المملكة الأردنية الهاشمية
وزارة التربية والتعليم

المركز الوطني لتطوير المناهج
National Center
for Curriculum Development

الفيزياء

الصف العاشر - كتاب الطالب

الفصل الدراسي الأول

10

فريق التأليف

موسى عطا الله الطراونة (رئيسًا)

أ.د. محمود إسماعيل الجاغوب
خلدون سليمان المصاروه

موسى محمود جرادات
يحيى أحمد طواها

روناهي محمد صالح الكردي (منسقًا)

الناشر: المركز الوطني لتطوير المناهج

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

06-4617304 / 8-5 06-4637569 P.O.Box: 1930 Amman 1118

@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 لتطويـر المناهـج في جلسـته رقـم (2020/3)، تاريـخ 2020/6/2 م، وقرار مجلس التربيـة والتعليم رقـم (2020/43) تاريـخ 2020/6/18 م بـدءًا من العـام الـدراسي 2020 / 2021 م.

© Harper Collins Publishers Limited 2020.

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

ISBN: 978 - 9923 - 41 - 046 - 2

المملكة الأردنية الهاشمية
رقم الإيداع لدى دائرة المكتبة الوطنية
(2020/8/2974)

373,19

الأردن. المركز الوطني لتطوير المناهج

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

ج1(110) ص.

ر.إ.: 2020/8/2974

الواصفات: / الفيزياء/ / العلوم الطبيعية/ / التعليم الإعدادي/ / المناهج/

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

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

British Library Cataloguing -in- Publication Data
A catalogue record for this publication is available from the Library.

الطبعة الأولى (التجريبية) 1441 هـ – 2020 م

أعيدت الطباعة 1442 هـ – 2021 م

قائمةُ المحتوياتِ

الموضوعُ	الصفحـةُ
المقدمةُ	5
الوحدةُ الأولى: المُتَّجِهاتُ	**7**
تجربةٌ استهلاليةٌ: ناتجُ جمعِ قُوَّتيْنِ عمليًّا	9
الدرسُ الأولُ: الكمياتُ القياسيةُ والكمياتُ المُتَّجِهةُ	10
الدرسُ الثاني: جمعُ المُتَّجِهاتِ وطرحُها	22
الوحدةُ الثانيةُ: الحركةُ	**39**
تجربةٌ استهلاليةٌ: وصفُ الحركةِ باستخدامِ المَدْرجِ الهوائيِّ	41
الدرسُ الأولُ: الحركةُ في بُعْدٍ واحدٍ	42
الدرسُ الثاني: الحركةُ في بُعْديْنِ	64
الوحدةُ الثالثةُ: القوى	**79**
تجربةٌ استهلاليةٌ: القصورُ الذاتيُّ	81
الدرسُ الأولُ: القانونُ الأولُ في الحركةِ لنيوتن	82
الدرسُ الثاني: القانونُ الثاني والقانونُ الثالثُ في الحركةِ لنيوتن	90
مسردُ المصطلحاتِ	107
قائمةُ المراجعِ	110

بسم الله الرحمن الرحيم

المقدمة

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.

وقد روعِيَ في تأليفه 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.

ويتألَّف الكتاب من ثلاث وحدات دراسية، هي: المتَّجِهات، والحركة، والقوى. وقد أُلحق به كتابٌ للأنشطة والتجارب العملية، يحتوي على جميع التجارب والأنشطة الواردة في كتاب الطالب؛ ليساعده على تنفيذها بسهولة، بإشراف المعلِّم، ومشاركة زملائه فيها، بما في ذلك رصد القراءات، وتحليلها، ثم مناقشتها، وصولًا إلى استنتاجات مبنية على أسس علمية سلمية. وتضمَّنَ أيضًا أسئلة تحاكي أسئلة الاختبارات الدولية؛ بُغْيَةَ تعزيز فهم الطالب لموضوعات المادة، وتنمية التفكير الناقد لديه.

ونحن إذ نُقدّمُ هذه الطبعةَ منَ الكتاب، فإنّا نأمَلُ أن يُسهِمَ في تحقيق الأهداف والغايات النهائيّة المنشودة لبناء شخصيّة المتعلّم، وتنمية اتجاهات حُبّ التعلُّم ومهارات التعلُّم المستمرّ، فضلًا عن تحسين الكتاب بإضافة الجديد إلى محتواهُ، وإثراءِ أنشطته المتنوّعة، والأخذِ بملاحظات المعلّمين.

والله ولي التوفيق

المركز الوطني لتطوير المناهج

الوحدةُ 1

المُتَّجِهاتُ
Vectors

أتأمَّلُ الصورةَ

يكونُ اتجاهُ حركةِ الطائراتِ في أثناءِ هبوطِها في الأحوالِ الاعتياديةِ موازيًّا لمَدْرجِ المطار، وأحيانًا يواجهُ الطيارُ صعوباتٍ في أثناءِ عمليةِ الهبوط في الأجواءِ العاصفةِ عندما يكونُ اتجاهُ الرياح عموديًّا على اتجاهِ المَدْرجِ، فيلجأ حينئذٍ إلى توجيهِ مُقدِّمةِ الطائرةِ على نحوٍ منحرفٍ عن اتجاهِ المَدْرجِ بعكسِ اتجاهِ هذهِ الرياحِ، كما هوَ مُبيَّنٌ في الصورةِ. وهذا ما حدثَ معَ طيارٍ أردنيٍّ؛ إذْ تمكَّنَ منَ الهبوطِ بأمانٍ على الرغمِ منَ العاصفةِ القويةِ التي ضربَتْ مطارَ هيثرو في لندنَ عامَ 2020 م، علمًا أنَّهُ تعذَّرَ على عشرينَ طائرةً الهبوطُ وقتئذٍ.

فما الهدفُ منْ توجيهِ الطيارِ مُقدِّمةَ الطائرةِ نحوَ الاتجاهِ المُبيَّنِ في الشكلِ؟ وما أثرُ ذلكَ في السلامةِ العامةِ؟

الفكرةُ العامةُ:

الكمياتُ الفيزيائيةُ عديدةٌ ومتنوعةٌ؛ فبعضُها كمياتٌ مُتَّجِهةٌ تتطلَّبُ تحديدَ المقدارِ والاتجاهِ للتعبيرِ عنْها على نـحوٍ كامـلٍ صحيحٍ، وبعضُها الآخرُ كميـاتٌ قياسيـةٌ تُحـدَّدُ بالمقـدارِ فقطْ وليسَ لها اتجاهٌ، ويختلفُ التعاملُ معَ الكمياتِ المُتَّجِهـةِ، وإجـراءَ العمليـاتِ الحسابيـةِ عليْها اختلافًا كبيرًا عنِ الكمياتِ القياسيةِ.

الدرسُ الأولُ: الكمياتُ القياسيةُ والكمياتُ المُتَّجِهةُ

Scalar and Vector Quantities

الفكرةُ الرئيسةُ: للكميـاتِ المُتَّجِهةِ خصائصُ تمتازُ بها عنِ الكمياتِ القياسيةِ.

الدرسُ الثاني: جمعُ المُتَّجِهاتِ وطرحُها

Addition and Subtraction of Vectors

الفكرةُ الرئيسةُ: جمعُ الكمياتِ المُتَّجِهةِ أوْ طرحُها يـكونُ إمّـا بيانيًّا، وإمّا رياضيًّا عنْ طريقِ تحليـلِ الكمياتِ المُتَّجِهةِ إلى مُركَّباتِها.

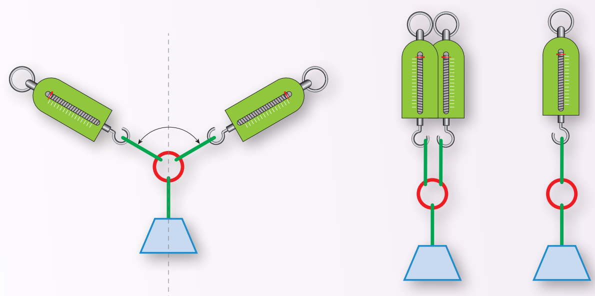
تجربةٌ استهلاليةٌ

ناتجُ جمعِ قُوّتيْنِ عمليًا

ادَّعَتْ هيا أنَّ مجموعَ قُوَّتيْنِ مقدارُ كلٍّ منْهُما 5 N تُؤثِّرانِ في جسمٍ، هوَ **$5\ N + 5\ N = 5\ N$**، في حينِ ادَّعى يَمانٌ أنَّ مجموعَ القُوَّتيْنِ **$5\ N + 5\ N = 10\ N$**. أيَّهُما تُؤيِّدُ؟

الموادُّ والأدواتُ: ثِقْلٌ كتلتُهُ 500g، ميزانانِ نابضيّانِ، ثلاثةُ خيوطٍ متساويةٍ في الطولِ، حلقةٌ مُهمَلةُ الوزنِ تقريبًا.

إرشاداتُ السلامةِ: الحذرُ منْ سقوطِ الأجسامِ والأدواتِ على القدمينِ.



خطواتُ العملِ:

بالتعاونِ معَ أفرادِ مجموعتي، أُنفِّذُ الخطواتِ الآتيةَ:

1. **أقيسُ:** أُعلِّقُ الثِّقْلَ بالميزانِ الأولِ، كما في الشكلِ (أ)، ثمَّ أُدَوِّنُ القراءةَ.
2. **أقيسُ:** أُعلِّقُ الميزانَ الثانيَ بالحلقةِ، إضافةً إلى الميزانِ الأولِ، كما في الشكلِ (ب)، ثمَّ أُدَوِّنُ قراءةَ كلٍّ منَ الميزانيْنِ.
3. **أقيسُ:** أُزيحُ كلًّا منَ الميزانيْنِ في الشكلِ (ب): أحدَهما إلى اليمينِ، والآخرَ إلى اليسارِ، كما في الشكلِ (جـ)، حتّى تصبحَ قراءةُ كلِّ ميزانٍ مساويةً لقراءةِ الميزانِ في الشكلِ (أ)، ثمَّ أُدَوِّنُ قراءتَيْهما في الجدولِ.

التحليلُ والاستنتاجُ:

1. ماذا تُمثِّلُ قراءةُ الميزانِ الأولِ في الحالةِ (أ)؟
2. كيفَ تغيَّرَتْ قراءةُ كلٍّ منَ الميزانيْنِ في الحالتيْنِ (ب) و (جـ)؟
3. **أُقارِنُ** مجموعَ قراءةِ الموازينِ في الحالةِ (ب) والحالةِ (جـ) بوزنِ الثِّقْلِ.
4. **أُقوِّمُ:** أُحدِّدُ أيَّهُما أُؤيِّدُ: ادِّعاءَ هيا أمِ ادِّعاءَ يَمانٍ، ماذا أستنتجُ؟

◀ الفكرةُ الرئيسةُ:

للكمياتِ المُتَّجِهةِ خصائصُ تمتازُ بها عنِ الكمياتِ القياسيةِ.

◀ نتاجاتُ التعلُّمِ:

- أُوضِّحُ المقصودَ بالكمياتِ الفيزيائيةِ: المُتَّجِهةِ، والقياسيةِ.
- أستنتجُ خصائصَ المُتَّجِهاتِ بطرائقَ مختلفةٍ.
- أحسُبُ الزاويةَ المحصورةَ بينَ مُتَّجِهيْنِ باستخدامِ تعريفِ الضربِ القياسيِّ لمُتَّجِهيْنِ.
- أُطبِّقُ خصائصَ المُتَّجِهاتِ على كمياتٍ فيزيائيةٍ مُتَّجِهةٍ.

◀ المفاهيمُ والمصطلحاتُ:

الكمياتُ المُتَّجِهةُ Vector Quantities.

الكمياتُ القياسيةُ Scalar Quantities.

تمثيلُ المُتَّجِهاتِ Representation of Vectors.

تساوي مُتَّجِهيْنِ Equality of two Vectors.

سالبُ المُتَّجِهِ Negative of a Vector.

الضربُ القياسيُّ Scalar Product.

الضربُ المُتَّجِهيُّ Vector Product.

الكمياتُ الفيزيائيةُ
Physical Quantities

نتعاملُ في حياتِنا معَ كمياتٍ فيزيائيةٍ عديدةٍ؛ سواءٌ أكانَتْ كمياتٍ أساسيةً (مثلُ: الزمنِ، ودرجةِ الحرارةِ، والكتلةِ، والطولِ)، أوْ كمياتٍ مشتقةً (مثلُ: القُوَّةِ، والسرعةِ، والتسارُعِ)، ويُعبَّرُ عنْ بعضِ تلكَ الكمياتِ بعددٍ ووحدةٍ مناسبيْنِ، فنقولُ مثلًا إنَّ كتلةَ الحقيبةِ 6 kg، وسرعةَ الطائرةِ 200 m/s. ولكنْ، هلْ كانَ وصْفُ كلٍّ منَ الكميتيْنِ كافيًا؟

يُوضِّحُ الشكلُ (1) حالةَ الطقسِ المتوقعةَ في العاصمةِ عمّانَ بحسبِ تنبؤاتِ دائرةِ الأرصادِ الجويةِ الأردنيةِ. ما الكمياتُ الفيزيائيةُ التي ظهرَتْ في النشرةِ الجويةِ؟ هلِ اختلفَ وصفُ كلٍّ منْها عنْ غيرِهِ؟

يُلاحَظُ وجودُ كمياتٍ فيزيائيةٍ يكفي تحديدُ مقدارِها فقطْ لوصفِها وصفًا كاملًا، وأُخرى يَلزمُ تحديدُ مقدارِها واتجاهِها معًا.

الشكلُ (1): حالةُ الطقسِ في العاصمةِ عمّانَ. ◀

بوجهٍ عامٍّ، تُقسَّمُ الكمياتُ الفيزيائيةُ إلى قسميْنِ رئيسيْنِ، هما:

أ . الكمياتُ القياسيةُ Scalar Quantities

هيَ الكمياتُ التي تُحدَّدُ فقطْ بالمقدارِ، ولا يوجدُ لها اتجاهٌ. ففي الشكلِ (1)، يُكتفى بالقولِ إنَّ درجةَ حرارةِ الجوِّ 9 °C نهارًا. وحينَ يسألُني أحدُ زملائي في الصفِّ عنْ مقدارِ كتلتي، فإنَّني أُجيبُهُ مثلًا: 50 kg. ومنَ الأمثلةِ الأُخرى على **الكمياتِ القياسيةِ (Scalar quantities)**: الحجمُ، والطاقةُ، والضغطُ.

ب. الكمياتُ المُتَّجِهةُ Vector Quantities

هيَ الكمياتُ التي تُحدَّدُ بالمقدارِ والاتجاهِ معًا. ففي ما يخصُّ سرعةَ الرياحِ مثلًا في الشكلِ (1)، لا يُكتفى بالقولِ إنَّ مقدارَها 24 km/h نهارًا، وإنَّما يجبُ تحديدُ اتجاهِها نحوَ الشرقِ لكيْ يصبحَ وصفُها كاملًا. وكذلكَ لاعبُ كرةِ القدمِ؛ فهوَ يَركُلُ الكرةَ بقدمِهِ لتنطلقَ بسرعةٍ كبيرةٍ وفي اتجاهٍ مُحدَّدٍ لكيْ يُسجِّلَ هدفًا في المرمى. ومنَ الأمثلةِ الأُخرى على **الكمياتِ المُتَّجِهةِ (Vector quantities)**: الإزاحةُ، والتسارُعُ، والقُوَّةُ.

المثالُ 1

أُصنِّفُ الكمياتِ الفيزيائيةَ في الجدولِ (1) الآتي إلى كمياتٍ مُتَّجِهةٍ، وأُخرى قياسيةٍ:

الجدولُ (1)	تصنيفُ الكمياتِ الفيزيائيةِ
الكميةُ الفيزيائيةُ	كميةٌ مُتَّجِهةٌ/ كميةٌ قياسيةٌ
الكتلةُ (4 kg)	
التسارُعُ ($20\,m/s^2$، غربًا)	
الشغلُ (200 J)	
القُوَّةُ (120 N، شمالًا)	

الحلُّ:

- الكتلةُ: كميةٌ قياسيةٌ؛ لأنَّها حُدِّدَتْ فقط بمقدارٍ.
- التسارُعُ: كميةٌ مُتَّجِهةٌ؛ لأنَّها حُدِّدَتْ بمقدارٍ واتجاهٍ.
- الشغلُ: كميةٌ قياسيةٌ؛ لأنَّها حُدِّدَتْ فقط بمقدارٍ.
- القُوَّةُ: كميةٌ مُتَّجِهةٌ؛ لأنَّها حُدِّدَتْ بمقدارٍ واتجاهٍ.

توجدُ طرائقُ عِدَّةٌ لتمييزِ الكميةِ المُتَّجهةِ منَ الكميةِ القياسيةِ، منْها:

- وَضْعُ سَهْمٍ فوقَ رمزِ الكميةِ المُتَّجِهةِ، مثل: $\vec{F}$ لتمييزِ مُتَّجِهِ القُوَّةِ. ويُعبَّرُ عنْ مقدارِ المُتَّجِهِ على النحوِ الآتي: $|\vec{F}|$ أوْ F ، وسيستخدمُ الطلبةُ هذهِ الطريقةَ في دفاترِهِمْ، وكذلكَ على اللوحِ.
- كتابةُ رمزِ الكميةِ المُتَّجِهةِ بالخطِّ الغامقِ (Bold)، مثلِ $\boldsymbol{F}$ لتمييزِ مُتَّجِهِ القُوَّةِ، وبالخطِّ العاديِّ للدلالةِ على مقدارِ المُتَّجِهِ، مثلِ F، وسنستخدمُ هذهِ الطريقةَ في كتابِنا هذا.

أتحقَّقُ: أُقارِنُ بينَ الكمياتِ المُتَّجِهةِ والكمياتِ القياسيةِ.

المثالُ 2

أُجيبُ بـ (نعمْ) أوْ (لا)، مُعزِّزًا إجابتي بمثالٍ على كلٍّ ممّا يأتي:

- تشيرُ الإشارةُ السالبةُ أوِ الإشارةُ الموجبةُ إلى اتجاهِ الكميةِ المُتَّجِهةِ . هلْ يُمكِنُ أنْ تكونَ الكميةُ القياسيةُ سالبةً؟
- قدْ يكونُ للكميةِ المُتَّجِهةِ والكميةِ القياسيةِ الوحدةُ نفسُها.
- قدْ تتساوى كميتانِ مُتَّجِهتانِ في المقدارِ، وتختلفانِ في الاتجاهِ.

الحلُّ:

- نعمْ، فدرجةُ الحرارةِ قدْ تكونُ سالبةً، وهيَ كميةٌ قياسيةٌ. والإشارةُ السالبةُ هنا لا تعني اتجاهًا.
- نعمْ، فطولُ المسارِ الفعليِّ بينَ نقطتَيِ البدايةِ والنهايةِ كميَّةٌ قياسيةٌ، لكنَّ الإزاحةَ (الخطُّ المستقيمُ منْ نقطةِ البدايةِ إلى نقطةِ النهايةِ) كميةٌ مُتَّجِهةٌ، ووحدةُ قياسِ كلٍّ منْ هاتيْنِ الكميتيْنِ هيَ نفسُها (المترُ في النظامِ الدوليِّ).
- نعمْ، فالكمياتُ المُتَّجِهةُ قدْ تتساوى في المقدارِ وتختلفُ في الاتجاهِ. فمثلًا، تُؤثِّرُ في الجسمِ قُوَّتانِ متساويتانِ في المقدارِ؛ إحداهُما باتجاهِ الشرقِ، والأُخرى باتجاهِ الشمالِ. وقدْ تكونُ هذهِ الكمياتُ مختلفةً في المقدارِ ومُتماثِلةً في الاتجاهِ.

تمرينٌ

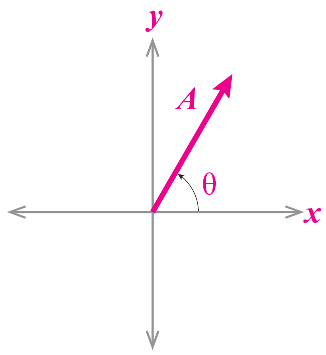
في أثناءِ جلوسي في غرفةِ الصفِّ سقطَ قلمٌ باتجاهِ سطحِ الأرضِ. أُحدِّدُ كميتيْنِ قياسيتيْنِ وكميتيْنِ مُتَّجِهتيْنِ لها صلةٌ بذلكَ.

تمثيلُ المُتَّجِهاتِ بيانيًّا Representation of Vectors: Graphical Method

إنَّ التعاملَ معَ الكمياتِ القياسيةِ وإجراءَ العملياتِ الحسابيةِ عليْها أسهلُ منَ التعاملِ معَ الكمياتِ المُتَّجِهةِ. فمثلًا، منَ السهلِ المقارنةُ بينَ كميتيْنِ قياسيتيْنِ، خلافًا للمقارنةِ بينَ كميتيْنِ مُتَّجِهتيْنِ؛ لأنَّ لكلٍّ منْهُما مقدارًا واتجاهًا. لذا نلجأُ أحيانًا إلى **تمثيلِ الكمياتِ المُتَّجِهةِ (Representation of vector quantities)** تمثيلًا بيانيًّا؛ ما يُسهِّلُ التعاملَ معها. يُمكِنُ أيضًا استخدامُ التمثيلِ البيانيِّ في إيجادِ محصلةِ كمياتٍ مُتَّجِهةٍ عِدَّةٍ، وإجراءِ عملياتِ الجمعِ والطرحِ عليْها.

للكميةِ المُتَّجِهةِ مقدارٌ يُحدَّدُ بعددٍ ووحدةِ قياسٍ، ولها اتجاهٌ أيضًا. ولتمثيلِها بيانيًّا، نختارُ مستوًى إحداثيًّا مثلَ $(x\text{-}y)$، ونقطةَ إسنادٍ مثلَ نقطةِ الأصلِ (0,0)، ثمَّ نرسمُ سهمًا بحيثُ يقعُ ذيلُهُ (نقطةُ بدايتِهِ) عندَ نقطةِ الأصلِ، وذلكَ على النحوِ الآتي:

- طولُ السهمِ يُمثِّلُ مقدارَ المُتَّجِهِ، ويُحدَّدُ باستخدامِ مقياسِ رسمٍ مناسبٍ.
- اتجـاهُ السهمِ يُحدَّدُ نسبةً إلى اتجـاهٍ مرجعيٍّ؛ إمّا جغرافيًّا باستخدامِ الجهاتِ الأربـعِ (شمالٌ، جنـوبٌ، شـرقٌ، غـربٌ)، وإمّا باستخدامِ الزاويةِ θ التي يَصنعُها المُتَّجِهُ معَ محورٍ مرجعيٍّ، مثلِ محورِ $(+x)$، بـعكسِ دورانِ عقـاربِ الساعةِ، وتُسمّى الزاويةَ المرجعيةَ. وبذلكَ يمكنُ التعبيرُ عنْ مُتَّجِهٍ $(\boldsymbol{A})$ مثلًا، الذي يصنعُ زاويةً مرجعيةً θ، الموضحِ في الشكلِ (2) كما يأتي: $\boldsymbol{A} = A, \theta$؛ حيثُ A مقدارُ المُتَّجِهِ.



الشكلُ (2): رسمٌ لمُتَّجِهٍ $\boldsymbol{A}$ على المستوى $\boldsymbol{x\text{-}y}$.

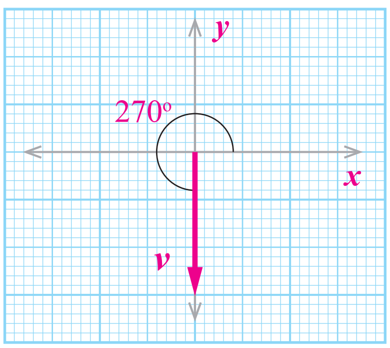
المثالُ 3

اكتسبَ جسمٌ سرعةً $v = 3$ m/s, 270°. أُمثِّلُ مُتَّجِهَ السرعةِ بيانيًّا.

الحلُّ:

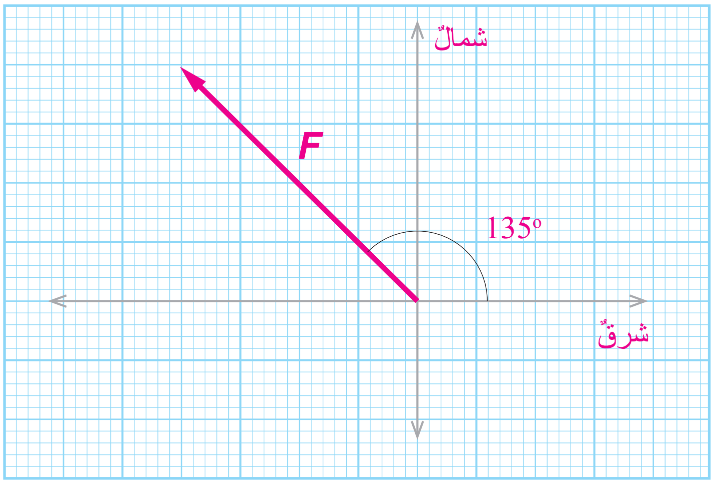
- أختارُ مقياسَ رسـمٍ مناسـبًا، مثلَ (1cm : 1 m/s)؛ أيْ إنَّ كلَّ 1 cm على الورقةِ يُمثِّلُ 1 m/s، فيكونُ طولُ السهمِ: 3 m/s × (1cm/(1 m/s)) = 3 cm.
- أرسـمُ سـهمًا طولُـهُ 3 cm، ولهُ نقطةُ بدايةٍ (تُسـمّى ذيلَ المُتَّجِـهِ) عندَ نقطةِ الأصـلِ (0,0)، ونقطـةُ نهـايـةٍ (تُسـمّى رأسَ المُتَّجِـهِ)، بحيثُ يَصنـعُ اتجاهُ السـهمِ زاويـةً مقدارُهـا 270° مـعَ المحـورِ $(+x)$ بعكـسِ دورانِ عقـاربِ السـاعةِ (باتجـاهِ الجنـوبِ)، كمـا في الشـكلِ (3).

الشكلُ (3): رسمٌ لمُتَّجِهِ السرعةِ v.



المثالُ 4

تُؤثِّرُ قُوَّةٌ F مقدارُها 60 N في جسمٍ باتجاهٍ يَصنعُ زاويةً مقدارُها 45° شمالَ الغربِ. أُمثِّلُ مُتَّجِهَ القُوَّةِ F بيانيًّا.



الشكلُ (4): رسمٌ لمُتَّجِهِ القُوَّةِ F.

* **ملحوظة:** إذا كانَ المُتَّجِهُ يَصنعُ زاويةً θ (45° مثلًا) شمالَ الغربِ، فهذا يعني وجوبَ البدءِ منَ الغربِ، وقطعَ زاويةِ 45° باتجاهِ الشمالِ، أمّا إذا كانَتِ الزاويةُ غربَ الشمالِ فيجبُ البدءُ منَ الشمالِ باتجاهِ الغربِ، وهكذا.

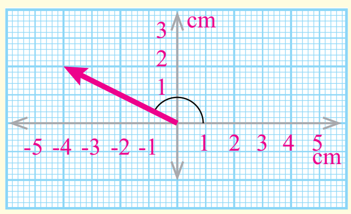
الحلُّ:

- أختارُ مقياسَ رسمٍ مناسبًا، مثلَ (1cm :10 N)، فيكونُ طولُ السهمِ:

$$60\ N \times (1cm / 10\ N) = 6\ cm$$

- أرسمُ سهمًا طولُهُ 6 cm، بحيثُ يَصنعُ زاويةً مقدارُها 135° معَ محورِ ($+x$)، أوْ زاويةً مقدارُها 45° شمالَ الغربِ، كما في الشكلِ (4).

أفكِّرُ: استخدمَ أحمدُ مقياسَ الرسمِ (1 cm: 20 m) لرسمِ مُتَّجِهٍ يُمثِّلُ بُعْدَ المسجدِ عنْ منزلِهِ، كما في الشكلِ (5). أُحدِّدُ بُعْدَ المسجدِ عنْ منزلِ أحمدَ، مُبيِّنًا الاتجاهَ.



الشكلُ (5): مُتَّجِهٌ يُمثِّلُ بُعْدَ المسجدِ عنْ منزلِ أحمدَ.

تمرينٌ

تسيرُ سيارةٌ بسرعةٍ v مقدارُها 80 km/h، في اتجاهٍ يَصنعُ زاويةً مقدارُها 37° جنوبَ الشرقِ. أُمثِّلُ مُتَّجِهَ السرعةِ بيانيًّا.

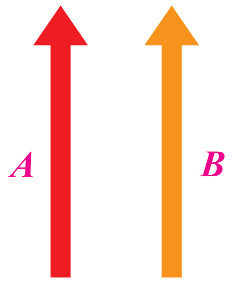
أتحقَّقُ: كيفَ يُمكِنُ تحديدُ كلٍّ منْ طولِ السهمِ واتجاهِهِ عندَ تمثيلِ المُتَّجِهِ بيانيًّا؟

خصائصُ المُتَّجِهاتِ Properties of Vectors

تمتازُ المُتَّجِهاتُ بخصائصَ عِدَّةٍ تُميِّزُها مِنَ الكمياتِ القياسيةِ، وهذهِ بعضُها:

- **تساوي مُتَّجِهَيْنِ Equality of Two Vectors**

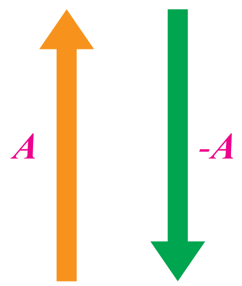
يتساوى مُتَّجِهانِ عندما يكونُ لهُما المقدارُ والاتجاهُ نفساهُما، كما في الشكلِ (6)، إضافةً إلى أنَّهُما منَ النوعِ نفسِهِ. اعتمادًا على هذهِ الخصيصةِ، فإنَّهُ يُمكِنُ نقلُ المُتَّجِهِ منْ مكانٍ إلى آخرَ شرطَ المحافظةِ على ثباتِ كلٍّ منْ مقدارِهِ واتجاهِهِ.



الشكلُ (6): تساوي المُتَّجِهَيْنِ: **A** وَ **B**.

- **سالبُ (معكوسُ) المُتَّجِهِ Negative of a Vector**

هوَ مُتَّجِهٌ لهُ مقدارُ المُتَّجِهِ الأصليِّ نفسِهِ، ولكنَّهُ يعاكِسُهُ في الاتجاهِ؛ أيْ أنَّ الزاويةَ بينَ المُتَّجِهِ و**سالبِ المُتَّجِهِ (Negative of a vector)** هيَ 180^{o}. ويُبيِّنُ الشكلُ (7) أنَّ المُتَّجِهَ $\boldsymbol{A}$، والمُتَّجِهَ $\boldsymbol{-A}$ يتساويانِ في المقدارِ ويتعاكسانِ في الاتجاهِ.



الشكلُ (7): المُتَّجِهُ $\boldsymbol{A}$، وسالبُ هذا المُتَّجِهِ $(\boldsymbol{-A})$.

- **ضربُ المُتَّجِهِ في كميةٍ قياسيةٍ**
Multiplication of a Vector by a Scalar

يُمكِنُ ضربُ مُتَّجِهٍ ما (مثلُ $\boldsymbol{C}$) في كميةٍ قياسيةٍ (مثلُ n) للحصولِ على مُتَّجِهٍ جديدٍ $(n\boldsymbol{C})$ مقدارُهُ nC، حيثُ n عددٌ حقيقيٌّ. أمّا اتجاهُهُ فيعتمدُ على إشارةِ n؛ فإذا كانَتْ هذهِ الإشارةُ موجبةً فإنَّ المُتَّجِهَ $n\boldsymbol{C}$ يكونُ في الاتجاهِ نفسِهِ للمُتَّجِهِ $\boldsymbol{C}$، وفي حالِ كانَتْ إشارةُ n سالبةً فإنَّ المُتَّجِهَ $n\boldsymbol{C}$ يكونُ عكسَ اتجاهِ المُتَّجِهِ $\boldsymbol{C}$.

منَ الأمثلةِ الفيزيائيةِ على ضربِ المُتَّجِهِ في كميةٍ قياسيةٍ القانونُ الثاني لنيوتن الذي سندرسُهُ لاحقًا؛ إذْ إنَّ مُتَّجِهَ القُوَّةِ المحصلةِ $\sum \boldsymbol{F}$ هوَ حاصلُ ضربِ الكتلةِ m في مُتَّجِهِ التسارُعِ $\boldsymbol{a}$ بحسبِ العلاقةِ الآتيةِ:

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

أُفكِّرُ: لماذا يكونُ اتجاهُ التسارُعِ $\boldsymbol{a}$ دائمًا في نفسِ اتجاهِ القُوَّةِ المحصلةِ $\sum \boldsymbol{F}$ ؟

أتحقَّقُ: ما المقصودُ بكلٍّ ممّا يأتي:
- تساوي مُتَّجِهَيْنِ؟
- ضربُ مُتَّجِهٍ في عددٍ سالبٍ؟

المثالُ 5

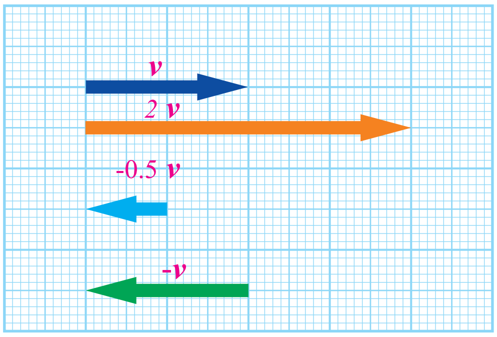
تتحرَّكُ عربةٌ بسرعةٍ مُتَّجِهةٍ v مقدارُها 40 m/s في اتجاهِ الشرقِ. أُمثِّلُ بيانيًّا:

أ . مُتَّجِهَ السرعةِ v

ب. المُتَّجِهَ $2v$

جـ. المُتَّجِهَ $-0.5v$

د . سالبَ المُتَّجِهِ v



الشكلُ (8): خصائصُ المُتَّجِهاتِ.

الحلُّ:

أ . أختارُ مقياسَ الرسمِ (1cm:10 m/s)، ثمَّ أرسمُ سهمًا طولُهُ 4 cm ليُمثِّلَ المُتَّجِهَ (v) باتجاهِ الشرقِ، كما في الشكلِ (8).

ب . أرسمُ سهمًا طولُهُ 8 cm ليُمثِّلَ المُتَّجِهَ ($2v$)، ومقدارُهُ 80 m/s باتجاهِ الشرقِ.

جـ . أرسمُ سهمًا طولُهُ 2 cm ليُمثِّلَ المُتَّجِهَ ($-0.5v$)، ومقدارُهُ 20 m/s باتجاهِ الغربِ.

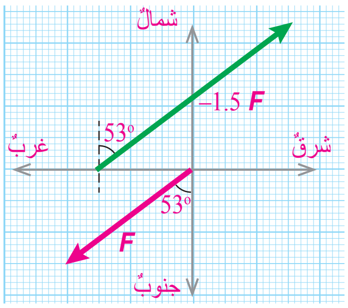
د . أرسمُ سهمًا طولُهُ 4 cm ليُمثِّلَ المُتَّجِهَ ($-v$)، ومقدارُهُ 40 m/s باتجاهِ الغربِ.

المثالُ 6

تُؤثِّرُ قُوَّةٌ F مقدارُها 250 N في جسمٍ باتجاهٍ يَصنعُ زاويةً مقدارُها 53^{o} غربَ الجنوبِ. أُمثِّلُ بيانيًّا:

أ . مُتَّجِهَ القُوَّةِ F.

ب. المُتَّجِهَ $(-1.5\ F)$.



الشكلُ (9): تمثيل ناتج ضرب كمية متجهة بكمية قياسية.

الحلُّ:

أ . أختارُ مقياسَ الرسمِ (1cm : 50 N)، ثمَّ أرسمُ سهمًا طولُهُ 5 cm ليُمثِّلَ المُتَّجِهَ F، كما في الشكلِ (9).

ب. أرسمُ سهمًا طولُهُ 7.5 cm ليُمثِّلَ المُتَّجِهَ ($-1.5\ F$)، ومقدارُهُ 375 N، واتجاهُهُ معاكسٌ لاتجاهِ F؛ أيْ بزاويةٍ مقدارُها 53^{o} شرقَ الشمالِ (أوْ بزاويةٍ مقدارُها 37^{o} شمالَ الشرقِ)، كما في الشكلِ.

تمرينٌ

تسيرُ سيارةٌ بتسارعٍ ثابتٍ $a = 3\ m/s^2$ في اتجاهٍ يَصنعُ زاويةً مقدارُها 30^{o} شرقَ الشمالِ. أُمثِّلُ بيانيًّا:

أ. سالبَ المُتَّجِهِ a. ب. ضربَ المُتَّجِهِ a في العددِ (2).

ضربُ المُتَّجِهاتِ Vectors Product

تعرَّفْنا سابقًا أنَّ كميةً مُتَّجِهةً تنتجُ منْ حاصلِ ضربِ كميةٍ قياسيةٍ في كميةٍ مُتَّجِهةٍ، ولكنَّنا نحتاجُ أحيانًا في علمِ الفيزياءِ إلى ضربِ كميةٍ مُتَّجِهةٍ في كميةٍ أُخرى مُتَّجِهةٍ، فهلْ سيكونُ الناتجُ كميةً مُتَّجِهةً أمْ كميةً قياسيةً؟

يوجدُ نوعانِ منْ ضربِ مُتَّجِهيْنِ بعضِهما في بعضٍ، هما: الضربُ القياسيُّ، والضربُ المُتَّجِهيُّ.

أصممُ باستخدامِ برنامجِ السكراتشِ (Scratch) عرضًا يوضحُ ضربَ المتجهاتِ، ثمَّ أشاركهُ معلمي وزملائي في الصفِّ.

أ . الضربُ القياسيُّ (النقطيُّ) Scalar (Dot) Product

يُعرَّفُ **الضربُ القياسيُّ (Scalar product)** لمُتَّجِهيْنِ (مثلُ: $\boldsymbol{A}$ و $\boldsymbol{B}$) بينَهُما زاويةٌ θ، كما في الشكلِ (10)، على النحوِ الآتي:

$$\boldsymbol{A} \cdot \boldsymbol{B} = AB\cos\theta$$

حيثُ:

A: مقدارُ المُتَّجِهِ $\boldsymbol{A}$.

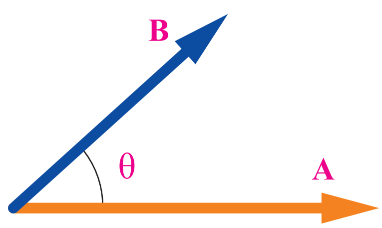
B: مقدارُ المُتَّجِهِ $\boldsymbol{B}$.

θ: الزاويةُ الصغرى بينَ المُتَّجِهيْنِ: $\boldsymbol{A}$ و $\boldsymbol{B}$؛ أيْ $(0^\circ \le \theta \le 180^\circ)$ حينَ ينطلقُ المُتَّجِهانِ منَ النقطةِ نفسِها، كما في الشكلِ(10).

أمّا الناتجُ منْ عمليةِ الضربِ القياسيِّ فيكونُ كميةً قياسيةً لها مقدارٌ فقطْ، وهوَ مقدارٌ يتغيَّرُ بتغيُّرِ مقدارِ الزاويةِ θ بينَ المُتَّجِهيْنِ.

منَ التطبيقاتِ الفيزيائيةِ على الضربِ القياسيِّ الشغلُ W، وهوَ حاصلُ الضربِ القياسيِّ لمُتَّجِهِ القُوَّةِ $\boldsymbol{F}$ في مُتَّجِهِ الإزاحةِ $\boldsymbol{d}$:

$$(W = \boldsymbol{F} \cdot \boldsymbol{d} = Fd\cos\theta)$$



الشكلُ (10): مُتَّجِهانِ بينَهُما زاويةٌ θ.

أُقارِنُ بينَ ناتجِ كلٍّ منْ: $\boldsymbol{B} \cdot \boldsymbol{A}$، و $\boldsymbol{A} \cdot \boldsymbol{B}$.

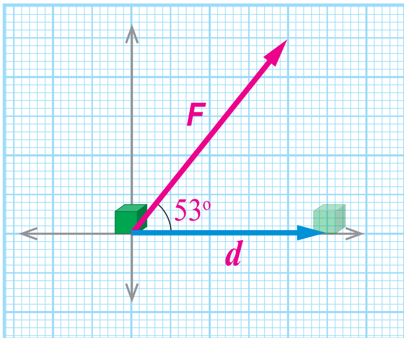
المثالُ 7

أثَّرَتْ قوَّةٌ F مقدارُها 120 N في جسمٍ، فحرَّكَتْهُ إزاحةً d مقدارُها 5 m في اتجاهِ الشرقِ. إذا علمْتُ أنَّ الشغلَ W الذي تُنجِزُهُ القوَّةُ F يُعطى بالعلاقةِ: $W = \boldsymbol{F} . \boldsymbol{d}$، وأنَّ الزاويةَ بينَ اتجاهِ F واتجاهِ d (53^{o})، فأُجيبُ عمّا يأتي:

أ . أُمثِّلُ المُتَّجهيْنِ F وَ d بيانيًّا.

ب . هلْ يُعَدُّ الشغلُ W كميةً مُتَّجِهةً؟ أُوضِّحُ ذلكَ.

جـ . أجِدُ مقدارَ الشغلِ الذي أنجزَتْهُ القوَّةُ.



الشكلُ (11): تمثيلُ المُتَّجِهيْنِ F وَ d بيانيًّا.

المعطياتُ: $\theta = 53^{o}$، $d = 5$ m، $F = 120$ N.

المطلوبُ: $W = ?$.

الحلُّ:

أ . مقياسُ الرسمِ (1 cm: 20 N) للقُوَّةِ، وَ (1 cm: 1 m) للإزاحةِ، وتمثيلُ المُتَّجِهيْنِ مُبيَّنٌ في الشكلِ (11).

ب . لا، لا يُعَدُّ الشغلُ W كميةً مُتَّجِهةً، فهوَ كميةٌ قياسيةٌ؛ لأنَّهُ ناتجٌ منَ الضربِ القياسيِّ لمُتَّجهي القُوَّةِ والإزاحةِ.

جـ . يُمكِنُ إيجادُ مقدارِ الشغلِ الذي أنجزَتْهُ القُوَّةُ باستخدامِ العلاقةِ الآتيةِ:

$$W = \boldsymbol{F} . \boldsymbol{d} = F\, d \cos\theta$$
$$= 120 \times 5 \times \cos 53^{o} \quad , \quad \cos 53^{o} = 0.6$$
$$= 360 \text{ J}$$

ب. الضربُ المُتَّجِهيُّ (التقاطعيُّ) Vector (Cross) Product

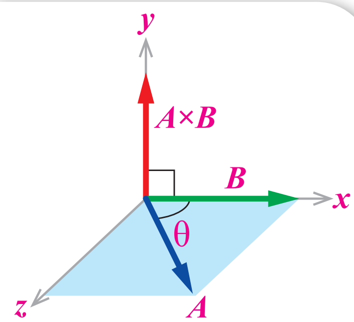
ناتجُ الضربِ المُتَّجِهيِّ (Vector product) لمُتَّجِهيْنِ (مثلُ: A وَ B) بينَهُما زاويةٌ θ يُكتَبُ في صورةِ ($A \times B$)، ويكونُ كميةً مُتَّجِهةً لها مقدارٌ واتجاهٌ، ويكونُ الاتجاهُ دائمًا متعامدًا معَ كلٍّ منَ اتجاهِ المُتَّجِهيْنِ: A وَ B، كما في الشكلِ (12)، ويُعطى مقدارُهُ على النحوِ الآتي:

$$|\boldsymbol{A} \times \boldsymbol{B}| = A\, B \sin\theta$$

حيثُ:

$|A \times B|$: مقدارُ ناتجِ الضربِ المُتَّجِهيِّ للمُتَّجهيْنِ: A وَ B.

A: مقدارُ المُتَّجِهِ A.



الشكلُ (12): الضربُ المُتَّجِهيُّ للمُتَّجِهيْنِ: A، وَ B.

B: مقدارُ المُتَّجِهِ $\boldsymbol{B}$.

θ: الزاويةُ الصغرى بينَ المُتَّجِهيْنِ: $\boldsymbol{A}$ وَ $\boldsymbol{B}$ ؛ أيْ $(0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ)$ حينَ ينطلقُ المُتَّجِهانِ منَ النقطةِ نفسِها.

لتحديدِ اتجاهِ ناتجِ الضربِ المُتَّجِهيِّ $(\boldsymbol{A} \times \boldsymbol{B})$، تُستخدَمُ قاعدةُ كفِّ اليدِ اليمنى، كما في الشكلِ (13)؛ إذْ يشيرُ اتجاهُ الإبهامِ إلى اتجاهِ المُتَّجِهِ الأولِ $\boldsymbol{A}$، وتشيرُ الأصابعُ إلى اتجاهِ المُتَّجِهِ الثاني $\boldsymbol{B}$، فينتجُ من ضربِهِما المُتَّجِهيِّ $(\boldsymbol{A} \times \boldsymbol{B})$ مُتَّجِهٌ عموديٌّ على الكفِّ، وخارجٌ منْها.

بوجهٍ عامٍّ، يكونُ المُتَّجِهُ الناتجُ $(\boldsymbol{A} \times \boldsymbol{B})$ دائمًا عموديًّا على المستوى الذي يحوي المُتَّجِهيْنِ: $(\boldsymbol{A})$ وَ $(\boldsymbol{B})$، كما هو مُبيَّنٌ في الشكلِ (13).

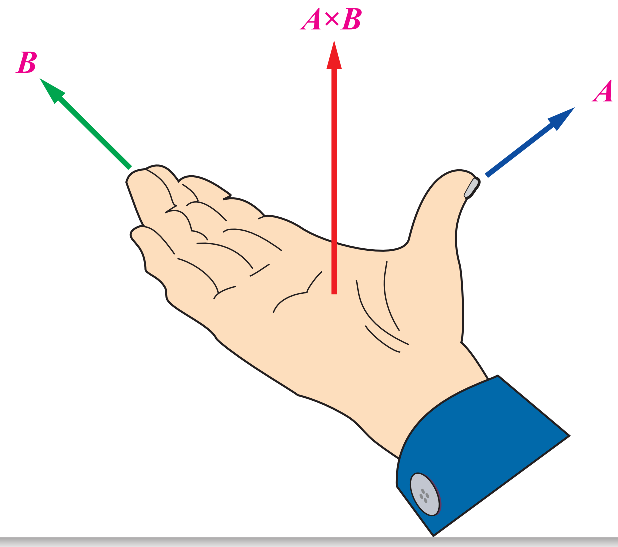
مِنَ التطبيقاتِ الفيزيائيةِ على الضربِ المُتَّجِهيِّ القُوَّةُ المغناطيسيةُ $\boldsymbol{F}$ المُؤثِّرةُ في شحنةٍ كهربائيةٍ q متحركةٍ بسرعةٍ $\boldsymbol{v}$ في مجالٍ مغناطيسيٍّ $\boldsymbol{B}$، وهيَ تُعطى بالعلاقةِ: $\boldsymbol{F} = q\,(\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B})$، وكذلكَ عزمُ القُوَّةِ $\boldsymbol{\tau}$، $(\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{r} \times \boldsymbol{F})$، حيثُ:

$\boldsymbol{F}$: القُوَّةُ المُؤثِّرةُ.

$\boldsymbol{r}$: مُتَّجِهُ الموقعِ.

أفكِّرُ: إذا أشارَتِ الأصابعُ إلى المُتَّجِهِ $\boldsymbol{A}$، وأشارَ الإبهامُ إلى المُتَّجِهِ $\boldsymbol{B}$، فهلْ تتغيَّرُ نتيجةُ الضربِ المُتَّجِهيِّ؟ أُوضِّحُ ذلكَ.

أتحقَّقُ: ما الفرقُ بينَ الضربِ المُتَّجِهيِّ والضربِ القياسيِّ؟



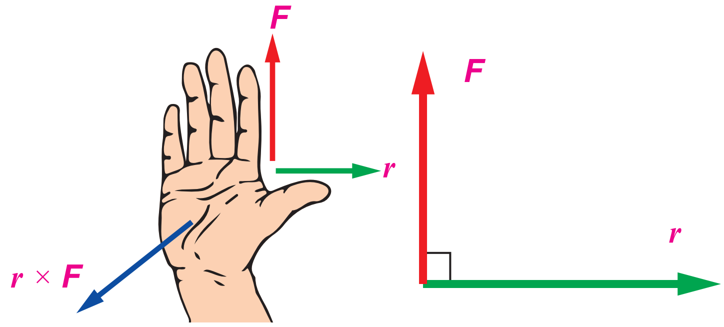
الشكلُ (13): تطبيقُ قاعدةِ كفِّ اليدِ اليمنى لتحديدِ اتجاهِ $\boldsymbol{A} \times \boldsymbol{B}$.

المثالُ 8

في الشكلِ (14)، إذا كانَ $F = 250\ N$، وَ $r = 0.4\ m$، فأُجيبُ عمّا يأتي:

أ . أَجِدُ مقدارَ عزمِ القُوَّةِ ($r \times F$)، واتجاهَهُ.

ب . إذا تغيَّرَتِ الزاويةُ بينَ r وَ F لتصبحَ 135^{o}، فما مقدارُ $r \times F$، واتجاهُهُ؟



الشكلُ (14): تطبيقُ قاعدةِ كفِّ اليدِ اليمنى.

الحلُّ:

أ . مقدارُ عزمِ القُوَّةِ ($r \times F$):

$$|r \times F| = r \times F \times \sin\theta$$
$$= 0.4 \times 250 \times \sin 90^{o}\ ,\ \sin 90^{o} = 1$$
$$= 100\ N.m$$

بحسبِ قاعدةِ كفِّ اليدِ اليمنى، يشيرُ الإبهامُ إلى اتجاهِ r، وتشيرُ الأصابعُ إلى اتجاهِ F ؛ لذا يكونُ اتجاهُ عزمِ القُوَّةِ خارجًا منَ الورقةِ (باتجاهِ محورِ $+z$).

ب. مقدارُ $r \times F$:

$$|r \times F| = r \times F \times \sin\theta$$
$$= 0.4 \times 250 \times \sin 135^{o}\ ,\ \sin 135^{o} = 0.7$$
$$= 70\ N.m$$

اتجاهُ $F \times r$ يكونُ خارجًا منَ الورقةِ (باتجاهِ محورِ $+z$)، كما في الفرعِ (أ).

تمرينٌ

مُتَّجِهانِ: A وَ B، مقدارُ كلٍّ منْهُما $20\ u$ (الرمزُ u يعني وحدةً unit).

أَجِدُ مقدارَ الزاويةِ بينَ المُتَّجِهيْنِ في الحالتيْنِ الآتيتيْنِ:

أ . $A \cdot B = 320\ u$

ب . $|A \times B| = 200\ u$

مراجعةُ الدرسِ

1. **الفكرةُ الرئيسةُ:** أذكرُ اختلافًا واحدًا وتشابهًا واحدًا بينَ:

أ . الكميةِ المُتَّجِهةِ والكميةِ القياسيةِ.   ب . المُتَّجِهِ وسالبِ المُتَّجِهِ.

جـ. الضربِ القياسيِّ والضربِ المُتَّجِهيِّ.

2. **أُصنِّفُ** الكمياتِ الآتيةَ إلى مُتَّجِهةٍ، وقياسيةٍ:

- زمنُ الحصةِ الصفيةِ.
- قُوَّةُ الجاذبيةِ الأرضيةِ.
- درجةُ حرارةِ المريضِ.
- المقاومةُ الكهربائيةُ.
- كتلةُ الحقيبةِ المدرسيةِ.

3. **أُمَثِّلُ بيانيًّا** الكميتيْنِ المُتَّجِهتيْنِ الآتيتيْنِ:

أ . قُوَّةٌ مغناطيسيةٌ مقدارُها 0.25 N في اتجاهٍ يَصنعُ زاويةً مقدارُها 143^{o} معَ محورِ $+x$.

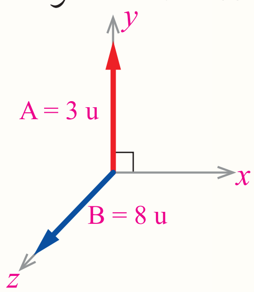
ب. تسارعٌ ثابتٌ مقدارُهُ $4\ m/s^2$ في اتجاهٍ يَصنعُ زاويةً مقدارُها 30^{o} جنوبَ الشرقِ.

4. ما مقدارُ الزاويةِ بينَ الكميتيْنِ المُتَّجِهتيْنِ $\boldsymbol{F}$ وَ $\boldsymbol{L}$ في الحالتيْنِ الآتيتيْنِ:

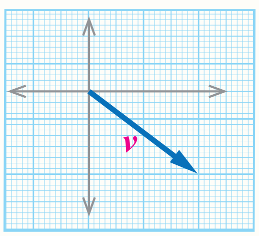
أ . $\boldsymbol{F} \times \boldsymbol{L} = 0$؟   ب . $\boldsymbol{F} . \boldsymbol{L} = 0$؟   بافتراضِ أنَّ $(L \neq 0$، وَ $F \neq 0)$.

5. **أحسُبُ:** اعتمادًا على العلاقةِ الآتيةِ للتدفُّقِ المغناطيسيِّ Φ: $\Phi = \boldsymbol{B} . \boldsymbol{A}$،

أحسُبُ مقدارَ التدفُّقِ المغناطيسيِّ Φ عندما تكونُ $A = 2 \times 10^{-6}\ m^2$ ، $B = 0.1$ Tesla، ومقدارُ الزاويةِ بينَ المُتَّجِهيْنِ $\boldsymbol{A}$ وَ $\boldsymbol{B}$ 45^{o}.



6. **أحسُبُ:** اعتمادًا على البياناتِ في الشكلِ المجاورِ، أحسُبُ مقدارَ ناتجِ الضربِ المُتَّجِهيِّ $(\boldsymbol{B} \times \boldsymbol{A})$، مُحدِّدًا الاتجاهَ (الرمزُ u يعني وحدةً unit).



7. **أحسُبُ:** سيارةٌ تسيرُ بسرعةٍ ثابتةٍ $\boldsymbol{v}$، وفي اتجاهٍ مُحدَّدٍ. مُثِّلَتْ سرعةُ السيارةِ بيانيًّا برسمِ سهمٍ طولُهُ 5 cm باستخدامِ مقياسِ الرسمِ (1 cm: 10 m/s) على النحوِ المُبيَّنِ في الشكلِ المجاورِ.
أحسُبُ مقدارَ سرعةِ السيارةِ، مُحدِّدًا اتجاهَها.

8. **أحسُبُ** مقدارَ الزاويةِ بينَ المُتَّجِهيْنِ: $\boldsymbol{F}$ وَ $\boldsymbol{r}$، التي يتساوى عندَها مقدارُ الضربِ القياسيِّ ومقدارُ الضربِ المُتَّجِهيِّ للمُتَّجِهيْنِ؛ أيْ إنَّ: $\boldsymbol{r} . \boldsymbol{F} = |\boldsymbol{r} \times \boldsymbol{F}|$.

جمعُ المُتَّجِهاتِ وطرحُها
Addition and Subtraction of Vector

الفكرةُ الرئيسةُ:

جمعُ الكمياتِ المُتَّجِهةِ أوْ طرحُها يكونُ إمّا بيانيًّا، وإمّا رياضيًّا عنْ طريقِ تحليلِ الكمياتِ المُتَّجِهةِ إلى مُركَّباتِها.

نتاجاتُ التعلُّمِ:

- أُطبِّقُ خصائصَ المُتَّجِهاتِ على كمياتٍ فيزيائيةٍ مُتَّجِهةٍ.
- أستنتجُ خصائصَ المُتَّجِهاتِ بطرائقَ مختلفةٍ.

المفاهيمُ والمصطلحاتُ:

جمعُ الكمياتِ المتَّجِهةِ Addition of vector quantities

مُتَّجِهُ المحصلةِ Resultant Vector.

الطريقةُ البيانيةُ Graphical Method.

تحليلُ المُتَّجِهاتِ إلى مُركِّباتِها Resolving Vectors into Components.

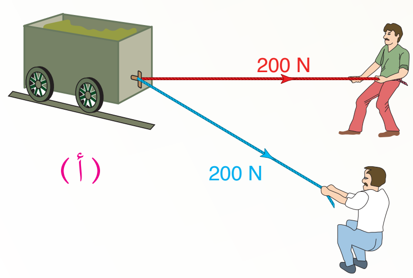
الطريقةُ التحليليةُ Analytical Method.

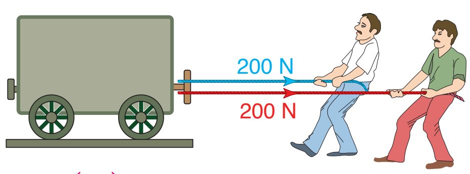
جمعُ المُتَّجِهاتِ Addition of Vectors

تعرَّفْتُ في الدرسِ السابقِ أنَّ الكمياتِ الفيزيائيةَ تكونُ كمياتٍ مُتَّجِهةً تُحدَّدُ بالمقدارِ والاتجاهِ معًا، أوْ كمياتٍ قياسيةً تُحدَّدُ فقطْ بالمقدارِ، وأنَّ عمليةَ ضربِ الكمياتِ المُتَّجِهةِ تختلفُ عنْ عمليةِ ضربِ الكمياتِ القياسيةِ. ولكنْ هلْ تختلفُ عملياتُ جمعِ الكمياتِ المُتَّجِهةِ وطرحِها عنها في الكمياتِ القياسيةِ؟

إذا أمضيْتُ أمسِ أربعَ ساعاتٍ في الدراسةِ، وساعتينِ في ممارسةِ الرياضةِ، وساعةً في العملِ التطوعيِّ، فإنَّ مجموعَ ما استغرقْتُهُ في الدراسةِ والرياضةِ والعملِ التطوعيِّ 7 ساعاتٍ. وإذا كانَتْ درجةُ حرارةِ الجوِّ اليومَ $20\ ^oC$، ودرجةُ حرارةِ الجوِّ المُتوقَّعةُ غدًا $24\ ^oC$، فإنَّ درجةَ الحرارةِ غدًا سترتفعُ $4\ ^oC$، بحسبِ قولِ الراصدِ الجويِّ.

هذهِ بعضُ الأمثلةِ على جمعِ الكمياتِ القياسيةِ وطرحِها (الزمنُ، درجةُ الحرارةِ)، وقدْ جُمِعَتْ وطُرِحَتْ بطريقةٍ جبريةٍ شرطَ أنْ تكونَ منَ النوعِ نفسِهِ، وأنْ يكونَ لها الوحداتُ نفسُها، ويكونَ ناتجُ الجمعِ كميةً قياسيةً أيضًا. أمّا عندَ **جمعِ الكمياتِ المُتَّجِهةِ (Addition of vector quantities)** فيجبُ مراعاةُ الاتجاهِ والمقدارِ. فمثلًا، إذا جُمِعَتِ القُوَّتانِ اللتانِ يُؤثِّرُ بهما الرجلانِ لسحبِ العربةِ في الشكلِ (15/أ) جبريًّا ($200 + 200 = 400\ N$) فإنَّ الإجابةَ تكونُ غيرَ صحيحةٍ، أمّا إذا أثَّرَ الرجلانِ في الاتجاهِ نفسِهِ، وبالقُوَّةِ نفسِها، كما في الشكلِ (15/ ب) فإنَّ مجموعَ القُوَّتيْنِ $400\ N$ في اتجاهِ إحدى القُوَّتيْنِ يكونُ صحيحًا.





الشكلُ (15): أ. قُوَّتانِ في اتجاهيْنِ مختلفيْنِ. ب. قُوَّتانِ في الاتجاهِ نفسِهِ.

ماذا يُتوقَّعُ أنْ يكونَ ناتجُ جمعِ القوّتيْنِ إذا أثَّرَ كلُّ رجلٍ بالقوَّةِ نفسِها، ولكنْ في اتجاهيْنِ متعاكسيْنِ؟

نستنتجُ ممّا سبقَ أنَّ ناتجَ جمعِ مُتَّجِهيْنِ (مثلُ: $\boldsymbol{A}$ وَ $\boldsymbol{B}$) هوَ مُتَّجِهٌ جديدٌ $(\boldsymbol{A}+\boldsymbol{B})$ يختلفُ مقدارُهُ واتجاهُهُ باختلافِ المقدارِ والاتجاهِ لكلٍّ منَ المُتَّجِهيْنِ، وأنَّ ما ينطبقُ على جمعِ مُتَّجِهيْنِ ينطبقُ على جمعِ مُتَّجِهاتٍ عِدَّةٍ.

بوجهٍ عامٍّ، يُسمّى المُتَّجِهُ الناتجُ منَ الجمعِ المُتَّجِهيِّ لمُتَّجِهيْنِ أو أكثرَ (مثلُ: $\boldsymbol{A}$ وَ $\boldsymbol{B}$ وَ $\boldsymbol{C}$) **مُتَّجِهَ المحصلةِ Resultant vector**، ويُرمَزُ إليهِ بالرمزِ $\boldsymbol{R}$، $(\boldsymbol{R}=\boldsymbol{A}+\boldsymbol{B}+\boldsymbol{C})$؛ على أنْ تكونَ المُتَّجِهاتُ منَ النوعِ نفسِهِ. فمثلًا، إذا جمعْنا مُتَّجِهاتٍ للسرعةِ فإنَّ مُتَّجِهَ المحصلةِ يكونُ مُتَّجِهَ سرعةٍ، وكذلكَ مُتَّجِهاتُ التسارعِ والقوَّةِ وغيرُها.

✓ **أتحقَّقُ:** ما المقصودُ بمُتَّجِهِ المحصلةِ؟

المثالُ 9

مِزْلاجٌ كتلتُهُ $m_1=70$ kg، وُضِعَ فوقَهُ صندوقٌ حجمُهُ $1\ m^3$، وكتلتُهُ $m_2=80$ kg. سُحِبَ المِزْلاجُ بقُوَّةٍ مقدارُها $F_1=400$ N باتجاهِ الشرقِ، وأثَّرَتْ فيهِ قُوَّةٌ أُخرى $F_2=100$ N باتجاهِ الغربِ، فتحرَّكَ بتسارُعٍ مقدارُهُ $a=2\ m/s^2$ باتجاهِ الشرقِ:

أ . أُحدِّدُ الكمياتِ القياسيةَ التي يُمكِنُ جمعُها معًا، ثمَّ أجِدُ ناتجَ الجمعِ.

ب . أُحدِّدُ الكمياتِ المُتَّجِهةَ التي يُمكِنُ جمعُها معًا، ثمَّ أُعبِّرُ عنْ ناتجِ الجمعِ (المحصلةُ) بالرموزِ.

الحلُّ:

أ . الكمياتُ القياسيةُ، هيَ: كتلةُ المِزْلاجِ، وحجمُ الصندوقِ، وكتلةُ الصندوقِ. أمّا الكمياتُ التي يُمكِنُ جمعُها معًا فيجبُ أنْ تكونَ منَ النوعِ نفسِهِ، وهيَ: $m_1=70$ kg، وَ $m_2=80$ kg، وناتجُ جمعِهما: $80+70=150$ kg، وهوَ كميةٌ قياسيةٌ.

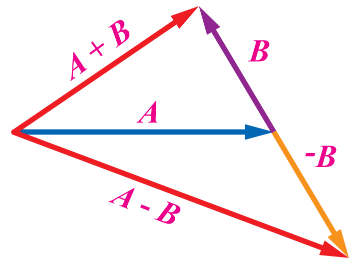
ب . الكمياتُ المُتَّجِهةُ، هيَ: القُوَّةُ الأولى $\boldsymbol{F}_1$، والقُوَّةُ الثانيةُ $\boldsymbol{F}_2$، والتسارُعُ $\boldsymbol{a}$. أمّا الكمياتُ التي يُمكِنُ جمعُها معًا فيجبُ أنْ تكونَ منَ النوعِ نفسِهِ، وهيَ: $F_1=400$ N، وَ $F_2=100$ N، ومحصلتُهما: $\boldsymbol{R}=\boldsymbol{F}_1+\boldsymbol{F}_2$، وهيَ كميةٌ مُتَّجِهةٌ.

طرحُ المُتَّجِهاتِ Subtraction of Vectors

إنَّ عمليةَ طرحِ المُتَّجهاتِ تُشبِهُ عمليةَ جمعِها. والإشارةُ السالبةُ تعني معكوسَ المُتَّجِهِ المرادِ طرحُهُ. فمثلًا، عندَ طرحِ المُتَّجِهِ B منَ المُتَّجِهِ A (أيْ: $A - B$) فإنَّ المُتَّجِهَ A يُجمَعُ معَ معكوسِ المُتَّجِهِ الثاني ($-B$)، كما في الشكلِ (16)، ويُكتَبُ بالصورةِ الآتيةِ:

$$A - B = A + (-B)$$

أيْ أنَّ طرحَ المُتَّجِهِ يُكافِئُ جمعَ سالبِ ذلكَ المُتَّجِهِ.



الشكلُ (16): جمعُ المُتَّجِهاتِ وطرحُها.

✓ **أتحقَّقُ:** ما المقصودُ بطرحِ المُتَّجِهِ؟

محصلةُ مُتَّجِهاتٍ عِدَّةٍ Resultant of Many Vectors

لإيجادِ محصلةِ مُتَّجِهيْنِ أوْ أكثرَ، سواءٌ أكانَتْ في بُعْدٍ واحدٍ مثلِ محورِ x أوْ محورِ y، أمْ في بُعْدَيْنِ مثلِ مستوى (x-y)، فإنَّنا نستخدمُ إحدى الطريقتَيْنِ الآتيتَيْنِ:

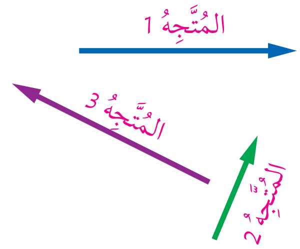
أ. الطريقةُ البيانيةُ (الرسمُ) Graphical Method

هيَ طريقةٌ تتلخَّصُ في تمثيلِ المُتَّجِهاتِ المرادِ جمعُها بأسهمٍ، ثمَّ تركيبِ تلكَ الأسهمِ بطريقةِ متوازي الأضلاعِ، أوْ بطريقةِ المُضلَّعِ (الذيلُ على الرأسِ)، وسنتناولُ في هذا الدرسِ طريقةَ المُضلَّعِ.

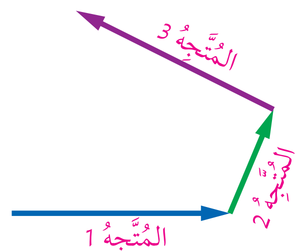
طريقةُ المُضلَّعِ (الذيلُ على الرأسِ) Polygon (head-to-tail) Method:

تُستخدَمُ هذهِ الطريقةُ لإيجادِ محصلةِ العديدِ منَ المُتَّجِهاتِ بيانيًّا. فمثلًا، لإيجادِ محصلةِ المُتَّجِهاتِ الموضحةِ في الشكلِ (17/ أ) نتبّعُ الخطواتِ الآتيةَ:

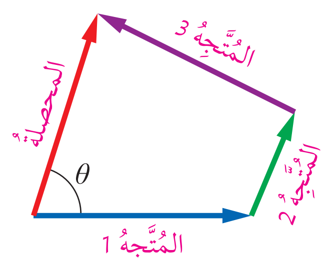
1. اختيارُ مقياسِ رسمٍ مناسبٍ، ورسمُ أسهمٍ تُمثِّلُ المُتَّجِهاتِ التي يرادُ إيجادُ محصلتِها (جمعُها).
2. رسمُ المُتَّجِهِ الأولِ، ثمَّ رسمُ المُتَّجِهِ الثاني، بحيثُ يقعُ ذيلُهُ عندَ رأسِ المُتَّجِهِ الأولِ، وهكذا الحالُ لبقيةِ المُتَّجِهاتِ حتّى آخرِ مُتَّجِهٍ، كما في الشكلِ (17/ ب)، معَ المحافظةِ على طولِ السهمِ واتجاهِهِ عندَ نقلِهِ.



(أ)



(ب)



(جـ)

الشكلُ (17): محصلةُ مُتَّجِهاتٍ عِدَّةٍ بطريقةِ المُضلَّعِ.

3. رسمُ سهمٍ منْ ذيلِ المُتَّجِهِ الأولِ إلى رأسِ المُتَّجِهِ الأخيرِ؛ ليُمثِّلَ طولُهُ مقدارَ المحصلةِ، معَ مراعاةِ مقياسِ الرسمِ، ويُمثِّلَ اتجاهُهُ (منَ الذيلِ إلى الرأسِ) اتجاهَ المحصلةِ (قياسُ الزاويةِ θ بينَ اتجاهِ المحصلةِ ومحورِ $x+$، بعكسِ دورانِ عقاربِ الساعةِ) كما في الشكلِ (17/ جـ).

أتحقَّقُ: أُوضِّحُ المقصودَ بطريقةِ المُضلَّعِ لإيجادِ محصلةِ مُتَّجِهاتٍ عِدَّةٍ بيانيًّا.

أفكِّرُ: هلْ يُمكِنُ إيجادُ الزاويةِ θ بطريقةٍ رياضيةٍ منْ دونِ استخدامِ المنقلةِ في المثالِ 10؟ أُوضِّحُ ذلكَ.

المثالُ 10

تُؤثِّرُ ثلاثُ قوى في جسمٍ: القُوَّةُ الأولى F_1 مقدارُها 30 N في اتجاهِ الشمالِ، والقُوَّةُ الثانيةُ F_2 مقدارُها 50 N في اتجاهٍ يَصنعُ زاويةً مقدارُها 37^o شمالَ الغربِ، والقُوَّةُ الثالثةُ F_3 مقدارُها 70 N في اتجاهِ الجنوبِ. أَجِدُ مقدارَ محصلةِ القوى المؤثِّرةِ في الجسمِ واتجاهَها بيانيًّا.

المعطياتُ: $F_1 = 30$ N, +y ، $F_2 = 50$ N,143^o ، $F_3 = 70$ N, - y.

المطلوبُ: $R = ?$.

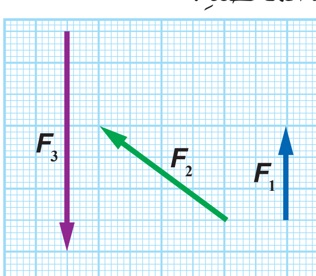
الحلُّ:

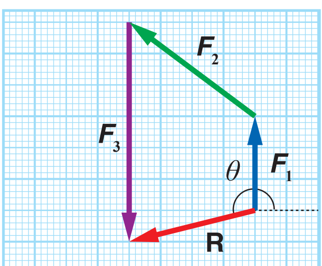
أ . أختارُ مقياسَ رسمٍ مناسبًا، وليكنْ (1 cm: 10 N)، ثمَّ أرسمُ ثلاثةَ أسهمٍ تُمثِّلُ مُتَّجِهاتِ القوى الثلاث، كما في الشكلِ (18/أ)، بحيثُ يكونُ طولُ الأولِ F_1: 3 cm، وطولُ الثاني F_2: 5 cm، وطولُ الثالثِ F_3: 7 cm.

ب. أرسمُ السهمَ الذي يُمثِّلُ مُتَّجِهَ القُوَّةِ F_1، كما في الشكلِ (18/ب)، ثمَّ أرسمُ السهمَ الذي يُمثِّلُ مُتَّجِهَ القُوَّةِ F_2، بحيثُ يقعُ ذيلُهُ على رأسِ سهمِ F_1، ثمَّ أرسمُ السهمَ الذي يُمثِّلُ مُتَّجِهَ القُوَّةِ F_3، بحيثُ يقعُ ذيلُهُ على رأسِ سهمِ F_2. بعدَ ذلكَ أرسمُ سهمًا منْ ذيلِ المُتَّجِهِ الأولِ F_1 إلى رأسِ المُتَّجِهِ الثالثِ (الأخيرِ)؛ ليُمثِّلَ طولُهُ مقدارَ المحصلةِ، ويُمثِّلَ اتجاهُهُ اتجاهَ المحصلةِ.

جـ. أقيسُ -بالمسطرةِ- طولَ مُتَّجِهِ المحصلةِ R منَ الشكلِ (4.1 cm). وبحسبِ مقياسِ الرسمِ (1cm: 10 N)، فإنَّ مقدارَ المحصلةِ: $R = 4.1 \times 10 = 41$ **N**.

د . أقيسُ -بالمنقلةِ- الزاويةَ بينَ مُتَّجِهِ المحصلةِ ومحورِ x + بعكسِ دورانِ عقاربِ الساعةِ ($\theta = 194^o$)؛ لتُمثِّلَ اتجاهَ المحصلةِ.





الشكلُ (18): أ . تمثيلُ مُتَّجِهاتِ القوى بأسهمٍ. ب . محصلةُ مُتَّجِهاتِ القوى بالرسمِ.

التجربةُ ١

إيجادُ محصلةِ قُوَّتيْنِ بصورةٍ عمليةٍ

الموادُّ والأدواتُ: طاولةُ القوى، مجموعتانِ منَ الأثقالِ تتكوَّنُ كلٌّ منْهُما منْ ثلاثةِ أثقالٍ متساويةٍ في الكُتلةِ، ميزانٌ إلكترونيٌّ (حسّاسٌ)، ثلاثةُ حواملِ أثقالٍ متماثلةٍ.

إرشاداتُ السلامةِ: الحذرُ منْ سقوطِ الأجسامِ والأدواتِ على القدميْنِ.

خطواتُ العملِ:

بالتعاونِ معَ أفرادِ مجموعتي، أُنفِّذُ الخطواتِ الآتيةَ:

1. أضعُ طاولةَ القوى على سطحٍ مستوٍ، وأستعملُ الميزانَ لقياسِ كتلةِ حاملِ الأثقالِ، ثم أُدَوِّنُ النتيجةَ.
2. أضعُ ثقلًا على كلِّ حاملٍ، ثمَّ أضبطُ خيطَ أحدِ الحواملِ على تدريجِ الصفرِ $0°$، وخيطًا لحاملٍ آخرَ على تدريجِ $120°$، وأُحرِّكُ خيطَ الحاملِ المُتبقِّيَ حتّى ينطبقَ مركزُ الحلقةِ على مركزِ طاولةِ القوى، ثمَّ أُدَوِّنُ التدريجَ الذي انطبقَ عليْهِ الخيطُ.
3. أُكرِّرُ الخطوةَ الثانيةَ باستخدامِ ثلاثةِ أثقالٍ أخرى متساويةٍ. هلْ تغيَّرَتِ النتائجُ؟

التحليلُ والاستنتاجُ:

1. **أحسُبُ** القوى الثلاثَ المُؤثِّرةَ في الحلقةِ باستخدامِ العلاقةِ: $F = mg$، حيثُ m: (كتلةُ حاملِ الثِّقْلِ + كتلةِ الثِّقْلِ). ما مقدارُ محصلةِ تلكَ القوى؟
2. **أحسُبُ** بيانيًا محصلةَ القُوَّتيْنِ: الأولى، والثانيةِ.
3. **أقارِنُ** محصلةَ هاتيْنِ القُوَّتيْنِ بالقُوَّةِ الثالثةِ منْ حيثُ: المقدارُ، والاتجاهُ.
4. **أستنتجُ** استنادًا إلى تجربتي، علاقةَ محصلةِ أيِّ قُوَّتيْنِ بالقُوَّةِ الثالثةِ عندَ الاتزانِ (انطباقُ مركزِ الحلقةِ على مركزِ الطاولةِ).
5. **أحسُبُ** بيانيًا محصلةَ القوى الثلاثِ، ثمَّ أُفسِّرُ النتيجةَ.
6. **أقارِنُ** نتائجَ مجموعتي بنتائجِ المجموعاتِ الأخرى.

تمرينٌ

شحنةٌ كهربائيةٌ تُؤثِّرُ فيها ثلاثُ قوى كهربائيةٍ على النحوِ الآتي:

200 N في اتجاهِ الجنوبِ، 300 N في اتجاهِ يَصنعُ زاويةً مقدارُها $53°$ شمالَ الغربِ، 500 N في اتجاهِ الغربِ.

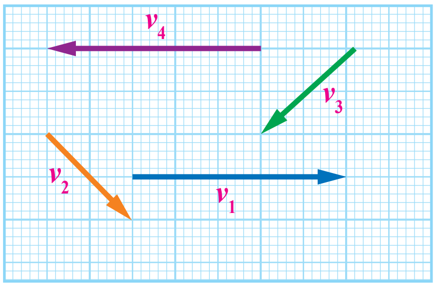
أَجِدُ مقدارَ محصلةِ القوى الكهربائيةِ المُؤثِّرةِ في الشحنةِ واتجاهَها بيانيًا.

المثالُ 11

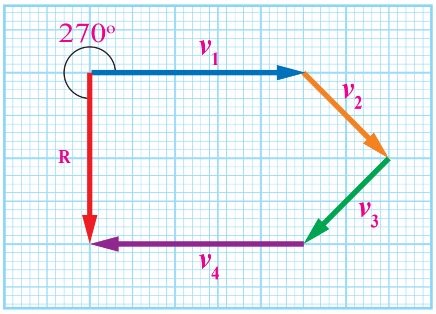
مُثِّلَتْ أربعةُ مُتَّجِهاتٍ للسرعةِ (v_1 , v_2 , v_3 , v_4) بالرسمِ، كما في الشكلِ (19)، وذلكَ باستخدامِ مقياسِ الرسمِ (1 cm:5 m/s). أَجِدُ:

أ . مقدارَ مُتَّجِهِ محصلةِ السرعةِ، واتجاهَهُ.

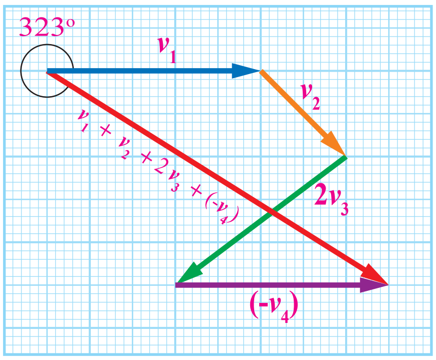
ب. $v_1 + v_2 + 2\,v_3 - v_4$



الشكلُ (19): مُتَّجِهاتُ السرعةِ.



الشكلُ (20): محصلةُ السرعةِ.



الشكلُ(21): مجموعُ المُتَّجِهاتِ.

الحلُّ:

أ . بتطبيقِ طريقةِ المُضلَّعِ، كما في الشكلِ (20)، فإنَّ طولَ سهمِ المحصلةِ $\boldsymbol{R}$ هوَ 4 cm. ووفقًا لمقياسِ الرسمِ (1cm: 5 m/s)، فإنَّ مقدارَ المحصلةِ: $R = 4 \times 5 = 20$ m/s، واتجاهَها نحوَ الجنوبِ: $(\boldsymbol{R} = 20$ m/s, $270°)$.

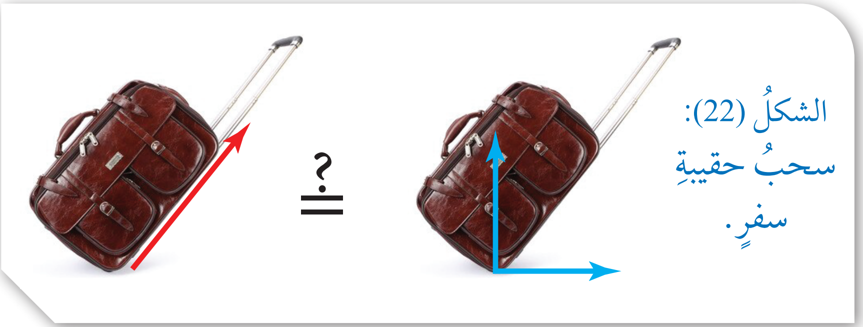
ب. بتطبيقِ طريقةِ المُضلَّعِ، كما في الشكلِ (21)، فإنَّ طولَ السهمِ الناتجِ منْ جمعِ $v_1 + v_2 + 2\,v_3 + (-v_4)$ هوَ 10 cm. ووفقًا لمقياسِ الرسمِ (1cm: 5 m/s)، فإنَّ مقدارَ مُتَّجِهِ المحصلةِ: $R = 10 \times 5 = 50$ m/s، وباستخدامِ المنقلةِ نجدُ أنَّ اتجاهَها يميلُ بزاويةِ θ مقدارُها 323° عنْ محورِ $+x$.

ب. الطريقةُ التحليليةُ Analytical Method

إنَّ استخدامَ الطريقةِ البيانيةِ في إيجادِ محصلةِ مُتَّجِهاتٍ عِدَّةٍ عمليةٌ سهلةٌ، لكنَّها قدْ تفتقرُ إلى الدقةِ. لقدْ لاحظْتُ وجودَ اختلافاتٍ بسيطةٍ بينَ نتائجي ونتائجِ زملائي عندَ استخدامي إيّاها، ويُعْزى ذلكَ إلى أخطاءٍ في عملياتِ القياسِ (قياسُ الأطوالِ والزوايا)؛ لذا سأتعرَّفُ طريقةً رياضيةً أكثرَ دقةً، هيَ تحليلُ المُتَّجِهاتِ إلى مُركَّباتِها.

تحليلُ المُتَّجِهاتِ إلى مُركَّباتِها
Resolving Vectors into Components

عندَ سحبِ حقيبةِ سفرٍ بطريقتيْنِ، كما في الشكلِ (22)، هلْ يتساوى تأثيرُ كلٍّ منْهُما في الحقيبةِ؟



الشكلُ (22): سحبُ حقيبةِ سفرٍ.

بعدَ أنْ تعرَّفْنا عمليةَ جمعِ مُتَّجِهيْنِ أوْ أكثرَ لإيجادِ مُتَّجِهٍ واحدٍ جديدٍ (مُتَّجِهُ المحصلة)، سنقومُ بعمليةٍ عكسيةٍ؛ أيْ تحليلِ المُتَّجِهِ الواحدِ والاستعاضةِ عنْهُ بمُتَّجِهيْنِ متعامدَيْنِ (على محورَيْ x وَ y مثلًا) يُسمّيانِ مُركَّبتَي المُتَّجِهِ، وتكونُ محصلتُهُما المُتَّجِهَ نفسَهُ، ويتحدانِ معَهُ في نقطةِ البدايةِ.

يُطلَقُ على هذهِ العمليةِ اسمُ **تحليلِ المُتَّجِهِ إلى مُركَّبتَيْهِ Resolving a vector into two components**. فمثلًا، يُمكِنُ تحليلُ المُتَّجِهِ A الواقعِ في الربعِ الأولِ منْ مستوى x-y، كما في الشكلِ (23)، إلى مُركَّبتَيْنِ، هما:

- المُركَّبةُ الأفقيةُ A_x: تُمثِّلُ مسقطَ المُتَّجِهِ A على محورِ $+x$.
- المُركَّبةُ العموديةُ A_y: تُمثِّلُ مسقطَ المُتَّجِهِ A على محورِ $+y$.

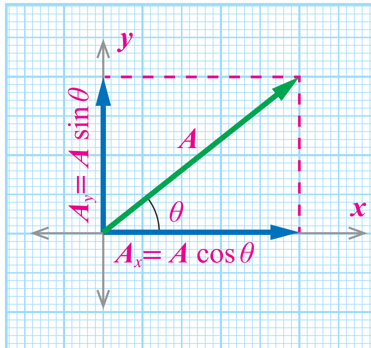
يكونُ المجموعُ المُتَّجِهيُّ للمُركَّبتَيْنِ مساويًا المُتَّجِهَ A؛ أيْ أنَّ: $\boldsymbol{A}_x + \boldsymbol{A}_y = \boldsymbol{A}$.

وبتطبيقِ النسبِ المثلثيةِ، فإنَّ:

$$\cos\theta = \frac{A_x}{A} \rightarrow A_x = A\cos\theta$$

$$\sin\theta = \frac{A_y}{A} \rightarrow A_y = A\sin\theta$$

إذْ تتغيَّرُ إشاراتُ المُركَّباتِ الأفقيةِ والعموديةِ بحسبِ الربعِ الذي يقعُ فيهِ المُتَّجِهُ، أنظرُ الشكلَ (24).



الشكلُ (23): تحليلُ المُتَّجِهِ A إلى مُركَّبتَيْهِ.

أُثبِتُ أنَّ: $A_x^2 + A_y^2 = A^2$.

(A_x, A_y) (-, +)	(A_x, A_y) (+, +)
(A_x, A_y) (-, -)	(A_x, A_y) (+, -)

الشكلُ (24): إشاراتُ المُركَّبتَيْنِ: (A_x, A_y).

ولمّا كانَتِ المُركَّبتانِ: (A_x , A_y) تُشكِّلانِ ضلعيْنِ في مثلثٍ قائمِ الزاويةِ، والمُتَّجِهِ A يُمثِّلُ وترَ المثلثِ، فإنَّ مقدارَ المُتَّجِهِ A:

بحسبِ نظريةِ فيثاغورس........ $$A = \sqrt{A_x^{\,2} + A_y^{\,2}}$$

أمّا الزاويةُ المرجعيةُ θ بينَ المُتَّجِهِ ومحورِ $+x$ فيُمكِنُ حسابُها منَ العلاقةِ الآتيةِ:

$$\tan\theta = \frac{A_y}{A_x} \rightarrow \theta = \tan^{-1}\frac{A_y}{A_x}$$

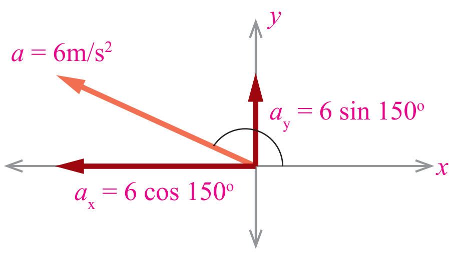
أفكِّرُ: ما علاقةُ صورةِ لاعبِ كرةِ السَّلَّةِ -في بدايةِ الوحدةِ- بتحليلِ المُتَّجِهاتِ؟

تجدرُ الإشارةُ هنا إلى أنَّنا سنحصلُ على قيمتيْنِ للزاويةِ θ، فأيُّهما تُمثِّلُ القيمةَ الصحيحةَ لموقعِ المُتَّجِهِ؟ إنَّ الذي يُحدِّدُ ذلكَ هوَ إشارةُ كلٍّ منَ المُركَّبتيْنِ: (A_x , A_y)؛ فإذا كانَتِ الإشارتانِ موجبتيْنِ دلَّ ذلكَ على أنَّ المُتَّجِهَ يقعُ في الربعِ الأولِ، كما في الشكلِ (24)، فنختارُ الزاويةَ θ التي تقعُ فيهِ، وإنْ كانتا سالبتيْنِ مثلًا، فإنَّ المُتَّجِهَ يقعُ في الربعِ الثالثِ، فنختارُ الزاويةَ θ التي تقعُ فيهِ.

أتحقَّقُ: ما المقصودُ بتحليلِ المُتَّجِهِ؟

المثالُ 12

تتحرَّكُ مركبةٌ بتسارُعٍ ثابتٍ $(a = 6\ m/s^2 , 150^o)$. أَجِدُ مقدارَ المُركَّبتيْنِ الأفقيةِ والعموديةِ للتسارعِ، ثمَّ أُحدِّدُ اتجاهَ كلٍّ منْهُما.



الشكلُ (25): المُركَّبةُ الأفقيةُ، والمُركَّبةُ العموديةُ للتسارعِ.

المعطياتُ: $(a = 6\ m/s^2 , 150^o)$.

المطلوبُ: $a_x = ?\ ,\ a_y = ?$.

الحلُّ:

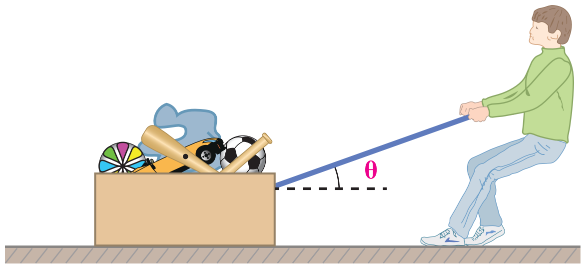
المُركَّبةُ الأفقيةُ: $a_x = a\cos\theta = 6 \times \cos 150^o = 6 \times -\cos 30^o = -5.2\ m/s^2$

المُركَّبةُ العموديةُ: $a_y = a\sin\theta = 6 \times \sin 150^o = 6 \times \sin 30^o = 3\ m/s^2$

يُلاحَظُ أنَّ إشارةَ a_x سالبةٌ؛ ما يعني أنَّ اتجاهَها هوَ في اتجاهِ $(-x)$، وأنَّ إشارةَ a_y موجبةٌ؛ ما يعني أنَّ اتجاهَها هوَ في اتجاهِ $(+y)$، حيثُ إنَّ المُتَّجِهَ a يقعُ في الربعِ الثاني. أنظرُ الشكلَ (25).

المثالُ 13

يسحبُ عامرٌ صندوقَ ألعابِهِ بقُوَّةٍ مقدارُها 100 N في اتجاهٍ يَصنعُ زاويةً θ مقدارُها 30^o مع محورِ $+x$ كما في الشكلِ (26). أَجِدُ مقدارَ كلٍّ منَ المُركَّبتيْنِ الأفقيةِ والعموديةِ للقُوَّةِ، مُحدِّدًا اتجاهَهُما.



الشكلُ (26): عامرٌ يسحبُ الصندوقَ بقُوَّةٍ.

المعطياتُ: $F = 100$ N ، $\theta = 30^o$.

المطلوبُ: $F_x = ?$, $F_y = ?$.

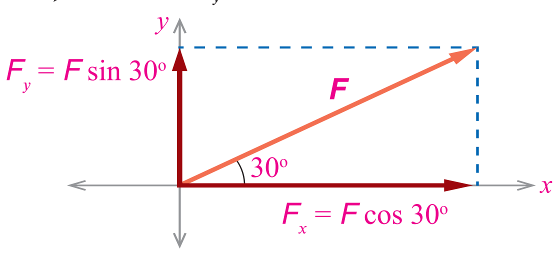
الحلُّ:

المُركَّبةُ الأفقيةُ للقُوَّةِ F_x :

$F_x = F\cos\theta = 100 \times \cos 30^o = 100 \times 0.87 = 87$ N باتجاهِ محورِ $+x$، كما في الشكلِ (27).

المُركَّبةُ العموديةُ للقُوَّةِ F_y :

$F_y = F\sin\theta = 100 \times \sin 30^o = 100 \times 0.5 = 50$ N باتجاهِ محورِ $+y$.



الشكلُ (27): المُركَّبةُ الأفقيةُ، والمُركَّبةُ العموديةُ للمُتَّجِهِ **F**.

ماذا يحدثُ لمُركَّبَتَيِ القُوَّةِ الأفقيةِ والعموديةِ إذا قلَّتِ الزاويةُ θ عنْ 30^o؟

تمرينٌ

أُطلِقَتْ قذيفةٌ بسرعةِ $\boldsymbol{v}$ ، وكانَتِ المُركَّبةُ الأفقيةُ للسرعةِ **(-20 m/s)** والمُركَّبةُ العموديةُ لها **(40 m/s)**. أَجِدُ مقدارَ السرعةِ $\boldsymbol{v}$، واتجاهَها.

محصلةُ المُتَّجِهاتِ بالطريقةِ التحليليةِ
Resultant by Analytical Method

لإيجادِ المقدارِ والاتجاهِ لمحصلةِ مُتَّجِهيْنِ أوْ أكثرَ **بالطريقةِ التحليليةِ (Analytical method)**، أتَّبِعُ الخطواتِ الآتيةَ:

- أرسمُ المُتَّجِهاتِ، بحيثُ يبدأُ كلُّ مُتَّجِهٍ بنقطةِ الأصلِ (0,0).
- أُحلِّلُ كلَّ مُتَّجِهٍ إلى مُركَّبتيهِ، مراعيًا أنْ تلتقيَ نقطةُ البدايةِ (الذيلُ) لجميعِ المُتَّجِهاتِ عندَ نقطةِ الأصلِ (0,0).
- أَجِدُ مجموعَ المُركَّباتِ على محورِ x (R_x) ومجموعَ المُركَّباتِ على محورِ y (R_y).
- أَجِدُ مقدارَ المحصلةِ R باستخدامِ العلاقةِ الآتيةِ:

$$R = \sqrt{R_x^{\ 2} + R_y^{\ 2}}$$

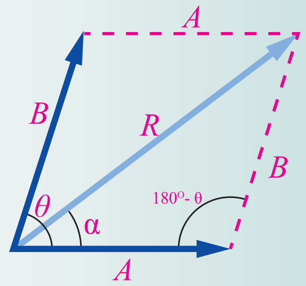
- أُحدِّدُ اتجاهَ المحصلةِ R باستخدامِ العلاقةِ الآتيةِ:

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{R_y}{R_x}$$

حيثُ α الزاويةُ بينَ اتجاهِ المحصلةِ R ومحورِ $+x$.

✓ **أتحقَّقُ:** أُحدِّدُ اتجاهَ المحصلةِ عندما يتساوى مجموعُ المُركَّباتِ على محورِ $+x$ معَ مجموعِ المُركَّباتِ على محورِ $+y$.

الربطُ بالرياضيات



لإيجادِ المحصلةِ R للمُتَّجِهيْنِ: A، وَ B اللذيْنِ بينَهُما زاويةٌ (θ) بطريقةٍ رياضيةٍ، يُستخدَمُ قانونُ جيبِ التمامِ:

$$R^2 = A^2 + B^2 - 2AB\cos(180^o - \theta)$$
$$\rightarrow R^2 = A^2 + B^2 + 2AB\cos\theta$$

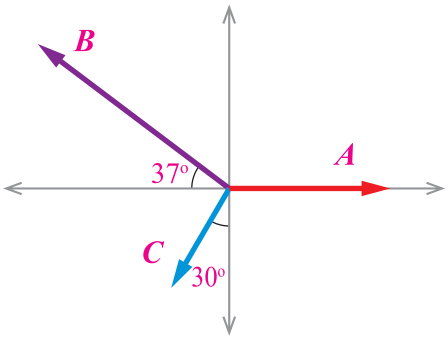
ولتحديدِ اتجاهِ المحصلةِ (الزاويةُ α)، يُستخدَمُ قانونُ الجيبِ:

$$\sin\alpha = \frac{B\sin\theta}{R}$$

أُفكِّرُ: إذا كانَ مجموعُ المُركَّباتِ على محورِ y (R_y) لمجموعةٍ منَ المُتَّجِهاتِ صفرًا، فهلْ يعني ذلكَ بالضرورةِ أنَّ جميعَ تلكَ المُتَّجِهاتِ تقعُ فقطْ على محورِ x؟ أُفسِّرُ إجابتي.

المثالُ 14

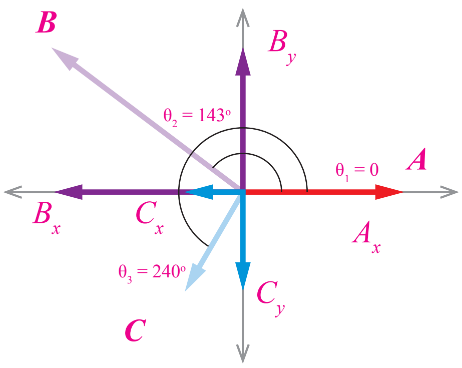
ثلاثةُ مُتَّجِهاتٍ (A, B, C) قيمُها: ($3u, 5u, 2u$) على الترتيبِ، كما في الشكلِ (28). أَجِدُ مقدارَ المحصلةِ واتجاهَها بالطريقةِ التحليليةِ.



الشكلُ (28): محصلةُ مُتَّجِهاتٍ عِدَّةٍ.

الحلُّ:

- أُحلِّلُ كلَّ مُتَّجِهٍ إلى مُركَّبتيهِ: المُركَّبةِ الأفقيةِ على محورِ x، والمُركَّبةِ العموديةِ على محورِ y، كما في الشكلِ (29)، على النحوِ الآتي:



الشكلُ (29): تحليلُ المُتَّجِهاتِ إلى مُركَّباتِها.

$A_x = A \cos\theta_1 = 3 \cos 0° = 3 \times 1 = 3\ u$

$A_y = A \sin\theta_1 = 3 \sin 0° = 3 \times 0 = 0$

$B_x = B \cos\theta_2 = 5 \cos 143° = 5 \times -0.8 = -4\ u$

$B_y = B \sin\theta_2 = 5 \sin 143° = 5 \times 0.6 = 3\ u$

$C_x = C \cos\theta_3 = 2 \cos 240° = 2 \times -0.5 = -1\ u$

$C_y = C \sin\theta_3 = 2 \sin 240° = 2 \times -0.87 = -1.74\ u$

- أَجِدُ مجموعَ المُركَّباتِ على محورِ x:

$\boldsymbol{R_x = A_x + B_x + C_x}$

$R_x = 3 - 4 - 1 = -2\ u$ .... في اتجاهِ محورِ $-x$

- أَجِدُ مجموعَ المُركَّباتِ على محورِ y:

$\boldsymbol{R_y = A_y + B_y + C_y}$

$R_y = 0 + 3 - 1.74 = 1.26\ u$ .... في اتجاهِ محورِ $+y$

- أَجِدُ مقدارَ المحصلةِ R باستخدامِ العلاقةِ الآتيةِ:

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}$$

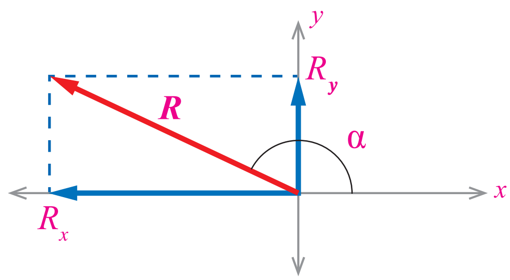
$$R = \sqrt{(-2)^2 + 1.26^2} = 2.36\ u$$

- أُحدِّدُ اتجاهَ المحصلةِ؛ أيِ الزاويةَ α بينَ اتجاهِ المحصلةِ **R** ومحورِ $+x$، كما في الشكلِ **(30)**، وذلكَ باستخدامِ المعادلةِ الآتيةِ:

$$\alpha = \tan^{-1}\frac{R_y}{R_x}$$

$$\alpha = \tan^{-1}\frac{1.26}{-2} = 148^{\circ}\ ,\ 328^{\circ}$$

أيُّ الزاويتيْنِ تُمثِّلُ الزاويةَ الصحيحةَ: 328° أَمْ 148°؟

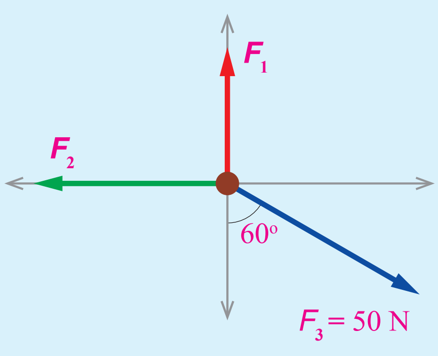


الشكلُ (30): تحديدُ مقدارِ المحصلةِ، واتجاهِها.

بعدَ دراستي وحدةَ المُتَّجَهاتِ تعرَّفْتُ سببَ توجيهِ الطيارِ الطائرةَ إلى اليسارِ بزاويةٍ معينةٍ (عكسَ اتجاهِ الرياحِ) في بندِ: أتأمَّلُ الصورةَ؛ وهوَ جعلُ اتجاهِ محصلةِ سرعتيِ الرياحِ والطائرةِ في أثناءِ هبوطِها نحوَ المَدْرجِ؛ حفاظًا على سلامةِ المسافرينَ وطاقمِ الطائرةِ، وتجنُّبًا لحدوثِ أيِّ أضرارٍ في جسمِ الطائرةِ. ولوِ افترضْنا أنَّ الطيارَ هبطَ بالطائرةِ باتجاهِ المَدْرجِ لانحرفَتِ الطائرةُ نحوَ اليمينِ، وخرجَتْ عنِ المسارِ المُحدَّدِ لها على المَدْرجِ.

تمرينٌ

- أَجِدُ مقدارَ المحصلةِ واتجاهَها في المثالِ السابقِ بيانيًّا، ثمَّ أُقارِنُ النتائجَ. ماذا أستنتجُ؟
- تُؤثِّرُ ثلاثُ قوى في نقطةٍ ماديةٍ كما في الشكلِ (31). إذا كانَتْ محصلةُ هذهِ القوى صِفرًا، فما مقدارُ كلٍّ منَ القُوَّتَيْنِ الأولى والثانيةِ؟



الشكلُ (31): ثلاثُ قوى تُؤثِّرُ في نقطةٍ ماديةٍ.

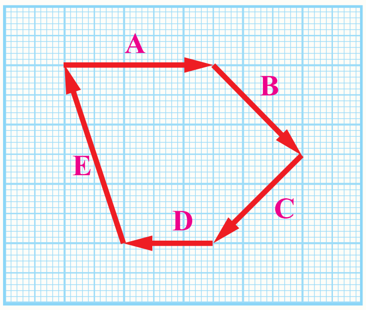
مراجعةُ الدرسِ

1. **أُقارِنُ** بينَ كلٍّ ممّا يأتي:
   أ . جمعُ المُتَّجِهاتِ وتحليلُها.
   ب . جمعُ المُتَّجِهاتِ ومحصلتُها.
   جـ . جمعُ المُتَّجِهاتِ وطرحُها.
   د . الطريقةُ التحليليةُ والطريقةُ البيانيةُ في جمعِ المُتَّجِهاتِ.

2. **أُحلِّلُ:** أُكمِلُ الفراغَ بما هوَ مناسبٌ في الجدولِ الآتي، الذي يُمثِّلُ تحليلَ المُتَّجِهاتِ إلى مُركَّباتِها:

المُتَّجِهُ	المُركَّبةُ الأفقيةُ	المُركَّبةُ العموديةُ
$(d = 8\ m\ ,\ 53^o)$	---------	--------
$(F =$ ---- ,-----$)$	6 N	- 8 N
$(v = \sqrt{200}\ m/s\ ,$ ----$)$	10 m/s	---------

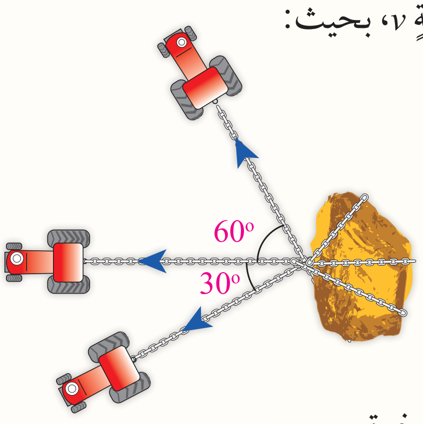
3. **أُحلِّلُ:** اعتمادًا على الشكلِ المجاورِ:



   أ . ما محصلةُ المُتَّجِهاتِ المُبيَّنةِ في الرسمِ؟
   ب . أَجِدُ بيانيًّا محصلةَ المُتَّجِهيْنِ: $\boldsymbol{B}$ و $\boldsymbol{A}$.
   جـ . أُثبِتُ بالرسمِ أنَّ: $\boldsymbol{A + B + C = -D +(-E)}$.

4. **أُقارِنُ:** قُوّتانِ متساويتانِ في المقدارِ، ما أكبرُ قيمةٍ لمحصلتِهِما؟ ما أقلُّ قيمةٍ لمحصلتِهِما؟

5. **أحسُبُ:** ما مقدارُ الزاويةِ التي تُطلَقُ بها كرةُ القدمِ بسرعةٍ مُتَّجِهةٍ $\boldsymbol{v}$، بحيثُ:
   أ . تساوي المُركَّبةُ العموديةُ للسرعةِ $\boldsymbol{v}_y$ صفرًا؟
   ب . تساوي المُركَّبةُ الأفقيةُ للسرعةِ $\boldsymbol{v}_x$ مُتَّجِهَ السرعةِ $\boldsymbol{v}$؟



6. **أُحلِّلُ:** ثلاثةُ جرّاراتٍ تحاولُ سحبَ صخرةٍ كبيرةٍ. إذا أثَّرَ كلٌّ منها بقُوَّةِ سحبٍ مقدارُها 4000 N في الاتجاهاتِ المُبيَّنةِ في الشكلِ المجاورِ:
   أ . أَجِدُ مقدارَ محصلةِ القوى التي تُؤثِّرُ بها الجرّاراتُ في الصخرةِ.
   ب . في أيِّ اتجاهٍ ستتحرَّكُ الصخرةُ؟

الإثراءُ والتوسعُ

الفيزياءُ والتكنولوجيا

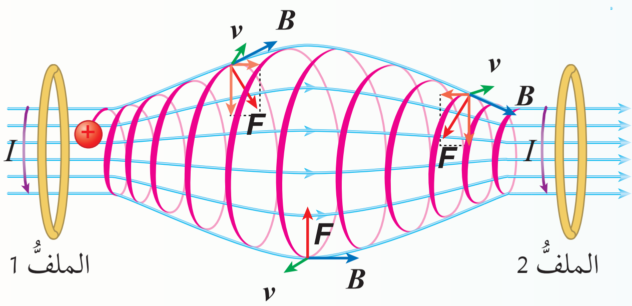
الوعاءُ المغناطيسيُّ

للمادةِ في الطبيعةِ ثلاثُ حالاتٍ، هيَ: الصُّلْبةُ، والسائلةُ، والغازيةُ. توجدُ للمادةِ أيضًا حالةٌ رابعةٌ تُسمّى البلازما، وهيَ تحوي عددًا كبيرًا جدًّا منَ الجسيماتِ المشحونةِ كهربائيًّا؛ لذا تتأثَّرُ هذهِ الجسيماتُ بالقُوَّتيْنِ: الكهربائيةِ، والمغناطيسيةِ.

تمتازُ البلازما بدرجةِ حرارتِها العاليةِ جدًّا التي قدْ تزيدُ على 11000 °C، بحيثُ لا يُمكِنُ احتواؤُها في وعاءٍ ماديٍّ؛ لأنَّها تعملُ على صهرِهِ، فكيفَ تَمكَّنَ العلماءُ منَ الاحتفاظِ بتلكَ الجسيماتِ؟

الوعاءُ (القارورةُ) المغناطيسيُّ Magnetic Bottle:

تقنيةٌ يُستخدَمُ فيها ملفّانِ كهربائيانِ لتوليدِ مجالٍ مغناطيسيٍّ مُتغيِّرِ المقدارِ والاتجاهِ؛ لاحتواءِ جسيماتٍ مشحونةٍ كهربائيًّا، وذاتِ طاقةٍ عاليةٍ جدًّا، مثلِ البلازما. وبحسبِ الشكلِ المجاورِ، فإنَّ الملفَّيْنِ الكهربائييْنِ والمجالَ المغناطيسيَّ الناتجَ منْهُما تشبهُ جميعُها شكلَ القارورةِ، فكيفَ يُمكِنُ احتواءُ مادةِ البلازما باستخدامِ هذهِ التقنيةِ؟



تناولْنا في الدرسِ الأولِ بعضَ التطبيقاتِ على الضربِ المُتَّجِهيِّ للكمياتِ المُتَّجِهةِ، ومنْها القُوَّةُ المغناطيسيةُ $\boldsymbol{F}$ التي تُؤثِّرُ في شحنةٍ كهربائيةٍ q تتحركُ بسرعةٍ $\boldsymbol{v}$ في مجالٍ مغناطيسيٍّ $\boldsymbol{B}$، وتُعطى بالعلاقةِ: $\boldsymbol{F} = q\,(\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B})$؛ حيثُ يكونُ اتجاهُ القُوَّةِ مُتعامِدًا معَ كلٍّ منْ سرعةِ الشحنةِ والمجالِ المغناطيسيِّ. وهذهِ القُوَّةُ المغناطيسيةُ تُؤثِّرُ بمُركَّبتِها في الجسيماتِ المشحونةِ بحيثُ تُبقيها مُتحرِّكةً بينَ الملفَّيْنِ -ذهابًا، وإيابًا- حركةً تذبذبيةً منْ دونِ مغادرتِها منطقةَ المجالِ المغناطيسيِّ.

أبحث مستعينًا بمصادرِ المعرفةِ المناسبةِ، أبحثُ عنْ تطبيقاتٍ أُخرى للمُتَّجِهاتِ، ثمَّ أكتبُ تقريرًا عنْ ذلكَ، وأقرأُهُ أمامَ الطلبةِ في غرفةِ الصفِّ.

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

1. الكميةُ المُتَّجِهةُ منَ الكمياتِ الفيزيائيةِ الآتيةِ، هيَ:

أ . عددُ المسافرينَ في الطائرةِ.

ب . المدَّةُ الزمنيةُ لإقلاعِ الطائرةِ.

جـ . تسارعُ الطائرةِ في أثناءِ إقلاعِها.

د . حجمُ وقودِ الطائرةِ.

2. عندَ جمعِ القُوَّتيْنِ: 30 N وَ 20 N جمعًا مُتَّجِهًا، فإنَّ الناتجَ غيرَ الصحيحِ منَ النواتجِ المُحتملةِ الآتيةِ، هوَ:

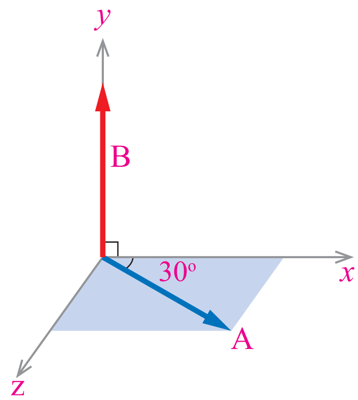
أ . 10 N

ب . 20 N

جـ . 50 N

د . 55 N

3. ناتجُ الضربِ المُتَّجِهيِّ $|\boldsymbol{A} \times \boldsymbol{B}|$ في الشكلِ المجاورِ، هوَ:



أ . $AB \sin 90^{\circ}$

ب . $AB \sin 30^{\circ}$

جـ . $AB \sin 120^{\circ}$

د . $AB \cos 90^{\circ}$

4. العلاقةُ بينَ مُتَّجِهَيِ التسارُعِ $\boldsymbol{a}_2$، $\boldsymbol{a}_1$ بناءً على العلاقةِ $(\boldsymbol{a}_1 - \boldsymbol{a}_2 = 0)$، هيَ:

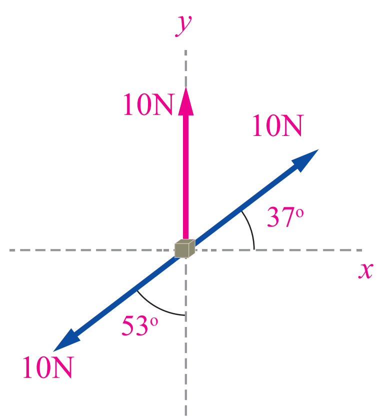
أ . المُتَّجِهانِ $\boldsymbol{a}_2$ ، $\boldsymbol{a}_1$ متساويانِ في المقدارِ، ومتعاكسانِ في الاتجاهِ.

ب . المُتَّجِهانِ $\boldsymbol{a}_2$ ، $\boldsymbol{a}_1$ متساويانِ في المقدارِ، وفي الاتجاهِ نفسِهِ.

جـ . المُتَّجِهانِ $\boldsymbol{a}_2$ ، $\boldsymbol{a}_1$ مختلفانِ في المقدارِ، وفي الاتجاهِ نفسِهِ.

د . المُتَّجِهانِ $\boldsymbol{a}_2$ ، $\boldsymbol{a}_1$ مختلفانِ في المقدارِ، ومتعاكسانِ في الاتجاهِ.

5. مقدارُ محصلةِ القوى واتجاهُها في الشكلِ المجاورِ، هما:



أ . 30 N باتجاهِ محورِ $+y$

ب . 30 N باتجاهِ محورِ $-y$

جـ . 10 N باتجاهِ محورِ $+y$

د . 0 N

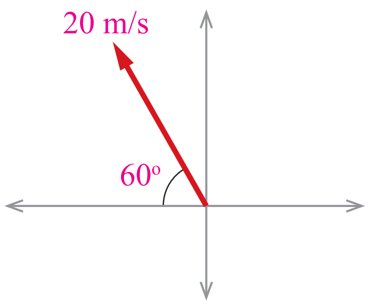
6. صوَّبَتْ سعادُ كرةَ السَّلَّةِ بسرعةٍ مقدارُها 20 m/s في الاتجاهِ المُبيَّنِ في الشكلِ المجاورِ. أيُّ الآتيةِ تُمثِّلُ المُركَّبةَ الأفقيةَ للسرعةِ:

أ . $20 \cos 120^{o}$؟

ب . $20 \cos 60^{o}$؟

جـ . $20 \sin 120^{o}$؟

د . $20 \cos 30^{o}$؟



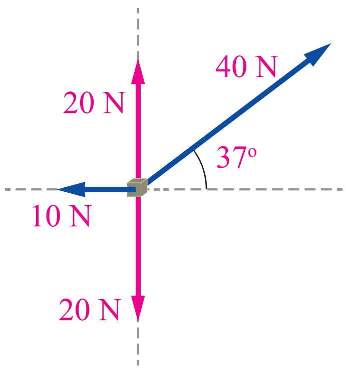
2. **أحلِّلُ: ركلَ لاعبٌ كرةَ قدمٍ كتلتُها 0.4 kg لتنطلقَ بسرعةٍ 30 m/s في اتجاهٍ يَصنعُ زاويةً مقدارُها 37º معَ سطحِ الأرضِ الأفقيِّ، وبتسارُعٍ مقدارُهُ $10\ m/s^2$. استغرقَتِ الكرةُ مدَّةً زمنيةً مقدارُها 6 s لتعودَ إلى مستوى سطحِ الأرضِ:**

أ . أُحدِّدُ الكمياتِ المُتَّجِهةَ والكمياتِ القياسيةَ.

ب . أُمثِّلُ الكمياتِ المُتَّجِهةَ بيانيًّا.

جـ . هلْ يُمكِنُ إيجادُ محصلةِ تلكَ الكمياتِ المُتَّجِهةِ؟ أُفسِّرُ إجابتي.

3. **أحلِّلُ: تُؤثِّرُ قوًى عِدَّةٌ في جسمٍ، كما في الشكلِ المجاورِ.**
أجِدُ المقدارَ والاتجاهَ لمحصلةِ القوى المُؤثِّرةِ في الجسمِ بالطريقةِ التحليليةِ.



4. **أحسُبُ: مُتَّجِهانِ: الأولُ $F = 8$ N في اتجاهِ محورِ $(-y)$، والثاني $r = 5$ m في اتجاهِ محورِ $(+x)$. أجِدُ:**

أ . $3\ \boldsymbol{F}$

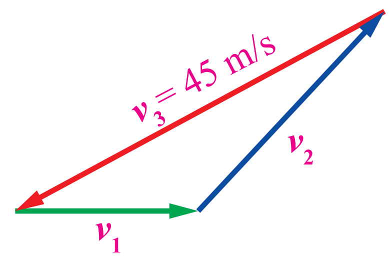
ب . $-0.5\ \boldsymbol{r}$

جـ . $|\boldsymbol{r} \times \boldsymbol{F}|$

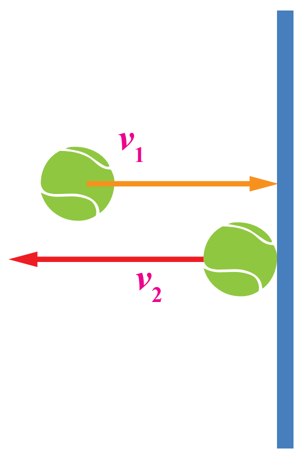
د . $|\boldsymbol{r} \times \boldsymbol{r}|$

هـ . $\boldsymbol{F} \cdot \boldsymbol{r}$

5. **حلُّ المشكلاتِ: انطلقَتْ نورُ منْ منزلِها سيرًا على الأقدامِ، وقطعَتْ مسافةَ 400 m باتجاهِ الغربِ، ثمَّ اتجهَتْ شمالًا، وقطعَتْ مسافةَ 200 m لتصلَ منزلَ صديقتِها. إذا أرادَتْ نورُ العودةَ مباشرةً إلى منزلِها بخطٍّ مستقيمٍ، فكمْ مترًا يجبُ أنْ تسيرَ؟ في أيِّ اتجاهٍ يتعيَّنُ عليْها السيرُ حتّى تصلَ منزلَها؟**



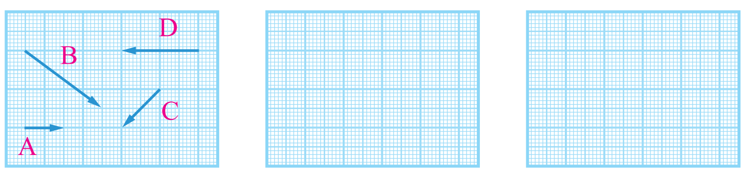
6. ثلاثةُ مُتَّجِهاتٍ للسرعةِ تُشكِّلُ مثلثًا مغلقًا، كما في الشكلِ المجاورِ. أَجِدُ:
   أ . $v_1 + v_2$
   ب . محصلةَ المُتَّجِهاتِ الثلاثةِ.



7. **أحسُبُ:** صوَّبَتْ سارةُ كرةَ تنسٍ أفقيًّا نحوَ جدارٍ عموديٍّ، فاصطدمَتْ بهِ بسرعةٍ أفقيةٍ v_1 مقدارُها 10 m/s باتجاهِ الشرقِ، كما في الشكلِ المجاورِ، ثمَّ ارتدَّتْ عنْهُ أفقيًّا نحوَ الغربِ بسرعةٍ v_2 مقدارُها 7 m/s. أَجِدُ التغيُّرَ في سرعةِ الكرةِ $(\Delta v = v_2 - v_1)$.

8. **أستنتجُ:** ما مقدارُ الزاويةِ بينَ المُتَّجِهيْنِ: $\boldsymbol{A}$ وَ $\boldsymbol{B}$ في الحالتيْنِ الآتيتيْنِ:
   أ . $|\boldsymbol{A} \times \boldsymbol{B}| = A\,B$؟
   ب . $\boldsymbol{A}.\boldsymbol{B} = A\,B$؟

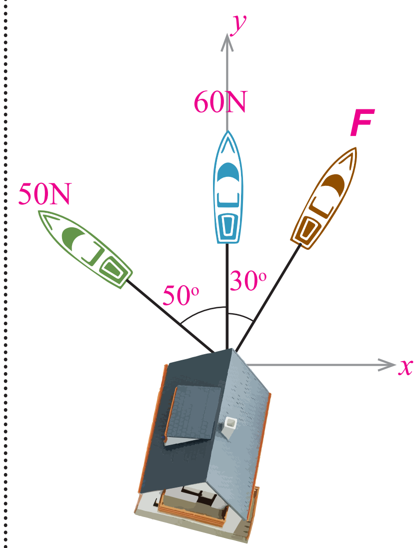
9. أستخدمُ الطريقةَ البيانيةَ في حسابِ ناتجِ جمعِ المُتَّجِهاتِ وطرحِها، كما هوَ مُبيَّنٌ في الشكلِ الآتي:



ناتجُ جمعٍ: $2A + B - C + 1.5\,D$

المحصلةُ $\boldsymbol{R}$

المُتَّجِهاتُ: $\boldsymbol{A}$، وَ $\boldsymbol{B}$، وَ $\boldsymbol{C}$، وَ $\boldsymbol{D}$ حيثُ يُمثِّلُ كلُّ مربعٍ في الرسمِ وحدةً واحدةً $(1u)$.



10. **أحلِّلُ:** ثلاثةُ قواربَ، كلٌّ منْها يُؤثِّرُ بقُوَّةٍ في منزلٍ عائمٍ على الماءِ لسحبِهِ، كما في الشكلِ المجاورِ. إذا تحرَّكَ المنزلُ باتجاهِ محورِ $(+y)$، فأَجِدُ:
   أ . مقدارَ القُوَّةِ $\boldsymbol{F}$.
   ب . مقدارَ محصلةِ القوى الثلاثِ، مُحدِّدًا اتجاهَها.

الوحدةُ

2

الحركةُ

Motion

أتأمَّلُ الصورةَ

يُرتِّبُ اللاعبُ كراتَ البلياردو على شكلِ مثلثٍ، ثمَّ يبدأُ اللعبَ مُستعمِلًا عصًا خاصةً بضربِ الكرةِ البيضاءِ نحوَ هذا التجمُّعِ، فتتحرَّكُ كراتُ البلياردو في اتجاهاتٍ مُتعدِّدةٍ، غيرَ أنَّ كلَّ كرةٍ تتحرَّكُ وحدَها على خطٍّ مستقيمٍ. فهلْ يُمكِنُ وصفُ حركةِ كلِّ كرةٍ بأنَّها منتظمةٌ؟

الفكرةُ العامةُ:

لدراسةِ حركةِ أيِّ جسمٍ، سواءٌ أكانَ قريبًا حولَنا أمْ بعيدًا في الفضاءِ، يتعيَّنُ علينا أنْ نصفَ مكانَ وجـودِهِ الآنَ، والمكانَ الذي وُجِدَ فيـهِ قديمًا، وأينَ سيكونُ بعدَ زمنٍ.

الـــدرسُ الأولُ: الحركــةُ فـــي بُعْـــدٍ واحــدٍ

Motion in One Dimension

الفكرةُ الرئيسةُ: الحركةُ في بُعْدٍ واحدٍ تعني أنَّ الجسمَ يتحـرَّكُ على خـطٍّ مستقيـمٍ، في اتجـاهٍ واحدٍ، أوْ في اتجاهيْنِ متعاكسيْنِ.

الـــدرسُ الثانـــي: الحركــةُ فـــي بُعْديْـــنِ

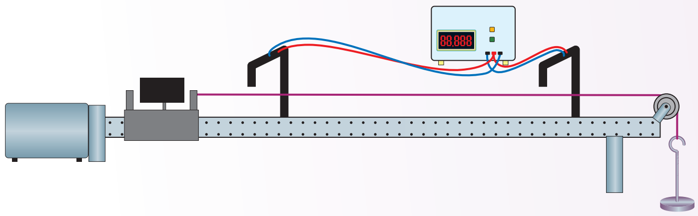
Motion in Two Dimensions

الـفكرةُ الرئيسـةُ: الحركـةُ في بُعْـديْـنِ تعني أنَّ لسرعـةِ الجسمِ مُركَّبتيْنِ متعامدتيْنِ مـنْ دونِ اعتمادِ إحداهُما على الأُخرى.

تجربة استهلالية

وصفُ الحركةِ باستخدامِ المَدْرجِ الهوائيِّ

الموادُّ والأدواتُ: مَدْرجٌ هوائيٌّ وملحقاتُهُ (بوّابتانِ ضوئيتانِ، بكرةٌ، خيطٌ، عدّادٌ زمنيٌّ رقميٌّ)، كتلتانِ: (50 g)، وَ (100 g).



إرشاداتُ السلامةِ:

الحذرُ منْ سقوطِ الأجسامِ والأدواتِ على القدمينِ.

خطواتُ العملِ:

1. أُجهِّزُ المَدْرجَ الهوائيَّ، وأُثبِّتُهُ بشكلٍ أفقيٍّ، ثمَّ أَصِلُ البوّابتيْنِ بالعدّادِ الزمنيِّ الرقميِّ على نحوٍ صحيحٍ.
2. أُثبِّتُ البكرةَ فوقَ طرفِ المَدْرجِ، ثمَّ أضعُ العربةَ على الطرفِ البعيدِ، وأربطُها بخيطٍ، ثمَّ أُمرِّرُهُ فوقَ البكرةِ.
3. أُثبِّتُ البوّابتيْنِ الضوئيتيْنِ فوقَ المَدْرجِ، بحيثُ تكونُ إحداهُما عندَ موقعِ بدايةِ الحركةِ والأُخرى عندَ موقعِ نهايتِها.
4. أربطُ الطرفَ الحرَّ للخيطِ في الكتلةِ (50 g).
5. أُشغِّلُ مضخةَ الهواءِ، وأتركُ الكتلةَ لتتحركَ منْ نقطةِ البدايةِ.
6. **أُلاحِظُ** حركةَ العربةِ، والإزاحةَ التي تقطعُها، وأنظرُ قراءةَ العدّادِ الزمنيِّ الرقميِّ.
7. **أقيسُ** المسافةَ بينَ البوّابتيْنِ الضوئيتيْنِ على طولِ المَدْرجِ، ثمَّ أُدوِّنُ نتيجةَ القياسِ في الجدولِ.
8. أُكرِّرُ التجربةَ باستخدامِ الكتلةِ الأُخرى (100 g)، ثمَّ أُدوِّنُ النتائجَ في الجدولِ.

الحالةُ (الشكل)	الإزاحةُ Δx (m)	زمنُ الحركةِ Δt (s)	السرعةُ المتوسطةُ $\bar{v}$ (m/s)
الكتلةُ الأولى (50 g)			
الكتلةُ الثانيةُ (100 g)			

التحليلُ والاستنتاجُ:

1. أَجِدُ الزمنَ الكليَّ لحركةِ العربةِ في حالِ استخدامِ كلِّ كتلةٍ.
2. أَجِدُ ناتجَ قسمةِ إزاحةِ العربةِ على زمنِ الحركةِ في كلٍّ منَ الحالتيْنِ (الناتجُ هوَ السرعةُ المتوسطةُ).
3. **أُقارِنُ** النتائجَ عندَ اختلافِ الكتلةِ المُعلَّقةِ.
4. **التفكيرُ الناقدُ:** إذا كانَتْ سرعةُ العربةِ الابتدائيةُ صفرًا، فهلْ يُمكِنُ معرفةُ سرعتِها النهائيةِ بناءً على سرعتِها المتوسطةِ؟

الحركةُ في بُعْدٍ واحدٍ
Motion in One Dimension

الفكرةُ الرئيسةُ:

الحركةُ في بُعْدٍ واحدٍ تعني أنَّ الجسمَ يتحرَّكُ على خطٍّ مستقيمٍ، في اتجاهٍ واحدٍ، أوْ في اتجاهيْنِ متعاكسيْنِ.

نتاجاتُ التعلُّم:

- أُمثِّلُ المُتغيِّراتِ المُتعلِّقةَ بوصفِ الحركةِ برسومٍ بيانيةٍ.
- أُفسِّرُ رسومًا بيانيةً تتعلَّقُ بوصفِ الحركةِ.
- أُوضِّحُ معادلاتِ الحركةِ في الميكانيكا، وأستخدمُها في حلِّ المسائلِ.
- أستقصي أهميةَ التطبيقاتِ الحياتيةِ للحركةِ في بُعْدٍ واحدٍ.

المفاهيمُ والمصطلحاتُ:

الموقعُ Position.
نقطةُ الإسنادِ Reference Point.
الإزاحةُ Displacement.
المسافةُ Distance.
الحركةُ المنتظمةُ Uniform Motion.
السرعةُ القياسيةُ Speed.
السرعةُ المُتَّجِهةُ Velocity.
السرعةُ المُتَّجِهةُ المتوسطةُ Average Velocity.
السرعةُ المُتَّجِهةُ اللحظيةُ Instantaneous Velocity.
التسارُعُ Acceleration.
تسارُعُ السقوطِ الحرِّ Free Fall Acceleration.

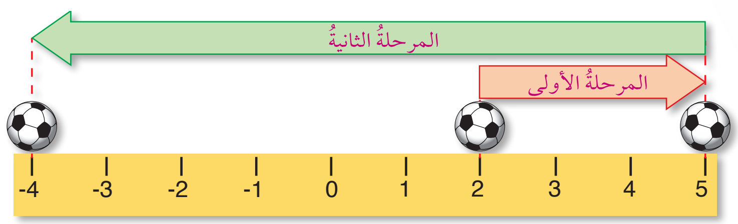
الحركةُ Motion

تتحرَّكُ الأجسامُ بطرائقَ مختلفةٍ؛ فالكرةُ مثلًا تتحرَّكُ على سطحِ الأرضِ في خطٍّ مستقيمٍ عندَ ركلِها بصورةٍ أفقيةٍ، في حينِ أنَّها تتحرَّكُ في مسارٍ مُنْحَنٍ عندَ ركلِها بزاويةٍ نحوَ الأعلى.

يوجدُ للحركةِ أشكالٌ مُتعدِّدةٌ، تُصنَّفُ ضمنَ ثلاثةِ مجالاتٍ رئيسةٍ، هيَ: الحركةُ في بُعْدٍ واحدٍ، والحركةُ في بُعْديْنِ، والحركةُ في ثلاثةِ أبعادٍ. وسندرسُ في هذهِ الوحدةِ موضوعَ الحركةِ في بُعْدٍ واحدٍ، وموضوعَ الحركةِ في بُعْديْنِ. توصَفُ حركةُ كرةٍ ما على سطحِ الأرضِ في خطٍّ مستقيمٍ بأنَّها حركةٌ في بُعْدٍ واحدٍ، سواءٌ استمرَّتِ الحركةُ في اتجاهٍ واحدٍ أوْ في اتجاهيْنِ متعاكسيْنِ.

الموقعُ والإزاحةُ Position and Displacement

عندَ تحديدِ **موقعِ (Position)** جسمٍ يُرادُ وصفُ حالتِهِ الحركيةِ، فإنَّنا نعتمدُ على أجسامٍ أُخرى قربَهُ، أوْ نعتمدُ نظامَ إحداثياتٍ متعامدةٍ و**نقطةَ إسنادٍ (Reference point)** مُحدَّدةً يُنسَبُ إليها موقعُ هذا الجسمِ. ويُطلَقُ على نظامِ الإحداثياتِ ونقطةِ الإسنادِ اسمُ الإطارِ المرجعيِّ للحركةِ. سنبدأُ بدراسةِ الحركةِ في بُعْدٍ واحدٍ. فمثلًا، قدْ يتحرَّكُ الجسمُ في خطٍّ مستقيمٍ على محورِ (x) في اتجاهٍ واحدٍ، أوْ في اتجاهيْنِ متعاكسيْنِ، أنظرُ الشكلَ (1) الذي يُوضِّحُ حركةَ كرةٍ في بُعْدٍ واحدٍ على محورِ (x).



الشكلُ (1): مفهوما الإزاحةُ والمسافةُ.

نُعبِّرُ عنْ موقعِ الكرةِ بالنسبةِ إلى نقطةِ الإسنادِ $(x = 0)$، كما يأتي:
إذا كانَ موقعُ الكرةِ على يمينِ نقطةِ الإسنادِ، فإنَّ (x) تكونُ موجبةً، في حينِ أنَّها تكونُ سالبةً إذا كانَ موقعُ الكرةِ على يسارِ تلكَ النقطةِ.

لوصفِ حركةِ الكرةِ، يجبُ أولًا تعرُّفُ مفهومِ **الإزاحةِ (Displacement)** (Δx)، وهيَ الفرقُ بينَ مُتَّجِهِ موقعِ الكرةِ النهائيِّ (x_2) ومُتَّجِهِ موقعِها الابتدائيِّ (x_1)، وذلكَ باستخدامِ العلاقةِ:

$$\Delta x = x_2 - x_1$$

في المرحلةِ الأولى منَ الحركةِ انتقلَتِ الكرةُ منَ الموقعِ $x_1 = 2\text{m}$ إلى الموقعِ $x_2 = 5\text{ m}$؛ لذا تكونُ إزاحةُ الكرةِ:

$$(\Delta x)_1 = 5 - 2 = 3\text{m}$$

ومنَ المُلاحَظِ أنَّ إشارةَ الإزاحةِ موجبةٌ؛ ما يعني أنَّ الكرةَ تحرَّكَتْ في اتجاهِ محورِ (x) الموجبِ.

أمّا إزاحةُ الكرةِ في المرحلةِ الثانيةِ منَ الحركةِ، فهيَ:

$$(\Delta x)_2 = -4 - 5 = -9\text{ m}$$

والإشارةُ السالبةُ تعني أنَّ الكرةَ تحرَّكَتْ في اتجاهِ محورِ (x) السالبِ.

يُمكِنُ حسابُ الإزاحةِ الكليةِ للكرةِ مباشرةً بإيجادِ الفرقِ بينَ موقعَيِ الكرةِ الابتدائيِّ والنهائيِّ كما يأتي:

$$\Delta x = -4 - (+2) = -6\text{ m}$$

وهذا يُمثِّلُ حاصلَ جمعِ الإزاحتَيْنِ لمرحلتَيِ الحركةِ الأولى والحركةِ الثانيةِ:

$$\Delta x = (+3) + (-9) = -6\text{ m}$$

يُمكِنُ أيضًا وصفُ حركةِ الكرةِ باستخدامِ مفهومِ **المسافةِ (Distance)**، وهيَ كميةٌ قياسيةٌ قيمتُها تُساوي طولَ المسارِ الفعليِّ الذي اتَّبَعَهُ الجسمُ، ويُرمَزُ إليْها بالرمزِ (S). يَتبيَّنُ منَ الشكلِ (1) أنَّ المسافةَ الكليةَ التي قطعَتْها الكرةُ (S) هيَ المسافةُ المقطوعةُ في المرحلةِ الأولى $(S_1 = 3\text{m})$، مضافًا إليها المسافةُ المقطوعةُ في المرحلةِ الثانيةِ $(S_2 = 9\text{ m})$، وهيَ:

$$S = S_1 + S_2 = 3 + 9 = 12\text{ m}$$

أتحقَّقُ: فيمَ تختلفُ المسافةُ التي قطعَتْها الكرةُ عنِ الإزاحةِ التي أحدثَتْها في هذهِ الحركةِ؟ أيُّهما أكبرُ: المسافةُ أمْ مقدارُ الإزاحةِ؟

أفكِّرُ: هلْ يستطيعُ جسمٌ مُتحرِّكٌ أنْ يُغيِّرَ موقعَهُ أكثرَ منْ مرَّةٍ بحيثُ تكونُ إزاحتُهُ صفرًا؟ أُوضِّحُ إجابتي.

السرعةُ المتوسطةُ

السرعةُ القياسيةُ المتوسطةُ Average Speed

يُمكِنُ وصفُ الحركةِ باستخدامِ مفهومِ **السرعةِ القياسيةِ المتوسطةِ (Average speed)** ($\overline{v}_s$)، التي تُحسَبُ بقسمةِ طولِ المسارِ الفعليِّ الذي يقطعُهُ الجسمُ (S) على الزمنِ الكليِّ للحركةِ (Δt):

$$\overline{v}_s = \frac{S}{\Delta t}$$

تقاسُ السرعةُ بوحدةِ (m/s) بحسبِ النظامِ الدوليِّ لوحداتِ القياسِ. ولأنَّ المسافةَ كميةٌ لا اتجاهَ لها فإنَّ السرعةَ القياسيةَ أيضًا ليسَ لها اتجاهٌ. فمثلًا، الطائرةُ التي تصلُ إلى دولةِ قَطَرَ منْ عمّانَ في ثلاثِ ساعاتٍ وربعِ الساعةِ، وتقطعُ مسافةَ (2600 km)، وتُغيِّرُ مقدارَ سرعتِها واتجاهَ طيرانِها مرّاتٍ عِدَّةً، في هذهِ الأثناءِ، يُمكِنُ حسابُ سرعةِ الطائرةِ القياسيةِ المتوسطةِ بقسمةِ المسافةِ التي قطعَتْها على زمنِ الطيرانِ، فيكونُ الناتجُ (800 km/h).

السرعةُ المُتَّجِهةُ المتوسطةُ Average Velocity

تعتمدُ **السرعةُ المُتَّجِهةُ المتوسطةُ (Average velocity)** للجسمِ على إزاحتِهِ، وعلى الزمنِ اللازمِ لحدوثِ تلكَ الإزاحةِ، ويُرمَزُ إلى هذهِ السرعةِ بالرمزِ ($\overline{v}$)، وتُحسَبُ بقسمةِ الإزاحةِ الكليةِ للجسمِ على الزمنِ الكليِّ اللازمِ لقطعِ الإزاحةِ:

$$\overline{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}$$

يُذْكَرُ أنَّ السرعةَ المتوسطةَ تُحسَبُ خلالَ مدَّةٍ زمنيةٍ ($\Delta t = t_2 - t_1$)، سواءٌ أكانَتْ هذهِ السرعةُ قياسيةً أمْ مُتَّجِهةً.

المثال 1

قطعَ فراسٌ بدرّاجتِهِ مسافةَ (645 m) في مدَّةٍ زمنيةٍ مقدارُها (86 s). أَجِدُ سرعتَهُ القياسيةَ المتوسطةَ.

المعطياتُ: ($S = 645$ m)، ($\Delta t = 86$ s).

المطلوبُ: ($\overline{v} = ?$).

الحلُّ:

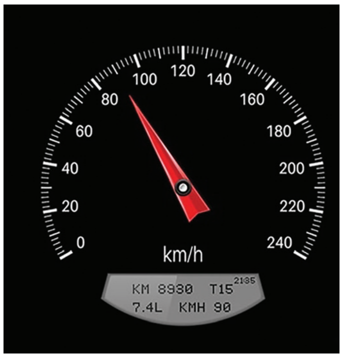
$$\overline{v}_s = \frac{S}{\Delta t} = \frac{645}{86} = 7.5 \text{ m/s}$$

السرعةُ المُتَّجِهةُ اللحظيةُ Instantaneous Velocity

إنَّ قراءةَ عدّادِ السرعةِ في السيارةِ عندَ لحظةٍ معينةٍ تُمثِّلُ **السرعةَ القياسيةَ اللحظيةَ**، كما في الشكلِ (2). وعندَ تحديدِ اتجاهِ هذهِ السرعةِ، فإنَّها تُسمّى **السرعةَ المُتَّجِهةَ اللحظيةَ Instantaneous velocity**، ويُرمَزُ إليْها بالرمزِ (v). فمثلًا، إذا كانَ اتجاهُ حركةِ السيارةِ المُبيَّنِ عدّادُ سرعتِها في الشكلِ (2) نحوَ الشمالِ، فإنَّ سرعتَها المُتَّجِهةَ اللحظيةَ هيَ 90 km/h شمالًا.

وإذا كانَتِ السرعةُ المُتَّجِهةُ (أوِ القياسيةُ) اللحظيةُ ثابتةً، فإنَّها تساوي السرعةَ المُتَّجِهةَ (أوِ القياسيةَ) المتوسطةَ دائمًا. وعندما يتحرَّكُ الجسمُ بسرعةٍ قياسيةٍ ثابتةٍ توصَفُ حركتُهُ بأنَّها منتظمةٌ.

نشيرُ إلى أنَّ كلمةَ (سرعةٌ) تعني السرعةَ المُتَّجِهةَ أينَما ورَدَتْ في هذا الكتابِ.

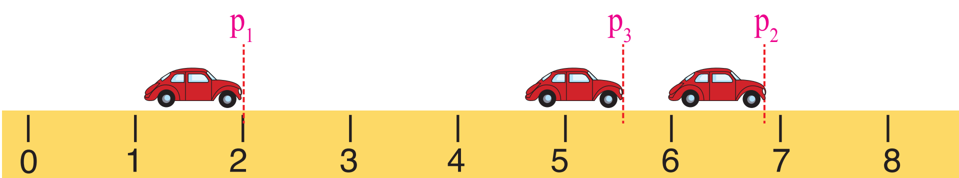


الشكلُ (2): السرعةُ اللحظيةُ.

✓ **أتحقَّقُ:** ما الشرطُ الواجبُ توافُرُهُ في الحركةِ في بُعْدٍ واحدٍ لكيْ تتساوى السرعةُ المُتَّجِهةُ المتوسطةُ معَ السرعةِ اللحظيةِ؟

المثالُ 2

وُضِعَتْ لُعْبَةُ سيارةٍ على محورِ (x)، على بُعْدِ (2 m) منْ نقطةِ الأصلِ في الاتجاهِ الموجبِ، ثمَّ حُرِّكَتْ في الاتجاهِ الموجبِ فأصبحَتْ على بُعْدِ (6.8 m) على المحورِ نفسِهِ، ثمَّ حُرِّكَتْ في الاتجاهِ السالبِ فأصبحَتْ على بُعْدِ (5.6 m)، كما في الشكلِ (3). إذا علمْتُ أنَّ الزمنَ الكليَّ للحركةِ هوَ (15 s)، فأَجِدُ:



الشكلُ (3): حركةُ لعبةِ السيارةِ.

أ . المسافةَ الكليةَ التي قطعَتْها لعبةُ السيارةِ.

ب . الإزاحةَ الكليةَ للعبةِ السيارةِ.

جـ . السرعةَ القياسيةَ المتوسطةَ للعبةِ السيارةِ.

د . السرعةَ المُتَّجِهةَ المتوسطةَ للعبةِ السيارةِ.

المعطياتُ: $x_1 = 2.0\ m$ ، $x_2 = 6.8\ m$ ، $x_3 = 5.6\ m$ ، $(\Delta t = 15\ s)$.

المطلوبُ: $\bar{v} = ?\ ,\ \bar{v}_s = ?\ ,\ \Delta x = ?\ ,\ S = ?$.

الحلُّ:

أ . المسافةُ الكليةُ التي قطعَتْها لعبةُ السيارةِ تساوي مجموعَ المسافتيْنِ: S_1، و S_2:

المسافةُ الأولى:

$$S_1 = 6.8 - 2.0 = 4.8\ m$$

المسافةُ الثانيةُ:

$$S_2 = |5.6 - 6.8| = 1.2\ m$$

المسافةُ الكليةُ:

$$S = S_1 + S_2 = 4.8 + 1.2 = 6.0\ m$$

ب . الإزاحةُ الكليةُ للعبةِ السيارةِ تساوي الفرقَ بينَ مُتَّجِهَي الموقعيْنِ: الابتدائيِّ، والنهائيِّ:

$$\Delta x = x_3 - x_1 = 5.6 - 2.0 = 3.6\ m$$

منَ المُلاحَظِ أنَّ إشارةَ الإزاحةِ موجبةٌ؛ لأنَّ إزاحةَ الجسمِ الكليةَ في اتجاهِ محورِ (x) الموجبِ.

جـ . السرعةُ القياسيةُ المتوسطةُ للعبةِ السيارةِ:

$$\bar{v}_s = \frac{S}{\Delta t} = \frac{6}{15} = 0.4\ m/s$$

د . السرعةُ المُتَّجِهةُ المتوسطةُ للعبةِ السيارةِ:

$$\bar{v}_s = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{3.6}{15} = 0.24\ m/s$$

يُلاحَظُ أنَّ السرعةَ المُتَّجِهةَ المتوسطةَ موجبةٌ؛ ما يعني أنَّها في اتجاهِ محورِ (x) الموجبِ، وأنَّهُ لا يوجدُ اتجاهٌ للسرعةِ القياسيةِ المتوسطةِ.

التسارُعُ الثابتُ Constant Acceleration

لتوضيحِ مفهومِ **التسارُعِ (Acceleration)**، أُنْعِمُ النظرَ في الجدولِ (1)، الذي يُبيِّنُ السرعاتِ المُتَّجِهةَ اللحظيةَ (v) لسيارتيْنِ تتحرَّكانِ في اتجاهِ محورِ (x) الموجبِ في الأوقاتِ الزمنيةِ المُحدَّدةِ.

يُلاحَظُ أنَّ سرعةَ السيارةِ الأولى ثابتةُ المقدارِ عندَ القيمةِ (4.0 m/s)، وكذلكَ اتجاهُها؛ ما يعني أنَّها لا تتسارعُ، أمّا سرعةُ السيارةِ الثانيةِ فمُتغيِّرةُ المقدارِ، بحيثُ تزدادُ (2 m/s) في أثناءِ كلِّ ثانيةٍ منْ زمنِ الحركةِ؛ ما يعني أنَّها تتسارعُ.

يُذْكَرُ أنَّ **التسارُعَ المتوسطَ** كميةٌ مُتَّجِهةٌ تُعطى بناتجِ قسمةِ التغيُّرِ في السرعةِ اللحظيةِ (Δv) على المدَّةِ الزمنيةِ اللازمةِ لإحداثِ التغيُّرِ في السرعةِ:

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}$$

إنَّ اتجاهَ التسارُعِ المتوسطِ يكونُ دائمًا في نفسِ اتجاهِ التغيُّرِ في السرعةِ اللحظيةِ Δv، ويُقاسُ هذا التسارُعُ بوحدةِ m/s^2، أمّا التسارُعُ اللحظيُّ (a) فيُعرَفُ عندَ لحظةٍ زمنيةٍ مُحدَّدَةٍ. وسيقتصرُ الحديثُ هنا على التسارُعِ الثابتِ؛ حيثُ يتساوى التسارُعُ المتوسطُ والتسارُعُ اللحظيُّ ($\bar{a} = a$).

أفكِّرُ: عندما تزدادُ سرعةُ السيارةِ بمقدارِ (2 m/s) في كلِّ ثانيةٍ يكونُ التسارُعُ ثابتًا. كيفَ يكونُ تسارُعُ السيارةِ غيرَ ثابتٍ؟

أستخدمُ برنامجَ الجداولِ الإلكترونيةِ (Microsoft Excel) لتمثيلِ البياناتِ في الجدولِ (1) بمخططٍ بيانيٍّ خطي.

الجدولُ (1) السرعةُ الثابتةُ، والسرعةُ المُتغيِّرةُ.

الزمنُ (s):	t_1=0	t_2=1	t_3=2	t_4=3	t_5=4
سرعةُ السيارةِ الأولى (m/s):	v_1=4.0	v_2=4.0	v_3=4.0	v_4=4.0	v_5=4.0
سرعةُ السيارةِ الثانيةِ (m/s):	v_1=0	v_2=2.0	v_3=4.0	v_4=6.0	v_5=8.0

المثالُ 3

بناءً على قيمِ الزمنِ والسرعةِ الواردةِ في الجدولِ (1)، أَجِدُ التسارُعَ المتوسطَ لكلٍّ منَ السيارتيْنِ خلالَ المدَّةِ الزمنيةِ منْ ($t_2 = 1s$) إلى ($t_3 = 2s$).

المعطياتُ: الجدولُ.

المطلوبُ: $\bar{a} = ?$.

الحلُّ:

التسارُعُ المتوسطُ للسيارةِ الأولى:

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_3 - v_2}{t_3 - t_2}$$

$$\bar{a} = \frac{4.0 - 4.0}{2 - 1} = \frac{0}{1} = 0 \text{ m/s}^2$$

التسارُعُ المتوسطُ للسيارةِ الثانيةِ:

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_3 - v_2}{t_3 - t_2}$$

$$\bar{a} = \frac{4.0 - 2.0}{2 - 1} = \frac{2.0}{1} = 2 \text{ m/s}^2$$

يُلاحَظُ أنَّ التسارُعَ المتوسطَ للسيارةِ الأولى صفرٌ؛ لأنَّ سرعتَها اللحظيةَ لَمْ تتغيَّرْ، وأنَّ السيارةَ الثانيةَ تتحرَّكُ بتسارُعٍ متوسطٍ ثابتِ المقدارِ والاتجاهِ (2 m/s^2) في اتجاهِ محورِ (x) الموجبِ؛ لذا تتغيَّرُ سرعتُها المُتَّجِهةُ اللحظيةُ باستمرارٍ.

أتحقَّقُ: أَجِدُ التسارُعَ المتوسطَ لكلٍّ منَ السيارتيْنِ في أثناءِ مُدَدٍ زمنيةٍ أُخرى؛ منْ: ($t_1 = 0$ s) إلى ($t_4 = 3$ s) مثلًا.

المثالُ 4

تحرَّكَ قطارٌ نحوَ الشرقِ في اتجاهِ محورِ ($+x$) بسرعةٍ مُتغيِّرةِ المقدارِ، وقدْ رُصِدَتْ سرعتُهُ الابتدائيةُ عندَ اللحظةِ ($t = 2$ s)، فكانَتْ (12 m/s)، ثمَّ رُصِدَتْ سرعتُهُ النهائيةُ عندَ اللحظةِ ($t = 38$ s)، فكانَتْ (30 m/s). أَجِدُ مقدارَ التسارُعِ المتوسطِ الذي تحرَّكَ بهِ القطارُ خلالَ المدَّةِ منْ ($t = 2$ s) إلى ($t = 38$ s)، ثمَّ أُحدِّدُ اتجاهَ هذا التسارُعِ.

المعطياتُ: $v_1 = 12$ m/s ، $v_2 = 30$ m/s ، $t_1 = 2$ s ، $t_2 = 38$ s .

المطلوبُ: $\bar{a} = ?$ ، اتجاهُ التسارُعِ.

الحلُّ:

$$\bar{a} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}$$

$$\bar{a} = \frac{30 - 12}{38 - 2} = \frac{18}{36} = 0.5\ m/s^2$$

يُلاحَظُ أنَّ التغيُّرَ في السرعةِ المُتَّجِهةِ اللحظيةِ (Δv) موجبٌ؛ أيْ في اتجاهِ الشرقِ؛ لذا يكونُ اتجاهُ التسارُعِ المتوسطِ نحوَ الشرقِ ($+x$)، ويتضحُ ذلكَ منْ إشارةِ التسارُعِ المتوسطِ الموجبةِ.

المثالُ 5

انطلقَ سامرٌ بزلّاجتِهِ بسرعةٍ ابتدائيةٍ (2.4 m/s) باتجاهِ الشرقِ، وبعدَ مُدّةٍ زمنيةٍ مقدارُها (3.0 s) توقَّفَتِ الزلّاجةُ عنِ الحركةِ. أَجِدُ مقدارَ التسارُعِ المتوسطِ للزلّاجةِ، مُحدِّدًا اتجاهَهُ.

المعطياتُ: $v_1 = 2.4\ m/s$ ، $v_2 = 0\ m/s$ ، $\Delta t = 3.0\ s$.

المطلوبُ: $\bar{a} = ?$ ، اتجاهُ التسارُعِ.

الحلُّ:

$$\bar{a} = \frac{v_2 - v_1}{\Delta t}$$

$$\bar{a} = \frac{0.0 - 2.4}{3.0} = \frac{-2.4}{3.0} = -0.8\ m/s^2$$

يُلاحَظُ أنَّ إشارةَ التسارُعِ المتوسطِ سالبةٌ؛ ما يعني أنَّ اتجاهَهُ نحوَ الغربِ؛ أيْ أنَّ اتجاهَ التسارُعِ بعكسِ اتجاهِ السرعةِ، وفي مثلِ هذهِ الحالةِ تكونُ الحركةُ بتباطؤٍ.

بالنظرِ إلى المثاليْنِ السابقيْنِ، نجدُ أنَّ تسارُعَ الأجسامِ يكونُ في حالتيْنِ، هما:

الحالةُ الأولى: تكونُ الأجسامُ متسارعةً عندما تتشابهُ إشارةُ التسارُعِ معَ إشارةِ السرعةِ؛ فتكونُ الإشارتانِ موجبتيْنِ (+ , +)، كما في المثالِ (4)؛ إذْ تحرَّكَ القطارُ بسرعةٍ وتسارعٍ باتجاهِ $x+$، أوْ سالبتيْنِ (- , -)؛ فيكونُ كلٌّ منَ السرعةِ والتسارُعِ باتجاهِ x-.

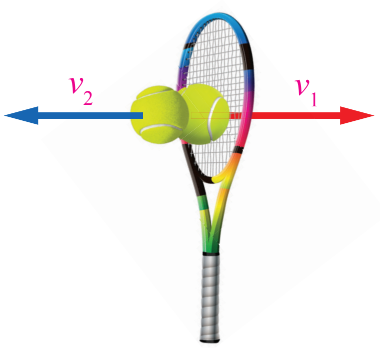
الحالةُ الثانيـةُ: تكونُ الأجسامُ متباطئةً عندما تختلفُ إشارةُ التسارُعِ عنْ إشارةِ السرعةِ؛ فتكونُ إحداهُما موجبةً والأُخرى سالبةً (- , +)، كما في المثالِ (5)؛ إذْ تحرَّكَتِ الزلّاجةُ بتباطؤٍ.

المثالُ 6

تحرَّكَتْ كرةُ تنسٍ أرضيٍّ في اتجاهِ الشرقِ معَ محورِ ($+x$) بسرعةِ (40 m/s). وفي أثناءِ مدَّةٍ زمنيةٍ مقدارُها ($\Delta t = 0.05$ s) ارتدَّتِ الكرةُ نحوَ الغربِ معَ محورِ ($-x$) بسرعةِ (40 m/s)، كما في الشكلِ (4). أَجِدُ مقدارَ تسارُعِ الكرةِ في أثناءِ هذهِ المدَّةِ، مُحدِّدًا اتجاهَهُ.

المعطياتُ: ($v_1 = +40$ m/s)، ($v_2 = -40$ m/s) ، ($\Delta t = 0.8$ s).

المطلوبُ: ($\bar{a} = ?$).



الشكلُ (4): ارتدادُ الكرةِ بعدَ تصادُمِها معَ المَضرِبِ.

الحلُّ:

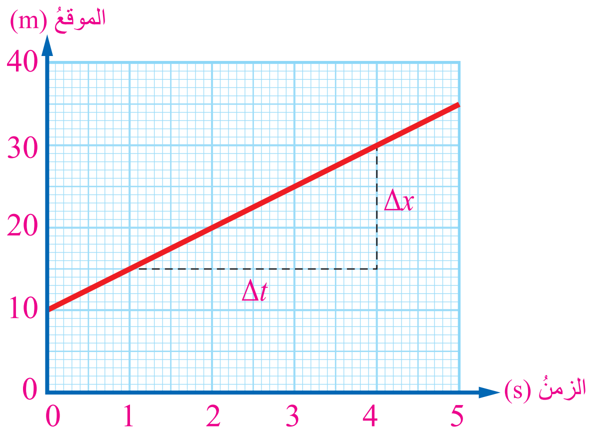
سرعةُ الكرةِ الابتدائيةُ موجبةٌ، وسرعتُها النهائيةُ سالبةٌ:

$$\bar{a} = \frac{v_2 - v_1}{\Delta t}$$

$$\bar{a} = \frac{-40 - 40}{0.05} = \frac{-80}{0.05} = -1600 \text{ m/s}^2$$

يُلاحَظُ أنَّ تسارُعَ الكرةِ سالبٌ؛ ما يعني أنَّهُ في اتجاهِ محورِ ($-x$).

أتحقَّقُ: بدأَتْ طائرةُ السيرَ على مَدرجِ المطارِ منْ وضعِ السكونِ، بحركةٍ أفقيةٍ في خطٍّ مستقيمٍ، فأصبحَتْ سرعتُها (80 m/s) بعدَ مرورِ مدَّةٍ زمنيةٍ مقدارُها ($t = 32$ s). أَجِدُ مقدارَ التسارُعِ المتوسطِ للطائرةِ في أثناءِ تلكَ المدَّةِ، ثمَّ أُحدِّدُ اتجاهَهُ.



الشكلُ (5): منحنى الموقعِ – الزمنِ.

تمثيلُ الحركةِ بيانيًّا

منحنى الموقعِ- الزمنِ Position-Time Graph

عندَ تمثيلِ الحركةِ بيانيًّا، بحيثُ يُحدَّدُ محورُ (x) لتدريجِ الزمنِ، ومحورُ (y) لتدريجِ الموقعِ، فإنَّ هذهِ العلاقةَ البيانيةَ تصفُ التغيُّرَ في موقعِ الجسمِ بالنسبةِ إلى الزمنِ، أنظرُ الشكلَ (5). وبالرجوعِ إلى منحنى هذهِ العلاقةِ يُمكِنُ معرفةُ الموقعِ الذي يوجدُ فيهِ الجسمُ المتحرِّكُ نسبةً إلى نقطةِ الإسنادِ في أيِّ لحظةٍ زمنيةٍ، وتُمثِّلُ نقطةُ الإسنادِ عادةً عندَ (0,0) على الرسمِ.

يَتبيَّنُ منَ الشكلِ (5) أنَّ الجسمَ يقعُ على بُعْدِ (15 m) منْ نقطةِ الإسنادِ عندَ اللحظةِ ($t = 1$ s)، وأنَّهُ قدْ غيَّرَ موقعَهُ، فأصبحَ على بُعْدِ (30 m) عندَ اللحظةِ ($t = 4$ s)؛ لذا، فإنَّ إزاحتَهُ في أثناءِ المدَّةِ الزمنيةِ (Δt) هيَ:

$$\Delta x = x_2 - x_1 = 30 - 15 = 15 \text{ m}$$

حيثُ:

$$\Delta t = 4 - 1 = 3 \text{ s}$$

درسْتُ في مبحثِ الرياضياتِ أنَّ ميلَ الخطِّ المستقيمِ يُعطى بالعلاقةِ الآتيةِ:

$$slope = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

اعتمادًا على الشكلِ (5)، يُمكِنُ حسابُ ميلِ الخطِّ المستقيمِ الذي

يصلُ بينَ الموقعِ الابتدائيِّ للجسمِ $(x_1 = 15\ m)$ عنـدَ الـزمنِ $(t = 1s)$ وموقعِهِ النهائيِّ $(x_2 = 30\ m)$ عندَ الزمنِ $(t = 4s)$ كما يأتي:

$$slope = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{30 - 15}{4 - 1} = \frac{15\ m}{3\ s} = 5\ m/s$$

يُلاحَـظُ أنَّ وحـدةَ الميلِ هـيَ (m/s)، وأنَّ هذهِ الوحـدةَ هيَ وحدةُ السرعــةِ نفسُهــا. ولمّـا كانَ المقـامُ فـي المعادلـةِ المذكـورةِ آنفًا هوَ المـدَّةَ الزمنيـةَ التـي حـدثَ فـي أثنائِهـا التغيُّـرُ فـي الموقعِ، فـإنَّ ميلَ الخـطِّ المسـتقيمِ في منحنـى الموقعِ – الزمـنِ يُمثِّلُ السـرعةَ المُتَّجِهةَ المتوسطةَ $(\overline{v})$.

تجدرُ الإشارةُ إلى أنَّ منحنى الموقعِ – الزمنِ يكونُ خطًّا مستقيمًا عندَ الحركـةِ بسرعـةٍ ثابتةٍ؛ حيثُ التسارُعُ يساوي صفرًا، ولا يكـونُ المنحنى مستقيمًا عندَ الحركةِ بسرعةٍ مُتغيِّرةٍ؛ حيثُ التسارُعُ لا يساوي صفرًا.

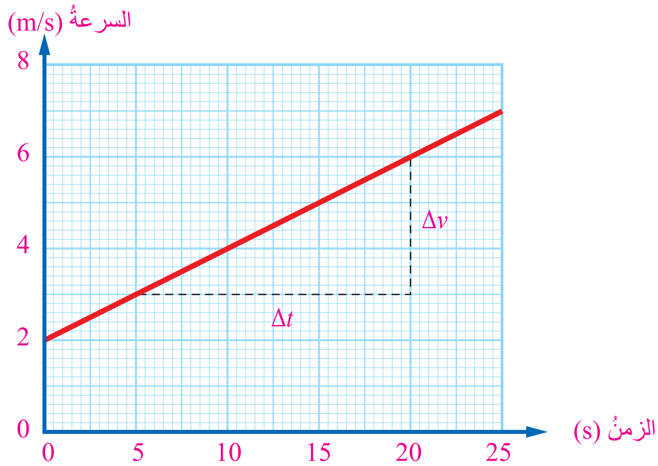
✔ **أتحقَّقُ**: أَصِفُ شكلَ منحنى الموقعِ – الزمنِ لجسمٍ يتحرَّكُ بسرعةٍ ثابتةٍ؛ مقدارًا، واتجاهًا.

منحنى السرعةِ- الزمنِ Velocity-Time Graph

عندَ تمثيلِ الحركةِ بيانيًّا، بحيثُ يُحدِّدُ محورُ (x) لتدريجِ الزمنِ، ومحورُ (y) لتدريجِ السرعةِ، ثمَّ تمثيلِ العلاقةِ بينَ السرعةِ والزمنِ بيانيًّا، فإنَّ هذهِ العلاقةَ تصفُ التغيُّرَ في سرعةِ الجسمِ بالنسبةِ إلى الزمنِ، كما في الشكلِ (6)، وتُمكِّنُنا منْ معرفةِ سرعةِ الجسمِ عندَ أيِّ لحظةٍ زمنيةٍ، فضلًا عنْ حسابِ تسارُعِ الجسمِ منْ تحليلِ الرسمِ البيانيِّ.

بناءً على تعريفِ التسارُعِ المتوسطِ، فإنَّ:

$$\overline{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}$$



الشكلُ (6): منحنى السرعةِ – الزمنِ.

بالرجوعِ إلى مفهومِ الميلِ في الرياضياتِ نجدُ أنَّ مقدارَ التسارُعِ يساوي الميلَ. ولأنَّ الميلَ في الشكلِ (6) موجبٌ؛ فإنَّ التسارُعَ يكونُ موجبًا أيضًا، وتتشابهُ إشارتا السرعةِ والتسارُعِ (+ , +)؛ لذا يتسارعُ الجسمُ في الاتجاهِ الموجبِ.

يَتبيَّنُ منَ الشكلِ (6) أنَّ التسارُعَ يساوي الميلَ:

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{6 - 3}{20 - 5} = \frac{3}{15} = 0.2\ \mathrm{m/s^2}$$

يُلاحَظُ أنَّ منحنى السرعةِ – الزمنِ خطٌّ مستقيمٌ، فيكونُ الميلُ في هذهِ الحالةِ ثابتًا، وكذلكَ التسارُعُ، ويكونُ $a = \bar{a}$.

يُستفادُ أيضًا منَ منحنى السرعةِ – الزمنِ في معرفةِ إزاحةِ الجسمِ، وذلكَ بإيجادِ المساحةِ تحتَ المنحنى؛ إذْ تساوي هذهِ المساحةُ حاصلَ ضربِ السرعةِ (وحدةُ قياسِها m/s) في المدَّةِ الزمنيةِ (وحدةُ قياسِها s)، فيُمثِّلُ حاصِلُ الضربِ الإزاحةَ (وحدةُ قياسِها $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} \times \mathrm{s} = \mathrm{m}$)؛ أيْ أنَّ الإزاحةَ تساوي عدديًّا المساحةَ المحصورةَ تحتَ المنحنى.

المثالُ 7

في تجربةٍ لدراسةِ حركةِ عربةٍ صغيرةٍ في المختبرِ، كانَتِ النتائجُ كما في الجدولِ الآتي:

الزمنُ (s):	0	5	10	15	20	25
السرعةُ (m/s):	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.0

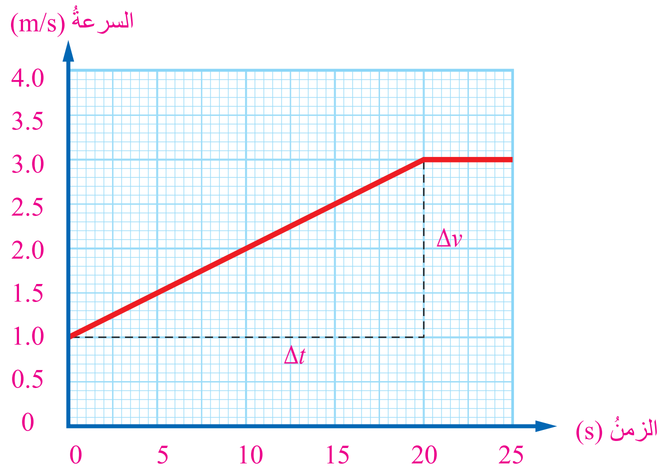
أُمثِّلُ القيمَ التي في الجدولِ بيانيًّا، ثمَّ أستنتجُ منَ المنحنى تسارُعَ العربةِ في أثناءِ المدَّةِ الزمنيةِ منْ (0 s) إلى (20 s).

المعطياتُ: قراءاتُ الزمنِ، قراءاتُ السرعةِ.

المطلوبُ: رسمُ منحنى العلاقةِ بينَ السرعةِ والزمنِ، إيجادُ التسارُعِ المتوسطِ.

الحلُّ:

رسمُ الشكلِ (7) لتمثيلِ العلاقةِ بيانيًّا.

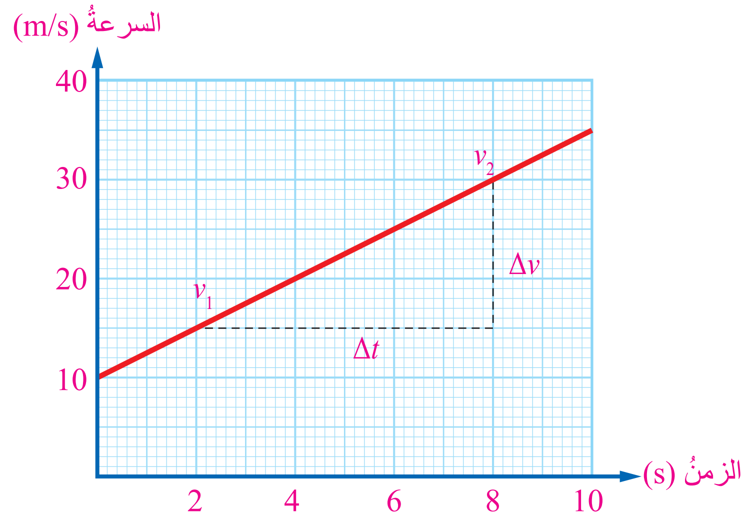


الشكلُ (7): منحنى السرعةِ – الزمنِ.

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{3.0 - 1.0}{20 - 0} = \frac{2}{20} = 0.1\ \text{m/s}^2$$

تمرينٌ

أَجِدُ المساحةَ المحصورةَ بينَ المنحنى والمحورِ الأفقيِّ (محورُ الزمنِ) بينَ اللحظتيْنِ $(t = 0\ \text{s}, t = 25\ \text{s})$ في المثالِ السابقِ.



الشكلُ (8) : التسارُعُ يساوي الميلَ.

معادلاتُ الحركةِ Equations of Motion

تعرَّفْتُ وصفَ الحركةِ في بُعدٍ واحِدٍ باستخدامِ مفهومِ الإزاحةِ، والسرعةِ، والتسارُعِ، ثمَّ وصفَها بيانيًّا، وكيفَ أُفسِّرُ الأشكالَ البيانيةَ المُتعلِّقَةَ بمُتغيِّراتِ الحركةِ.

لوصفِ الحركةِ على نحوٍ أكثرَ سهولةٍ، تُستخدَمُ ثلاثُ معادلاتٍ رياضيةٍ تساعدُ على وصفِ الحركةِ المنتظمةِ للأجسامِ في خطٍّ مستقيمٍ.

ملحوظةٌ: موضوعُ الاشتقاقِ الرياضيِّ لمعادلاتِ الحركةِ منْ موضوعاتِ المطالعةِ الذاتيةِ.

• المعادلةُ الأولى

يُمثِّلُ الشكلُ (8) منحنى السرعةِ – الزمنِ الذي يُمكِنُ إيجادُ ميلِهِ، ثمَّ حسابُ التسارُعِ الثابتِ (a) باستخدامِ العلاقةِ الآتيةِ:

$$a = \bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}$$

حيثُ تُمثِّلُ $\Delta t = t_2 - t_1$ المدَّةَ الزمنيةَ التي حدثَ خلالَها التغيُّرُ في السرعةِ. ولكنْ، عندما يكونُ زمنُ البدايةِ ($t_1 = 0$)، فإنَّ:

($\Delta t = t_2 - 0 = t$)، عندئذٍ يُمكِنُ كتابةُ العلاقةِ بالصورةِ الآتيةِ:

$$v_2 - v_1 = at$$

$$v_2 = v_1 + at \quad \text{..........} \quad (1)$$

• المعادلةُ الثانيةُ

يُمكِنُ معرفةُ السرعةِ المُتَّجِهةِ المتوسطةِ ($\overline{v}$) في حالةِ التسارُعِ الثابتِ، بإيجادِ المتوسطِ الحسابيِّ للسرعةِ الابتدائيةِ والسرعةِ النهائيةِ:

$$\overline{v} = \frac{v_2 + v_1}{2}$$

تُعطى السرعةُ المُتَّجِهةُ المتوسطةُ بدلالةِ الإزاحةِ الكليةِ للجسمِ منَ العلاقةِ الآتيةِ:

$$\overline{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\Delta x}{t}$$

حيثُ تُمثِّلُ $\Delta x = x_2 - x_1$ الإزاحةَ التي حدثَتْ للجسمِ.

بالمساواةِ بينَ العلاقتيْنِ السابقتيْنِ، تنتجُ العلاقةُ الآتيةُ:

$$\Delta x = \frac{1}{2}(v_2 + v_1)t$$

بتعويضِ قيمةِ السرعةِ النهائيةِ (v_2) منَ المعادلةِ الأولى، تنتجُ العلاقةُ الآتيةُ:

$$\Delta x = v_1 t + \frac{1}{2} at^2 \quad \text{.........................} \; 2$$

• المعادلةُ الثالثةُ

بناءً على العلاقةِ الخاصةِ بالسرعةِ المُتَّجِهةِ المتوسطةِ، فإنَّ:

$$\frac{\Delta x}{t} = \frac{v_2 + v_1}{2}$$

وبناءً على المعادلةِ الأولى في الحركةِ، فإنَّ:

$$v_2 - v_1 = at$$

بتعويضِ قيمةِ (t) منْ إحدى العلاقتيْنِ في الأُخرى، فإنَّ:

$$(v_2 - v_1)(v_2 + v_1) = 2a\Delta x$$

$$v_2^2 = v_1^2 + 2a\Delta x \quad \text{.........................} \; 3$$

ولكنْ، عندما يكونُ موقعُ البدايةِ ($x_1 = 0$)، فإنَّ:

$$(\Delta x = x_2 - 0 = x)$$

عندئذٍ يُمكِنُ كتابةُ المعادلاتِ السابقةِ بدلالةِ (x).

أُفكِّرُ: في الحركةِ بتسارُعٍ ثابتٍ؛ حيثُ يكونُ التغيُّرُ في السرعةِ منتظمًا، تتساوى السرعةُ المتوسطةُ مَعَ المتوسطِ الحسابيِّ للسرعتيْنِ الابتدائيةِ والنهائيةِ $\overline{v} = \frac{1}{2}(v_1 + v_2)$. لماذا لا يكونُ ذلكَ صحيحًا عندما تتغيَّرُ السرعةُ على نحوٍ غيرِ منتظمٍ؟

المثالُ 8

انطلقَتْ نسرينُ بدرّاجتِها الهوائيةِ منْ وضعِ السكونِ بسرعةٍ أفقيةٍ في خطٍّ مستقيمٍ، بتسارُعٍ ثابتٍ مقدارُهُ ($5\ m/s^2$). أَجِدُ:

أ . السرعةَ النهائيةَ بعدَ مرورِ زمنٍ مقدارُهُ ($6.4\ s$).

ب . الإزاحةَ الكليةَ التي قطعَتْها الدرّاجةُ.

المعطياتُ: ($v_1 = 0\ m/s$)، ($a = 5\ m/s^2$)، ($t = 6.4\ s$).

المطلوبُ: ($v_2 = ?$)، ($\Delta x = ?$).

الحلُّ:

أ . لإيجادِ السرعةِ النهائيةِ، تُستخدَمُ المعادلةُ الأولى:

$$v_2 = v_1 + at$$

$$v_2 = 0 + 5 \times 6.4 = 32\ m/s$$

ب. لإيجادِ الإزاحةِ الكليةِ التي قطعَتْها الدرّاجةُ، تُستخدَمُ المعادلةُ الثانيةُ:

$$\Delta x = v_1 t + \frac{1}{2} at^2$$

$$\Delta x = 0 + \frac{1}{2} \times 5 \times (6.4)^2 = 102.4\ m$$

المثالُ 9

سارَ قطارٌ بسرعةٍ أفقيةٍ مقدارُها (20 m/s) في خطٍّ مستقيمٍ، ثمَّ نقصَتْ سرعتُهُ في أثناءِ إزاحةٍ مقدارُها (128 m)، فأصبحَتْ (4 m/s). أَجِدْ تسارُعَ القطارِ.

المعطياتُ: $(v_1 = 20\ \text{m/s})$، $(v_2 = 4\ \text{m/s})$، $(\Delta x = 128\ \text{m})$.

المطلوبُ: $(a = ?)$.

الحلُّ:

لإيجادِ تسارُعِ القطارِ منْ دونِ معرفةِ الزمنِ، تُستخدَمُ المعادلةُ الثالثةُ:

$$v_2^2 = v_1^2 + 2a\Delta x$$

$$(4)^2 = (20)^2 + 2a \times 128$$

$$a = \frac{16 - 400}{2 \times 128} = -1.5\ \text{m/s}^2$$

تمرينٌ

في المثالِ السابقِ، أَجِدُ المدَّةَ الزمنيةَ التي قطعَ فيها القطارُ الإزاحةَ المذكورةَ.

السقوطُ الحُرُّ Free Fall

إنَّ الأجسامَ الموجودةَ في مجالِ الجاذبيةِ الأرضيةِ تتأثَّرُ بقُوَّةِ جذبِ الأرضِ لها (الوزنُ)؛ فعندَ رفعِ جسمٍ مثلًا ثمَّ تركِهِ ليتحرَّكَ بحريةٍ فإنَّهُ يسقطُ إلى الأسفلِ (نحوَ مركزِ الأرضِ)، وعندَ رمي جسمٍ إلى الأعلى فإنَّ سرعتَهُ تتناقصُ حتّى يتوقفَ عنِ الحركةِ عندَ ارتفاعٍ معينٍ، ثمَّ يعودُ إلى الأسفلِ.

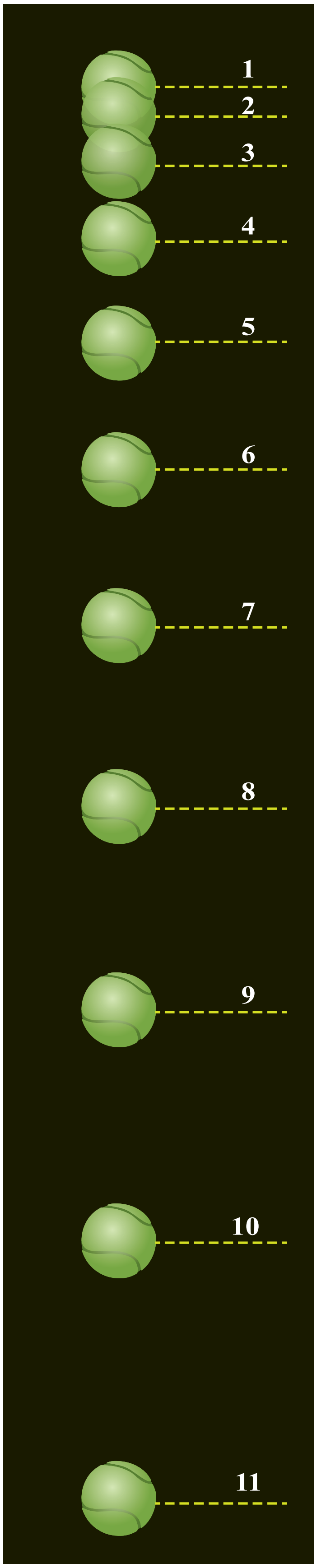
يُعرَّفُ **السقوطُ الحُرُّ Free fall** بأنَّهُ حركةُ الأجسامِ إلى الأعلى، أوْ إلى الأسفلِ، تحتَ تأثيرِ وزنِها فقطْ، وذلكَ بإهمالِ القوى الأُخرى مثلِ مقاومةِ الهواءِ.

يُبيِّنُ الشكلُ (9) كرةً في حالةِ سقوطٍ حُرٍّ عندما تُلتَقَطُ لها مجموعةٌ متتاليةٌ منَ الصورِ، ويفصلُ بينَ كلِّ صورتيْنِ متتاليتيْنِ مُدَدٌ زمنيةٌ متساويةٌ. أُلاحِظُ أنَّ الكرةَ تقطعُ إزاحاتٍ متزايدةً في أزمانٍ متساويةٍ نتيجةَ تسارُعِها نحوَ الأسفلِ.

يُعَدُّ السقوطُ الحُرُّ أحدَ أهمِّ التطبيقاتِ على الحركةِ في بُعْدٍ واحدٍ بتسارُعٍ ثابتٍ، في ما يُعرَفُ **بتسارُعِ السقوطِ الحُرِّ Free fall acceleration**، ويُرمَزُ إليهِ بالرمزِ (g). غيرَ أنَّ الأجسامَ التي نراها تسقطُ يوميًّا قدْ يختلفُ تسارُعُها قليلًا بسببِ تأثيرِ مقاومةِ الهواءِ، وهذا التأثيرُ يختلفُ باختلافِ شكلِ الجسمِ، وحجمِهِ، وسرعتِهِ، فيزدادُ زمنُ سقوطِها نتيجةً لذلكَ.

قريبًا منْ سطحِ الأرضِ، يُعَدُّ تسارُعُ السقوطِ الحُرِّ ثابتًا (g=9.8 m/s^2) نحوَ مركزِ الأرضِ؛ لذا يُمكِنُ استخدامُ المعادلاتِ السابقةِ للحركةِ، واستخدامُ الرمزِ (Δy) للإزاحةِ الرأسيةِ بدلًا منْ (Δx)، واستخدامُ ($-g$) بدلًا منْ (a)، علمًا أنَّ الإشارةَ السالبةَ مَردُّها إلى الاصطلاحِ بأنَّ الاتجاهَ نحوَ الأعلى موجبٌ، والاتجاهَ نحوَ الأسفلِ سالبٌ.

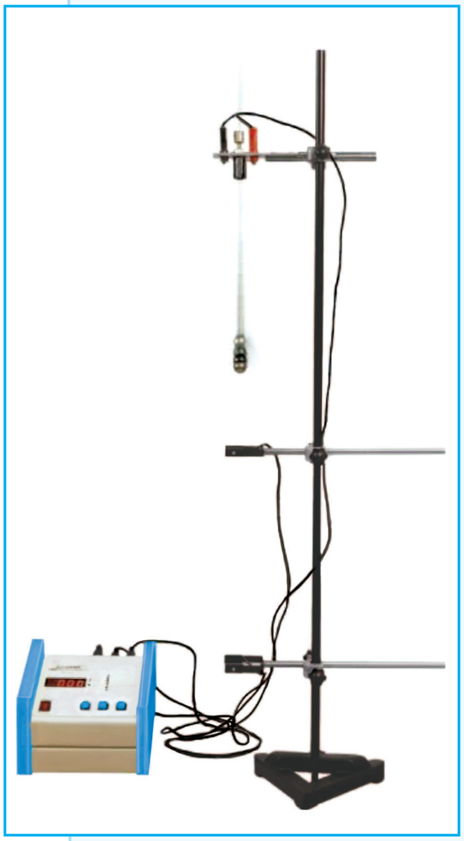
يُمكِنُ التوصُّلُ عمليًّا إلى قيمٍ قريبةٍ جدًّا منْ قيمةِ تسارُعِ السقوطِ الحُرِّ، وذلكَ بتنفيذِ التجربةِ العمليةِ الآتيةِ.



الشكلُ (9): حركةُ السقوطِ الحُرِّ.

التجربةُ ١

قياسُ تسارُعِ السقوطِ الحُرِّ عمليًّا



الموادُّ والأدواتُ: كرةٌ مطاطيةٌ صغيرةٌ، بوّابتانِ ضوئيتانِ، عدّادٌ زمنيٌّ رقميٌّ، شريطُ قياسٍ متريٌّ، حاملٌ فلزيٌّ.

إرشاداتُ السلامةِ: الحذرُ منْ سقوطِ الأجسامِ والأدواتِ على القدميْنِ.

خطواتُ العملِ:

1. بالتعاونِ معَ أفرادِ مجموعتي، أُجهِّزُ مكانًا لسقوطِ الكرةِ عليْهِ قربَ الجدارِ (قطعةٌ منَ الكرتونِ)، ثمَّ أضعُ علامةً على الجدارِ عندَ ارتفاعِ ($\Delta y = 1\text{m}$) تقريبًا، ثمَّ أُثبِّتُ إحدى البوّابتيْنِ الضوئيتيْنِ عندَ تلكَ العلامةِ باستخدامِ حاملٍ فلزيٍّ لرصدِ زمنِ بدءِ الحركةِ (t_1).
2. أُثبِّتُ البوّابةَ الأُخرى قربَ سطحِ الأرضِ لرصدِ زمنِ نهايةِ الحركةِ (t_2)، ثمَّ أَصِلُ البوّابتيْنِ بالعدّادِ الزمنيِّ الرقميِّ.
3. **أجَرِّبُ:** أُسقِطُ الكرةَ بحيثُ تمرُّ أمامَ البوّابتيْنِ، ثمَّ أُدوِّنُ في الجدولِ قراءةَ العدّادِ الزمنيِّ الرقميِّ، وكذلكَ المسافةُ بينَ البوّابتيْنِ.
4. أرفعُ البوّابةَ الضوئيةَ العُليا إلى ارتفاعِ (1.5 m) تقريبًا، ثمَّ أُكرِّرُ الخطوةَ (3)، مُدَوِّنًا النتائجَ في الجدولِ.
5. أرفعُ البوّابةَ الضوئيةَ العُليا مرَّةً أُخرى إلى ارتفاعِ (2 m) تقريبًا، ثمَّ أُكرِّرُ الخطوةَ (3)، مُدَوِّنًا النتائجَ في الجدولِ.
6. أُكمِلُ بياناتِ الجدولِ بحسابِ الكميةِ ($2\Delta y$)، والكميةِ ($(\Delta t)^2$)؛ حيثُ ($\Delta t = t_2 - t_1$) في كلِّ محاولةٍ، ثمَّ أُدوِّنُهُما في الجدولِ.
7. **أُمثِّلُ بيانيًّا** القراءاتِ في الجدولِ؛ على أنْ تكونَ قيمُ $(\Delta t)^2$ على المحورِ الأفقيِّ وقيمُ ($2\Delta y$) على المحورِ الرأسيِّ، ثمَّ أحسبُ ميلَ المنحنى (يُمثِّلُ هذا الميلُ تسارُعَ السقوطِ الحُرِّ).

رقمُ المحاولةِ	Δy(m)	$\Delta t = t_2 - t_1$	Δt^2(s^2)	$2\Delta y$(m)

التحليلُ والاستنتاجُ:

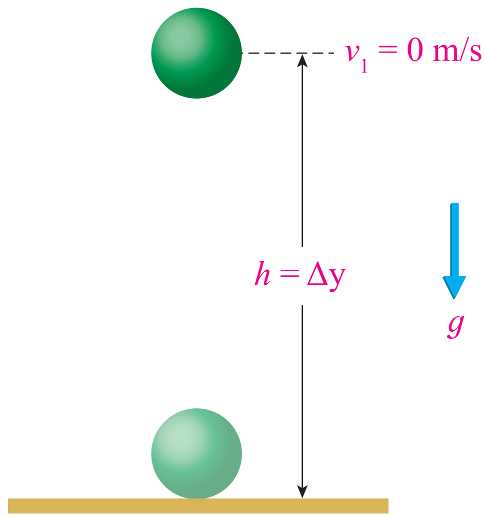
1. **أُقارِنُ:** بالتعاونِ معَ أفرادِ مجموعتي، أُقارِنُ النتيجةَ التي توصَّلْنا إليْها عمليًّا بالقيمةِ المقبولةِ المُتَّفَقِ عليْها (9.8 m/s^2).
2. **أستنتجُ:** ما سببُ اختلافِ النتيجةِ بينَ مجموعةٍ وأُخرى؟ ما سببُ اختلافِ النتيجةِ عنِ القيمةِ المقبولةِ؟
3. **أُفسِّرُ:** ما سببُ اختيارِ كرةٍ مطاطيةٍ صغيرةِ الحجمِ؟ إذا استُخدِمَتْ كرةٌ كبيرةُ الحجمِ وخفيفةٌ، فما الذي سيتغيَّرُ؟

المثالُ 10

أُسقِطَتْ كرةٌ منْ وضعِ السكونِ، كما في الشكلِ (10)، فوصلَتِ سطحَ الأرضِ بعدَ (0.6 s). أَجِدُ السرعةَ النهائيةَ للكرةِ قبلَ ملامستِها سطحَ الأرضِ مباشرةً.

المعطياتُ: ($v_1 = 0$ m/s)، ($g = 9.8$ m/s^2) ، ($t = 0.6$ s).

المطلوبُ: السرعةُ النهائيةُ ($v_2 =?$ m/s).



الشكلُ (10): سقوطُ كرةٍ.

الحلُّ:

$$v_2 = v_1 + at = v_1 - gt$$

$$v_2 = 0 - 9.8 \times 0.6 = -5.88 \text{ m/s}$$

الإشارةُ السالبةُ هنا تعني أنَّ اتجاهَ السرعةِ النهائيةِ هوَ نحوَ سطحِ الأرضِ بعكسِ الاتجاهِ الموجبِ.

أعـدُّ فلـمًا قصـيرًا باسـتخدامِ برنامـجِ صانـعِ الأفـلامِ (movie maker) يبـيِّنُ حركـةَ السـقوطِ الحـرِ للكـرةِ بتقنيةِ التصويرِ التتابعيِ، وأحرصُ علـى أنْ يشـتملَ الفلـمُ علـى توضيـحِ التغـيرِ الـذي يحدثُ للسرعـةِ مـعَ الزمـنِ، ثـمَّ أشـاركهُ معلمـي وزملائـي في الصـفِّ.

تمرينٌ

في المثالِ السابقِ، أَجِدُ الارتفاعَ ($h = \Delta y$) الذي أُسقِطَتْ منْهُ الكرةُ.

المثالُ 11

قُذِفَ سهمٌ رأسيًّا نحوَ الأعلى بسرعةٍ ابتدائيةٍ (14.7 m/s). أَجِدْ:

أ . زمنَ وصولِ السهمِ إلى أقصى ارتفاعٍ.

ب . أقصى ارتفاعٍ وصلَ إليْهِ السهمُ.

المعطياتُ: ($v_1 = +14.7$ m/s)، ($v_2 = 0$ m/s)، ($g = 9.8$ m/s^2).

المطلوبُ: (t =?)، (Δy =?).

الحلُّ:

أ . لإيجادِ زمنِ وصولِ السهمِ إلى أقصى ارتفاعٍ، أستخدِمُ المعادلةَ الأولى:

$$v_2 = v_1 - gt$$

$$0 = 14.7 - 9.8t$$

$$t = \frac{14.7}{9.8} = 1.5 \text{ s}$$

ب . لإيجادِ أقصى ارتفاعٍ وصلَ إليْهِ السهمُ، أستخدِمُ المعادلةَ الثالثةَ:

$$v_2^2 = v_1^2 - 2g\Delta y$$

$$0 = (14.7)^2 - 2 \times 9.8 \times \Delta y$$

$$\Delta y = \frac{216.1}{19.6} = 11.0 \text{ m}$$

يُلاحَظُ أنَّ إشارةَ الإزاحةِ موجبةٌ؛ ما يعني أنَّ الإزاحةَ التي قطعَها السهمُ كانَتْ في الاتجاهِ الموجبِ نحوَ الأعلى.

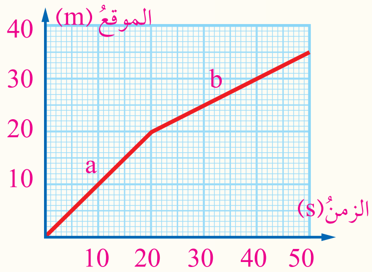
مراجعةُ الدرسِ

1. **الفكرةُ الرئيسةُ:** أُوضِّحُ المقصودَ بالحركةِ المنتظمةِ في بُعْدٍ واحدٍ، وعلاقةَ ذلكَ بالسرعةِ.

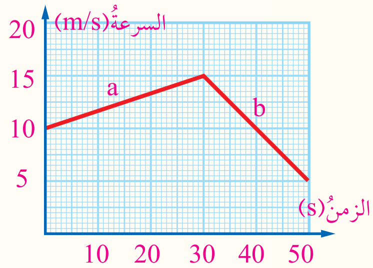
2. **أحسُبُ:** يتحرَّكُ قطارٌ أفقيًّا في خطٍّ مستقيمٍ بسرعةٍ ثابتةٍ مقدارُها (12 m/s). أَجِدُ الإزاحةَ التي يقطعُها القطارُ إذا تحرَّكَ مدَّةَ (80 s).

3. **أحسُبُ:** تسحبُ فتاةٌ صندوقًا على سطحٍ أفقيٍّ في اتجاهٍ ثابتٍ. بدأَ الصندوقُ الحركةَ منْ وضعِ السكونِ، وأصبحَتْ سرعتُهُ (1.2 m/s) بعدَ مرورِ (3 s). أَجِدُ التسارُعَ الذي اكتسبَهُ الصندوقُ.

4. **أُحلِّلُ:** يُمثِّلُ الشكلُ المجاورُ منحنى الموقعِ–الزمنِ لحركةِ حصانٍ يجرُّ عربةً في طريقٍ مستقيمٍ. مُعتمِدًا على الشكلِ، أَجِدُ:
   أ . الإزاحةَ التي قطعَتْها العربةُ في المرحلةِ (a) منَ الحركةِ.
   ب . السرعةَ المتوسطةَ للعربةِ في المرحلةِ (b) منَ الحركةِ.



5. **أُحلِّلُ:** في أثناءِ جري أحدِ العدّائينَ على طريقٍ مستقيمٍ، رُصِدَتْ حركتُهُ، ومُثِّلَتْ سرعتُهُ بيانيًّا، كما في الشكلِ المجاورِ. مُعتمِدًا على الشكلِ، أَجِدُ:
   أ . السرعةَ اللحظيةَ للعدّاءِ عندَ نهايةِ المرحلةِ (a) منَ الحركةِ.
   ب. تسارُعَ (تباطُؤَ) العدّاءِ في المرحلةِ (b) منَ الحركةِ.
   جـ. الإزاحةَ الكليةَ للعدّاءِ في مرحلتَي الحركةِ معًا.



6. **أحسُبُ:** سقطَ جسمٌ منْ وضعِ السكونِ منَ ارتفاعِ (176.4 m) عنْ سطحِ الأرضِ. بإهمالِ مقاومةِ الهواءِ. أَجِدُ:
   أ . زمنَ وصولِ الجسمِ إلى سطحِ الأرضِ.
   ب. سرعةَ الجسمِ النهائيةَ قبيلَ لمسِهِ سطحَ الأرضِ.

7. تحركَ جسمٌ منْ وضعِ السكونِ أفقيًّا في خطٍّ مستقيمٍ بتسارُعٍ ثابتٍ، وقدْ رُصِدَ موقعُهُ وزمنُ حركتِهِ في الجدولِ الآتي. **أُمثِّلُ بيانيًّا** العلاقةَ بينَ الزمنِ والموقعِ، ثمَّ أَجِدُ السرعةَ اللحظيةَ عندَ اللحظةِ ($t = 2.5$ s).

الزمنُ (s):	0	1	2	3	4
الموقعُ (m):	0	0.2	0.8	1.8	3.2

الفكرةُ الرئيسةُ:

الحركـةُ في بُعْدَيْنِ تعنـي أنَّ لسرعـةِ الجسمِ مُركَّبتَيْنِ متعامدتَيْنِ منْ دونِ اعتمادِ إحداهُما على الأُخرى.

نتاجاتُ التعلُّمِ:

- أُوظِّـفُ معـرفتـي بعلمِ الميكانيكا ومفاهيمِهِ وقوانينِهِ في حلِّ مسائلَ حسابيةٍ.
- أُطبِّقُ معرفتي بعلمِ الميكانيكا ومفاهيمِهِ وقوانينِهِ عندَ تفسيرِ مشاهداتٍ ومواقفَ مُتعلِّقةٍ بالحركةِ.
- أستقصي أهميةَ التطبيقاتِ الحياتيةِ للحركةِ في بُعْدَيْنِ.

المفاهيمُ والمصطلحاتُ:

المقذوفاتُ Projectiles.

أقصى ارتفاعٍ Maximum Height.

زمنُ التحليقِ Time of Flight.

المدى الأفقيُّ Range.

حركةٌ دائريةٌ منتظمةٌ Uniform Circular Motion.

تسارُعٌ مركزيٌّ Centripetal Acceleration.

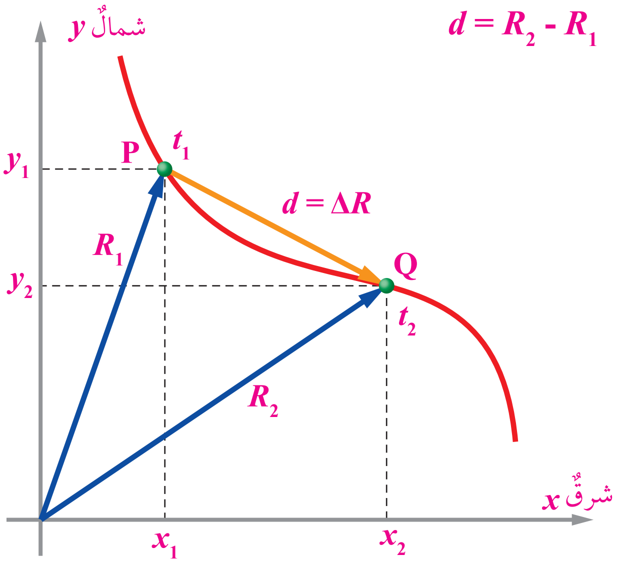
الإزاحةُ في بُعْدَيْنِ Displacement in Two Dimensions

تعرَّفْنا في الدرسِ السابقِ كيفَ يُمكِنُ وصفُ حركةِ جسمٍ في بُعْدٍ واحدٍ، وكيفيةَ التعبيرِ عنِ اتجاهاتِ كلٍّ منَ: الإزاحةِ، والسرعةِ، والتسارُعِ في بُعْدٍ واحدٍ، عنْ طريقِ تمييزِها بإشارةِ (+) إنْ كانَتْ نحوَ اليمينِ أوِ الأعلى، وبإشارةِ (–) إنْ كانَتْ نحوَ اليسارِ أوِ الأسفلِ. وستعرَّفُ في هذا الدرسِ كيفَ نَصِفُ حركةَ الأجسامِ في بُعْدَيْنِ، بتطبيقِ خصائصِ المُتَّجِهاتِ عليْها.

يُبيِّنُ الشكلُ (11) طريقًا أفقيًّا مُتعرِّجًا تسيرُ عليْهِ درّاجةٌ، ويُمثِّلُ فيهِ المحورُ ($+x$) اتجاهَ الشرقِ، والمحورُ ($+y$) اتجاهَ الشمالِ. إذا تحرَّكَتِ الدرّاجةُ منَ الموقعِ (P) إلى الموقعِ (Q) على المسارِ المنحني في مـدَّةٍ زمنيـةٍ (Δt)، فـإنَّهُ يُمكِنُ وصفُ تـلكَ الحركـةِ باستخدامِ مفهومَيِ الإزاحةِ، والسرعةِ المتوسطةِ للدرّاجةِ.

يَتبيَّنُ منَ الشكلِ أنَّ مُتَّجِهَ الموقعِ الأولِ (R_1)، الذي حُدِّدَ نسبةً إلى نقطةِ الإسنادِ المرجعيةِ ($x = 0 , y = 0$)، يُمكِنُ تحليلُهُ إلى مُركَّبتَيْنِ متعامدتَيْنِ، هما: (x_1)، وَ (y_1)، وأنَّ مُتَّجِهَ الموقـعِ الثـاني (R_2) يُمكِنُ تحليلُهُ إلى مُركَّبتَيْنِ متعامدتَيْنِ، هما: (x_2)، وَ(y_2). وبذلكَ، فإنَّ التغيُّرَ في الموقعِ الذي يُمثِّلُهُ المُتَّجِهُ ($d = \Delta R$) يُعطى بالعلاقةِ الآتيةِ:

$$d = R_2 - R_1$$



الشكلُ (11): الحركةُ في بُعْدَيْنِ.

وهذا يعني وجودَ مُركَّبةِ إزاحةٍ في اتجاهِ الشرقِ $(+x)$: $(d_x = x_2 - x_1)$، ومُركَّبةِ إزاحةٍ في اتجاهِ الشمالِ $(+y)$: $(d_y = y_2 - y_1)$.

أمّا السرعةُ المُتَّجهةُ المتوسطةُ للدرّاجةِ ومُركَّبتاها المتعامدتانِ فتُعطى بالعلاقاتِ الآتيةِ:

$$\bar{v} = \frac{d}{\Delta t} \text{ ، } v_x = \frac{d_x}{\Delta t} \text{ ، } v_y = \frac{d_y}{\Delta t}$$

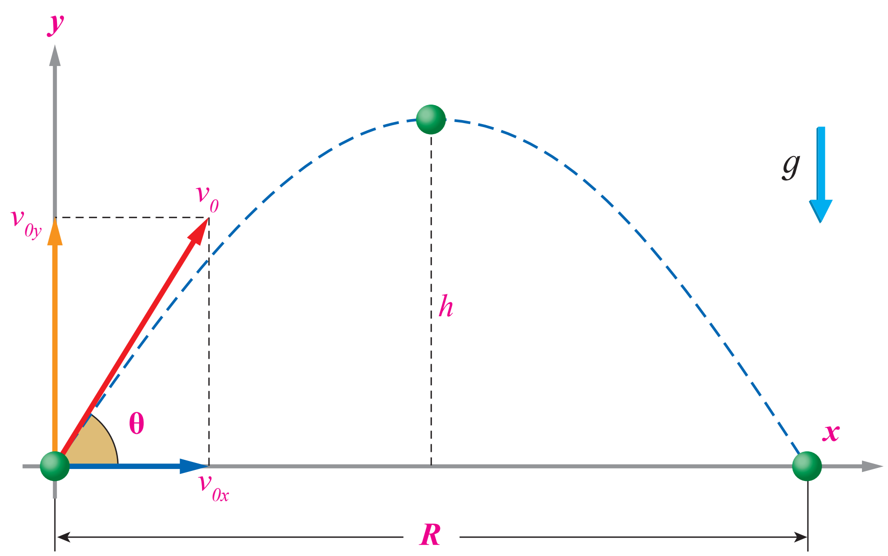
المقذوفاتُ Projectiles

عندَ قذفِ جسمٍ في اتجاهٍ يَصنعُ زاويةً (θ) معَ الأفقِ، فإنَّهُ يتحرَّكُ في مسارٍ مُنْحَنٍ، كما في الشكلِ (12)، وتكونُ هذهِ الحركةُ في بُعْدَيْنِ، بحيثُ تتغيَّرُ إحداثياتُ الحركةِ على المحورِ الأفقيِّ (x)، والمحورِ الرأسيِّ (y) في اللحظةِ نفسِها. تُستخدَمُ معادلاتُ الحركةِ بتسارُعٍ ثابتٍ (توصَّلْنا إليْها في الدرسِ السابقِ) في وصفِ حركةِ المقذوفاتِ، وتُطبَّقُ هذهِ المعادلاتُ على المحورِ الأفقيِّ، ثمَّ تُطبَّقُ بصورةٍ مستقلةٍ على المحورِ الرأسيِّ.

عندَ رمي كرةٍ إلى الأعلى في اتجاهٍ يَصنعُ معَ الأفقِ زاويةً ابتدائيةً (θ)، فإنَّ السرعةَ الابتدائيةَ للكرةِ (v_0) يُمكِنُ تحليلُها إلى مُركَّبتيْنِ متعامدتيْنِ (v_{0x} , v_{0y})، كما في الشكلِ (12). وتُعطى مُركَّبتا السرعةِ بالمعادلتيْنِ الآتيتيْنِ:

المُركَّبةُ الأفقيةُ للسرعةِ الابتدائيةِ .... $v_{0x} = v_0 \cos\theta$

المُركَّبةُ الرأسيةُ للسرعةِ الابتدائيةِ .... $v_{0y} = v_0 \sin\theta$



الشكلُ (12): تحليلُ السرعةِ الابتدائيةِ إلى مُركَّبتيْنِ.

تستمرُّ الكرةُ في حركتِها منذُ لحظةِ إطلاقِها منْ نقطةِ الإسنادِ المرجعيةِ (0,0)، في مسارٍ مُنْحَنٍ، حتّى تصلَ إلى **أقصى ارتفاع (Maximum height)** (h)، ثمَّ تعودُ إلى الأسفلِ. وفي أثناءِ هذهِ الحركةِ، فإنَّ المُركَّبةَ الأفقيةَ للسرعةِ تظلُّ ثابتةً في المقدارِ والاتجاهِ؛ لأنَّ التسارُعَ الأفقيَّ يساوي صفرًا ($a_x = 0$)؛ لعدمِ وجودِ قُوَّةٍ مُؤثِّرةٍ في الكرةِ بالاتجاهِ الأفقيِّ عندَ إهمالِ مقاومةِ الهواءِ. أمّا المُركَّبةُ الرأسيةُ للسرعةِ فتتأثَّرُ بقُوَّةِ الجاذبيةِ الأرضيةِ التي تؤدي إلى حركتِها بتسارُعِ السقوطِ الحُرِّ ($g = 9.80\ m/s^2$) نحوَ مركزِ الأرضِ (معَ إهمالِ مقاومةِ الهواءِ)، فيتناقصُ مقدارُ هذهِ المُركَّبةِ في مرحلةِ الصعودِ حتّى يصبحَ صفرًا عندَ أقصى ارتفاعٍ، ثمَّ يتزايدُ مقدارُها في مرحلةِ الهبوطِ، علمًا أنَّهُ يُرمَزُ إلى المُركَّبةِ الرأسيةِ للسرعةِ بالرمزِ (v_y) بعدَ لحظةِ الإطلاقِ.

منَ الكمياتِ الأُخرى المستخدمةِ في وصفِ حركةِ المقذوفاتِ:

- **زمنُ التحليقِ (Time of flight) (T)**، وهوَ الزمنُ الكليُّ لحركةِ المقذوفِ في الهواءِ، ويساوي مجموعَ زمنَي الصعودِ والهبوطِ. يختلفُ زمنُ الصعودِ إلى أقصى ارتفاعٍ عنْ زمنِ الهبوطِ عندما يختلفُ المستوى الأفقيُّ الذي يعودُ إليهِ المقذوفُ عنْ مستوى الإطلاقِ. ولكنْ، عندما يعودُ المقذوفُ إلى المستوى الأفقيِّ الذي أُطلِقَ منْهُ فإنَّ زمنَ الهبوطِ يساوي زمنَ الصعودِ، وهنا يُمكِنُ التوصُّلُ إلى زمنِ التحليقِ بدلالةِ زمنِ الصعودِ (t_h) فقطْ، كما في العلاقةِ الآتيةِ:

$$T = 2t_h$$

- **المدى الأفقيُّ (Range) (R)**، وهوَ أكبرُ إزاحةٍ أفقيةٍ يَصنعُها المقذوفُ منْ نقطةِ إطلاقهِ إلى أنْ يعودَ إلى مستوى الإطلاقِ نفسِهِ (سطحُ الأرضِ مثلًا)، كما في الشكلِ (12)، ويُعطى بالعلاقةِ الآتيةِ:

$$R = T \times v_0 \cos \theta$$

أتحقَّقُ: أستنتجُ العواملَ التي يعتمدُ عليْها كلٌّ منْ: أقصى ارتفاعٍ، وزمنِ التحليقِ.

أُفكِّرُ: هلْ يكونُ تأثيرُ مقاومةِ الهواءِ في حركةِ المقذوفاتِ في المُركَّبةِ الأفقيةِ لسرعةِ المقذوفِ، أمْ في المُركَّبةِ الرأسيةِ، أمْ في المُركَّبتيْنِ معًا؟

أصممُ باستخدامِ برنامجِ السكراتشِ (Scratch) عرضًا يوضحُ حركةَ المقذوفاتِ، وأحرص على توضيحِ المفاهيمِ المرتبطةِ بحركةِ المقذوفِ: زمنِ التحليقِ، أقصى ارتفاعٍ، المدى الأفقي، ثمَّ أشاركهُ معلمي وزملائي في الصفِّ.

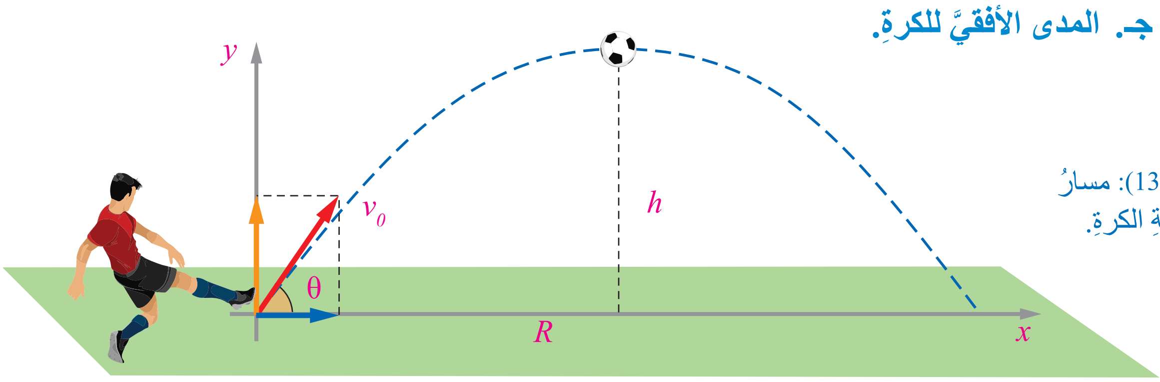
المثالُ 12

ركلَ لاعبٌ كرةً بسرعةٍ ابتدائيةٍ (22.5 m/s)، في اتجاهٍ يَصنعُ زاويةً (53°) معَ الأفقِ، كما في الشكلِ (13)، بإهمالِ مقاومةِ الهواءِ. أَجِدْ:

أ . أقصى ارتفاعٍ تصلُ إليْهِ الكرةُ.

ب. زمنَ تحليقِ الكرةِ حتّى تعودَ إلى سطحِ الأرضِ.

جـ. المدى الأفقيَّ للكرةِ.



الشكلُ (13): مسارُ حركةِ الكرةِ.

المعطياتُ: $(v_0 = 22.5\ \text{m/s})$، $(\theta = 53°)$.

المطلوبُ: $(h =?)$، $(T=?)$، $(R=?)$.

الحلُّ:

بدايةً، يجبُ تحليلُ السرعةِ الابتدائيةِ إلى مُركَّبتيْنِ؛ أفقيةٍ ورأسيةٍ، للتعاملِ معَ الحركةِ عنْ طريقِ كلِّ مُركَّبةٍ بصورةٍ منفصلةٍ:

$$v_{0x} = v_0 \cos\theta = 22.5 \times \cos 53 = 22.5 \times 0.6 = 13.5\ \text{m/s}$$

$$v_{0y} = v_0 \sin\theta = 22.5 \times \sin 53 = 22.5 \times 0.8 = 18\ \text{m/s}$$

أ . لإيجادِ أقصى ارتفاعٍ تصلُ إليْهِ الكرةُ، أستخدَمُ المعادلةَ الثالثةَ للحركةِ، علمًا أنَّ المُركَّبةَ الرأسيةَ للسرعةِ عندَ أقصى ارتفاعٍ هيَ $(v_y = 0\ \text{m/s})$، وأنَّ الاتجاهَ نحوَ الأعلى موجبٌ. وبذلكَ، فإنَّ $(a = -g)$ في معادلاتِ الحركةِ:

$$v_2^2 = v_1^2 + 2ad$$

$$(v_y)^2 = (v_0 \sin\theta)^2 - 2gh$$

$$0 = 18^2 - 2 \times 9.8 \times h$$

$$h = \frac{324}{19.6} = 16.5\ \text{m}$$

ب. لمعرفةِ زمنِ تحليقِ الكرةِ حتّى تعودَ إلى سطحِ الأرضِ، يجبُ إيجادُ زمنِ الصعودِ منَ المعادلةِ الأولى للحركةِ:

$$v_2 = v_1 + at_h$$

$$v_y = v_0 \sin\theta - gt_h$$

$$0 = 18 - 9.8 \times t_h$$

$$t_h = \frac{18}{9.8} = 1.84 \text{ s}$$

$$T = 2t_h = 2 \times 1.84 = 3.68 \text{ s}$$

جـ. المدى الأفقيُّ للكرةِ:

$$R = T \times v_0 \cos\theta$$

$$R = 3.68 \times 13.5 = 49.68 \text{ m}$$

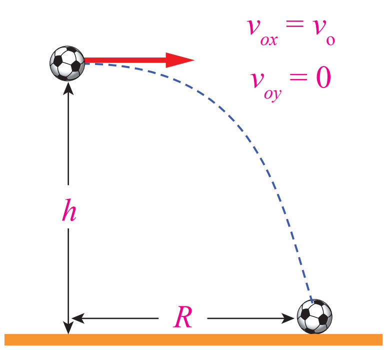
أتحقَّقُ: بناءً على العلاقاتِ السابقةِ، أستنتجُ العواملَ التي يعتمدُ عليْها المدى الأفقيُّ للمقذوفِ.

عندَ قذفِ جسمٍ في اتجاهٍ أفقيٍّ منْ مكانٍ مرتفعٍ عنْ سطحِ الأرضِ؛ حيثُ $(\theta = 0)$، فإنَّ مُركَّبتَي السرعةِ الابتدائيةِ تكونانِ كما يأتي:

$$v_{0x} = v_0 \cos\theta = v_0 \cos 0 = v_0$$

$$v_{0y} = v_0 \sin\theta = v_0 \sin 0 = 0$$

والشكلُ (14) يُوضِّحُ مسارَ الجسمِ المقذوفِ أفقيًّا.

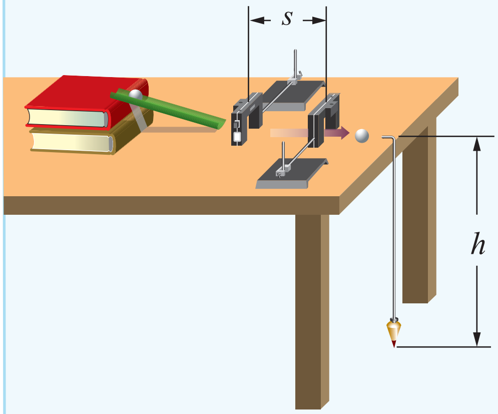


الشكلُ (14): مسارُ حركةِ جسمٍ مقذوفٍ أفقيًّا.

لدراسةِ حركةِ المقذوفِ الأفقيِّ بصورةٍ عمليةٍ، أُنفِّذُ وزملائي التجربةَ الآتيةَ.

التجربةُ 2

وصفُ حركةِ المقذوفِ الأفقيِّ



الموادُّ والأدواتُ: عددٌ منَ الكتبِ، مجرًى بلاستيكيٌّ، كرةٌ فلزيةٌ، مسطرةٌ، ورقُ كربونٍ، بوّابتانِ ضوئيتانِ، عدّادٌ زمنيٌّ رقميٌّ.

إرشاداتُ السلامةِ: الحذرُ منْ سقوطِ الأجسامِ والأدواتِ على القدميْنِ.

خطواتُ العملِ:

1. أُركِّبُ أدواتِ التجربةِ، كما في الشكلِ، مراعيًا وضعَ كتابيْنِ فوقَ الطاولةِ، ووضعَ طرفِ المجرى البلاستيكيِّ فوقَهُما.
2. **أقيسُ** ارتفاعَ الطاولةِ عنْ سطحِ الأرضِ (h)، والمسافةَ بينَ البوّابتيْنِ (S)، ثمَّ أُدَوِّنُ النتيجةَ في الجدولِ.
3. **أتوقَّعُ** مكانَ سقوطِ الكرةِ على الأرضِ، وأضعُ فيهِ ورقَ الكربونِ.
4. أَصِلُ البوّابتيْنِ بالعدّادِ الزمنيِّ الرقميِّ، ثمَّ أَصِلُهُ بمصدرِ الطاقةِ الكهربائيةِ، ثمَّ أُشغِّلُهُ.
5. أضعُ الكرةَ الفلزيةَ في أعلى المجرى المائلِ، ثمَّ أتركُها تتحرَّكُ، وأُلاحِظُ مسارَها، ومكانَ سقوطِها. وفي حالِ سقطَتِ الكرةُ في مكانٍ غيرِ الذي توقَّعْتُهُ أنقلُ ورقَ الكربونِ إلى مكانِ السقوطِ، مُكرِّرًا الخطوةَ.
6. أُدَوِّنُ قراءةَ العدّادِ الرقميِّ (Δt) في الجدولِ، ثمَّ أقيسُ المسافةَ الأفقيةَ (R) بينَ نقطةِ السقوطِ ونقطةِ الأصلِ التي يشيرُ إليْها البندولُ، ثمَّ أُدَوِّنُها في الجدولِ.
7. أُضيفُ كتابًا ثالثًا تحتَ المجرى، ثمَّ أُكرِّرُ الخطوةَ (5) والخطوةَ (6)، مُدَوِّنًا النتائجَ، ثمَّ أُضيفُ كتابًا رابعًا، وأُكرِّرُ ما سبقَ.
8. أَجِدُ السرعةَ الابتدائيةَ (v_{ox}) لكلِّ محاولةٍ، بقسمةِ المسافةِ (S) على المدَّةِ الزمنيةِ (Δt)، ثمَّ أُدَوِّنُ الناتجَ في الجدولِ.
9. أستخدمُ معادلاتِ الحركةِ في إيجادِ زمنِ السقوطِ (t)، والمدى الأفقيِّ (R)، ثمَّ أُدَوِّنُ الناتجَ في الجدولِ.

عددُ الكتبِ	h (m)	R (m)	S (m)	Δt (s)	v_{ox} (m/s)	الحساباتُ	
						$t=\sqrt{2h/g}$	$R=tv_{ox}$(m)

التحليلُ والاستنتاجُ:

1. **أُقارِنُ** بينَ قيمِ المدى الأفقيِّ التجريبيةِ والقيمِ المحسوبةِ منَ المعادلاتِ في كلِّ محاولةٍ.
2. أَصِفُ العلاقةَ بينَ السرعةِ الابتدائيةِ للكرةِ وكلٍّ منْ: زمنِ السقوطِ، والمدى الأفقيِّ.
3. **أُفسِّرُ:** كيفَ يُؤثِّرُ عددُ الكتبِ الموجودةِ تحتَ المجرى في السرعةِ الابتدائيةِ للكرةِ؟
4. **أُفسِّرُ:** كيفَ ستُؤثِّرُ زيادةُ ارتفاعِ الطاولةِ (h) في مقدارِ المدى الأفقيِّ للكرةِ؟

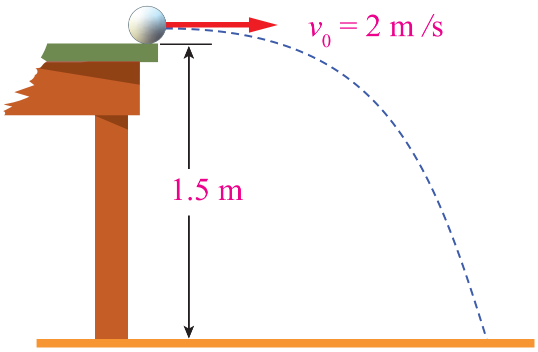
المثالُ 13

قُذِفَتْ كرةُ تنسٍ أرضيٍّ أفقيًّا منْ سطحِ طاولةٍ، كما في الشكلِ (15). مُعتمِدًا البياناتِ الواردةَ في الشكلِ، أَجِدُ:

أ . زمنَ وصولِ الكرةِ إلى الأرضِ.

ب. المدى الأفقيَّ للكرةِ.

جـ. مقدارَ السرعةِ النهائيةِ للكرةِ، مُحدِّدًا اتجاهَها.



الشكلُ (15): المثالُ (13).

المعطياتُ: $(\theta = 0)$، $(h = -1.5\text{ m})$، $(v_0 = 2\text{ m/s})$، $(g = 9.8\text{ m/s}^2)$.

المطلوبُ: $(t = ?)$، $(R = ?)$، $(v = ?)$.

الحلُّ:

أ . زمنُ وصولِ الكرةِ إلى الأرضِ يعتمدُ على الحركةِ في المستوى الرأسيِّ، حيثُ: $\theta = 0$:

$$v_{0y} = v_0 \sin\theta = v_0 \sin 0 = 0$$

$$h = v_{0y}t + \frac{1}{2}at^2 = 0 - \frac{1}{2}gt^2$$

$$t = \sqrt{\frac{2h}{-g}} = \sqrt{\frac{-2\times1.5}{-9.8}} = +\sqrt{0.3} = 0.55\text{ s}$$

يُلاحَظُ أنَّ اتجاهَ كلٍّ منَ التسارُعِ والإزاحةِ هوَ نحوَ الأسفلِ بعكسِ الاتجاهِ الموجبِ؛ لذا عُوِّضَتِ الإشارتانِ السالبتانِ، حيثُ:

$$a = -g = -9.8\text{ m/s}^2 \quad ، \quad h = -1.5\text{ m}$$

ب. المدى الأفقيُّ للكرةِ يعتمدُ على المُركَّبةِ الأفقيةِ والزمنِ:

$$v_{0x} = v_0 \cos\theta = v_0 \cos 0 = v_0$$

$$R = v_0\, t = 2 \times 0.55 = 1.1\text{ m}$$

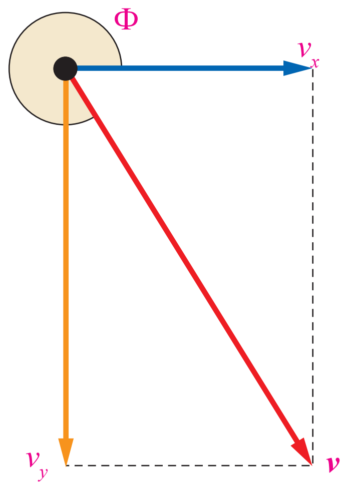
جـ. مقدارُ السرعةِ النهائيةِ للكرةِ:

$$v_x = v_{0x} = 2\ \text{m/s}$$

$$v_y = v_{0y} + at$$

$$v_y = 0 - 9.8 \times 0.55 = -5.39\ \text{m/s}$$

الإشارةُ السالبةُ تعني أنَّ اتجاهَ المُركَّبةِ الرأسيةِ للسرعةِ النهائيةِ هوَ إلى الأسفلِ بعكسِ الاتجاهِ الموجبِ:



الشكلُ (16): اتجاهُ السرعةِ.

$$v = \sqrt{(v_x)^2 + (v_y)^2} = \sqrt{2^2 + (-5.39)^2} = 5.7\ \text{m/s}$$

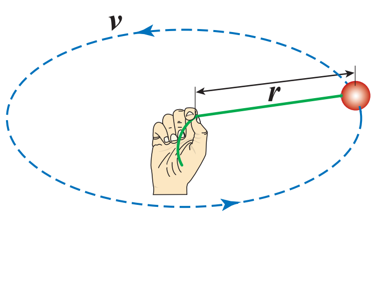
وعليْهِ، يكونُ اتجاهُ السرعةِ النهائيةِ للكرةِ، كما في الشكلِ (16) ، بحيثُ يَصنعُ زاويةً معَ محورِ ($+x$)، بعكسِ اتجاهِ دورانِ عقاربِ الساعةِ، مقدارُها (Φ):

$$\tan \Phi = \frac{v_y}{v_x} = \frac{-5.39}{2} = -2.69 \cdots\cdots\longrightarrow \Phi = 290.4°$$

أتحقَّقُ: ما الأثرُ المُتوقَّعُ في حالِ عدمِ إهمالِ مقاومةِ الهواءِ لحركةِ الكرةِ على المُركَّبتيْنِ الأفقيةِ والرأسيةِ للسرعةِ؟

الحركةُ الدائريةُ المنتظمةُ Uniform circular motion

تعرَّفْتُ سابقًا أنَّ الجسمَ الذي يتحرَّكُ بسرعةٍ ثابتةٍ مقدارًا في خطٍّ مستقيمٍ لا يمتلكُ تسارُعًا؛ فالتسارُعُ يُمثِّلُ تغيُّرًا في مقدارِ السرعةِ، أوِ اتجاهِها، أوْ كليْهِما معًا.



الشكلُ (17): الحركةُ الدائريةُ.

يُبيِّنُ الشكلُ (17) كرةً مربوطةً بخيطٍ، تدورُ في مسارٍ دائريٍّ أفقيٍّ نصفُ قطرِهِ (r)، بسرعةٍ ثابتةٍ مقدارًا، لكنَّها مُتغيِّرةٌ اتجاهًا. يُطلَقُ على الحركةِ في هذهِ الحالةِ اسمُ **الحركةِ الدائريةِ المنتظمةِ Uniform circular motion.**

يمتلكُ الجسمُ في الحركةِ الدائريةِ **تسارُعًا مركزيًّا Centripetal acceleration**،

(r)

ويُرمَزُ إليهِ بالرمزِ (a_c)، ويكونُ اتجاهُهُ دائمًا نحوَ مركزِ المسارِ الدائريِّ، ويؤدي إلى تغيُّرٍ في اتجاهِ السرعةِ (Δv)، الذي يكونُ دائمًا في اتجاهِ مركزِ الدورانِ.

يُبيِّنُ الشكلُ (18) مُتَّجِهاتِ السرعةِ والتسارُعَ المركزيَّ عندَ نقاطٍ مختلفةٍ منَ المسارِ الدائريِّ الأفقيِّ لحركةِ الكرةِ، حيثُ يتعامدُ مُتَّجِهُ التسارُعِ المركزيِّ باستمرارٍ معَ مُتَّجِهِ السرعةِ، الذي يكونُ دائمًا على امتدادِ المماسِّ للدائرةِ، وَتُسمّى السرعةَ المماسيةَ.

منَ الأمثلةِ على الحركةِ الدائريةِ المنتظمةِ: حركةُ نقطةٍ مرسومةٍ على طرفِ مروحةٍ تدورُ، وحركةُ سيارةٍ تسيرُ بسرعةٍ ثابتةٍ مقدارًا في مسارٍ دائريٍّ، وحركةُ بعضِ الأقمارِ الصناعيةِ حولَ الأرضِ.

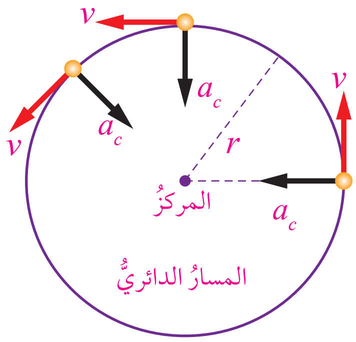
عندَ دراسةِ الحركةِ الدائريةِ المنتظمةِ، فإنَّ مركزَ المسارِ الدائريِّ يُمثِّلُ نقطةَ إسنادٍ مرجعيةٍ لتحديدِ المُتغيِّراتِ، حيثُ تُحسَبُ السرعةُ القياسيةُ التي يتحرَّكُ بها الجسمُ بقسمةِ طولِ المسارِ الدائريِّ (محيطُ الدائرةِ) على الزمنِ الدوريِّ، وهوَ الزمنُ اللازمُ حتّى يُكمِلَ الجسمُ دورةً كاملةً حولَ مركزِ الدورانِ. ولمّا كانَتِ السرعةُ ثابتةَ المقدارِ، فإنَّ السرعةَ القياسيةَ المتوسطةَ تساوي السرعةَ القياسيةَ اللحظيةَ:

$$v_s = \bar{v}_s = \frac{S}{T} = \frac{2\pi r}{T}$$

يُعطى التسارُعُ المركزيُّ للحركةِ الدائريةِ المنتظمةِ بالعلاقةِ الآتيةِ:

$$a_c = \frac{v_s^2}{r}$$

أتحقَّقُ: مُستخدِمًا العلاقةَ الرياضيةَ للتسارُعِ المركزيِّ، ومُعتمِدًا وحدتَيْ قياسِ السرعةِ ونصفِ القُطْرِ، أجِدُ وحدةَ قياسِ التسارُعِ المركزيِّ.



الشكلُ (18): منظرٌ علويٌّ للحركةِ الدائريةِ الأفقيةِ.

الفيزياءُ والحياةُ

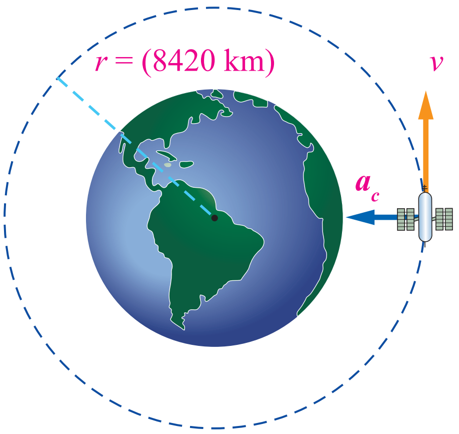
لعلمِ الفيزياءِ دورٌ رئيسٌ في تصميمِ الطرقِ ووضعِ قوانينِ السيرِ عليْها؛ فالسرعةُ التي يجبُ على السائقِ الالتزامُ بها عندَ القيادةِ على المنعطفاتِ تُحدَّدُ اعتمادًا على نصفِ قُطْرِ الدائرةِ التي يُعَدُّ المنعطفُ جزءًا منها. وعندَ تجاوزِ حدودِ هذهِ السرعةِ يزدادُ تسارُعُ السيارةِ المركزيُّ، فتنحرفُ عنِ الطريقِ، وتخرجُ عنِ السيطرةِ.

المثالُ 14

يدورُ قمرٌ صناعيٌّ حولَ الأرضِ على ارتفاعِ (8420 km) عنْ مركزِ الأرضِ، في مسارٍ دائريٍّ (تقريبًا)، بسرعةٍ مماسيةٍ ثابتةِ المقدارِ، كما في الشكلِ (19). إذا علمتُ أنَّ زمنَهُ الدوريَّ (129 min)، فأجِدُ مقدارَ:

أ . سرعَتِهِ المماسيةِ.

ب . تسارُعِهِ المركزيِّ.



الشكلُ (19): القمرُ الصناعيُّ.

المعطياتُ: $(r = 8.42 \times 10^6 \text{ m})$، $(T = 129 \times 60 = 7740 \text{ s})$.

المطلوبُ: $(v_s = ?)$ ، $(a_c = ?)$.

الحلُّ:

أ . مقدارُ السرعةِ المماسيةِ للقمرِ الصناعيِّ:

$$v_s = \frac{S}{T} = \frac{2\pi r}{T}$$

$$v_s = \frac{2 \times 3.14 \times 8.42 \times 10^6}{7740} = 6832 \text{ m/s}$$

ب. مقدارُ التسارُعِ المركزيِّ لهذا القمرِ:

$$a_c = \frac{v_s^2}{r}$$

$$a_c = \frac{6832^2}{8.42 \times 10^6} = 5.54 \text{ m/s}^2$$

مراجعةُ الدرسِ

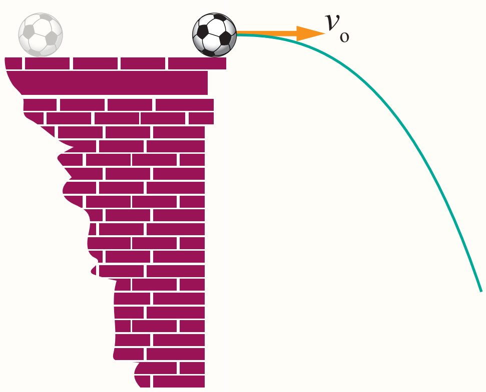
1. **الفكرةُ الرئيسةُ:** ما أهميةُ تحليلِ السرعةِ الابتدائيةِ للمقذوفاتِ إلى مُركَّبتيْنِ؛ أفقيةٍ، ورأسيةٍ؟

2. أذكرُ مثاليْنِ منَ الحياةِ اليوميةِ على حركةِ المقذوفاتِ، ومثاليْنِ آخريْنِ على الحركةِ الدائريةِ المنتظمةِ.

3. **أُفسِّرُ:** ما سببُ وجودِ تسارُعٍ مركزيٍّ، وعدمِ وجودِ تسارُعٍ مماسيٍّ في الحركةِ الدائريةِ المنتظمةِ؟

4. **أُقارِنُ** بينَ مُركَّبتَيْ كلِّ عنصرٍ منَ العناصرِ الآتيةِ لحركةِ المقذوفِ الأفقيةِ وحركتِهِ الرأسيةِ:
   - الإزاحةُ.
   - السرعةُ.
   - التسارُعُ.

5. **أحسُبُ:** قُذِفَتْ كرةٌ بسرعةٍ مقدارُها (15.8m/s) نحوَ الأعلى في اتجاهٍ يَصنعُ معَ الأفقِ زاويةً مقدارُها (30°)، بإهمالِ مقاومةِ الهواءِ لحركةِ الكرةِ. أَجِدُ:
   أ . زمنَ تحليقِ الكرةِ.
   ب. أقصى ارتفاعٍ للكرةِ.



6. **أحسُبُ:** قُذِفَتْ كرةٌ منْ فوقِ بنايةٍ ارتفاعُها (44.1 m) عنْ سطحِ الأرضِ بسرعةٍ أفقيةٍ مقدارُها (12 m/s)، كما في الشكلِ المجاورِ. أحسُبُ زمنَ سقوطِ الكرةِ إلى سطحِ الأرضِ، والمسافةَ الأفقيةَ التي قطعَتْها قبلَ ارتطامِها بالأرضِ.

7. **أحسُبُ:** كتلةٌ مربوطةٌ بخيطٍ طولُهُ (0.80 m)، تتحرَّكُ حركةً دائريةً منتظمةً، ويبلغُ الزمنُ الدوريُّ للحركةِ (1.0 s). إذا كانَ طولُ الخيطِ نصفَ قُطرِ المسارِ الدائريِّ، فما مقدارُ التسارُعِ المركزيِّ لهذهِ الحركةِ؟

الإثراءُ والتوسعُ

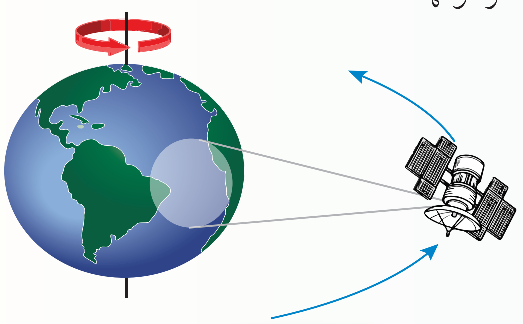
الفيزياءُ والفضاءُ

الأقمارُ الصناعيةُ المُتزامِنةُ معَ الأرضِ

توضَعُ بعضُ الأقمارِ الصناعيةِ في مداراتٍ حولَ الأرضِ، بحيثُ يتزامنُ دورانُها معَ دورانِ الأرضِ، فتبقى فوقَ منطقةٍ مُحدَّدةٍ منْ سطحِ الأرضِ باستمرارٍ، وتدورُ معَها بالسرعةِ نفسِها. والهدفُ منْ وضعِ هذهِ الأقمارِ هوَ تأمينُ عمليةِ الاتصالِ التلفزيونيِّ والهاتفيِّ وشبكةِ الإنترنتْ على مدارِ اليومِ في هذهِ المنطقةِ. وفي المقابلِ، توجدُ أقمارٌ أُخرى خاصةٌ بالتصويرِ، والمسحِ الجويِّ، وغيرِ ذلكَ منَ المهامِّ التي لا تتزامنُ حركتُها معَ حركةِ الأرضِ، وتنتقلُ منْ فوقِ بلدٍ إلى آخرَ، منْ مثلِ أقمارِ المسحِ الجيولوجيِّ والبيئيِّ ومحطةِ الفضاءِ الدوليةِ (ISS).

عندَ وضعِ قمرٍ صناعيٍّ مُتزامِنٍ معَ الأرضِ في مدارِهِ، يجبُ مراعاةُ ما يأتي:

1. مساواةُ الزمنِ الدوريِّ للقمرِ الصناعيِّ طولَ اليومِ الفلكيِّ للأرضِ، وهوَ الزمنُ اللازمُ لنقطةٍ على سطحِ الأرضِ حتّى تدورَ حولَ محورِ الأرضِ دورةً كاملةً (360°)، ويساوي (23h 56m 4s)، وهوَ يقلُّ بمقدارِ (4) دقائقَ تقريبًا عنِ اليومِ الشمسيِّ الذي تدورُ فيهِ الشمسُ ظاهريًا حولَ الأرضِ دورةً كاملةً.
2. وفقًا للقانونِ الثالثِ لكبلر، توجدُ نسبةٌ ثابتةٌ بينَ مربعِ الزمنِ الدوريِّ للقمرِ الصناعيِّ ومكعبِ نصفِ قُطْرِ مدارِهِ. ونتيجةً لذلكَ، فإنَّ نصفَ قُطْرِ مدارِ القمرِ الصناعيِّ المُتزامِنِ معَ الأرضِ هوَ (42155 km)، وهذا يعني أنَّ ارتفاعَهُ فوقَ سطحِ الأرضِ يبلغُ (35786 km).
3. وجوبُ معرفةِ نصفِ قُطْرِ المدارِ، وطولِ المحيطِ، والزمنِ الدوريِّ لهُ؛ لإيجادِ مقدارِ السرعةِ المماسيةِ للقمرِ المُتزامِنِ معَ الأرضِ: (11066 km/h)، أوْ: (3.07 km/s).
4. وجوبُ أنْ يكونَ مدارُ القمرِ المُتزامِنِ معَ الأرضِ فوقَ خطِّ الاستواءِ حتّى يبدوَ القمرُ ثابتًا في السماءِ، وإلّا فإنَّهُ سيظهرُ مُتذبذِبًا بينَ الشمالِ والجنوبِ.
5. وجوبُ أنْ يكونَ شكلُ المدارِ دائريًّا تمامًا. وفي حالِ كانَ المدارُ إهليلجيًّا، فإنَّ القمرَ سيتحرَّكُ بسرعةٍ مماسيةٍ مُتغيِّرةٍ. ونتيجةً لذلكَ، سيتغيَّرُ موقعُهُ شرقًا وغربًا فوقَ البُقْعةِ المُحدَّدِ لهُ أنْ يستقرَّ فوقَها.



يُبيِّنُ الشكلُ المجاورُ قمرًا صناعيًّا منَ النوعِ المُتزامِنِ في حركتِهِ معَ حركةِ الأرضِ، وهوَ يدورُ حولَها على ارتفاعِ (35786 km) فوقَ سطحِها، بحيثُ يبقى مُقابِلًا لمنطقةٍ تضمُّ جنوبَ المحيطِ الأطلسيِّ.

أبحث أبحثُ في شبكةِ الإنترنتْ عنْ حياةِ العالِمِ كبلر وقوانينِهِ في الفَلَكِ، ثمَّ أكتبُ تقريرًا يتضمَّنُ لمحةً عنْ حياتِهِ، ونصوصَ قوانينِهِ الثلاثةِ، ثمَّ أُنظِّمُ جدولًا يحوي بعضَ كواكبِ المجموعةِ الشمسيةِ، ويُبيِّنُ بُعْدَها عنِ الشمسِ، وزمنَ دورانِها حولَ الشمسِ.

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

1. المُتَّجِهُ الذي يُمثِّلُ التغيُّرَ في موقعِ جسمٍ بالنسبةِ إلى نقطةِ إسنادٍ مرجعيةٍ، هوَ:

أ . السرعةُ القياسيةُ.

ب . السرعةُ المُتَّجِهةُ.

جـ . الإزاحةُ.

د . الموقعُ.

2. ناتجُ قسمةِ المسافةِ الكليةِ التي تقطعُها سيارةٌ على الزمنِ الكليِّ لحركتِها، يُسمّى:

أ . السرعةَ القياسيةَ المتوسطةَ.

ب . السرعةَ المُتَّجِهةَ المتوسطةَ.

جـ . السرعةَ المُتَّجِهةَ اللحظيةَ.

د . التسارُعَ المتوسطَ.

3. إذا قُذِفَ جسمٌ رأسيًّا إلى الأعلى، ووصلَ أقصى ارتفاعٍ لهُ، فإنَّ:

أ . إزاحتَهُ تساوي صفرًا.

ب . تسارُعَهُ يساوي صفرًا.

جـ . زمنَ الصعودِ يساوي صفرًا.

د . سرعتَهُ تساوي صفرًا.

4. العبارةُ الصحيحةُ التي تصفُ حركةَ المقذوفِ، بإهمالِ مقاومةِ الهواءِ، هيَ:

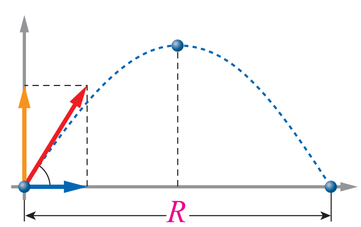
أ . التسارُعُ الأفقيُّ صفرٌ، والتسارُعُ الرأسيُّ (g).

ب . التسارُعُ الأفقيُّ صفرٌ، والتسارُعُ الرأسيُّ صفرٌ.

جـ . التسارُعُ الأفقيُّ (g)، والتسارُعُ الرأسيُّ صفرٌ.

د . التسارُعُ الأفقيُّ (g)، والتسارُعُ الرأسيُّ (g).

5. الإزاحةُ الأفقيةُ التي يَصنعُها المقذوفُ في الشكلِ المجاورِ عندما يعودُ إلى مستوى إطلاقِهِ، تُسمّى:



أ . أقصى ارتفاعٍ.

ب . المدى الأفقيَّ.

جـ . المدى الرأسيَّ.

د . المسارَ الفعليَّ.

2. أَصِفُ نوعَ الحركةِ في كلِّ حالةٍ ممّا يأتي؛ بالاختيارِ ممّا بينَ القوسيْنِ:

(بُعْدٌ، بُعْدانِ، دائريةٌ منتظمةٌ، دائريةٌ غيرُ منتظمةٍ):

أ . الحركةُ الدورانيةُ بمعدلٍ ثابتٍ لعجلةِ السيارةِ حولَ محورِها.

ب. حركةُ قطارٍ على سكَّةِ حديدٍ أفقيةٍ في خطٍّ مستقيمٍ باتجاهٍ واحدٍ (شرقًا).

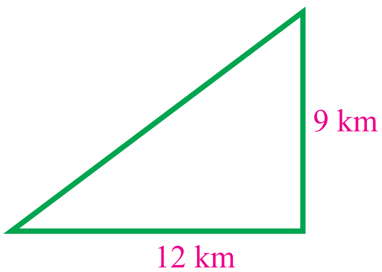
جـ. حركةُ قطارٍ على سكَّةِ حديدٍ أفقيةٍ في خطٍّ مستقيمٍ باتجاهيْنِ مختلفيْنِ (شرقًا، وغربًا).

د . حركةُ قطارٍ على سكَّةِ حديدٍ غيرِ أفقيةٍ (صعودًا، وهبوطًا) باتجاهِ الغربِ.

هـ. حركةُ طائرةٍ على مَدْرجِ المطارِ.

و . حركةُ قمرٍ صناعيٍّ حولَ الأرضِ، على ارتفاعٍ ثابتٍ فوقَ سطحِها.

3. أَجِدُ سرعةَ عدّاءٍ قطعَ مسافةَ (51 km) في (6 h)، ثمَّ أَصِفُ نوعَ هذهِ السرعةِ.



4. تحرَّكَتْ درّاجةٌ هوائيةٌ في خطٍّ مستقيمٍ باتجاهِ الشرقِ، فقطعَتْ مسافةَ (12 km)، ثمَّ تحرَّكَتْ في خطٍّ مستقيمٍ باتجاهِ الشمالِ، فقطعَتْ مسافةَ (9 km) في (35 min) كما في الشكلِ المجاورِ. أَجِدُ:

أ . السرعةَ القياسيةَ المتوسطةَ للدرّاجةِ في أثناءِ حركتِها.

ب. السرعةَ المُتَّجِهةَ المتوسطةَ للدرّاجةِ في أثناءِ حركتِها.

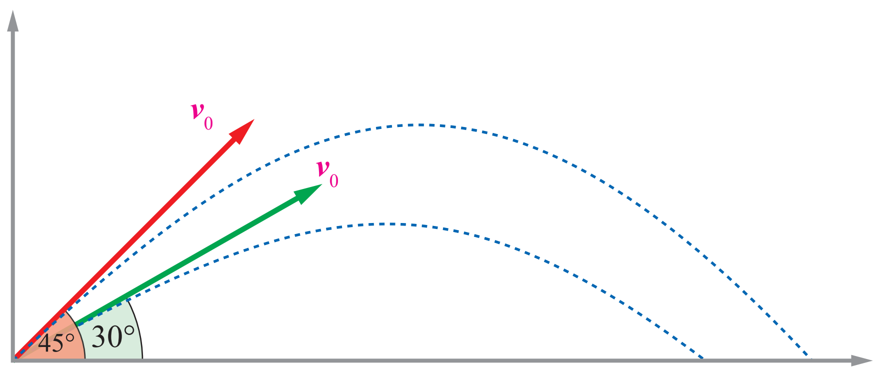
5. صمَّمَتْ مهندسةٌ مَدْرجًا لحركةِ الطائراتِ منْ وضعِ السكونِ حتّى تبلغَ سرعتُها النهائيةُ عندَ الإقلاعِ (60 m/s). إذا كانَ تسارُعُ إحدى الطائراتِ ($2.4\ m/s^2$)، فما أقلُّ طولٍ ممكنٍ للمَدْرجِ؟

6. رمَتْ ليلى قُبَّعتَها إلى الأعلى بسرعةٍ ابتدائيةٍ رأسيةٍ مقدارُها (7 m/s)، بإهمالِ مقاومةِ الهواءِ. ما أقصى ارتفاعٍ وصلَتْ إليْهِ القُبَّعةُ؟

7. أُطلِقَتْ قذيفةٌ منْ سطحِ الأرضِ بسرعةٍ ابتدائيةٍ، مُركَّبتُها الأفقيةُ (49 m/s)، ومُركَّبتُها الرأسيةُ (98 m/s). أَجِدُ مقدارَ الزمنِ اللازمِ لوصولِ القذيفةِ إلى أقصى ارتفاعٍ.

8. قُذِفَتْ كرةٌ أفقيًّا منْ فوقِ بنايةٍ بسرعةٍ ابتدائيةٍ مقدارُها (20 m/s)، فوصلَتْ سطحَ الأرضِ بعدَ مرورِ (3.0 s) منْ رميِها. إذا قُذِفَتِ الكرةُ أفقيًّا منَ المكانِ نفسِهِ بسرعةٍ مقدارُها (30 m/s)، فمتى تصلُ سطحَ الأرضِ؟

9. أُطلِقَتْ قذيفةٌ بسرعةٍ ابتدائيةٍ (v_0)، وبزاويةٍ معَ سطحِ الأرضِ مقدارُها (30°)، كما في الشكلِ الآتي. إذا أصبحَتِ الزاويةُ (45°)، فكيفَ سيتغيَّرُ مدى القذيفةِ الأفقيُّ؟



الوحدةُ 3

القوى
Forces

أتأمَّلُ الصورةَ

الفيزياءُ في السياراتِ

عندَ تصنيعِ نوعٍ جديدٍ منَ السياراتِ، فإنَّهُ يخضعُ لاختباراتٍ عِدَّةٍ قبلَ إنتاجِهِ على نحوٍ تجاريٍّ وتسويقِهِ، منْ مثلِ: اختباراتِ مستوى الأمانِ، وفاعليةِ الوسائدِ الهوائيةِ، وأحزمةِ الأمانِ، وأنظمةِ المكابحِ.

فهلْ لعلمِ الفيزياءِ دورٌ في تطويرِ صناعةِ السياراتِ منْ حيثُ شكلُها ووسائلُ الأمانِ فيها؟ لماذا توضعُ دميةٌ مكانَ السائقِ عندَ اختبارِ السيارةِ بتعريضِها لحادثِ اصطدامٍ بحاجزٍ؟ ما الذي يُختبَرُ في هذا التصادمِ؟

الفكرةُ العامةُ:

للقوى تأثيرٌ كبيرٌ في حياتِنا، وجميعِ أنشطتِنا.

الدرسُ الأولُ: القانونُ الأولُ في الحركةِ لنيوتن

Newton’s First Law of Motion

الفكرةُ الرئيسةُ: تُعَدُّ معرفتُنا بالقانونِ الأولِ لنيوتن (قانونُ القصورِ الذاتيِّ) أساسيةً لفهمِ بعضِ الظواهرِ الحركيةِ.

الدرسُ الثاني: القانونُ الثاني والقانونُ الثالثُ في الحركةِ لنيوتن

Newton’s Second and Third Laws of Motion

الفكرةُ الرئيسةُ: يعتمدُ تسارُعُ أيِّ جسمٍ على كتلتِهِ، وعلى القُوَّةِ المحصلةِ المُؤثِّرةِ فيهِ. توجدُ القوى في الطبيعةِ فقطْ بصورةِ أزواجٍ، ولا يُمكِنُ أنْ توجدَ منفردةً.

تجربة استهلالية

القصورُ الذاتيُّ

الموادُّ والأدواتُ: لوحُ تزلُّجٍ أوْ عربةٌ، مكعبٌ خشبيٌّ، حاجزٌ، شريطٌ لاصقٌ.

إرشاداتُ السلامةِ: تنفيذُ التجربةِ في منتصفِ غرفةِ الصفِّ، بعيدًا عنْ أيِّ قطعِ أثاثٍ قابلةٍ للكسرِ.

خطواتُ العملِ:

1 أضعُ لوحَ التزلُّجِ (أوِ العربةَ) في منتصفِ غرفةِ الصفِّ، ثمَّ أضعُ المكعبَ عليْهِ، ثمَّ أضعُ الحاجزَ على بُعْدِ (1-2 m) منَ اللوحِ.

2 **ألاحِظُ** ما يحدثُ عندَ وضعِ المكعبِ على اللوحِ، ودفعِ اللوحِ باتجاهِ الحاجزِ، مُدَوِّنًا ملاحظاتي.

3 **ألاحِظُ** ما يحدثُ عندَ تكرارِ الخطوةِ السابقةِ، بعدَ تثبيتِ المكعبِ باللوحِ باستخدامِ الشريطِ اللاصقِ، مُدَوِّنًا ملاحظاتي.

التحليلُ والاستنتاجُ:

1. **أُقارِنُ** بينَ ملاحظاتي في الخطوتيْنِ: (2)، وَ (3).
2. ما سببُ اندفاعِ المكعبِ الخشبيِّ في الخطوةِ (2)؟
3. **أُفسِّرُ:** هلْ يتعيَّنُ على سائقي السياراتِ استخدامُ أحزمةِ الأمانِ؟ أُفسِّرُ إجابتي.

القانونُ الأولُ في الحركةِ لنيوتن
Newton's First Law of Motion

الفكرةُ الرئيسةُ:

تُعَدُّ معرفتُنا بالقانونِ الأولِ لنيوتن (قانونُ القصورِ الذاتيِّ) أساسيةً لفهمِ بعضِ الظواهرِ الحركيةِ.

نتاجاتُ التعلّمِ:

- أُوضِّحُ مفهومَ القُوَّةِ.
- أرسمُ مُخطَّطَ الجسمِ الحُرِّ لتحديدِ جميعِ القوى المُؤثِّرةِ في الجسمِ.
- أذكرُ نصَّ القانونِ الأولِ في الحركةِ لنيوتن.
- أُفسِّرُ ظواهرَ طبيعيةً تتعلَّقُ بالقصورِ الذاتيِّ اعتمادًا على القانونِ الأولِ لنيوتن.
- أُطبِّقُ ما تعلَّمْتُهُ بحلِّ مسائلَ على القُوَّةِ المحصلةِ، والقانونِ الأولِ لنيوتن.

المفاهيمُ والمصطلحاتُ:

القُوَّةُ Force.

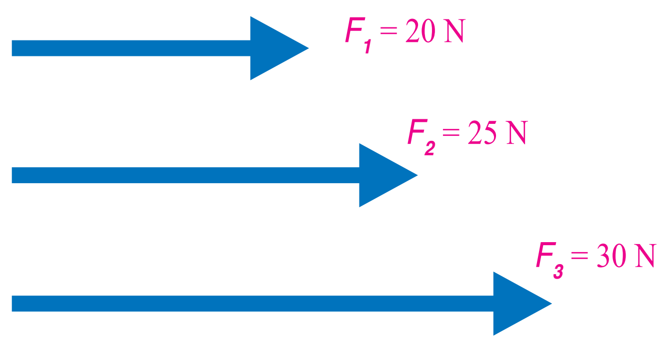
القانونُ الأولُ لنيوتن Newton's First Law.

القصورُ الذاتيُّ Inertia.

القُوَّةُ Force

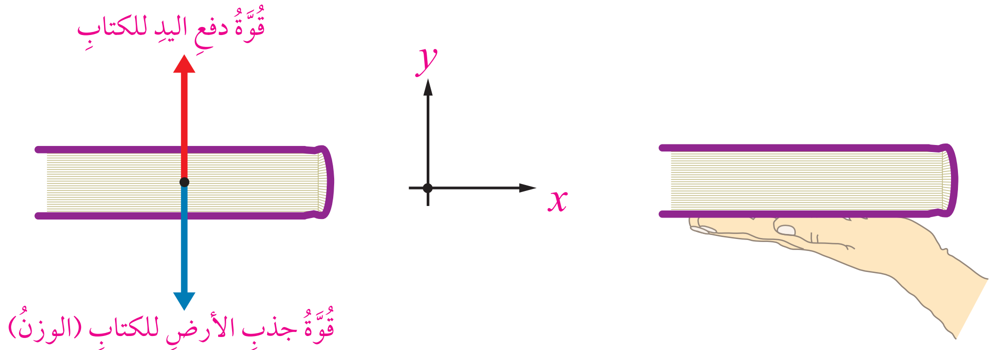
إنَّ كلَّ ما يُؤثِّرُ في الأجسامِ، فيُغيِّرُ منْ أشكالِها أوْ حالاتِها الحركيةِ، يُسمّى **قُوَّةً Force**، يُرمَزُ إليْها بالرمزِ (***F***)، وتقاسُ بوحدةِ newton (N) بحسبِ النظامِ الدوليِّ لوحداتِ القياسِ (SI).

تتغيَّرُ حالةُ الجسمِ الحركيةُ بتغيُّرِ مقدارِ سرعتِهِ، أوِ اتجاهِها، أوْ كليْهما معًا. وقدْ درسْتُ في وحدةِ (المُتَّجِهاتُ) أنَّ القُوَّةَ كميةٌ فيزيائيةٌ مُتَّجِهةٌ، تُحدَّدُ بمقدارٍ واتجاهٍ، حيثُ تُمثَّلُ القُوَّةُ على شكلِ سهمٍ يتناسبُ طولُهُ معَ مقدارِ القُوَّةِ التي يُمثِّلُها وفقَ مقياسِ رسمٍ مناسبٍ، ويدلُّ اتجاهُ السهمِ على اتجاهِ تأثيرِ القُوَّةِ، أوْ خطِّ عملِها. أنظرُ الشكلَ (1).



الشكلُ (1): تمثيلُ القوى بأسهمٍ تتناسبُ أطوالُها معَ مقاديرِ القوى التي تُمثِّلُها.

أتحقَّقُ:
- ما القُوَّةُ؟
- ما وحدةُ قياسِها؟



الشكلُ (2): أ. اتزانُ كتابِ الفيزياءِ على يدِ طالبٍ.

ب. مُخطَّطُ الجسمِ الحُرِّ للكتابِ.

مُخطَّطُ الجسمِ الحُرِّ Free-Body Diagram

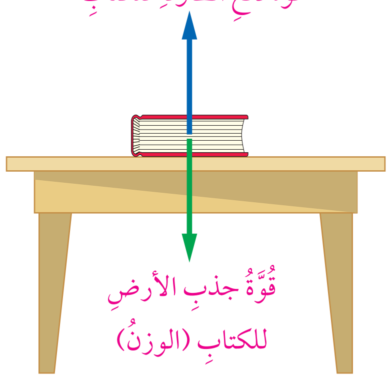
هوَ رسمٌ تخطيطيٌّ يُبيِّنُ جميعَ القوى الخارجيةِ المُؤثِّرةِ في جسمٍ ما؛ إذْ يُستخدَمُ نموذجُ الجسيمِ النقطيِّ في تمثيلِ الجسمِ بنقطةٍ، ثمَّ تُمثَّلُ كلُّ قُوَّةٍ خارجيةٍ مُؤثِّرةٍ في الجسمِ بسهمٍ يتناسبُ طولُهُ معَ مقدارِ القُوَّةِ، ويشيرُ إلى اتجاهِ تأثيرِها.

يُطلَقُ على الجسمِ الذي ندرسُ تأثيرَ القوى فيهِ اسمُ النظامِ. أنظرُ الشكلَ (2) الذي يُمثِّلُ مُخطَّطَ الجسمِ الحُرِّ لكتابٍ (نظامٌ) يتزنُ على يدِ طالبٍ؛ إذْ يتأثَّرُ الكتابُ بقُوَّتيْنِ، هما: قُوَّةُ دفعِ اليدِ للكتابِ إلى أعلى، وقُوَّةُ جذبِ الأرضِ للكتابِ إلى أسفلَ.

أتحقَّقُ: ما المقصودُ بمُخطَّطِ الجسمِ الحُرِّ؟

القانونُ الأولُ في الحركةِ لنيوتن
Newton's First Law of Motion

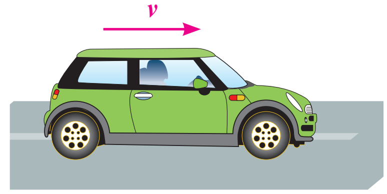
ارتبطَتِ القُوَّةُ بالحركةِ على مَرِّ العصورِ؛ فمنذُ زمنِ أرسطو اعتقدَ العلماءُ أنَّ الحالةَ الطبيعيةَ للأجسامِ هيَ السكونُ، وأنَّ القُوَّةَ ضروريةٌ لتحريكِ جسمٍ ما، وأنَّهُ يجبُ أنْ تُؤثِّرَ قُوَّةٌ في الجسمِ باستمرارٍ لكيْ يظلَّ مُتحرِّكًا، وأنَّ زوالَ تأثيرِ هذهِ القُوَّةِ يوقِفُ الجسمَ عنِ الحركةِ. لقدْ ظلَّ هذا الاعتقادُ سائدًا حتّى بدايةِ القرنِ السابعَ عشرَ للميلادِ؛ إذْ جاءَ العالِمُ غاليليو مُصحِّحًا أفكارَ العلماءِ السابقينَ، واقترحَ أنَّ الحركةَ بسرعةٍ مُتَّجِهةٍ ثابتةٍ هيَ حالةٌ طبيعيةٌ للأجسامِ مثلُ حالةِ السكونِ، وأنَّ كرةً صُلْبَةً ملساءَ تتحرَّكُ بسرعةٍ مُتَّجِهةٍ ثابتةٍ على مستوًى أفقيٍّ أملسَ ستستمرُّ في حركتِها بسرعةٍ مُتَّجِهةٍ ثابتةٍ في حالِ انعدامِ قوى الاحتكاكِ ومقاومةِ الهواءِ.



الشكلُ (3): كتابٌ ساكنٌ في حالةِ اتزانٍ على سطحِ طاولةٍ أفقيٍّ.

إذا كانَتِ القُوَّةُ المحصلةُ المُؤثِّرةُ في جسمٍ ما صفرًا، فكيفَ تكونُ حالتُهُ الحركيةُ؟ للإجابةِ عنْ هذا السؤالِ، أنظرُ الشكلَ (3) الذي يُظهِرُ كتابًا ساكنًا على سطحِ طاولةٍ أفقيٍّ؛ إذْ يتأثَّرُ الكتابُ بقُوَّتيْنِ متساويتيْنِ مقدارًا، ومتعاكستيْنِ اتجاهًا، هما: وزنُهُ إلى أسفلَ، وقُوَّةُ دفعِ سطحِ الطاولةِ لهُ إلى أعلى، وبذلكَ تكونُ محصلتُهُما صفرًا. وهذا يعني أنَّ الكتابَ في حالةِ اتزانٍ سكونيٍّ، وأنَّهُ يظلُّ ساكنًا ما لمْ تُؤثِّرْ فيهِ قُوَّةٌ إضافيةٌ تُحرِّكُهُ إلى موقعٍ آخرَ.

وفي المقابلِ، إذا تحرَّكَ جسمٌ ما بسرعةٍ ثابتةٍ مقدارًا واتجاهًا، فإنَّ القُوَّةَ المحصلةَ المُؤثِّرةَ فيهِ تساوي صفرًا؛ ما يعني أنَّهُ في حالةِ اتزانٍ ديناميكيٍّ، ومثالُ ذلكَ حركةُ سيارةٍ بسرعةٍ مُتَّجِهةٍ ثابتةٍ على طريقٍ أفقيٍّ. أنظرُ الشكلَ (4).



الشكلُ (4): سيارةٌ تتحرَّكُ بسرعةٍ مُتَّجِهةٍ ثابتةٍ على طريقٍ أفقيٍّ.

وتأسيسًا على ما سبقَ، وبناءً على مشاهداتِنا اليوميةِ، فإنَّهُ يَلزمُ توافُرُ قُوَّةٍ محصلةٍ لتغييرِ مقدارِ سرعةِ الجسمِ، أوِ اتجاهِها، أوْ كليْهِما معًا. فمثلًا، إذا أرادَ سائقٌ زيادةَ سرعةِ سيارتِهِ فإنَّهُ يضغطُ على دوّاسةِ

الوقودِ، وإذا أرادَ أنْ يُبطِئَ سرعتَها فإنَّهُ يضغطُ على دوّاسةِ المكابحِ، وإذا أرادَ تغييرَ اتجاهِ سرعتِها فإنَّهُ يُؤثِّرُ بقُوَّةٍ في عجلةِ القيادةِ.

يُمكِنُ تفسيرُ هذهِ المشاهداتِ باستخدامِ **القانونِ الأولِ لنيوتن** **Newton's first law**، الذي نصُّهُ: "الجسمُ يظلُّ على حالتِهِ منْ حيثُ السكونُ أوِ الحركةُ بسرعةٍ ثابتةٍ مقدارًا واتجاهًا ما لمْ تُؤثِّرْ فيهِ قُوَّةٌ خارجيةٌ محصلةٌ تُغيِّرُ حالتَهُ الحركيةَ".

إذا أَنْعَمْنا النظرَ في هذا القانونِ فَيُمكِنُ التوصُّلُ إلى ما يأتي:

أ . القُوَّةُ المحصلةُ المُؤثِّرةُ في كلٍّ منَ الجسمِ الساكنِ والجسمِ المُتحرِّكِ بسرعةٍ ثابتةٍ مقدارًا واتجاهًا تساوي صفرًا؛ لذا يكونُ الجسمُ مُتَّزِنًا:

$$\sum \boldsymbol{F} = 0$$

وبذلكَ، فإنَّ:

$$\sum F_x = 0$$

$$\sum F_y = 0$$

ب. الجسمُ عاجزٌ، أوْ قاصرٌ عنْ تغييرِ حالتِهِ الحركيةِ منْ تلقاءِ نفسِهِ، ويتطلَّبُ تغييرَ هذهِ الحالةِ تأثيرُ قُوَّةٍ محصلةٍ في الجسمِ؛ لذا يُعرَفُ القانونُ الأولُ لنيوتن باسمِ قانونِ القصورِ الذاتيِّ.

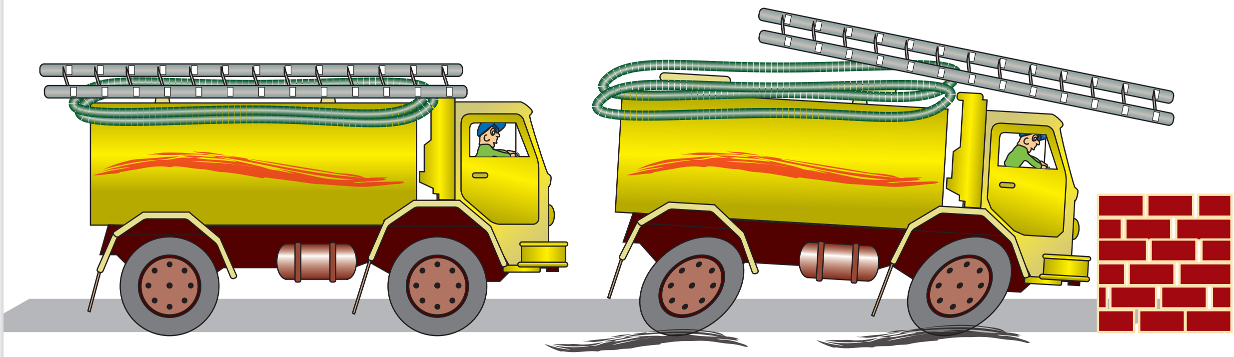
✓ **أتحقَّقُ:** أُعبِّرُ بكلماتي الخاصةِ عنِ القانونِ الأولِ لنيوتن.

القصورُ الذاتيُّ Inertia

القصورُ الذاتيُّ Inertia هوَ ممانعةُ الجسمِ لأيِّ تغييرٍ في حالتِهِ الحركيةِ؛ فإذا كانَ الجسمُ ساكنًا أوْ مُتحرِّكًا بسرعةٍ مُتَّجِهةٍ ثابتةٍ فإنَّهُ يظلُّ على حالتِهِ ما لمْ تُؤثِّرْ فيهِ قُوَّةٌ خارجيةٌ محصلةٌ.

الفيزياءُ والحياةُ

للفيزياءِ دورٌ أساسٌ في تصميمِ السياراتِ منْ حيثُ أشكالُها، ووسائلُ الأمانِ والحمايةِ. تعكسُ صورةُ بدايةِ الوحدةِ هذا الدورَ لعلمِ الفيزياءِ. فمثلًا، لاختبارِ فاعليةِ أنظمةِ المكابحِ وأحزمةِ الأمانِ والوسائدِ الهوائيةِ في نوعٍ جديدٍ منَ السياراتِ قبلَ إنتاجِهِ وتسويقِهِ، تُعَرَّضُ لحادثِ اصطدامٍ بحاجزٍ. وتوضعُ دميةٌ مكانَ السائقِ، تكونُ مصنوعةً منْ موادَّ تُحاكي تركيبَ أعضاءِ جِسمِ الإنسانِ، ويوصلُ في الدميةِ أنواعٌ مختلفةٌ منَ المجسّاتِ في مواقعَ مختلفةٍ منْ جسمِها، وعلى أعماقٍ مختلفةٍ فيها لقياسِ تسارُعِ أجزائِها، والقوى المُؤثِّرةِ فيها عندَ وقوعِ اصطدامٍ.
ينتجُ منَ الاصطدامِ اندفاعُ الدميةِ جهةَ عجلةِ القيادةِ بسببِ قصورِها الذاتيِّ؛ فتصطدمُ بها، وتُؤثِّرُ العجلةُ في الدميةِ بقُوَّةٍ في اتجاهٍ معاكسٍ لاتجاهِ اندفاعِها. وبعدَ تحليلِ البياناتِ المستقاةِ منْ هذهِ المجسّاتِ يُعرَفُ تسارُعُ الدميةِ والقوى المُؤثِّرةُ في أجزائِها المختلفةِ. وبناءً على هذهِ النتائجِ تُدخَلُ تعديلاتٌ على تصميمِ السيارةِ، ووسائلِ الأمانِ فيها.



الشكلُ (5): اندفاعُ السُّلّمِ إلى الأمامِ بسببِ القصورِ الذاتيِّ.

تُعَدُّ كتلةُ الجسم مقياسًا لقصورِهِ الذاتيِّ الذي يتناسبُ طرديًّا معَها؛ فكلّما زادَتْ كتلةُ الجسمِ زادَ قصورُهُ، ولَزِمَ تأثيرُ قُوّةٍ محصلةٍ أكبرَ لتغييرِ حالتِـهِ الحركيةِ.

يُمكِنُ تفسيرُ كثيـرٍ منَ المشاهـداتِ اليوميـةِ اعتمـادًا على القصورِ الذاتيِّ، مثلِ: اندفاعِ السائقِ والطلبةِ إلى الأمامِ عندَ توقُّفِ حافلةِ المدرسةِ فجأةً، وميلانِهِمْ إلى اليمينِ أوِ اليسارِ عندَ تغييرِ اتجاهِ سرعتِها، واندفاعِ الصناديقِ المُحمَّلَةِ على شاحنةٍ إلى الخلفِ (أوْ إلى الأمامِ) عندَ انطلاقِها بتسارُعٍ إلى الأمامِ (أوْ توقُّفِها المُفاجِئِ)؛ لذا يُلزِمُ قانونُ السيـرِ السائقينَ والرُّكّابَ باستخدامِ أحزمةِ الأمانِ، ويوجِبُ على سائـقي الشـاحنـاتِ ربطَ بضائعِ شاحناتِهِمْ؛ حفـاظًا على حيـاةِ المواطنينَ؛ لأنَّهُمْ أغلى ما نملكُ. ويُبيِّنُ الشكلُ (5) ما يحدثُ عندَ اصطدامِ الشاحنةِ بالحاجزِ؛ إذْ إنَّهُ يُؤثِّرُ فيها بقُوّةٍ، ويُغيِّرُ سرعتَـها المُتَّجهةَ، في حيـنِ ينـدفعُ السُّلَّمُ إلى الأمامِ بالسرعةِ نفسِها قبلَ التصادمِ بسببِ القصورِ الذاتيِّ، وعـدمِ تثبيتِهِ بالشاحنةِ. وهذا يُوضِّحُ أهميةَ تثبيتِ الحمولةِ جيدًا على المركباتِ.

✓ **أتحقَّقُ**: ما المقصودُ بالقصورِ الذاتيِّ؟

الشكلُ (6): عندَ سحبِ مفرشِ السفرةِ أفقيًّا بسرعةٍ كافيةٍ تظلُّ الأطباقُ ثابتةً تقريبًا على سطحِ الطاولةِ. **لسلامتِكَ، يُنصَحُ بعدمِ تجريبِ ذلكَ.**

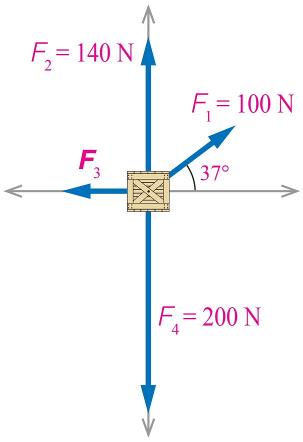
أفكِّرُ: في الشكلِ (6) تظلُّ أطباقُ السفرةِ ثابتةً على سطحِ الطاولةِ عندَ سحبِ المفرشِ أفقيًّا منْ أسفلِها بسرعةٍ كبيرةٍ. أُفسِّرُ ذلكَ.

المثالُ 1

يتزنُ صندوقٌ كتلتُهُ (20 kg) على سطحٍ أفقيٍّ، تحتَ تأثيرِ أربعِ قوًى مستويةٍ متلاقيةٍ، كما في الشكلِ (7) الذي يُبيِّنُ مُخطَّطَ الجسمِ الحُرِّ للصندوقِ. أَجِدُ:

أ . مقدارَ القُوَّةِ المحصلةِ المُؤثِّرةِ في الصندوقِ، مُحدِّدًا اتجاهَها.

ب . مقدارَ القُوَّةِ ($\boldsymbol{F}_3$).



الشكلُ (7): مُخطَّطُ الجسمِ الحُرِّ لصندوقٍ.

المعطياتُ: $(\boldsymbol{F}_1 = 100\text{ N}, 37°)$, $(\boldsymbol{F}_2 = 140\text{ N}, 90°)$, $(\boldsymbol{F}_4 = 200\text{ N}, 270°)$.

المطلوبُ: $\sum \boldsymbol{F} = ?$ ، $\boldsymbol{F}_3 = ?$.

الحلُّ:

أ . الصندوقُ متزنٌ؛ لذا، فإنَّ القُوَّةَ المحصلةَ المُؤثِّرةَ فيهِ تساوي صفرًا:

$\sum \boldsymbol{F} = 0$.

ب. القُوَّةُ $\boldsymbol{F}_3$ في اتجاهِ محورِ $(-x)$؛ لذا، لأَجِدَ مقدارَها أحسُبُ مجموعَ مُركَّباتِ القوى في اتجاهِ المحورِ (x)، وأساويها بالصفرِ لأنَّ الصندوقَ متزنٌ:

$$\sum F_x = F_{1x} + F_{2x} + F_{3x} + F_{4x} = 0$$

$$F_1 \cos\theta_1 + F_2 \cos\theta_2 + F_3 \cos\theta_3 + F_4 \cos\theta_4 = 0$$

$$100 \times \cos 37° + 140 \times \cos 90° + F_3 \times \cos 180° + 200 \times \cos 270° = 0$$

$$100 \times 0.8 + 140 \times 0 + F_3 \times -1 + 200 \times 0 = 0$$

$$80 + 0 - F_3 + 0 = 0$$

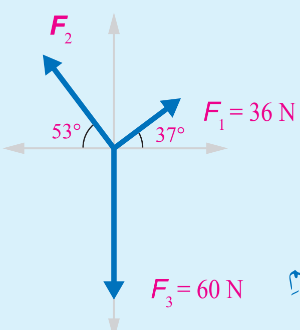
$$F_3 = 80\text{ N}$$

لذا، فإنَّ :

$$\boldsymbol{F}_3 = 80\text{ N}, 180°$$

تمرينٌ

يُمثِّلُ الشكلُ (8) مُخطَّطَ الجسمِ الحُرِّ لدميةٍ متزنةٍ، يُؤثِّرُ فيها ثلاثُ قوًى في الاتجاهاتِ المُبيَّنةِ في الشكلِ. أَجِدُ مقدارَ القُوَّةِ $\boldsymbol{F}_2$.



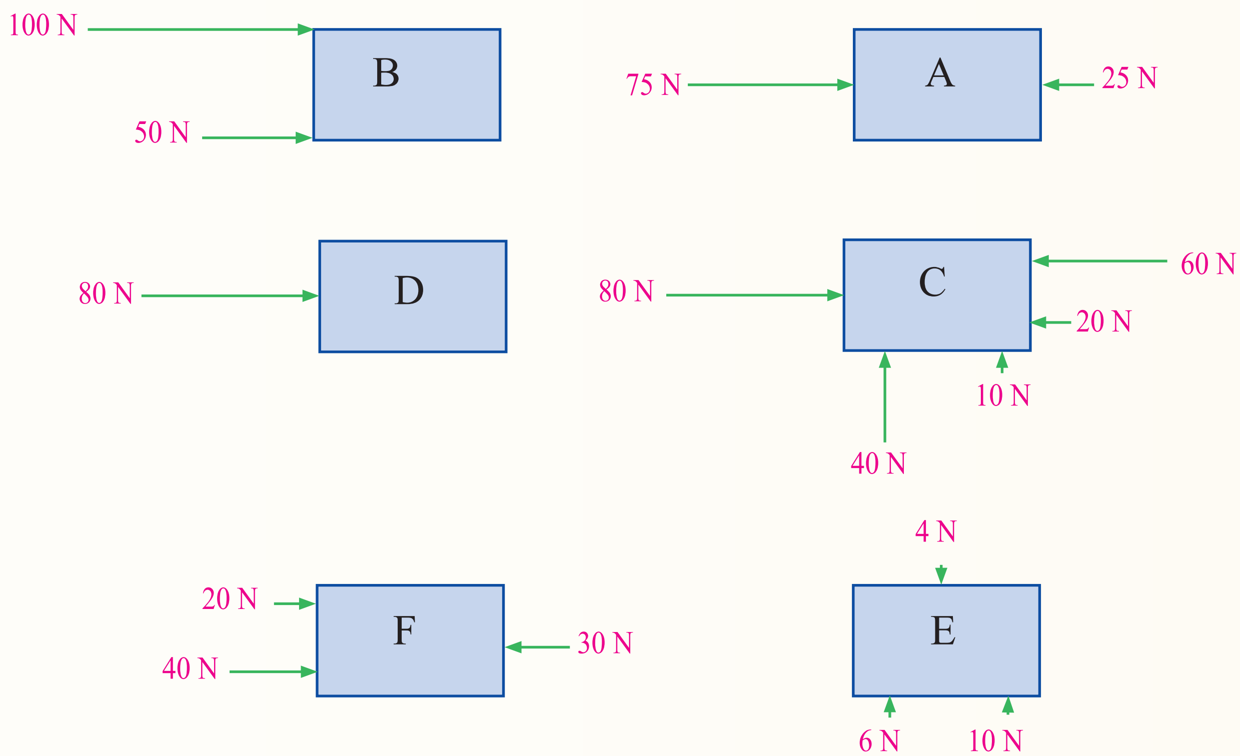
الشكلُ (8): مُخطَّطُ الجسمِ الحُرِّ لدميةٍ متزنةٍ.

مراجعةُ الدرسِ

1. **الفكرةُ الرئيسةُ:** لماذا يشترطُ قانونُ السيرِ ربطَ حزامِ الأمانِ عندَ ركوبِ السيارةِ؟

2. **أستنتجُ:** تتحرَّكُ سيارةٌ بسرعةٍ ثابتةٍ مقدارًا واتجاهًا على طريقٍ أفقيٍّ مستقيم. إذا كانَتْ قُوَّةُ دفعِ مُحرِّكِها (6000 N)، فما مقدارُ القُوَّةِ المعيقةِ المُؤثِّرةِ في السيارةِ؟ ما اتجاهُها؟

3. **أحسُبُ:** الأجسامُ المُبيَّنةُ في الشكلِ الآتي جميعُها ساكنةٌ، وهيَ في حالةِ اتزانٍ. أَجِدُ القُوَّةَ الإضافيةَ التي يَلزمُ التأثيرُ بها في كلِّ جسمٍ حتّى يتحقَّقَ شرطُ الاتزانِ، ثمَّ أُحدِّدُ اتجاهَ هذهِ القُوَّةِ.



4. **التفكيرُ الناقدُ:** في أثناءِ دراستي وزميلي يوسفَ لهذا الدرسِ، قالَ: "يجبُ أنْ تُؤثِّرَ قُوَّةٌ محصلةٌ في الجسمِ بصورةٍ دائمةٍ لكيْ يتحرَّكَ بسرعةٍ مُتَّجِهةٍ ثابتةٍ". أُناقِشُ صحَّةَ قولِ يوسفَ.

الفكرةُ الرئيسةُ:
يعتمدُ تسارُعُ أيِّ جسمٍ على كتلتِهِ، وعلى القُوَّةِ المحصلةِ المُؤثِّرةِ فيهِ. توجدُ القوى في الطبيعةِ فقطْ بصورةِ أزواجٍ، ولا يُمكِنُ أنْ توجدَ منفردةً.

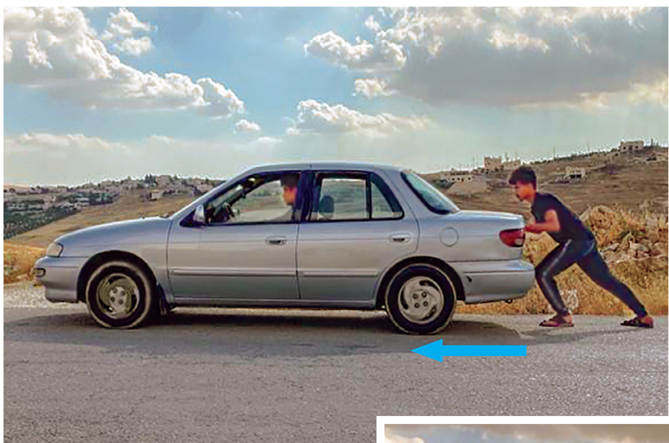
نتاجاتُ التعلُّمِ:
- أستقصي القانونَ الثانيَ لنيوتن.
- أذكرُ نَصَّ كلٍّ منَ القانونِ الثاني والقانونِ الثالثِ لنيوتن.
- أُحدِّدُ قُوَّتَي الفعلِ وردِّ الفعلِ في مجموعةٍ منَ الأنظمةِ.
- أُطبِّقُ ما تعلَّمْتُهُ بحلِّ مسائلَ على قوانينِ نيوتن في الحركةِ.

المفاهيمُ والمصطلحاتُ:
القانونُ الثاني لنيوتن
Newton's Second Law.
القانونُ الثالثُ لنيوتن
Newton's Third Law.

القانونُ الثاني في الحركةِ لنيوتن
Newton's Second Law of Motion

يُقدِّمُ لنا القانونُ الأولُ لنيوتن وصفًا لحالةِ الجسمِ الحركيةِ عندما تكونُ القُوَّةُ المحصلةُ المُؤثِّرةُ فيهِ صفرًا، منْ دونِ أنْ يُوضِّحَ كيفيةَ تغيُّرِها عندما تُؤثِّرُ فيهِ قُوَّةٌ محصلةٌ لا تساوي صفرًا. أمّا قانونُهُ الثاني فقدِ استكملَ العلاقةَ بينَ القُوَّةِ والحركةِ، وذلكَ بوصفِ حركةِ جسمٍ تُؤثِّرُ فيهِ قُوَّةٌ محصلةٌ.

يُبيِّنُ الشكلُ (9/أ) سيارةً يدفعُها شخصٌ واحدٌ، في حينِ يُبيِّنُ الشكلُ (9/ب) سيارةً يدفعُها أكثرُ منْ شخصٍ. في أيِّ الحالتيْنِ تكونُ القُوَّةُ المحصلةُ المُؤثِّرةُ في السيارةِ أكبرَ؟ في التجربةِ الآتيةِ سنستقصي عمليًّا تأثيرَ كلٍّ منَ القُوَّةِ المحصلةِ المُؤثِّرةِ في جسمٍ، وكتلةِ الجسمِ في تسارُعِهِ.

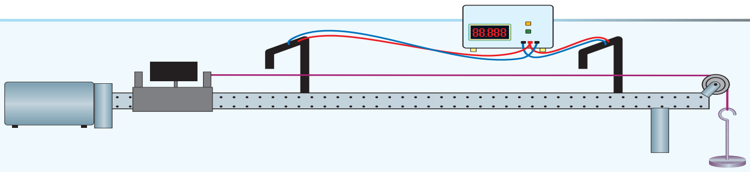
(أ)


(ب)


الشكلُ (9): القُوَّةُ المحصلةُ المُؤثِّرةُ في السيارةِ الظاهرةِ في الصورةِ (ب) أكبرُ منْ تلكَ المُؤثِّرةِ في السيارةِ الظاهرةِ في الصورةِ (أ)؛ لذا، فإنَّ تسارُعَها أكبرُ.

التجربة ١

القُوَّةُ والكتلةُ والتسارُعُ



الموادُّ والأدواتُ: مَدْرجٌ هوائيٌّ وملحقاتُهُ، مسطرةٌ متريةٌ، بكرةٌ، خيطٌ، حاملُ أثقالٍ، عشرةُ أثقالٍ كتلةُ كلٍّ منْها (10 g)، ميزانٌ.

إرشاداتُ السلامةِ: الحذرُ منْ سقوطِ الأجسامِ والأدواتِ على القدميْنِ.

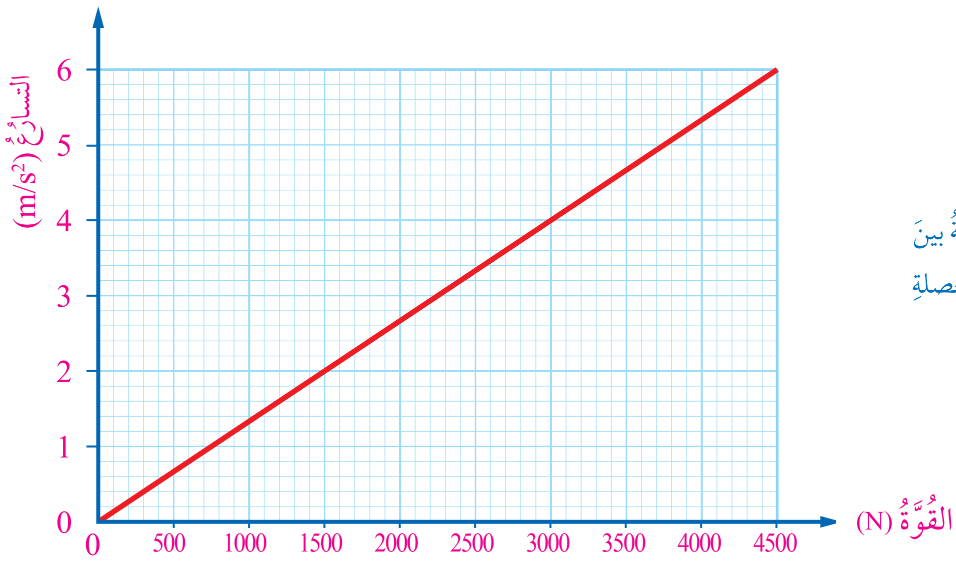
خطواتُ العملِ:

1. أُثبِّتُ المَدْرجَ الهوائيَّ أفقيًّا على سطحِ الطاولةِ، ثمَّ أُثبِّتُ البكرةَ في نهايتِهِ، كما في الشكلِ.
2. **أقيسُ** كتلةَ العربةِ المنزلقةِ، ثمَّ أُدوِّنُ القراءةَ أعلى الجدولِ (1)، ثمَّ أضعُ العربةَ عندَ بدايةِ المَدْرجِ.
3. أربطُ أحدَ طرفَي الخيطِ بمُقدِّمةِ العربةِ، ثمَّ أربطُ طرفَهُ الآخرَ بحاملِ الأثقالِ، مرورًا بالبكرةِ.
4. أُثبِّتُ إحدى البوّابتيْنِ الضوئيتيْنِ عندَ مُقدِّمةِ العربةِ، ثمَّ أُثبِّتُ البوّابةَ الأُخرى على بُعْدِ (1 m) منْها، ثمَّ أُدوِّنُ مقدارَ هذا البُعدِ (d) أعلى الجدولِ. بعدَ ذلكَ أُثبِّتُ حاجزَ الاصطدامِ في نهايةِ المسارِ؛ لمنعِ اصطدامِ العربةِ بالبكرةِ.
5. أَصِلُ البوّابتيْنِ بالعدّادِ الزمنيِّ الرقميِّ، ثمَّ أَصِلُهُ بمصدرِ الطاقةِ الكهربائيةِ، ثمَّ أُشغِّلُهُ.
6. أضعُ أثقالًا مناسبةً على العربةِ والحاملِ، بحيثُ تقطعُ العربةُ مسافةَ (1 m) في زمنٍ مناسبٍ، ثمَّ أَجِدُ كتلَ الحاملِ وأثقالَهُ، التي تُسمّى كتلةَ ثِقْلِ التعليقِ (m_{hang})، ثمَّ أُدوِّنُ القراءاتِ في الجدولِ. بعدَ ذلكَ أُضيفُ كتلَ الأثقالِ التي فوقَ العربةِ إلى كتلةِ العربةِ، ثمَّ أُدوِّنُها في الجدولِ تحتَ عمودِ كتلةِ العربةِ (m_{cart}).
7. أُشغِّلُ مضخَّةَ الهواءِ، ثمَّ أُفلِتُ العربةَ، ثمَّ أُدوِّنُ في الجدولِ تحتَ عمودِ الزمنِ (t) قراءةَ العدّادِ الزمنيِّ الرقميِّ، الذي يُمثِّلُ الزمنَ الذي تستغرقُهُ العربةُ في حركتِها بينَ البوّابتيْنِ.
8. أنقلُ ثِقْلًا منْ فوقِ العربةِ إلى الحاملِ، ثمَّ أُكرِّرُ الخطوةَ السابقةَ، وأُدوِّنُ في الجدولِ القياساتِ الجديدةَ لكلٍّ منْ: (m_{hang})، وَ (m_{cart})، والزمنِ.
9. أُكرِّرُ الخطوةَ السابقةَ مرَّتَيْنِ لأثقالٍ إضافيةٍ أُخرى.
10. **أحسُبُ** تسارُعَ العربةِ لكلِّ (m_{hang}) باستخدامِ العلاقةِ: $a = 2d/t^2$، ثمَّ أَجِدُ ناتجَ ضربِ $a\ (m_{hang} + m_{cart})$ لكلِّ حالةٍ.
11. أُكرِّرُ التجربةَ بتثبيتِ كتلةِ ثِقْلِ التعليقِ (m_{hang})، وتغييرِ كتلةِ العربةِ (m_{cart})؛ لدراسةِ العلاقةِ بينَ الكتلةِ والتسارُعِ، ثمَّ أُدوِّنُ القراءاتِ في الجدولِ (2).

التحليلُ والاستنتاجُ:

1. **أُقارِنُ** بينَ $a\ (m_{hang} + m_{cart})$ ومقدارِ وزنِ ثِقْلِ التعليقِ ($m_{hang}\ g$) لكلِّ حالةٍ. ما العلاقةُ بينَهُما؟
2. **أُمثِّلُ بيانيًّا** العلاقةَ بينَ مقدارِ القُوَّةِ المحصلةِ المُؤثِّرةِ في العربةِ ($m_{hang}\ g$) على المحورِ ($+y$) ومقدارِ التسارُعِ (a) على المحورِ ($+x$). ما شكلُ هذهِ العلاقةِ؟ ماذا أستنتجُ؟
3. ما الذي يُمثِّلُهُ ميلُ المنحنى البيانيِّ في السؤالِ السابقِ؟
4. ماذا حدثَ لمقدارِ تسارُعِ العربةِ عندَ تثبيتِ كتلةِ ثِقْلِ التعليقِ (m_{hang}) وتغييرِ كتلةِ العربةِ (m_{cart})؟

رقمُ المحاولةِ	m_{hang} (kg)	m_{cart} (kg)	t (s)	a (m/s²)	$(m_{hang}+m_{cart})\ a$ (N)	$m_{hang}\ g$ (N)
1						
2						



الشكلُ (10): العلاقةُ بينَ التسارُعِ والقُوَّةِ المحصلةِ لكتلةٍ ثابتةٍ.

القُوَّةُ والتسارُعُ Force and Acceleration

تَبيَّنَ لنا بعدَ تنفيذِ التجربةِ السابقةِ أنَّهُ كلَّما زادَتِ القُوَّةُ المحصلةُ المُؤثِّرةُ في جسمٍ زادَ تسارعُهُ عندَ ثباتِ كتلتِهِ؛ أيْ أنَّ العلاقةَ بينَ القُوَّةِ والتسارُعِ علاقةٌ طرديةٌ، يُعبَّرُ عنْها رياضيًّا على النحوِ الآتي:

$$a \propto \sum F$$

يُبيِّنُ الشكلُ (10) العلاقةَ بينَ مقدارِ القُوَّةِ المحصلةِ المُؤثِّرةِ في جسمٍ ومقدارِ تسارُعِهِ عندَ ثباتِ كتلتِهِ. وبالعودةِ إلى الشكلِ (9)، يُلاحَظُ أنَّ القُوَّةَ المحصلةَ المُؤثِّرةَ في السيارةِ الظاهرةِ في الصورةِ (ب) أكبرُ منْ تلكَ المُؤثِّرةِ في السيارةِ الظاهرةِ في الصورةِ (أ)؛ لذا، فإنَّ تسارُعَها أكبرُ.

✓ **أتحقَّقُ:** ما العلاقةُ بينَ تسارُعِ جسمٍ والقُوَّةِ المحصلةِ المُؤثِّرةِ فيهِ عندَ ثباتِ كتلتِهِ؟

الكتلةُ والتسارُعُ Mass and Acceleration

يَتبيَّنُ منَ التجربةِ السابقةِ أنَّ زيادةَ كتلةِ الجسمِ المتحرِّكِ تُقلِّلُ منْ تسارُعِهِ عندَ ثباتِ القُوَّةِ المحصلةِ المُؤثِّرةِ فيهِ؛ أيْ أنَّ تسارُعَ الجسمِ

يتناسبُ عكسيًّا معَ كتلتِهِ عندَ ثباتِ القُوَّةِ المحصلةِ المُؤثِّرةِ فيهِ، ويُعبَّرُ عنْ ذلكَ رياضيًّا بالعلاقةِ الآتيةِ:

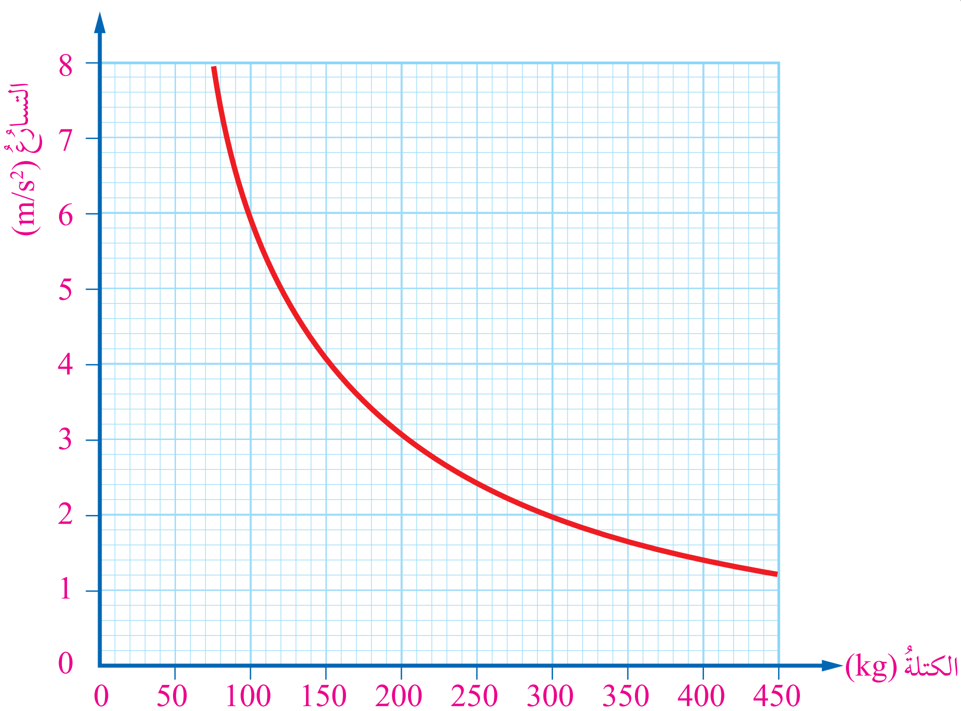
$$a \propto \frac{1}{m}$$

أنظرُ الشكلَ (11) الذي يُوضِّحُ هذهِ العلاقةَ. وللوصولِ إلى التسارُعِ نفسِهِ عندَ زيادةِ الكتلةِ يَلزمُ زيادةُ القُوَّةِ المحصلةِ.

بناءً على ما سبقَ، يُمكِنُ التوصُّلُ إلى **القانونِ الثاني لنيوتن Newton's second law**، الذي نصُّهُ: "يتناسبُ تسارُعُ الجسمِ طرديًّا معَ القُوَّةِ المحصلةِ المُؤثِّرةِ فيهِ، ويتناسبُ عكسيًّا معَ كتلتِهِ". ويكونُ اتجاهُ التسارُعِ دائمًا في اتجاهِ القُوَّةِ المحصلةِ.

وفي حالِ بقاءِ كتلةِ الجسمِ ثابتةً في أثناءِ زمنِ تأثيرِ القُوَّةِ فيهِ، فإنَّهُ يُمكِنُ كتابةُ القانونِ الثاني لنيوتن على النحوِ الآتي:

$$\sum \boldsymbol{F} = ma$$



الشكلُ (11): العلاقةُ بينَ التسارُعِ والكتلةِ عندَ ثباتِ القُوَّةِ المحصلةِ.

يَلزمُ أيضًا مراعاةُ وحداتِ القياسِ عندَ تطبيقِ القانونِ الثاني لنيوتن؛ إذْ تكونُ ($\boldsymbol{F}$) بوحدةِ (N)، وَ ($\boldsymbol{a}$) بوحدةِ (m/s^2)، وَ (m) بوحدةِ (kg). وبناءً على هذا القانونِ، يُمكِنُ القولُ إنَّ: $1\ N = 1\ kg.m/s^2$.

يُستخدَمُ هذا القانونُ في تعريفِ وحدةِ قياسِ القُوَّةِ (N)، كما يأتي:

"مقدارُ القُوَّةِ المحصلةِ التي يَلزمُ التأثيرُ بها في جسم كتلتُهُ (1 kg) لإكسابِهِ تسارُعًا مقدارُهُ ($1\ m/s^2$) في اتجاهِها". وبذلكَ، فإنَّ القُوَّةَ المحصلةَ الأفقيةَ تُكسِبُ الجسمَ تسارُعًا أفقيًّا، في حينِ تُكسِبُ القُوَّةُ المحصلةُ الرأسيةُ الجسمَ تسارُعًا رأسيًّا:

$$\sum F_x = ma_x,\ \sum F_y = ma_y$$

علمًا أنَّهُ لا بُدَّ منْ رسمِ مُخطَّطِ الجسمِ الحُرِّ لتحديدِ جميعِ القوى المُؤثِّرةِ في الجسمِ.

منَ المُلاحَظِ أنَّ القانونَ الأولَ لنيوتن يُعَدُّ حالةً خاصةً منْ قانونِهِ الثاني؛ فإذا كانَتِ القُوَّةُ المحصلةُ المُؤثِّرةُ في جسم صفرًا فإنَّ تسارُعَهُ أيضًا يكونُ صفرًا، وعندئذٍ يكونُ الجسمُ ساكنًا أوْ مُتحرِّكًا بسرعةٍ ثابتةٍ مقدارًا واتجاهًا؛ أيْ يكونُ مُتَّزنًا:

$$\sum \boldsymbol{F} = 0,\ a = 0$$

✓ **أتحقَّقُ:** ما العلاقةُ بينَ تسارُعِ جسمٍ وكتلتِهِ عندَ ثباتِ القُوَّةِ المحصلةِ المُؤثِّرةِ فيهِ؟

الفيزياءُ والفَلَكُ

توجدُ حالاتٌ تتغيَّرُ فيها كتلةُ الجسمِ في أثناءِ مدَّةِ تأثيرِ القُوَّةِ فيهِ، منها تغيُّرُ كتلةِ الصواريخِ المستخدمةِ في إطلاقِ الأقمارِ الصناعيةِ نتيجةَ استهلاكِ الوقودِ. ويَلزمُ لتلكَ الحالاتِ استخدامُ علاقةٍ (صيغةٌ) أُخرى للقانونِ الثاني لنيوتن، تتضمَّنُ تغييرَ الكتلةِ.

المثالُ 2

أَجِدُ القُوَّةَ المحصلةَ التي يَلزمُ التأثيرُ بها في صندوقٍ كتلتُهُ (20 kg) لإكسابِهِ تسارُعًا أفقيًّا مقدارُهُ $(2\ m/s^2)$ جهةَ اليمينِ.

المعطياتُ: $m = 20\ kg,\ \boldsymbol{a} = 2\ m/s^2,\ +x$.

المطلوبُ: $\sum F_x = ?$.

الحلُّ:

لإيجادِ القُوَّةِ المحصلةِ التي يَلزمُ التأثيرُ بها في الصندوقِ لكيْ يتحرَّكَ وفقَ التسارُعِ المطلوبِ، يُستخدَمُ القانونُ الثاني لنيوتن في اتجاهِ المحورِ (x):

$$\sum F_x = ma_x$$

$$= 20 \times 2 = 40\ N$$

$$\sum \boldsymbol{F}_x = 40\ N,\ +x$$

المثالُ 3

تعطَّلَتْ سيارةٌ كتلتُها (800 kg)، فسحبَتْها شاحنةُ قَطْرٍ على طريقٍ أفقيٍّ مستقيمٍ، بقُوَّةٍ أفقيَّةٍ مقدارُها 1000 N جهةَ اليمينِ. إذا كانَتْ قُوَّةُ الاحتكاكِ المُؤثِّرةُ في السيارةِ 400 N جهةَ اليسارِ، فأَجِدُ:

أ . القُوَّةَ المحصلةَ المُؤثِّرةَ في السيارةِ في الاتجاهِ الأفقيِّ.

ب . تسارُعَ السيارةِ الأفقيَّ.

جـ . السرعةَ المُتَّجِهةَ للسيارةِ بعدَ مرورِ (10 s) منْ بدءِ سحبِها.

المعطياتُ: الرمزُ إلى قُوَّةِ السحبِ بالرمزِ $\boldsymbol{F}_1$، والرمزُ إلى قُوَّةِ الاحتكاكِ بالرمزِ $\boldsymbol{f}$:

$m = 800\ kg,\ \boldsymbol{F}_1 = 1000\ N,\ 0°\ ,\boldsymbol{f} = 400\ N,\ 180°\ ,\ t = 10\ s,\ v_1 = 0\ m/s$.

المطلوبُ: $\sum \boldsymbol{F} = ?,\ \ \boldsymbol{a} = ?,\ \boldsymbol{v}_2 = ?$.

الحلُّ:

أ . القُوَّةُ المحصلةُ المُؤثِّرةُ في السيارةِ في الاتجاهِ الأفقيِّ (x):

$$\sum F = F_1 - f$$

$$= 1000 - 400$$

$$= 600\ \text{N}$$

$$\sum \boldsymbol{F} = 600\ \text{N}, +x$$

ب . تسارُعُ السيارةِ الأفقيُّ:

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

$$= \frac{600}{800}$$

$$= 0.75\ \text{m/s}^2$$

$$\boldsymbol{a} = 0.75\ \text{m/s}^2, +x$$

جـ . لإيجادِ السرعةِ المُتَّجِهةِ للسيارةِ بعدَ مرورِ (10 s) منْ بدءِ سحبِها، تُستخدَمُ المعادلةُ الآتيةُ للحركةِ:

$$v_2 = v_1 + at$$

$$= 0 + 0.75 \times 10$$

$$= 7.5\ \text{m/s}$$

$$\boldsymbol{v}_2 = 7.5\ \text{m/s}, +x$$

تمرينٌ

أثَّرَتْ قُوَّةٌ محصلةٌ أفقيةٌ مقدارُها (100 N) باتجاهِ اليمينِ في صندوقٍ كتلتُهُ (20 kg)، وهوَ مُستقرٌّ على سطحٍ أفقيٍّ أملسَ. أَجِدُ:

أ . تسارُعَ الصندوقِ.

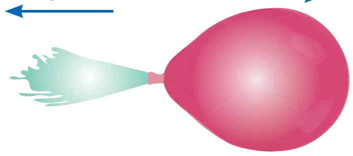
ب . السرعةَ المُتَّجِهةَ للصندوقِ بعدَ مرورِ (5 s) منْ بدءِ حركتِهِ.

جـ . الإزاحةَ التي يقطعُها الصندوقُ بعدَ مرورِ (5 s) منْ بدءِ حركتِهِ.

القانونُ الثالثُ في الحركةِ لنيوتن Newton's Third Law of Motion

وصفَ لنا القانونُ الأولُ لنيوتن الحالةَ الحركيةَ لجسمٍ ما عندما تكونُ القُوَّةُ المحصلةُ المُؤثِّرةُ فيهِ صفرًا، في حينِ قدَّمَ لنا قانونُهُ الثاني تفسيرًا لكيفيةِ تغيُّرِ تسارُعِ جسمٍ عندما تُؤثِّرُ فيهِ قُوَّةٌ محصلةٌ، أمّا قانونُهُ الثالثُ فيدرسُ طبيعةَ القوى المتبادلةِ بينَ الأجسامِ.

عندَ إفلاتِ بالونٍ منفوخٍ، كما في الشكلِ (12)، يندفعُ الهواءُ منْ فُوَّهتِهِ إلى اليسارِ، في حينِ يندفعُ البالونُ في الاتجاهِ المعاكسِ (إلى اليمينِ). وعندَ تقريبِ مغناطيسيْنِ، فإنَّ كلًّا منْهُما يسحبُ الآخرَ، أوْ يدفعُهُ بقُوَّةِ مجالٍ. وعندما أستندُ إلى أحدِ الجدرانِ، فإنَّ جسمي يُؤثِّرُ بقُوَّةِ تلامُسٍ في الجدارِ، ويُؤثِّرُ الجدارُ بقُوَّةِ تلامُسٍ في جسمي.

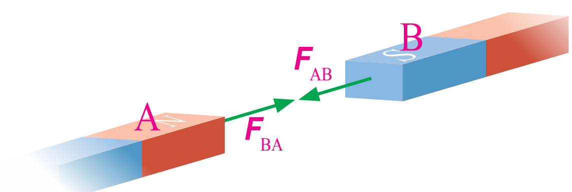


الشكل (12): يندفعُ الهواءُ منْ فُوَّهةِ البالونِ جهةَ اليسارِ، في حينِ يندفعُ البالونُ جهةَ اليمينِ.

لتفسيرِ هذهِ المشاهداتِ، يجبُ دراسةُ **القانونِ الثالثِ لنيوتن Newton's third law**، الذي نصُّهُ:

"إذا تفاعلَ جسمانِ (A) وَ (B)، فإنَّ القُوَّةَ التي يُؤثِّرُ بها الجسمُ (A) في الجسمِ (B) تساوي القُوَّةَ التي يُؤثِّرُ بها الجسمُ (B) في الجسمِ (A) منْ حيثُ المقدارُ، وتُعاكِسُها في الاتجاهِ".

لتعرُّفِ ما يحدثُ عندَ تقريبِ القطبِ الشماليِّ لمغناطيسٍ إلى القطبِ الجنوبيِّ لمغناطيسٍ آخرَ استنادًا إلى القانونِ الثالثِ لنيوتن، أنظرُ الشكلَ (13)؛ إذْ يُلاحَظُ منْ هذا الشكلِ أنَّ القطبَ الشماليَّ للمغناطيسِ (A) يُؤثِّرُ بقُوَّةِ تجاذُبٍ ($\boldsymbol{F}_{AB}$) في القطبِ الجنوبيِّ للمغناطيسِ (B)، وأنَّ القطبَ الجنوبيَّ للمغناطيسِ (B) يُؤثِّرُ -في اللحظةِ نفسِها- بقُوَّةِ تجاذُبٍ ($\boldsymbol{F}_{BA}$) في القطبِ الشماليِّ للمغناطيسِ (A)، وأنَّ هاتيْنِ القُوَّتيْنِ تتساويانِ في المقدارِ، وتتعاكسانِ في الاتجاهِ،



الشكلُ (13): قُوَّتا الفعلِ وردِّ الفعلِ (أوْ زوجا التأثيرِ المُتبادَلِ) متساويتانِ في المقدارِ، ومتعاكستانِ في الاتجاهِ.

ويُطلَقُ على إحـداهُما اسمُ الفعلِ (Action)، ويُـطلَقُ على الأُخرى اسمُ ردِّ الفعلِ (Reaction)؛ لذا يُعرَفُ هذا القانونُ غالبًا باسمِ قانونِ الفعلِ وردِّ الفعلِ.

بنـاءً على ما سبـقَ، يُمكِنُ إعـادةُ صياغةِ هذا القانـونِ على النحـوِ الآتي:

"لكلِّ فعلٍ ردُّ فعلٍ، مساوٍ لهُ في المقدارِ، ومعاكسٌ لهُ في الاتجاهِ".

أتحقَّقُ: علامَ ينصُّ القانونُ الثالثُ لنيوتن؟

وجودُ القوى في الطبيعةِ في صورةِ أزواجٍ

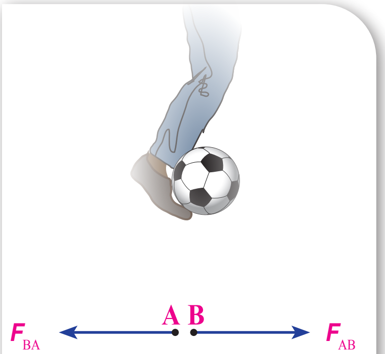
Forces Always Occur in Pairs

يُلاحَظُ منَ القانونِ الثالثِ لنيوتن أنَّ القوى دائمًا توجدُ في صورةِ أزواجٍ (أيْ فعلٍ، وردِّ فعلٍ)، وأنَّها لا تـوجـدُ منفردةً. لتوضيحِ ذلـكَ، أنظرُ الشكلَ (14) الذي يُبيِّنُ قُوَّتَيِ الفعلِ وردِّ الفعلِ لحظةَ تلامُسِ قَدمِ اللاعبِ (A)، وكرةِ القدمِ (B).

عنـدَ ملامسةِ قَـدمِ اللاعبِ للكرةِ، فإنَّهُ يُؤثِّرُ فيها بقُـوَّةٍ ($\boldsymbol{F}_{AB}$) في الاتجـاهِ المُوضَّحِ في الشكلِ، وفي اللحظـةِ نـفسِها تُـؤثِّـرُ الكـرةُ في قَدمِ اللاعبِ بقُوَّةٍ ($\boldsymbol{F}_{BA}$) تكونُ مساويـةً في المقـدارِ للقُوَّةِ ($\boldsymbol{F}_{AB}$)، لكنَّها معاكسةٌ لها في الاتجاهِ. تُعرَفُ هاتانِ القُوَّتانِ أيضًا باسمِ زوجَيِ التأثيرِ المُتبادَلِ؛ حيثُ:

$$\boldsymbol{F}_{AB} = -\boldsymbol{F}_{BA}$$

أتحقَّقُ: هلْ يُمكِنُ أنْ توجدَ قُوَّةٌ منفردةٌ؟ أُفسِّرُ إجابتي.



الشـكلُ (14): قُوَّتـا الفعـلِ وردِّ الفعـلِ لحظـةَ تلامُـسِ قَـدمِ لاعـبٍ وكـرةِ قـدمٍ.

الفعلُ وردُّ الفعلِ مُتزامِنان

Action and Reaction Forces are Simultaneous

عندَ استخدام مصطلح (الفعلُ)، ومصطلحِ (ردُّ الفعلِ)، قدْ يتبادرُ إلى الـذهنِ -خطأً- أنَّ الفعلَ يسبقُ ردَّ الفعلِ؛ فقُوَّةُ الفعلِ وقُوَّةُ ردِّ الفعلِ مُتزامِنتانِ؛ إذْ تنشأانِ معًا، وتختفيانِ معًا، خلافًا للمعنى الشائع لهُما في حياتِنا اليوميةِ؛ فنحنُ نستخدمُ مصطلحَ (ردُّ الفعلِ) للدلالةِ على وقوعِ حـدثٍ بعدَ وقوعِ حـدثٍ آخرَ؛ استجابةً لـهُ. ولأنَّ هاتيْنِ القُوَّتيْنِ مُتزامِنتانِ؛ فإنَّ كلًّا منْهُما تُسمّى فعلًا، أوْ ردَّ فعلٍ.

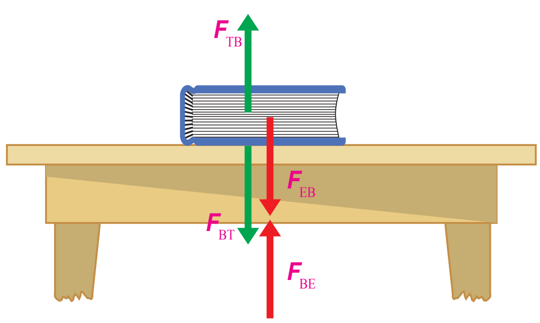
✓ **أتحقَّقُ**: ماذا نعني بقولِنا: "إنَّ قُوَّتَيِ الفعلِ وردِّ الفعلِ مُتزامِنتانِ"؟

الفعلُ وردُّ الفعلِ يُؤثِّرانِ في جسميْنِ مختلفيْنِ

Action and Reaction Forces Act on Different Objects

يَتبيَّنُ منَ القانونِ الثالثِ لنيوتن أنَّ قُوَّةَ الفعلِ وقُوَّةَ ردِّ الفعلِ تُؤثِّرانِ في جسميْنِ مختلفيْنِ، وأنَّهُما لا تُؤثِّرانِ في الجسمِ نفسِهِ. ومنْ ثَمَّ، فلا تُحسَبُ محصلتُهُما؛ لأنَّ القُوَّةَ المحصلةَ تُحسَبُ للقوى عندما تُؤثِّرُ في الجسمِ نفسِهِ.

يُمثِّلُ الشكلُ (15) كتابًا يتزنُ على سطحِ طاولةٍ أفقيٍّ. وفيـهِ يُؤثِّرُ الكتابُ بقُوَّةٍ في سطحِ الطاولةِ إلى أسفلَ ($\boldsymbol{F}_{BT}$)، ويُؤثِّرُ سطحُ الطاولةِ بقُوَّةٍ في الكتابِ إلى أعلى ($\boldsymbol{F}_{TB}$).



الشكلُ (15): أزواجُ التأثيرِ المُتبادَلِ في حالةِ كتابٍ يستقرُّ على سطحِ طاولةٍ موضوعةٍ على الأرضِ.

تُمثِّلُ هاتانِ القُوَّتانِ زوجَيِ التأثيرِ المُتبادَلِ (الفعلُ، وردُّ الفعلِ)؛ إذْ تُؤثِّرانِ في جسميْنِ مختلفيْنِ، وتنشأانِ معًا، وتختفيانِ معًا. وبالمثلِ، تُؤثِّرُ الأرضُ بقُوَّةِ جذبٍ في الكتابِ إلى أسفلَ ($\boldsymbol{F}_{\text{EB}}$)، ويُؤثِّرُ الكتابُ بقُوَّةِ جذبٍ في الأرضِ إلى أعلى ($\boldsymbol{F}_{\text{BE}}$). وهاتانِ القُوَّتانِ تُمثِّلانِ أيضًا زوجَيِ التأثيرِ المُتبادَلِ.

وفي المقابلِ، لا تُمثِّلُ القُوَّةُ ($\boldsymbol{F}_{\text{TB}}$) والقُوَّةُ ($\boldsymbol{F}_{\text{EB}}$) زوجَيْ تأثيرٍ مُتبادَلٍ، بالرغمِ منْ أنَّهُما -في هذا المثالِ- متساويتانِ في المقدارِ، ومتعاكستانِ في الاتجاهِ؛ لأنَّهُما تُؤثِّرانِ في الجسمِ نفسِهِ. وكذلكَ في حالِ افتراضِ عدمِ وجودِ الطاولةِ، فإنَّ القُوَّةَ ($\boldsymbol{F}_{\text{TB}}$) فقطْ تختفي، وتظلُّ القُوَّةُ ($\boldsymbol{F}_{\text{EB}}$) موجودةً؛ فلوْ كانتا فعلًا وردَّ فعلٍ لوجبَ أنْ تختفيا معًا. فمثلًا، إذا أثَّرَتْ قُوَّةٌ خارجيةٌ في الكتابِ رأسيًّا إلى أسفلَ فإنَّ مقدارَ القُوَّةِ ($\boldsymbol{F}_{\text{TB}}$) يكونُ أكبرَ منْ مقدارِ القُوَّةِ ($\boldsymbol{F}_{\text{EB}}$).

يُلاحَظُ منَ الأمثلةِ السابقةِ أنَّ الفعلَ وردَّ الفعلِ مُتجانِسانِ؛ أيْ أنَّ لهُما الطبيعةَ نفسَها. فإذا كانَ الفعلُ قُوَّةَ جذبٍ كانَ ردُّ الفعلِ أيضًا قُوَّةَ جذبٍ، وإذا كانَ الفعلُ قُوَّةً كهربائيةً كانَ ردُّ الفعلِ أيضًا قُوَّةً كهربائيةً، وهكذا. وبالمثلِ، إذا كانَ الفعلُ قُوَّةَ تلامُسٍ أوْ قُوَّةَ مجالٍ كانَ ردُّ الفعلِ أيضًا قُوَّةَ تلامُسٍ أوْ قُوَّةَ مجالٍ.

✓ **أتحقَّقُ:** هلْ يُمكِنُ إيجادُ محصلةِ قُوَّةِ الفعلِ وقُوَّةِ ردِّ الفعلِ؟ أُفسِّرُ إجابتي.

أصممُ باستخدامِ برنامجِ السكراتشِ (Scratch) عرضًا يوضحُ الفعلَ وردَّ الفعلِ، ثمَّ أشاركُهُ معلمي وزملائي في الصفِّ.

مراجعةُ الدرسِ

1. **الفكرةُ الرئيسةُ:** علامَ يعتمدُ تسارُعُ أيِّ جسمٍ؟ هلْ يُمكِنُ أنْ توجدَ قُوَّةٌ منفردةٌ في الطبيعةِ؟

2. **أُصنِّفُ:** لكلِّ زوجٍ ممّا يأتي، أُحدِّدُ أيُّهُما قصورُهُ الذاتيُّ أكبرُ:

أ . سيارةٌ صغيرةٌ، وشاحنةٌ.

ب . كرةُ قدمٍ، وكرةُ تنسِ طاولةٍ.

جـ. كرةُ تنسٍ، وحجرٌ لهُما الكتلةُ نفسُها.

3. **أستخدمُ المُتغيِّراتِ:** دفعَ زيدٌ عربةَ تسوُّقٍ كتلتُها (40 kg)، فتسارعَتْ بمقدارِ ($2\ m/s^2$) جهةَ اليمينِ على أرضٍ أفقيةٍ ملساءَ:

أ . **أحسُبُ** مقدارَ القُوَّةِ المحصلةِ المُؤثِّرةِ في العربةِ، ثمَّ أُحدِّدُ اتجاهَها.

ب. أَجِدُ تسارُعَ عربةٍ ثانيةٍ كتلتُها (60 kg)، وقدْ أثَّرتْ فيها القُوَّةُ المحصلةُ السابقةُ نفسُها.

جـ. أَجِدُ مقدارَ القُوَّةِ المحصلةِ التي يَلزمُ تأثيرُها في العربةِ الثانيةِ لإكسابِها نفسَ تسارُعِ العربةِ الأولى.

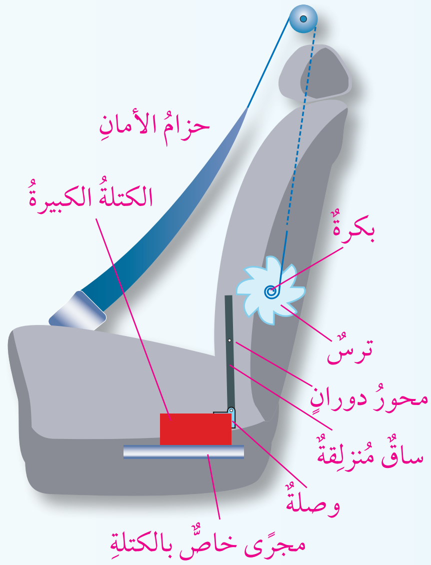
د . **أُقارِنُ** بينَ مقدارَيِ القُوَّةِ المحصلةِ في الفرعِ (أ)، والفرعِ (جـ). ماذا أستنتجُ؟

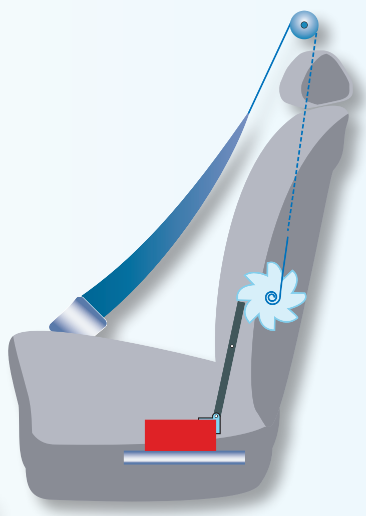
4. **التفكيرُ الابتكاريُّ:** أُفكِّرُ في تجربةٍ أُثْبِتُ فيها أنَّ قُوَّةَ الفعلِ وقُوَّةَ ردِّ الفعلِ متساويتانِ في المقدارِ، ومتعاكستانِ في الاتجاهِ.

الفيزياءُ والحياةُ

تُستخدَمُ أحزمةُ الأمانِ في السيارةِ لحمايةِ السائقِ والرُّكّابِ، والحدِّ مِنْ تعرُّضِهِمْ للإصاباتِ الخطرةِ في حالِ التوقُّفِ المُفاجِئِ، أوِ التناقُصِ الكبيرِ في سرعةِ السيارةِ، أوْ تغييرِ اتجاهِها عندَ المنعطفاتِ؛ إذْ يعملُ حزامُ الأمانِ على تثبيتِ الشخصِ في كرسيِّهِ، ويَحولُ دونَ اندفاعِهِ إلى الأمامِ، مانعًا ارتطامَهُ بعجلةِ القيادةِ، أوِ الزجاجِ الأماميِّ؛ فالراكبُ في السيارةِ يكتسبُ سرعةَ السيارةِ نفسَها. وفي حالِ عدمِ استخدامِهِ حزامَ الأمانِ، فإنَّهُ يندفعُ إلى الأمامِ عندما تتباطأُ السيارةُ؛ نتيجةً لقصورِهِ الذاتيِّ.

يعتمدُ مبدأُ عملِ حزامِ الأمانِ على القصورِ الذاتيِّ أيضًا. ويُوضِّحُ الشكلُ المجاورُ أحدَ أنواعِ أحزمةِ الأمانِ؛ ففي الأحوالِ العاديةِ، يدورُ الترسُ بحريةٍ في الاتجاهيْنِ حولَ البكرةِ المُزوَّدةِ بنابضٍ؛ ما يسمحُ بحركةِ الحزامِ، ثمَّ بحريةِ الحركةِ للشخصِ. وفي حالِ حدثَ تغيُّرٌ مُفاجِئٌ في السرعةِ المُتَّجِهةِ للسيارةِ (وقوعُ حادثٍ مثلًا)، فإنَّ السيارةَ تتباطأُ بصورةٍ كبيرةٍ؛ ما يُسبِّبُ اندفاعَ كتلةٍ كبيرةٍ موجودةٍ أسفلَ الكرسيِّ إلى الأمامِ خلالَ مجرًى خاصٍّ لها؛ بسببِ قصورِها الذاتيِّ؛ ما يؤدي إلى دورانِ الساقِ الفلزيةِ حولَ محورِها، ثمَّ تثبيتِ أسنانِ الترسِ، ومنعِ دورانِهِ، وهوَ ما يؤدي إلى تثبيتِ حزامِ الأمانِ، ثمَّ تثبيتِ السائقِ في مكانِهِ.





الساقُ الفلزيةُ تمنعُ دورانَ الترسِ، وتُثبِّتُ حزامَ الأمانِ عندَ وقوعِ حادثٍ، أوْ عندَ تباطُؤِ السيارةِ بصورةٍ كبيرةٍ.

أبحث مستعينًا بمصادرِ المعرفةِ المناسبةِ، أبحثُ عنْ مزايا استخدامِ حزامِ الأمانِ، ومخاطرِ عدمِ الالتزامِ بِهِ في أثناءِ سيرِ المركبةِ، ثمَّ أكتبُ تقريرًا عنْ ذلكَ، ثمَّ أقرأُهُ أمامَ زملائي في غرفةِ الصفِّ.

مراجعةُ الوحدةِ

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

1. تتحرَّكُ سيارةٌ على طريقٍ أفقيٍّ مستقيمٍ بسرعةٍ مُتَّجِهةٍ ثابتةٍ مقدارُها (90 km /h) شمالًا. القُوَّةُ المحصلةُ المُؤثِّرةُ في السيارةِ، هيَ:

أ . في اتجاهِ الشمالِ. ب . في اتجاهِ الجنوبِ.

جـ. صفرٌ. د . في اتجاهِ الشرقِ.

2. إحدى الحالاتِ الآتيةِ تتطلَّبُ تأثيرَ قُوَّةٍ محصلةٍ أكبرَ:

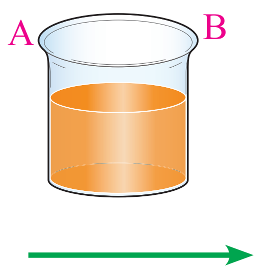
أ . إكسابُ جسمٍ كتلتُهُ (2 kg) تسارُعًا مقدارُهُ ($5\ m/s^2$).

ب . إكسابُ جسمٍ كتلتُهُ (4 kg) تسارُعًا مقدارُهُ ($3\ m/s^2$).

جـ . إكسابُ جسمٍ كتلتُهُ (6 kg) تسارُعًا مقدارُهُ ($1.5\ m/s^2$).

د . إكسابُ جسمٍ كتلتُهُ (8 kg) تسارُعًا مقدارُهُ ($1\ m/s^2$).

3. تجلسُ فرحُ في سيارةٍ تتحرَّكُ على طريقٍ أفقيٍّ بسرعةٍ مُتَّجِهةٍ ثابتةٍ في اتجاهِ المحورِ ($+x$)، وتُمسِكُ بيدِها كوبًا فيهِ عصيرٌ، أنظرُ الشكلَ المجاورَ. إذا ضغطَ السائقُ فجأةً على المكابحِ:



اتجاهُ الحركةِ

أ . فإنَّ العصيرَ ينسكبُ منَ الجهةِ (A).

ب. فإنَّ سطحَ العصيرِ في الكوبِ يبقى مستويًا.

جـ. فإنَّ العصيرَ ينسكبُ منَ الجهةِ (B).

د . فلا يُمكِنُ تحديدُ جهةِ انسكابِ العصيرِ.

4. تُسمّى ممانعةُ الجسمِ لأيِّ تغييرٍ في حالتِهِ الحركيةِ:

أ . السرعةَ المُتَّجِهةَ. ب. القُوَّةَ المحصلةَ.

جـ. القانونَ الثالثَ لنيوتن. د . القصورَ الذاتيَّ.

5. عندَ نقصانِ مقدارِ القُوَّةِ المحصلةِ المُؤثِّرةِ في جسمٍ إلى النصفِ، معَ ثباتِ كتلتِهِ، فإنَّ مقدارَ تسارُعِهِ:

أ . يتضاعفُ مرَّتيْنِ. ب. يتضاعفُ أربعَ مرّاتٍ.

جـ. يقلُّ بمقدارِ النصفِ. د . لا توجدُ علاقةٌ بينَهُما.

6. عندما تدفعُ جدارًا بقُوَّةٍ معينةٍ، فإنَّ الجدارَ يدفعُكَ بقُوَّةٍ معاكسةٍ في الاتجاهِ، مقدارُها يساوي:

أ . مثليّ مقدارِ قُوَّتِكَ. ب. مقدارَ قُوَّتِكَ.

جـ. نصفَ مقدارِ قُوَّتِكَ. د . صفرًا.

7. تتحرَّكُ سيارةٌ بسرعةٍ مُتَّجِهةٍ ثابتةٍ على طريقٍ أفقيٍّ. وفجأةً، توقَّفَتِ السيارةُ، فاندفعَ سائقُها إلى الأمامِ. يُعْزى سببُ اندفاعِ السائقِ إلى:
أ . تأثيرِ قُوَّةٍ فيهِ باتجاهِ الحركةِ نفسِها.
ب . القصورِ الذاتيِّ للسائقِ.
جـ . القانونِ الثالثِ لنيوتن.
د . تأثيرِ قُوَّةٍ فيهِ عموديةٍ على اتجاهِ الحركةِ.

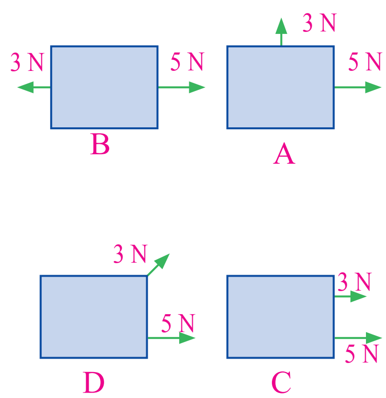
8. منْ خصائصِ الجسمِ التي قدْ تتغيَّرُ عندَ تأثيرِ قُوَّةٍ محصلةٍ فيهِ:
أ . مقدارُ السرعةِ، والكتلةُ، واتجاهُ الحركةِ.
ب . الشكلُ، والكتلةُ، ومقدارُ السرعةِ.
جـ . مقدارُ السرعةِ، والشكلُ، والكثافةُ.
د . مقدارُ السرعةِ، والشكلُ، واتجاهُ الحركةِ.

9. وحدةُ قياسِ القُوَّةِ، هيَ:
أ . kg.
ب . N.s.
جـ . N.
د . m/s^2.

10. بحسبِ القانونِ الثاني لنيوتن، يكونُ اتجاهُ التسارُعِ دائمًا:
أ . في اتجاهِ الإزاحةِ.
ب . في اتجاهِ السرعةِ المُتَّجِهةِ الابتدائيةِ.
جـ . في اتجاهِ السرعةِ المُتَّجِهةِ النهائيةِ.
د . في اتجاهِ القُوَّةِ المحصلةِ.

11. القصورُ الذاتيُّ للجسمِ يُسبِّبُ:
أ . تسارُعَهُ. ب . تباطُؤَهُ.
جـ . مقاومتَهُ لأيِّ تغييرٍ في حركتِهِ. د . تغييرَ اتجاهِ حركتِهِ.

12. إذا كانَتْ كتلُ الأجسامِ المُوضَّحةُ في الشكلِ المجاورِ متساويةً، فإنَّ أقلَّها تسارُعًا منْ حيثُ المقدارُ، هوَ:
أ . (A). ب . (B).
جـ . (C). د . (D).



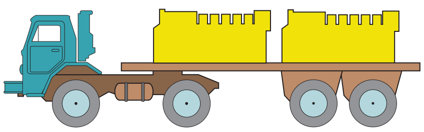
13. يُمثِّلُ الشكلُ المجاورُ شاحنةً في صورةِ قاطرةٍ ومقطورةٍ. إذا كانَتْ كتلةُ المقطورةِ (5) أضعافِ كتلةِ القاطرةِ، وكانَتِ القاطرةُ تتسارعُ على طريقٍ أفقيٍّ مستقيمٍ، فإنَّ القُوَّةَ التي تُؤثِّرُ بها المقطورةُ في القاطرةِ تساوي:

أ . (5) أضعافِ القُوَّةِ التي تُؤثِّرُ بها القاطرةُ في المقطورةِ.

ب . ($\frac{1}{5}$) القُوَّةِ التي تُؤثِّرُ بها القاطرةُ في المقطورةِ.

جـ . (10) أضعافِ القُوَّةِ التي تُؤثِّرُ بها القاطرةُ في المقطورةِ.

د . القُوَّةَ التي تُؤثِّرُ بها القاطرةُ في المقطورةِ.

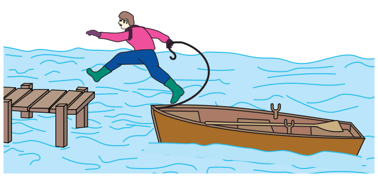


2. أفسِّرُ: عندَ النظرِ إلى سبّاحٍ في بركةِ السباحةِ يُلاحَظُ أنَّهُ يدفعُ الماءَ إلى الخلفِ. أُفسِّرُ سببَ فعلِهِ ذلكَ.

3. أستنتجُ: إذا كانَ تسارُعُ جسمٍ ما صفرًا، فهلْ يعني ذلكَ عدمَ وجودِ قوًى تُؤثِّرُ فيهِ؟ أُفسِّرُ إجابتي.

4. التفكيرُ الناقدُ: علامَ يعتمدُ تسارُعُ أيِّ جسمٍ؟ هلْ تُؤثِّرُ السرعةُ في تسارُعِ الجسمِ؟ أُبرِّرُ إجابتي.

5. لكيْ تسيرَ روى على الأرضِ؛ فإنَّها تدفعُ الأرضَ بقُوَّةٍ إلى الخلفِ، فتدفَعُها الأرضُ بقُوَّةٍ إلى الأمامِ. لماذا لا يظهرُ أثرُ دفعِ روى في الأرضِ؟



6. أفسِّرُ: يُمثِّلُ الشكلُ المجاورُ شخصًا يقفزُ منْ قاربٍ نحوَ الرصيفِ. لماذا يندفعُ القاربُ إلى الخلفِ في أثناءِ ذلكَ؟

7. إذا كانَتِ القُوَّةُ المحصلةُ المُؤثِّرةُ في جسمٍ صفرًا، فهلْ يُمكِنُ أنْ يكونَ الجسمُ مُتحرِّكًا؟ أُفسِّرُ إجابتي.

8. أُحدِّدُ زوجَي التأثيرِ المُتبادَلِ في كلِّ حالةٍ ممّا يأتي:

أ . حارسُ مرمى يُمسِكُ كرةَ قدمٍ مُتَّجِهةً نحوَهُ.

ب. عدّاءةٌ تركضُ على أرضيةِ مضمارِ سباقٍ.

جـ. اصطدامُ كرةٍ بجدارٍ.

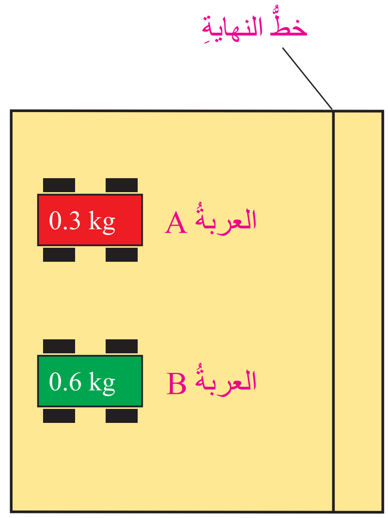
د . إطلاقُ مكوكٍ فضائيٍّ منْ على سطحِ الأرضِ.

9. **التفكيرُ الناقدُ: إذا كانَتْ قُوَّتَا الفعلِ وردِّ الفعلِ متساويتيْنِ، فكيفَ يُفسَّرُ جَرُّ حصانٍ لعربةٍ؟**

10. **يُمثِّلُ الشكلُ المجاورُ منظرًا علويًا لعربتيْنِ مختلفتيْنِ في الكتلةِ؛ (A)، وَ (B)، تستقرّانِ على سطحٍ أفقيٍّ. دُفِعَتِ العربتانِ منْ وضعِ السكونِ في اللحظةِ نفسِها في اتجاهِ المحورِ ($+x$)، ووصلَتا خطَّ النهايةِ في اللحظةِ نفسِها أيضًا. بناءً على ما سبقَ، أجيبُ عمّا يأتي:**

    أ . أيُّ العربتيْنِ أثَّرَتْ فيها قُوَّةٌ محصلةٌ أكبرُ؟ أُفسِّرُ إجابتي.

    ب . ما العلاقةُ بينَ تسارُعَيِ العربتيْنِ؟ أُفسِّرُ إجابتي.



11. **يُبيِّنُ الجدولُ المجاورُ قيمَ القُوَّةِ المحصلةِ، والتسارُعَ في اتجاهِ المحورِ (x) لكتلٍ مختلفةٍ. اعتمادًا على القانونِ الثاني لنيوتن، أُكمِلُ الفراغَ في الجدولِ بما هوَ مناسبٌ.**

الفقرةُ	$\sum F$ (N)	m (kg)	a (m/s^2)
A		500	2.5 +
B	300	600	
C	2500		+2
D	-600	800	

12. **أحسُبُ: تتحرَّكُ سيارةٌ كتلتُها (1000 kg) على طريقٍ أفقيٍّ مستقيمٍ بسرعةٍ مُتَّجِهةٍ ثابتةٍ مقدارُها (24 m /s) في اتجاهِ المحورِ ($+x$). شاهدَ سائقُها ممرَّ مُشاةٍ أمامَهُ، فضغطَ على المكابحِ مُسبِّبًا تباطؤَ السيارةِ حتّى توقَّفَتْ بعدَ (4 s). أَجِدُ:**

    أ . تسارُعَ السيارةِ.

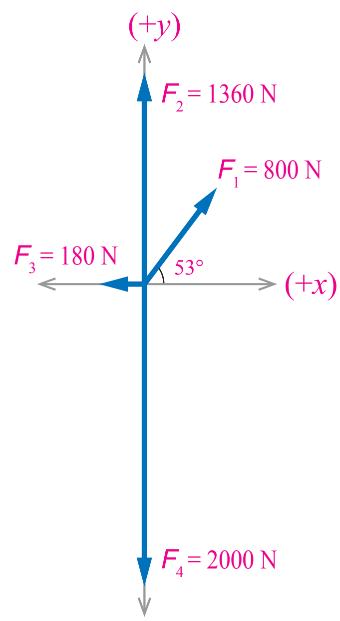
    ب . القُوَّةَ المحصلةَ التي أثَّرَتْ في السيارةِ.

13. **أستخدمُ المتغيراتِ: قُوَّةٌ محصلةٌ مقدارُها (4 N)، أثَّرَتْ في الكتلةِ (m_1)، فأكسبَتْها تسارُعًا مقدارُهُ (8 m/s^2)، وأثَّرَتْ في الكتلةِ (m_2)، فأكسبَتْها تسارُعًا مقدارُهُ (16 m/s^2). أَجِدُ التسارُعَ الذي تكتسِبُهُ هاتانِ الكتلتانِ عندَ ربطِهِما معًا، وتأثيرِ القُوَّةِ السابقةِ نفسِها فيهِما؟**

14. **أثَّرَتْ قوًى عِدَّةٌ مستويةٌ متلاقيةٌ في قاربٍ كتلتُهُ (200 kg)، في أثناءِ سحبِهِ بسفينةٍ. وكانَ مُخطَّطُ الجسمِ الحُرِّ لهذهِ القوى كما في الشكلِ المجاورِ. أَجِدُ:**

    أ . القُوَّةَ المحصلةَ المُؤثِّرةَ في القاربِ.

    ب . التسارُعَ الأفقيَّ والتسارُعَ الرأسيَّ للقاربِ.



مسردُ المصطلحاتِ

- **أقصى ارتفاعٍ (Maximum Height):** الإزاحةُ الرأسيةُ العظمى التي يَصنعُها المقذوفُ.
- **الإزاحةُ (Displacement):** الفرقُ بينَ مُتَّجِهَيْ موقعَيِ الجسمِ الابتدائيِّ والنهائيِّ.
- **تحليلُ المُتَّجِهاتِ إلى مُركَّباتِها (Resolving Vectors into Components):** الاستعاضةُ عنْ مُتَّجِهٍ بمُتَّجِهيْنِ متعامديْنِ (على محورَيْ *x-y* مثلًا) يُسمّيانِ مُركَّبتَيِ المُتَّجِهِ، ومحصلتُهُما المُتَّجِهُ نفسُهُ، وهما يتحدانِ معَهُ في نقطةِ البدايةِ.
- **التسارُعُ (Acceleration):** كميةٌ مُتَّجِهةٌ تُعطى بناتجِ قسمةِ التغيُّرِ في السرعةِ اللحظيةِ على المدَّةِ الزمنيةِ اللازمةِ لإحداثِ التغيُّرِ في السرعةِ.
- **التسارُعُ المركزيُّ (Centripetal Acceleration):** تسارُعٌ ناتجٌ منَ التغيُّرِ في اتجاهِ السرعةِ المماسيةِ لجسمٍ يتحرَّكُ حركةً دائريةً.
- **تساوي مُتَّجِهيْنِ (Equality of Two Vectors):** مُتَّجِهانِ منَ النوعِ نفسِهِ، لهُما المقدارُ نفسُهُ، والاتجاهُ نفسُهُ.
- **تمثيلُ المُتَّجِهاتِ (Representation of Vectors):** التعبيرُ عنِ الكميةِ المُتَّجِهةِ برسمِ سهمٍ طولُهُ يُمثِّلُ مقدارَ الكميةِ المُتَّجِهةِ باستخدامِ مقياسِ رسمٍ مناسبٍ، واتجاهُهُ يُمثِّلُ اتجاهَ تلكَ الكميةِ.
- **جمعُ الكمياتِ المتَّجِهةِ (Addition of Vector Quantities):** جمعٌ مُتَّجِهيٌّ للكمياتِ المُتَّجِهةِ، يُراعى فيهِ المقدارُ والاتجاهُ، وهوَ ليسَ جمعًا جبريًّا.
- **الحركةُ الخطِّيةُ (Linear Motion):** حركةٌ على خطٍّ مستقيمٍ (في بُعْدٍ واحدٍ).
- **الحركةُ الدائريةُ (Circular Motion):** حركةُ جسمٍ في مسارٍ دائريٍّ بحيثُ يبقى بُعْدُهُ عنْ مركزِ المسارِ ثابتًا.
- **الحركةُ الدائريةُ المنتظمةُ (Uniform Circular Motion):** حركةٌ دائريةٌ بسرعةٍ ثابتةٍ مقدارًا.
- **الحركةُ المنتظمةُ (Uniform Motion):** حركةُ الجسمِ بسرعةٍ قياسيةٍ ثابتةٍ؛ أيْ سرعةٍ ثابتةٍ في المقدارِ.
- **زمنُ التحليقِ (Time of Flight):** الزمنُ الكليُّ لحركةِ المقذوفِ في الهواءِ.
- **سالبُ المُتَّجِهِ (Negative of a Vector):** مُتَّجِهٌ لهُ مقدارُ المُتَّجِهِ الأصليِّ نفسِهِ، ولكنَّهُ يُعاكِسُهُ في الاتجاهِ.

- **السرعةُ القياسيةُ (Speed):** معدلُ تغيُّرِ المسافةِ المقطوعةِ بالنسبةِ إلى الزمنِ.
- **السرعةُ القياسيةُ المتوسطةُ (Average Speed):** ناتجُ قسمةِ المسافةِ الكليةِ التي يقطعُها الجسمُ المتحرِّكُ على الزمنِ الكليِّ لهذهِ الحركةِ.
- **السرعةُ المُتَّجِهةُ اللحظيةُ (Instantaneous Velocity):** سرعةُ الجسمِ المُتَّجِهةُ عندَ لحظةٍ معينةٍ.
- **السرعةُ المُتَّجِهةُ (Velocity):** معدلُ تغيُّرِ الإزاحةِ بالنسبةِ إلى الزمنِ.
- **السرعةُ المُتَّجِهةُ المتوسطةُ (Average Velocity):** ناتجُ قسمةِ الإزاحةِ التي يُحْدِثُها الجسمُ المتحرِّكُ على الزمنِ الكليِّ لحركةِ الجسمِ.
- **الضربُ القياسيُّ (Scalar Product):** عمليةُ ضربِ كميةٍ مُتَّجِهةٍ في كميةٍ أُخرى مُتَّجِهةٍ، يكونُ ناتجُها كميةً غيرَ مُتَّجِهةٍ (لها مقدارٌ فقطْ).
- **الضربُ المُتَّجِهيُّ (Vector Product):** عمليةُ ضربِ كميةٍ مُتَّجِهةٍ في كميةٍ أُخرى مُتَّجِهةٍ، يكونُ ناتجُها كميةً مُتَّجِهةً (لها مقدارٌ واتجاهٌ).
- **الطريقةُ البيانيةُ (Graphical Method):** طريقةٌ لإيجادِ محصلةِ مُتَّجِهيْنِ أوْ أكثرَ بالرسمِ، وهيَ تتلخَّصُ في تمثيلِ المُتَّجِهاتِ التي يُرادُ جمعُها بأسهمٍ، ثمَّ تركيبِ هذهِ الأسهمِ بطريقةِ متوازي الأضلاعِ، أوْ طريقةِ المُضلَّعِ (الذيلُ على الرأسِ).
- **الطريقةُ التحليليةُ (Analytical Method):** طريقةٌ رياضيةٌ لإيجادِ محصلةِ مُتَّجِهيْنِ أوْ أكثرَ عنْ طريقِ تحليلِ المُتَّجِهاتِ إلى مُركَّباتِها.
- **القانونُ الأولُ لنيوتن (Newton's First Law):** الجسمُ يظلُّ على حالتِهِ منْ حيثُ السكونُ أوِ الحركةُ بسرعةٍ ثابتةٍ مقدارًا واتجاهًا ما لم تُؤثِّرْ فيهِ قُوَّةٌ خارجيةٌ محصلةٌ تُغيِّرُ حالتَهُ الحركيةَ.
- **القانونُ الثالثُ لنيوتن (Newton's Third Law):** إذا تفاعلَ جسمانِ (A وَB)، فإنَّ القُوَّةَ التي يُؤثِّرُ بها الجسمُ (A) في الجسمِ (B) تساوي القُوَّةَ التي يُؤثِّرُ بها الجسمُ (B) في الجسمِ (A) منْ حيثُ المقدارُ، وتُعاكِسُها في الاتجاهِ.
- **القانونُ الثاني لنيوتن (Newton's Second Law):** تسارُعُ الجسمِ يتناسبُ طرديًّا معَ القُوَّةِ المحصلةِ المُؤثِّرةِ فيهِ، ويتناسبُ عكسيًّا معَ كتلتِهِ.

- **القصورُ الذاتيُّ (Inertia):** ممانعةُ الجسمِ لأيِّ تغييرٍ في حالتِهِ الحركيةِ.
- **القُوَّةُ (Force):** كلُّ ما يُؤثِّرُ في الأجسامِ، فيُغيِّرُ منْ أشكالِها أوْ حالاتِها الحركيةِ، ويُرمَزُ إليْها بالرمزِ (F)، وتقاسُ بوحدةِ newton (N) بحسبِ النظامِ الدوليِّ لوحداتِ القياسِ.
- **القُوَّةُ المحصلةُ (Resultant Force):** حاصلُ الجمعِ المُتَّجِهيِّ لجميعِ القوى المُؤثِّرةِ في الجسمِ، بحيثُ تنتجُ قُوَّةٌ منفردةٌ لها تأثيرٌ يُكافِئُ تأثيرَ جميعِ القوى المُؤثِّرةِ في الجسمِ مُجتمِعةً.
- **الكمياتُ القياسيةُ (Scalar Quantities):** كمياتٌ تُحدَّدُ فقطْ بالمقدارِ، وليسَ لها اتجاهٌ.
- **الكمياتُ المُتَّجِهةُ (Vector Quantities):** كمياتٌ تُحدَّدُ بالمقدارِ والاتجاهِ معًا.
- **مُتَّجِهُ المحصلةِ (Resultant Vector):** مُتَّجِهٌ ناتجٌ منَ الجمعِ المُتَّجِهيِّ لمُتَّجِهاتٍ عِدَّةٍ.
- **المدى الأفقيُّ (Range):** الإزاحةُ الأفقيةُ التي يَصنعُها المقذوفُ منذُ إطلاقِهِ حتّى يعودَ إلى مستوى الإطلاقِ نفسِهِ.
- **المقذوفاتُ (Projectiles):** أجسامٌ تبدأُ حركتَها بسرعةٍ ابتدائيةٍ تَصنعُ زاويةً حادَّةً معَ الأفقِ، وتتحرَّكُ تحتَ تأثيرِ قُوَّةِ جاذبيةِ الأرضِ فقطْ.
- **الموقعُ (Position):** كميةٌ فيزيائيةٌ مُتَّجِهةٌ تُحدَّدُ بمُتَّجِهٍ يبدأُ منْ نقطةِ الإسنادِ، وينتهي في موقعِ الجسمِ.
- **نقطةُ الإسنادِ (Reference Point):** نقطةٌ مرجعيةٌ مُحدَّدةٌ تُنسَبُ إليْها مواقعُ الأجسامِ، وينطلقُ منْها مُتَّجِهُ الموقعِ. وفي بُعْديْنِ تُعرَفُ بأنَّها النقطةُ (0, 0) في المستوى (x, y).

قائمةُ المراجِع (References)

1. Avijit Lahiri, **Basic Physics: Principles and Concepts,** Avijit Lahiri, 2018 David Halliday, Robert Resnick , Jearl Walker, Fundamentals of Physics, Wiley; 11 edition 2018.

2. Douglas C. Giancoli, Physics: **Principles with Applications**, Addison Wesley, 6th edition, 2009.

3. Gurinder Chadha, **A Level Physics a for OCR**, A Level Physics a for OCR, 2015.

4. Hugh D. Young , Roger A. Freedman, **University Physics with Modern Physics**, Pearson; 14 edition (February 24, 2015)

5. Paul A. Tipler, Gene Mosca, **Physics for Scientists and Engineers**, W. H. Freeman; 6th edition, 2007.

6. Paul G. Hewitt, **Conceptual Physics**, Pearson; 14th edition, 2015.

7. R. Shankar, **Fundamentals of Physics I: Mechanics, Relativity, and Thermodynamics**, Yale University Press; Expanded Edition, 2019.

8. Raymond A. Serway , John W. Jewett, **Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics**, Cengage Learning; 009 edition, 2015.

9. Raymond A. Serway, Chris Vuille, **College Physics**, Cengage Learning; 11 edition, 2017.

10. Roger Muncaster, **A Level Physics**, Oxford University Press; 4th edition, 2014.

11. Steve Adams, **Advanced Physics**, Oxford University Press, USA; 2nd. Edition, 2013.

12. Tom Duncan, **Advanced Physics**, Hodder Murray; 5th edition, 2000.