعلى، ليختلطَ معَ الهواءِ المندفعِ منَ الأنبوبِ الأفقيِّ، ويتشتتَ على شكلِ رذاذٍ ناعمٍ منَ القطراتِ. تعملُ كثيرٌ منَ الأجهزةِ والأدواتِ بالطريقةِ الموضحةِ في الشكلِ ووفقَ استخداماتِها؛ مثلَ: زجاجاتِ العطورِ، ومرشاتِ الطلاءِ، ومرشاتِ المنظفاتِ، وفي مازجِ السيارةِ (الكاربوريترِ).



الشكلُ (31): المرذاذُ.

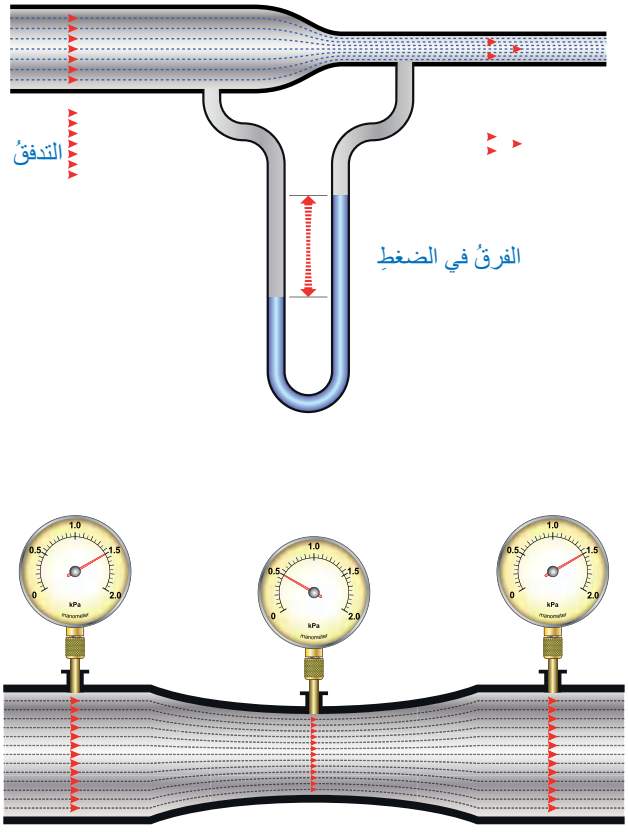
ما فائدةُ الفتحةِ في أعلى القارورةِ؟

## مقياسُ فنتوري Venturi Meter

**مقياسُ فنتوري Venturi Meter** جهازٌ يُستخدَمُ لقياسِ سرعةِ ومعدّلِ تدفقِ الموائعِ في الأنابيبِ بتطبيقِ معادلةِ برنولي؛ وهو أنبوبٌ مفتوحُ الطرفينِ، مختنِقٌ (ضيِّقٌ) في وسطِهِ، وعندَ مرورِ المائعِ في الاختناقِ تزدادُ سرعتهُ فيقلُّ ضغطهُ، أعلّلُ ذلكَ.

يتمُّ قياسُ سرعةِ ومعدّلِ تدفقِ المائعِ عنْ طريقِ قياسِ الفرقِ بينَ ضغطِ المائعِ في الأنبوبِ وضغطِهِ في اختناقِ الأنبوبِ، كما هوَ مبينٌ في الشكلِ (32). والصورةُ المبينةُ في الشكلِ (33) تُظهِرُ الاستخدامَ العمليَّ لمقياسِ فنتوري.

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




الشكلُ (32): أشكالٌ مختلفةٌ لمقياسِ فنتوري.

**ما** الفرقُ بينَ مقياسَيْ فنتوري في الشكلِ؟

# مراجعةُ الدرسِ

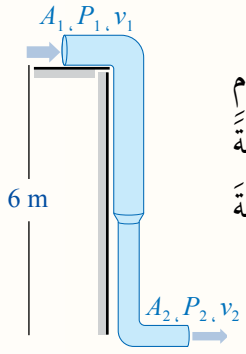
1. **الفكرةُ الرئيسةُ:** أوضحُ المقصودَ بكلٍّ ممّا يأتي:
المائعُ المثاليُّ، قوةُ الرفعِ، معادلةُ الاستمراريةِ، خطُّ الجريانِ.

2. **أحلُّ مشكلاتٍ:** تتطايرُ الأسقفُ المعدنيةُ للمنازلِ الجاهزةِ عندَ هبوبِ رياحٍ قويةٍ، كما هوَ مبينٌ في الشكلِ.

أ . ما التفسيرُ العلميُّ لِما يحدثُ؟

ب. ما النصيحةُ التي أقدِّمُها لأصحابِ تلكَ المنازلِ لحلِّ تلكَ المشكلةِ؟

3. **أستخدمُ المتغيراتِ:** يتدفقُ الماءُ منَ ارتفاعِ 6 m عنْ سطحِ الأرضِ –باستخدامِ مضخةٍ– عبرَ أنبوبٍ متغيرِ مساحةِ المقطعِ كما في الشكلِ، فإذا علمتُ أنَّ مساحةَ مقطعِ الطرفِ العلويِّ للأنبوبِ $0.2\ m^2$، وضغطَ الماءِ $1.5 \times 10^5\ Pa$ ومساحةَ مقطعِ الطرفِ السفليِّ للأنبوبِ $0.05\ m^2$، وسرعةَ الماءِ فيه 4 m/s فأجدُ:

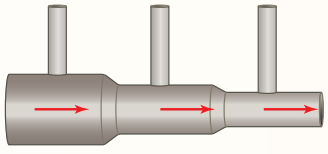



أ . سرعةَ الماءِ في الطرفِ العلويِّ للأنبوبِ.

ب. ضغطَ الماءِ في الطرفِ السفليِّ للأنبوبِ.

جـ. حجمَ الماءِ المتدفقِ منَ الطرفِ السفليِّ للأنبوبِ خلالَ (2 min).

4. **أقارنُ:** يمثلُ الشكلُ أنبوبَ جريانٍ مساحةُ مقطعِهِ غيرُ منتظمةٍ. عندَ جريانِ المائعِ في الأنبوبِ أجيبُ عمّا يأتي:



أ . أوضحُ كيفَ تتغيرُ سرعةُ المائعِ في الأنبوبِ.

ب. أقارنُ بينَ ارتفاعِ المائعِ في كلِّ أنبوبٍ منَ الأنابيبِ العموديةِ الثلاثةِ.

5. **أحسبُ:** يتفرعُ الشريانُ الأبهرُ البطنيُّ إلى فرعيْنِ رئيسيْنِ يُسمّى كلٌّ منهُما الشريانَ الحرقفيَّ كما في الشكلِ، إذا علمتُ أنَّ قطرَ الشريانِ الأبهرِ 2 cm وسرعةَ جريانِ الدمِ عبرهُ 0.2 m/s وقطرَ كلٍّ منَ الشريانيْنِ الحرقفييْنِ 1 cm (باعتبارهِما متماثليْنِ). فأحسبُ:

أ . معدلَ التدفقِ الحجميِّ للدمِ في كلٍّ منَ الشرايينِ الثلاثةِ.

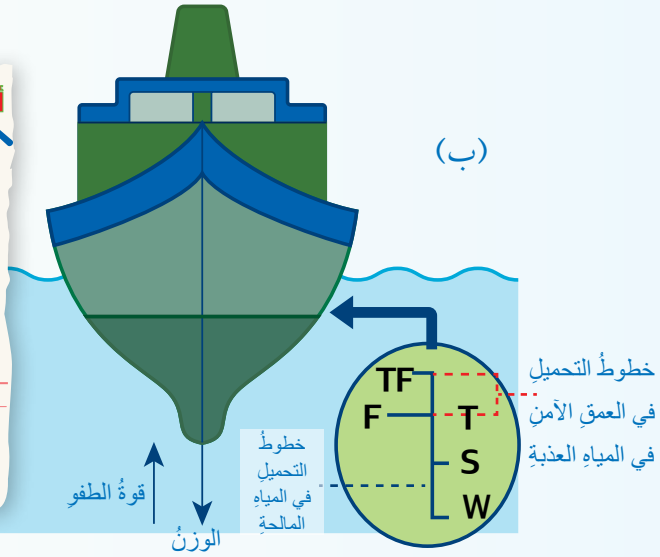
ب. سرعةَ تدفقِ الدمِ في الشريانِ الحرقفيِّ.

# الغاطسُ Draft Mark

**الغاطسُ Draft Mark** هوَ تدريجٌ رقميٌّ يشيرُ إلى المسافةِ الرأسيةِ بينَ سطحِ الماءِ وأسفلِ هيكلِ السفينةِ كما في الشكلِ (أ)، ويحددُ الغاطسُ عمقَ المياهِ التي يمكنُ للسفينةِ أوِ الزورقِ أن يبحرَ فيها بأمانٍ. وقدْ يُستخدَمُ الغاطسُ أيضًا لتحديدِ وزنِ الشحنةِ الموجودةِ على السفينةِ بحسابِ إجماليِّ الماءِ المزاحِ واستخدامِ قاعدةِ أرخميدس. أمّا خطُّ التحميلِ **Load Line** فهوَ علامةٌ خاصةٌ توضَعُ على وسطِ السفينةِ تشيرُ إلى الحمولةِ الآمنةِ للسفينةِ بما فيها وزنُ هيكلِ السفينةِ والبضائعِ المُحمَّلةِ والأشخاصِ الموجودينَ على متنِها كما في الشكلِ (ب). ويجبُ على جميعِ السفنِ التي يبلغُ طولُها 24 m أوْ أكثرَ أنْ يكونَ لديْها علامةُ خطِّ تحميلٍ، حيثُ تمَّ التوصلُ إلى اتفاقيةٍ دوليةٍ للتطبيقِ العالميِّ لخطوطِ التحميلِ؛ منْ أجلِ الحدِّ منْ مخاطرِ إبحارِ السفنِ؛ ذلك أنَّ العديدَ منَ الحوادثِ البحريةِ حدثتْ بسببِ الحمولةِ الزائدةِ للسفنِ.

(أ)

نظرًا لأنَّ طَفْوَ السفينةِ وغَمرَها يعتمدانِ إلى حدٍّ كبيرٍ على نوعِ الماءِ وكثافتِهِ – حيثُ تتغيرُ قوةُ الطفوِ تبعًا لذلكَ – فليسَ مقبولًا منَ الناحيةِ العمليةِ تحديدُ حدٍّ عامٍّ قياسيٍّ للسفينةِ في جميعِ الأوقاتِ والأماكنِ. لهذا السببِ؛ فإنَّ خطَّ التحميلِ مثلًا لسفينةٍ تبحرُ في الشتاءِ في شمالِ المحيطِ الأطلسيِّ يختلفُ عنهُ عندَما تبحرُ السفينةُ في المناطقِ الاستوائيةِ صيفًا، وكذلكَ الأمرُ بالنسبةِ إلى المياهِ المالحةِ والمياهِ العذبةِ.




(ب)

**أبحثُ** مستعينًا بمصادرِ المعرفةِ الموثوقةِ والمتاحةِ ومنْها شبكةُ الإنترنتِ، أبحثُ عنْ أسبابِ غرقِ بعضِ السفنِ، مثلِ: التايتانكِ، وعلاقةِ ذلكَ بقوةِ الطفوِ والحمولةِ، ثمَّ أكتبُ تقريرًا عنْ ذلكَ، وأقرؤُهُ أمامَ الطلبةِ في غرفةِ الصفِّ يتبعهُ مناقشةٌ معَ زملائي/ زميلاتي.

**1. أضعُ دائرةً حولَ رمزِ الإجابةِ الصحيحةِ لكلِّ جملةٍ ممّا يأتي:**

1. وحدةُ قياسِ معدلِ التدفقِ الحجميِّ للمائعِ هيَ:

أ . $m^3$ ب. $m^3\ s$ جـ. $m^3/s$ د. $m^2/s$

2. أيٌّ ممّا يأتي يُعدُّ تطبيقًا أوْ مثالًا على قاعدةِ أرخميدسَ:

أ . مقياسُ فنتوري. ب. مقياسُ كثافةِ السوائلِ. جـ . المرذاذُ. د. أجنحةُ الطائرةِ.

3. منْ خصائصِ المائعِ المثاليِّ التي تميزهُ عنِ المائعِ الحقيقيِّ أنَّهُ:

أ . لزجٌ. ب. انضغاطيٌّ. جـ. غيرُ دوّاميٍّ. د. جريانهُ غيرُ منتظمٍ.

4. قوةُ الطفوِ لسبيكةٍ وزنُها في الهواءِ 600 N ووزنُها في الماءِ 200 N تساوي:

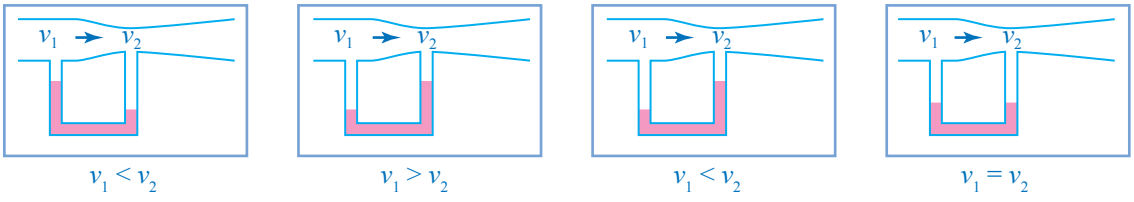
أ . 800 N ب. 600 N جـ. 400 N د. 200 N

5. عندَ هبوبِ الرياحِ بشكلٍ أفقيٍّ فوقَ فتحةِ مدخنةٍ، كيفَ يتأثرُ الدخانُ الصاعدُ في المدخنةِ:

أ . يرتفعُ الدخانُ بسرعةٍ أكبرَ في المدخنةِ. ب. يرتفعُ الدخانُ بسرعةٍ أقلَّ في المدخنةِ.

جـ. يندفعُ الدخانُ إلى الأسفلِ في المدخنةِ. د. لا يتأثرُ الدخانُ الصاعدُ في المدخنةِ.

6. أيُّ الأشكالِ الآتيةِ يمثلُ ما يحدثُ للمائعِ عندَ جريانهِ في مقياسِ فنتوري:




(1) (2) (3) (4)

أ . الشكلُ (1). ب. الشكلُ (2). جـ. الشكلُ (3). د. الشكلُ (4).

7. عندَ انتقالِ السفينةِ منَ الماءِ العذبِ إلى ماءِ البحرِ، فإنَّ كلًّا منْ قوةِ الطفوِ وحجمِ الجزءِ المغمورِ منَ السفينةِ بعدَ اتزانِها في مياهِ البحرِ مقارنةً بالمياهِ العذبةِ، على الترتيبِ:

أ . تبقى القوةُ ثابتةً، يقلُّ الحجمُ. ب. تبقى القوةُ ثابتةً، يزدادُ الحجمُ.

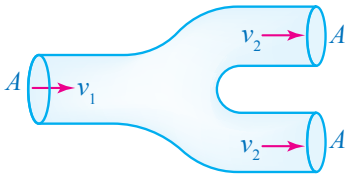
جـ. تزدادُ القوة، يبقى الحجمُ ثابتًا. د. تزدادُ القوةُ، يقلُّ الحجمُ.

8. أيُّ العباراتِ الآتيةِ صحيحةٌ بالنسبةِ إلى جسمٍ يطفو على سطحِ السائلِ:

أ . حجمُ السائلِ المزاحِ يساوي حجمَ الجسمِ. ب. وزنُ السائلِ المزاحِ يساوي وزنَ الجسمِ في السائلِ.

جـ. قوةُ الطفوِ أكبرُ منْ وزنِ السائلِ المزاحِ. د. حجمُ السائلِ المزاحِ يساوي حجمَ الجزءِ المغمورِ منَ الجسمِ.

9. أنبوبُ جريانٍ مساحةُ مقطعهِ $A$ وسرعةُ جريانِ المائعِ فيهِ $v_1$، تفرَّعَ إلى أنبوبيْنِ مساحةُ مقطعِ كلٍّ منهُما $A$ كما في الشكلِ، في أيٍّ منَ الأنبوبيْنِ سرعةُ المائعِ $v_2$ تساوي:



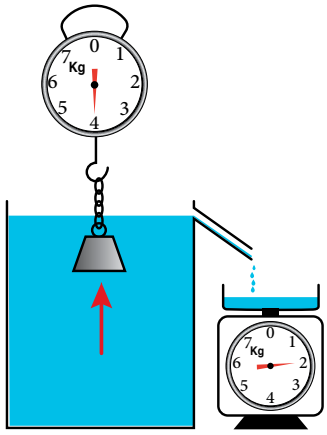

أ . $4v_1$ ب. $2v_1$ جـ. $v_1$ د. $\frac{1}{2}v_1$

2. **أقارنُ بينَ قوةِ الطفوِ والوزنِ الحقيقيِّ في كلٍّ منَ التطبيقاتِ والحالاتِ الآتيةِ:**
أ. القاربُ وهوَ طافٍ على سطحِ البحرِ.
ب. الغواصةُ أثناءَ هبوطِها تحتَ الماءِ.
جـ. المنطادُ أثناءَ صعودِهِ للأعلى في الهواءِ.

3. **أحلِّلُ: الزمنُ اللازمُ لملْءِ كأسِ ماءٍ منْ خرطومِ مياهٍ 30 s، وعندَ الضغطِ على فوهةِ الخرطومِ تضاعفتْ سرعةُ تدفقِ الماءِ منَ الخرطومِ. كمْ منَ الوقتِ يلزمُ لملْءِ الكأسِ نفسِها؟**

4. **أحسبُ: وُضِعتْ كرةُ قدمٍ متوسطُ كثافتِها $15\ kg\ m^{-3}$ على سطحِ سائلٍ فاتزنَ عندَ انغمارِ ربعِ حجمِها في السائلِ، أحسبُ كثافةَ السائلِ.**

5. **أحلِّلُ: اعتمادًا على البياناتِ المبينةِ في الشكلِ وباعتبارِ كثافةِ الماءِ $10^3\ kg\ m^{-3}$ أجيبُ عمّا يأتي:**
أ. أجدُ وزنَ السائلِ المزاحِ. ب. أحسبُ قوةَ الطفوِ.
جـ. أحسبُ وزنَ الجسمِ الحقيقيَّ. د. أرسمُ مخططَ الجسمِ الحرِّ للجسمِ المعلَّقِ.




6. **أفسرُ ما يأتي:**
أ. قوةُ الطفوِ لجسمٍ مغمورٍ كليًّا في سائلٍ لا تتغيرُ بتغيرِ عمقِ الجسمِ تحتَ سطحِ السائلِ.
ب. عندَ وضعِ بالونيْنِ متماثليْنِ حجمًا في الهواءِ؛ أحدُهُما مملوءٌ بغازِ الهيليومِ والآخرُ بغازِ الهيدروجينِ؛ فإنَّ قوةَ الطفوِ في كلٍّ منهُما متساويةٌ.

7. **يمثلُ الشكلُ المجاورُ خطوطَ جريانِ الهواءِ حولَ جناحِ الطائرةِ، اعتمادًا عليْهِ أجيبُ عمّا يأتي:**
أ. في أيةِ منطقةٍ حولَ الجناحِ تتقاربُ خطوطُ الجريانِ؟
ب. ما العلاقةُ بينَ تقاربِ خطوطِ الجريانِ، وكلٍّ منْ سرعةِ الهواءِ وضغطِهِ؟
جـ. ما اسمُ المعادلةِ التي تفسرُ قوةَ الرفعِ في أجنحةِ الطائرةِ؟
د. ما سببُ تولدِ قوةِ الرفعِ في جناحِ الطائرةِ؟
هـ. كيفَ يمكنُ زيادةُ قوةِ الرفعِ؟

8. **أحلُّ مشكلاتٍ: متزلجٌ كتلتهُ 50 kg يريدُ أنْ يستخدمَ لوحًا خشبيًّا كثافتهُ $600\ kg\ m^{-3}$ وسماكتهُ 10 cm كما في الشكلِ، إذا علمتُ أنَّ كثافةَ ماءَ البحرِ $1024\ kg\ m^{-3}$ فأجدُ أقلَّ مساحةٍ للوحِ الخشبِ تُمكِّنُ المتزلجَ منَ استخدامِهِ دونَ أنْ يغرقَ.**

9. **أحسبُ: أنبوبُ نفطٍ أفقيٌّ سرعةُ جريانِ السائلِ فيهِ 20 m/s يضيقُ ليصبحَ قطرهُ نصفَ قطرِ الأنبوبِ الرئيسِ، ويقلُّ ضغطُ السائلِ فيهِ ليصبحَ $2 \times 10^5\ Pa$، باعتبارِ كثافةِ السائلِ $800\ kg\ m^{-3}$ أجدُ:**
أ. سرعةَ جريانِ النفطِ في الأنبوبِ الواسعِ.
ب. ضغطَ النفطِ في الأنبوبِ الرئيسِ.

# الوحدةُ 6

# الحركةُ الموجيةُ
# Wave Motion

## أتأمَّلُ الصورةَ

يعملُ العلماءُ في بناءِ نموذجٍ متطورٍ يمكِّنُهُمْ منْ حصادِ الطاقةِ الهائلةِ التي تحملُها موجاتُ البحارِ، التي تشكلُ مصدرَ طاقةٍ متجددةٍ لا ينضبُ، إضافةً إلى كونِها طاقةً نظيفةً مقارنةً ببعضِ مواردِ الطاقةِ الأخرى. وقدْ صممَ العلماءُ جهازًا يُكثِّفُ الموجاتِ ويركِّزُها في مكانٍ ضيقٍ، قبلَ أنْ تُحوَّلَ منْ طاقةٍ حركيةٍ إلى طاقةٍ كهربائيةٍ.

ما نوعُ الطاقةِ التي تحملُها موجاتُ البحرِ، وعلى ماذا تعتمدُ؟

## الفكرةُ العامةُ:

دراسةُ الحركةِ الموجيةِ وسلوكِ الموجاتِ تساعدُنا في فهمِ كثيرٍ منَ الظواهرِ والمواقفِ الحياتيةِ المتعلقةِ بالصوتِ والضوءِ؛ فالصوتُ والضوءُ ينتقلانِ على شكلِ موجاتٍ تشبهُ موجاتِ الماءِ، حيثُ يمكنُ وصفُها بمعرفةِ طولِها الموجيِّ وترددِها وسعتِها وسرعةِ انتشارِها.

### الدرسُ الأولُ: الموجاتُ وصفاتُها

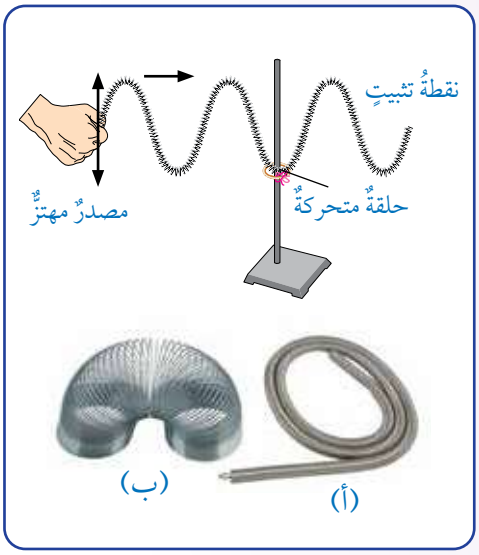
**الفكرةُ الرئيسةُ:** الموجاتُ تنقلُ الطاقةَ ولا تنقلُ المادةَ، وندركُ ذلكَ بحواسِّنا المختلفةِ؛ فنحنُ نشاهدُ موجاتِ البحرِ وهيَ تنقلُ الطاقةَ الحركيةَ لقاربٍ يرسو على الشاطئِ، بينَما لا تنقلُ الماءَ نحوَ الشاطئِ، وإنَّ موجاتِ الصوتِ والضوءِ تنقلُ الطاقةَ أيضًا.

### الدرسُ الثاني: خصائصُ الحركةِ الموجيةِ

**الفكرةُ الرئيسةُ:** للموجاتِ المختلفةِ سلوكٌ محددٌ يظهرُ في تطبيقاتٍ حياتيةٍ كثيرةٍ عندَ انتقالِها خلالَ الوسطِ الواحدِ، أو بينَ وسطيْنِ مختلفيْنِ، مثلَ: الانعكاسِ والانكسارِ والتداخلِ والحيودِ والاستقطابِ.

# تجربةٌ استهلاليةٌ

## الموجاتُ تنقلُ الطاقةَ ولا تنقلُ المادةَ




**الموادُّ والأدواتُ:** نابضانِ فلزيانِ طويلانِ أحدُهما رفيعٌ والآخرُ عريضٌ، منصبٌ فلزيٌّ، حلقةٌ فلزيةٌ، شريطٌ قماشيٌّ ملونٌ.

**إرشاداتُ السلامةِ:** الحذرُ منْ سقوطِ الأجسامِ والأدواتِ على القدميْنِ.

**خطواتُ العملِ:** بالتعاونِ معَ أفرادِ مجموعتي، أنفذُ الخطواتِ الآتيةَ:

1. أثبتُ المنصبَ الفلزيَّ كما في الشكلِ معَ تثبيتِ قاعدتِهِ بأجسامٍ ثقيلةٍ، ووضعِ الحلقةِ الفلزيةِ حولَ ساقِ المنصبِ.
2. أربطُ النابضَ الرفيعَ (أ) منْ منتصفِهِ معَ الحلقةِ الفلزيةِ باستخدامِ الشريطِ القماشيِّ الملونِ.
3. **أجربُ:** أمسكُ طرفَ النابضِ بيدي وأطلبُ منْ زميلي أنْ يمسكَ الطرفَ الثانيَ ويثبتَ يدَهُ، وأحركُ الطرفَ الذي بيدي للأعلى وللأسفلِ بشكلٍ منتظمٍ، وأراقبُ حركةَ الشريطِ الملونِ، ثمَّ أدوِّنُ ملاحظاتي في الجدولِ.
4. أغيرُ منْ سرعةِ حركةِ يدي للأعلى وللأسفلِ، وأراقبُ حركةَ الشريطِ الملونِ وأدوِّنُ ملاحظاتي في الجدولِ.
5. **ألاحظُ:** أجعلُ مدى حركةِ يدي للأعلى وللأسفلِ أكبرَ وأوسعَ منَ السابقِ، ثمَّ ألاحظُ حركةَ الحلقةِ الفلزيةِ، وأدوِّنُ ملاحظاتي في الجدولِ.
6. **أجربُ:** أضعُ وأفرادَ مجموعتي النابضَ العريضَ (ب) على الأرضِ، ثمَّ أحركُ يدي لتصنعَ أوْ تُحدِثَ تضاغطاتٍ وتخلخلاتٍ متتاليةً، بينَما يثبِّتُ زميلي الطرفَ الآخرَ، ثمَّ ألاحظُ كيفَ ينتقلُ التخلخلُ خلالَ النابضِ.

### التحليلُ والاستنتاجُ:

1. **أصفُ** شكلَ حركةِ النابضِ، محددًا مصدرَ الطاقةِ اللازمةِ لهذهِ الحركةِ.
2. **أفسّرُ** سببَ حركةِ الحلقةِ الفلزيةِ، موضحًا كيفَ انتقلتِ الطاقةُ الحركيةُ إليْها.
3. **أقارنُ** بينَ اتجاهِ حركةِ الحلقةِ الفلزيةِ واتجاهِ انتشارِ الموجةِ في الحبلِ.
4. أفرقُ بينَ حركةِ جسيماتِ الوسطِ في كلٍّ منْ نوعَيِ الموجاتِ الطوليةِ والمستعرضةِ.
5. **أستنتجُ:** ما الطرائقُ التي يمكنُ بِها زيادةُ الطاقةِ المنقولةِ في المدةِ الزمنيةِ نفسِها خلالَ الحركةِ الموجيةِ؟

# الموجاتُ وصفاتُها
Waves and their Characteristics

**الفكرةُ الرئيسةُ:**
الموجاتُ تنقلُ الطاقةَ ولا تنقلُ المادةَ، وندركُ ذلكَ بحواسِّنا المختلفةِ؛ فنحنُ نشاهدُ موجاتِ البحرِ وهيَ تنقلُ الطاقةَ الحركيةَ لقاربٍ يرسو على الشاطئِ، بينَما لا تنقلُ الماءَ نحوَ الشاطئِ. وإنَّ موجاتِ الصوتِ والضوءِ تنقلُ الطاقةَ أيضًا.

**نتاجاتُ التعلُّمِ:**
- أوضحُ صفاتِ الموجاتِ والمفاهيمَ المتعلقةَ بكلٍّ منْها.
- أوظفُ معرفتي بالمفاهيمِ المتعلقةِ بالموجاتِ وصفاتِها في حلِّ مسائلَ حسابيةٍ، وفي تفسيرِ ظواهرَ ومشاهداتٍ يوميةٍ.
- أمثلُ رسوماتٍ بيانيةً تتعلقُ بصفاتِ الموجاتِ، وأحللُها.
- أوظفُ التجربةَ العمليةَ في تعرفِ صفاتِ الموجاتِ.
- أتوصلُ إلى أنَّ الصوتَ موجةٌ طوليةٌ تعتمدُ صفاتُها على الوسطِ الذي تنتشرُ فيهِ.
- أتوصلُ إلى أنَّ موجاتِ (الراديو) والضوءِ والأشعةِ السينيةِ لَها أطوالٌ موجيةٌ مختلفةٌ ضمنَ طيفِ الموجاتِ الكهرمغناطيسيةِ.

**المفاهيمُ والمصطلحاتُ:**

| | |
|---|---|
| موجةٌ | Wave |
| موجةٌ مستعرَضةٌ | Transverse Wave |
| موجةٌ طوليةٌ | Longitudinal Wave |
| سعةُ الموجةِ | Wave Amplitude |
| شدةُ الموجةِ | Wave Intensity |
| طولٌ موجيٌّ | Wavelength |
| ترددٌ | Frequency |
| زمنٌ دوريٌّ | Period |
| سرعةُ الموجةِ | Speed of a Wave |
| عتبةُ السمعِ | Threshold of Hearing |

## الموجةُ The Wave

تساعدُنا دراسةُ الفيزياءِ في فهمِ الظواهرِ منْ حولِنا. ومنْ بينِ التطبيقاتِ اليوميةِ والظواهرِ الطبيعيةِ التي نشاهدُها كثيرًا في حياتِنا: الموجاتُ والحركةُ الموجيةُ. تنتشرُ الموجاتُ على سطحِ الماءِ، كما في الشكلِ (1)، وتنتقلُ الموجاتُ في حبلٍ مشدودٍ أوْ نابضٍ، كما توجدُ أنواعٌ أخرى منَ الموجاتِ يمكنُنا الإحساسُ بِها دونَ أنْ نراها مثلَ موجاتِ الصوتِ، وموجاتِ الضوءِ.

تُعرَّفُ **الموجةُ Wave** في الفيزياءِ بأنَّها اضطرابٌ أوِ اهتزازٌ ينتقلُ منْ مكانٍ إلى آخرَ، وتعدُّ الموجةُ وسيلةً لنقلِ الطاقةِ، ومعَ أنَّ الاضطرابَ يتسببُ في حدوثِ اهتزازٍ لجسيماتِ الوسطِ الناقلِ للموجةِ، إلا أنَّ هذهِ الجسيماتِ لا تنتقلُ منْ موقعٍ إلى آخرَ مثلَ الطاقةِ. وقدْ شاهدْنا ذلكَ يحدثُ لأجزاءِ النابضِ في التجربةِ الاستهلاليةِ، حيثُ كانتْ تهتزُّ للأعلى وللأسفلِ، لكنَّها لمْ تنتقلْ باتجاهِ انتقالِ الطاقةِ في النابضِ. تتولدُ الموجاتُ في الوسطِ نتيجةَ اهتزازِ المصدرِ المولدِ للموجاتِ، ثمَّ ينتقلُ الاهتزازُ منَ المصدرِ خلالَ الوسطِ الناقلِ.

الشكلُ (1): موجاتُ الماءِ على سطحِ البحرِ.

## أنواعُ الموجاتِ Types of Waves

يُحدَّدُ نوعُ الموجاتِ بناءً على اتجاهِ اهتزازِ جسيماتِ الوسطِ؛ إذْ تصنَّفُ الموجاتُ إلى نوعيْنِ رئيسيْنِ هما: موجاتٌ مستعرضةٌ وموجاتٌ طوليةٌ.

### الموجاتُ المستعرضةُ Transverse Waves

تُسمّى الموجةُ التي يكونُ اتجاهُ اهتزازِ جسيماتِ الوسطِ الناقلِ لها متعامدًا معَ اتجاهِ انتشارِها **موجةً مستعرضةً Transverse Wave**، مثلَ موجاتِ سطحِ الماءِ والموجاتِ التي تنتقلُ في نابضٍ أوْ حبلٍ مشدودٍ، كما لاحظتُ في التجربةِ الاستهلاليةِ. وتنتشرُ الموجاتُ المستعرضةُ في الأوساطِ الصلبةِ والسائلةِ، بينَما لا يمكنُها الانتقالُ خلالَ الغازاتِ. معَ أنَّ بعضَ الموجاتِ المستعرضةِ مثلَ موجاتِ الضوءِ يمكنُها الانتقالُ في الفراغِ.

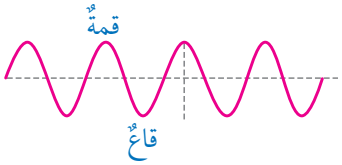
يبينُ الشكلُ (2/ أ) انتشارَ الموجاتِ المستعرَضةِ في حبلٍ باتجاهٍ أفقيٍّ معَ امتدادِ الحبلِ، ألاحظُ اهْتزازَ أجزاءِ الحبلِ في اتجاهِ المحورِ العموديِّ على شكلِ قممٍ وقيعانٍ متتاليةٍ.

### الموجاتُ الطوليةُ Longitudinal Waves

تُسمّى الموجةُ التي يكونُ فيها اتجاهُ اهتزازِ جسيماتِ الوسطِ الناقلِ لَها باتجاهِ انتشارِ الموجةِ نفسِها **موجةً طوليةً Longitudinal Wave**، ومثلُ ذلكَ موجاتُ الصوتِ وبعضُ أنواعِ الموجاتِ التي تنتقلُ في النابضِ على شكلِ تضاغطٍ وتخلخلٍ، كما لاحظتُ في النابضِ العريضِ في التجربةِ الاستهلاليةِ.

وينتشرُ هذا النوعُ منَ الموجاتِ في الأوساطِ جميعِها؛ الصلبةِ والسائلةِ والغازيةِ. يبينُ الشكلُ (2/ ب) انتشارَ الموجاتِ الطوليةِ في نابضٍ، ألاحظُ كيفَ ينتشرُ التضاغطُ والتخلخلُ على طولِ النابضِ، التضاغطُ منطقةٌ تتقاربُ فيها جسيماتُ الوسطِ، بينَما تكونُ الجسيماتُ أكثرَ تباعدًا في منطقةِ التخلخلِ.

(أ) موجةٌ مستعرضةٌ




(ب) موجةٌ طوليةٌ

الشكلُ (2): الموجاتُ المستعرضةُ والموجاتُ الطوليةُ.

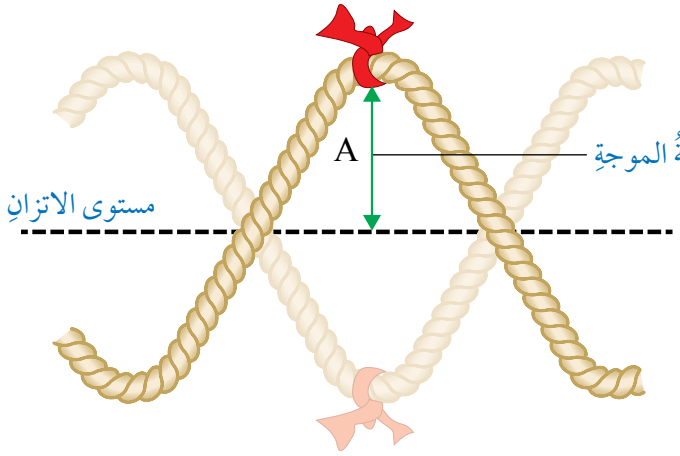
## صفاتُ الموجةِ Characteristics of a Wave

للموجاتِ جميعِها – مهما اختلفتْ أنواعُها – صفاتٌ مشتركةٌ، نميِّزُ بها الحركةَ الموجيةَ Wave Motion، وهيَ الطريقةُ التي تنتشرُ بِها الموجاتُ في الأوساطِ المختلفةِ، وتختلفُ باختلافِ أنواعِ الموجاتِ سواءٌ أكانتْ مستعرضةً أمْ طوليةً. وهذهِ الصفاتُ هيَ:

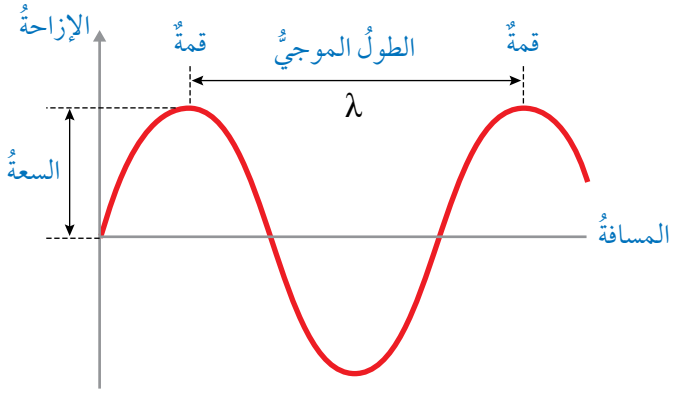
### سعةُ الموجةِ Wave Amplitude

لاحظتُ في نوعَيِ الموجاتِ المستعرضةِ والطوليةِ أنَّ جسيماتِ الوسطِ تتحركُ باتجاهيْنِ متعاكسيْنِ على طرفَيْ موقعِ اتزانِها؛ أي أنَّها تهتزُّ، وقدْ يبدو هذا الاهتزازُ أكثرَ وضوحًا في الموجاتِ المستعرضةِ؛ فعندَ انتقالِ موجةٍ مستعرضةٍ في حبلٍ مشدودٍ، أجدُ أنَّ العلامةَ المثبتةَ على الحبلِ، كما يبينُها الشكلُ (3) تُغيرُ موقعَها باستمرارٍ بالنسبةِ إلى موقعِ اتزانِها (موقعُ الاتزانِ هوَ نقطةٌ على الحبلِ المشدودِ أفقيًّا بشكلٍ مستقيمٍ في حالةِ عدمِ انتقالِ أيِّ موجةٍ خلالَهُ)، ويمثلُ هذا التغيرُ في الموقعِ الإزاحةَ التي تحدثُ لجسيماتِ الحبلِ عندَ تلكَ العلامةِ، وتتغيرُ هذهِ الإزاحةُ باستمرارٍ معَ مرورِ الزمنِ. وتُعرَّفُ أقصى إزاحةٍ تُحدثُها الموجةُ لجسيماتِ الوسطِ الناقلِ بالنسبةِ إلى موقعِ اتزانِها بأنَّها **سعةُ الموجةِ Wave Amplitude**، ويُرمَزُ إليْها على الشكلِ بالرمزِ (A). كما تُعرَّفُ **شدةُ الموجةِ Wave Intensity** بأنَّها الطاقةُ التي تنقلُها الموجةُ لكُلِّ وَحدةِ مساحةٍ في الثانيةِ الواحدةِ، وتُقاسُ بوَحدةِ ($W/m^2$) حسبَ النظامِ الدوليِّ للوَحداتِ. وسعةُ الموجةِ تزدادُ بزيادةِ طاقةِ المصدرِ، وتقلُّ بزيادةِ البعدِ عنهُ. لذلكَ فإنَّ سعةَ الموجةِ تتناسبُ طرديًّا معَ شدتِها.

✓ **أتحقَّقُ:** منْ أينَ تحصلُ الموجاتُ على طاقتِها؟




الشكلُ (3): سعةُ الموجةِ المستعرضةِ.




الشكلُ (4): الطولُ الموجيُّ للموجةِ المستعرضةِ.

## طولُ الموجةِ Wavelength

توصفُ الموجاتُ أيضًا باستخدامِ مفهومِ **الطولِ الموجيِّ Wavelength**، وهوَ المسافةُ بينَ قمتيْنِ متتاليتيْنِ، كما في الشكلِ (4)، أوْ هوَ المسافةُ بينَ قاعيْنِ متتاليَيْنِ، ويُرمزُ إليهِ بالحرفِ اليونانيِّ (λ – لامدا). وبصورةٍ عامةٍ فإنَّ المسافةَ بينَ أيِّ نقطتيْنِ متناظرتيْنِ ومتتاليتيْنِ على الموجةِ تساوي الطولَ الموجيَّ.

## التردُّدُ Frequency

تتوالى الموجاتُ عندَ استمرارِ انتقالِها خلالَ الوسطِ بشكلٍ متماثلٍ، ويطلقُ على تكرارِ الموجاتِ المتماثلةِ **التردُّدُ Frequency**، وهوَ عددُ الموجاتِ الكاملةِ (n) التي تعبرُ نقطةً ثابتةً في الوسطِ خلالَ ثانيةٍ واحدةٍ. ويُرمَزُ إليهِ بالحرفِ اللاتينيِّ ($f$)، أما وحدةُ قياسِ التردُّدِ فهيَ هيرتز (Hz)، وتكافئُ ($s^{-1}$)، ويُستخدَمُ أيضًا مفهومَ **الزمنِ الدوريِّ Period** للتعبيرِ عنِ المدةِ الزمنيةِ اللازمةِ لعبورِ موجةٍ كاملةٍ واحدةٍ نقطةً ثابتةً في الوسطِ. ويُرمَزُ إلى الزمنِ الدوريِّ بالرمزِ ($T$)، ووحدةُ قياسِهِ هيَ (s). ويرتبطُ التردُّدُ بالزمنِ الدوريِّ للموجةِ بالعلاقةِ الرياضيةِ الآتيةِ:

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

✓ **أتحقَّقُ:** كيفَ يمكنُني التمييزُ بينَ الموجاتِ المستعرضةِ والموجاتِ الطوليةِ؟

## المثالُ 1

يهتزُّ جسمٌ وهوَ يلامسُ سطحَ الماءِ فيصدرُ عنهُ (12) موجةً مستعرضةً في مدةٍ زمنيةٍ مقدارُها (3 s)، وتنتشرُ على سطحِ الماءِ. أحسبُ كلًّا منَ: الزمنِ الدوريِّ والترددِ.

**المعطياتُ:** $(t = 3\ \text{s})$، $(n = 12)$

**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، أيْ أنَّهُ عندَ انتقالِ موجةٍ ترددُها (5 Hz) بينَ وسطيْنِ مختلفيْنِ، فإنَّ ترددَها لا يتغيرُ، ويبقى (5 Hz).

### سرعةُ الموجةِ Speed of a Wave

تُحسبُ **سرعةُ الموجةِ Speed of a Wave** بقسمةِ المسافةِ $(S)$ التي تقطعُها على الزمنِ الكليِّ $(t)$ اللازمِ لقطعِ تلكَ المسافةِ، وتُعطى سرعةُ الموجةِ بالعلاقةِ الرياضيةِ الآتيةِ:

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

وتتناسبُ سرعةُ الموجةِ $(v)$ طرديًّا معَ ترددِها $(f)$، لأنَّهُ بزيادةِ سرعةِ انتقالِ الموجةِ يزدادُ عددُ الموجاتِ الكاملةِ التي تعبرُ نقطةً معينةً في الثانيةِ الواحدةِ؛ أيْ يزدادُ الترددُ، ويُمثَّلُ ذلكَ التناسبُ كما يأتي:

$$f \propto v$$

وعندَ مقارنةِ موجتيْنِ تنتقلانِ في وسطٍ بالسرعةِ نفسِها، حيثُ تمتلكُ إحداهُما طولًا موجيًّا أكبرَ منَ الأخرى، نجدُ أنَّ الموجةَ ذاتَ الطولِ الموجيِّ الأكبرِ تنتقلُ بترددٍ أقلَّ، في حينِ تنتقلُ الموجةُ التي هيَ أقصرُ بترددٍ أكبرَ؛ أيْ أنَّ الطولَ الموجيَّ يتناسبُ عكسيًّا معَ الترددِ. ويُمثَّلُ ذلكَ رياضيًّا كما يأتي:

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

مما سبقَ أتوصلُ إلى علاقةٍ رياضيةٍ ترتبطُ فيها سرعةُ الموجةِ بكلٍّ منْ ترددِها وطولِها الموجيِّ، وتنصُّ على أنَّ: سرعةَ الموجةِ تساوي حاصلَ ضربِ التردِدِ في الطولِ الموجيِّ، وهيَ:

$$v = f\lambda$$

## المثالُ 2

يمسكُ كرم بطرفِ حبلٍ مشدودٍ ويحركهُ للأعلى والأسفلِ بترددٍ مقدارهُ 5 Hz، إذا كانَ طولُ الموجةِ الواحدةِ يساوي 0.4 m، فأجدُ سرعةَ انتقالِ الموجاتِ في الحبلِ:

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

**المطلوبُ:** $(v = ?)$

**الحلُّ:**

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

## تمرينٌ

تنتقلُ موجةٌ مستعرضةٌ على سطحِ الماءِ بسرعةِ (12 m/s)، إذا علمتُ أنَّ طولَها يساوي 1.5 m، فأجدُ ترددَها.

تعتمدُ سرعةُ الموجةِ على طبيعةِ الوسطِ الذي تنتقلُ فيهِ، كَما هوَ مُبيَّنٌ في الجدولِ (1).

**الجدولُ (1): سرعةُ الموجاتِ حسبَ الوسطِ الذي تنتقلُ فيهِ.**

| نوعُ الموجاتِ والوسطُ الذي تنتقلُ فيهِ | السرعةُ (m/s) |
|---|---|
| موجاتُ الصوتِ في الهواءِ عندَ مستوى سطحِ البحرِ ودرجةِ حرارةِ (20°C). | 343 |
| موجاتُ الصوتِ في ماءِ البحرِ عندَ عمقِ (4 m) ودرجةِ حرارةِ (20°C). | 1500 |
| موجاتُ الصوتِ في الصخورِ. | 4750 |
| موجاتُ الضوءِ في الألياف البصريةِ الزجاجيةِ. | $2.00 \times 10^8$ |
| موجاتُ الضوءِ في الهواءِ أوِ الفراغِ (c). | $3.00 \times 10^8$ |

ألاحظُ منَ الجدولِ السابقِ أيضًا أنَّ سرعةَ الموجةِ الواحدةِ تختلفُ منْ وسطٍ إلى آخرَ، وألاحظُ اختلافَ سرعةِ انتقالِ موجاتِ الصوتِ في الهـواءِ عنْ سرعـةِ انتقالِها في ماءِ البحرِ، وحيثُ إنَّ ترددَ هذهِ الموجاتِ يساوي ترددَ مصدرِها ولا يتغيرُ عندَ انتقالِها منْ وسطٍ إلى آخرَ، فإنَّ التغيرَ في سرعتِها ينتجُ عنْ تغيرِ طولِها الموجيِّ. وتُعدُّ سرعـةُ الموجاتِ الكهرمغناطيسيةِ في الفراغِ إحدى الثوابتِ الكونيـةِ، ويُرمَزُ إليْها بالرمزِ (c).

✓ **أتحقَّقُ:** توصفُ الموجةُ بترددِها وسرعتِها وطولِها الموجيِّ. أيٌّ منْ هذهِ الكمياتِ تتغيرُ عندَ انتقالِ الموجةِ منْ وسطٍ إلى آخرَ مختلفٍ في خصائصِهِ؟

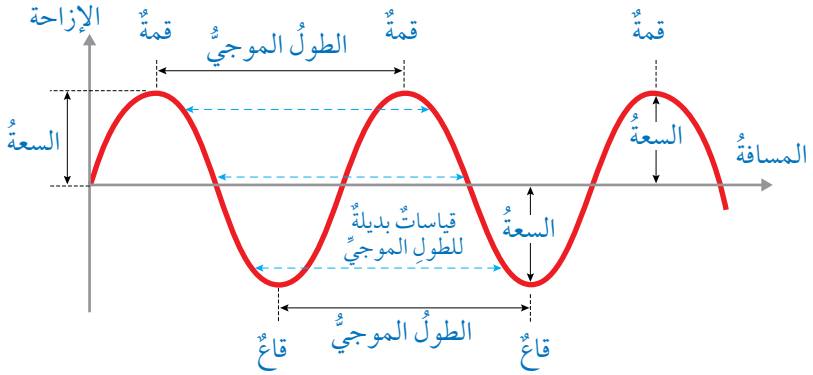
أستخدمُ برنامجَ الجداولِ الإلكترونيـةِ (Microsoft Excel) لتمثيـلِ البيانـاتِ في الجـدولِ (1) بمخطـطٍ بيـانيٍّ (عمـودٌ ثلاثـيُّ الأبعـادِ)، ثـمَّ أشـاركهُ زملائي/ زميـلاتي.

## تمثيلُ الموجاتِ بيانيًّا Graphical Representations of Waves

عندَ معرفتي للمزيدِ عنِ الموجاتِ وانتشارِها، سأجدُ أنَّهُ منَ المفيدِ تمثيلُ الحركةِ الموجيةِ بيانيًّا؛ سواءٌ أكانتْ موجاتٍ مستعرضةً أمْ موجاتٍ طوليةً، ويمكنني ذلكَ بطريقتيْنِ، في الأولى يتمُّ رسمُ المنحنى البيانيِّ؛ اعتمادًا على المسافةِ التي تقطعُها الموجةُ، وفي الطريقةِ الثانيةِ يكونُ التمثيلُ بالنسبةِ إلى الزمنِ، ولا بدَّ منَ التفريقِ بينَ الطريقتيْنِ.

### منحنى الإزاحةِ ـ المسافةِ Displacement –Distance Graph

عندَ رميِ حجرٍ في بركةِ ماءٍ، تتولدُ موجاتٌ مستعرضةٌ تنتشرُ على سطحِ الماءِ على شكلِ دوائرَ مركزُها نقطةُ سقوطِ الحجرِ. لوْ قمتُ بالتقاطِ صورةٍ ثابتةٍ لمشهدِ تلكَ الموجاتِ عندَ لحظةٍ زمنيةٍ محددةٍ، فإنَّ المشهدَ يبدو كالمنحنى المبينِ في الشكلِ (5)، الذي يمثلُ العلاقةَ بينَ إزاحةِ جزيئاتِ الماءِ للأعلى أوِ الأسفلِ والبعدِ عنْ موقعِ سقوطِ الحجرِ، حيثُ يمثلُ البعدُ عنِ المركزِ على محورِ ($x$) ووحدةِ قياسِهِ (m)، والإزاحةُ بالنسبةِ إلى مستوى اتزانِ سطحِ الماءِ على محورِ ($y$) ووحدةِ قياسِها (m).



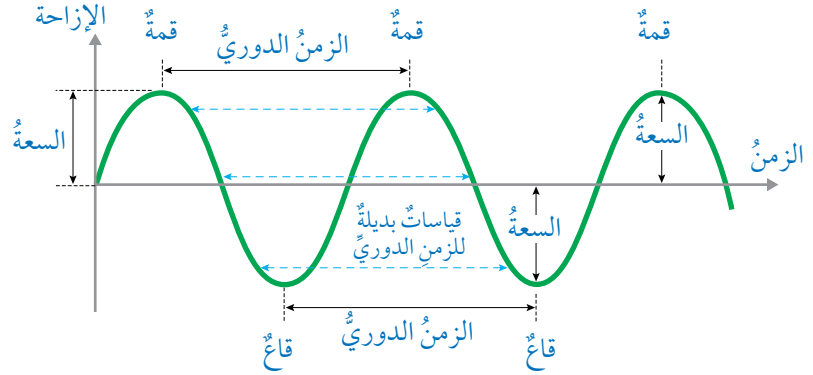

الشكلُ (5): العلاقةُ البيانيةُ بينَ إزاحةِ جزيئاتِ سطحِ الماءِ والبعدِ عنْ مركزِ انتشارِ الموجاتِ عندَ لحظةٍ محددةٍ.

يفيدُ المنحنى في معرفةِ كلٍّ منَ: الطولِ الموجيِّ وهوَ المسافةُ الأفقيةُ بينَ قمتيْنِ متتاليتيْنِ، أو قاعيْنِ متتاليْنِ، والسعةِ – وهيَ أكبرُ إزاحةٍ رأسيةٍ لجزيئاتِ الماءِ بالنسبةِ إلى مستوى اتزانِها– وكذلكَ معرفةُ مواقعِ القممِ والقيعانِ المتتاليةِ على سطحِ الماءِ عندَ لحظةٍ زمنيةٍ محددةٍ.

## منحنى الإزاحةِ - الزمنِ Displacement –Time Graph

بالرجوعِ إلى مشهدِ الموجاتِ الناتجةِ عنْ رميِ الحجرِ في بركةِ الماءِ، وتحديدِ نقطةٍ معينةٍ على سطحِ الماءِ على بُعدٍ ثابتٍ منْ مركزِ انتشارِ الموجاتِ، ثمَّ وضعِ قطعةِ فلينٍ عندَ هذهِ النقطةِ ومراقبتِها، أجدُ أنَّ قطعةَ الفلينِ تتحركُ للأعلى وللأسفلِ بشكلٍ منتظمٍ معَ مرورِ الزمنِ، وعندَ تمثيلِ العلاقةِ بينَ إزاحةِ قطعةِ الفلينِ والزمنِ أحصلُ على المنحنى المبينِ في الشكلِ (6).

✓ **أتحقَّقُ:** أوضحُ المقصودَ بسعةِ الموجةِ لموجاتٍ طوليةٍ تنتقلُ أفقيًّا في نابضٍ.




الشكلُ (6):العلاقةُ البيانيةُ بينَ إزاحةِ جزيئاتِ سطحِ الماءِ والزمنِ عندَ موقعٍ على بعدٍ ثابتٍ منْ مركزِ انتشارِ الموجاتِ.

**يفيدُ المنحنى في معرفةِ كلٍّ منَ:**

- الزمنِ الدوريِّ للحركةِ الموجيةِ: وهوَ الفرقُ في الزمنِ بينَ قمتيْنِ متتاليتيْنِ، أوْ قاعيْنِ متتاليْنِ.
- السعةِ: وهيَ أكبرُ إزاحةٍ رأسيةٍ تُحدثُها قطعةُ الفلينِ بالنسبةِ إلى مستوى اتزانِها على سطحِ الماءِ.
- عددِ القممِ والقيعانِ التي تحدثُ لقطعةِ الفلينِ خلالَ مدةٍ زمنيةٍ محددةٍ.

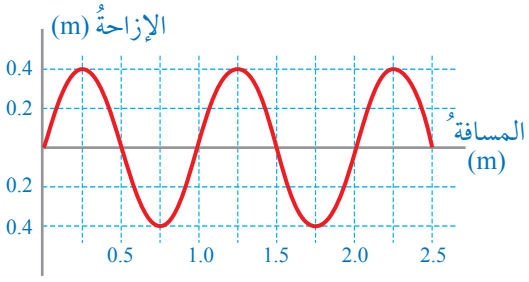
**ملاحظةٌ**

ألاحظُ منَ الشكليْنِ السابقيْنِ (6،5) تماثلًا في تعريفِ الطولِ الموجيِّ والزمنِ الدوريِّ وفي تمثيلِهما على المنحنى.

## المثالُ 3

تنتشرُ موجاتٌ مستعرضةٌ في حبلٍ ممدودٍ بشكلٍ أفقيٍّ، وفي لحظةٍ زمنيةٍ محددةٍ رُسِمَتِ العلاقةُ بينَ إزاحةِ أجزاءِ الحبلِ وبُعدِ كلِّ جزءٍ عنْ مصدرِ الاهتزازِ، فكانتْ كما في الشكلِ (7). معتمدًا على الرسمِ، أجدُ كلًّا منْ:

الطولِ الموجيِّ، السعةِ، عددِ الموجاتِ الكاملةِ.




الشكلُ (7): العلاقةُ بينَ إزاحةِ أجزاءِ الحبلِ والبُعدِ عنِ المصدرِ.

**المعطياتُ:** الشكلُ المجاورُ.

**المطلوبُ:** $\lambda$ ، A ، n

**الحلُّ:**

الطولُ الموجيُّ: $\lambda = 1.25 - 0.25 = 1.0\ m$

السعةُ: $A = 0.4\ m$

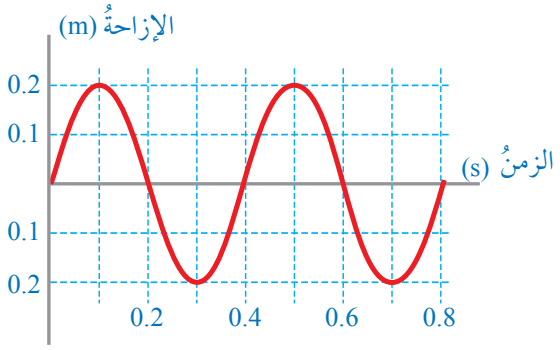
عددُ الموجاتِ الكاملةِ: $n = 2$

## المثالُ 4

تنتشرُ موجاتٌ مستعرضةٌ على سطحِ الماءِ، وتُحدثُ اهتزازًا في قطعةِ فلينٍ على بُعدِ ($x$) منْ مصدرِ الموجاتِ، مُثِّلَتِ العلاقةُ بينَ الإزاحةِ الرأسيةِ لقطعةِ الفلينِ والزمنِ بيانيًّا، فكانتْ كما في الشكلِ (8).

معتمدًا على الرسمِ، أجدُ كلًّا منَ:

الزمنِ الدوريِّ، الترددِ، السعةِ.




الشكلُ (8): العلاقةُ بينَ إزاحةِ قطعةِ الفلينِ والزمنِ.

**المعطياتُ:** الشكلُ المجاورُ.

**المطلوبُ:** $T$ ، $f$ ، A

**الحلُّ:**

الزمنُ الدوريُّ: $T = 0.5 - 0.1 = 0.4$ s

السعةُ: $A = 0.2$ m

الترددُ: $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.4} = 2.5\ s^{-1}$

## موجاتُ الصوتِ Sound Waves

ينتجُ الصوتُ عنِ اهتزازِ مصدرِ الصوتِ، وينتقلُ الاهتزازُ إلى جسيماتِ الوسطِ المحيطِ، فينتشرُ في الاتجاهاتِ جميعِها على شكلِ موجاتٍ طوليةٍ. عندَ اهتزازِ وترٍ مشدودٍ في الهواءِ، فإنَّهُ يتحركُ باتجاهيْنِ متعاكسيْنِ فيؤثرُ في جزيئاتِ الهواءِ المحيطةِ بهِ مُحدثًا فيها مجموعةً منَ التضاغطاتِ (ضغطُ الهواءِ المرتفعُ) والتخلخلاتِ (ضغطُ الهواءِ المنخفضُ) المتتاليةِ التي تنتشرُ في الهواءِ ناقلةً الصوتَ منَ الوترِ إلى أذنِ السامعِ. وتختلفُ الأصواتُ بعضُها عنْ بعضٍ في الطولِ الموجيِّ والترددِ والسعةِ، ونتيجةً لذلكَ يمكنُنا تمييزُ الأصواتِ المختلفةِ.

### جهارةُ الصوتِ Loudness

يُعبَّرُ عنْ علوِّ الصوتِ أوِ انخفاضِهِ **بجهارةِ الصوتِ Loudness** وهوَ مقياسٌ لاستجابةِ الأذنِ للصوتِ، ويمكنُ التعبيرُ عنْ هذهِ الصفةِ **بمستوى شدةِ الصوتِ Sound Intensity Level** الذي يُقاسُ بوحدةِ **ديسيبل Decibel (dB)**. وتعتمدُ جهارةُ الصوتِ على سعةِ موجاتِهِ، وعلى شدتِهِ عندَ ثبوتِ الترددِ.

الجدولُ (2): مقارنةٌ بينَ شدةِ الصوتِ ومستوى شدةِ الصوتِ لبعضِ الأصواتِ المألوفةِ.

| مصدرُ الصوتِ | شدةُ الصوتِ ($Watt/m^2$) | مستوى شدةِ الصوتِ (dB) |
|---|---|---|
| عتبةُ السمعِ عندَ ترددِ (1000 Hz) | $1 \times 10^{-12}$ | 0 |
| حفيفُ أوراقِ الشجرِ | $1 \times 10^{-11}$ | 10 |
| المحادثةُ العاديةُ | $1 \times 10^{-6}$ | 60 |
| شاحنةٌ كبيرةٌ | 1 | 120 |
| طائرةٌ نفاثةٌ | $1 \times 10^{2}$ | 140 |

بعضُ الآلاتِ كالمنشارِ أوِ الطائرةِ يكونُ مستوى شدةِ صوتِها عاليًا؛ لأنَّ موجاتِهِ تحملُ الكثيرَ منَ الطاقةِ، وتكون سعتُها كبيرةً، في حينِ يكونُ لحفيفِ أوراقِ الشجرِ أوِ الهمسِ في الحديثِ مستوى شدةِ صوتٍ منخفضٌ، لأنَّ موجاتِهِ تحملُ القليلَ منَ الطاقةِ، وسعتُها صغيرةٌ، ويعودُ الاختلافُ في مستوى الشدةِ إلى طاقةِ المصدرِ.

يقعُ مستوى شدةِ الصوتِ المسموعِ لدى الإنسانِ ضمنَ المجالِ (0 – 180 dB)، ويمثلُ المستوى (0 dB) **عتبةَ السمعِ Threshold of Hearing** لدى الإنسانِ، وهيَ أدنى مستوى شدةٍ للصوتِ يمكنُ للإنسانِ سماعهُ. وتعدُّ الأصواتُ التي يزيدُ مستوى شدتِها على (120 dB) ضارةً بالأذنِ. وللتمييزِ بينَ شدةِ الصوتِ ومستوى شدتِهِ، أنظرُ الجدولَ (2) الذي يتضمنُ بعضَ الأمثلةِ على بعضِ الأصواتِ المألوفةِ التي نسمعُها كثيرًا.

✓ **أتحقَّقُ:** أوضِّحُ المقصودَ بعتبةِ السمعِ لدى الإنسانِ السليمِ.

## درجةُ الصوتِ Pitch of Sound

يُسمّى إحساسُنا بترددِ الصوتِ درجةَ الصوتِ Pitch of Sound، فنحنُ نميزُ بينَ الأصواتِ الحادةِ والأصواتِ الغليظةِ عندَما نصغي لبعضِ الآلاتِ الموسيقيةِ، كالتي في الشكلِ (9)؛ فالآلاتُ الموسيقيةُ صغيرةُ الحجمِ مثلَ الناي يَصدرُ عنْها موجاتٌ صوتيةٌ قصيرةٌ وعاليةُ الترددِ، فيكونُ صوتُها حادًّا (درجتهُ عاليةٌ)، بينَما يصدرُ عنِ الآلاتِ الموسيقيةِ كبيرةِ الحجمِ مثلَ البوقِ موجاتٌ صوتيةٌ طويلةٌ ومنخفضةُ الترددِ، فيكونُ صوتُها غليظًا (درجتهُ منخفضةٌ).

البوقُ

الناي

الشكلُ (9): تختلفُ الآلاتُ الموسيقيةُ الهوائيةُ في درجةِ الصوتِ.

يمكنُنا سماعُ مجالٍ واسعٍ منَ الترددات الصوتيةِ عنْ طريقِ حاسةِ السمعِ لديْنا، فالترددات التي تحسُّ بِها أذنُ الإنسانِ سليمِ السمعِ تقعُ في المتوسطِ ضمنَ المجالِ (20 Hz - 20 kHz). ومعَ تقدمِ العمرِ يفقدُ الإنسانُ مقدرتَهُ على سماعِ الترددات العاليةِ التي تزيدُ على (14 kHz).

## سرعةُ الصوتِ Speed of Sound

نستمتعُ في كثيرٍ منَ المناسباتِ الوطنيةِ مثلَ يومِ الاستقلالِ، وفي الأفراحِ والمناسباتِ الخاصةِ بمشاهدةِ عروضِ الألعابِ الناريةِ، وكثيرًا ما يلفتُ انتباهَنا سماعُ الصوتِ متأخرًا بمدةٍ زمنيةٍ عن رؤيتِنا الوميضَ، ويُعدُّ هذا دليلًا ملموسًا على سرعةِ الصوتِ، وهيَ تساوي في الهواءِ (340 m/s) تقريبًا، وتقلُّ كثيرًا عنْ سرعةِ الضوءِ، ومقدارُها ($3\times10^8$ m/s).

تتأثرُ سرعةُ موجاتِ الصوتِ بطبيعةِ الوسطِ الناقلِ، فهيَ كبيرةٌ في الوسطِ غيرِ القابلِ للانضغاطِ، وتقلُّ في الأوساطِ القابلةِ للانضغاطِ. لذلكَ أجدُ أنَّ سرعةَ الصوتِ في الصخورِ والماءِ أكبرُ منْها في الهواءِ، كما لاحظتُ في الجدولِ (1)، وذلكَ لأنَّ الصخورَ والماءَ وسَطانِ غيرُ قابليْنِ للانضغاطِ، بينَما يمكنُ بسهولةٍ ضغطُ الهواءِ.

تتأثرُ سرعةُ الصوتِ بكثافةِ الوسطِ الذي ينتقلُ فيهِ. عندَ انتشارِ الصوتِ في الهواءِ، على سبيلِ المثالِ، فإنَّ سرعتَهُ تزدادُ كلَّما قلَّت كثافةُ الهواءِ، وحيثُ إنَّ كثافةَ الهواءِ تقلُّ بارتفاعِ درجةِ الحرارةِ، أجدُ أنَّ سرعةَ الصوتِ في الهواءِ تزدادُ بارتفاعِ درجةِ حرارتِهِ. وينتقلُ الصوتُ في الغازاتِ قليلةِ الكثافةِ مثلَ غازِ الهيليومِ بسرعةٍ أكبرَ منْ سرعتِهِ في الهواءِ.

**أُفكِّرُ:** يمكنُ للإنسانِ العاديِّ أنْ يتحدثَ بصوتٍ يقعُ ترددهُ بينَ (85 Hz - 3 kHz)، فما أهميةُ سماعِهِ لترددات أخرى تزيدُ على الترددِ الذي يتحدثُ بِهِ؟

**الربطُ بالحياةِ**

معظمُنا يكونُ سعيدًا بسماعِ صوتِهِ الذي يألفهُ، لكنْ عندَما يستمعُ أحدُنا لتسجيلِ صوتِهِ عبرَ أجهزةِ التسجيلِ المختلفةِ، ربَّما يشعرُ بالحرجِ. إذ إنَّ كلًّا منّا اعتادَ على سماعِ صوتِهِ عندَما تنتقلُ موجاتُهُ الصوتيةُ خلالَ عظامِ الجمجمةِ إلى الأذنيْنِ (وليسَ خلالَ الهواءِ كما هوَ الحالُ عندَ سماعِ صوتِهِ المسجلِ)؛ حيثُ تصبحُ سرعتُهُ أكبرَ منْها في الهواءِ، ويختلفُ الطولُ الموجيُّ نتيجةً لذلكَ.

كيفَ يسمعُ الآخرونَ صوتي؟ أيسمعونَهُ كما أسمعُهُ أنا عندَما أتحدثُ؟ أمْ كما أسمعُهُ منْ جهازِ التسجيلِ؟

**أُفكِّرُ:** تُنفخُ بعضُ البالوناتِ بغازِ الهيليومِ كيْ ترتفعَ في الهواءِ. عندَما يستنشقُ شخصٌ غازَ الهيليومِ منَ البالونِ ثمَّ يتحدثُ، نلاحظُ أنَّ صوتَهُ يصبحُ مختلفًا إلى درجةٍ كبيرةٍ. ما الذي يُحدثُهُ غازُ الهيليومِ في صوتِ الشخصِ؟

### المثالُ 5

تنتقلُ موجاتُ الصوتِ في الهواءِ بسرعةِ 340 m/s، إذا علمتُ أنَّ ترددَها يساوي 425 Hz؛ فما طولُها الموجيُّ؟

**المعطياتُ:** ($v = 340$ m/s)، ($f = 425$ Hz)

**المطلوبُ:** $\lambda = ?$

**الحلُّ:**

$$v = f\lambda$$

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

## الموجاتُ الميكانيكيةُ والموجاتُ الكهرمغناطيسيةُ

## Mechanical Waves and Electromagnetic Waves

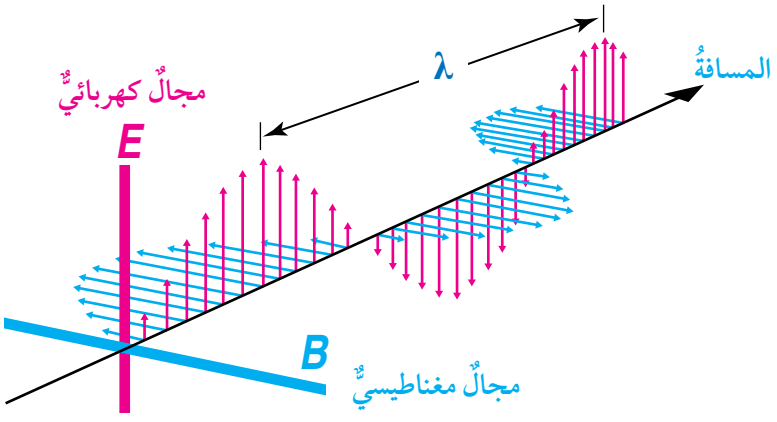
قُسِّمتِ الموجاتُ عندَ بدايةِ الدرسِ منْ حيثُ اتجاهُ الاهتزازِ الذي تُحدثهُ عندَ انتشارِها إلى نوعيْنِ: موجاتٍ مستعرضةٍ، وموجاتٍ طوليةٍ، إلا أنَّهُ يوجدُ تقسيمٌ آخرُ للموجاتِ منْ حيثُ طبيعةُ الأوساطِ التي تنتشرُ فيها، وتأثيرُها في هذهِ الأوساطِ؛ فهيَ تُقسَّمُ إلى نوعيْنِ:

### الموجاتُ الميكانيكيةُ Mechanical Waves

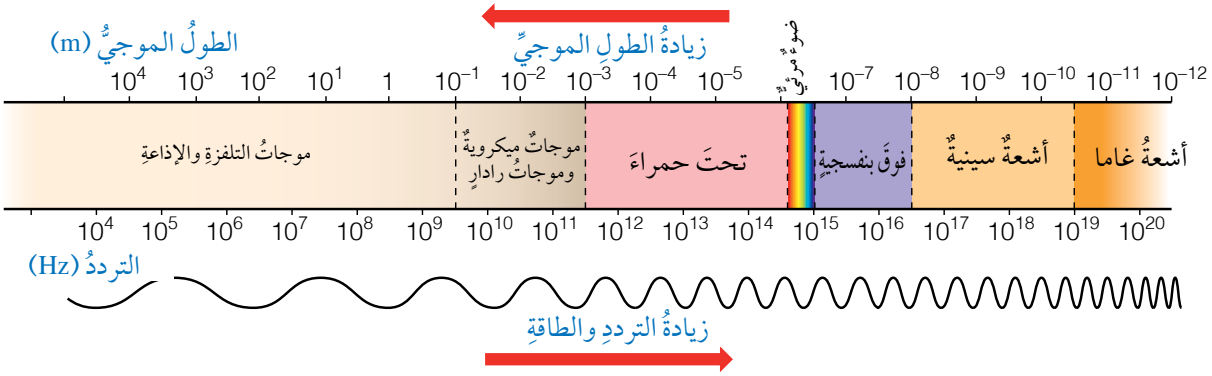
تحتاجُ كلٌّ منْ موجاتِ الماءِ والصوتِ والنابضِ وبعضِ الموجاتِ الأخرى إلى وسطٍ تنتشرُ خلالَهُ؛ إذْ إنَّها تسببُ اهتزازًا ميكانيكيًّا في جسيماتِ هذا الوسطِ، فهيَ تنقلُ الطاقةَ الميكانيكيةَ خلالَ الوسطِ. لذلكَ فهيَ تُسمّى موجاتٍ ميكانيكيةً. وألاحظُ أنَّ هذهِ الموجاتِ يمكنُ أنْ تكونَ مستعرضةً أوْ طوليةً.

### الموجاتُ الكهرمغناطيسيةُ Electromagnetic Waves

للإشعاعِ الكهرمغناطيسيِّ طبيعتانِ: جسيميةٌ وموجيةٌ؛ فهوَ ينتقلُ على شكلِ موجاتٍ مستعرضةٍ تُسمّى موجاتٍ كهرمغناطيسيةً Electromagnetic waves، لا تحتاجُ وسطًا ماديًّا لتُحدثَ اهتزازًا في جسيماتهِ؛ لأنَّها تتكونُ، كما يبينُ الشكلُ (10) منْ مجاليْنِ متعامديْنِ: أحدُهُما كهربائيٌّ ($E$)، والآخرُ مغناطيسيٌّ ($B$)، يتذبذبُ كلٌّ منهُما بشكلٍ عموديٍّ على الآخرِ، وكلاهُما عموديٌّ على اتجاهِ انتشارِ الموجةِ الكهرمغناطيسيةِ. وبذلكَ فإنَّ الطاقةَ التي تنقلُها الموجاتُ الكهرمغناطيسيةُ طاقةٌ كهربائيةٌ وطاقةٌ مغناطيسيةٌ.




الشكلُ (10): موجةٌ كهرمغناطيسيةٌ.



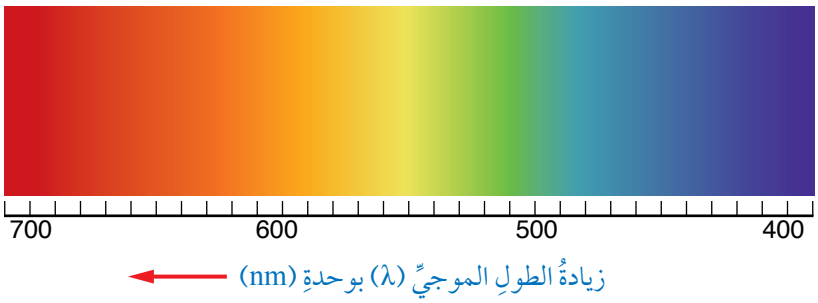

الشكلُ (11): مكوناتُ الطيفِ الكهرمغناطيسيِّ.

تحصلُ موجاتُ الإشعاعِ الكهرمغناطيسي على طاقتِها منْ مصدرِها الذي يتكونُ منْ جُسيماتٍ مشحونةٍ (مثلَ الإلكتروناتِ) تهتزُّ بترددٍ محددٍ ($f$) حولَ مركزِ اتزانِها، ويكونُ لكلِّ موجةٍ كهرمغناطيسيةٍ ترددٌ ($f$) مساوٍ لترددِ مصدرِها وطولٌ موجيٌّ ($\lambda$) خاصٌّ بِها. تنتقلُ موجاتُ الإشعاعِ الكهرمغناطيسي جميعُها في الفراغِ بسرعةٍ ثابتةٍ، هيَ سرعةُ الضوءِ ($c = 299{,}792{,}458$ m/s)، وقيمتُها التقريبيةُ في الفراغِ هيَ ($3\times10^{8}$ m/s). ولا تختلفُ كثيرًا سرعتُها في الهواءِ عنْها في الفراغِ، إلا أنَّ هذهِ السرعةَ تقلُّ كثيرًا عندَ انتقالِ الموجاتِ الكهرمغناطيسيةِ المختلفةِ في الأوساطِ الماديةِ الأخرى مثلَ الزجاجِ أوِ الماءِ. ويرتبطُ الطولُ الموجيُّ للإشعاعِ الكهرمغناطيسيِّ معَ ترددِه وفقَ العلاقةِ السابقةِ، التي استُعملتْ في حالةِ الموجاتِ الميكانيكيةِ، معَ استبدالِ سرعةِ الضوءِ في الفراغِ ($c$) بسرعةِ الموجةِ ($v$)، بحيثُ تصبحُ العلاقةُ:

$$c = f\lambda$$

تشكِّلُ موجاتُ الإشعاعِ الكهرمغناطيسيِّ ما يُعرَفُ بالطيفِ الكهرمغناطيسيِّ، وهوَ مجالٌ واسعٌ منَ الأطوالِ الموجيةِ المختلفةِ لهذهِ الموجاتِ، التي تختلفُ في خصائصِها. ويبينُ الشكلُ (11) المكوناتِ الرئيسةَ للطيفِ الكهرمغناطيسيِّ.

ألاحظُ أنَّ مكوناتِ الطيفِ الكهرمغناطيسيِّ مرتبةٌ تصاعديًّا منَ اليمينِ إلى اليسارِ حسبَ أطوالِها الموجيَّةِ، وهيَ: موجاتُ أشعةِ غاما، موجاتُ الأشعةِ السينيةِ، موجاتُ الأشعةِ فوقَ البنفسجيةِ، موجاتُ الضوءِ المرئيِّ، موجاتُ الأشعةِ تحتَ الحمراءِ، الموجاتُ الميكرويةُ،




الشكلُ (12): الأطوالُ الموجيةُ المختلفةُ لمركباتِ الضوءِ المرئيِّ.

ثمَّ أكبرُها طولًا موجيًّا موجاتُ التلفزةِ والموجاتُ الإذاعيةُ، وهيَ في الوقتِ نفسهِ مرتبةٌ منَ اليسارِ إلى اليمينِ تصاعديًّا حسبَ ترددِها وطاقتِها، حيث تُعدُّ أشعةُ غاما أعلاها طاقةً وترددًا.

✓ **أتحقَّقُ:** أيُّ الموجاتِ الآتيةِ تحملُ طاقةً أكبرَ منْ غيرِها؟ أيُّها أكبرُها ترددًا؟ أيُّها أكبرُها طولًا موجيًّا؟ (موجاتُ الأشعةِ تحتَ الحمراءِ، موجاتُ الرادارِ، موجاتُ الأشعةِ فوقَ البنفسجيةِ).

يشكلُ الضوءُ المرئيُّ جزءًا صغيرًا منَ الطيفِ الكهرمغناطيسيِّ، وهذا الجزءُ هوَ ما تراهُ عينُ الإنسانِ، وتنحصرُ الأطوالُ الموجيةُ للضوءِ المرئيِّ بينَ (400 nm - 700 nm)، ويمكنُ تمييزُ سبعةِ ألوانٍ منْها، ويبينُ الشكلُ (12) الأطوالَ الموجيةَ لهذهِ الألوانِ، إذ يُعدُّ الضوءُ البنفسجيُّ أكبرَها ترددًا وطاقةً وأصغرَها طولًا موجيًّا، في حينِ أنَّ الضوءَ الأحمرَ أكبرُها طولًا موجيًّا وأصغرُها ترددًا وطاقةً.

ألاحظُ منَ الشكلِ أنَّ أصغرَ طولٍ موجيٍّ تراهُ عينُ الإنسانِ: حواليْ (400 nm) للضوءِ البنفسجيِّ، وأكبرُ طولٍ موجيٍّ تراهُ: حواليْ (700 nm) للضوءِ الأحمرِ. وباستخدامِ البادئاتِ الملحقةِ في وحداتِ النظامِ الدوليِّ، فإنَّ: $(700\ nm = 700 \times 10^{-9}\ m = 7 \times 10^{-7}\ m)$ .

✓ **أتحقَّقُ:** أستخرجُ منَ الشكليْنِ السابقيْنِ:

- اسمَ الموجاتِ التي لَها ترددٌ مقدارهُ $(1 \times 10^{13}\ Hz)$.
- اسمَ الموجاتِ التي لَها طولٌ موجيٌّ مقدارهُ $(1 \times 10^{-9}\ m)$.
- لونَ الضوءِ المرئيِّ الذي لهُ طولٌ موجيٌّ مقدارهُ (560 nm).

## المثالُ 6

يتكوَّنُ الضوءُ المرئيُّ منْ عدَّةِ ألوانٍ، تنتقلُ جميعُها في الفراغِ بسرعةِ $3 \times 10^8$ m/s معَ أنَّ لكلِّ لونٍ منْ ألوانِ الضوءِ ترددًا مختلفًا، إذا علمتُ أنَّ ترددَ الضوءِ الأصفرِ $530 \times 10^{12}$ Hz فأحسبُ طولَ موجةِ الضوءِ الأصفرِ في الهواءِ.

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

**المطلوبُ:** $\lambda = ?$

**الحلُّ:**

$$c = f\lambda$$

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

## تطبيقاتُ الموجاتِ الكهرمغناطيسيةِ

## Applications of Electromagnetic Waves

تختلفُ استخداماتُ الموجاتِ الكهرمغناطيسيةِ في التطبيقاتِ التكنولوجيةِ والحياتيةِ باختلافِ خصائصِ كلٍّ منْها، منْ مثلِ: التردّدِ والطولِ الموجيِّ والطاقةِ التي تحملُها كلُّ موجةٍ، وقدرتِها على الاختراقِ، وخصائصِ الوسطِ الذي تسيرُ فيهِ، ومنْ بينِ هذهِ الاستخداماتِ استخدامُ الأشعةِ السينيةِ في مجالاتٍ مختلفةٍ، منْ مثلِ: الطبِّ والصناعةِ والمجالاتِ العسكريةِ والأمنيةِ.

تُستخدَمُ الأشعةُ السينيةُ في تصويرِ العظامِ والأعضاءِ الداخليةِ للجسمِ؛ فهيَ تحملُ طاقةً كبيرةً تساعدُها على اختراقِ طبقاتِ الجسمِ. أُلاحظُ الشكلَ (13).

الشكلُ (13): تصويرُ الأسنانِ باستخدامِ الأشعةِ السينيةِ.

تُستخدمُ الأشعةُ السينيةُ أيضًا في مجالاتٍ صناعيةٍ للكشفِ عنْ عيوبِ الصناعاتِ ونقاطِ الضعفِ في الهياكلِ الفلزيةِ.

وفي المجالاتِ الأمنيةِ، مثلَ فحصِ حقائبِ المسافرينَ في المطاراتِ، أوْ على شكلِ بواباتٍ يدخلُ خلالَها المسافرونَ للكشفِ عنِ الأجسامِ والموادِّ التي قدْ يُخفيها بعضُهم. أُلاحظُ الشكلَ (14).

الشكلُ (14): فحصُ الحقائبِ في المطاراتِ.

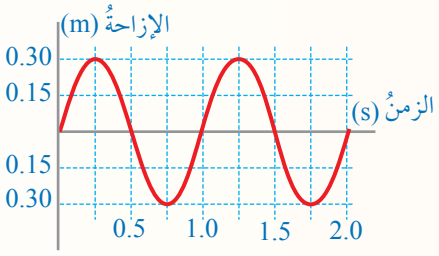
**أبحثُ:** مستعينًا بمصادرِ المعرفةِ الموثوقةِ والمتاحةِ ومنها شبكةُ الإنترنتِ أبحثُ عنِ استخدامِ الموجاتِ الأخرى منْ موجاتِ الطيفِ الكهرمغناطيسيِّ، ثمَّ تتبادلُ مجموعاتُ الطلبةِ ما توصلتْ إليهِ منَ استخداماتٍ في ما بينَها.

# مراجعةُ الدرسِ

1. **الفكرةُ الرئيسةُ: أصفُ** كلًّا منْ نوعَيْ الموجاتِ: المستعرضةِ والطوليةِ، وأذكرُ مثالًا على كلِّ نوعٍ.
2. أوضحُ المقصودَ بكلٍّ منَ:
الطولِ الموجيِّ، السعةِ، التردّدِ، الزمنِ الدوريِّ.
3. **أقارنُ** بينَ الموجاتِ: الميكانيكيةِ والكهرمغناطيسيةِ منْ حيثُ: طبيعةُ الوسطِ الناقلِ، ونوعُ الطاقةِ المنقولةِ، وطريقةُ الاهتزازِ.
4. تتابعُ سارةُ برنامجًا تلفزيونيًّا للهواةِ على قناةٍ فضائيةٍ، وتستمعُ إلى صديقتِها سالي وهيَ تعزفُ قيثارتَها في بثٍّ مباشرٍ. أحددُ نوعَ الموجاتِ إنْ كانتْ مستعرضةً أوْ طوليةً في الفقراتِ الآتيةِ:
أ . اهتزازُ أوتارِ قيثارةِ سالي.
ب. موجاتُ الصوتِ المنبعثةُ منَ القيثارةِ إلى جهازِ الميكرفونِ.
جـ. موجاتُ الراديو للقناةِ التلفزيونيةِ المنبعثةِ منَ القمرِ الصناعيِّ.
د. موجاتُ الصوتِ المنبعثةُ خلالَ الهواءِ منْ سماعةِ التلفازِ إلى أذنَيْ سارةَ.
هـ. موجاتُ الصوتِ التي تنتقلُ خلالَ جدارِ غرفةِ سارةَ إلى الغرفةِ المجاورةِ.
5. **أقارنُ:** بينَ الموجاتِ الكهرمغناطيسيةِ المبينةِ في الجدولِ الآتي:

| الموجاتُ | الطولُ الموجيُّ | التردّدُ | السرعةُ في الفراغِ | مرئيةٌ/ غيرُ مرئيةٍ |
|---|---|---|---|---|
| الميكروويةُ | | | | |
| الضوءُ الأزرقُ | | | | |
| فوقَ البنفسجيةِ | | | | |

6. **أحسبُ:** موجتانِ كهرمغناطيسيتانِ؛ الطولُ الموجيُّ للأولى ($\lambda_1 = 3.0 \times 10^{-5}\ m$)، والطولُ الموجيُّ للثانيةِ ($\lambda_2 = 1.5 \times 10^{-9}\ m$)، تنتقلانِ معًا في الهواءِ. أجدُ ما يأتي:
أ . سرعةَ انتقالِ كلِّ موجةٍ في الهواءِ.
ب. ترددَ كلِّ موجةٍ.
جـ. أحددُ موقعَ كلٍّ منهُما في الطيفِ الكهرمغناطيسيِّ.
7. **أحللُ:** الشكلُ التالي يمثلُ إزاحةَ جسيماتِ الوسطِ بالنسبةِ إلى الزمنِ عندَ انتقالِ موجةٍ طوليةٍ فيهِ. أستخرجُ منَ الشكلِ كلًّا منَ: الزمنِ الدوريِّ، والسعةِ، ثمَّ أحسبُ التردّدَ.



**الفكرةُ الرئيسةُ:**
للموجاتِ المختلفةِ سلوكٌ محددٌ يظهرُ في تطبيقاتٍ حياتيةٍ كثيرةٍ عندَ انتقالِها خلالَ الوسطِ الواحدِ، أوْ بينَ وسطيْنِ مختلفيْنِ، مثلَ: الانعكاسِ والانكسارِ والتداخلِ والحيودِ والاستقطابِ.

**نتاجاتُ التعلُّمِ:**
- أصممُ تجربةً عمليةً لأصفَ عددًا منَ الظواهرِ الموجيةِ مثلَ: تراكبِ موجتيْنِ باتجاهيْنِ متعاكسيْنِ، وانعكاسِ موجاتِ سطحِ الماءِ عنْ حاجزٍ.
- أستقصي عمليًّا شروطَ حدوثِ حيودِ موجاتِ الماءِ.
- أطورُ نموذجًا ليحددَ خصائصَ الموجاتِ: التداخلَ، الحيودَ، الانكسارَ، الاستقطابَ.
- أنفذُ تجاربَ عمليةً لتوضيحِ ظاهرةِ تأثيرِ دوبلر.
- أوظفُ تجاربَ عمليةً في معرفةِ خصائصِ الموجاتِ: الانعكاسِ، الانكسارِ، الحيودِ، التداخلِ.

**المفاهيمُ والمصطلحاتُ:**

| | |
|---|---|
| انعكاسُ الموجةِ | Wave Reflection |
| انكسارُ الموجةِ | Wave Refraction |
| مبدأ تراكب الموجات | Principle of Superposition of Waves |
| تداخلٌ | Interference |
| حيودٌ | Diffraction |
| استقطابٌ | Polarization |
| تأثيرُ دوبلر | Doppler Effect |

## انعكاسُ الموجاتِ وانكسارُها
## Reflection and Refraction of Waves

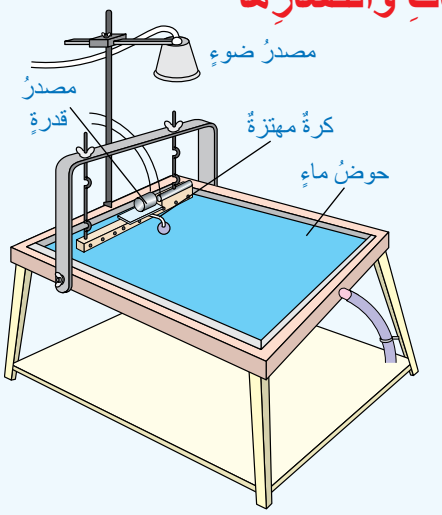
تظهرُ خاصيتا انعكاسِ الموجاتِ وانكسارِها بوضوحٍ في كثيرٍ منَ الظواهرِ الصوتيةِ والضوئيةِ. إنَّ صدى الصوتِ الذي نسمعهُ بفارقٍ زمنيٍّ عنِ الصوتِ الأصليِّ ناتجٌ عنْ ظاهرةِ انعكاسِ موجاتِ الصوتِ عنْ جدارٍ أوْ جبلٍ أوْ أيِّ حاجزٍ آخرَ. وصُورُنا التي نراها في المرآةِ وزجاجِ النافذةِ والمسطحاتِ المائيةِ ناتجةٌ عنْ ظاهرةِ انعكاسِ موجاتِ الضوءِ عنِ السطوحِ الملساءِ العاكسةِ. كما أنَّ الموجاتِ التلفزيونيةَ التي ترسلُها الأقمارُ الصناعيةُ تنعكسُ عنْ أطباقٍ مقعرةٍ وتتجمعُ في جهازٍ صغيرٍ يلتقطُ تلكَ الموجاتِ، التي تحولُ في النهايةِ إلى صورٍ نشاهدُها على شاشةِ التلفازِ. كيفَ تَحدثُ كلٌّ منْ ظاهرتيْ انعكاسِ الموجاتِ وانكسارِها؟

سوفَ أتوصلُ باستخدامِ حوضِ الموجاتِ في التجربةِ الآتيةِ إلى خاصيتَيِ انعكاسِ موجاتِ الماءِ وانكسارِها، وإلى شروطِ حدوثِ كلٍّ منهُما. وحوضُ الموجاتِ جهازٌ يتكونُ في أبسطِ أشكالهِ منْ حوضٍ زجاجيٍّ أوْ بلاستيكيٍّ شفافٍ، توضعُ فيهِ كميةٌ منَ الماءِ بارتفاعٍ مناسبٍ، ويُثبَّتُ مصدرٌ ضوئيٌّ تحتَ الحوضِ، فيظهرُ خيالٌ مكبرٌ للحركةِ الموجيةِ المتكونةِ في الحوضِ على السقفِ، ويمكنُ استخدامُ مرآةٍ تساعدُ في تكوينِ الخيالِ على شاشةٍ مثبتةٍ بشكلٍ رأسيٍّ. ويُزوَّدُ الحوضُ بملحقاتٍ متعددةٍ لتوليدِ أشكالٍ مختلفةٍ منَ الموجاتِ؛ بهدفِ دراسةِ خصائصِ موجاتِ سطحِ الماءِ.

✓ **أتحقَّقُ:** أوضِّحُ عمليةَ انعكاسِ موجاتِ الصوتِ وموجاتِ الضوءِ بذكرِ مثالٍ على كلِّ حالةٍ.

# التجربةُ 1

## استقصاءُ خاصيتَي انعكاسِ الموجاتِ وانكسارِها




**الموادُّ والأدواتُ:** حوضُ الموجاتِ وملحقاتُهُ، شاشةُ عرضٍ، مصدرُ ضوءٍ.

**إرشاداتُ السلامةِ:** الحذرُ منْ وصولِ الماءِ إلى مصدرِ الكهرباءِ.

**خطواتُ العملِ:** بالتعاونِ معَ أفرادِ مجموعتي، أنفذُ الخطواتِ الآتيةَ:

1. أركبُ حوضَ الموجاتِ بوضعٍ أفقيٍّ، وأثبّتُ مصدرَ الإضاءةِ في مكانِهِ الصحيحِ للحصولِ على خيالٍ واضحٍ على السقفِ، بمساعدةِ معلمي/ معلمتي وأعضاءِ مجموعتي.
2. أضعُ كميةَ ماءٍ في الحوضِ حتى ارتفاعٍ مناسبٍ لا يقلُّ عنْ (3 cm) تقريبًا.
3. **أجربُ:** أُركّبُ المحركَ الكهربائيَّ المولِّدَ للاهتزازاتِ، وأُشغّلُهُ بحيثُ يُصدرُ موجاتٍ دائريةً، وأراقبُ أنا وأفرادُ مجموعتي انتشارَها في الحوضِ. ثمَّ أكررُ الخطوةَ لتوليدِ موجاتٍ مستقيمةٍ. وأدوّنُ الملاحظاتِ في الجدولِ.
4. أُثبّتُ حاجزًا رأسيًّا في منتصفِ الحوضِ بشكلٍ قطريٍّ، ثمَّ أشغلُ مولدَ الموجاتِ المستقيمةِ، وأراقبُ انعكاسَ الموجاتِ عنِ الحاجزِ. وأدوّنُ الملاحظاتِ في الجدولِ.
5. **أجربُ:** أُزيلُ الحاجزَ وأضعُ في منتصفِ الحوضِ لوحًا زجاجيًّا شفافًا لا يزيدُ سمكُهُ على (2 cm) بحيثُ يبقى مغمورًا بالماءِ بشكلٍ كليٍّ، وحافتُهُ موازيةٌ لحافةِ الحوضِ، وأراقبُ ما يحدثُ للموجاتِ المستقيمةِ، وأدونُ الملاحظاتِ.
6. أكررُ الخطوةَ (5)، لكنْ بعدَ تدويرِ اللوحِ الزجاجيِّ؛ بحيثُ تصبحُ حافتُهُ غيرَ موازيةٍ لحافةِ الحوضِ. وأدونُ الملاحظاتِ.
7. أرسمُ الأنماطَ التي حصلتُ عليْها في الخطواتِ السابقةِ.

**التحليلُ والاستنتاجُ:**

1. **أصفُ** نمطَ كلٍّ منَ: الموجاتِ الدائريةِ والموجاتِ المستقيمةِ ، وأصفُ انتشارَها.
2. **أصفُ** ما حدثَ للموجاتِ المستقيمةِ عندَ مواجهتِها للحاجزِ الرأسيِّ. ماذا تُسمّى هذهِ الظاهرةُ؟
3. **أصفُ** ما حدثَ للموجاتِ المستقيمةِ عندَ مرورِها فوقَ اللوحِ الزجاجيِّ في الحالتيْنِ (الخطوةَ 5 والخطوةَ 6). ماذا تُسمّى هذهِ الظاهرةُ؟
4. **أستنتجُ:** ما الذي تغيرَ منْ صفاتِ الموجةِ (الطولُ الموجيُّ، أمِ التردُّدُ، أمِ السرعةُ، أمِ الاتجاهُ) في الحالاتِ السابقةِ؟
5. **أفسرُ** سببَ تغيرِ سرعةِ الموجاتِ على سطحِ الماءِ عندَ عبورِها منطقةً ضحلةً.

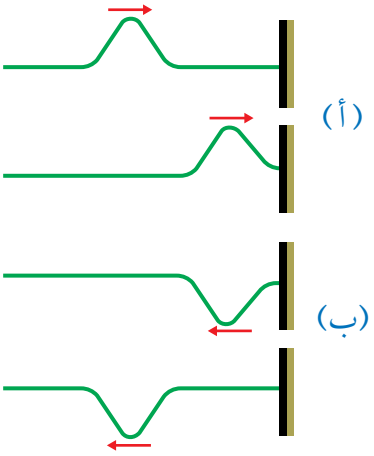
## انعكاسُ الموجاتِ Reflection of Waves

ظاهرةُ انعكاسِ موجاتِ الماءِ على سطحِ بركةٍ منَ الظواهرِ الموجيَّةِ المألوفةِ في حياتِنا، وكذلكَ انعكاسُ موجاتِ الصوتِ والضوءِ. وقدْ لاحظتُ عندَ تنفيذِ النشاطِ السابقِ أنَّ الموجاتِ المنتشرةَ على سطحِ الماءِ تغيرَ اتجاهُها عندَ مواجهتِها حاجزًا في طريقِ انتشارِها، ولقدْ لاحظتُ أيضًا أنَّ الموجةَ المنعكسةَ حافظتْ على صفاتِها، عندَما لمْ تتغيرْ خصائصُ الوسطِ الذي تنتقلُ خلالَهُ. وكما هيَ الموجاتُ في الماءِ، فإنَّ أنواعَ الموجاتِ الأخرى مثلَ: موجاتِ النابضِ والحبلِ أوِ الموجاتِ الصوتيةِ، أوِ الضوئيةِ جميعِها تنعكسُ بطريقةٍ مشابهةٍ. **وانعكاسُ الموجةِ Wave Reflection** هوَ عمليةُ سقوطِ الموجةِ على جسمٍ أوْ حاجزٍ ثمَّ ارتدادِها عنهُ باتجاهٍ مختلفٍ.

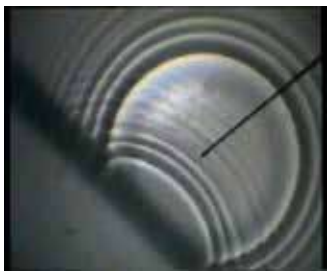
عندَ إرسالِ نبضةٍ موجيةٍ واحدةٍ خلالَ حبلٍ بعدَ تثبيتِ طرفِهِ الثاني في الجدارِ أوْ في مقبضِ البابِ، وإحداثِ اهتزازةٍ واحدةٍ في طرفِهِ الحرِّ، فإنّني ألاحظُ أنَّ هذهِ النبضةَ ترتدُّ عنِ الجدارِ وتنتقلُ باتجاهٍ معاكسٍ منَ الجدارِ إلى الطرفِ الحرِّ للحبلِ، كما يبينُ الشكلُ (15).

تنتقلُ النبضةُ باتجاهِ اليمينِ كما في المرحلةِ (أ)، وعندَ اقترابِها منْ نقطةِ التثبيتِ على الجدارِ، فإنَّ الحبلَ يؤثرُ في الجدارِ بقوةٍ نحوَ الأعلى، وحسبَ القانونِ الثالثِ في الحركةِ لنيوتن، فإنَّ الجدارَ يؤثرُ في الحبلِ بقوةِ ردِّ فعلٍ نحوَ الأسفلِ، ويُحدِثُ فيهِ نبضةً جديدةً مقلوبةً تنتقلُ عائدةً (راجعةً) نحوَ اليسارِ، كما في المرحلةِ (ب)؛ أيْ أنَّها تنعكسُ.

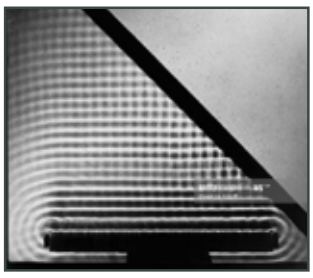
تنعكسُ موجاتُ سطحِ الماءِ الدائريةُ عنِ الحاجزِ على شكلِ أقواسٍ دائريةٍ يقعُ مركزُها الوهميُّ خلفَ الحاجزِ، كما يبينُ الشكلُ (16/ أ)، بينَما يبينُ الشكلُ (16/ ب) انعكاسَ موجاتٍ مستقيمةٍ، كالتي شاهدتُها في التجربةِ السابقةِ.




الشكلُ (15):انعكاسُ النبضةِ في حبلٍ.



(أ)



(ب)

الشكلُ (16):انعكاسُ موجاتِ سطحِ الماءِ الدائريةِ والمستقيمةِ.

كما يحدثُ انعكاسُ الموجاتِ المستعرضةِ على سطحِ الماءِ، أوْ في الحبلِ والنابضِ، فإنَّ جميعَ الموجاتِ المستعرضةِ الأخرى تنعكسُ بالطريقةِ نفسِها، ومثالُ ذلكَ موجاتُ الضوءِ وباقي الموجاتِ الكهرمغناطيسيةِ. ويحدثُ الشيْءُ نفسهُ بالنسبةِ إلى الموجاتِ الطوليةِ، فإنَّها تنعكسُ أيضًا عندَما تواجهُ حاجزًا يعترضُ طريقَ انتشارِها، ومثالُ ذلكَ انعكاسُ موجاتِ الصوتِ عنـدَ الحواجزِ المختلفةِ كالمباني والجبالِ.

## انكسارُ الموجاتِ Refraction of Waves

ظاهرةُ انكسارِ الموجاتِ هيَ الظاهرةُ الشائعةُ الثانيةُ إضافةً إلى ظاهرةِ الانعكاسِ، ويُعرَّفُ **انكسارُ الموجةِ** **Wave Refraction** بأنَّهُ انحرافُ اتجاهِ انتشارِ الموجاتِ عندَ اجتيازِها الحدَّ الفاصلَ بينَ وسطيْنِ مختلفيْنَ في خصائصِهما. وقدْ لاحظتُ ذلكَ بوضوحٍ في النشاطِ السابقِ، حيثُ أدى وجودُ لوحِ زجاجٍ شفافٍ داخلَ الحوضِ إلى اختلافِ سمكِ الماءِ، وتكوَّنَ نتيجةَ ذلكَ وسطانِ مختلفانِ نتجَ عنهُما انكسارُ موجاتِ الماءِ؛ أيْ تغييرٌ في اتجاهِ انتشارِها. وينتجُ الانكسارُ عنِ اختلافِ الطولِ الموجيِّ معَ بقاءِ الترددِ ثابتًا عندَ الحدِّ الفاصلِ بينَ وسطيْنِ مختلفيْنِ في الخصائصِ. وباستخدامِ العلاقةِ: ($v = f\,\lambda$) فإنَّ سرعةَ انتشارِ الموجاتِ تتغيرُ منْ وسطٍ إلى آخرَ نتيجةً لاختلافِ الطولِ الموجيِّ. ألاحظُ أنَّ الطولَ الموجيَّ في الشكلِ (17) هوَ المسافةُ بينَ كلِّ خطيْنِ مضيئيْنِ، أوْ بينَ كلِّ خطيْنِ مظلميْنِ، ويبينُ الشكلُ النتيجةَ التي حصلْنا عليْها في النشاطِ السابقِ، وهوَ نقصانُ الطولِ الموجيِّ الذي أدى إلى الانكسارِ.

الشكلُ (17): انكسارُ موجاتِ سطحِ الماءِ المستويةِ.

✓ **أتحقَّقُ:** ما سببُ حدوثِ انكسارٍ لموجاتِ الماءِ عندَ مرورِها فوقَ لوحٍ زجاجيٍّ موضوعٍ في قاعِ الحوضِ؟

**تمرينٌ**

بالرجوعِ إلى الشكلِ (17). إذا كانَ التردُدُ (8 Hz)، وكانتِ المسافةُ بينَ كلِّ خطيْنِ مضيئيْنِ في الوسطِ الأولِ (5 cm)، وفي الوسطِ الثاني (3 cm). **فأحسبُ** سرعةَ الموجاتِ في كلٍّ منَ الوسطيْنِ.

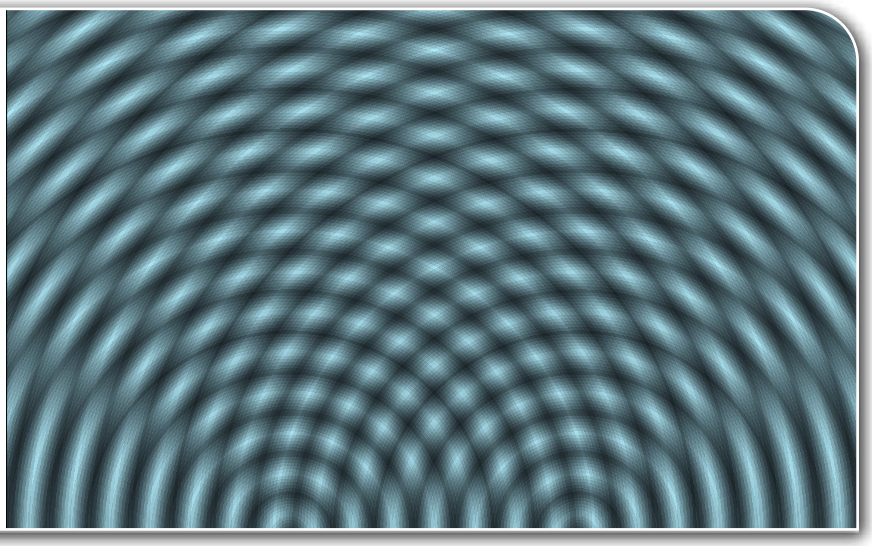
## التداخلُ والحيودُ Interference and Diffraction

### التداخلُ Interference

تحدثُ ظاهرةُ تداخلِ الموجاتِ عندَما تلتقي موجتانِ أوْ أكثرُ في لحظةٍ واحدةٍ عندَ نقطةٍ محددةٍ، فتُحدِثُ هذهِ الموجاتُ -مجتمعةً- إزاحـةً محصلـةً لجسيمات الوسطِ الـذي تنتقلُ خلالـهُ. **فالتداخلُ Interference**: التقاءُ مساريْنِ منَ الحركةِ الموجيةِ بحيثُ ينتجُ عنِ التقاءِ القممِ والقيعانِ نمطٌ محددٌ.

وعندَما تلتقي موجتانِ متماثلتانِ (لهُما التردُدُ نفسهُ والطولُ الموجيُّ نفسهُ) ومنِ النوعِ نفسهِ، فإنَّ عمليةَ التداخلِ تكونُ منتظمةً. ويبينُ الشكلُ (18) نمطَ تداخلٍ منتظمٍ يتكوَّنُ عندَ التقاءِ موجاتٍ ناتجةٍ عنْ مصدريْنِ متجاوريْنِ ومتماثليْنِ على سطحِ الماءِ. وحتى تتلاشى الإزاحةُ تمامًا عندَ التقاءِ قمةِ موجةٍ مع قاعِ موجةٍ أخرى يجبُ أنْ تكونَ الموجتانِ متساويتيْنَ في السعةِ. ومثالٌ على ذلكَ يحدثُ تداخلٌ هدّامٌ وتداخلٌ بنّاءٌ بينَ موجاتِ الصوتِ التي تصدرُ عنْ سماعتيْنِ موصولتيْنِ معَ مصدرٍ واحدٍ يولدُ الاهتزازاتِ.

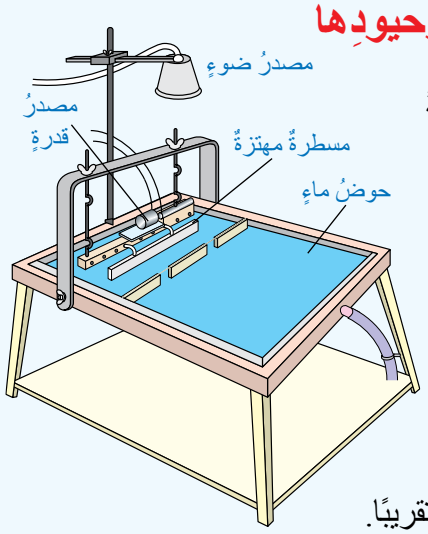
لتكوينِ نمطِ تداخلٍ منتظمٍ عمليًّا، ولدراسةِ الحيودِ Diffraction وهوَ ظاهرةٌ أخرى متعلقةٌ بالحركةِ الموجيةِ، أنفِّذُ التجربةَ الآتيةَ:



الشكلُ (18): تداخلُ الموجاتِ منْ مصدريْنِ متماثليْنِ على سطحِ الماءِ.

# التجربةُ 2

## استقصاءُ خاصيتَيْ تداخلِ الموجاتِ وحيودِها




**الموادُّ والأدواتُ:** حوضُ الموجاتِ وملحقاتُهُ (مصدرُ ضوءٍ ومجموعةُ حواجزَ).

**إرشاداتُ السلامةِ:** الحذرُ منْ وصولِ الماءِ إلى مصدرِ الكهرباءِ.

**خطواتُ العملِ:** بالتعاونِ معَ أفرادِ مجموعتي، أنفذُ الخطواتِ الآتيةَ:

1. أركبُ حوضَ الموجاتِ بوضعٍ أفقيٍّ وأثبّتُ مصدرَ الإضاءةِ في مكانِهِ الصحيحِ بمساعدةِ معلّمي/ معلّمتي وأعضاءِ مجموعتي.
2. أضعُ كميةَ ماءٍ مناسبةً في الحوضِ حتى ارتفاعٍ لا يقلُّ عن (3 cm) تقريبًا.
3. أثبتُ المحركَ الكهربائيَّ المولدَ للاهتزازاتِ فوقَ المسطرةِ الخاصةِ وأشغّلُهُ بحيثُ يصدرُ موجاتٍ مستقيمةً، وأراقبُ حركةَ تقدمِ هذهِ الموجاتِ في الحوضِ.
4. أضعُ حاجزًا يحتوي على فتحتيْنِ على بُعدِ (15 cm) أمامَ المسطرةِ، كما في الشكلِ، وأراقبُ عبورَ الموجاتِ المستقيمةِ من كلتا الفتحتين، وأغيرُ منْ سرعةِ المحركِ للحصولِ على شكلٍ واضحٍ، ثمَّ أدوّنُ الملاحظاتِ على النمطِ المتكونِ بعدَ الفتحتيْنِ.
5. أعدلُ الحاجزَ في الخطوةِ السابقةِ بحيثُ يحتوي على فتحةٍ واحدةٍ ضيقةٍ، ثمَّ أدوّنُ الملاحظاتِ على النمطِ المتكونِ. ثمَّ أغيّرُ اتساعَ الفتحةِ وأراقبُ ما يحدثُ للموجاتِ مرةً أخرى.
6. أرسمُ الأنماطَ التي حصلتُ عليْها في الخطوتيْنِ (5,4) السابقتيْنِ.

### التحليلُ والاستنتاجُ:

1. **أفسّرُ** أهميةَ وجودِ فتحتيْنِ في الحاجزِ في الخطوةِ (4). وما التغيرُ الذي حصلَ للموجاتِ بعدَ الحاجزِ؟
2. **أصفُ** ما حدثَ للموجاتِ المستقيمةِ بعدَ تجاوزِها الحاجزَ الذي يحتوي على فتحتيْنِ، وأذكرُ اسمَ هذهِ العمليةِ.
3. **أصفُ** ما حدثَ للموجاتِ المستقيمةِ بعدَ تجاوزِها الحاجزَ الذي يحتوي على فتحةٍ ضيقةٍ، وأذكرُ اسمَ هذهِ العمليةِ.
4. **أستنتجُ:** عندَما تتجاوزُ الموجاتُ المستقيمةُ حاجزًا فيهِ فتحةٌ، فإنَّها تنفذُ منهُ وتكملُ مسيرَها على هيئةِ موجاتٍ دائريةٍ، أيْ أنَّها تحيدُ عن اتجاهِها، وتلتفُّ حولَ الحاجزِ قليلًا. ما العلاقةُ بينَ حيودِ الموجاتِ واتساعِ الفتحةِ؟

بعدَ أنْ لاحظتُ نمطَ التداخلِ المنتظمَ في التجربةِ السابقةِ، ربَّما أتساءلُ كيفَ يحدثُ التداخلُ وما الذي يؤدي إلى ظهورِ هذا النمطِ المنتظمِ؟ تعودُ ظاهرةُ التداخلِ إلى إحدى الخصائصِ الموجيةِ التي تُعرَفُ **بمبدأِ تراكُبِ الموجاتِ** **Priciple of Superposition of Waves** وهوَ أنَّ الإزاحةَ الكليةَ التي تحدثُ لجسيماتِ الوسطِ تساوي ناتجَ الجمعِ المتجهيِّ للإزاحاتِ الناتجةِ عنِ التقاءِ الموجاتِ عندَ النقطةِ نفسِها. كيفَ يحدثُ التراكبُ؟

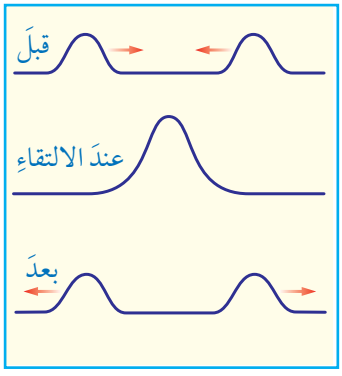
عندَ مرورِ موجةٍ مستعرضةٍ في نابضٍ باتجاهِ اليمينِ، ومرورِ موجةٍ مستعرضةٍ أخرى في النابضِ نفسهِ باتجاهِ اليسارِ، فإنَّ الموجتيْنِ ستلتقيانِ في مكانٍ واحدٍ عندَ لحظةٍ زمنيةٍ معينةٍ، ويعملُ تأثيرُ الموجتيْنِ في جسيماتِ النابضِ عندَ لحظةِ التقائِهما بشكلٍ مشتركٍ فيظهرُ النابضُ بصورةٍ مختلفةٍ عن أيٍّ منَ الموجتيْنِ، والنتيجةُ جمعُ التأثيرِ المشتركِ للموجتيْنِ معًا في جسيماتِ الوسطِ الذي تنتقلُ خلالهُ. يحدثُ التراكُبُ بينَ موجتيْنِ في حالِ انتقالِهما باتجاهيْنِ متعاكسيْنِ، أوْ بالاتجاهِ نفسهِ عندَما تلحقُ إحداهُما بالأخرى، كما يحدثُ أيضًا بينَ موجتيْنِ أوْ أكثرَ عندَ التقائِها مهما كانَ اتجاهُ كلٍّ منْها. يوضحُ الشكلُ (19/ أ) مثالًا بسيطًا على تراكبِ الموجاتِ، حيثُ تلتقي موجاتٌ دائريةٌ على سطحِ الماءِ في حوضٍ.

ويبينُ الشكلُ (19/ ب) أيضًا قمتيْ موجتيْنِ تسيرانِ باتجاهيْنِ متعاكسيْنِ قبلَ التقائِهما، وعندَ حدوثِ التراكبِ ثمَّ بعدِ ابتعادِهما، لاحظْ أنَّهُ ينتجُ عنِ الأثرِ المشتركِ للقمتيْنِ لحظةَ تراكبِهما قمةٌ مضاعفةٌ، وينتجُ عنْ هذا التراكبِ تداخلٌ بنّاءٌ Constructive Interference.

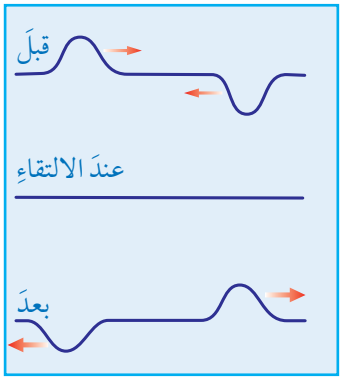
ويبينُ الشكلُ (19/ جـ) أنَّ تراكبَ قمةٍ معَ قاعٍ ينتجُ عنهُ انعدامٌ للإزاحةِ، وتختفي الموجتانِ في لحظةِ تراكبِهما، ويُسمّى هذا التراكبُ تداخلًا هدّامًا Destructive Interference.

ألاحظُ منَ الشكلِ السابقِ أنَّ كلاًّ منَ الموجتيْنِ المتراكبتيْنِ بعدَ التراكبِ تعودُ إلى شكلِها السابقِ الذي كانتْ عليْهِ قبلَ التراكبِ. ويُشترطُ لحدوثِ تراكبِ الموجاتِ أنْ تكونَ الموجتانِ منَ النوعِ نفسهِ، فلا يمكنُ أنْ يحدثَ تراكبٌ بينَ موجتيْنِ إحداهُما طوليةٌ والأخرى مستعرضةٌ، فلا يحدثُ بينَ موجةٍ صوتيةٍ وأخرى كهرمغناطيسيةٍ.

( أ )

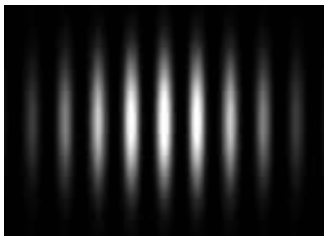


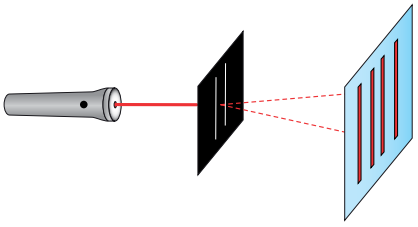

(ب)




(جـ)

الشكلُ (19): تراكُبُ الموجاتِ.





الشكلُ (20): (أ): غشاءُ فقاعةِ صابونٍ. (ب): نمطُ تداخلِ موجاتِ ضوءِ الشمسِ. (جـ): تجربةُ تداخلِ موجاتِ ضوءِ الليزرِ.

تحدثُ ظاهرةُ التداخلِ في جميعِ أنواعِ الموجاتِ، فموجاتُ الصوتِ تتداخلُ وتنشأُ عنْ تداخلِها أنماطٌ تتألفُ منْ مناطقَ تزدادُ فيها شدةُ الصوتِ، ومناطقَ أخرى ينخفضُ فيها الصوتُ. كما يمكنُ رؤيةُ بعضِ الأنماطِ الناتجةِ عنْ تداخلِ موجاتِ الضوءِ على غشاءِ فقاعةِ صابونٍ مثلَما يبينُ الشكلُ (20/ أ). وهناكَ تجاربُ عمليةٌ تمكنُنا منْ رؤيةِ بعضِ أنماطِ التداخلِ لموجاتِ الضوءِ. يوضحُ الشكلُ (20/ ب) تداخلَ موجاتِ ضوءِ الشمسِ بعدَ عبورهِ منْ شقيْنِ صغيريْنِ متجاورينِ، بينَما يُظهرُ الشكلُ (20/ جـ) رسمًا توضيحيًّا للتداخلِ الناتجِ عنْ ضوءِ ليزرَ أحمرَ عندَ مرورهِ من شقيْنِ. ويكونُ نمطُ التداخلِ منتظمًا بحيثُ يكررُ نفسَهُ عندَما تكونُ الموجاتُ المتداخلةُ متساويةً في الطولِ الموجيَّ.

يحدثُ التداخلُ أيضًا بينَ الموجاتِ التي لا تتساوى في التردِدِ والطولِ الموجيِّ، أوْ أنَّها صادرةٌ عنْ مصدريْنِ غيرِ متماثليْنِ، لكنَّ النمطَ الناتجَ عنْ ذلكَ لا يكونُ منتظمًا.

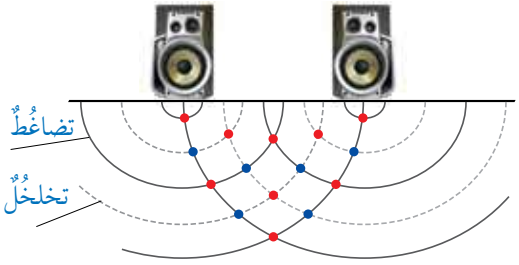
**أُفكِّرُ:** عندَ النظرِ إلى المنشورِ الزجاجيِّ وعندَ النظرِ إلى فقاعةِ الصابونِ، في الحالتيْنِ ألاحظُ مركباتِ الطيفِ المرئيِّ الملونةَ، أوْ جزءًا منْها. ما الاختلافُ بينَ الحالتيْنِ؟

### ✓ أتحقَّقُ:

- متى يكونُ التداخلُ بنّاءً؟ ومتى يكونُ هدّامًا؟
- ما الشرطُ اللازمُ توافرهُ حتى يحدثَ تراكبٌ لموجتيْنِ تنتقلانِ في وسطٍ واحدٍ؟

## المثالُ 7

وُضِعتْ سماعتانِ متصلتانِ معَ المصدرِ نفسهِ، بحيثُ تفصلهُما مسافةُ (1 m) تقريبًا، فحدثَ تداخلٌ بينَ الموجاتِ الصادرةِ عنِ السماعتيْنِ معًا، كما يبينُ الشكلُ (21). أحددُ نقاطَ التداخلِ البنّاءِ والهدّامِ، وأبيِّنُ ما يحدثُ للصوتِ عندَ كلٍّ منْها.




الشكلُ (21): التداخلُ المنتظمُ بينَ موجاتِ الصوتِ المتماثلةِ.

**المعطياتُ:** الشكلُ.

**المطلوبُ:** تحديدُ نقاطِ التداخلِ البنّاءِ والهدّامِ، ووصفُ ما يحدثُ للصوتِ.

**الحلُّ:**

الخطوطُ المتصلةُ على الشكلِ تمثلُ مناطقَ تضاغطٍ، والخطوطُ المتقطعةُ تمثلُ مناطقَ تخلخلٍ. تبينُ النقاطُ الحمراءُ التداخلَ البنّاءَ، فبعضُها ناتجةٌ عنْ تقاطعِ خطيْنِ متصليْنِ (تضاغطٌ معَ تضاغطٍ)؛ فهيَ تمثلُ تضاغطًا مضاعفًا. وبعضُ النقاطِ الحمراءِ الأخرى ناتجةٌ عنْ تقاطعِ خطيْنِ متقطعيْنِ (تخلخلٌ معَ تخلخلٍ)؛ فهيَ تمثلُ تخلخلًا مضاعفًا. وتكونُ شدةُ الصوتِ عندَ النقاطِ الحمراءِ جميعِها أكبرَ ما يمكنُ. النقاطُ الزرقاءُ جميعُها تبينُ التداخلَ الهدّامَ، فهيَ ناتجةٌ عنْ تقاطعِ خطٍّ متصلٍ معَ خطٍّ متقطعٍ (تضاغطٌ معَ تخلخلٍ)؛ فهيَ تمثلُ انعدامًا للموجاتِ، أيِ اختفاءَ الصوتِ.

### الحيودُ Diffraction

**الحيودُ Diffraction** هوَ ظاهرةُ انعطافِ الموجاتِ عنِ اتجاهِها عندَ نفاذِها خلالَ الفتحاتِ الضيقةِ، أوْ بالقربِ منْ حوافِّ الحواجزِ، وهيَ ظاهرةٌ تحدثُ لمختلفِ أنواعِ الموجاتِ، مثلَ: موجاتِ الماءِ والصوتِ والضوءِ، وقدْ لاحظتُ حيودَ الموجاتِ المنتشرةِ على سطحِ الماءِ في التجربةِ السابقةِ عندَ نفاذِها خلالَ فتحةٍ في حاجزٍ. ويكونُ الحيودُ واضحًا عندَما يكونُ اتساعُ الفتحةِ التي تمرُّ منْ خلالِها الموجاتُ مقاربًا لمقدارِ طولِها الموجيِّ.

يبينُ الشكلُ (22) نمطيْنِ مختلفيْنِ لحيودِ موجاتٍ مستقيمةٍ على سطحِ الماءِ عندَ نفاذِها منْ فتحتيْنِ مختلفتيْنِ في حاجزيْنِ، وسببُ الاختلافِ في نمطَيِ الحيودِ ناتجٌ عنْ الاختلافِ في اتساعِ الفتحةِ التي عبرتْ خلالَها الموجاتُ.

الشكلُ (22): حيودُ موجاتِ سطحِ الماءِ عندَ نفاذِها منْ فتحةٍ واسعةٍ وأخرى ضيقةٍ.

ألاحظُ أحيانًا تكوُّنَ أهدابِ تداخلٍ مضيئةٍ وأخرى مظلمةٍ عندَما أنظرُ إلى حاجزٍ يسقطُ عليهِ ضوءٌ صادرٌ عنْ فتحةٍ ضيقةٍ، وتكونُ هذهِ الأهدابُ ناتجةً عنْ حيودِ موجاتِ الضوءِ عندَ نفاذِها خلالَ هذهِ الفتحةِ أوْ بالقربِ منَ الحوافِّ الحادةِ للأجسامِ الصغيرةِ؛ فعندَ مرورِ الضوءِ خلالَ ثقبِ إبرةِ خياطةٍ مثلًا، أوْ بالقربِ منْ حافةِ جسمٍ دقيقٍ آخرَ، ثمَّ سقوطِهِ على حاجزٍ، فإنّني أرى بوضوحٍ أهدابَ التداخلِ المتكونةَ على الحاجزِ الناتجةَ عنْ حيودِ الضوءِ. والشكلُ (23) يبينُ حيودَ ضوءٍ أحمرَ عندَ مرورِهِ خلالَ ثقبِ إبرةِ خياطةٍ.

الشكلُ (23): حيودُ موجاتِ الضوءِ الأحمرِ عندَ مرورِها منْ ثقبِ إبرةِ خياطةٍ.

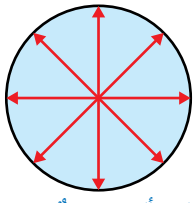
**أُفكّرُ:** عندَما يُناديني زميلي منْ خلفِ سورٍ مرتفعٍ، فإنّي أسمعُ صوتَهُ، لكنّي لا أراهُ. لماذا؟

## الاستقطابُ Polarization

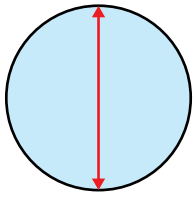
ترتبطُ خاصيةُ الاستقطابِ بالموجاتِ المستعرضةِ فقطْ، فهيَ تتعلقُ باتجاهِ اهتزازِ جسيماتِ الوسطِ عندَما يكونُ متعامدًا معَ اتجاهِ انتشارِ الموجةِ. فالموجاتُ المستعرضةُ بجميعِ أنواعِها يمكنُ استقطابُها، في حينِ لا يمكنُ استقطابُ الموجاتِ الطوليةِ. ويعدُّ الاستقطابُ الذي ألاحظُهُ لموجاتِ الضوءِ المرئيِّ دليلًا على أنَّ الموجاتِ الكهرمغناطيسيةَ جميعَها مستعرضةٌ. في الموجاتِ المستقطبةِ يكونُ اهتزازُ جسيماتِ الوسطِ في بُعدٍ واحدٍ يتعامدُ معَ اتجاهِ انتشارِ الموجةِ، بينَما في الموجاتِ غيرِ المستقطبةِ تهتزُّ هذهِ الجسيماتُ في أبعادٍ عدَّةٍ جميعُها متعامدةٌ معَ اتجاهِ انتشارِ الموجةِ.

لذلكَ يُعرَّفُ **الاستقطابُ Polarization** بأنَّهُ عمليةُ انتقاءِ موجةٍ مستعرضةٍ تُحدثُ اهتزازًا في جسيماتِ الوسطِ في بُعدٍ واحدٍ فقطْ منْ بينِ حزمةِ موجاتٍ يكونُ الاهتزازُ فيها باتجاهاتٍ عدَّةٍ، جميعُها متعامدةٌ معَ اتجاهِ انتشارِ الموجاتِ.

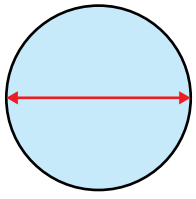
يبينُ الشكلُ (24/ أ) موجاتٍ غيرَ مستقطبةٍ تهتزُّ منْ خلالِها جسيماتُ الوسطِ باتجاهاتٍ مختلفةٍ، إذْ تمثلُ الأسهمُ اتجاهاتِ الاهتزازِ، أما اتجاهُ انتشارِ الموجاتِ فيكونُ عموديًّا على سطحِ الورقةِ، داخلًا فيها أوْ خارجًا منْها. في حينِ يبينُ الشكلُ (24/ ب) موجاتٍ مستقطبةً استقطابًا رأسيًّا، ويبينُ الشكلُ (24/ جـ) موجاتٍ مستقطبةً استقطابًا أفقيًّا.



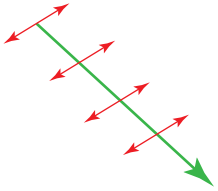
الشكلُ (24/أ): موجاتٌ غيرُ مستقطبةٍ.



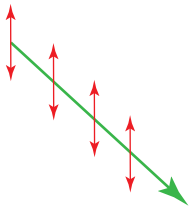
الشكلُ (24/ب): استقطابٌ رأسيٌّ.



الشكلُ (24/جـ): استقطابٌ أفقيٌّ.



(أ) موجاتٌ مستقطبةٌ أفقيًّا.



(ب) موجاتٌ مستقطبةٌ رأسيًّا.

الشكلُ (25): تحديدُ مستوى استقطابِ الموجاتِ الكهرمغناطيسيةِ.

أعلمُ أنَّ الموجةَ الكهرمغناطيسيةَ تتكونُ منْ مركبتيْنِ متعامدتيْنِ إحداهُما ناتجةٌ عنِ اهتزازٍ في المجالِ الكهربائيِّ، والأخرى عنِ اهتزازٍ في المجالِ المغناطيسيِّ، ويتمُّ تحديدُ مستوى الاستقطابِ في الموجاتِ الكهرمغناطيسيةِ على أنَّهُ المستوى الذي يهتزُّ فيهِ المجالُ الكهربائيُّ فقطْ. يبينُ الشكلُ (25/ أ) موجةً مستقطبةً أفقيًّا، ويبينُ الشكلُ (25/ ب) موجةً مستقطبةً رأسيًّا.

كثيرٌ منْ مصادرِ الضوءِ، مثلَ بعضِ مصابيحِ الليزرِ والشاشاتِ الرقميةِ (LED) يكونُ الضوءُ الصادرُ عنْها مستقطبًا، في حينِ يكونُ ضوءُ المصباحِ العاديِّ وضوءُ الشمسِ غيرَ مستقطبٍ، وأيضًا تُستخدَمُ بعضُ النظاراتِ الشمسيةِ التي تعملُ على استقطابِ الضوءِ لتخفيفِ شدةِ الأضواءِ المنعكسةِ عنِ الطرقِ والمسطحاتِ المائيةِ.

**الفيزياءُ والتكنولوجيا**

عندَ سقوطِ ضوءِ الشمسِ غيرِ المستقطبِ على سطحِ الماءِ أوِ الزجاجِ أوِ الطريقِ بزاويةٍ معينةٍ، فإنَّهُ ينعكسُ مستقطبًا باتجاهٍ واحدٍ يوازي السطحَ العاكسَ، كما في الشكلِ (25/ أ).

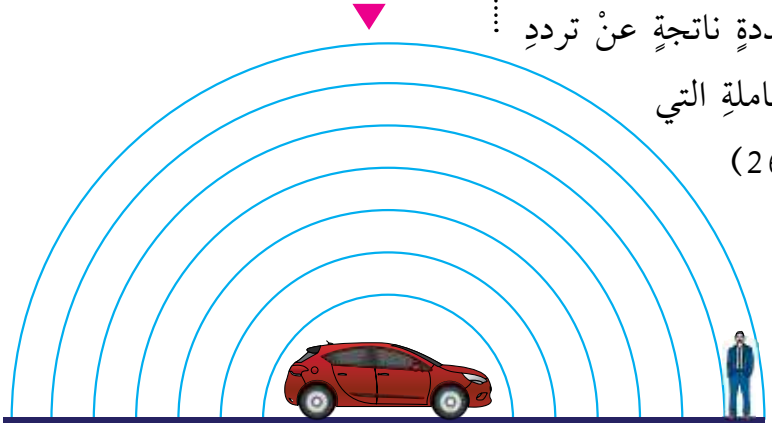
عندَ استخدامِ نظارةٍ شمسيةٍ ذاتِ محورِ استقطابٍ رأسيٍّ، فإنَّها تمتصُّ نسبةً كبيرةً منَ الضوءِ المستقطبِ استقطابًا أفقيًّا وهوَ المنعكسُ عنِ الأرضِ، لكنَّها تسمحُ للضوءِ غيرِ المستقطبِ بالوصولِ إلى العينِ؛ ما يقللُ منْ وهجِ الانعكاساتِ المزعجةِ.

✓ **أتحقَّقُ:** ما المقصودُ بعمليةِ استقطابِ الموجاتِ؟ ولماذا تُستقطَبُ موجاتُ الضوءِ، ولا تُستقطَبُ موجاتُ الصوتِ؟

## تأثيرُ دوبلر Doppler Effect

عندَ سماعِكَ صوتَ منبهِ سيارةٍ متوقفةٍ عنِ الحركةِ، وأنتَ تقفُ بالقربِ منْها، فإنَّكَ تسمعهُ بدرجةِ صوتٍ محددةٍ ناتجةٍ عنْ ترددِ هذا الصوتِ، وهوَ عددُ الموجاتِ الصوتيةِ الكاملةِ التي يصدرُها المنبهُ في الثانيةِ الواحدةِ. يبينُ الشكلُ (26) الموجاتِ الصوتيةَ الصادرةَ عنْ منبهِ سيارةٍ في حالةِ وقوفٍ، وهيَ تصلُ إلى المستمعِ، إذْ تمثلُ الأقواسُ مناطقَ التضاغطِ المتتاليةَ في الهواءِ.

الشكلُ (26): موجاتُ صوتِ منبهِ سيارةٍ متوقفةٍ.

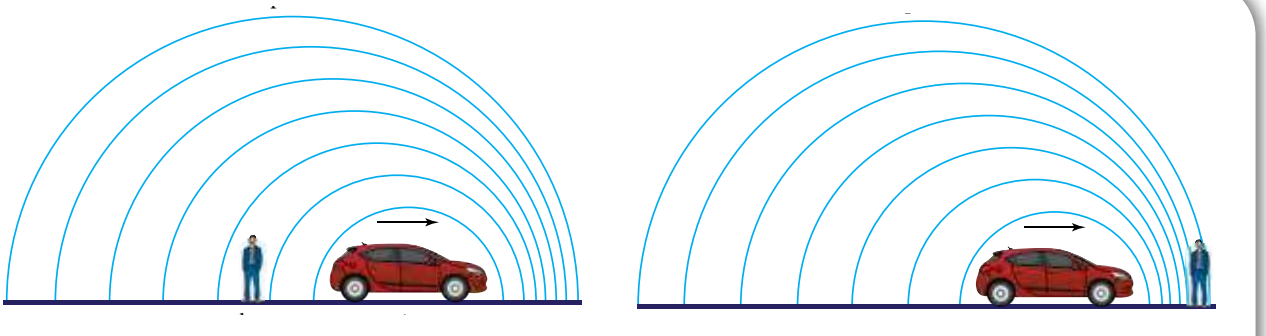


لأطرحْ تساؤلًا: ما الذي سيحدثُ لوْ كانتِ السيارةُ تُصدرُ صوتَ المنبهِ وهيَ متحركةٌ بسرعةٍ نحوَ السامعِ؟ إنَّ منبهَ السيارةِ لمْ يتغيرْ وسيبقى يُصدرُ الصوتَ بالترددِ نفسهِ والطولِ الموجيِّ نفسهِ، وكذلك سرعةُ الصوتِ في الهواءِ لنْ تتغيرَ؛ لأنَّها تعتمدُ على خصائصِ الهواءِ. لكنْ بسببِ حركةِ السيارةِ فإنَّ موجاتِ الصوتِ في الجهةِ الأماميةِ سوفَ تتقاربُ منْ بعضِها، أيْ أنَّ الطولَ الموجيَّ للموجاتِ التي بينَ السيارةِ والسامعِ سوفَ يقصرُ، كما في الشكلِ (27/ أ). وستصلُ مزيدٌ منَ الموجاتِ إلى أذنِ السامعِ في الثانيةِ الواحدةِ، وهذا يدركهُ السامعُ على صورةِ زيادةٍ في درجةِ الصوتِ، أيْ أنَّ الترددَ الذي يصلُ إلى أذنِ السامعِ يكونُ أكبرَ منْ ترددِ مصدرِ الصوتِ (المنبهِ).

ويحدثُ عكسُ ذلك عندما تُصدرُ سيارةٌ صوتَ منبهٍ وهيَ تتحركُ مبتعدةً عنِ السامعِ، كما في الشكلِ (27/ ب)، حيثُ ستصلُ التضاغطاتُ إلى أذنِ السامعِ متباعدةً عنْ بعضِها، أيْ ستُحدثُ زيادةً في الطولِ الموجيِّ، فيصبحُ الترددُ المسموعُ أقلَّ منْ ترددِ المصدرِ، وهذا سوفَ يدركهُ السامعُ على صورةِ نقصانٍ في درجةِ صوتِ المنبهِ. تُعرَفُ هذهِ الظاهرةُ **بتأثيرِ دوبلر Doppler Effect**، وهوَ التغيُّرُ الظاهريُّ في ترددِ الموجةِ نتيجةَ وجودِ حركةٍ نسبيةٍ بينَ مصدرِ الصوتِ والسامعِ. وتأثيرُ دوبلر يحدثُ في الموجاتِ الأخرى؛ الميكانيكيةِ والكهرمغناطيسيةِ.

**أُفكِّرُ:** في تأثيرِ دوبلر يحدثُ تغيُّرٌ ظاهريٌّ في ترددِ الموجةِ عندَ وصولِها إلى المراقبِ نتيجةَ حركةِ المصدرِ أوْ المراقبِ. كيفَ لِهذا أنْ يحدثَ منْ دونِ أنْ يتغيرَ ترددُ المصدرِ؟

أعدُّ فيلمًا قصيرًا باستخدامِ برنامجِ صانعِ الأفلامِ (movie maker) يوضحُ الاستقطابَ، وأحرصُ على أنْ يشتملَ الفيلمُ على مفهومِ كلٍّ منَ: الاستقطابِ الأفقيِّ، والاستقطابِ الرأسيِّ، وعلى صورٍ متحركةٍ لأمثلةٍ توضيحيةٍ، ثمَّ أشاركهُ زملائي/ زميلاتي في الصفِّ.



(ب) (أ)

الشكلُ (27): موجاتُ الصوتِ الصادرةُ عنْ منبهِ سيارةٍ متحركةٍ بسرعةٍ.

## تطبيقاتٌ على تأثيرِ دوبلر Doppler Effect Applications

- **الخفاشُ**: يعتمدُ الخفاشُ على الموجاتِ فوقَ الصوتيةِ في إيجادِ طريقِهِ أوْ تعقُّبِ فريستِهِ؛ فهوَ يرسلُ موجاتٍ فوقَ صوتيةٍ تصلُ إلى جسمِ الفريسةِ ثمَّ ترتدُّ عنْها، فيحددُ الخفاشُ موقعَ الفريسةِ، ثمَّ يحددُ سرعتَها منْ فرقِ التردِدِ بينَ الموجتينِ المرسلةِ والمنعكسةِ، كما يوضحُ الشكلُ (28).

الشكلُ (28): خفاشٌ يطاردُ فريستَهُ.

- **الرادارُ**: على غرارِ الطريقةِ التي وهبَها اللّٰهُ تعالى للخفاشِ، ابتكرَ الإنسانُ تقنيةَ الرادارِ، الذي يرسلُ موجاتٍ كهرمغناطيسيةً قصيرةً (ميكروية) ثمَّ تنعكسُ عنْ جسمِ الهدفِ الذي قدْ يكونُ طائرةً في الجوِّ أوْ سيارةً على الطريقِ، وبمعرفةِ الفرقِ بينَ ترددِ الموجاتِ المرسلةِ، وترددِ الموجاتِ المرتدةِ عنِ الهدفِ يجري حسابُ سرعةِ الهدفِ المتحركِ.

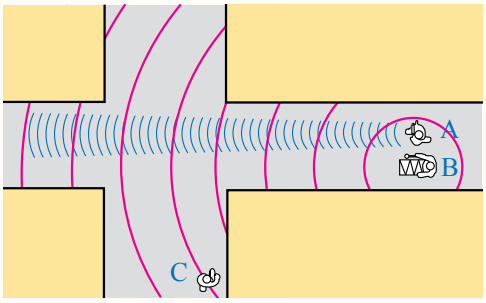
- **التصويرُ فوقَ الصوتيِّ**: حيثُ تُستخدَمُ موجاتٌ فوقَ صوتيةٍ في تصويرِ أماكنَ يصعبُ الوصولُ إليْها مثلَ قيعانِ البحارِ، وكذلكَ في الطبِّ لقياسِ سرعةِ الدمِ في الأوعيةِ الدمويةِ داخلَ جسمِ الإنسانِ.

- **دراسة تطورِ الكونِ**: لاحظَ علماءُ الفلكِ أنَّ كثيرًا منَ المجراتِ يميلُ طيفُها الضوئيُّ القادمُ إلى الأرضِ نحوَ اللونِ الأحمرِ؛ ما يعني أنَّ ترددَ الضوءِ الذي يصلُ منْها إلى الأرضِ أقلُّ منْ الترددِ الذي ترسلهُ، ولنْ يحدثَ هذا إلا عندَما يكونُ مصدرُ الضوءِ متحركًا بسرعةٍ كبيرةٍ مبتعدًا عنِ الأرضِ، حسبَ تأثيرِ دوبلر. وبذلكَ؛ افترضَ العلماءُ أنَّ مجراتِ الكونِ ما زالتْ تتحركُ مبتعدةً عنْ بعضِها منذُ بدءِ الكونِ، وتُعرَفُ هذهِ الفرضيةُ بتمددِ الكونِ.

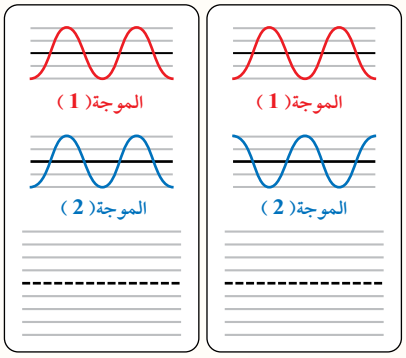
أعدُّ فيلمًا قصيرًا باستخدامِ برنامجِ صانعِ الأفلامِ (movie maker) يبيِّنُ تأثيرَ دوبلر، وأحرصُ على أنْ يشتملَ الفيلمُ على توضيحِ التغيرِ الذي يحدثُ لدرجةِ الصوتِ في حالِ كانَ مصدرُ الصوتِ يتحركُ ابتعادًا عنِ السامعِ أو اقترابًا منهُ، وكذلك في حالِ كانَ مصدرُ الصوتِ ساكنًا والمراقبُ (السامعُ) يتحركُ ابتعادًا أو اقترابًا منْ مصدرِ الصوتِ، ويشتملُ الفيلمُ على صورٍ متحركةٍ لأمثلةٍ توضيحيةٍ، ثمَّ أشاركهُ زملائي/ زميلاتي في الصفِّ.

# مراجعةُ الدرسِ

1. **الفكرةُ الرئيسةُ:** أذكرُ خصائصَ الموجاتِ التي ترتبطُ بكثيرٍ منَ الظواهرِ الطبيعيةِ.
2. أوضحُ المقصودَ بكلٍّ منْ: تراكبِ الموجاتِ واستقطابِها.
3. **أقارنُ** بينَ عمليتَيْ انعكاسِ الموجاتِ المستعرضةِ التي تنتشرُ على سطحِ الماءِ، وانكسارِها.
4. أيٌّ منَ العملياتِ الآتيةِ تحدثُ في الموجاتِ المستعرضةِ ولا تحدثُ في الموجاتِ الطوليةِ: التداخلُ، الحيودُ، الاستقطابُ؟
5. **أفسّرُ:** بينَما كنتُ أقفُ في الموقعِ (C) بالقربِ منْ تقاطعِ شارعيْنِ، كما في الشكلِ المجاورِ، سمعتُ صوتَ فرقةٍ موسيقيةٍ، العازفُ (A) يعزفُ القِربةَ التي تُصدرُ صوتًا حادًّا طولهُ الموجيُّ قصيرٌ (اللونُ الأزرقُ)، والعازفُ (B) يقرعُ الطبلَ الذي يُصدرُ صوتًا غليظًا طولهُ الموجيُّ كبيرٌ (اللونُ الأحمرُ). أيَّ الصوتيْنِ أسمعُ؟ لماذا؟




6. أبينُ أهميةَ استخدامِ السائقِ للنظاراتِ الشمسيةِ التي تعملُ على استقطابِ الضوءِ بشكلٍ رأسيٍّ؛ خاصةً عندَما يقودُ سيارتَهُ في النهارِ، ويتعرضُ إلى وهجٍ كبيرٍ ناتجٍ عنِ انعكاسِ ضوءِ الشمسِ عنِ السطوحِ الأفقيةِ.
7. **تفكيرٌ ناقدٌ:** وضعَ العلماءُ نظرياتٍ عدَّةً تصفُ تطورَ الكونِ، منْها نظريةُ الانفجارِ العظيمِ التي تفترضُ أنَّ المجراتِ ما زالتْ تتحركُ متباعدةً عنْ بعضِها بسرعةٍ كبيرةٍ. معتمدًا على معرفتي بمكوناتِ الطيفِ المرئيِّ وترددِاتِها، ومعرفتي بتأثيرِ دوبلر في الحركةِ الموجيةِ. أصفُ ما يحدثُ للضوءِ القادمِ إلى الأرضِ منْ مجرةٍ تتحركُ مبتعدةً عنِ الأرضِ.
8. أكملُ الشكلَ المجاورَ برسمِ الموجةِ الناتجةِ عنْ تراكبِ الموجتيْنِ (1,2) في كلٍّ منَ الحالتيْنِ (أ، ب)، ثمَّ أكتبُ تحتَ كلِّ حالةٍ إنْ كانَ التراكبُ بنّاءً أوْ هدّامًا.




الحالةُ (أ) الحالةُ (ب)

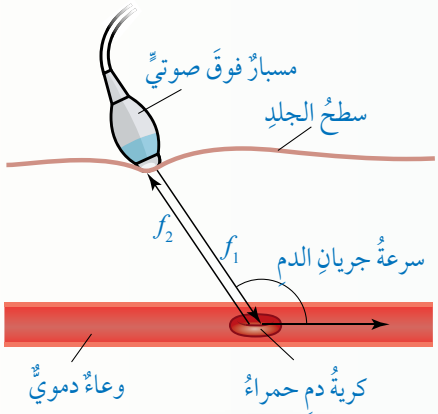
# تطبيقاتُ تأثيرِ دوبلر في الطبِّ

## Applications of Doppler Effect in Medicine

يمتازُ الطبُّ الحديثُ عنِ الماضي بقلةِ اعتمادِهِ على العملياتِ الجراحيةِ؛ فكثيرٌ منَ الحالاتِ المرضيةِ الصعبةِ أصبحتْ تعالَجُ باستخدامِ تقنياتٍ حديثةٍ، ويُعدُّ التصويرُ الصوتيُّ واحدًا منَ التقنياتِ غيرِ الجراحيةِ التي تُستخدَمُ في الطبِّ الحديثِ، وفيهِ تُستخدَمُ الموجاتُ فوقَ الصوتيةِ لتصويرِ ما في داخلِ الجسمِ. والموجاتُ فوقَ الصوتيةِ هيَ موجاتٌ صوتيةٌ يزيدُ تردُدُها على الحدِّ الأعلى لحاسةِ السمعِ عندَ الإنسانِ (20 kHz)، ولَها قدرةٌ على اختراقِ أنسجةِ الجسمِ اللينةِ (الجلدِ والعضلاتِ والدهونِ).

منْ بينِ الاستخداماتِ الطبيةِ الكثيرةِ للموجاتِ فوقَ الصوتيةِ تقنيةُ قياسِ سرعةِ الدمِ، بهدفِ تتبعِ الدورةِ الدمويةِ داخلَ أنسجةِ الجسمِ المختلفةِ، للبحثِ عنِ الانسدادِ والتضيُّقِ في الأوعيةِ الدمويةِ. حيثُ يتدفقُ الدمُ في الأوردةِ بسرعةٍ متوسطةٍ ثابتةٍ تقريبًا، بينَما تتأثرُ سرعتهُ في الشرايينِ بضرباتِ القلبِ، وتكونُ هذهِ السرعاتُ بالنسبةِ إلى الإنسانِ السليمِ معلومةً لدى الأطباءِ، وعندَما يحدثُ تغيرٌ ملحوظٌ في سرعةِ الدمِ، فإنَّ هذا يعني وجودَ تضيُّقٍ أوِ انسدادٍ جزئيٍّ في الوريدِ أوِ الشريانِ.

يبينُ الشكلُ المجاورُ طريقةَ استخدامِ الموجاتِ فوقَ الصوتيةِ لقياسِ سرعةِ الدمِ، حيثُ يُستخدمُ مسبارٌ خاصٌّ لإرسالِ موجاتٍ فوقَ صوتيةٍ تردُدُها معلومٌ ($f_1$)، ثمَّ يلتقطُ الموجةَ فوقَ الصوتيةَ المنعكسةَ بترددٍ مختلفٍ ($f_2$)، علمًا أنَّ هذهِ الموجةَ تنعكسُ عنْ كرياتِ الدمِ الحمراءِ داخلَ الوعاءِ الدمويِّ.




وسببُ تغيرِ التردِدِ هوَ تأثيرُ دوبلر نتيجةَ الحركةِ النسبيةِ بينَ كريةِ الدمِ والمسبارِ. ويعملُ جهازُ حاسوبٍ خاصٍّ بحسابِ سرعةِ الدمِ بالاعتمادِ على معرفةِ الفرقِ وتحديدِهِ بينَ ترددَيْ الموجتيْنِ، وسرعةِ الموجاتِ فوقَ الصوتيةِ داخلَ أنسجةِ الجسمِ اللينةِ التي تساوي (1500 m/s).ثمَّ يرى الطبيبُ إنْ كانتْ سرعةُ تدفقِ الدمِ في الوعاءِ الدمويِّ اعتياديةً أمْ لا.

**أبحث** في كتبِ الفيزياءِ، أوْ في شبكةِ الإنترنتِ عنْ إجاباتِ الأسئلةِ الآتيةِ:

- أيُّ الحيواناتِ تسمعُ موجاتٍ فوقَ صوتيةٍ؟ وأيُّها تسمعُ موجاتٍ تحتَ سمعيةٍ؟
- هلْ يمكنُ استخدامُ الموجاتِ فوقَ الصوتيةِ لقياسِ سرعةِ جريانِ الدمِ في الأوعيةِ الدمويةِ داخلَ الدماغِ؟ أعلّلُ إجابتي.
- عندَ استخدامِ المسبارِ فوقَ الصوتيِّ لقياسِ سرعةِ الدمِ في الأوعيةِ الدمويةِ، ولكَيْ تكونَ النتائجُ صحيحةً، فإنَّهُ يجبُ أنْ يبقى المسبارُ ملاصقًا لجلدِ الإنسانِ ولا يبتعدُ عنهُ. ما سببُ ذلكَ؟
- أحسبُ الطولَ الموجيَّ لموجاتٍ فوقَ صوتيةٍ تردُدُها (24 MHz)، عندَما تنتقلُ في الهواءِ، ثمَّ أحسبُ طولَها الموجيَّ عندَما تنتقلُ داخلَ أنسجةِ الجسمِ اللينةِ.

**1. أضعُ دائرةً حولَ رمزِ الإجابةِ الصحيحةِ لكلِّ جملةٍ ممّا يأتي:**

1. المقصودُ بالتخلخلِ في الحركةِ الموجيةِ، هوَ منطقةٌ:
   أ . منخفضةُ الضغطِ تنشأُ في الوسطِ عندَ مرورِ موجاتٍ مستعرضةٍ خلالَهُ.
   ب . مرتفعةُ الضغطِ تنشأُ في الوسطِ عندَ مرورِ موجاتٍ مستعرضةٍ خلالَهُ.
   جـ . منخفضةُ الضغطِ تنشأُ في الوسطِ عندَ مرورِ موجاتٍ طوليةٍ خلالَهُ.
   د . مرتفعةُ الضغطِ تنشأُ في الوسطِ عندَ مرورِ موجاتٍ طوليةٍ خلالَهُ.

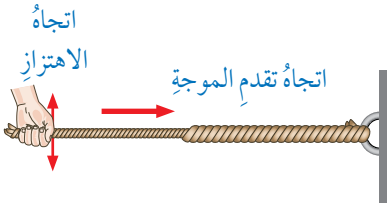
2. حركةُ جزيءِ الهواءِ عندَ مرورِ الصوتِ خلالَهُ حركةٌ:
   أ . اهتزازيةٌ باتجاهٍ يتعامدُ معَ اتجاهِ انتشارِ الموجةِ.
   ب . دائريةٌ في مستوى اتجاهِ انتشارِ الموجةِ.
   جـ . انتقاليةٌ ينتقلُ فيها باتجاهِ انتشارِ الموجةِ.
   د . اهتزازيةٌ باتجاهٍ يوازي اتجاهَ انتشارِ الموجةِ.

3. متى تزدادُ سرعةُ الصوتِ في الهواءِ؟
   أ . بزيادةِ سعةِ الموجةِ الصوتيةِ.
   ب . بزيادةِ طاقةِ مصدرِ الصوتِ.
   جـ . بانخفاضِ درجةِ حرارةِ الهواءِ.
   د . بارتفاعِ درجةِ حرارةِ الهواءِ.

4. تنتقلُ موجتانِ مستعرضتانِ في حبلٍ وتلتقيانِ عندَ نقطةٍ في لحظةٍ ما، فإنَّ الظاهرةَ التي تحدثُ هيَ:
   أ . تراكبُ الموجتيْنِ معًا، وحصولُ إزاحةٍ واحدةٍ.
   ب . تلاشٍ للموجتين، وانعدامُ الإزاحةِ.
   جـ . انعكاسُ الموجةِ الأكبرِ سعةً عن الموجةِ الأصغرِ سعةً.
   د . انعكاسُ الموجةِ الأصغرِ سعةً عن الموجةِ الأكبرِ سعةً.

5. التردُدُ الظاهريُّ لصوتِ منبهِ سيارةِ إسعافٍ متحركةٍ بسرعةٍ إلى الأمامِ، يكونُ كما يأتي:
   أ . أمامَها أصغرَ منْ ترددِ المصدرِ، وخلفَها أكبرَ منْ ترددِ المصدرِ.
   ب . أمامَها أكبرَ منْ ترددِ المصدرِ، وخلفَها أصغرَ منْ ترددِ المصدرِ.
   جـ . مساويًا لترددِ المصدرِ أمامَ السيارةِ وخلفَها.
   د . أكبرَ منْ ترددِ المصدرِ أمامَ السيارةِ وخلفَها.

**2. تفكيرٌ ناقدٌ: عندَ توصيلِ حبليْنِ مختلفيْنِ في مساحةِ المقطعِ والمتانةِ، كما يبينُ الشكلُ المجاورُ، ثمَّ إرسالِ نبضةٍ في الحبلِ الرفيعِ. أبيِّنُ ما يحدثُ لها عندَما تصلُ إلى نقطةِ التقاءِ الحبليْنِ، مفسرًا إجابتي.**



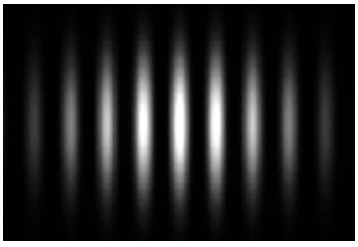
3. **أحسبُ: موجتانِ كهرمغناطيسيتانِ تنتقلانِ معًا في الهواءِ؛ الطولُ الموجيُّ للأولى ($\lambda_1 = 8.0 \times 10^{-4}$ m)، والطولُ الموجيُّ للثانيةِ ($\lambda_2 = 2.4 \times 10^{-2}$ m). أجيبُ عما يأتي:**

أ . أحسبُ ترددَ كلِّ موجةٍ، علمًا أنَّ سرعتَهُما في الهواءِ ($3.0 \times 10^8$ m/s).

ب . ما الذي يحدثُ لكلٍّ منَ: الطولِ الموجيِّ والترددِ عندَ انتقالِ الموجتيْنِ في الماءِ؟ علمًا أنَّ سرعةَ الموجاتِ الكهرمغناطيسيةِ في الماءِ أقلُّ منْها في الهواءِ.

جـ. أحددُ موقعَ كلٍّ منهُما في الطيفِ الكهرمغناطيسيِّ.

4. **وُضِعَ حاجزٌ معتمٌ فيهِ شقّانِ رفيعانِ أمامَ مصدرٍ ضوئيٍّ، ثمَّ وُضِعَتْ شاشةٌ بعدَ الحاجزِ، فظهرتْ على الشاشةِ خطوطٌ مضيئةٌ، كما في الشكلِ. أجيبُ عما يأتي:**



أ . ما اسمُ هذهِ الظاهرةِ؟

ب . ما الذي تمثلهُ الخطوطُ المضيئةُ؟

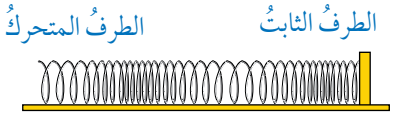
جـ . ما الذي تمثلهُ الخطوطُ المظلمةُ؟

5. **تتحركُ سيارةُ إسعافٍ بسرعةٍ نحوَ اليمينِ وهيَ تصدرُ صوتَ منبهٍ، متجهةً نحوَ فتاةٍ تقفُ في الموقعِ (A)، وتتجاوزُ عنْ شابٍّ يسيرُ في الموقعِ (B)، كما في الشكلِ.**

**أصفُ درجةَ الصوتِ الذي يسمعهُ كلٌّ منَ الفتاةِ والشابِّ وسائقِ سيارةِ الإسعافِ. أفسرُ إجابتي، ذاكرًا الخصيصةَ الموجيةَ التي اعتمدتُ عليْها في إجابتي.**

6. **أذكرُ استخدامًا تكنولوجيًّا واحدًا يعتمدُ على تأثيرِ دوبلر لكلٍّ منَ: الموجاتِ فوقَ الصوتيةِ والموجاتِ الكهرمغناطيسيةِ.**

7. **أحلِّلُ: الشكلُ المجاورُ يمثلُ موجاتٍ طوليةً تنتقلُ في نابضٍ. أبينُ على الرسمِ كلًّا منْ: اتجاهِ انتشارِ الموجاتِ، اتجاهِ إزاحةِ حلقاتِ النابضِ، الطولِ الموجيِّ، اتجاهِ انتقالِ الطاقةِ.**



## مسردُ المصطلحاتِ

- **استقطابٌ (Polarization):** عمليةُ انتقاءِ موجةٍ مستعرضةٍ تُحدثُ اهتزازًا في جسيماتِ الوسطِ في بُعدٍ واحدٍ فقطْ منْ بينِ حزمةِ موجاتٍ يكونُ الاهتزازُ فيها باتجاهاتٍ عدَّةٍ، جميعُها متعامدةٌ معَ اتجاهِ انتشارِ الموجاتِ.
- **انعكاسُ الموجةِ (Wave Reflection):** عمليةُ سقوطِ الموجةِ على جسمٍ أوْ حاجزٍ ثمَّ ارتدادِها عنهُ باتجاهٍ مختلفٍ.
- **انكسارُ الموجةِ (Wave Refraction):** انحرافُ اتجاهِ انتشارِ الموجاتِ عندَ اجتيازِها الحدَّ الفاصلَ بينَ وسطيْنِ مختلفيْنِ في خصائصِهما.
- **تأثيرُ دوبلر (Doppler Effect):** التغيرُ الظاهريُّ في ترددِ الموجةِ نتيجةَ وجودِ حركةٍ نسبيةٍ بينَ مصدرِ الصوتِ والسامعِ.
- **تداخلٌ (Interference):** عمليةُ التقاءِ مساريْنِ منَ الحركةِ الموجيةِ؛ بحيثُ ينتجُ عنِ التقاءِ القممِ والقيعانِ نمطٌ محددٌ.
- **ترددٌ (Frequency):** عددُ الموجاتِ الكاملةِ التي تعبرُ نقطةً ثابتةً في الوسطِ خلالَ ثانيةٍ واحدةٍ.
- **جريانٌ منتظمٌ (Steady Flow):** جريانُ المائعِ الذي تكونُ سرعةُ جزيئاتِهِ عندَ نقطةٍ معينةٍ فيهِ ثابتةً لا تتغيرُ معَ الزمنِ، ولكنَّها يمكنُ أنْ تتغيرَ منْ نقطةٍ إلى أخرى.
- **حوضُ موجاتٍ (Ripple Tank):** حوضٌ شفافٌ توضعُ فيهِ كميةٌ منَ الماءِ، ويُجهَّزُ بمحركٍ كهربائيٍّ مهتزٍّ وملحقاتٍ أخرى لتوليدِ الموجاتِ ودراسةِ حركتِها.
- **حيودٌ (Diffraction):** ظاهرةُ انعطافِ الموجاتِ عنِ اتجاهِها عندَ نفاذِها خلالَ الفتحاتِ الضيقةِ أوْ قريبًا منْ حوافِّ الحواجزِ.
- **خطُّ الجريانِ (Flow Line):** خطٌّ وهميٌّ يمثلُ مسارَ جزيئاتِ المائعِ عندَ جريانِها.
- **زمنٌ دوريٌّ (Period):** المدةُ الزمنيةُ اللازمةُ لعبورِ موجةٍ كاملةٍ واحدةٍ نقطةً ثابتةً في الوسطِ.
- **سرعةُ الموجةِ (Speed of a Wave):** ناتجُ قسمةِ المسافةِ ($S$) التي تقطعُها الموجةُ على الزمنِ الكليِّ ($t$) اللازمِ لقطعِ تلكَ المسافةِ.
- **سعةُ الموجةِ (Wave Amplitude):** أقصى إزاحةٍ تُحدثُها الموجةُ لجسيماتِ الوسطِ الناقلِ بالنسبةِ إلى موقعِ اتزانِها.
- **شدةُ الموجةِ (Wave Intensity):** الطاقةُ التي تنقلُها الموجةُ لكُلِّ وَحدةِ مساحةٍ في الثانيةِ الواحدةِ، وتُقاسُ بوَحدةِ ($W/m^2$) حسبَ النظامِ الدوليِّ للوَحداتِ.
- **ضغطُ المائعِ (Fluid Pressure):** القوةُ العموديةُ التي يؤثرُ بها المائعُ لكلِّ وحدةِ مساحةٍ.
- **طولٌ موجيٌّ (Wavelength):** المسافةُ بينَ قمتيْنِ متتاليتيْنِ، أوْ المسافةُ بينَ قاعيْنِ متتاليينِ، ويُرمَزُ إليهِ بالحرفِ اليونانيِّ ($\lambda$ - لامدا).

- **عتبةُ السمعِ (Threshold of Hearing):** مستوى الصوتِ (0 dB)، وهوَ أدنى مستوى صوتٍ يمكنُ للإنسانِ سماعهُ.
- **غيرُ دوّاميٍ (Irrotational):** جريانُ المائعِ الذي لا تدورُ جسيماته حولَ مركزِ دورانٍ.
- **غيرُ قابلٍ للانضغاطِ (Incompressible):** المائعُ الذي تبقى كثافتهُ ثابتةً؛ عندَ تأثيرِ قوةٍ فيهِ.
- **قاعدةُ أرخميدس (Archimedes' Principle):** قوةُ الطفوِ المؤثرةُ في الجسمِ المغمورِ كليًّا أوْ جزئيًّا في مائعٍ تساوي وزنَ المائعِ المزاحِ.
- **قانونُ الجذبِ العامُّ لنيوتن (Newton's Law of Universal Gravitation):** ينصُّ على أنَّ: "كلَّ جسميْنِ في الكونِ يتجاذبانِ بقوةٍ يتناسبُ مقدارُها طرديًّا معَ حاصلِ ضربِ كتلتيْهما وعكسيًّا معَ مربعِ المسافةِ بينَ مركزيْهما"، وتؤثرُ هذهِ القوةُ في اتجاهِ الخطِّ الواصلِ بينَ مركزَيِ الجسميْنِ المتجاذبيْنِ.
- **قوةُ احتكاكٍ (Friction Force):** قوةُ تلامسٍ تُعيقُ حركةَ الأجسامِ الصلبةِ المتلامسةِ بعضِها فوقَ بعضٍ وتمانعُ حركتَها، وتؤثرُ بشكلٍ موازٍ لسطحيِ التلامسِ بينَ الجسميْنِ. وتنشأُ هذهِ القوةُ بينَ سطحَيِ الجسميْنِ المتلامسيْنِ عندَ تحريكِ بعضِهما فوقَ بعضٍ، أوْ محاولةِ ذلكَ.
- **قوةُ الاحتكاكِ السكونيِّ (Static Frictional Force):** قوةٌ تؤثرُ في سطحَيْ جسميْنِ متلامسيْنِ عندَ محاولةِ تحريكِ أحدِهما بالنسبةِ إلى الآخرِ، رمزُها ($f_s$).
- **قوةُ الاحتكاكِ الحركيُّ (Kinetic Frictional Force):** قوةٌ تؤثرُ في سطحَيْ جسميْنِ متلامسيْنِ عندَما يتحركُ بعضُها فوقَ بعضٍ، رمزُها ($f_k$).
- **قوةُ الطفوِ (Buoyant Force):** محصلةُ القوى التي يؤثرُ بِها المائعُ في الجسمِ المغمورِ فيهِ كليًّا أوْ جزئيًّا وتكونُ رأسيًّا لأعلى.
- **قوةُ شدٍّ (Tension Force):** قوةُ سحبٍ تؤثرُ في جسمٍ منْ خلالِ سلكٍ أوْ خيطٍ أوْ حبلٍ، رمزُها ($F_T$)، وتؤثرُ في اتجاهِ طولِ الخيطِ أوِ الحبلِ أوِ السلكِ.
- **قوةٌ عموديةٌ (Normal Force):** قوةُ تلامسٍ يؤثرُ بِها جسمٌ في جسمٍ آخرَ ملامسٍ لهُ، رمزُها ($F_N$)، وتكونُ دائمًا عموديةً على مستوى التلامسِ بينَ الجسميْنِ.
- **قوةٌ مركزيةٌ (Centripetal Force):** القوةُ المحصلةُ التي تؤثرُ في جسمٍ يتحركُ حركةً دائريةً منتظمةً وتكونُ نحوَ مركزِ مسارهِ الدائريِّ، رمزُها ($F_C$)، وتسبِّبُ تغيرًا في اتجاهِ السرعةِ معَ بقاءِ مقدارِها ثابتًا.
- **كتلةٌ (Mass):** مقدارُ المادةِ الموجودةِ في جسمٍ ما، وهيَ كميةٌ قياسيةٌ، رمزُها ($m$)، وتُقاسُ بوحدةِ (kg) بحسبِ النظامِ الدوليِّ للوحداتِ.
- **مائعٌ غيرُ لزجٍ (Nonviscous Fluid):** المائعُ الذي لا يوجدُ قوى احتكاكٍ بينَ طبقاتهِ أثناءَ جريانهِ.
- **مائعٌ مثاليٌّ (Ideal Fluid):** المائعُ الذي يتصفُ بالخصائصِ الأربعِ الآتيةِ: جريانهُ منتظمٌ، وغيرُ قابلٍ للانضغاطِ، وغيرُ لزجٍ، وغيرُ دوّاميٍّ.

- **مبدأُ تراكبِ الموجاتِ (Principle of Superposition of Waves):** الإزاحةُ الكليةُ التي تحدثُ لجسيمات الوسطِ تساوي ناتجَ الجمعِ المتجهيِّ للإزاحاتِ الناتجةِ عنِ التقاءِ الموجاتِ عندَ النقطةِ نفسِها.
- **مستوى الصوتِ (Loudness of Sound):** مدى علوِّ الصوتِ أوِ انخفاضِهِ، ويتناسبُ معَ مقدارِ الطاقةِ التي تحملُها موجاتُ الصوتِ، ويُقاسُ بوحدةِ ديسيبل (dB).
- **معادلةُ الاستمراريةِ (Continuity Equation):** حاصلُ ضربِ مساحةِ المقطعِ العرضيِّ لأنبوبِ جريانِ المائعِ في سرعةِ المائعِ عندَ ذلكَ المقطعِ يساوي مقدارًا ثابتًا.
- **معادلةُ برنولي (Bernoulli's Equation):** مجموعُ الضغطِ والطاقةِ الميكانيكيةِ لوحدةِ الحجومِ يساوي مقدارًا ثابتًا. (الطاقةُ الميكانيكيةُ هيَ مجموعُ طاقتي الوضعِ والحركةِ)
- **معاملُ الاحتكاكِ الحركيِّ (Coefficient of Kinetic Friction):** يساوي نسبةَ مقدارِ قوةِ الاحتكاكِ الحركيِّ إلى مقدارِ القوةِ العموديةِ، رمزهُ ($\mu_k$)، وهوَ يعتمدُ على طبيعةِ السطحيْنِ المتلامسيْنِ، وبما أنَّهُ نسبةُ قوًى فليسَ لهُ وحدةُ قياسٍ.
- **معاملُ الاحتكاكِ السكونيِّ (Coefficient of Static Friction):** يساوي نسبةَ مقدارِ قوةِ الاحتكاكِ السكونيِّ العظمى إلى مقدارِ القوةِ العموديةِ، رمزهُ ($\mu_s$)، ويعتمدُ على طبيعةِ السطحيْنِ المتلامسيْنِ، وبما أنَّهُ نسبةُ قوًى فليسَ لهُ وحدةُ قياسٍ.
- **معدلُ التدفقِ الحجمي (Volume Flow Rate):** حجمُ المائعِ الذي يعبرُ مساحةَ مقطعٍ معينٍ منَ الأنبوبِ في وحدةِ الزمنِ.
- **مقياسُ فنتوري (Venturi Meter):** جهازٌ يُستخدَمُ لقياسِ سرعةِ تدفقِ الموائعِ في الأنابيبِ بتطبيقِ معادلةِ برنولي.
- **مقياسُ كثافةِ السوائلِ (Hydrometer):** أداةٌ تُستخدَمُ لقياسِ كثافةِ السائلِ بالاعتمادِ على قاعدةِ أرخميدس.
- **موائعُ (Fluids):** الموادُّ التي تتصفُ بخاصيتَيْ القدرةِ على الجريانِ وتغييرِ شكلِها، وتشملُ السوائلَ والغازاتِ.
- **موجةٌ (Wave):** اضطرابٌ أوِ اهتزازٌ ينتقلُ منْ مكانٍ إلى آخرَ، وتُعدُّ الموجةُ وسيلةً لنقلِ الطاقةِ.
- **موجةٌ طوليةٌ (Longitudinal Wave):** الموجةُ التي يكونُ فيها اتجاهُ اهتزازِ جسيماتِ الوسطِ الناقلِ لَها باتجاهِ انتشارِ الموجةِ نفسِها.
- **موجةٌ مستعرضةٌ (Transverse Wave):** الموجةُ التي يكونُ اتجاهُ اهتزازِ جسيماتِ الوسطِ الناقلِ لَها متعامدًا معَ اتجاهِ انتشارِها.
- **وزنٌ (Weight):** قوةُ جذبِ الأرضِ للجسمِ، رمزهُ ($F_g$)، ويُقاسُ بوحدةِ نيوتن newton بحسبِ النظامِ الدوليِّ للوحداتِ، وهوَ كميةٌ متجهةٌ، حيثُ يكونُ اتجاهُ وزنِ أيِّ جسمٍ على سطحِ الأرضِ دائمًا رأسيًّا إلى أسفلَ نحوَ مركزِها.

# جدولُ الاقتراناتِ المثلثيةِ

| الزاوية | الجيب | جيب التمام | الظل |
|---|---|---|---|
| صفر | 0.0000 | 1.000 | 0.000 |
| 1 | 0.018 | 1.000 | 0.018 |
| 2 | 0.035 | 0.999 | 0.035 |
| 3 | 0.052 | 0.999 | 0.052 |
| 4 | 0.070 | 0.998 | 0.070 |
| 5 | 0.087 | 0.996 | 0.088 |
| 6 | 0.105 | 0.995 | 0.105 |
| 7 | 0.122 | 0.993 | 0.123 |
| 8 | 0.139 | 0.990 | 0.141 |
| 9 | 0.156 | 0.989 | 0.158 |
| 10 | 0.174 | 0.985 | 0.176 |
| 11 | 0.191 | 0.982 | 0.194 |
| 12 | 0.208 | 0.978 | 0.213 |
| 13 | 0.225 | 0.974 | 0.231 |
| 14 | 0.242 | 0.970 | 0.249 |
| 15 | 0.259 | 0.966 | 0.268 |
| 16 | 0.276 | 0.961 | 0.287 |
| 17 | 0.292 | 0.956 | 0.306 |
| 18 | 0.309 | 0.951 | 0.325 |
| 19 | 0.326 | 0.946 | 0.344 |
| 20 | 0.342 | 0.940 | 0.364 |
| 21 | 0.358 | 0.934 | 0.384 |
| 22 | 0.375 | 0.927 | 0.404 |
| 23 | 0.391 | 0.921 | 0.425 |
| 24 | 0.407 | 0.914 | 0.445 |
| 25 | 0.423 | 0.906 | 0.466 |
| 26 | 0.438 | 0.899 | 0.488 |
| 27 | 0.454 | 0.891 | 0.510 |
| 28 | 0.470 | 0.883 | 0.531 |
| 29 | 0.485 | 0.875 | 0.554 |
| 30 | 0.500 | 0.866 | 0.577 |
| 31 | 0.515 | 0.857 | 0.604 |
| 32 | 0.530 | 0.848 | 0.625 |
| 33 | 0.545 | 0.839 | 0.650 |
| 34 | 0.559 | 0.829 | 0.675 |
| 35 | 0.574 | 0.819 | 0.700 |
| 36 | 0.588 | 0.809 | 0.727 |
| 37 | 0.602 | 0.799 | 0.754 |
| 38 | 0.616 | 0.788 | 0.781 |
| 39 | 0.629 | 0.777 | 0.810 |
| 40 | 0.643 | 0.766 | 0.839 |
| 41 | 0.656 | 0.755 | 0.869 |
| 42 | 0.669 | 0.734 | 0.900 |
| 43 | 0.682 | 0.731 | 0.932 |
| 44 | 0.695 | 0.719 | 0.966 |
| 45 | 0.707 | 0.707 | 1.000 |

| الزاوية | الجيب | جيب التمام | الظل |
|---|---|---|---|
| 46 | 0.719 | 0.695 | 1.036 |
| 47 | 0.731 | 0.682 | 1.072 |
| 48 | 0.743 | 0.669 | 1.110 |
| 49 | 0.756 | 0.656 | 1.150 |
| 50 | 0.766 | 0.643 | 1.192 |
| 51 | 0.777 | 0.629 | 1.235 |
| 52 | 0.788 | 0.616 | 1.280 |
| 53 | 0.799 | 0.602 | 1.327 |
| 54 | 0.809 | 0.588 | 1.376 |
| 55 | 0.819 | 0.574 | 1.428 |
| 56 | 0.829 | 0.559 | 1.483 |
| 57 | 0.839 | 0.545 | 1.540 |
| 58 | 0.848 | 0.530 | 1.600 |
| 59 | 0.857 | 0.515 | 1.664 |
| 60 | 0.866 | 0.500 | 1.732 |
| 61 | 0.875 | 0.485 | 1.804 |
| 62 | 0.883 | 0.470 | 1.880 |
| 63 | 0.891 | 0.454 | 1.963 |
| 64 | 0.899 | 0.438 | 2.050 |
| 65 | 0.906 | 0.423 | 2.145 |
| 66 | 0.914 | 0.407 | 2.246 |
| 67 | 0.921 | 0.391 | 2.356 |
| 68 | 0.927 | 0.375 | 2.475 |
| 69 | 0.935 | 0.384 | 2.605 |
| 70 | 0.940 | 0.342 | 2.748 |
| 71 | 0.946 | 0.326 | 2.904 |
| 72 | 0.951 | 0.309 | 3.078 |
| 73 | 0.956 | 0.292 | 3.271 |
| 74 | 0.961 | 0.276 | 3.487 |
| 75 | 0.966 | 0.259 | 3.732 |
| 76 | 0.970 | 0.242 | 4.011 |
| 77 | 0.974 | 0.225 | 4.331 |
| 78 | 0.978 | 0.208 | 4.705 |
| 79 | 0.982 | 0.191 | 5.145 |
| 80 | 0.985 | 0.174 | 5.671 |
| 81 | 0.988 | 0.156 | 6.314 |
| 82 | 0.990 | 0.139 | 7.115 |
| 83 | 0.993 | 0.122 | 8.144 |
| 84 | 0.995 | 0.105 | 9.514 |
| 85 | 0.996 | 0.087 | 11.43 |
| 86 | 0.998 | 0.070 | 14.30 |
| 87 | 0.998 | 0.052 | 19.08 |
| 88 | 0.999 | 0.035 | 28.64 |
| 89 | 1.000 | 0.018 | 57.29 |
| 90 | 1.000 | 0.000 | ∞ |

# قائمةُ المراجعِ


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**, HarperCollinsPublishers 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. Edition, 2013.
14. Tom Duncan, **Advanced Physics**, Hodder Murray; 5th edition, 2000.

Collins