



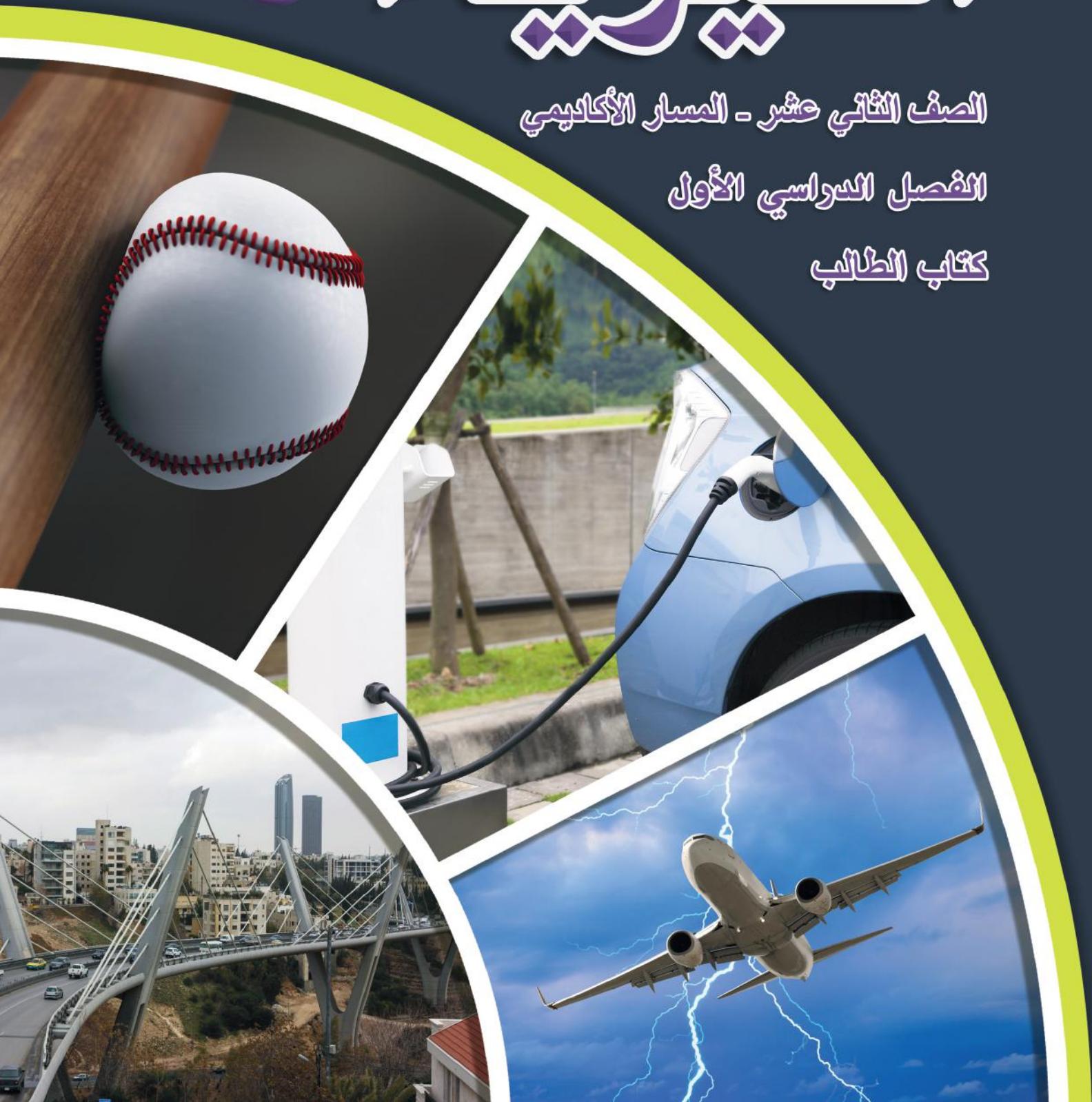
12

الفنون

الصف الثاني عشر - المسار الأكاديمي

الفصل الدراسي الأول

كتاب الطالب





الفيزياء

الصف الثاني عشر - المسار الأكاديمي

الفصل الدراسي الأول

كتاب الطالب

12

فريق التأليف

د. موسى عطا الله الطراونة (رئيساً)

خلدون سليمان المصاروه

موسى محمود جرادات

أ.د. محمود إسماعيل الحافظ

د. إبراهيم ناجي غبار

الناشر: المركز الوطني لتطوير المناهج

يسير المركز الوطني لتطوير المناهج، استقبال آرائكم وملحوظاتكم على هذا الكتاب عن طريق العنوانين الآتية:



06-5376262 / 237



06-5376266



P.O.Box: 2088 Amman 11941



@nccdjor



feedback@nccd.gov.jo



www.nccd.gov.jo

قررت وزارة التربية والتعليم تدريس هذا الكتاب في مدارس المملكة الأردنية الهاشمية جميعها، بناءً على قرار المجلس الأعلى للمركز الوطني لتطوير المناهج في جلسته رقم (2025/2)، تاريخ 25/2/2025 م، وقرار مجلس التربية والتعليم رقم (46/2025)، تاريخ 30/4/2025 م، بدءاً من العام الدراسي 2025 / 2026 م.

© HarperCollins Publishers Limited 2025.

- 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 - 799 - 7

المملكة الأردنية الهاشمية
رقم الإيداع لدى دائرة المكتبة الوطنية
(2025/1/383)

بيانات الفهرسة الأولية للكتاب:

عنوان الكتاب	الفيزياء، كتاب الطالب: الصف الثاني عشر، المسار الأكاديمي، الفصل الدراسي الأول
إعداد / هيئة	الأردن. المركز الوطني لتطوير المناهج
بيانات النشر	عمان: المركز الوطني لتطوير المناهج، 2025
رقم التصنيف	373,19
الواصفات	/ الفيزياء/ /أساليب التدريس/ /المناهج/ / التعليم الثانوي/
الطبعة	الطبعة الأولى

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

المراجعة والتعديل

ميمي محمد التكروري
أ.د. محمود إسماعيل الجاغوب

التحكيم الأكاديمي

أ.د. راجي عوض الصرابية

التصميم والإخراج

نایف محمد أمین مراشدة

التحرير اللغوي

سامر مازن الخطيب

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.

الصفحة	قائمة المحتويات	الموضوع
5		المقدمة
7	الوحدة الأولى: الزخم الخطى والتصادمات	
9	تجربة استهلالية: الزخم الخطى	
10	الدرس الأول: الزخم الخطى والدفع	
22	الدرس الثاني: تطبيقات على حفظ الزخم الخطى	
41	الوحدة الثانية: الحركة الدورانية	
43	تجربة استهلالية: الاتزان السكوفي ومركز الكتلة	
44	الدرس الأول: العزم والاتزان السكوفي	
58	الدرس الثاني: ديناميكا الحركة الدورانية	
67	الدرس الثالث: الزخم الزاوي	
83	الوحدة الثالثة: الكهرباء السكونية	
85	تجربة استهلالية: تخطيط المجال الكهربائي المستقيم	
86	الدرس الأول: المجال الكهربائي	
102	الدرس الثاني: الجهد الكهربائي	
117	الدرس الثالث: المُواسعة الكهربائية	
139	الوحدة الرابعة: التيار الكهربائي	
141	تجربة استهلالية: استقصاء العلاقة بين الجهد والتيار بين طرفي مقاومة	
142	الدرس الأول: المقاومة والقوة الدافعة الكهربائية	
152	الدرس الثاني: الدارة البسيطة والقدرة الكهربائية	
160	الدرس الثالث: توصيل المقاومات وقاعدتا كيرشوف	
178	مسرد المصطلحات	
182	جدول النسب المثلثية	

المقدمة

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

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

وقد روّيَ في تأليفه تقديم المعلومة العلمية الدقيقة وفق منهجية تقوم على السلامة في العرض، والوضوح في التعبير، إضافة إلى الربط بين الموضوعات المطروحة في المراحل الدراسية السابقة واللاحقة، واعتماد منهجية التدرج في عرض موضوعات المادة، واستهلال وحداتها بأسئلة تُظهر علاقة علم الفيزياء بالظواهر من حولنا؛ ما يحفّز الطالب على الإفادة مما يتعلّمه في غرفة الصف في تفسير مشاهدات يومية وظواهر طبيعية قد تحدث أمامه، أو يشاهدها في التلفاز، أو يسمع عنها. وقد تضمّنت كل وحدة إثراً يعتمد منحى STEAM في التعليم الذي يُستعمل لدمج العلوم والتكنولوجيا والهندسة والفن والعلوم الإنسانية والرياضيات.

ويتألّف الكتاب من أربع وحدات دراسية، هي: الزخم الخطّي والتصادمات، والحركة الدورانّية، والكهرباء السكونية، والتيار الكهربائي. وقد أُحق به كتاب للأنشطة والتجارب العملية، يحتوي على التجارب والأنشطة جميعها الواردة في كتاب الطالب؛ ليساعده على تنفيذها بسهولة بإشراف المعلم ومشاركة زملائه فيها، بما في ذلك رصد القراءات وتحليلها، ثم مناقشتها وصولاً إلى استنتاجات مبنية على أسس علمية سليمة. ويتضمن أيضاً أسئلة تفكير؛ بهدف تعزيز فهم الطالب لموضوعات المادة، وتنمية التفكير الناقد لديه.

ونحن إذ نقدم هذه الطبعة من الكتاب، فإننا نأمل أن يُسهم في تحقيق الأهداف والغايات النهائية المنشودة لبناء شخصية المتعلّم، وتنمية اتجاهات حبّ التعلّم ومهارات التعلّم المستمرّ، إضافة إلى تحسين الكتاب بإضافة الجديد إلى محتواه، وإثراء أنشطته المتنوعة، والأخذ بـ ملاحظات المعلّمين.

والله ولي التوفيق

المركز الوطني لتطوير المناهج

الرُّزْمُ الْخَطِيٌّ وَالْتَّصَادُمُاتُ

Linear Momentum and Collisions

الوحدة

1



أتَأْمَلُ الصُّورَةَ

إِطْلَاقُ مَكْوِكٍ فَضَائِيٍّ

يُظَهِّرُ فِي الصُّورَةِ إِطْلَاقُ مَكْوِكٍ فَضَائِيٍّ، حِيثُ تَنْدُفعُ الْغَازَاتُ النَّاتِجَةُ مِنَ الْاحْتِرَاقِ مِنَ الصَّارُوخِ إِلَى أَسْفَلٍ؛ بَيْنَمَا يَنْدُفعُ الْمَكْوِكُ الْفَضَائِيُّ وَالصَّارُوخُ إِلَى أَعْلَى بِتَسَارِعٍ.

عَلَامَ يَعْتَمِدُ عَمَلُ الصَّارُوخِ؟ وَمَا الْكَمِيَاتُ الْفِيَزِيَائِيَّةُ الَّتِي يَلْزَمُ مَعْرِفَتُهَا لِوَصْفِ حَرْكَةِ الصَّارُوخِ وَالْمَكْوِكِ الْفَضَائِيِّ؟

الفكرة العامة:

لمفهوم الزَّخْمُ الْخَطِيِّ، وحفظِهِ والتصادمات وأنواعِها، تأثيراتٌ وتطبيقات مختلفة في كثير من الظواهر اليومية، ويعتمد عليها مبدأ عملٍ كثيرٍ من الأجهزة والآلات المهمة في حياتنا.

الدرس الأول: الزَّخْمُ الْخَطِيِّ والدفع

Linear Momentum and Impulse

الفكرة الرئيسية: ترتبط مفاهيم الدفع والقوة والتغيير في الزَّخْمُ الْخَطِيِّ بعلاقاتٍ رياضية. ولحفظ الزَّخْمُ الْخَطِيِّ أهمية كبيرة في حياتنا اليومية.

الدرس الثاني: تطبيقات على حفظ الزَّخْمُ الْخَطِيِّ.

Conservation of Linear Momentum Applications

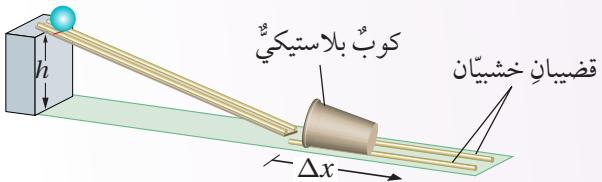
الفكرة الرئيسية: للتصادمات نوعانِ رئيسان؛ تساعد معرفتهما في تصميم أجهزة وأدواتٍ عدّة يعتمد مبدأ عملها على هذه التصادمات والحماية منها.

تجربة استهلاكية

الزخم الخطّي

المواد والأدوات: كرة زجاجية أو فلزية، كرة تنس، سطح خشبي مستوي أملس يحتوي فيه مجرى، حامل فلزي، كوب بلاستيك، قضيبان خشبيان طول كلّ منهما (30 cm) تقريباً، مسطرة مترية، شريط لاصق.

إرشادات السلامة: الحذر من سقوط الكرات على أرضية المختبر، أو تقاذف الطلبة الكرات بينهم.



خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أُفذ الخطوات الآتية:

1 أضع السطح الخشبي على سطح الطاولة، ثم أرفع أحد طرفيه بالحامل الفلزي ليصبح مستوى مائلاً، ثم أثبّت قطعة شريط لاصق عليه عند ارتفاع محدّد (h). بعدها؛ أثبّت القضيبين الخشبيين بشكل متوازٍ على بُعد محدّد من نهاية المستوى المائل لتشكل مجرّى للكوب البلاستيك، وأضع الكوب بينهما، بحيث تكون فوّهته مقابلاً للمستوى المائل، كما هو موضح في الشكل، وأدوّن الارتفاع (h).

2 أقيس: أضع الكرة الزجاجية على المستوى المائل عند الشريط اللاصق، ثم أفلّتها، وأقيس المسافة التي تحرّكها الكوب بعد اصطدام الكرة به، وأدوّنها.

3 أكرّر الخطوة السابقة باستخدام كرة التنس.

4 أجرّب: أكرّر الخطوة 2 باستخدام الكرة الزجاجية، على أن أغيّر الارتفاع الرأسي (h) الذي أفلّت الكرة منه.

التحليل والاستنتاج:

1. أقارن بين المسافة التي تحرّكها الكوب البلاستيك في الخطوتين (2، 3). ماذا أستنتج؟ أفسّر إجابتي.

2. أقارن بين المسافة التي تحرّكها الكوب البلاستيك في الخطوتين (2، 4). ماذا أستنتج؟ أفسّر إجابتي.

3. أستنتاج: استناداً إلى ملاحظاتي في التجربة، ما العوامل التي تحدّد المسافة التي يتحرّكها الكوب؟ أفسّر إجابتي.

الزَّخْمُ الْخَطِيُّ وَالدَّفْعُ

Linear Momentum and Impulse

1

الدرس

الزَّخْمُ الْخَطِيُّ | Linear Momentum

عندما تتحرّك شاحنةً وسيارة بمقدار السرعة نفسه؛ فإن إيقاف الشاحنة أصعب من إيقاف السيارة. وعند تحرّك سيارتين متماثلتين متساويتين في الكتلة بسرعتين مختلفتين مقداراً؛ فإن إيقاف السيارة الأقل سرعةً أسهل من إيقاف السيارة الأكبر سرعة. فما الكمية الفيزيائية التي تعتمد على كل من كتلة الجسم وسرعته؟

يُعرّف الزَّخْمُ الْخَطِيُّ (كميّة التحرّك) **Linear momentum** لجسم؛ بأنه ناتج ضرب كتلة الجسم (m) في سرعته الخطية المتجهة (v)، رمزه p ، ويُقاس بوحدة $\text{kg}\cdot\text{m/s}$ حسب النظام الدولي للوحدات. وأُعبر عنه بالمعادلة الآتية:

$$p = mv$$

والزَّخْمُ الْخَطِيُّ كميّة متتجهة، له اتجاه السرعة نفسه. وألاحظُ من هذه المعادلة أن الزَّخْمُ الْخَطِيُّ لجسم يزدادُ بزيادة مقدار سرعته أو كتلته أو كليهما. فمثلاً، الزَّخْمُ الْخَطِيُّ للشاحنة الموضحة في الشكل (1) أكبرُ منه للسيارة عند حركتهما بمقدار السرعة نفسه. ولاحظُ في أثناء تفاصي التجربة الاستهلايكية أن تأثيرَ جسم متحرك في جسم آخر عند التصادم يعتمد على كتلته وسرعته المتتجهة؛ أي يعتمد على زخمه الخطبي.

✓ **أتحقق:** ما المقصود بالزَّخْمُ الْخَطِيُّ؟

الزَّخْمُ الْخَطِيُّ والقانون الثاني لنيوتن في الحركة

Linear Momentum and Newton's Second Law of Motion

يلزمُ التأثير بقوّةٍ في جسم لتغيير مقدار زَخْمه الخطبي أو اتجاهه أو كليهما. ويُستخدم القانون الثاني لنيوتن في الحركة للربط بين التغيير في الزَّخْمُ الْخَطِيُّ

الشكل (1): شاحنة وسيارة

تحركان بمقدار السرعة نفسه.



الفقرة الرئيسية:

ترتبط مفاهيم الدفع والقوّة والتغيير في الزَّخْمُ الْخَطِيُّ بعلاقاتٍ رياضيّة. ولحفظ الزَّخْمُ الْخَطِيُّ أهميّة كبيرة في حياتنا اليومية.

نتائج التعلم:

- أُعرّف الزَّخْمُ الْخَطِيُّ (كميّة التحرّك) لجسم.
- أُعبر عن القانون الثاني لنيوتن بدلاله معدل التغيير في الزَّخْمُ الْخَطِيُّ لجسم.
- أُعرّف الدفع بدلاله القوّة والزمن.
- أحسبُ الدفع الذي تؤثّر به قوّة ثابتة أو متغيرة في جسم.
- أستنتج العلاقة بين الدفع الكلي المؤثّر في جسم والتغيير في زَخْمه الخطبي.
- أستقصي قانون حفظ الزَّخْمُ الْخَطِيُّ عند تصادم الأجسام بفعل قوي داخليّة.
- أطبق بحل مسائل على الزَّخْمُ الْخَطِيُّ وحفظه.

المفاهيم والمصطلحات:

الزَّخْمُ الْخَطِيُّ	Linear Momentum
الدفع	Impulse

مبرهنـة (الزَّخْمُ الْخَطِيُّ - الدفع)
Impulse – Momentum Theorem

قانون حفظ الزَّخْمُ الْخَطِيُّ
Law of Conservation of Linear Momentum

أَفْخَر: هل يُمْكِن أَنْ يَكُون مَقْدَارُ
الزَّخْمِ الْخَطِي لِسَيَارَةٍ مَسَاوِيًّا مَقْدَارُ
الزَّخْمِ الْخَطِي لِشَاحِنَةٍ كَبِيرَةٍ كَتْلَتَهَا
عَشْرَةُ أَصْعَافٍ كَتْلَةُ السَّيَارَةِ؟ أَفْسَرْ

أتحقق: أُعْرِفُ القوّةَ المُحَصَّلَةَ
المُؤثِّرةَ فِي جَسْمٍ بِدَلَالَةِ الزَّرْخَمِ.
الخطيٰ.

الربط بالتكنولوجيا

تنفس الوسادة الهوائية في أثناء حدوث تصادم سيارة، إذ تُحَفَّز القوة الناتجة عن التصادم مجسّاً يُطلق تفاعلاً كيميائياً يتبع عنه غاز يؤدي إلى انتفاخ الوسادة بسرعة. وتعمل الوسادة الهوائية على زيادة زمن تأثير القوة الذي خلاله يتوقف جسم الراكب عن الحركة، وبالتالي تقليل مقدار القوة المؤثرة فيه؛ فيقلل ذلك من احتمال حدوث الإصابات أو خطورتها. كما تعمل الوسادة الهوائية على توزيع القوة على مساحة كبيرة من جسم الراكب، فيقلل ضغط هذه القوة المؤثرة فيه.



للجسم والقوّة المُمحضّلة المؤثّرة فيه، علمًا أنّ العالِم نيوتن صاغ قانونه الثاني بدلالة الزَّخم الخطّي كما يأتي:

$$\sum \mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt}$$

حيث $\sum F$ هي القوة المُحصلة المؤثرة في الجسم. وعند ثبات الكتلة يمكن إعادة كتابة القانون الثاني لنيوتون بدلاله الرَّحْم كما يأتي:

$$\sum \mathbf{F} = \frac{d(m\mathbf{v})}{dt} = m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = m\mathbf{a}$$

وعندما يحدث تغير في الزخم الخطّي (Δp) لجسم خلال مدة زمنية معينة (Δt)؛ فإنه يمكن إعادة كتابة العلاقة السابقة بالصورة الآتية:

$$\sum F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$$

العلاقة بين الزخم الخطى والدفع

Relationship between Linear Momentum and Impulse

عندما يرك كل لاعب كرّة قدم ساكنةً؛ يحدث تلامسُ بين قدمه والكرة لمدّة زمنية، وتتغير سرعتها المتوجهة بسبب القوّة المؤثرة فيها من قدم اللاعب، وتكتسب الكرة زخماً خطياً باتجاه محدّد نتيجة دفع قدم اللاعب لها.

يُعرَّف الدفع (I) المؤثِّر في جسمٍ بأنه ناتجٌ ضربِ القوّة المُحصّلة المؤثِّرة في الجسم في زمن تأثيرها، كما يأتي:

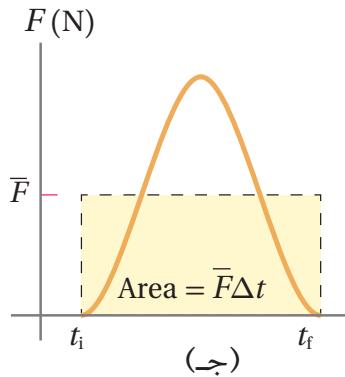
$$I = \sum F \Delta t$$

يُقاس الدفع بوحدة (N.s) حسب النظام الدولي للوحدات. ويمكن استخدام القانون الثاني لنيوتون للتعبير عن الدفع بالعلاقة الآتية:

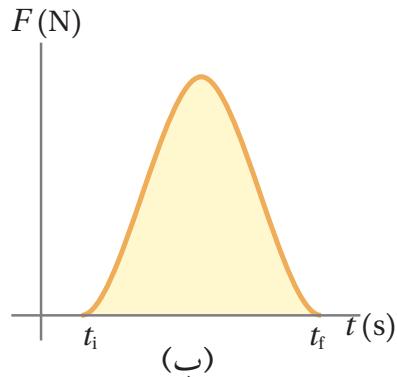
$$I = \Delta p$$

Impulse – momentum (الزخم الخطى – الدفع) سُمِّيَّ هذه المعادلة مبرهنة الزخم الخطى – الدفع

theorem)، وتنص على: «دفع قوة محصلة مؤثرة في جسم يساوي التغير في زخم الخطى»، والدفع كمية متوجهة، يكون باتجاه تغير الزخم الخطى، وهو اتجاه القوة المحصلة نفسه. وبما أن الزخم الخطى والدفع والقوة كميات متوجهة؛ فإن الإشارات الموجبة والسلبية ضرورية لتحديد اتجاهاتها، لذا؛ سنختار في هذا الدرس نظام إحداثيات يكون فيه الاتجاه الموجب نحو محور $(x+)$.



(ج)



(ب)



(أ)

الشكل (2): (أ) لاعب يركل كرة، (ب) منحنى (القوة - الزمن) يبيّن تغيير القوة المؤثرة في الكرة مع الزمن، (ج) القوة المُتغيّرة والقوة المتوسطة خلال الفترة الزمنية نفسها.

يبيّنُ الشكل (2/أ) قدمَ لاعبٍ يركل كرَةً قدمً؛ فيتغيّرُ زَخْمُها الخطّي بسبِبِ قوّتِه المؤثّرة فيها. بينما يوضّحُ الشكل (2/ب) كيفية تغيّرُ مقدارِ تلك القوّة مع الزمن أثناء ملامسة قدم اللاعب للكرة لفترة زمنيّة Δt). يُحسبُ مقدارُ الدفع المؤثّر في الكرة عن طريق إيجاد المساحة Area الممحصورة بين منحنى (القوّة-الزمن) ومحور الزمن الموضّح في الشكل (2/ب)، أو باستخدام مقدارِ القوّة المُتوسّطة مضروباً في زمن تأثيرها، كما في الشكل (2/ج)، عن طريق إيجاد المساحة الممحصورة بين منحنى (القوّة المتوسطة - الزمن) ومحور الزمن خلال الفترة الزمنيّة نفسها. والقوّة المتوسطة (\bar{F}) كما في الشكل (2/ج) هي القوّة المُمحصلة الثابتة التي إذا أثرت في الجسم لفترة زمنيّة (Δt) لأحدثت الدفع نفسه الذي تحدّثُه القوّة المُتغيّرة أثناء الفترة الزمنيّة نفسها.

تُستخدم مُبرهنَة (الزَخْمُ الخطّي - الدفع) في توضيح نقطتين مهمتين:

- عند ثبات القوّة المُمحصلة المؤثّرة، يزدادُ التغيّرُ في الزَخْمُ الخطّي بزيادة زمان تأثير هذه القوّة. فمثلاً؛ عند دفع عربة تسوق ساكنة بقوّة، يزدادُ التغيّرُ في زَخْمِها الخطّي بزيادة المدّة الزمنيّة لتأثير القوّة من لحظة تحريك العربة وحتى ترکها. أنظر الشكل (3/أ).
- عند ثبات مقدار التغيّر في الزَخْمُ الخطّي، يتتناسبُ مقدار القوّة المُمحصلة المؤثّرة عكسيّاً مع زمن تأثيرها. فمثلاً؛ يَتني المظلّيُّ رجلٍ يدفع ملامة قدميه سطح الأرض، وهذا يجعلُ تغيّر زَخْمه الخطّي يستغرقُ فترَةً زمنيّةً أطْوَلَ، فيقلُّ مقدارُ القوّة المُمحصلة المؤثّرة فيه. أنظر الشكل (3/ب). كما أَتني أَثني رجلٍ تلقائياً عند ملامسة قدميه سطح الأرض بعد القفز.

تحقق: ما العلاقةُ بين دفع قوّة مُمحصلةٍ مؤثّرةٍ في جسمٍ والتغيّرُ في زَخْمه الخطّي؟ ✓



ب

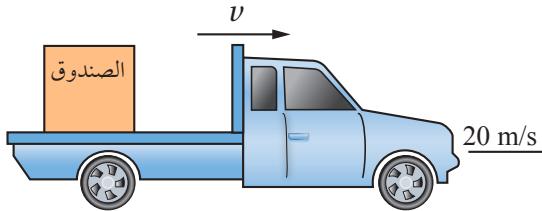


أ

الشكل (3):

- شخصٌ يؤثّر في عربة تسوق بقوّة مدةً من الزمن فيُحدث دفعاً يغيّرُ زَخْمَها الخطّي.
- يَتني المظلّيُّ رجلٍ يدفع ملامة قدميه سطح الأرض لزيادة زمان التغيّر في زَخْمه الخطّي.

المثال ١



وضع صندوق كتلته (100 kg) في شاحنة تتحرك بسرعة (20 m/s) شرقاً، كما هو موضح في الشكل (4). إذا ضغط السائق على دواسة المكابح، فتوقفت الشاحنة خلال (5.0 s) من لحظة الضغط على المكابح دون أن ينزلق الصندوق؛ فأحسب ما يأتي:

الشكل (4): شاحنة تحمل صندوقاً تتحرك شرقاً بسرعة ثابتة.

أ. الزخم الخطّي الابتدائي للصندوق.

ب. الدفع المؤثّر في الصندوق.

ج. قوّة الاحتكاك المُتوسّطة التي أثّرت في الصندوق ومنعته من الانزلاق.

المعطيات: $m = 100 \text{ kg}$, $v_i = 20 \text{ m/s}$, $+x$, $v_f = 0$, $\Delta t = 5.0 \text{ s}$.

المطلوب: $p_i = ?$, $I = ?$, $\bar{f}_s = ?$



الحلّ:

سوف نتعامل وفق نظام إحداثيات يكون فيه الاتجاه الموجب باتجاه محور ($+x$) في هذا المثال وفي أمثلة الوحدة ومسائلها كافة.

أ. تتحرك الشاحنة باتجاه محور x ؛ لذا تكون السرعة الابتدائية للصندوق موجبة، وأحسب زخمها الخطّي الابتدائي كما يأتي:

$$p_i = mv_i = 100 \times 20$$

$$= 2 \times 10^3 \text{ kg.m/s}$$

$$p_i = 2 \times 10^3 \text{ kg.m/s}, +x$$

الزخم الخطّي الابتدائي موجب؛ فيكون باتجاه محور $+x$.

ب. أستخدم مبرهنة (الزخم الخطّي - الدفع) لحساب الدفع.لاحظ أنّ الزخم الخطّي النهائي للصندوق يساوي صفرًا؛ لأنّ مقدار سرعته النهائية يساوي صفرًا.

$$I = \Delta p = p_f - p_i$$

$$= mv_f - 2 \times 10^3 = 100 \times 0 - 2 \times 10^3$$

$$= -2 \times 10^3 \text{ kg.m/s}$$

$$I = 2 \times 10^3 \text{ kg.m/s}, -x$$

الدفع سالب، حيث يؤثّر في اتجاه الغرب ($-x$)؛ لأنّ يؤثّر في الصندوق بعكس اتجاه سرعته الابتدائية.

ج. أستخدم القانون الثاني لنيوتون لحساب قوّة الاحتكاك المُتوسّطة المؤثّرة في الصندوق أثناء مدة توقف الشاحنة.

$$\sum F = \bar{f}_s = \frac{\Delta p}{\Delta t}$$

$$\bar{f}_s = \frac{-2 \times 10^3}{5.0} = -4 \times 10^2 \text{ N}$$

$$\bar{f}_s = 4 \times 10^2 \text{ N}, -x$$

تؤثّر قوّة الاحتكاك في الاتجاه المعاكس لاتجاه سرعة الصندوق؛ لذا يكون اتجاهها في اتجاه $-x$ (غرباً).

المثال 2



الشكل (5): لاعب يركل كرة قدم.

يرُكِّل لاعب كرة قدم ساكنة كتلتها (0.450 kg)؛ فتنطلق بسرعة (30.0 m/s) في اتجاه محور $+x$. انظر الشكل (5). إذا علمت أن القوة المتوسطة المؤثرة في الكرة خلال زمن تلامسها مع قدم اللاعب يساوي (135 N)؛ فأحسب ما يأتي بإهمال وزن الكرة مقارنة بالقوة المؤثرة فيها.

أ. الزخم الخطّي للكرة عند لحظة ابعادها عن قدم اللاعب.

ب. زمن تلامس الكرة مع قدم اللاعب.

ج. الدفع المؤثر في الكرة نتيجة تأثير القوة من قدم اللاعب.

$$m = 0.450 \text{ kg}, v_i = 0 \text{ m/s}, v_f = 30.0 \text{ m/s}, +x, \sum F = 135 \text{ N}, +x.$$

المعطيات:

$$p_f = ?, \Delta t = ?, I = ?$$

المطلوب:

الحلّ:

أ. أحسب الزخم الخطّي النهائي للكرة لحظة ابعادها عن قدم اللاعب.

$$p_f = mv_f = 0.450 \times 30.0$$

$$= 13.5 \text{ kg.m/s}$$

$$p_f = 13.5 \text{ kg.m/s}, +x$$

الزخم الخطّي النهائي موجب؛ إذ تحرّك الكرة في اتجاه محور $+x$.

ب. أستخدم القانون الثاني لنيوتون لحساب زمن تلامس الكرة مع قدم اللاعب كما يأتي:

$$\sum F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$$

$$\Delta t = \frac{\Delta p}{\sum F} = \frac{p_f - p_i}{135} = \frac{13.5 - 0}{135}$$

$$= 0.10 \text{ s}$$

ج. أستخدم مبرهنة (الزخم الخطّي - الدفع) لحساب الدفع.

$$I = \Delta p = p_f - p_i$$

$$= 13.5 - 0 = 13.5 \text{ kg.m/s}$$

$$I = 13.5 \text{ kg.m/s}, +x$$

الدفع موجب؛ إذ يؤثر في اتجاه محور $+x$ ؛ لأنّه يؤثر في الكرة باتجاه القوة المُحصلة المؤثرة فيها من قدم اللاعب.

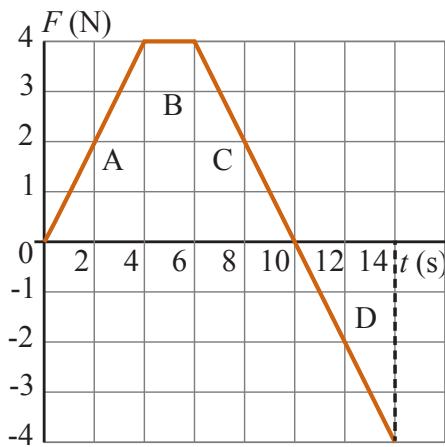
كما يمكن حساب الدفع باستخدام تعريف الدفع كما يأتي:

$$I = \sum F \Delta t$$

$$= 135 \times 0.10 = 13.5 \text{ N.s}$$

$$I = 13.5 \text{ N.s}, +x$$

المثال 3



الشكل (6): منحنى (القوة - الزمن).

$m = 4 \text{ kg}$, $v_i = 0 \text{ m/s}$, $\Delta t = 14 \text{ s}$. المنحنى البياني.

$$I = ?, v_f = ?, \bar{F} = ?$$

المعطيات:

المطلوب:

الحل:

ب. أستخدم مبرهنة (الزخم الخطى - الدفع) لحساب مقدار السرعة النهاية للصندوق في نهاية الفترة الزمنية.

$$I = \Delta p = p_f - p_i$$

$$16 = mv_f - 0$$

$$v_f = \frac{16}{4} = 4 \text{ m/s}$$

السرعة النهاية موجبة، فيكون اتجاهها باتجاه محور x .

ج. أستخدم القانون الثاني لنيوتون لحساب القوة المتوسطة المؤثرة في الصندوق، كما يأتي:

$$\sum F = \bar{F} = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{16}{14} = 1.1 \text{ N}$$

يكون اتجاه القوة المتوسطة باتجاه المحور x .

تؤثر قوة محصلة باتجاه محور x في صندوق ساكن كتلته (4 kg) مدة زمنية مقدارها (14 s). إذا علمت أن مقدار القوة المُحصلة واتجاهها يتغيران بالنسبة للزمن كما هو موضح في منحنى (القوة - الزمن) في الشكل (6)؛ فأحسب ما يأتي:

- أ. الدفع الكلى المؤثر في الصندوق نتيجةً لتأثير القوة المُحصلة.
- ب. السرعة النهاية للصندوق في نهاية المدة الزمنية لتأثير القوة المُحصلة.
- ج. القوة المتوسطة المؤثرة في الصندوق خلال هذه المدة الزمنية.

أ. الدفع المؤثر في الصندوق خلال زمن تأثير القوة يساوي المساحة المحصورة بين منحنى (القوة - الزمن) ومحور الزمن، ويساوي مجموع المساحات A و B و C و D.

وأحسب مقداره كما يأتي:

$$I = A + B + C + D$$

$$= \frac{1}{2} \times (4 - 0) \times 4 + (6 - 4) \times 4 + \frac{1}{2} \times (10 - 6) \times 4 + \frac{1}{2} \times (14 - 10) \times (-4) \\ = 16 \text{ kg.m/s}$$

$$I = 16 \text{ kg.m/s}, +x$$

اتجاه الدفع باتجاه محور x .



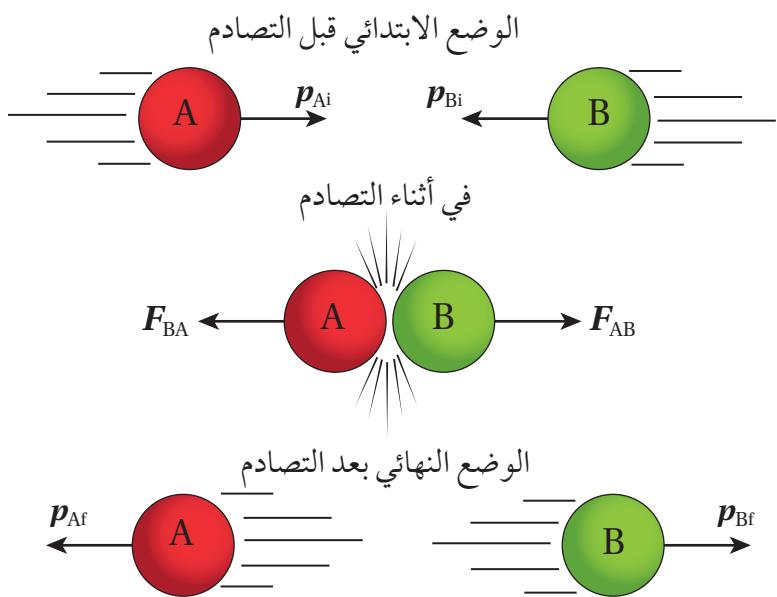
الشكل (7): لاعب يقذف كرة تنس.

للمزيد

استخدم الأرقام: كرة تنس كتلتها (0.060 kg)؛ يرميها لاعب إلى أعلى قليلاً، وعند بلوغها أقصى ارتفاع يضر بها أفقياً بالمضرب؛ فتنطلق بسرعة (55 m/s) في اتجاه محور x . انظر الشكل (7). إذا علمت أن زمن تلامس الكرة مع المضرب ($4.0 \times 10^{-3} \text{ s}$)؛ أحسب ما يأتي:

أ. الدفع الذي يؤثر به المضرب في الكرة.

ب. القوة المتوسطة التي أثر بها المضرب في الكرة.



الشكل (8): مراحل تصادم كرتين
بلياردو في بُعد واحد.

حفظ الزَّخْم الخطِّي Conservation of Linear Momentum

يكونُ الزَّخْم الخطِّي محفوظاً تحت شروطٍ معينة. وكيفية الوصول إلى قانون حفظ الزَّخْم الخطِّي؛ انظر الشكل (8)، الذي يوضح تصادم كرتين بلياردو في بُعد واحد، حيث يتحرك الجسمان قبل التصادم على امتداد الخط المستقيم نفسه، ويتصادمان رأساً برأس، وتبقى حركتهما بعد التصادم على المسار المستقيم نفسه.

أتذكرُ أنَّ النَّظام المُعزوَل Isolated system هو النَّظام الذي تكونُ القوَّة المُحصَّلةُ الْخَارِجِيَّةُ المُؤثِّرةُ فيه صفرًا، وتكونُ القوى المُؤثِّرةُ قويًّا داخليًّا فقط. ويعُدُّ النَّظام المُكوَّن من كرتين بلياردو في الشكل (8) مُعزوًلاً؛ إذ إنَّ القوى الْخَارِجِيَّةُ المُؤثِّرةُ فيه، مثلُ قوَّة الاحتكاكِ تكونُ صغيرًّا مُقارنةً بالقوى الداخليَّة المُؤثِّرةُ في النَّظام وهي قوى الفعل ورد الفعل التي تؤثِّرُ بها كُلُّ من الكرتين في الآخرِ في أثناء التصادم؛ لذا نهمل قوى الاحتكاك الْخَارِجِيَّة.

أتحقق: متى يمكن إهمال القوى الْخَارِجِيَّة المُؤثِّرة في نظام كي يُعدُّ نظاماً مُعزوًلاً؟

حفظ الزَّخْم الخطِّي والقانون الثالث لنيوتن في الحركة

Conservation of Linear Momentum and Newton's Third Law of Motion

يوضُّحُ الشكل (8) كرتين بلياردو قبل التصادم مباشِرَةً، وفي أثناء التصادم، وبعدَه مباشِرَةً. تؤثِّرُ كُلُّ كرَّة بقوَّةٍ في الكرة الآخرِ في أثناء تصادمهما معاً، وأفترضُ أنَّ مقدارَ كُلِّ من القوى ثابتٌ في أثناء الفترة الزمنية لِتَلَامُسِ الكُرتين. تكونُ هاتان

اللُّقُوتانِ مُتساوَيَتَيْنِ فِي الْمَقْدَارِ وَمُتَعَاكِسَتَيْنِ فِي الْاتِّجَاهِ؛ بِحَسْبِ الْقَانُونِ الثَّالِثِ لِنِيُوتَنِ فِي الْحَرْكَةِ، إِذْ إِنَّهُمَا تُمَثَّلُانِ زَوْجِي تَأْثِيرِ مُتَبَادِلٍ (فَعْلٌ وَرَدُّ فَعْلٌ)، وَأَعْبَرُ عَنْهُمَا كَمَا يَأْتِي:

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

وَبِضُربِ طَرَفِيِّ الْمُعَادِلَةِ بِالْفَتَرَةِ الزَّمِنِيَّةِ لِتَلَامِسِ الْكُرْتَيْنِ، أَتُوَصِّلُ إِلَىِ الْعَلَاقَةِ الْآتِيَّةِ:

$$\mathbf{F}_{AB} \Delta t = -\mathbf{F}_{BA} \Delta t$$

وَتَعْنِي هَذِهِ الْعَلَاقَةُ أَنَّ دَفَعَ الْكُرْتَةِ A فِي الْكُرْتَةِ B وَهُوَ ($\mathbf{I}_{AB} = \Delta \mathbf{p}_B$) يَسَاوِي فِي الْمَقْدَارِ دَفَعَ الْكُرْتَةِ B فِي الْكُرْتَةِ A وَهُوَ ($\mathbf{I}_{BA} = \Delta \mathbf{p}_A$)، وَيَعَاكِسُهُ فِي الْاتِّجَاهِ. وَبِمَا أَنَّ التَّغْيِيرَ فِي الزَّخْمِ الْخَطِّيِّ يَسَاوِي الدَّفَعَ بِحَسْبِ مُبْرَهَنَةِ (الزَّخْمِ الْخَطِّيِّ - الدَّفَعِ)، فَإِنَّهُ يُمْكِنُ كِتَابَةُ الْعَلَاقَةِ السَّابِقَةِ كَمَا يَأْتِي:

$$\mathbf{I}_{AB} = -\mathbf{I}_{BA}$$

$$\Delta \mathbf{p}_B = -\Delta \mathbf{p}_A$$

أَيْ أَنَّ:

$$\mathbf{p}_{Bf} - \mathbf{p}_{Bi} = -(\mathbf{p}_{Af} - \mathbf{p}_{Ai})$$

وَبِإِعادَةِ تَرْتِيبِ حَدُودِ هَذِهِ الْمُعَادِلَةِ نَحْصُلُ عَلَىِ مُعَادِلَةِ قَانُونِ حَفْظِ الزَّخْمِ الْخَطِّيِّ:

$$m_A \mathbf{v}_{Ai} + m_B \mathbf{v}_{Bi} = m_A \mathbf{v}_{Af} + m_B \mathbf{v}_{Bf}$$

حِيثُ \mathbf{v}_{Ai} و \mathbf{v}_{Af} تمثَّلُانِ السُّرْعَيْنِ الْمُتَجَهَّيْنِ لِلْجَسْمِ الْأَوَّلِ قَبْلَ التَّصَادُمِ وَبَعْدَهُ مُبَاشِرَةً عَلَىِ التَّرْتِيبِ، وَ \mathbf{v}_{Bi} و \mathbf{v}_{Bf} تمثَّلُانِ السُّرْعَيْنِ الْمُتَجَهَّيْنِ لِلْجَسْمِ الْثَّانِي قَبْلَ التَّصَادُمِ وَبَعْدَهُ مُبَاشِرَةً عَلَىِ التَّرْتِيبِ. تَشِيرُ هَذِهِ الْمُعَادِلَةِ إِلَىِ قَانُونِ

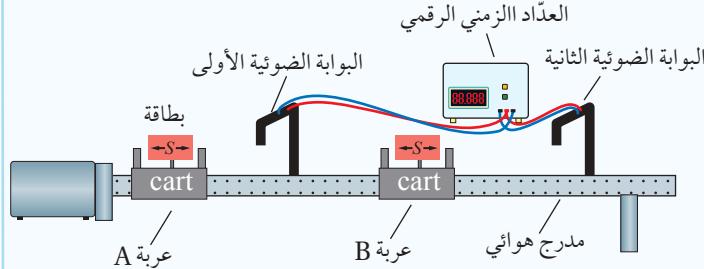
حَفْظِ الزَّخْمِ الْخَطِّيِّ Law of conservation of linear momentum، إِذ يَنْصُّ أَنَّهُ: «عِنْدَمَا يَتَفَاعَلُ جَسْمَانُ أَوْ أَكْثَرُ فِي نَظَامٍ مَعْزُولٍ، يَبْقَى الزَّخْمُ الْخَطِّيُّ الْكُلِّيُّ لِلنَّظَامِ ثَابِتًا». كَمَا يُمْكِنُ التَّعْبِيرُ عَنْهُ بِأَنَّ: الزَّخْمُ الْخَطِّيُّ الْكُلِّيُّ لِلنَّظَامِ مَعْزُولٍ قَبْلَ التَّصَادُمِ مُبَاشِرَةً يَسَاوِي الزَّخْمُ الْخَطِّيُّ الْكُلِّيُّ لِلنَّظَامِ بَعْدَ التَّصَادُمِ مُبَاشِرَةً. وَسُوفَ نَتَعَالَمُ مَعَ الْأَنْظَمَةِ جَمِيعَهَا فِي هَذِهِ الْوَاحِدَةِ عَلَىِ أَنَّهَا مَعْزُولَةً.

أَتَحَقَّقُ: مَا الْعَلَاقَةُ بَيْنَ اِتِّجَاهِ الدَّفَعِ الْمُؤَثِّرِ فِي جَسْمٍ وَاتِّجَاهِ التَّغْيِيرِ فِي زَخْمِهِ الْخَطِّيِّ؟

تَعَرَّفْتُ إِثْبَاتَ حَفْظِ الزَّخْمِ الْخَطِّيِّ رِياضِيًّا، وَلَا سُقْصَاءَ حَفْظِ الزَّخْمِ الْخَطِّيِّ عَمَلِيًّا؛ أَنْفَذَتُ الْتَّجْرِيْبَ الْآتِيَّ:

حفظ الزَّخْمُ الْخَطِي

المواد والأدوات: مدرج هوائي مع ملحقاته (العربات والبطاقات الخاصة بها، والبوابات الضوئية ومضخة الهواء)، ميزان إلكتروني، أنقال مختلف، شريط لاصق.



إرشادات السلامة:

ارتداء المعطف واستعمال النظارات الواقية للعينين، والحذر من سقوط الأجسام والأدوات على القدمين.

خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أُفذ الخطوات الآتية:

- أُثبت المدرج الهوائي أفقياً على سطح الطاولة، ثم أثبتت البوابتين الضوئيتين كما هو موضح في الشكل.
- أقيس طول كُلٌّ من البطاقتين الخصتين بالعربتين المُنْزَلقتين (S)، ثم أثبتت كُلًاً منها على عربة، وأدون طوليهما في الجدول (1)، ثم أثبتت لاصقاً على كل عربة، وأكتب الرمز A على إدراهما، والرمز B على الآخر.
- أقيس كتلة كُلٌّ من العربتين، ثم أدونهما في المكان المُخصّص في الجدول (2).
- أضع العربة A عند بداية المدرج، ثم أضع العربة B في منتصف المدرج بين البوابتين الضوئيتين، كما هو موضح في الشكل.
- أُجِّرِّب:** أشغل مضخة الهواء، ثم أدفع العربة A في اتجاه العربة B الساكنة، ثم أدون في الجدول (1) الزمن (t_{Ai}) الذي تستغرقه العربة A في عبور البوابة الأولى قبل التصادم، والزمن الذي تستغرقه كُلٌّ من العربتين A و B (t_{Bf}, t_{Af}) في عبور البوابتين الأولى والثانية على الترتيب بعد التصادم.
- أكرر الخطوة السابقة بوضع أنقال على العربة A، بحيث تصبح كتلتها مثلي كتلة العربة B، وأدون قياسات الكتلة والزمن في الجدولين (1 و 2) للمحاولة 2.

التحليل والاستنتاج:

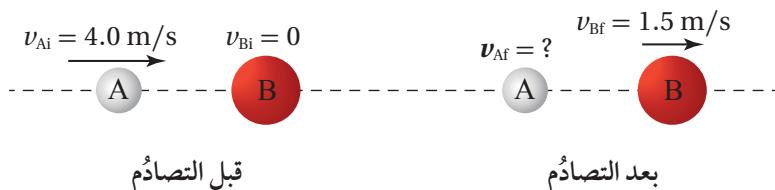
- أستخدم الأرقام:** أحسب السرعات الابتدائية والنهاية للعربتين لكُلٌّ محاولة باستخدام العلاقة: $v = \frac{S}{\Delta t}$ ، وأدون السرعات المُتجهة للعربتين في الجدولين (1 و 2)، مع افتراض أن اتجاه الحركة إلى اليمين موجب.
- أستخدم الأرقام:** أحسب الزخمين الخطيين الابتدائي والنهائي لكُلٌّ عربة وأدونهما في الجدول (2).
- أستخدم الأرقام:** أحسب الزخم الخطى الكلى الابتدائى والزخم الخطى الكلى النهائى لنظام العربتين لكُلٌّ محاولة وأدونهما في الجدول (2).
- أقارن:** ما العلاقة بين الزخم الخطى الكلى الابتدائى والزخم الخطى الكلى النهائى لنظام العربتين؟ أفسّر نتائجي.
- أصدر حكماً:** هل تطابقت نتائج تجربتي مع قانون حفظ الزخم الخطى في المحاولتين؟ ماذا أستنتج؟ أوضح إجابتي.
- أتوقع** مصادر الخطأ المُحتملة في التجربة.

الاحظُ بعد تنفيذ التجربة أن الزخم الخطّي الكلي لنظام العربتين قبل التصادم يساوي الزخم الخطّي الكلي لنظام العربتين بعد التصادم. وهذا يتوافق مع قانون حفظ الزخم الخطّي في الأنظمة المعزولة.

يمكن أن يحتوي النظام أعداداً مختلفة من الأجسام المُتفاعلَة (المُتصادِمة) معاً، وقد يحدث التصادم بينها في بُعدٍ واحدٍ أو بُعدَين أو ثلاثة أبعادٍ، وبعد تصادم هذه الأجسام؛ فإنّها قد ترتد عن بعضها بعضاً، أو تلتصق بعضها بعضاً، وفي الدرس الثاني سوف تُناقَش الأنواع المختلفة للتصادمات وحفظ الزخم فيها، كما سيناقش حفظ الزخم في الانفجارات، حيث يتجزأ الجسم الواحد إلى أجزاء عدّة.

المثال 4

يُوضّح الشكل (9) تصادم كرتين A و B، حيث تتحرّك الكرة A باتّجاه محور $x +$ بسرعة (4.0 m/s) نحو الكرة B الساكنة. بعد التصادم تحرّكت الكرة B بسرعة (1.5 m/s) باتّجاه محور $x +$. إذا علمتُ أنَّ ($m_A = 1.0 \text{ kg}$) و ($m_B = 2.0 \text{ kg}$) فاحسب سرعة الكرة A بعد التصادم.



الشكل (9): تصادم كرتين.

$$v_{Ai} = 4.0 \text{ m/s}, +x, \quad v_{Bi} = 0, \quad v_{Bf} = 1.5 \text{ m/s}, +x, \quad m_A = 1.0 \text{ kg}, \quad m_B = 2.0 \text{ kg}.$$

المعطيات:

$$v_{Af} = ?$$

المطلوب:

الحلّ:

بتطبيق قانون حفظ الزخم الخطّي على نظام الكرترين.

$$\sum p_i = \sum p_f$$

$$p_{Ai} + p_{Bi} = p_{Af} + p_{Bf}$$

$$m_A v_{Ai} + m_B v_{Bi} = m_A v_{Af} + m_B v_{Bf}$$

$$1.0 \times 4.0 + 2.0 \times 0 = 1.0 \times v_{Af} + 2.0 \times 1.5$$

$$v_{Af} = 4.0 - 3.0 = 1.0 \text{ m/s}$$

$$v_{Af} = 1.0 \text{ m/s}, +x$$

بما أنَّ السرعة النهائية للكرة A موجبة؛ فهذا يعني أن اتجاه سرعتها باتّجاه محور $x +$ ، أي بنفس اتجاه سرعتها قبل التصادم.

مراجعة الدرس

1. الفكرة الرئيسية: ما المقصود بالزخم الخطّي لجسم؟ ما العلاقة بين الدفع المؤثّر في جسم والتغيير في زخمه الخطّي؟

2. **أستنتج:** بحسب علاقـة تعريف الزخم الخطـي $mv = p$ ؛ تكون وحدـة قياسـه $\text{kg} \cdot \text{m/s}$ ، وبحسب مبرهـنة (الزخم الخطـي - الدفع) تكون وحدـة قياسـه $(\text{N} \cdot \text{s})$. أثبتـ أنـ هـاتـين الـوـحدـتين مـتـكافـتـان.

3. **أوضح:** متـى يكونـ الزـخمـ الخطـيـ لنـظـامـ مـحـفـوظـاـ؟

4. **أفسـرـ:** ذـهـبـ مـحـمـدـ إـلـىـ مدـيـنـةـ الـأـلـعـابـ، وـعـنـدـ قـيـادـتـهـ سـيـارـةـ كـهـرـبـائـيـةـ وـاصـطـدـامـهـ بـالـسـيـارـاتـ الـأـخـرـىـ وـجـدـ أـنـ تـأـثـيرـ هـذـهـ التـصـادـمـاتـ عـلـيـهـ قـلـيلـ. وـعـنـدـ تـركـيـزـ اـنـتـباـهـهـ عـلـىـ هـذـهـ السـيـارـاتـ؛ لـاحـظـ وـجـودـ حـزـامـ مـاـدـةـ مـطـاطـيـةـ يـحـيطـ بـجـسـمـ السـيـارـةـ. أـفـسـرـ سـبـبـ وـجـودـ هـذـاـ الحـزـامـ المـطـاطـيـ.

5. **أفسـرـ ماـيـأـتـيـ:**

أ. يـسـنـدـ الصـيـادـ كـعـبـ بـنـدـقـيـةـ الصـيـدـ إـلـىـ كـتـفـهـ بـإـحـكـامـ عـنـدـ إـطـلـاقـ الرـصـاصـ.

بـ. تـغـيـرـ المـرـكـبةـ الـفـضـائـيـةـ مـنـ مـقـدـارـ سـرـعـتـهاـ أـوـ اـتـجـاهـ حـرـكـتـهاـ عـنـ طـرـيقـ التـحـكـمـ بـكـمـيـةـ الـغـازـاتـ الـمـنـدـفـعـةـ مـنـهـاـ وـاتـجـاهـ اـنـدـفـاعـهـاـ.

6. **أـسـتـخـدـمـ الـأـرـقـامـ:** تـنـزلـقـ عـربـةـ (A) كـتـلـتـهـ (0.2 kg) عـلـىـ مـدـرـجـ هوـائـيـ (عدـيمـ الـاحـتكـاكـ) بـسـرـعـةـ (5 m/s) بـاتـجـاهـ (+x)، فـتـصـطـدـمـ بـعـربـةـ أـخـرـىـ (B) سـاـكـنـةـ عـلـىـ المـدـرـجـ كـتـلـتـهـ (0.6 kg). إـذـاـ كـانـ التـغـيـرـ فـيـ الزـخمـ الخطـيـ للـعـربـةـ (A) نـتـيـجـةـ التـصـادـمـ يـسـاوـيـ (1.6 kg.m/s)؛ أـحـسـبـ ماـيـأـتـيـ:

أـ. سـرـعـةـ كـلـ مـنـ الـعـربـتـيـنـ بـعـدـ التـصـادـمـ مـبـاـشـرـةـ.

بـ. زـمـنـ التـلـامـسـ بـيـنـ الـعـربـتـيـنـ إـذـاـ كـانـتـ القـوـةـ الـتـيـ أـثـرـتـ بـهـاـ إـحـدـىـ الـعـربـتـيـنـ فـيـ الـأـخـرـىـ (5.0 N).

7. أـضـعـ دائـرـةـ حـولـ رـمـزـ الإـجـابـةـ الصـحـيـحةـ لـكـلـ جـمـلـةـ مـمـاـيـأـتـيـ:

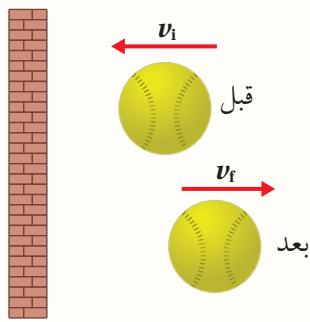
1. أـثـرـتـ قـوـةـ مـحـصـلـةـ مـقـدـارـهـاـ (3.2 N) فـيـ جـسـمـ سـاـكـنـ كـتـلـتـهـ (4 kg) مـدـةـ زـمـنـيـةـ مـقـدـارـهـاـ (20 s)، وـحـرـكـتـهـ بـاتـجـاهـهـاـ. إـنـ مـقـدـارـ السـرـعـةـ النـهـائـيـةـ لـلـجـسـمـ بـوـحدـةـ (m/s) يـسـاوـيـ:

دـ . 0.04

جـ . 4

بـ . 16

أـ . 64

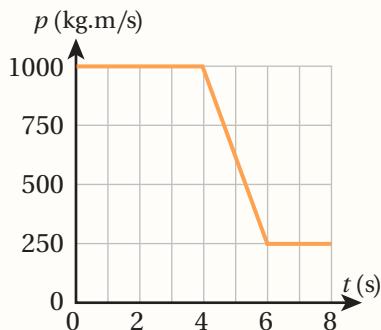


2. كرة كتلتها (0.5 kg) تتحرك باتجاه محور x -، فتصطدم بجدار بسرعة ($v_i = 30 \text{ m/s}$)، وترتد عنه بسرعة (v_f)، كما يبين الشكل. إذا كان الدفع المؤثر في الكرة (25 kg.m/s)؛ فإن مقدار السرعة (v_f) بوحدة يساوي:

- ب. 30 . أ. 80
د. 5 . ج. 20

3. شاحنة غير محمولة بالبضائع تتحرك بسرعة (v)، عند الضغط على المكابح توقفت خلال مدة زمنية (Δt_1). عندما تكون هذه الشاحنة محمولة بالبضائع، وتتحرك بالسرعة نفسها وتؤثر المكابح بالقوة نفسها توقفت خلال مدة زمنية (Δt_2). أي العلاقات الآتية تصف التغير في الزخم ومدة التوقف في الحالتين؟

- $\Delta P_2 < \Delta P_1$, $\Delta t_2 < \Delta t_1$. أ. $\Delta P_2 > \Delta P_1$, $\Delta t_2 > \Delta t_1$
 $\Delta P_2 > \Delta P_1$, $\Delta t_2 < \Delta t_1$. د. $\Delta P_2 = \Delta P_1$, $\Delta t_2 > \Delta t_1$. ج.



* يبين الشكل المجاور تمثيلاً بيانيًّا لزخم دراجة هوائية متوجهة خلال مدة (8.0 s). عند اللحظة ($t = 4.0 \text{ s}$) استخدم راكب الدراجة المكابح. معتمداً على الرسم البياني، أجب عن الفقرتين الآتىين:

4. ما مقدار القوة المحصلة التي أثّرت في الدراجة في أثناء استخدام المكابح؟

- د. 750 N . أ. 125 N
ج. 375 N . ب. 250 N

5. إذا كانت السرعة الابتدائية للدراجة (20 m/s)، فإن سرعتها النهائية بعد استخدام المكابح تساوي:

- د. 5 m/s . أ. 15 m/s
ج. 8 m/s . ب. 10 m/s

الطاقة الحركية والزخم الخطي في الأنظمة المعزلة Kinetic Energy and Linear Momentum in Isolated Systems

تعلمت أن الجسم المتحرك يمتلك زخماً خطياً، كذلك تعلمت في صفوف سابقة أن الجسم المتحرك يمتلك طاقة حركة انتقالية، تعتمد على كل من كتلة الجسم، ومقدار سرعته، ويعبر عنها بالمعادلة الآتية:

$$KE = \frac{1}{2} m v^2$$

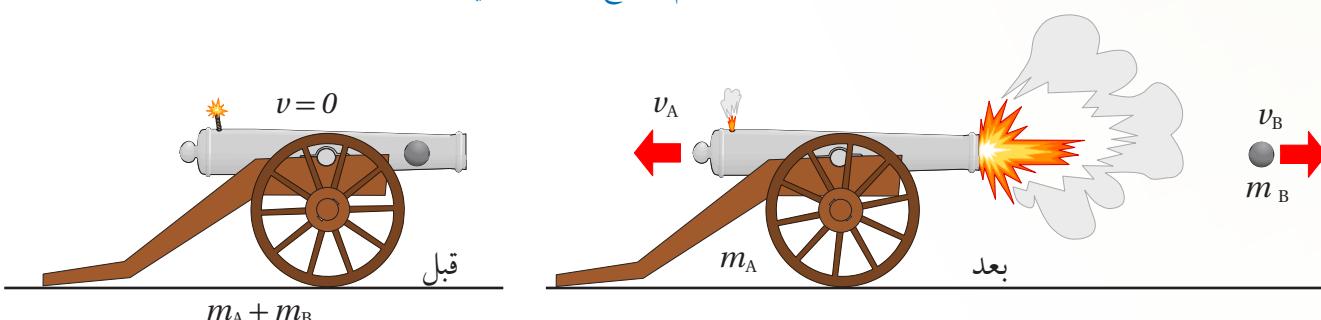
في الأنظمة المعزلة يكون الزخم الخطي محفوظاً، أما الطاقة الحركية فلا تكون محفوظة دائماً. في هذا الدرس سأتعرف على كيفية تطبيق قانون حفظ الزخم، وكيفية حساب التغير في الطاقة الحركية لنوتين من الأنظمة المعزلة؛ الأول: تفكيك جسم إلى جسمين مثل إطلاق مدفع لقذيفة، وانفصال صاروخ فضائي إلى جزأين خلال مراحل حركته. أما النوع الثاني فيختص التصادمات.

حفظ الزخم الخطي عند إطلاق قذيفة

Linear Momentum Conservation when Firing a Shell

يوضح الشكل (10) مدفعاً ساكناً كتلته (m_A) وبداخله قذيفة كتلتها (m_B). قبل إطلاق القذيفة يكون الزخم الخطي للنظام المكون منهما صفراءً، وكذلك الطاقة الحركية. وعند انفجار البارود تؤثر قوة الانفجار في القذيفة فتخرج من فوهة المدفع بسرعة (v_B) باتجاه اليمين، ويرتد المدفع بسرعة (v_A) باتجاه اليسار. وبما أن تفكيك النظام يحدث نتيجة تأثير قوى فعل ورد فعل داخلية، ناتجة عن انفجار البارود؛ فإن الزخم الخطي يكون محفوظاً، شريطة أن تكون قوة الاحتكاك الخارجية التي يؤثر بها سطح الأرض في المدفع مهملاً مقارنة بالقوى الداخلية.

الشكل (10): نظام المدفع والقذيفة الذي يُعد معزولاً.



الفكرة الرئيسية:

للتصادمات نوعان رئيسان، وتساعد معرفتهما في تصميم الأجهزة والأدوات المتعددة التي يعتمد مبدأ عملها على هذه التصادمات أو الحماية منها.

التوجهات التعليمية:

- أصنّف التصادمات إلى مرنٍ وغير مرنٍ وفقاً للتغييرات التي تطرأ على الطاقة الحركية للأجسام المتصادمة.
- أفسّر التغير في الطاقة الحركية في أثناء التصادم في ضوء انتقال الطاقة وتحولاتها وبدأ حفظ الطاقة.
- أفسّر مبدأ عمل تطبيقات عملية تقلل من الأضرار الناتجة عن تصادم جسمين.
- أطبق بحثٍ مسائِل على التصادمات.

المفاهيم والمصطلحات:

- | | |
|---------------------|----------------|
| Elastic Collision | تصادم مرنٌ |
| Inelastic Collision | تصادم غير مرنٌ |

أُفْكِر: لماذا يحتاج خرطوم إطفاء الحريق عادةً إلى أكثر من رجل إطفاء للإمساك به عند اندفاع الماء منه بسرعة كبيرة، كما هو موضح في الشكل (11)؟



الشكل (11): اندفاع الماء من خرطوم إطفاء الحريق.

بعد الانفجار، يكون الزخم الخطى الكلى للنظام مساوياً للزخم الخطى الكلى قبل الانفجار؛ ويساوي صفرًا. ومع ذلك فإن طاقة الحركة للنظام ليست محفوظة. إذ يكتسب النظام مقداراً كبيراً من طاقة الحركة بعد الانفجار؛ هذه الزيادة في طاقة الحركة للنظام مصدرها الطاقة الناتجة عن الانفجار نفسه.

في الأنظمة المعزلة التي يكون فيها الجسم مُتحركاً قبل الانقسام (انفصال صاروخ إلى جزأين مثلاً)، يكون الزخم الخطى محفوظاً أيضاً، ويمتلك النظام طاقة حركيةً قبل الانقسام، وبعد الانقسام يزداد مقدار هذه الطاقة عمّا كان عليه قبل الانقسام.

أَتَحَقَّق: في الشكل (10)، أقارن بين زخم المدفع وزخم القذيفة بعد الانفجار. ✓

المثال 5

- مدفعٌ ساكنٌ كتلته $(2.0 \times 10^3 \text{ kg})$ ، فيه قذيفةٌ كتلتها (50.0 kg) . أطلقت القذيفة أفقياً من المدفع بسرعة $(1.2 \times 10^2 \text{ m/s})$.
باتجاه محور x . أحسب ما يأتي:
أ. الدفع الذي تؤثر به القذيفة في المدفع.
ب. سرعة ارتداد المدفع.

المعطيات: أفترض رمز المدفع A ورمز القذيفة B.

$$m_A = 2.0 \times 10^3 \text{ kg}, \quad m_B = 50.0 \text{ kg}, \quad v_{Ai} = 0, \quad v_{Bi} = 0, \quad v_{Bf} = 1.2 \times 10^2 \text{ m/s}, \quad +x.$$

المطلوب:

الحلّ:

- أ. الدفع الذي تؤثر به القذيفة في المدفع (\mathbf{I}_{BA}) يساوي في المقدار الدفع الذي يؤثر به المدفع في القذيفة (\mathbf{I}_{AB})، ويعاكسه في الاتجاه. أستخدم مبرهنة (الزخم الخطى - الدفع) لحساب الدفع الذي تؤثر به القذيفة في المدفع.

$$\mathbf{I}_{BA} = -\mathbf{I}_{AB} = -\Delta \mathbf{p}_B$$

$$\mathbf{I}_{BA} = -(p_{Bf} - p_{Bi})$$

$$= -m_B(v_{Bf} - v_{Bi}) = -50.0 \times (1.2 \times 10^2 - 0)$$

$$= -6.0 \times 10^3 \text{ kg.m/s}$$

$$\mathbf{I}_{BA} = 6.0 \times 10^3 \text{ kg.m/s}, \quad -x$$

الدفع سالبٌ، حيث يؤثر في المدفع باتجاه محور x .

- ب. أطبق قانون حفظ الزخم الخطى على القذيفة والمدفع قبل إطلاقها مباشرةً، مع ملاحظة أن مجموع الزخم الخطى للقذيفة والمدفع يساوي صفرًا قبل إطلاق القذيفة.

$$\sum \mathbf{p}_i = \sum \mathbf{p}_f$$

$$\mathbf{p}_{Ai} + \mathbf{p}_{Bi} = \mathbf{p}_{Af} + \mathbf{p}_{Bf}$$

$$m_A v_{Ai} + m_B v_{Bi} = m_A v_{Af} + m_B v_{Bf}$$

$$2.0 \times 10^3 \times 0 + 50.0 \times 0 = 2.0 \times 10^3 \times v_{Af} + 50.0 \times 1.2 \times 10^2 = 0$$

$$v_{Af} = \frac{-6.0 \times 10^3}{2.0 \times 10^3} = -3.0 \text{ m/s}$$

$$v_{Af} = 3.0 \text{ m/s, } -x$$

بما أن السرعة النهائية للمدفع (A) سالبة، فهذا يعني أن اتجاه سرعته باتجاه محور x .

المثال 6

رائد فضاء كتلته (80 kg) يحمل جسمًا كتلته (40 kg)، ويتحرك باتجاه محور ($+x$) بسرعة ثابتة (6 m/s)، قذف الجسم باتجاه محور ($+x$) بسرعة (21 m/s)، كما في الشكل (12). أحسب ما يأتي:



أ. سرعة رائد الفضاء بعد قذفه للجسم.

ب. التغير في الطاقة الحركية للنظام، مفسّرًا سبب هذا التغيير.

الشكل (12): رائد فضاء يقذف جسمًا نحو الأمام.

$$m_A = 80 \text{ kg}, m_B = 40 \text{ kg}, v_i = 6 \text{ m/s}, v_{Bf} = 21 \text{ m/s}$$

$$v_{Af} = ?, \Delta KE = ?$$

الحل:

أ. أطبق قانون حفظ الزخم على النظام المعزل المكون من رائد الفضاء والجسم، قبل الانفصال مباشرةً وبعده مباشرةً.

$$\Sigma p_i = \Sigma p_f$$

$$(m_A + m_B) v_i = m_A v_{Af} + m_B v_{Bf}$$

$$(80 + 40) \times 6 = 80v_{Af} + 40 \times 21$$

$$720 = 80v_{Af} + 840$$

$$v_{Af} = \frac{-120}{80} = -1.5 \text{ m/s}$$

نستنتج من الإشارة السالبة لسرعة رائد الفضاء بعد الانفصال؛ أنه تحرك باتجاه معاكس لحركته قبل الانفصال ($-x$).

ب. التغير في الطاقة الحركية:

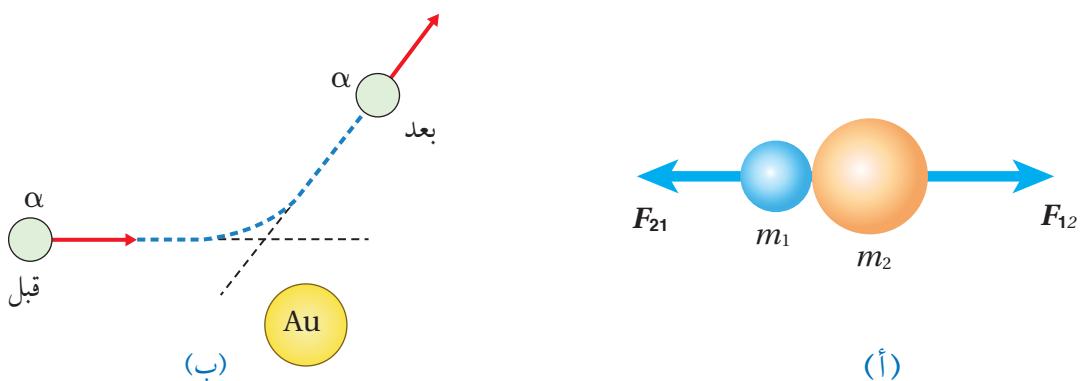
$$\Delta KE = \frac{1}{2} m_A (v_{Af})^2 + \frac{1}{2} m_B (v_{Bf})^2 - \frac{1}{2} (m_A + m_B) (v_i)^2$$

$$\Delta KE = \frac{1}{2} \times 80 \times (-1.5)^2 + \frac{1}{2} \times 40 \times (21)^2 - \frac{1}{2} \times (120) \times (6)^2$$

$$\Delta KE = 90 + 8820 - 2160 = 6750 \text{ J}$$

نستنتج من الإشارة الموجبة للتغير في الطاقة الحركية أن النظام اكتسب طاقة حركية إضافية مصدرها شغل قوة

عضلات رائد الفضاء؛ وهي قوة داخلية في النظام.



الشكل (13):

- (أ) تصادم جسمين على المستوى الجاهري.
- (ب) تصادم جسيمين مشحونين على المستوى دون الجاهري. (الشكل ليس ضمن مقياس رسم).

الطاقة الحركية والزخم الخطى في التصادمات

Kinetic Energy and Linear Momentum in Collisions

يستخدم مصطلح تصادم لتمثيل حدث يقترب فيه جسمان أحدهما من الآخر؛ فيؤثر كل منهما في الآخر بقوة. وقد يتضمن التصادم تلامساً مباشراً بين الجسيمين، كما هو موضح في الشكل (13/أ)، أو عدم حدوث تلامس بينهما كما في تصادم جسيمات مشحونة على المستوى دون الجاهري، مثل تصادم جسيم ألفا (α) مع نواة ذرة الذهب (Au) في تجربة رذرفورد الشهيرة، كما هو موضح في الشكل (13/ب). جسيم ألفا يحمل شحنة موجبة، وعند اقترابه من نواة عنصر الذهب تتولد قوة تنافر كهربائية بينهما تؤدي إلى تغيير مسار جسيم ألفا دون حدوث تلامس بينهما.

تعرف أنّ الزخم الخطى محفوظ دائمًا في الأنظمة المعزلة، فعند تصادم الأجسام بعضها بعض؛ يكون مجموع الزخم الخطى لمكونات النظام قبل التصادم يساوى مجموع الزخم الخطى لهما بعد التصادم.

تحتفل طاقة الحركة في التصادمات عن الزخم الخطى؛ إذ أنها ليست محفوظة دائمًا، مع أن النظام يكون معزولاً والزخم الخطى الكلّي له يكون محفوظًا. عدم حفظ الطاقة الحركية يعني أنّ جزءاً منها تحول إلى شكل أو أشكال أخرى من الطاقة، مثل الطاقة الحرارية أو الصوتية أو المرونية، وهذا يتحقق مبدأ حفظ الطاقة العام عندما تتحول من شكل إلى آخر. وتأسياً على حفظ الطاقة الحركية أو عدمه؛ تُصنف التصادمات إلى نوعين رئисين، هما:



الشكل (14): تصادم كرات البلياردو.

التصادم المرن Elastic Collision

في التصادم المرن **Elastic collision** يكون مجموع طاقة الحركة لأجزاء النظام قبل التصادم مساوياً مجموعاً طاقة الحركة لها بعد التصادم؛ أي أنّ طاقة الحركة للنظام محفوظة. ومن الأمثلة عليها التصادمات بين كرات البلياردو، كما في الشكل (14)، حيث نهمل فقد جزء صغير من الطاقة على شكل طاقة صوتية مثلاً. عند تصادم جسمين A و B تصادعاً مرناً، فإنني أطبق معادلتي حفظ الزخم الخطّي وحفظ الطاقة الحركية عليهما كما يأتي:

$$\sum p_i = \sum p_f$$

$$m_A v_{Ai} + m_B v_{Bi} = m_A v_{Af} + m_B v_{Bf}$$

$$\sum KE_i = \sum KE_f$$

$$\frac{1}{2} m_A v_{Ai}^2 + \frac{1}{2} m_B v_{Bi}^2 = \frac{1}{2} m_A v_{Af}^2 + \frac{1}{2} m_B v_{Bf}^2$$

يمكن استنتاج علاقة جديدة من المعادلتين السابقتين، وذلك بإعادة كتابة معادلة حفظ الزخم على الصورة :

$$m_A(v_{Ai} - v_{Af}) = m_B(v_{Bf} - v_{Bi})$$

وكتابة معادلة حفظ الطاقة الحركية على الصورة:

$$m_A(v_{Ai}^2 - v_{Af}^2) = m_B(v_{Bf}^2 - v_{Bi}^2)$$

* بإجراء بعض العمليات الرياضية البسيطة على هاتين المعادلتين، وحل المعادلتين يمكن التوصل إلى العلاقة الآتية:

$$v_{Ai} + v_{Af} = v_{Bi} + v_{Bf}$$

يمكن استخدام هذه العلاقة لحل مسائل في التصادمات المرنة في بعد واحد.

* استناداً إلى العلاقة غير مطلوب

المثال 7

كرتا بلياردو كتلة كلّ منها (0.16 kg). تحرّك الكرة (A) باتّجاه محور x بسرعة (2 m/s) نحو الكرة (B) الساكنة وتصادمان رأساً برأس تصادماً مرناً، انظر الشكل (15). أحسب سرعة الكرة (B) بعد التصادم.



$m_A = m_B = 0.16 \text{ kg}$, $v_{Ai} = 2 \text{ m/s}$, $+x$, $v_{Bi} = 0$.

المطلوب: $v_{Bf} = ?$

الحلٌ:

أطّبُق قانون حفظ الزَّخْم الْخَطِّي على نظام الكرتين.

$$\sum p_i = \sum p_f$$

$$m_A v_{Ai} + m_B v_{Bi} = m_A v_{Af} + m_B v_{Bf}$$

لأن $m_A = m_B$ ؛ فإنها تختصر من المعادلة وتصبح كما يأتي:

$$v_{\text{Ai}} + v_{\text{Bi}} = v_{\text{Af}} + v_{\text{Bf}}$$

$$2 + 0 = v_{\text{Af}} + v_{\text{Bf}}$$

هناك كميتان مجهولتان في هذه المعادلة، لذا يلزم معادلة ثانية أحصل عليها من تطبيق العلاقة:

$$v_{\text{Ai}} + v_{\text{Af}} = v_{\text{Bf}} + v_{\text{Bi}}$$

$$2 + v_{\text{Af}} = 0 + v_{\text{Bf}}$$

بحل المعادلتين (1)، (2) بالحذف:

$$v_{\text{Af}} + v_{\text{Bf}} = 2$$

$$v_{\text{Bf}} - v_{\text{Af}} = 2$$

نَتُوصِّلُ إِلَى أَنْ:

$$2v_{\text{Bf}} = 4$$

$$v_{\text{Bf}} = \frac{4}{2} = 2 \text{m/s}, v_{\text{Af}} = 0$$

أي أنَّ الكرة (A) سكنت بعد التصادُم، بينما اكتسبت الكرة (B) السرعة الابتدائية للكرة (A). وهذا يحدث إذا كان التصادُم مرناً، وكان للكرتين الكتلة نفسها.

التصادم غير المرن Inelastic Collision

في التصادم غير المرن Inelastic collision لا يكون مجموع طاقة الحركة لأجزاء النظام قبل التصادم مساوياً مجموع طاقة الحركة لها بعد التصادم؛ أي أن طاقة الحركة للنظام غير محفوظة. ومن أمثلتها اصطدام كرة مطاطية بسطح صلب (مضرب مثلًا)، حيث تفقد جزءاً من طاقتها الحركية عندما تتشوه الكرة في أثناء ملامستها للسطح، انظر الشكل (16). لكن الزخم الخطي يكون محفوظاً في كل أنواع التصادمات التي تكون فيها القوى الخارجية المؤثرة في النظام (إن وجدت) صغيرةً جدًا مقارنةً بقوى الفعل ورد الفعل المتبادلة بين الأجسام المتصادمة.



الشكل (16): يُعد تصادم كرة مطاطية
بالمضرب تصادماً غير مرن.

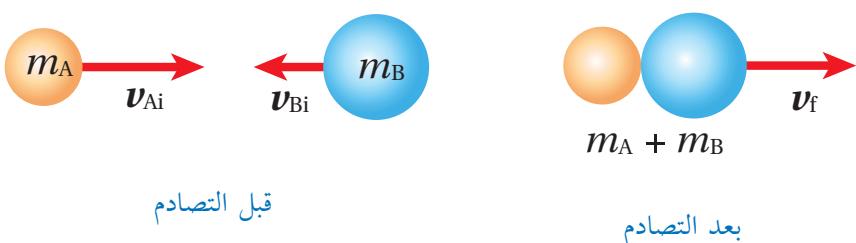
ويوصَفُ التصادُمُ غَيْرُ المَرْنِ بِأَنَّهُ تصادُمٌ عَدِيمُ المِرونة Perfectly inelastic،
عِنْدَمَا تلتَّحُمُ الأَجْسَامُ المِتَصَادِمَةُ مَعًا بَعْدَ التصادُمِ، لَتَبْصِرُ جَسْمًا
واحِدًا تَسَاوِي كَتْلَتُهُ مُجْمُوعَ كَتَلِ الْأَجْسَامِ المِتَصَادِمَةِ. وَمِثَالٌ ذَلِكَ مَا يَحْدُثُ عِنْدَ
اصطدامٍ كُرْتِيٍّ صَلْصَالٍ مَعًا، أَوْ اصطدامِ سِيَارَتَيْنِ وَتَحرُّكُهُمَا مَعًا بَعْدَ التصادُمِ.
وَأَحْسَبُ مَقْدَارَ السُّرْعَةِ النَّهَايِيَّةِ لِتصادُمٍ عَدِيمِ المِرونةِ بَيْنِ جَسَمَيْنِ، كَمَا هُوَ
مُوَضَّحٌ فِي الشَّكْلِ (17)، بِتَطْبِيقِ قَانُونِ حَفْظِ الزَّخْمِ الْخَطْيَّ علىِ النَّظَامِ الْمُكَوَّنِ
مِنْهُمَا كَمَا يَأْتِي:

$$m_A v_{Ai} + m_B v_{Bi} = (m_A + m_B) v_f$$

$$v_f = \frac{m_A v_{Ai} + m_B v_{Bi}}{m_A + m_B}$$

أتحقق: أقارن -في جدول- بين التصادم المرن، والتصادم غير المرن، والتصادم عديم المرونة في الأنظمة المعزولة، من حيث: حفظ الزخم الخطي، حفظ الطاقة الحركية، التحام الأجسام بعد التصادم.

أَفْكِرْ: عند تصادم جسمين في
بعد واحد تصادماً عديم المرونة،
ما الشرط الضروري لفقد الطاقة
الحركية الابتدائية للنظام جميعها
بعد الصدام؟



الشكل (17): تصادم عديم المرونة بين جسمين:

المثال 8

تحرك الكرة (A) باتجاه محور x بسرعة (6.0 m/s); فتصطدم رأساً برأس بكرة أخرى (B) أمامها تحرك باتجاه محور x - بسرعة (3.0 m/s). أنظر الشكل (18). بعد التصادم تحرك الكرة (B) بسرعة (2.0 m/s) باتجاه محور x . إذا علمت أن ($m_A = 5.0 \text{ kg}$, $m_B = 3.0 \text{ kg}$), فأجيب عما يأتي:



الشكل (18): تصادم كرتين في بُعد واحد.

أ. أحسب سرعة الكرة (A) بعد التصادم.

ب. أحدد نوع التصادم.

المعطيات:

$v_{Ai} = 6.0 \text{ m/s}$, $+x$, $v_{Bi} = 3.0 \text{ m/s}$, $-x$, $v_{Bf} = 2.0 \text{ m/s}$, $+x$, $m_A = 5.0 \text{ kg}$, $m_B = 3.0 \text{ kg}$.

المطلوب:

$v_{Af} = ?$

الحل:

أ. أطبق قانون حفظ الزخم الخطّي على نظام الكرتين.

$$\sum \mathbf{p}_i = \sum \mathbf{p}_f$$

$$m_A v_{Ai} + m_B v_{Bi} = m_A v_{Af} + m_B v_{Bf}$$

$$5.0 \times 6.0 - 3.0 \times 3.0 = 5.0 v_{Af} + 3.0 \times 2.0$$

$$v_{Af} = 3.0 \text{ m/s}$$

بما أن سرعة الكرة (A) بعد التصادم موجبة؛ فهذا يعني أن اتجاه سرعتها باتجاه محور $+x$.

ب. لتحديد نوع التصادم يلزم حساب التغيير في الطاقة الحركية للنظام.

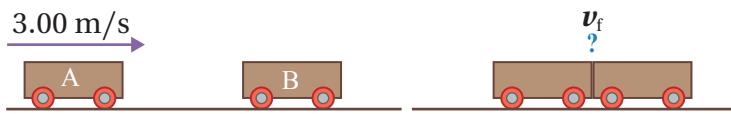
$$\Delta KE = \frac{1}{2} m_A v_{Af}^2 + \frac{1}{2} m_B v_{Bf}^2 - \left[\frac{1}{2} m_A v_{Ai}^2 + \frac{1}{2} m_B v_{Bi}^2 \right]$$

$$\Delta KE = \frac{1}{2} \times [5.0 \times (3.0)^2 + 3.0 \times (2.0)^2] - \frac{1}{2} \times [5.0 \times (6.0)^2 + 3.0 \times (3.0)^2]$$

$$\Delta KE = -75 \text{ J}$$

بما أن التغيير في الطاقة الحركية للنظام سالب، فهذا يعني حدوث نقص في الطاقة الحركية، والكرتان لم تلت>Nama بعد التصادم؛ إذن: التصادم غير مرن.

عربة قطار (A) كتلتها $1.80 \times 10^3 \text{ kg}$ تتحرّك في مسارٍ أفقيٍّ مستقيم لسكة حديد بسرعةٍ (3.00 m/s) باتجاه محور $x+$, فتصطدم بعربة أخرى (B) كتلتها $2.20 \times 10^3 \text{ kg}$ تقف على المسار نفسه، وتلتحمان معًا وتحرّكان على المسار المستقيم لسكة الحديد نفسه، كما هو موضح في الشكل (19). أجب عما يأتي:



الشكل (19): تصادم عربتي قطار.

أ. أحسب سرعة عربتي القطار بعد التصادم.

ب. ما نوع التصادم؟ وهل الطاقة الحركية محفوظة في هذا النوع من التصادمات؟ أثبّر إجابتك.

المعطيات: $m_A = 1.80 \times 10^3 \text{ kg}$, $m_B = 2.20 \times 10^3 \text{ kg}$, $v_{Ai} = 3.00 \text{ m/s}$, $v_{Bi} = 0$.

المطلوب: $v_f = ?$

الحل:

أ. أطبق قانون حفظ الزخم الخطّي على العربتين قبل التصادم مباشرةً وبعد التصادم مباشرةً.

$$\sum p_i = \sum p_f$$

$$m_A v_{Ai} + m_B v_{Bi} = (m_A + m_B) v_f$$

$$1.80 \times 10^3 \times 3.00 + 2.20 \times 10^3 \times 0 = (1.80 \times 10^3 + 2.20 \times 10^3) v_f$$

$$v_f = 1.35 \text{ m/s}$$

$$v_f = 1.35 \text{ m/s}, +x$$

ب. بما أن عربتي القطار التلحمتا معًا بعد التصادم فهو تصادم عديم المرونة. وأتأكد من ذلك عن طريق مقارنة الطاقة الحركية لنظام العربتين قبل التصادم بالطاقة الحركية للنظام بعد التصادم.

$$\begin{aligned} KE_i &= \frac{1}{2} m_A v_{Ai}^2 + \frac{1}{2} m_B v_{Bi}^2 = \frac{1}{2} \times 1.80 \times 10^3 \times (3.00)^2 + \frac{1}{2} \times 2.20 \times 10^3 \times 0 \\ &= 8.10 \times 10^3 \text{ J} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} KE_f &= \frac{1}{2} (m_A + m_B) v_f^2 = \frac{1}{2} (1.80 \times 10^3 + 2.20 \times 10^3) \times (1.35)^2 \\ &= 3.65 \times 10^3 \text{ J} \end{aligned}$$

$$\Delta KE = 3.65 \times 10^3 - 8.10 \times 10^3$$

$$= -4.45 \times 10^3 \text{ J}$$

التغيير في الطاقة الحركية سالب؛ أي يوجد نقص في الطاقة الحركية، والعربتان التلحمتا معًا بعد التصادم، لذا؛ فإن التصادم عديم المرونة.

استخدم الأرقام: تتحرك عربة قطار (A) في مسار أفقى مستقيم بسرعة (2.00 m/s) شرقاً فتصطدم بعربة (B) تتحرك على المسار نفسه بسرعة (1.00 m/s،) غرباً، وتلتحمان معاً. إذا علمت أن ($m_A = m_B = 5000 \text{ kg}$) أحسب الطاقة الحركية المفقودة في التصادم.

تطبيق: البندول القذفى

البندول القذفى Ballistic pendulum يستخدم لقياس مقدار سرعة مقدوفٍ، مثل الرصاصة. إذ تطلق رصاصة كتلتها (m_A) باتجاه قالب كبير ساكن من الخشب كتلته (m_B)، معلق رأسياً بخيطين خفيفين. فتخترق الرصاصة قطعة الخشب وتستقر داخلاًها، ويتحرك النظام المكون منهما كجسم واحد، ويرتفع إلى أقصى مسافةً رأسيةً (h). انظر الشكل (20). ويمكن حساب مقدار سرعة الرصاصة قبل اصطدامها بقطعة الخشب بمعرفة مقدار (h).

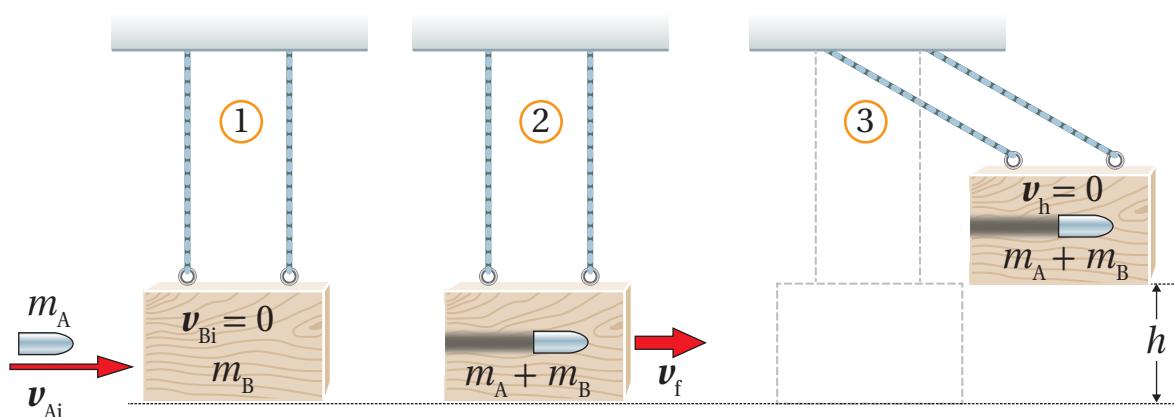
سوف نستخدم الرقم (1) ليمثل النظام قبل التصادم مباشرةً، والرقم (2) ليمثل النظام بعد التصادم مباشرةً عندما تتحرك قطعة الخشب والرصاصة بالسرعة نفسها، أما الرقم (3) فيمثل النظام عند أقصى ارتفاع (h). وألاحظ من الشكل (20) أن اتجاه حركة النظام المكون من قطعة الخشب والرصاصة بعد التصادم مباشرةً يكون باتجاه حركة الرصاصة نفسه قبل التصادم؛ أي باتجاه محور (x) أطبق قانون حفظ الزخم الخطى على النظام قبل التصادم مباشرةً وبعد التصادم مباشرةً كما يأتي:

$$m_A v_{Ai} + 0 = (m_A + m_B)v_f$$

وبإعادة ترتيب المعادلة، فإن السرعة الابتدائية للرصاصة تعطى بالعلاقة:

$$v_{Ai} = \frac{(m_A + m_B)v_f}{m_A} \quad \dots \dots \dots (1)$$

الشكل (20): تحرّك البندول القذفى جانبياً بعد اختراف الرصاصة له.



لا توجد قوى غير محافظة تبذل شغلاً على النظام في أثناء حركته بعد التصادم مباشرةً خلال المرحلة من الوضع (2) إلى أقصى ارتفاع (h) في الوضع (3)؛ لذا تكون الطاقة الميكانيكية للنظام محفوظة، وبافتراض أن قطعة الخشب كانت في مستوى الإسناد في الوضع (2)؛ فإن طاقة الوضع الناشئة عن الجاذبية الأرضية لها تساوي صفرًا ($PE_2 = 0$). كما أن طاقة الحركة للنظام عند أقصى ارتفاع تساوي صفرًا؛ أي أن ($KE_3 = 0$).

$$ME_2 = ME_3$$

$$KE_2 + PE_2 = KE_3 + PE_3$$

$$\frac{1}{2} (m_A + m_B)v_f^2 + 0 = 0 + (m_A + m_B)g h \\ v_f^2 = 2g h \rightarrow v_f = \sqrt{2g h}$$

بمعرفة سرعة الجسمين بعد الالتحام مباشرةً (v_f)؛ يمكن الرجوع إلى المعادلة (1)، لحساب سرعة الرصاصة قبل التصادم مباشرةً (v_{Ai}).

المثال 10

أطلق سعد سهماً كتلته (0.03 kg) أفقياً باتجاه بندول قذفيًّا كتلته (0.72 kg)؛ فاصطدم به والتحما معًا، بحيث كان أقصى ارتفاع وصل إليه البندول فوق المستوى الابتدائي له (20 cm). بافتراض تسارع السقوط الحر (10 m/s²)، وإهمال القوى الخارجية، أجيِّب عمّا يأتي:

- أ. أي مراحل حركة النظام المكوّن من البندول والسهم يكون فيها الزخم الخطّي محفوظًا؟
- ب. أي مراحل حركة النظام تكون فيها الطاقة الميكانيكية محفوظة؟
- ج. أحسِّب مقدار السرعة الابتدائية للسهم.

المعطيات: أفترض رمز كتلة البندول القذفي A ورمز السهم B.

$$m_A = 0.72 \text{ kg}, m_B = 0.03 \text{ kg}, h = 20 \text{ cm} = 0.20 \text{ m}, g = 10 \text{ m/s}^2.$$

المطلوب: $v_{Bi} = ?$

الحلّ:

- أ. يكون الزخم الخطّي محفوظًا في التصادم عديم المرونة بين السهم والبندول.
- ب. تكون الطاقة الميكانيكية محفوظة للسهم قبل التصادم. كما تكون الطاقة الميكانيكية محفوظة للبندول والسهم بدءًا من حركتهما معًا بعد التصادم مباشرةً من الوضع (2)، وحتى وصولهما إلى أقصى ارتفاع في الموضع (3).

ج. أحسب مقدار السرعة النهائية للنظام (بعد التصادم مباشر) بتطبيق قانون حفظ الطاقة الميكانيكية عند انتقال النظام من الموضع (2) إلى الموضع (3):

$$KE_2 + PE_2 = KE_3 + PE_3$$

$$\frac{1}{2} (m_A + m_B)v_f^2 + 0 = 0 + (m_A + m_B)g h$$

$$v_f = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 10 \times 0.2} = 2 \text{ m/s}$$

أحسب مقدار السرعة الابتدائية للسهم بتطبيق قانون حفظ الزخم الخطّي للنظام قبل التصادم وبعده مباشرةً، كما يأتي:

$$m_A v_{Ai} + 0 = (m_A + m_B)v_f$$

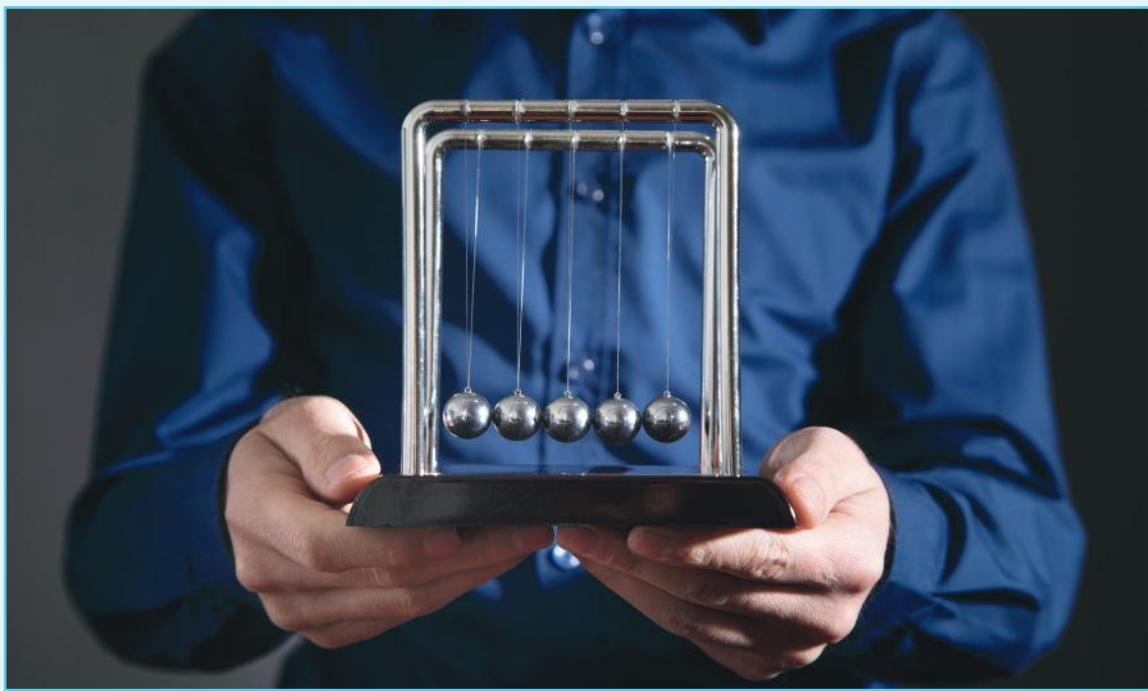
$$v_{Ai} = \frac{(m_A + m_B)v_f}{m_A} = \frac{(0.72 + 0.03) \times 2}{0.03} = 50 \text{ m/s}$$

لتمرين

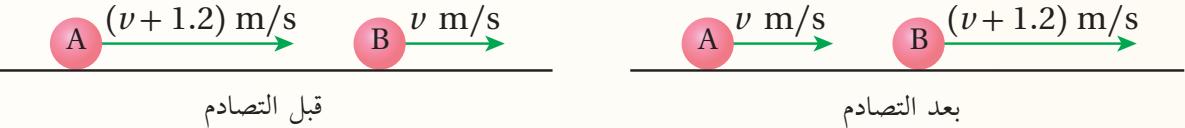
1. **استخدم الأرقام:** أطلق محقق رصاصةً كتلتها (0.030 kg) أفقياً باتجاه بندول قذفي كتلته (0.97 kg)، فاصطدمت به والتحما معاً، فكان أقصى ارتفاع وصل إليه البندول فوق المستوى الابتدائي له (45 cm). أحسب مقدار السرعة الابتدائية للرصاصة.

2. تظهر في الشكل أدناه لعبة شهيرة تسمى كرات نيوتن (Newton's cardle)؛ تكون من كرات عدّة فلزية متماثلة متراصة معلقة بخيوط خفيفة. عند سحب إحدى الكراتين الخارجيتين نحو الخارج ثم إفلاتها، فإنّها تصطدم تصادماً مرئياً بالكرة التي كانت مجاورة لها، ألّا حظ أنّ الكرة الخارجية على الجانب الآخر من اللعبة تقفز في الهواء.
أ. **أُنسر** ما حدث.

ب. **أتوقع:** ماذا سيحدث إذا سحبت كرتين من الجانب الأيسر جانبياً ثم أفلتهما معاً؟

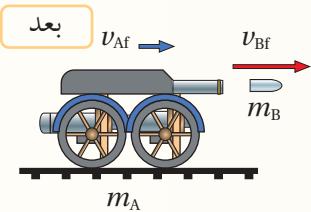
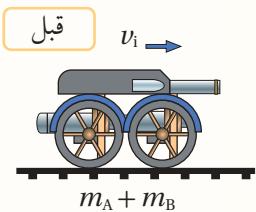


مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسية:** ما نوع التصادم بحسب حفظ الطاقة الحركية؟ وما الفرق بينهما؟
2. **أفسر:** عندما تتصادم سيارتين فإنهما عادةً لا تلتحمان معًا؛ فهل يعني ذلك أنّ تصادمهما مرن؟ أوضح إجابتي.
3. **استنتج:** تصادم جسمان تصادمًا مرنًا. أجب عنّي ما يأتي:
- هل يتساوى الزخم الخطّي لـ كل جسم قبل التصادم مع زخميه الخطّي بعد التصادم؟ أفسر إجابتي.
 - هل تتساوى الطاقة الحركية لـ كل جسم قبل التصادم مع طاقته الحركية بعد التصادم؟ أفسر إجابتي.
4. **استخدم الأرقام:** كرّة صلصالٍ كتلتها (2 kg) تتحرّك شرقًا بسرعةٍ ثابتة، وتصطدم بكرة صلصالٍ آخرى ساكنة، فلتتحمّن معًا وتتحرّكان شرقًا بسرعة مقدارها ربع مقدار السرعة الابتدائية للكرة الأولى. أحسب كتلة الكرة الثانية.
5. **استنتاج:** كرتا بلياردو (A و B) لهما الكتلة نفسها وتتحرّكان في الاتجاه نفسه في خط مستقيم، كما هو موضّع في الشكل. بالاستعانة بالبيانات المثبتة في الشكل، أبين إذا كان التصادم مرنًا أم غير مرن.
- 
6. **أصدر حكمًا:** تتحرّك شاحنة غربًا بسرعةٍ ثابتة؛ فتصطدم تصادمًا عديم المرونة مع سيارةٍ صغيرةٍ تتحرّك شرقًا بقدر سرعة الشاحنة نفسه. أجب عنّي ما يأتي:
- إيهما يكون التغيير في مقدار زخمها الخطّي أكبر؛ الشاحنة أم السيارة؟
 - إيهما يكون التغيير في طاقتها الحركية أكبر؛ الشاحنة أم السيارة؟
7. **استنتاج:** وضعت إسلام نابضاً خفيفاً مضغوطاً بين صندوقين كتلتيهما m_1 و m_2 موضوعين على سطح أفقى أملس، كما هو مبيّن في الشكل A. لحظة إفلات إسلام الصندوقين، تحرّكتا باتجاهين متعاكسيْن كما في الشكل B. إذا علمت أن $m_2 = 2m_1$ ، فأجد ما يأتي:
- نسبة مقدار سرعة الصندوق الأول إلى مقدار سرعة الصندوق الثاني لحظة ابتعاد كلّ منهما عن النابض.
 - نسبة طاقة الحركة للصندوق الأول إلى طاقة الحركة للصندوق الثاني.

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

1. عربة مدفعة كتلتها والقذيفة بداخلها (500 kg) تتحرك على سكة حديد أفقية، كما في الشكل. أطلقت العربة قذيفةً كتلتها (200 kg) بسرعة (200 m/s) شرقاً، فأصبحت سرعة العربة بعد الإطلاق (5 m/s) شرقاً.



إذا علمت أن نظام العربة والقذيفة معزول؛
فإن مقدار سرعة النظام قبل الإطلاق مباشرةً
بوحدة (m/s) :

د. (13)

ج. (12.8)

ب. (8.5)

أ. (3.2)

2. كرتان من المعجون؛ الأولى كتلتها (2 kg) تتحرك بسرعة (5 m/s) باتجاه الشرق، فتصطدم بالكرة الثانية وكتلتها (3 kg) تتحرك بسرعة (4 m/s) باتجاه الغرب. بعد التصادم التحمت الكرتان معاً، إن سرعتهما

بوحدة (m/s) :

د. (4.4) شرقاً.

ج. (4.4) غرباً.

ب. (0.4) شرقاً.

أ. (0.4) غرباً.

- * كررة (A) كتلتها (0.8 kg) تتحرك بسرعة (5 m/s) شرقاً؛ اصطدمت بكرة ساكنة (B) كتلتها (2.4 kg) تصادماً مرنّاً. فأجيب عن الفقرتين الآتيتين:

3. سرعة الكررة (B) بعد التصادم مباشرةً بوحدة (m/s) :

د. (7.5) غرباً.

ج. (7.5) شرقاً.

ب. (2.5) شرقاً.

أ. (2.5) شرقاً.

4. طاقة حركة الكررة (B) بعد التصادم مباشرةً بوحدة جول (J) تساوي:

د. (10).

ج. (5).

ب. (7.5).

أ. (2.5).

- * عربة (A) كتلتها (m) تنزلق على مسار أفقى مستقيم أملس بسرعة (v) باتجاه ($-x$)، اصطدمت بعربة أخرى (B) كتلتها (2m) تنزلق على المسار نفسه بسرعة (v) باتجاه ($+x$). إذا علمت أن العربتين التحمتا معاً بعد التصادم وتحركتا على المسار نفسه؛ أجيّب عن الفقرتين الآتيتين:

5. سرعة الجسم الناتج عن التحام العربتين بعد التصادم بدلالة (v) تساوي:

ب. ($\frac{1}{3}v$) باتجاه ($-x$).

أ. ($\frac{1}{3}v$) باتجاه ($+x$).

د. (v) باتجاه ($-x$).

ج. (v) باتجاه ($+x$).

6. الطاقة الحركية للنظام المكون من العربتين قبل التصادم بدلالة كل من (m) و (v) تساوي:
د. ($\frac{3}{2}mv^2$). ج. (mv^2). ب. ($\frac{2}{3}mv^2$). أ. ($\frac{1}{2}mv^2$).

تصميم السيارة والسلامة Car Design and Safety



تصادم رأس برأس في اختبار تصادم.

عند توقف سيارة بشكل مفاجئ نتيجةً لحدوث تصادم، فإن قوىً كبيرةً تؤثر في السيارة وركابها، وتُبَدِّد طاقاتهم الحركية.

يوجد في مقدمة السيارة ونهايتها مناطق انهيارات (ماصّات صدمات) Crumple zones؛ تبعيغ وتشوه بطريقةٍ يحدث فيها امتصاص الطاقة الحركية للسيارة وركابها تدريجياً، كما هو موضح في الصورة. حيث يتَشَوَّه هيكل السيارة المرن المصنوع من صفائح لينة، ما يؤدي إلى تناقص سرعتها تدريجياً وامتصاص جزءٍ كبيرٍ من الطاقة الحركية للسيارة والركاب، وهذا بدوره يزيد زمن التصادم، ويقلل مقدار القوة المؤثرة في السيارة والركاب، ما يقلل احتمالية تعرضهم لإصاباتٍ خطيرة.

أمّا أحزمة الأمان Seat belts؛ فتؤثّر في الركاب بقوّةٍ بعكس اتجاه حركة السيارة، خلال مسافة مقدارها (0.5 m)، وهي تقريباً المسافة بين راكب المقعد الأمامي والراكب الأمامي. ففي أثناء الاصطدام، يُثبَّت حزام الأمان للراكب في المقعد ويزيد زمان تغيير سرعته، وبما أن مقدار التغيير في الرخْم الخطي للراكب ثابت (فهو يعتمد على كتلة الراكب وسرعة السيارة سواءً استخدم حزام الأمان أم لم يستخدمه)؛ فإن مقدار القوة المؤثرة فيه يصبح أقلّ نتيجةً زيادة زمان توقف جسم الراكب. وفي حال عدم استخدام حزام الأمان سيرتطم الراكب بعجلة القيادة أو زجاج السيارة الأمامي، ويتوقف خلال مدة زمانية قصيرة مقارنةً بزمان التوقف عندما يستخدم حزام الأمان، ما يعني تأثير قوّة كبيرة في جسمه لإيقافه عندما لا يستخدم الحزام.

تنتفخ الوسائل الهوائية Air bags في بعض السيارات عند حدوث تصادم؛ وتحمي السائق والركاب من الإصابات الخطيرة، فهي مثلاً؛ تحمي السائق من الاصطدام بعجلة القيادة، وتزيد زمان تغيير سرعته، فيقلل مقدار القوة المؤثرة فيه، وتوزع القوّة المؤثرة فيه على مساحة أكبر من جسمه.

أمّا مساند الرأس Head restraints؛ فتضمن حركة رأس الراكب والساقي إلى الأمام مع الجسم، عند صدم السيارة من الخلف. وهذا يمنع كسر الجزء العلوي من العمود الفقري أو تلفه. وتقلل احتمالية التعرض لإصابات خطيرة عند وقوع حادثٍ بمقدارٍ كبيرٍ إذا استعملت أحزمة الأمان وثبتت مساند الرأس.

تساعد وسائل الأمان الثانية هذه جميعها على الحماية من الإصابات الخطيرة عند وقوع الحوادث. أما عوامل السلامة الأساسية فهي التي تسهم في منع وقوع الحوادث وتعتمد على: ثبات السيارة على الطريق، وكفاءة المكابح، وفاعلية أنظمة القيادة والتوجيه، ومقدرة السائق على التعامل مع المتغيرات التي تحدث في أثناء القيادة، إضافةً إلى انتباه السائق.

مراجعة الوحدة

1. أضف دائرةً حول رمز الإجابة الصحيحة لكل جملة مما يأتي:

1. كلّما زاد زمن تأثير قوة (F) في جسم كتلته (m):
 أ. زاد الدفع المؤثّر فيه، وزاد التغيير في زخمه الخطّي.
 ب. زاد الدفع المؤثّر فيه، ونقص التغيير في زخمه الخطّي.
 ج. نقص الدفع المؤثّر فيه، وزاد التغيير في زخمه الخطّي.
 د. نقص الدفع المؤثّر فيه، والتغيير في زخمه الخطّي.



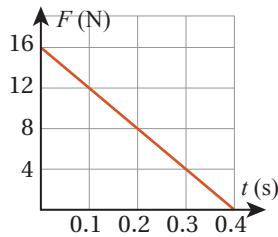
2. توفر الوسادة الهوائية الحماية للراكب عند حدوث التصادم، حيث تعمل على تقليل مقدار القوة التي تؤثر فيه؛ وذلك عن طريق:

- أ. إنقاص معدل تغير الزخم الخطّي. ب. إنقاصل التغيير في الزخم الخطّي.
 ج. زيادة معدل تغير الزخم الخطّي. د. زيادة التغيير في الزخم الخطّي.

3. تحرّك سيارة شماليًا بسرعة ثابتة؛ بحيث كان زخمها الخطّي يساوي $(9 \times 10^4 \text{ N.s})$. إذا تحركت السيارة جنوبًا بمقدار السرعة نفسه فإن زخمها الخطّي يساوي:

- أ. $9 \times 10^4 \text{ N.s}$ ب. $18 \times 10^4 \text{ N.s}$ ج. 0 N.s

4. جسم يلامس نابضًا مضغوطًا، عند إفلات الجسم تأثر بقوة متغيرة، كما هو ممثل بالرسم البياني المجاور. اعتمادًا على بيانات الشكل؛ فإن الدفع والقوة المتوسطة المؤثّران في الجسم (على الترتيب)، هما:



- أ. الدفع (0.4 N.s)، والقوة المتوسطة (4 N).
 ب. الدفع (3.2 N.s)، والقوة المتوسطة (8 N).
 ج. الدفع (4.6 N.s)، والقوة المتوسطة (4 N).
 د. الدفع (12.8 N.s)، والقوة المتوسطة (8 N).

5. صندوقان (A و B) يستقران على سطح أفقىًّا أملسٌ. أثّرت في كل منهما القوة المُمحصلة نفسها باتجاه محور $x +$ للفترة الزمنية (Δt) نفسها. إذا علمت أن كتلة الصندوق (A) أكبر من كتلة الصندوق (B)؛ فأيُّ العلاقات الآتية صحيحة في نهاية الفترة الزمنية؟

- أ. $p_A = p_B, KE_A > KE_B$. ب. $p_A < p_B, KE_A < KE_B$.
 ج. $p_A > p_B, KE_A > KE_B$. د. $p_A = p_B, KE_A < KE_B$.

6. رُميَت كُرة كتلتها m أفقىًّا بسرعة مقدارها v نحو جدار؛ فارتدى أفقىًّا بمقدار السرعة نفسه. بإهمال تأثير الجاذبية فإن مقدار التغيير في زخم الخطّي للكرة يساوي:

- أ. mv . ب. $\frac{1}{2}mv$. ج. $2mv$. د. صفرًا.

7. تحرّك قذيفة كتلتها (5 kg) بسرعة أفقية (200 m/s) شرقًا، إذا ان splitterت إلى جزأين؛ أحدهما كتلته (3 kg) واصل حركته بالاتجاه نفسه وبسرعة (100 m/s). فإن سرعة الجزء الثاني بوحدة (m/s) تساوي:

- أ. (350) شرقًا. ب. (375) غربًا. ج. (375) شرقًا. د. (375) غربًا.

مراجعة الوحدة

* أُسقطت كرة كتلتها (0.2 kg) نحو الأسفل فاصطدمت بسطح الأرض بسرعة (4 m/s)، وارتدى إلى الأعلى بسرعة (3 m/s)، معتمداً على هذه البيانات؛ أجب عن الفقرتين الآتتين:

8. إن الدفع الذي تأثرت به الكرة خلال فترة تلامسها مع الأرض بوحدة (N.s) يساوي:

- أ. (0.2) إلى الأسفل. ب. (0.2) إلى الأعلى. ج. (1.4) إلى الأسفل. د. (1.4) إلى الأعلى.

9. إن التغير في الطاقة الحركية للكرة بوحدة جول (J) يساوي:

- د. (-1.6) ج. (1.6) ب. (0.7) أ. (-0.7)

10. كرة (A) تتحرك بسرعة (2 m/s) غرباً؛ فتصطدم بكرة أخرى ساقية (B) مماثلة لها تصادماً مرتّباً في بعده واحد. إذا توقفت الكرة (A) بعد التصادم، فإن سرعة الكرة (B) بعد التصادم تساوي:

- أ. 2 m/s شرقاً. ب. 1 m/s غرباً. ج. 1 m/s شرقاً. د. 1 m/s غرباً.

11. يركض عمر بسرعة (4.0 m/s) شرقاً، ويقفز في عربة كتلتها (90.0 kg) تتحرك بسرعة (1.5 m/s) شرقاً. إذا علمت أن كتلة عمر (60.0 kg)؛ فما سرعة عمر والعربة معاً؟

- أ. 2.0 m/s شرقاً. ب. 5.5 m/s غرباً. ج. 4.2 m/s غرباً. د. 2.5 m/s شرقاً.

12. تقفز شذى من قارب ساكن على سطح الماء كتلته (300 kg) إلى الشاطئ بسرعةٍ أفقيةٍ مقدارها (3 m/s). إذا علمت أن كتلة شذى (50 kg) فما سرعة القارب؟

- ب. 3 m/s بعيداً عن الشاطئ. ج. 0.5 m/s نحو الشاطئ. د. 18 m/s نحو الشاطئ.

* تتحرك سيارة صغيرة كتلتها (1×10^3 kg) على طريق أفقية بسرعة (10 m/s) باتجاه الشرق، اصطدمت بشاحنة كتلتها (4×10^3 kg) تتحرك على الطريق نفسها، فالتحملا معاً وتحركتا بسرعة (2 m/s) باتجاه الغرب. معتمداً على هذه البيانات؛ أجب عن الفقرات الثلاث الآتية:

13. ما سرعة الشاحنة قبل التصادم مباشرةً؟
أ. (5 m/s) شرقاً. ب. (4 m/s) شرقاً. ج. (5 m/s) غرباً. د. (4 m/s) غرباً.

14. ما الزخم الخطّي الكلي للنظام المكوّن من الشاحنة والسيارة قبل التصادم؟
أ. (-10×10^3 kg.m/s). ب. (10×10^3 kg.m/s). ج. (-30×10^4 kg.m/s). د. (30×10^4 kg.m/s).

15. ما التغير في الطاقة الحركية للنظام نتيجة التصادم؟
أ. (90×10^3 J). ب. (-90×10^3 J). ج. (40×10^3 J). د. (-40×10^3 J).

2. أُفسِر ما يأتي:

أ. تقف نرجس على زلاجة ساقية موضوعة على أرضية غرفة ملساء وهي تحمل حقيقتها. وعندما قذفت حقيقتها إلى الأمام تحركت هي والزلافة معاً إلى الخلف.

ب. تُغطى أرضية ساحات الألعاب عادةً بالعشب أو الرمل، حيث يكمن خطر سقوط الأطفال.

مراجعة الوحدة

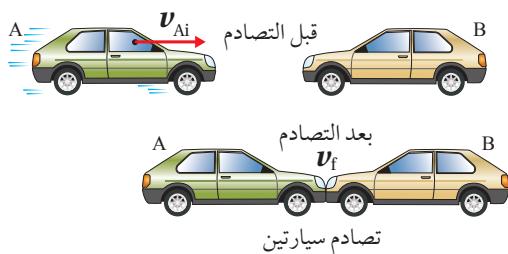
3. يقف صيّاد على سطح قاربٍ صيدٍ ساكن على سطح الماء، ثم يتحرك من نهاية القارب نحو مقدمته. أجب عن أيٍ من الآتي:
- أ. أفسر:** هل يتحرك القارب أم لا؟ أفسر إجابتك.
 - ب. أقارن:** بين مجموع الزخم الخطّي للقارب والصيّاد قبل بدء حركة الصيّاد وبعد حركته.

4. **أقارن:** جسمان (A و B) لهما الطاقة الحركية نفسها، هل يكون لهما مقدار الزخم الخطّي نفسه؟ أفسر إجابتك.

5. **أصدر حكماً:** في أثناء دراسة غيّث لهذا الدرس، قال: «إنَّ وسائل الحماية في السيارات قدِيمًا أفضَل منها في السيارات الحالية؛ إذ إنَّ هياكل السيارات الحديثة مرنَّة تتشوّه بسهولة عند تعرُّض السيارة لحادث، على عكس هياكل السيارات القديمة الصلبة». أناقش صحة قولِ غيّث.

6. **استخدم الأرقام:** تتحرّك سيارة كتلتها $(1.35 \times 10^3 \text{ kg})$ بسرعة (15 m/s) شرقًا، فتصطدم بجدارٍ وتتوقف تمامًا خلال فترة زمنية (0.115 s) ، فأحسب ما يأتي:

- التغيير في الزخم الخطّي للسيارة.
- القوة المتوسطة التي يؤثُر بها الجدار في السيارة.

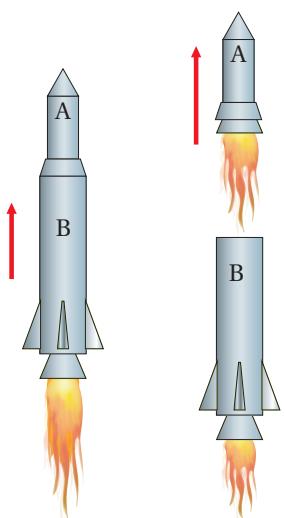


7. **استخدم الأرقام:** السيارة (A) كتلتها $(1.1 \times 10^3 \text{ kg})$ تتحرّك بسرعة (6.4 m/s) باتجاه محور $x +$ ، فتصطدم رأسًا برأس سيارة ساكنة (B) كتلتها $(1.2 \times 10^3 \text{ kg})$ ؛ وتلتجم السيارات معاً بعد التصادم وتتحرّكان على المسار المستقيم نفسه قبل التصادم، كما هو موضح في الشكل المجاور. أحسب ما يأتي:

- سرعة السيارات بعد التصادم.
- الدفع الذي تؤثُر به السيارة (B) في السيارة (A).

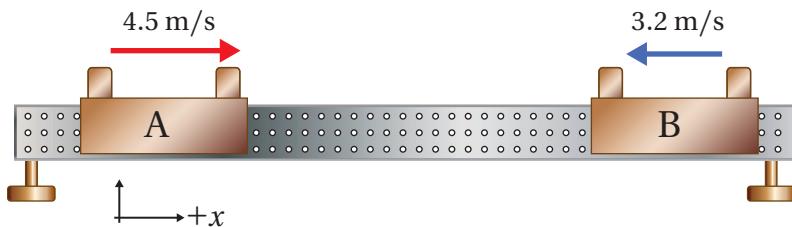
8. **استخدم الأرقام:** أثَرت قوَّة مُحصلة مقدارها $(N = 10^3)$ في جسم ساكن كتلته (10 kg) وحرَّكته باتجاهها مدة زمنية (0.01 s) . أحسب مقدار ما يأتي:

- التغيير في الزخم الخطّي للجسم.
- السرعة النهائية للجسم.



9. **استخدم الأرقام:** صاروخ فضائي كتلته (3600 kg) ، في المرحلة الأولى من حركته انطلق إلى الأعلى بسرعة (4900 km/s) ، ثم بدأت المرحلة الثانية لحركته بانفجار صغير فصل الصاروخ إلى جزأين (A، B)؛ العلوي (A) كتلته (1200 kg) ، واصل حركته إلى الأعلى بسرعة (5700 km/s) . بافتراض أنَّ النظام معزول؛ أجد ما يأتي:

- سرعة الجزء السفلي (B) من الصاروخ بعد الانفصال مباشرةً.
- التغيير في الطاقة الحركية للنظام، مفسرًا مصدر هذا التغيير.



10. أستنتاج: عربتان (A و B)، تزلقان باتجاهين متعاكسين على مسار أفقي مستقيم أملس كما هو موضح في الشكل، فتصطدمان رأساً برأس وترتدان باتجاهين متعاكسين على المسار المستقيم نفسه. إذا علمت أن كتلة العربة A تساوي (0.28 kg)، وسرعة العربتين بعد التصادم مباشرةً: ($v_{Bf} = 3.7 \text{ m/s}$) و ($v_{Af} = -1.9 \text{ m/s}$)، فأجيب عمّا يأتي:
أ. أحسب كتلة العربة (B).

ب. أستخدم القانون الثالث لنيوتن في الحركة لتوضيح سبب أن يكون الزخم الخطّي محفوظاً في هذا التصادم.

ج. أوضح هل التصادم منْ أم غير منْ؟

11. أستخدم الأرقام: أطلقت مريم سهمًا كتلته (0.20 kg) أفقياً بسرعة (15 m/s) باتجاه الغرب نحو هدف ساكن كتلته (5.8 kg)، فاصطدم به واستقرّ فيه وتحرّك كجسم واحد نحو الغرب. أحسب ما يأتي:
أ. سرعة النظام (السهم والهدف) بعد التصادم.

ب. التغيير في الطاقة الحرّية للنظام.

12. أستخدم الأرقام: تحرّك كرة زجاجية كتلتها (1.0 kg) باتجاه الغرب بسرعة (0.5 m/s)، فتصطدم رأساً برأس بكرة زجاجية أخرى كتلتها (2.0 kg) تتحرّك بسرعة (0.4 m/s) شرقاً. بعد التصادم ارتدت الكرة الأولى شرقاً بسرعة (0.7 m/s).
أجيّب عمّا يأتي:

أ. أحسب سرعة الكرة الثانية بعد التصادم.

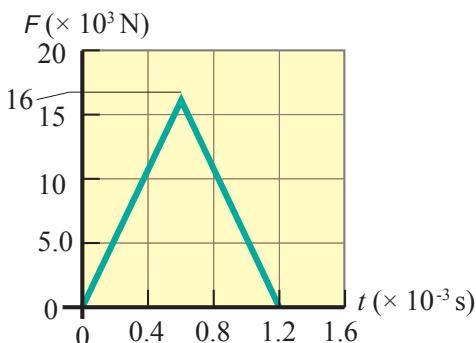
ب. أحدد نوع التصادم.

13. أستنتاج: يوضح الشكل المجاور منحنى (القوّة - الزمن) للقوة المُحصّلة المؤثرة في كرة يبسّبول كتلتها (145 g) في أثناء زمن تلامسها مع المضرب. مستعيناً بالمنحنى أحسب ما يأتي، بإهمال وزن الكرة:

أ. الدفع المؤثّر في الكرة نتیجة تلامسها مع المضرب.

ب. السرعة النهائية للكرة في نهاية الفترة الزمنية لتأثير القوّة المُحصّلة فيها، باعتبارها ساكنة لحظة بدء تأثير القوّة المُحصّلة.

ج. القوّة المتوسطة المؤثّرة في الكرة أثناء زمن تلامسها مع المضرب.



الوحدة

الحركة الدورانية

Rotational Motion

2

أتأمل الصورة

مدينة الألعاب

تظهر في الصورة ألعاب تتحرّك حركةً دورانيةً في مدينة الألعاب، وتعمل الألعاب الدوّارة على مُسارعة راكبيها بطرائق عدّة، بحيث تتحقق لهم الإثارة.

هل تنطبق قوانين نيوتن على الحركة الدورانية؟ وما الكميات الفيزيائية التي أحتاجها لوصف حركة جسمٍ يتحرّك حركةً دورانيةً؟

الفكرة العامة:

تتحرّك الكثير من الأجسام التي نشاهدها حرّكةً دورانيةً، ومنها الأبواب وإطارات السيارات وشفرات المراوح. وتوصّفُ الحرّكة الدورانية باستخدام مفاهيمٍ خاصةً؛ مثل العزم، والسرعة الزاويّة، والتسارع الزاويّ، والزخم الزاويّ.

الدرس الأول: العزم والاتزان السكوني

Torque and Static Equilibrium

الفكرة الرئيسة: من أجل دراسة الاتزان السكوني للأجسام تلزم معرفة بعض المفاهيم الفيزيائية مثل: العزم ومركز الكتلة، وكيفية حساب كلّ منها.

الدرس الثاني: ديناميكا الحرّكة الدورانية

Dynamics of Rotational Motion

الفكرة الرئيسة: توصّفُ الحرّكة الدورانية باستخدام مفاهيمٍ خاصةٍ منها: الإزاحة الزاويّة، والسرعة الزاويّة، والتسارع الزاويّ، والعلاقات بينها.

الدرس الثالث: الزخم الزاوي

Angular Momentum

الفكرة الرئيسة: للزخم الخطّي نظيرٌ في الحرّكة الدورانية يُسمى الزخم الزاويّ، ويكون الزخم الزاويّ محفوظاً في الأنظمة المعزولة؛ حيث العزم المحصل المؤثّر في الجسم يساوي صفرًا.



تجربة استهلاكية

الإتزان السكوني ومركز الكتلة



المواد والأدوات: مسطرة مترية، ثقلان كتلتها (150 g) و (250 g)، خطافان لتعليق الكتل، ميزان إلكتروني، حامل فلزي (نقطة ارتكاز).

إرشادات السلامة: الحذر من سقوط الأنقال على القدمين.

خطوات العمل:

1 **أقيس** كتلة المسطرة، مستخدماً الميزان.

2 أثبتت المسطرة على الحامل الفلزي ، وأحرّكها يميناً ويساراً، إلى أن تتنزن بوضع أفقي، وأضع إشارة على المسطرة عند موقع الإتزان؛ من المفترض أن تتنزن المسطرة عند متصifتها (عند التدرج 50 cm)، تسمى هذه النقطة مركز كتلة المسطرة.

3 أغلق ثقلاً كتلته (150 g) عند التدرج (20 cm)، وألاحظ اتجاه ميلان المسطرة. أحرّك نقطة الارتكاز إلى أن تستعيد المسطرة وضع الإتزان، أضع إشارة عند هذه النقطة وأرمز لها بالرمز (O).

4 أغلق ثقلاً إضافياً كتلته (250 g) عند التدرج (70 cm)، وأكرر الخطوة السابقة؛ لإيجاد موقع نقطة الارتكاز (O) الذي يحقق الإتزان للمسطرة.

التحليل والاستنتاج

1. **استنتج:** في الخطوة (2)، تؤثر في المسطرة قوتان هما وزن المسطرة (F_g)، والقوة العمودية التي تؤثر بها نقطة الارتكاز (F_N)، أرسم المخطط الحر للمسطرة لتوضيح هاتين القوتين؛ مقداراً واتجاهًا.

2. أرسم المخطط الحر موضحاً الآتي: موقع نقطة الارتكاز، القوى المؤثرة في المسطرة، بعد كل قوة عن نقطة الارتكاز، وذلك للخطوتين (3) و (4).

3. **أصدر حكمًا:** معتمداً على المخططات التي رسمتها، ماذا استنتج عن موقع نقطة الارتكاز التي تحقق الإتزان للنظام؟

العزم Torque

نشاهد في حياتنا اليومية أجساماً تدور حول محور ثابت تحت تأثير قوة أو أكثر، مثل الأبواب، والبراغي، والمفكّات، وغيرها، وهذا النوع من الحركة يُسمى الحركة الدورانية. فمثلاً؛ يدور الباب المُبَيِّن في الشكل (1) عند التأثير بقوة في المقابض المُثبتَ عند طرفه، ومحور الدوران في هذه الحالة هو خطٌّ وهما رأسٌ يمُرُّ عبر مُفضّلات الباب المُثبتة عند الطرف المقابل للمقبض.

يُعدُّ العزم **Torque** مقياساً لمقدمة القوة على إحداث دوران لجسم، وهو كمية مُتجهة، رمزه (τ)، ويُعرف رياضياً بأنه يُساوي ناتج الضرب المُتجهي لمُتجه القوة (F) ومُتجه موقع نقطة تأثير القوة (r) الذي يبدأ من نقطة على محور الدوران ويتهيّي عند نقطة تأثير القوة. ويعُقَس العزم بوحدة N.m حسب النظام الدولي للوحدات، ويُعبَّر عنه بالمعادلة الآتية:

$$\tau = r \times F$$

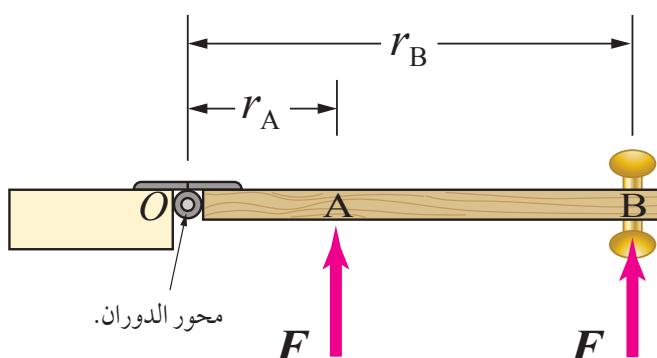
ويُحسب مقدار العزم كما يأتي:

$$\tau = r F \sin \theta$$

حيث (θ) الزاوية المحصورة بين المتجهين r و F .

يوضح الشكل (2) منظراً أعلىّاً لباب؛ ولفتح هذا الباب أو إغلاقه نُؤثر بقوة في مقابضه (النقطة B)، بدلاً من التأثير بها عند النقطة (A) بالقرب من محور الدوران، للحصول على أكبر مقدار للعزم، وذلك بجعل نقطة تأثير القوة أبعد ما يمكن عن محور الدوران. ويزداد مقدار العزم عند التأثير بهذه القوة بزاوية قائمة بالنسبة لمستوى سطح الباب.

أتحقق: أفسّر دفع الباب بقوة عمودية على مستوى سطح الباب أفضل من دفعه جانبيّاً بقوة تميل عن مستوى سطح الباب بزاوية.



الشكل (1): باب يدور حول محور دوران عند التأثير فيه بقوة.

الشكل (2): كلما زاد بعد نقطة تأثير القوة عن محور الدوران يزداد العزم.



الفقرة الرئيسية:

من أجل دراسة الاتزان السكوني للأجسام تلزم معرفة بعض المفاهيم الفيزيائية مثل: العزم ومركز الكتلة، وكيفية حساب كلّ منها

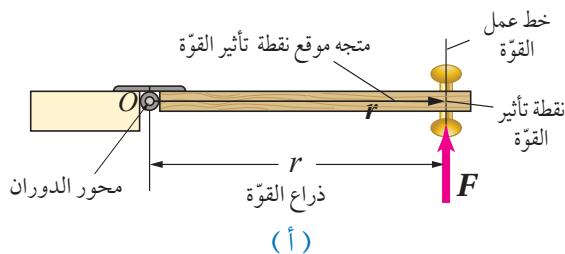
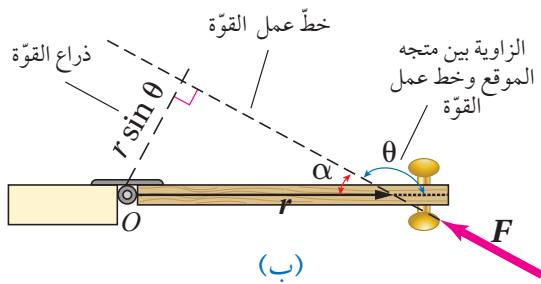
اتجاهات التعلم:

- أُعرّف التأثير الدوراني للقوة على جسم العزم).
- أحّدد مركز الكتلة لجسم منتظم الشكل وجسم غير منتظم الشكل عملياً.
- أحّدد مركز الكتلة لنظام يتكون من جسمين بمعادلة حسابية.

- أميّز بين الاتزان السكوني والاتزان الحركي.
- أصمّم تجربة تربط الاتزان بموقع مركز كتلة جسم.

المفاهيم والمصطلحات:

Torque	العزم
Lever Arm	ذراع القوة
Centre of Mass	مركز الكتلة



الشكل (3):

- (أ) طول ذراع القوة عند تأثير قوة عمودياً على مستوى سطح الباب،
 (ب) وعند تأثيرها بشكلٍ مائلٍ.

للتوصل إلى العوامل التي يعتمد عليها عزم القوة؛ انظر الشكل (3) الذي يوضح منظراً أعلى لباب تؤثر في مقبضه قوة (F). يُسمى امتداد متجه القوة خط عمل القوة، أما بعد العمودي بين خط عمل القوة ومحور الدوران فيُسمى ذراع القوة Lever arm

الربط مع الرياضيات

إذا كان مجموع الزاويتين α و β يساوي 180° فإنّ
 $\sin \alpha = \sin \beta$

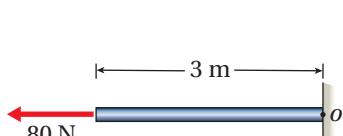
إذا كان مجموع الزاويتين α و β يساوي 90° فإنّ:
 $\sin \alpha = \cos \beta$

عندما تؤثر القوة (F) عمودياً على مستوى سطح الباب، كما في الشكل (أ) يكون طول ذراع القوة أكبر ما يمكن، ويكون مساوياً مقدار المتجه (r). أما عندما لا يكون اتجاه القوة (F) عمودياً على سطح الباب، كما في الشكل (ب) فإن طول ذراع القوة يساوي ($r \sin \theta$)، حيث ($\sin \alpha = \sin \theta$)، لأنّ مجموع الزاويتين يساوي 180° . أستنتج مما سبق أنّ مقدار العزم يتاسب طردياً مع كلّ من مقدار القوة (F) وطول ذراعها ($r \sin \theta$).

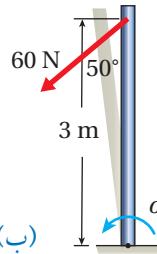
وبما أنّ العزم كمية متجهة؛ فإنّنا نعدّه موجباً عندما يسبّب دوران الجسم في عكس اتجاه حركة عقارب الساعة، وسالباً عندما يسبّب دوران الجسم في اتجاه حركة عقارب الساعة.

اتحقق: ما المقصود بالعزم؟ وعلام يعتمد؟ ✓

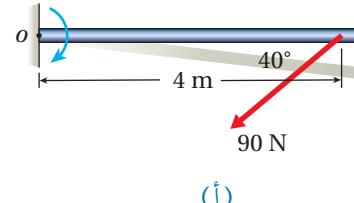
أحسب عزوم القوى المؤثرة في الأجسام المبينة في الشكل (٤) حول محور دوران يمرُّ بالنقطة (O).



(ج)



(ب)



(أ)

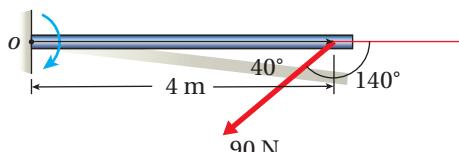
الشكل (٤): قوى تؤثر في أجسام قابلة للدوران حول محور ثابت.

المعطيات: الشكل والبيانات المثبتة فيه.

المطلوب: عزم كل قوة.

الحل:

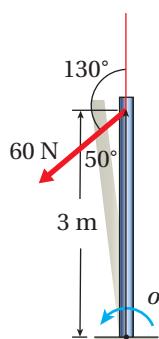
يُحسب العزم من العلاقة الآتية: $\tau = Fr \sin \theta$



الشكل (أ):

القوة تعمل على تدوير الجسم باتجاه حركة عقارب الساعة،
فيكون العزم سالبًا.

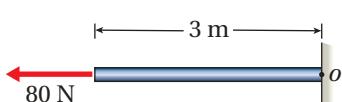
$$\begin{aligned}\tau &= -90 \times 4 \times \sin 140^\circ \\ &= -231.4 \text{ N.m}\end{aligned}$$



الشكل (ب):

القوة تعمل على تدوير الجسم بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة، فيكون العزم موجباً.

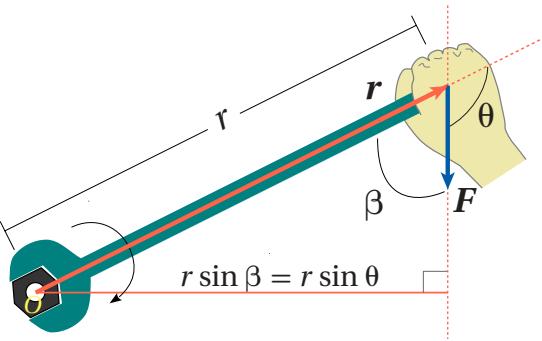
$$\begin{aligned}\tau &= 60 \times 3 \times \sin 130^\circ \\ &= 137.9 \text{ N.m}\end{aligned}$$



الشكل (ج):

الزاوية بين متجهى (F) و (r) تساوي ($\theta = 0^\circ$)؛ فيكون العزم $(\tau = 0)$.

المثال 2



الشكل (5): مفتاح شد صامولة.

يستخدم زيد مفتاح شد طوله (25.0 cm) لشد صامولة في دراجة، حيث أثر بقوة مقدارها ($1.60 \times 10^2 \text{ N}$) في طرف مفتاح الشد في الاتجاه الموضح في الشكل (5). فإذا علمت أنّ مقدار الزاوية (β) يساوي (75°)؛ أحسب مقدار العزم المؤثّر في المفتاح وأحدّد اتجاهه.

المعطيات: $r = 25.0 \text{ cm} = 0.250 \text{ m}$, $F = 1.60 \times 10^2 \text{ N}$, $\beta = 75^\circ$.

المطلوب: $\tau = ?$

الحلّ:

بحسب العزم باستخدام العلاقة:

$$\tau = r F \sin \theta$$

$$\text{علماً أن: } \sin 105^\circ = \sin 75^\circ \quad \text{و} \quad \theta = 105^\circ - 75^\circ = 30^\circ$$

ويكون العزم سالباً لأن القوة تعمل على تدوير مفتاح الشد باتجاه حركة عقارب الساعة.

$$\tau = -0.250 \times 1.60 \times 10^2 \times \sin 30^\circ$$

$$= -38.6 \text{ N.m}$$

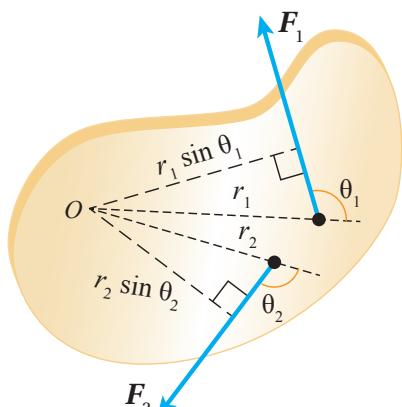
إيجاد العزم المحصل

يُحسب العزم المحصل المؤثّر في جسم عندما تؤثّر فيه أكثر من قوة؛ بحساب العزم الناتج عن كل قوة على حدة، مع مراعاة اتجاه الدوران، ثم تجمع العزوم مع إشاراتها. فمثلاً؛ يُبين الشكل (6) جسماً تؤثّر فيه قوتان: (F_1) تعمل على تدويره بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة، و (F_2) تعمل على تدويره باتجاه حركة عقارب الساعة. في هذه الحالة؛ أحسب عزم كل قوة حول محور الدوران على حدة، ثم أجده العزم المحصل ($\sum \tau$) المؤثّر في الجسم بجمع العزمين مع مراعاة إشارة كلّ منهما، كما يأتي:

$$\sum \tau = \tau_1 + \tau_2$$

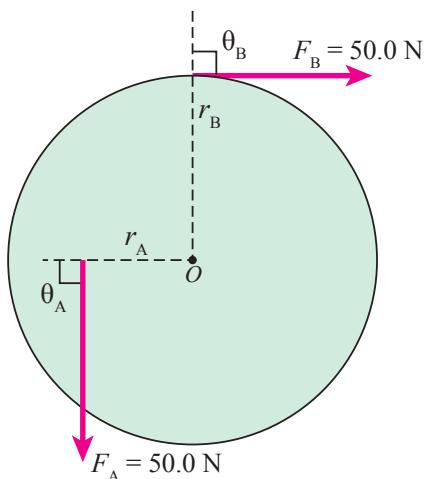
$$= F_1 r_1 \sin \theta_1 + (-F_2 r_2 \sin \theta_2)$$

الشكل (6): جسم قابل للدوران حول محور يمر بالنقطة (O) عمودياً على مستوى الصفحة، ويؤثّر فيه قوتان F_1 و F_2 .



أتحقق: كيف أحسب عزم قوى عدّة تؤثّر في جسم قابل للدوران حول محور ثابت؟ وكيف أحدد اتجاهه؟

المثال 3



بكرة مُصمتة نصف قطرها (r_B)، يمرّ في مركزها (O) محور دوران عمودي على مستوى الصفحة؛ كما هو موضح في الشكل (7). إذا علمت أن القوة (F_A) تؤثّر في البكرة على بعد ($r_A = 30.0 \text{ cm}$) من محور الدوران، وتؤثّر القوة (F_B) عند حافة البكرة حيث ($r_B = 50.0 \text{ cm}$)، واعتماداً على المعلومات المُثبتة في الشكل؛ أحسب مقدار العزم المُحصل المؤثّر في البكرة، وأحدّد اتجاهه.

الشكل (7): بكرة مصمتة.

$$F_A = F_B = 50.0 \text{ N}, r_A = 30.0 \text{ cm} = 0.30 \text{ m}, r_B = 50.0 \text{ cm} = 0.50 \text{ m}, \theta_A = \theta_B = 90^\circ.$$

المعطيات:

$$\sum \tau = ?$$

المطلوب:

الحلّ:

تعمل القوة (F_A) على تدوير البكرة بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة؛ لذا يكون عزّمها موجباً، أمّا القوة (F_B) فتعمل على تدويرها باتجاه حركة عقارب الساعة؛ لذا يكون عزّمها سالباً. فيُحسب العزم المُحصل حول محور دوران البكرة كما يأتي:

$$\sum \tau = \tau_1 + \tau_2$$

$$\begin{aligned} &= F_A r_A \sin \theta_A - F_B r_B \sin \theta_B \\ &= 50.0 \times 0.30 \sin 90^\circ - 50.0 \times 0.50 \sin 90^\circ \\ &= -10.0 \text{ N.m} \end{aligned}$$

بما أنّ العزم المُحصل سالب فإنّه يعمل على تدوير البكرة باتجاه حركة عقارب الساعة حول محور دورانها.

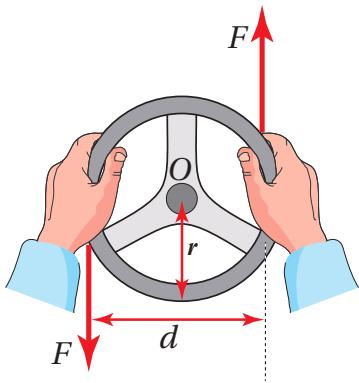


لذلك

أستخدم الأرقام: يدفع عامل عربة كاما هو موضح في الشكل (8)، عن طريق التأثير في مقبضي ذراعيها بقوتين مجموعهما ($F = 180 \text{ N}$) رأسياً إلى أعلى لرفعهما إلى أعلى بزاوية (25°) بالنسبة لمحور ($+x$). إذا علمت أنّ بعد كل من مقبضي العربة عن محور الدوران (O) يساوي (1.50 m)؛ أحسب مقدار عزم القوة (F) المؤثّر في العربة حول محور الدوران، وأحدّد اتجاهه.

الشكل (8): عامل يدفع عربة.

عزم الإزدواج Torque of a Couple



الشكل (9): الإزدواج المؤثر في مقود سيارة.

يُبيّن الشكل (9) منظراً لمقدار المقود سيارة تؤثّر فيه قوتان تعملاً على تدويره بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة. القوتان متساوياناً مقداراً ومتناكستان اتجاهها وخطاً عملهما غير متطابقين؛ فتشكلان ما يعرف بالازدواج Couple، ويسمى العزم الناتج عنه بعزم الإزدواج، ويحسب عزم الإزدواج بإيجاد العزم المحصل حول محور الدوران نفسه كما يأتي:

$$\begin{aligned}\sum \tau &= \tau_1 + \tau_2 \\ &= Fr + Fr \\ &= F(2r) \\ &= Fd\end{aligned}$$

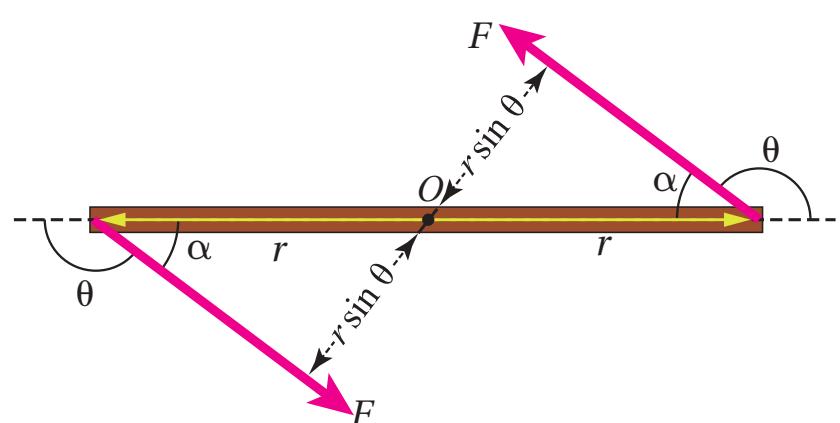
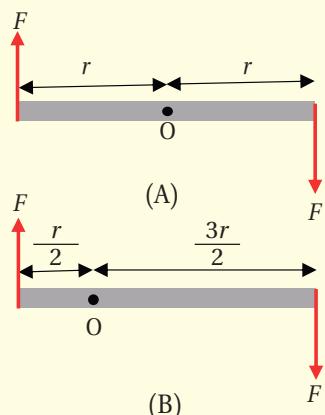
حيث (d) البُعد العموديُّ بين خطيِّ عمل القوتين. عموماً، فإن عزم الإزدواج عندما تصنُع قوتاً إزدواجاً زاويةً غير قائمةً مع المُتجه (r)، كما هو موضُع في الشكل (10)، يُحسب باستخدام العلاقة الآتية:

$$\tau_{couple} = 2Fr \sin \theta = F(2r \sin \theta) = Fd$$

أُستنتج أن عزم الإزدواج يساوي ناتج ضرب إحدى القوتين في البُعد العمودي بينهما.

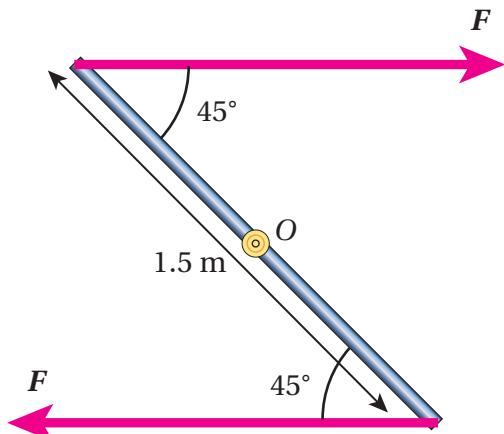
تحقق: ما الشروط اللازم تحقّقها في قوتين كي تشكلان إزدواجاً؟ ✓

أُفْكَر: تشكّل القوتان الموضحتان في الشكل (A) إزدواجاً يعمل على تدوير الجسم باتجاه حركة عقارب الساعة. إذاً تغيير موقع محور الدوران ليصبح كما في الشكل (B)، وبثبوت القوتين؛ فهل نعد القوتين إزدواجاً في هذه الحالة؟ وهل يكون العزم المحصل متساوياً في الحالتين؟ أوضح إجابتي رياضياً.



الشكل (10): تصنُع قوتاً إزدواجاً زاويةً غير قائمةً مع قضيب فلزيٍ قابلٍ للدوران حول محور ثابتٍ عموديٍّ على مستوى الصفحة يمرُّ في منتصف القضيب عند النقطة (O).

المثال 4



قرتان تشكلان إزدواجاً وتأثيران بالاتجاهات المثبتة في الشكل (11/أ)، عند طرف قصيب فلزي طوله (1.5 m) قابل للدوران حول محور عمودي على الصفحة ويمر بالنقطة (O) إذا علمت أن عزم الإزدواج يساوي (130 N.m)؛ فما مقدار كُل من القوتين؟ وما اتجاه دوران القضيب؟

الشكل (11/أ): إزدواج يؤثر في قضيب فلزي.

المعطيات:

$$l = 2r = 1.5 \text{ m}, \alpha = 45^\circ, \tau = 130 \text{ N.m}$$

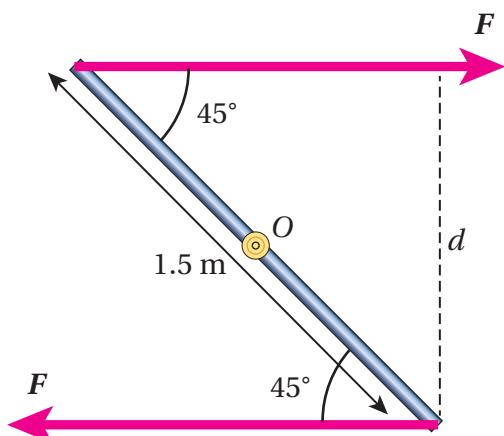
المطلوب:

$$F = ?$$

الحل:

نحسب البعد العمودي بين خطى عمل القوتين (d)، ألاحتظ الشكل (11/ب):

$$d = l \sin \alpha = 1.5 \times \sin 45^\circ = 1.1 \text{ m}$$



ثم نجد (F) باستخدام العلاقة:

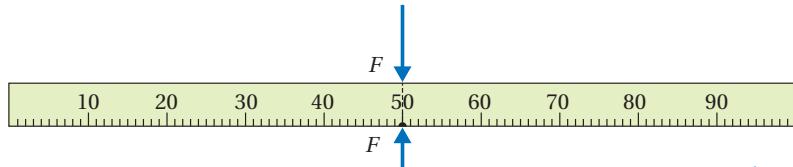
$$\tau_{(\text{couple})} = Fd$$

$$130 = F \times 1.1$$

$$F = \frac{130}{1.1} = 118.2 \text{ N}$$

يعمل الإزدواج على تدوير القضيب الفلزي باتجاه حركة عقارب الساعة.

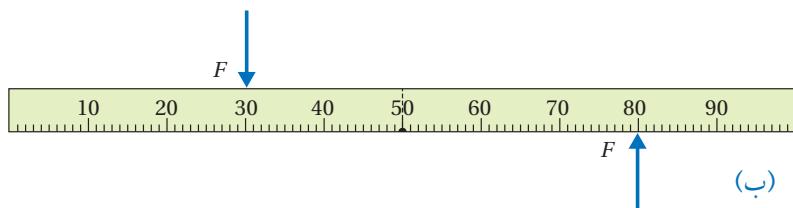
الشكل (11/ب): البعد العمودي بين خطى عمل القوتين



الشكل (12):

(أ) خطأً عمل القوتين المؤثرين في المسطورة متطابقان.

(ب) خطأً عمل القوتين المؤثرين غير متطابقين.



الاتزان Equilibrium

درستُ في صفوفِ سابقةٍ أنَّ الجسم الساكن يكون في حالة اتّزانٍ سكونيٍّ، والجسم المتحرّك بسرعةٍ ثابتة وبخطٍ مستقيم يكون في حالة اتّزانٍ حركيٍّ، وفي الحالتين تكون القوّة المُمحضّة المؤثرة في هذه الأجسام تساوي صفرًا: $\sum F = 0$. وهذا الشرط يتحقق الاتزان للجسم عندما تكون القوى المؤثرة فيه في الموقع نفسه، مثل المسطورة المبينة في الشكل (12/أ).

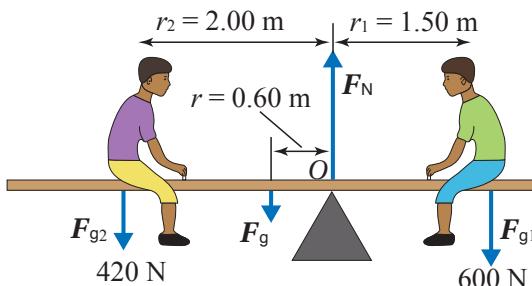
يوضح الشكل (12/أ) مسطرةً متريّةً موضوعةً على سطح طاولة؛ وتؤثّر فيها قوّتان أفقيتان متساويتان مقدارًا ومتعاكستان اتجاهًا في الموقع نفسه، حيث تكون المسطرة في حالة اتزان سكوني، لأنَّ القوّة المُمحضّة المؤثرة فيها تساوي صفرًا. أمّا الشكل (12/ب) فيوضح المسطرة نفسها عند تأثير القوتين نفسيهما فيها في مواقع مختلفين. هنا لا بد من توافر شرطٍ ثانٍ يتحقق الاتزان، وهذا الشرط مرتبط بالعزم؛ فالمسطرة في هذه الحالة غير مُتنّزة على الرغم من أنَّ القوّة المُمحضّة تساوي صفرًا؛ لأنَّ العزم المُحصل المؤثر فيها لا يساوي صفرًا. يمكن القول: إنه عندما تؤثّر في الجسم قوّى عدّة في مواقع مختلفة، يكون الجسم مُتنّزئًا عندما يتحقّق الشرطين الآتيين معًا:

الشرط الأول: أن تكون القوّة المُمحضّة المؤثرة فيه تساوي صفرًا: $\sum F = 0$.

الشرط الثاني: أن يكون العزم المُحصل المؤثر فيه يساوي صفرًا: $\sum \tau = 0$.

وفي هذا الدرس سنكتفي بتطبيق هذين الشرطين على الأجسام الساكنة؛ أي التي تكون في حالة اتّزان سكوني.

أتحقق: لماذا لا تعد المسطرة المبينة في الشكل (12/ب) متنّزة؟



الشكل (13): طفلان يجلسان على لعبة متربطة أفقياً.
See – saw

يجلس فادي (F_{g1}) و صقر (F_{g2}) على جانبي لعبة اتّزان (see – saw) تتكون من لوح خشبي متظم متماثل وزنه (F_g) يؤثّر في منتصفه، يركز على نقطة تبعد (0.60 m) يمين منتصف اللوح الخشبي، كما هو موضح في الشكل (13). إذا كان النظام المكون من اللعبة والطفلين في حالة اتّزان سكوني اللوح الخشبي في وضعٍ أفقى، وبالاستعانة بالبيانات المثبتة في الشكل، أحسب ما يأتي:

- وزن اللوح الخشبي (F_g).
- القوة (F_N) التي يؤثّر بها نقطة الارتكاز في اللوح الخشبي.

المعطيات: $F_{g1} = 600 \text{ N}$, $F_{g2} = 420 \text{ N}$, $r = 0.60 \text{ m}$, $r_1 = 1.50 \text{ m}$, $r_2 = 2.00 \text{ m}$.

المطلوب: $F_g = ?$, $F_N = ?$

الحلّ:

أ. يتأثر اللوح الخشبي بأربع قوى، هي: وزنا الطفلين (F_{g1} و F_{g2}), وزن اللوح (F_g), القوة العمودية (F_N) التي يؤثّر بها نقطة الارتكاز في اللوح. وبما أن مقداري القوة العمودية ووزن اللوح غير معلومين؛ فإن تطبيق الشرط الثاني للاتّزان حول محور دوار يمرُّ في إحدى نقطتي تأثير هاتين القوتين، يجعل عزم تلك القوة يساوي صفرًا.

إذا اخترنا تطبيق الشرط الثاني للاتّزان حول محور يمر بالنقطة (O)، يكون عزم القوة العمودية صفرًا.

$$\sum \tau = 0$$

$$F_{g2} r_2 + F_g r - F_{g1} r_1 = 0$$

$$F_{g1} r_1 = F_{g2} r_2 + F_g r$$

$$600 \times 1.50 = 420 \times 2.00 + F_g \times 0.60$$

$$F_g = \frac{900 - 840}{0.60} = 100 \text{ N}$$

ب. اللوح الخشبي في حالة اتّزان سكوني؛ لذا فإنّ القوة المُحصّلة المؤثّرة فيه تساوي صفرًا حسب الشرط الأول من شرطي الاتّزان. ويُطبّق هذا الشرط في اتجاه محور y ؛ لأنّه لا توجد قوى يؤثّر في اتجاه محور x .

$$\sum F_y = 0$$

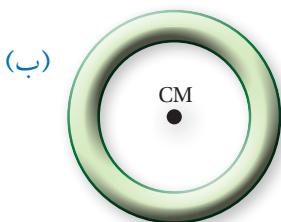
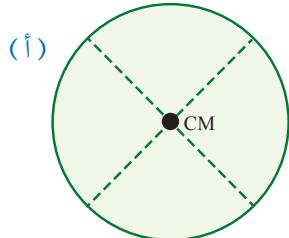
$$F_N - (F_g + F_{g1} + F_{g2}) = 0$$

$$F_N = F_g + F_{g1} + F_{g2}$$

$$= 100 + 600 + 420$$

$$= 1120 \text{ N}$$

مركز الكتلة Centre of Mass



الشكل (14): (أ) قرص مصمت أو مجوف، (ب) حلقة دائيرية.

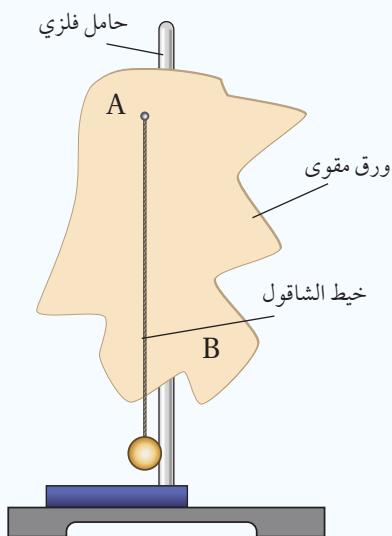
يُعرَّف مركز الكتلة (Centre of mass (CM)) أنه؛ النقطة التي يمكن افتراض كتلة الجسم كاملة مركزة فيها. وقد يقع مركز الكتلة داخل الجسم أو خارجه، اعتماداً على شكل الجسم.

ينطبق موقع مركز كتلة أي جسم متماثل منتظم توزيع الكتلة (متجانس) على مركزه الهندسي. فمثلاً؛ يقع مركز كتلة قضيب فلزي، أو مسطرة، أو أسطوانة أو كرة في المركز الهندسي لكتلتها، كذلك يقع مركز كرّة مجوفة أو حلقة دائيرية في المركز الهندسي لكل منها بالرغم من عدم وجود مادة الكرة أو الحلقة عند تلك النقطة. أنظر الشكل (14).

أما الجسم غير منتظم الشكل، فيكون مركز كتلته أقرب إلى المنطقة ذات الكتلة الأكبر. ويمكن تحديد موقع مركز الكتلة عملياً؛ باتباع الخطوات الموضحة في التجربة الآتية:

التجربة ١

مركز كتلة جسم غير منتظم الشكل



المواد والأدوات: قطعة ورق مقوى، حامل فلزي، قلم رصاص، مقص، مثقب، خيط الشاقول.

إرشادات السلامة:

ارتداء المعطف واستعمال النظارات الواقية للعينين، والحذر من سقوط الأجسام والأدوات على القدمين.

خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أُنفذ الخطوات الآتية:

1. أقصي قطعة الورق المقوى لأحصل على شكل غير منتظم، وأثقبه عند حافته ثقباً عدداً صغيراً متباundra؛ ثقبان على الأقل عند نقطتين مثل: A و B.

2. **أُجّرب:** أعلق قطعة الورق المقوى (الشكل غير المنتظم) من أحد الثقبين في الحامل الرأسى، وأعلق خيط الشاقول بالحامل الرأسى أيضاً، وأنظر حتى يستقر كل منهما ويتوقف عن التأرجح.

3. أرسم خطأ رأسياً على قطعة الورق المقوى على امتداد خيط الشاقول؛ كما هو موضح في الشكل.

4. أكرر الخطوة السابقة بتعليق قطعة الورق المقوى من الثقب الآخر.

التحليل والاستنتاج:

1. **أستنتاج:** أحدد نقطة تقاطع الخطيتين على قطعة الورق المقوى، ما الذي تمثله هذه النقطة؟ ماذا أستنتج؟

2. **أفارُّ** بين موقع مركز الكتلة لجسم غير منتظم الشكل، وأخر منتظم الشكل ومتجانس.

3. **أتوقعُ** ما يحدث لقطعة الورق المقوى غير المنتظمة عند تعليقها من نقطة تقاطع الخطيتين. أفسر إجابتي.

مركز الكتلة لنظام من جسمين

Centre of Mass of System of Two Masses

عندما يتكون النظام من جسمين متساوين في الكتلة، كما في الشكل (15) الذي يوضح رافع أثقال يرفع ثقلين متساوين في الكتلة؛ فإن مركز كتلة النظام يقع عند متصف المسافة بين الجسمين.

أما مركز الكتلة لنظام يتكون من جسمين (m_A, m_B) مختلفين في الكتلة، فيقع على الخط الواصل بين الجسمين وأقرب إلى الكتلة الأكبر، كما في الشكل (16). ولمعرفة موقع مركز الكتلة لهذا النظام اختيار نظام محاور يقع فيه الجسمان على محور x عند موقعين (x_A, x_B). لتحديد الإحداثي x لموقع مركز كتلة النظام (x_{CM})، أستخدم العلاقة الآتية:

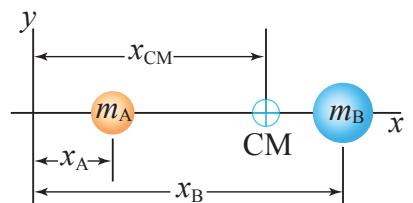
$$x_{CM} = \frac{m_A x_A + m_B x_B}{m_A + m_B}$$

من التطبيقات المهمة لمركز الكتلة، أن الجسم أو النظام يكون متزنًا عند تعليقه من مركز كتلته، حيث يكون مجموع العزوم لمكونات النظام حول مركز كتلته صفرًا. وهذا يتفق مع ما توصلت إليه في التجربة الاستهلالية، فنقطة الارتكاز التي تحقق الاتزان للنظام المكون من المسطرة والأثقال المعلقة فيها تقع عند مركز الكتلة.

✓ **أتحقق:** أين يقع مركز كتلة جسم مُتناظمٍ متماثل؟ وأين يقع مركز كتلة جسم غير متناظم الشكل؟



الشكل (15): يقع مركز كتلة الثقلين المتساوين في متصف المسافة بينهما.



الشكل (16): موقع مركز الكتلة لجسيمين مختلفين في الكتلة يقعان على محور x هو (x_{CM})، يكون أقرب لكتلة الأكبر.

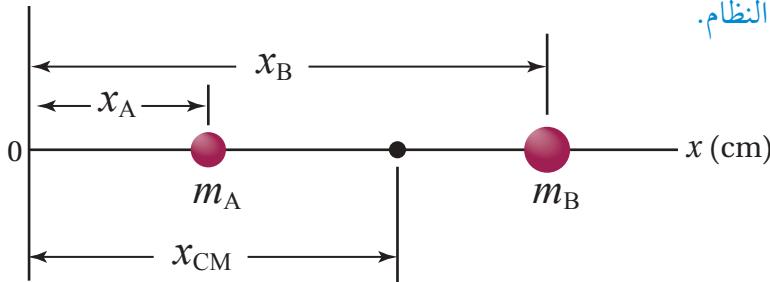
الربط بالحياة

عند حدوث عدم تمايز في توزيع كتلة إطار السيارة، نتيجة حدوث تآكل في بعض أجزاء الإطار مثلًا؛ فإن مركز كتلة الإطار لا ينطبق مع مركزه الهندسي الذي يمر في محور الدوران، مما يسبب اهتزاز إطار السيارة خصوصًا عند السرعات العالية. ولضمان توزيع منتظم لكتلة الإطار حول محور الدوران (بحيث ينطبق مركز كتلته مع مركزه الهندسي)؛ توضع قطع رصاص على الجزء الفلزي منه، وهذا بدوره يؤدي إلى التخلص من اهتزاز الإطار خصوصًا عند السرعات العالية.



المثال 6

نظامٌ يتكونُ من كرتين ($m_A = 1.0 \text{ kg}$) و ($m_B = 3.0 \text{ kg}$)؛ كما هو موضّح في الشكل (17). إذا علمنتُ أنَّ ($x_A = 5.0 \text{ cm}$) و ($x_B = 15.0 \text{ cm}$)؛ أُحدِّد موقعَ مركزَ كتلةِ النظام.



الشكل (17): نظامٌ مكوّنٌ من كرتينٍ تقعانِ على محورِ x .

المعطيات: $m_A = 1.0 \text{ kg}$, $m_B = 3.0 \text{ kg}$, $x_A = 5.0 \text{ cm}$, $x_B = 15.0 \text{ cm}$

المطلوب: $x_{CM} = ?$

الحلّ:

أُستخدم العلاقة الآتية لإيجاد الإحداثي (x_{CM}):

$$x_{CM} = \frac{m_A x_A + m_B x_B}{m_A + m_B}$$

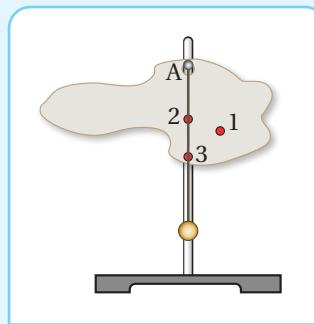
$$= \frac{1.0 \times 5.0 \times 10^{-2} + 3.0 \times 15.0 \times 10^{-2}}{1.0 + 3.0}$$

$$= 1.25 \times 10^{-1} \text{ m} = 12.5 \text{ cm}$$

الاحظُ أنَّ موقعَ مركزَ الكتلةِ أقربُ للكتلةِ الأكبر.

أفكار: في المثال (6)، أثبتُ أنَّ مجموعَ العزوم الناتجة عن أوزان مكوناتِ النظامِ حولَ محورِ عمودي على الصفيحة يمرُ في مركزِ الكتلة يساوي صفرًا.

أجرت طالبة تجربة مماثلة للتجربة (1) لإيجاد موقعَ مركزِ الكتلة لصفيحة غير منتظمةِ الشكل. حددت الطالبة ثلاًث نقاطَ توقعَتُ أنَّ مركزَ الكتلة يقعُ عندَها، ثمَّ علقتَ الصفيحة من النقطة (A) وانتظرتُ إلى أنْ توقفَ الشاقول المعلقَ عن التأرجُح، واستقرَ كما في الشكل.



أصدر حكمًا: أيٌ من النقاطِ الثلاثِ من المُحتمل أنْ يقعَ مركزُ الكتلةُ عندَها؟ أبرِرْ إجابتك.

اقتصرْ خطوةً إضافيةً على الطالبة أنْ تقومَ بها لتحديدَ موقعَ مركزِ الكتلة بدقَّة.

مراجعة الدرس

1. الفكرة الرئيسية: ما الشرطان اللذين يجب أن يتحققما معاً كي يكون الجسم أو النظام متزناً؟

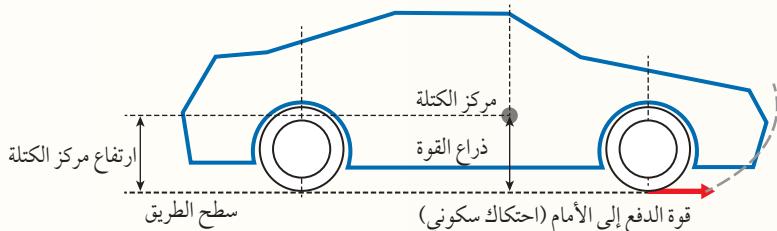
2. أوضح المقصود بمركز كتلة جسم.

3. **أفسر:** أثرت قوى عدّة في جسم؛ بحيث تمر خطوط عملها في مركز كتلته، وكانت القوة المحصلة المؤثرة فيه تساوي صفرًا. هل يكون الجسم متزنًا أم لا؟ أبرر إجابتي.

4. **اقارن** بين الاتزان السكوني والاتزان الحركي من حيث: القوة المحصلة المؤثرة، السرعة الخطية، التسارع الخطّي.

5. **توقع:** رأت ذكرى أخاها يحاول فك إطار سيارته المثقوب باستخدام مفتاح شد لفك الصواميل التي ثُبّتت في الإطار، لكنه لم يستطع فكها. أذكر طريقتين -على الأقل- يمكن أن تقتربهما ذكرى على أخيها لمساعدته على فك الصواميل. **أفسر إجابتي.**

6. **التفكير الناقد:** عند انطلاق السيارة بشكل مفاجئ؛ قد ترتفع مقدمتها إلى الأعلى. مستعيناً بالشكل المجاور؛ أفسر سبب ذلك.

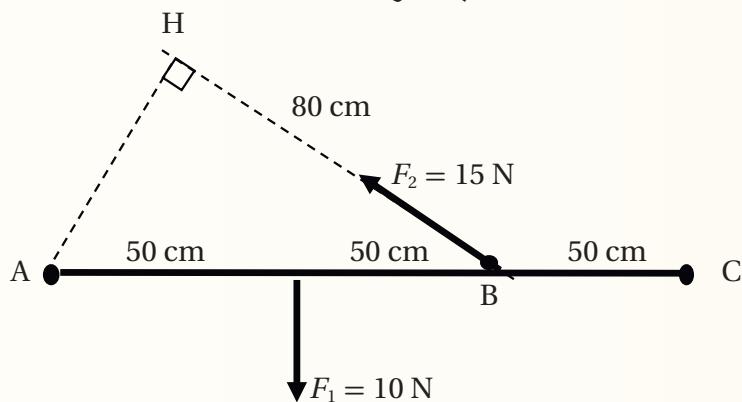


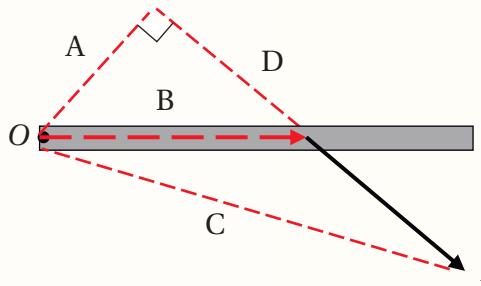
7. **استخدم الأرقام:** في الشكل المجاور أحسب العزم المحصل للقوى المبينة في الشكل، حول محور دوران عمودي على الصفحة:

ج. يمر بالنقطة (C).

ب. يمر بالنقطة (B).

أ. يمر بالنقطة (A).



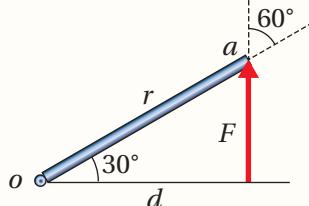


8. أضع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة لكل جملة مما يأتي:

1. يبين الشكل قوة (F) تعمل على تدوير الجسم حول محور يمر بالنقطة (O)؟ فإن ذراع القوة هو الخط المشار إليه بالرمز:

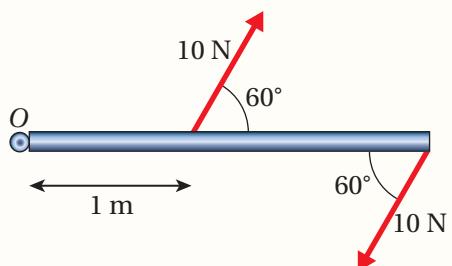
- أ. B .
- ب. A .
- ج. D .
- د. C .

2. يبين الشكل جسمًا قابلاً للدوران حول محور يمر بالنقطة (O), تؤثر فيه قوة (F) عند النقطة (a). معتمداً على الشكل وبياناته، فإن عزم هذه القوة يساوي:



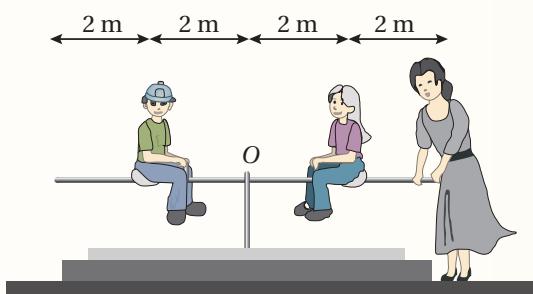
- أ. $-rF\sin 60^\circ$.
- ب. $+rF\sin 150^\circ$.
- ج. $-dF$.
- د. $+dF$.

3. يبين الشكل المجاور مقطعاً عرضياً لباب طوله (2.5 m)، ومحوراً دورانه يمر بالنقطة (O). بالاعتماد على البيانات المثبتة على الشكل؛ فإن العزم المحصل المؤثر في الباب بوحدة (N.m):



- أ. $35 \sin 60^\circ$ ، عكس اتجاه حركة عقارب الساعة.
- ب. $35 \sin 60^\circ$ ، مع اتجاه حركة عقارب الساعة.
- ج. $15 \sin 120^\circ$ ، عكس اتجاه حركة عقارب الساعة.
- د. $15 \sin 120^\circ$ ، مع اتجاه حركة عقارب الساعة.

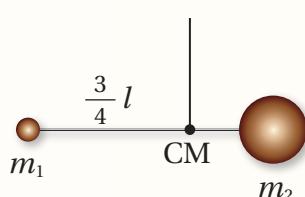
4. تجلس فتاة وأخوها على لعبة (see-saw)، كما هو مبين في الشكل، كتلة الفتاة (40 kg) وكتلة الولد (50 kg).



وكي يبقى اللوح متزنًا تمسك الأم بطرف اللوح، وتؤثر فيه بقوة مقدارها واتجاهها:

- أ. 50 N، للأعلى.
- ب. 50 N، للأسفل.
- ج. 100 N، للأعلى.
- د. 100 N، للأسفل.

5. يبين الشكل المجاور كرتين كتليهما (m_1, m_2)، تصلان بقضيب فلزّي خفيف كتلته مُهمّلة وطوله (l)، يتزن النظام عند تعليقه من مركز كتلته الذي يبعد عن الكرة الأولى ($\frac{3}{4}l$)، فيكون مقدار كتلة الكرة (m_1):



- أ. $\frac{1}{4}m_2$.
- ب. $\frac{1}{3}m_2$.
- ج. $\frac{2}{3}m_2$.
- د. $\frac{3}{4}m_2$.

وصف الحركة الدورانية

Description of Rotational Motion

في صفوف سابقة؛ تعلّمتُ وصف الحركة للأجسام التي تحرّك حركةً انتقاليةً باستخدام مفاهيم الإزاحة والسرعة والتسارع. وبالمثل يمكن وصف الحركة الدورانية باستخدام مفاهيم خاصةٍ وهي: الإزاحة الزاويّة، والسرعة الزاويّة، والتقارب الزاوي.

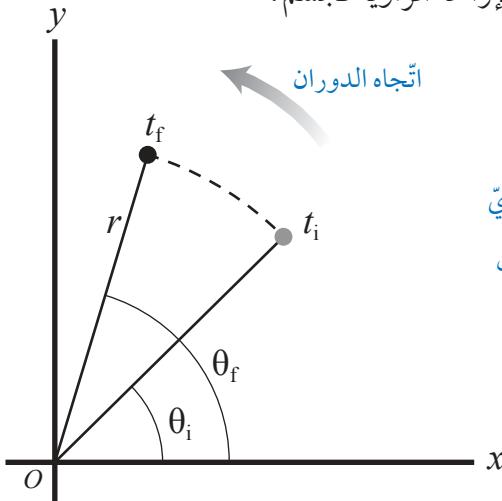
الإزاحة الزاويّة Angular Displacement

عندما يدور جسمٌ بزاويةٍ معيّنةٍ؛ فإنَّ جميع جسيماته تدور بالزاوية نفسها، والموقع الزاوي Angular position لأي جسمٍ عليه هو الزاوية (θ) التي يصنّعها الخط الواصل بين الجسم ونقطة الأصل مع الخط المرجعي (محور $x+$)، وتقاس بوحدة الرadian (rad). يبيّن الشكل (19) التغيير في الموضع الزاوي لجسمٍ يقع على جسمٍ يدور بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة. عند اللحظة (t_i) يكون الموضع الزاوي للجسم (θ_i)، وعند اللحظة (t_f) يصبح الموضع الزاوي (θ_f). أمّا الإزاحة الزاويّة Angular displacement ($\Delta\theta$)؛ فهي التغيير في الموضع الزاوي، وتحسب باستخدام العلاقة الآتية:

$$\Delta\theta = \theta_f - \theta_i$$

وُتعدُّ الإزاحة الزاويّة موجبةً عند الدوران بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة، بينما تُعدُّ الإزاحة الزاويّة سالبةً عند الدوران باتجاه حركة عقارب الساعة.

أتحقق: ما المقصود بالإزاحة الزاويّة لجسم؟ ✓



الشكل (19): تغيير الموضع الزاوي لجسمٍ يدور بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة.

تُوصَفُ الحركة الدورانية باستخدام مفاهيم منها، الإزاحة الزاويّة، السرعة الزاويّة، التقارب الزاويّ، وعزم القصور الذاتي.

نتائج العلم

أوضح المقصود بكل من: الإزاحة الزاويّة، والسرعة الزاويّة المتوسطة، والتقارب الزاويّ المتوسط.

أحسب مقدار كل من: السرعة الزاويّة، والتقارب الزاويّ.

أستنتج أنَّ عزم القصور الذاتي لجسم هو مقاييس لممانعة الجسم لإحداث تغيير في حركته الدورانية.

أعبر عن عزم القصور الذاتي لجسم بمعادلة.

أعبر عن القانون الثاني لنيوتون لجسم صلبٍ يدور حول محور ثابت.

المفاهيم والمصطلحات

الإزاحة الزاويّة Angular Displacement

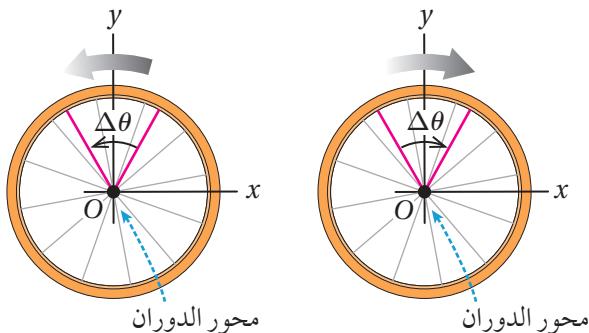
السرعة الزاويّة المتوسطة Average Angular Velocity

التقارب الزاويّ المتوسط Average Angular Acceleration

عزم القصور الذاتي Moment of Inertia

الدوران باتجاه حركة عقارب الساعة.

الشكل (20): عند دوران الجسم بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة تكون الإزاحة الزاوية والسرعة الزاوية موجبة، وعند دوران الجسم باتجاه حركة عقارب الساعة تكون كلاً من الإزاحة الزاوية والسرعة الزاوية سالبة.



السرعة الزاوية Angular Velocity

تعلّمتُ سابقاً حساب السرعة الخطية المتوسطة لجسم يتحرّك حرّكةً انتقاليةً من موقع إلى آخر. بالمثل، عندما يتحرّك جسم حركةً دورانيةً يمكن تعريف السرعة الزاوية المتوسطة ($\bar{\omega}$) Average angular velocity؛ بأنّها نسبة الإزاحة الزاوية ($\Delta\theta$) لذلك الجسم إلى الفترة الزمنية (Δt) التي حدثت خلالها هذه الإزاحة، ونُعطي بالعلاقة الآتية:

$$\bar{\omega} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$$

وحدة قياسها هي (rad/s). أمّا السرعة الزاوية لجسم عند لحظة زمنية معينة، فُسَمِّي السرعة الزاوية اللحظية (ω). Instantaneous angular velocity وعندما تكون السرعة الزاوية ثابتةً، فإنّ السرعة الزاوية المتوسطة تساوي السرعة الزاوية اللحظية. وفي هذه الوحدة أينما ورد مصطلح السرعة الزاوية؛ فإنه يعني السرعة الزاوية اللحظية.

يبين الشكل (20) جسماً يدور حول محور يمر بالنقطة (O) عمودياً عليها. عند دوران الجسم بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة تكون إزاحته الزاوية موجبة؛ لذا فإنّ سرعته الزاوية موجبة أيضاً. أمّا عند دورانه باتجاه حركة عقارب الساعة؛ فإنّ إزاحته الزاوية سالبة.

التسارُّع الزاوي Angular Acceleration

عند تغيير مقدار السرعة الزاوية لجسم من (ω_i) إلى (ω_f) خلال فترة زمنية (Δt) يكون له تسارُّع زاوي، ويُعرَّف التسارُّع الزاوي المتوسط Average angular acceleration بأنّه؛ نسبة التغيير في مقدار السرعة الزاوية إلى الفترة الزمنية (Δt) الالزامية لحدوث هذا التغيير، رمزه ($\bar{\alpha}$) ويُقاس بوحدة (rad/s²):

$$\bar{\alpha} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$$

أما التسارُّع الزاوي لجسم عند لحظة زمنية معينة، فُسَمِّي التسارُّع الزاوي اللحظي Instantaneous angular acceleration (α)

أتحقق: ما المقصود بالسرعة الزاوية المتوسطة؟

عند دوران جسم بتسارع زاوي ثابت؛ فإن تسارعه الزاوي المتوسط يساوي تسارعه الزاوي اللحظي؛ أي أن $\alpha = \bar{\alpha}$. وأينما ورد مصطلح التسارع الزاوي فإن يعني التسارع الزاوي اللحظي.

تستخدم إشارة كل من السرعة الزاوية والتسارع الزاوي لمعرفة ما إذا كان الجسم يدور بتسارع أم ببطء؛ فعندما تكون إشارتا السرعة الزاوية والتسارع الزاوي متماثلين؛ فإن الجسم يدور بتسارع، أما إذا كانت إشارتهما مختلفتين؛ فإن الجسم يدور ببطء.

عندما يدور جسم حول محور ثابت؛ فإن كل جسيم فيه يدور بالزاوية نفسها خلال مدة زمنية معينة، وبذلك فإن لأجزاء الجسم جميعها السرعة الزاوية نفسها والتسارع الزاوي نفسه. لذا فإن السرعة الزاوية (ω)، والتسارع الزاوي (α) تميز الحركة الدورانية للجسم بأكمله إضافة إلى الجسيمات المفردة فيه.

أتحقق: ما المقصود بالتسارع الزاوي المتوسط؟ وما وحدة قياسه؟

المثال 7

الحل:

أ. أستخدم المعادلة الآتية لحساب التسارع الزاوي المتوسط:

$$\bar{\alpha} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{\omega_f - \omega_i}{t} = \frac{3.00 \times 10^3 - 0}{30.0}$$

$$\bar{\alpha} = \alpha = 1.00 \times 10^2 \text{ rad/s}^2$$

ب. أستخدم معادلة التسارع الزاوي لحساب السرعة الزاوية:

$$\begin{aligned} \bar{\alpha} &= \frac{\omega_f - \omega_i}{t} \\ \omega_f &= \omega_i + \bar{\alpha}t = 0 + 1.00 \times 10^2 \times 20.0 \\ &= 2.00 \times 10^3 \text{ rad/s} \end{aligned}$$

يتسارع الجزء الدوار في جهاز فصل مكونات الدم من السكون إلى $(3.00 \times 10^3 \text{ rad/s})$ خلال (30.0 s) بتسارع زاوي ثابت. أحسب ما يأتي:

- أ. التسارع الزاوي المتوسط.
ب. السرعة الزاوية بعد مرور (20.0 s) من بدء دورانه.

المعطيات:

$$\omega_i = 0, \omega_f = 3.00 \times 10^3 \text{ rad/s}, t = 20.0 \text{ s.}$$

المطلوب:

$$\bar{\alpha} = ?, \omega = ?.$$

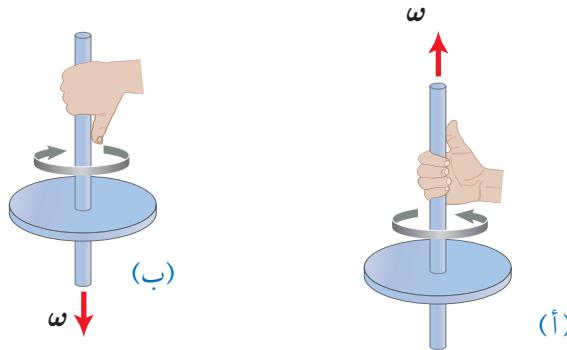
للمزيد

أستخدم الأرقام: يدور إطار سيارة بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة؛ بسرعة زاوية ثابتة مقدارها (2.0 rad/s) مدة زمنية مقدارها (20.0 s) ، ثم يتسارع بعد ذلك بتسارع زاوي ثابت مقداره (3.5 rad/s^2) مدة زمنية مقدارها (10.0 s) . أحسب ما يأتي:

أ. الإزاحة الزاوية للإطار عند نهاية المدة الزمنية لحركته بسرعة زاوية ثابتة.

ب. السرعة الزاوية للإطار عند نهاية المدة الزمنية لحركته بتسارع زاوي ثابت.

الشكل (21): استخدام قاعدة قبضة اليد اليمنى لتحديد اتجاه السرعة الزاوية لجسم يدور (أ) بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة، (ب) باتجاه حركة عقارب الساعة، عند النظر إليهما من أعلى.



متجه السرعة الزاوية ومتوجه التسارع الزاوي Angular Velocity and Angular Acceleration Vectors

تحقق: كيف أحدد اتجاه كل من السرعة الزاوية والتسارع الزاوي لجسم يدور حول محور (z) بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة بسرعة متناظرة؟

السرعة الزاوية كمية متتجهة، حيث يرسم متوجه السرعة الزاوية على امتداد محور الدوران، وتستخدم قاعدة قبضة اليد اليمنى لتحديد اتجاهه، وذلك عن طريق لفّ أصابع اليد اليمنى حول محور الدوران بحيث تُشير إلى اتجاه دوران الجسم، فيُشير الإبهام إلى اتجاه السرعة الزاوية. انظر الشكل (21).

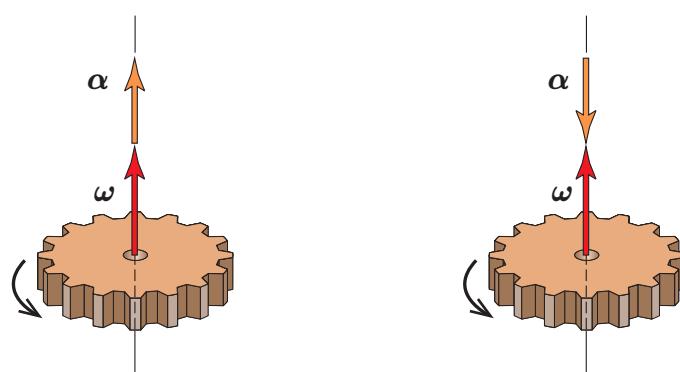
مثلاً؛ عند دوران جسم حول المحور (z) بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة يكون متوجه السرعة الزاوية باتجاه محور $(z+)$. أمّا عند دوران الجسم باتجاه حركة عقارب الساعة حول المحور نفسه فيكون متجه السرعة الزاوية باتجاه محور $(z-)$.

أما متوجه التسارع الزاوي فيكون باتجاه متوجه السرعة الزاوية عندما يدور الجسم بتسارع، وبعكس اتجاه متوجه السرعة الزاوية عندما يدور الجسم بتباطؤ. **لاحظ الشكل (22).**

متجها (α) و (ω) باتجاهين متعاكسيين:
السرعة تتزايد.

متجها (α) و (ω) باتجاهين متعاكسيين:
السرعة تتناقص.

الشكل (22): العلاقة بين متجهي السرعة الزاوية والتسارع الزاوي.



عزم القصور الذاتي والقانون الثاني لنيوتن في الحركة الدورانية

Moment of Inertia and Newton's Second Law for Rotational Motion

عندما يؤثر عزم محصل ثابت في جسم؛ فإنه يكتسب تسارعاً زاوياً ثابتاً. وهذا يناظر القانون الثاني لنيوتن في الحركة الانتقالية؛ فالقوة المحصلة الثابتة تُكتسب الجسم تسارعاً خطياً ثابتاً.

في الحركة الانتقالية يكتب القانون الثاني لنيوتن في الصورة الآتية: $\sum F = ma$ ، ويمكن التوصل إلى صيغة مُقابلة لهذه الصيغة للحركة الدورانية، حيث مقدار العزم المُمحصل يناظر القوة المحصلة، والتسارع الزاوي يُناظر التسارع الخطى. أما الكتلة (m) التي تعد مقياساً لممانعة الجسم للتغير في حركته الانتقالية فيقابلها ما يعرف بعزم القصور الذاتي.

يعد عزم القصور الذاتي (I) Moment of inertia مقياساً لممانعة الجسم للتغير حاليه الحركة الدورانية، تماماً كما الكتلة (m) مقياس لممانعة الجسم للتغير حاليه الحركة الانتقالية. وبذلك يمكن كتابة العلاقة الآتية للحركة الدورانية والتي تقابل القانون الثاني لنيوتن في الحركة الانتقالية:

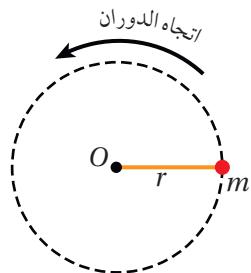
$$\sum \tau = I\alpha$$

حيث τ مقدار العزم المحصل المؤثر في جسم أو نظام. يُحسب عزم القصور الذاتي (I) لجسم نُقطي، كتلته (m)، يبعد مسافة عمودية (r) عن محور دوران عمودي على مستوى الصفحة يمر بالنقطة (O) كما يبيّن الشكل (23)، باستخدام العلاقة الآتية:

$$I = mr^2$$

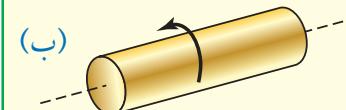
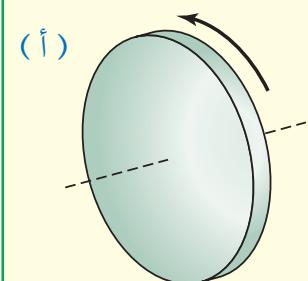
ويُقاس بوحدة ($kg \cdot m^2$) حسب النظام الدولي للوحدات. ويوضح الجدول (1) عزم القصور الذاتي لأجسام مختلفة.

يعتمد عزم القصور الذاتي على كيفية توزيع الكتلة حول محور الدوران، فكلما توزعت كتلة الجسم بعيداً عن محور دورانه؛ فإن عزم القصور الذاتي له يكون أكبر. فمثلاً، عزم القصور الذاتي لحلقةٍ رقيقةٍ نصف قطرها (r) وكتلتها (m) كما هو مبيّن في الجدول (1) يساوي (mr^2). أمّا عزم القصور الذاتي للأسطوانة مُصنّمة كتلتها (m)، ونصف قطرها (r)؛ فيساوي ($\frac{1}{2}mr^2$).



الشكل (23): جسم نقطي يدور حول محول ثابت.

- أَفْخَر:** يبيّن الشكل (24) أسطوانتين (أ) و (ب) متساويتان في الكتلة. مُعتمداً على الشكل؛ أجب عن الأسئلة الآتية، موظّحاً إجابتي:
1. أيهما أصعب؛ تحريك الإسطوانة؟ (أ) أم (ب) بالسرعة الزاوية نفسها؟
 2. أيهما أصعب؛ إيقاف الإسطوانة؟ (أ) أم (ب) عندما تتحرّك حركة دورانية بالسرعة الزاوية نفسها؟

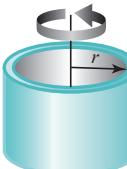
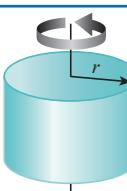
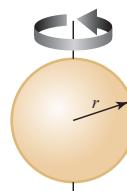
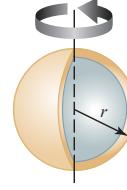
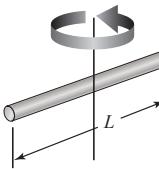
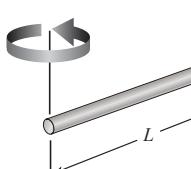


الشكل (24): أسطوانات متساويتان في الكتلة ومختلفتان في نصف القطر.

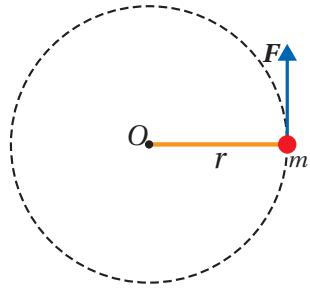
كذلك يعتمد عزم القصور الذاتي على موقع محور الدوران، كما هو موضح في الجدول (1). فعزم القصور الذاتي لقضيب كتلته (m)، وطوله (L)، يدور حول محور عمودي على القضيب مارًّا بمتصرفه يساوي ($\frac{1}{12} mL^2$)، أمّا عندما يكون محور الدوران عموديًّا على القضيب ويمرُّ بطرفه؛ فإنّ عزم القصور الذاتي له يساوي ($\frac{1}{3} mL^2$)، وهذا يعني أنه يلزم عزم أقلًّ لتدوير القضيب حول محور عموديٍّ عليه، ويمرُّ في متصرفه مقارنةً مع الحالة عندما يكون محور الدوران عموديًّا عليه ويمرُّ في أحد طرفيه.

أتحقق: ما المقصود بعزم القصور الذاتي؟

الجدول [1]: عزم القصور الذاتي لأجسام مختلفة كتلة كل منها (m):*

الجسم	موقع محور الدوران	الشكل	عزم القصور الذاتي
حلقةٌ رقيقةٌ أو أسطوانةٌ مجوفة.	يمر بالمركز عموديًّا على مستوى قاعدتها.		$I = mr^2$
أسطوانةٌ مُصَمَّمةٌ منتظمَةٌ أو قرصٌ دائريٌّ.	يمر بالمركز عموديًّا على مستوى قاعدتها.		$I = \frac{1}{2} mr^2$
كرةٌ مُصَمَّمةٌ منتظمَةٌ.	يمر بمركزها.		$I = \frac{2}{5} mr^2$
كرةٌ مجوفةٌ.	يمر بمركزها.		$I = \frac{2}{3} mr^2$
قضيبٌ منتظمٌ.	عموديٌّ على القضيب ويمر بمتصرفه.		$I = \frac{1}{12} mL^2$
قضيبٌ منتظمٌ.	عموديٌّ على القضيب ويمر بطرفه.		$I = \frac{1}{3} mL^2$

* الجدول ليس للحفظ.



كرة كتلتها (3.0 kg) مثبتة في نهاية قضيب فلزيّ خفيفٍ طوله (0.80 m)، وتتحرّك حركةً دورانيةً في مستوىً أفقيًّا بتأثير قوّة مماسيةً (F) ثابتةً في المقدار حول محور ثابتٍ (O). عموديًّا على مستوى الصفحة يمُرُّ في النهاية الأخرى للقضيب، كما هو موضّح في الشكل (25). إذا بدأت الكرة حرکتها من السكون بتسارع زاويٍ ثابتٍ، بحيث أصبحت سرعتها الزاويّة (ω rad/s) خالد (5.0 s)؛ فأحسِّ مقدار ما يأتي بإهمال كتلة القضيب الفلزيّ:

أ. التسارع الزاوي للكرة.
ب. العزم المُحصل المؤثر في الكرة.
ج. القوة المماسية (F) المؤثرة في الكرة.

المُعطيات: $m = 3.0 \text{ kg}$, $r = 0.80 \text{ m}$, $\omega_i = 0.0$, $\omega_f = 8\pi \text{ rad/s}$, $t = 5.0 \text{ s}$.

المطلوب: $\alpha = ?$, $\sum \tau = ?$, $F = ?$

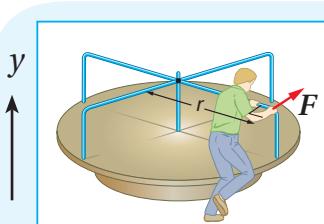
الحلّ:

أ . الكرة تدور بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة؛ فتكون سرعتها الزاوية موجبة، وأستخدم المعادلة الآتية لحساب مقدار التسارع الزاوي.

$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{\omega_f - \omega_i}{t}$$

$$= \frac{8\pi - 0.0}{5.0} = 5.0 \text{ rad/s}^2$$

بـ. بدايةً أحسب عزم القصور الذاتي للكرة حول



الشكل (26): لعبة القرص الدوار.

- أ . العزم المحصل المؤثر في اللعبة.

ب. التسارع الزاوي للّعبة.

ج. السرعة الزاوية للّعبة بعد (2.0 s) من بدء دورانها.

د. التسارع الزاوي للّعبة عندما يجلس طفل كتلته (20.0 kg) على بُعد (1.5 m) من محور الدوران، بافتراض الطفل حسماً نقطاً.

استخدم الأرقام لعبَة القرص الدوار الموضحة في الشكل (26)؛ تكون من قرصٍ مُصمَّم قابل للدوران حول محور ثابتٍ يمُرُّ في مركزه باتجاه محور لا. أثُر شخص بقوة مماسية (F) ثابتة في المقدار عند حافة القرص مقدارها (250 N). إذا علمت أن كتلة القرص الدوار (50.0 kg) ونصف قطره (2.0 m)، وبإهمال قوى الاحتكاك وافتراض قرص اللعبَة منتظم توزيع الكتلة، وبدأت اللعبَة الدورانَ من السكون بتسارُع زاويٍ ثابتٍ بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة، فأحسَّ مقدار ما يأتي:

مراجعة الدرس

1. الفكرة الرئيسية: ما الكميات الفيزيائية الالزمة لوصف الحركة الدورانية لجسم؟

2. **استنتاج:** السرعة الزاوية لجسم عند لحظة زمنية معينة تساوي (3 rad/s) ، وتتسارعه الزاوي عند اللحظة نفسها (-2 rad/s^2) . أجب عما يأتي:

أ. هل يدور الجسم باتجاه حركة عقارب الساعة أم بعكسه؟ أفسّر إجابتي.

ب. هل يتزايد مقدار سرعته الزاوية أم يتناقص؟ أفسّر إجابتي.

3. **استنتاج:** يدور إطار دراجة بسرعة زاوية ثابتة حول محور ثابت. هل تتغير السرعة الزاوية لأجزاء الإطار بالانتقال من داخله إلى حافته الخارجية؟ أوضح إجابتي.

4. علام يعتمد عزم القصور الذاتي لجسم؟

5. **استخدم الأرقام:** إطار دراجة نصف قطره (0.5 m) ، ووزن القصور الذاتي له (2.0 kg.m^2) ، ويدور بسرعة زاوية ابتدائية (10 rad/s) باتجاه حركة عقارب الساعة. أثرت في الأطارات قوة احتكاك مماسية مقدارها (8 N) فتوقف عن الحركة. أحسب المدة الزمنية من لحظة تأثير القوة إلى أن توقف الإطار عن الحركة.

6. **أفارن:** يبين الشكل قضيباً فلزياً طوله (L) مهملاً الكتلة مثبت في طفيه كرتين متماثلين مهملاً للأبعاد. دور النظام حول محور عمودي على مستوى الصفحة يمر في (أ): منتصف القضيب الفلزى، (ب): إحدى الكرتين. في أي من الحالتين (أ) و (ب) يلزم عزم محصل أكبر لبدء تدوير النظام؟ أفسّر إجابتي حسابياً.



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

1. جسمان متماثلان A و B على سطح الأرض؛ الجسم A عند خط الاستواء، والجسم B عند قطبها الشمالي.

أي مما يأتي يعبر بشكل صحيح عن العلاقة بين سرعتي الجسمين الزاوية؟

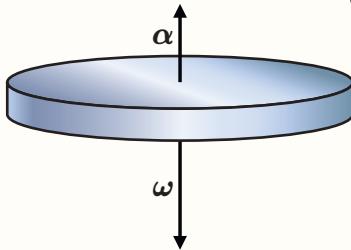
د. $\omega_A = \omega_B = 0$

ج. $\omega_A = \omega_B \neq 0$

ب. $\omega_A > \omega_B$

أ. $\omega_A < \omega_B$

2. يبيّن الشكل المجاور متجلّهي السرعة الزاويّة (ω) والتسارع الزاويّ (α) لقرص يدور حول محور (y) بالاعتماد على الشكل، وعند النظر إلى القرص من الأعلى، نستنتج أن الجسم:



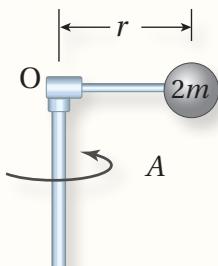
أ . يتسرّع، وحركته باتجاه حركة عقارب الساعة.

ب. يتباطأ، وحركته باتجاه حركة عقارب الساعة.

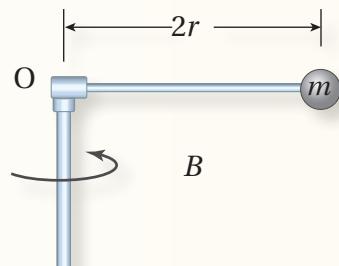
ج. يتسرّع، وحركته عكس اتجاه حركة عقارب الساعة.

د . يتباطأ، وحركته عكس اتجاه حركة عقارب الساعة.

3. يبيّن الشكل كرتين فلزّيتين مهمّلتين الأبعاد، كتلتيهما ($m_A = 2m$) و ($m_B = m$). تتصل كُلُّ منهما بقضيب فلزّي كتلته مهمّلة، وت دوران حول محور يمر بالنقطة (O) كما يبيّن الشكل. العلاقة بين عزمي القصور الذاتي للنظامين:



$$I_A = I_B \text{ .}$$



$$I_A = \frac{1}{4} I_B \text{ .}$$

$$I_A = \frac{1}{2} I_B \text{ .}$$

$$I_A = 2I_B \text{ .}$$

4. قرص صلب متجانس نصف قطره (1 m) وكتلته (75 kg) قابل للدوران حول محور يمُر في مركزه، أثّرت فيه قوة مماسية ثابتة؛ فحركته من السكون بتسرّع زاوي ثابت، بحيث أصبحت سرعته الزاويّة ($2\pi \text{ rad/s}$) بعد مرور (2.5 s). فإن مقدار عزم القوّة بوحدة (N.m) يساوي:

$$\text{ب. } 78.2$$

$$\text{أ . } 56.4$$

$$\text{د . } 94.2$$

$$\text{ج. } 128.8$$

5. كرة مصمّمة كتلتها (5.0 kg)، ونصف قطرها (10 cm)، تتحرّك حرّكة دوارانية حول محور ثابت يمُر في مراكزها. فتغيّر سرعتها الزاويّة من (20 rad/s) إلى (40 rad/s) خلال (5 s)؛ إذًا فإنّ مقدار العزم المحصل المؤثّر في الكرة خلال هذه الفترة الزمنية:

$$\text{ب. } 8 \times 10^{+2} \text{ N.m}$$

$$\text{أ . } 8 \times 10^{-2} \text{ N.m}$$

$$\text{د . } 4 \times 10^{+2} \text{ N.m}$$

$$\text{ج. } 4 \times 10^{-2} \text{ N.m}$$

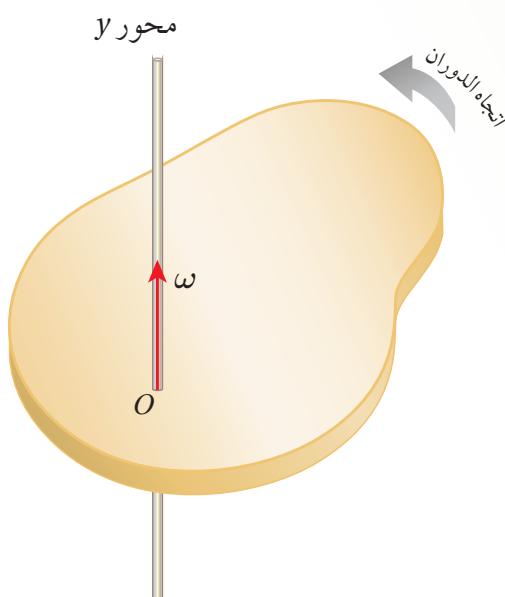
الطاقة الحركية الدورانية

الطاقة الحركية الخطية لجسم ترتبط بحركته الانتقالية. أما الجسم الذي يدور حول محور ثابت فإنه لا ينتقل من مكانٍ إلى آخر، ولكنه يمتلك طاقةً حركيةً دورانيةً.

يوضح الشكل (27) جسمًا يتحرك حركةً دورانيةً حول محور ثابت (محور z) بسرعةٍ زاويةٍ ثابتة (ω). تُحسب الطاقة الحركية الدورانية (KE_R) لهذا الجسم بالعلاقة الآتية:

$$KE_R = \frac{1}{2} I \omega^2$$

حيث (I) عزم القصور الذاتي للجسم، و (ω) سرعته الزاوية. ومثل أشكال الطاقة الأخرى؛ تُناسس الطاقة الحركية الدورانية بوحدة (J). الألحوظ التناظر بين الطاقة الحركية الخطية ($\frac{1}{2} m v^2$) والطاقة الحركية الدورانية ($\frac{1}{2} I \omega^2$)، حيث تُقابل الكميتان (I ، ω) في الحركة الدورانية الكميتين (m ، v) في الحركة الخطية على الترتيب.



الشكل (27): جسمٌ يتحرك حركةً دورانيةً
حول محور z ؛ بسرعةٍ زاويةٍ ثابتة (ω).

القلة الرئيسية:

للزخم الخطبي نظيرٌ في الحركة الدورانية يسمى الزخم الزاوي، ويكون الزخم الزاوي محفوظاً في الأنظمة المعزلة؛ حيث العزم المُحصل المؤثر في الجسم يساوي صفراء.

نتائج التعلم:

- تُحسب الطاقة الحركية الدورانية لجسم.
- تُعرف الزخم الزاوي لجسم.
- تُثبت قانون حفظ الزخم الزاوي لنظام معزل.
- تُعبر عن قانون حفظ الزخم الزاوي بمعادلة رياضية.

المفاهيم والمصطلحات:

الزخم الزاوي

قانون حفظ الزخم الزاوي

Law of Conservation of Angular Momentum

أتحقق: علامَ تعتمدُ الطاقة الحركية الدورانية
لجسم؟ وما وحدة قياسها؟

قرص مصممٌ منتظمٌ متماثلٌ كتلته (2.0 kg)، ونصف قطره (0.50 m)، يتحرّك حركةً دورانيةً ثابتةً مقدارُها (8.0 rad/s) حول محورٍ ثابتٍ عموديٍّ على مركزه. بالاستعانة بالجدول (١)؛ أحسب الطاقة الحركية الدورانية للقرص.

المعطيات:

$$m = 2.0 \text{ kg}, r = 0.50 \text{ m}, \omega = 8.0 \text{ rad/s}, I = \frac{1}{2} mr^2$$

المطلوب:

$$KE_R = ?$$

الحل:

بالرجوع إلى الجدول (١)؛ فإن عزم القصور الذاتي للقرص المصمم:

$$I = \frac{1}{2} mr^2$$

$$= \frac{1}{2} \times 2.0 \times (0.50)^2 = 0.25 \text{ kg.m}^2$$

ثم تُحسب الطاقة الحركية الدورانية باستخدام العلاقة:

$$KE_R = \frac{1}{2} I \omega^2$$

$$= \frac{1}{2} \times 0.25 \times (8)^2$$

$$= 8 \text{ J}$$

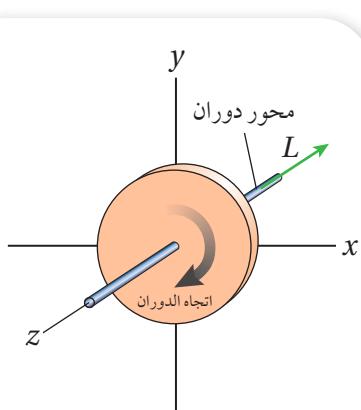
لتمرين

أستخدم الأرقام: يتحرّك جزيء الأكسجين (O_2) حركةً دورانيةً حول محورٍ ثابتٍ عموديٍّ على مُنتصف المسافة بين ذرتي الأكسجين المكوّنتين له، بسرعةٍ زاويَّةٍ ثابتةٍ مقدارُها ($4.6 \times 10^{12} \text{ rad/s}$). إذا علمتُ أنَّ عزم القصور الذاتي لجزيء الأكسجين حول محور دورانه يساوي ($1.95 \times 10^{-46} \text{ kg.m}^2$) عند درجة حرارة الغرفة؛ فأحسبُ الطاقة الحركية الدورانية لجزيء.

أفكِر: في المثال ٩؛ إذا تغيَّر موقع محور الدوران للقرص، مع بقاء مقدار السرعة الزاويَّة ثابتاً، فهل تتغيَّر الطاقة الحركية الدورانية؟ أوْضح إجابتَي.

الزَّخْمُ الزَّاوِيَّيِّ وَحْفَظُهُ

Angular Momentum and its Conservation



الشكل (28): متجه الزَّخْمِ الزَّاوِيَّيِّ.

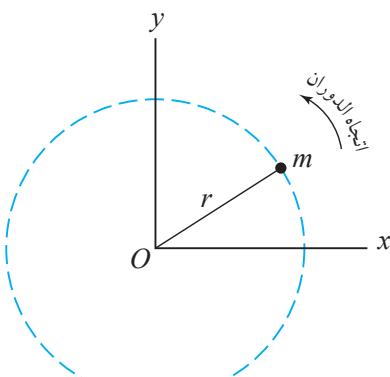
درستُ في الوحدة الأولى الزَّخْمُ الخطَّيِّ لأجسامٍ مُتَحْرِكَةٍ حرَكةً انتقاليةً. وفي أثناء دراستي لهذه الوحدة؛ وجدتُ أنَّ السرعة في الحركة الانتقالية تُقابِلُها السرعة الزَّاوِيَّةُ في الحركة الدُّورانية، والكتلة يُقابِلُها عزم القصور الذاتي. وبصورة مماثلة يوجد للزَّخْمِ الخطَّيِّ (p) نظيرٌ دُورانيٌّ يُسَمَّى **الزَّخْمُ الزَّاوِيَّيِّ** (L) **Angular momentum**؛ يُعرَفُ بِأَنَّهُ يُساوي ناتج ضربِ عزم القصور الذاتي للجسم أو النَّظام في سرعته الزَّاوِيَّةِ. وهو كمِيَّةٌ مُتَجَهَّةٌ، رمزُهُ (L)، ووحدة قياسه ($\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$) حسبَ النَّظام الدُّولِيِّ للوحدات.

يُعطى مقدار الزَّخْمِ الزَّاوِيَّيِّ لجسمٍ يَتَحَرَّكُ حَرَكَةً دُورانِيَّةً حول محورٍ ثابتٍ بِالعَلَاقَةِ:

$$L = I\omega$$

ويكون اِتِّجاهُ الزَّخْمِ الزَّاوِيَّيِّ بِاتِّجاهِ السرعة الزَّاوِيَّةِ المُتَجَهَّةِ، فمثلاً؛ عند دوران قرصٍ حول محور (z)، باتِّجاهِ حركة عقاربِ الساعَةِ كما هو موضَعُ في الشكل (28)، يكون متجهُ الزَّخْمِ الزَّاوِيَّيِّ داخِلًا إِلَى الصَّفَحةِ باتِّجاهِ ($-z$). أما عند دورانِ الجسمِ بِعَكْسِ اِتِّجاهِ حركة عقاربِ الساعَةِ، يكون متجهُ الزَّخْمِ الزَّاوِيَّيِّ خارِجًا من الصَّفَحةِ باتِّجاهِ ($+z$).

المثال 10



الشكل (29): جسيمٌ يتَحَرَّكُ في مسَارٍ دائِرِيٍّ نصفُ قطره (r) حول محور z .

يتَحَرَّكُ جُسِيمٌ كتلته (50.0 g) حول محورٍ ثابتٍ (محور z) عند النَّقطَةِ (O)، في مسَارٍ دائِرِيٍّ نصفُ قطره (20.0 cm)، بسرعةٍ زَاوِيَّةٍ ثابتَةٍ مقدارُهَا (5.0 rad/s) بعَكْسِ اِتِّجاهِ دورانِ عقاربِ الساعَةِ، كما هو موضَعُ في الشكل (29). أَحْسِبْ مقدارَ الزَّخْمِ الزَّاوِيَّيِّ للجُسِيمِ حول هذا المحورِ، وأَحْدِدْ اِتِّجاهَهُ.

المُعْطَياتُ: $m = 50.0 \times 10^{-3} \text{ kg}$, $r = 20.0 \times 10^{-2} \text{ m}$, $\omega = 5.0 \text{ rad/s}$, $I = mr^2$.

المطلوبُ: $L = ?$

الحلّ:

أَحْسِبْ مقدارَ الزَّخْمِ الزَّاوِيَّيِّ للجُسِيمِ بِالعَلَاقَةِ:

$$L = I\omega = mr^2\omega$$

$$= 50.0 \times 10^{-3} \times (20.0 \times 10^{-2})^2 \times 5.0$$

$$= 1.0 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$$

باستخدام قاعدة قبضة اليد اليمنى؛ فإنَّ متجهَ الزَّخْمِ الزَّاوِيَّيِّ يكون خارِجًا من الصَّفَحةِ على امتدادِ محورِ الدُّورانِ.

الزخم الزاوي والعزم

ينص القانون الثاني لنيوتون في الحركة الخطية على أن القوة المُمحصلة المؤثرة في جسمٍ تساوي المعدل الزمني للتغير في زخم الخطى ($\sum F = \frac{dp}{dt}$). ويمكن كتابة علاقة مماثلة في الحركة الدورانية بدلالة الزخم الزاوي كما يأتي:

$$\sum \tau = \frac{dL}{dt}$$

أي أن العزم المُمحصل المؤثر في جسم يتحرك حركةً دورانيةً حول محور ثابت يُساوي المعدل الزمني للتغير في زخمه الزاوي حول المحور نفسه. أي أن العزم المُمحصل ($\sum \tau$) يُسبب تغير الزخم الزاوي (dL)، تماماً كما تُسبب القوة المُمحصلة ($\sum F$) تغير الزخم الخطى (dp).

وعند حدوث تغير في الزخم الزاوي (ΔL) خلال فترة زمنية (Δt)؛ فإنه يمكن كتابة العلاقة السابقة في الحركة الدورانية كما يأتي:

$$\sum \tau = \frac{\Delta L}{\Delta t}$$

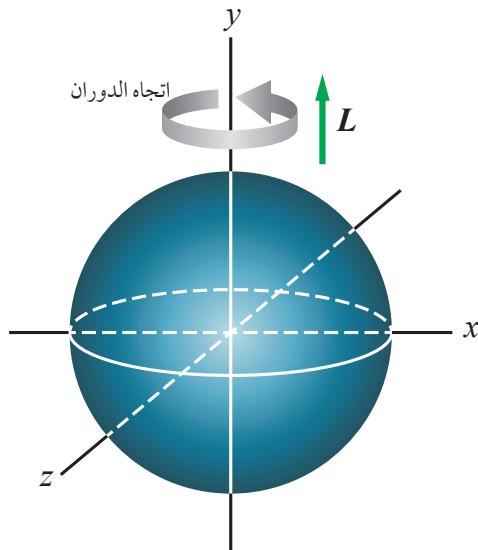
✓ **اتحقق:** أوضح العلاقة بين العزم المُمحصل المؤثر في جسم والمعدل الزمني للتغير في زخمه الزاوي. أفسّر إجابتي.

الربط بالعلوم الحياتية

عندما يرفف الطائر بجناحيه؛ فإنه يقوم بتدوير الجناحين إلى أعلى وأسفل حول الكتف. يمتلك الطائر الطنان أجنة صغيرة ذات عزم قصور ذاتي صغير، لذا يستطيع الطائر تحريك جناحيه بسرعة (تصل إلى 70 ذبذبة في الثانية). وعلى التقىض من ذلك فإن النسر لديه أجنة ضخمة يصعب تحريكها بسبب عزم القصور الذاتي الكبير. يرفف النسر بأجنحته بمعدل ذبذبة واحدة في الثانية عند الإقلاع، ولكنه في معظم الأوقات يميل إلى التحلق مع ثبات جناحيه.



المثال ١١



كرة مُصَمَّةٌ منتظمةٌ توزيع الكتلة، كتلتها (5.0 kg) ونصف قطرها (10.0 cm)، تتحرّك حركةً دورانيةً حول محور ثابت (محور y) يمرُّ في مركزها، بسرعةٍ زاويةٍ ثابتةٍ (20 rad/s) بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة عند النظر إليها من أعلى، كما هو موضح في الشكل (30). أحسب مقدار الزخم الزاوي للكرة حول هذا المحور، وأحدّد اتجاهه.

المُعْطَيات: $m = 5.0 \text{ kg}$, $r = 10.0 \times 10^{-2} \text{ m}$,

$$\omega = 20 \text{ rad/s}, I = \frac{2}{5} mr^2.$$

المطلوب: $L = ?$

الحلّ:

أستخدم العلاقة الآتية لحساب مقدار الزخم الزاوي لجسم يدور حول محور ثابت، وباستخدام الجدول (1)؛

أجد أنّ عزم القصور الذاتي لكرة مُصَمَّةٌ منتظمةٌ توزيع الكتلة يساوي $(\frac{2}{5} mr^2)$.

$$\begin{aligned} L &= I\omega = \frac{2}{5} mr^2 \omega \\ &= \frac{2}{5} \times 5.0 \times (10.0 \times 10^{-2})^2 \times 20 \\ &= 0.4 \text{ kg.m}^2/\text{s} \end{aligned}$$

الزخم الزاوي للكرة موجب، إذ يكون اتجاه الزخم الزاوي باتجاه محور z الموجب عند النظر إليها من أعلى؛ لأنّ الكرة تدور بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة كما يبدو للناظر.

لتمرين

أستخدام الأرقام: في المثال السابق، إذا تغيّر مقدار السرعة الزاوية للكرة حول محور الدوران نفسه بتسارع زاوي ثابت، بحيث أصبح (40 rad/s) خلال (5 s)، فأحسب مقدار العزم المحصل المؤثّر في الكرة خلال هذه الفترة الزمنية.

حفظ الزخم الزاوي Conservation of Angular Momentum

درستُ سابقاً قانون حفظ الزخم الخطّي لنظام معزول، حيث القوّة المُمحصلة المؤثرة في النظام تساوي صفرًا. ويمكن التوصل إلى علاقـة مماثلة في الحركة الدورانـية عندما يكون العزم المـحصل المؤثر في جـسم أو نظام صـفرـا ($\sum \tau = 0$)؛ عندهـا يكون الزـخم الزـاوي ثـابـتاً مع مرورـ الزـمن، أي أنـ:

$$\frac{dL}{dt} = 0$$

وهـذا يـعـني، أنـ الزـخم الزـاوي (L) للنـظام مـحـفـوظ، أي أنـ:

$$L_f = L_i$$

تـعبـر هذهـ العـلـاقـة عنـ قـانـون حـفـظ الزـخم الزـاوي Law of conservation of angular momentum، الذي يـنصـ أنـ: «الـزـخم الزـاوي لنـظام معـزـول يـقـى ثـابـتاً فيـ المـقـدـار والـاتـجـاه»، إذـ يـكـونـ العـزم المـحـصـل المؤـثر فيـ النـظـام المـعـزـول صـفرـاً. أيـ أنـ الزـخم الزـاوي الـابـتدـائـي لنـظام معـزـول يـسـاوـي زـخـمهـ الزـاويـ النـهـائيـ. إذاـ أـعـيدـ توـزـيعـ كـتـلـةـ النـظـامـ المـعـزـولـ الـذـيـ يـتـحـركـ حـرـكـةـ دـورـانـيـ؛ فـإـنـ عـزمـ الـقـصـورـ الذـاتـيـ وـالـسـرـعـةـ الرـأـوـيـ لـلـنـظـامـ يـتـغـيـرـانـ بـحـيثـ يـقـىـ الزـخمـ الزـاويـ ثـابـتاـ. أيـ يـمـكـنـ التـعـيـيرـ عنـ قـانـون حـفـظ الزـخمـ الزـاويـ بـالـصـورـةـ الـآـتـيـةـ:

$$I_f \omega_f = I_i \omega_i = \text{constant}$$

يـبـيـنـ الشـكـلـ (31) مـتـزلـجـاـ علىـ الجـليـدـ يـدـورـ حـولـ محـورـ عمـودـيـ عـلـىـ سـطـحـ الـأـرـضـ وـيـمـرـ بـمـرـكـزـ كـتـلـتـهـ. يـمـكـنـ التـعـاـمـلـ معـ المـتـزلـجـ عـلـىـ أـنـهـ نـظـامـ مـعـزـولـ، حيثـ وزـنـهـ وـالـقـوـةـ الـعـمـودـيـ تـؤـثـرـانـ فـيـ الـاتـجـاهـ الرـأـيـيـ وـعـزـمـ كـلـ مـنـهـمـاـ حـولـ محـورـ الدـورـانـ يـسـاوـيـ صـفـرـاـ. إـضـافـةـ إـلـىـ ذـلـكـ؛ فـإـنـ مـقـدـارـ قـوـةـ الـاحـتكـاكـ بـيـنـ الـزـلاـجـاتـ وـالـجـليـدـ صـغـيرـ وـيـمـكـنـ إـهـمـالـ عـزـمـ النـاتـجـ عـنـهـ حـولـ محـورـ الدـورـانـ. وـهـذـاـ يـعـنـيـ أـنـ الزـخمـ الزـاويـ لـلـمـتـزلـجـ مـحـفـظـ ($I \omega = \text{constant}$). وـعـنـدـمـاـ يـضـمـ المـتـزلـجـ قـدـمـيـهـ وـذـرـاعـيـهـ نـحـوـ جـسـدـهـ يـقـلـ عـزـمـ قـصـورـهـ الذـاتـيـ؛ لـذـاـ يـزـدـادـ مـقـدـارـ سـرـعـتـهـ الزـاوـيـةـ بـحـيثـ يـقـىـ زـخـمهـ الزـاويـ ثـابـتاـ.

أـتـحـقـقـ: عـلـامـ يـنـصـ قـانـونـ حـفـظـ الزـخمـ الزـاويـ؟ ✓



(أ) متزلج يدور بسرعة زاوية ω_i .



(ب) متزلج يدور بسرعة زاوية ω_f .

الـشـكـلـ (31): يـقـلـ عـزـمـ الـقـصـورـ الذـاتـيـ لـلـمـتـزلـجـ عـنـدـمـاـ يـضـمـ يـدـيـهـ نـحـوـ جـسـمـهـ وـيـضـمـ قـدـمـيـهـ مـعـاـ، فـيـزـدـادـ مـقـدـارـ سـرـعـتـهـ الزـاوـيـةـ بـحـيثـ يـسـبـبـ قـانـونـ حـفـظـ الزـخمـ الزـاويـ.

ثلاثة أطفال كتلهم (32 kg , 28 kg , 20 kg) يقفون عند حافة لعبة دوّارة على شكل قرص دائري متظم كتلته $M = 100 \text{ kg}$ ونصف قطره $r = 2.0 \text{ m}$, ويدور بسرعة زاوية ثابتة مقدارها 2.0 rad/s , حول محور دوران ثابت عمودي على سطح القرص، ويمُر في مركزه باتجاه محور الدوران. تحرك الطفل الذي كتلته 20 kg ووقف عند مركز القرص. أحسب مقدار السرعة الزاوية الجديدة للعبة الدوّارة.

المعطيات:

$$M = 100 \text{ kg}, r = 2.0 \text{ m}, m_1 = 20 \text{ kg}, m_2 = 28 \text{ kg}, m_3 = 32 \text{ kg}, \omega_i = 2.0 \text{ rad/s}$$

المطلوب:

$$\omega_f = ?$$

الحل:

يمكن التعامل مع النظام على أنه معزول؛ لذا يكون الزخم الزاوي محفوظاً.طبق قانون حفظ الزخم الزاوي:

$$L_i = L_f$$

$$I_i \omega_i = I_f \omega_f$$

عزم القصور الذاتي الابتدائي (I_i) للنظام يساوي مجموع عزوم القصور الذاتية للأطفال الثلاثة والقرص، ويُحسب باستخدام المعادلة الآتية:

$$\begin{aligned} I_i &= \frac{1}{2} Mr^2 + (m_1 + m_2 + m_3)r^2 = \frac{1}{2} \times 100 \times 4 + (20 + 28 + 32) \times 4 \\ &= 520 \text{ kg.m}^2 \end{aligned}$$

عزم القصور الذاتي النهائي (I_f) للنظام يساوي مجموع عزوم القصور الذاتية لطفلين فقط والقرص؛ لأن عزم القصور الذاتي للطفل الذي كتلته 20 kg يساوي صفرًا؛ لأنَّه يقف عند مركز القرص الذي يمر فيه محور الدوران، ويُحسب باستخدام المعادلة الآتية:

$$I_f = \frac{1}{2} Mr^2 + (m_2 + m_3)r^2 = \frac{1}{2} (100)(4) + (28 + 32)(4) = 440 \text{ kg.m}^2$$

باستخدام قانون حفظ الزخم الزاوي؛ أجد أنَّ:

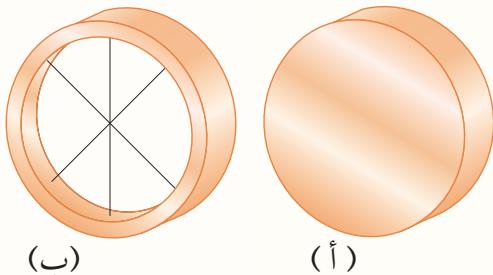
$$520 \times 2 = 440 \omega_f$$

ومنها أجد أنَّ مقدار السرعة الزاوية النهائي يساوي:

$$\begin{aligned} \omega_f &= \frac{1040}{440} \\ &= 2.37 \text{ rad/s} \approx 2.4 \text{ rad/s} \end{aligned}$$

مراجعة الدرس

1. الفكرة الرئيسية: أقارن بين الكميات الخطية الآتية وما يناظرها في الحركة الدورانية: الطاقة الحركية الخطية، القانون الثاني لنيوتون، الزخم الخطبي، حفظ الزخم الخطبي.



2. بيّنُ الشكل المجاور لأسطوانتين إحداهما مُصمَّمة والأخرى مجوّفة، متماثلتين في الكتلة والأبعاد والسرعة الزاويّة، وت دوران حول محور ثابت عمودي على المركز الهندسي لكُلِّ منهما. أجب عن الأسئلة الآتية:

أ . **أقارن** بين الزخم الزاوي للأسطوانتين، هل هما متساويان أم لا؟ أفسّر إجابتي.

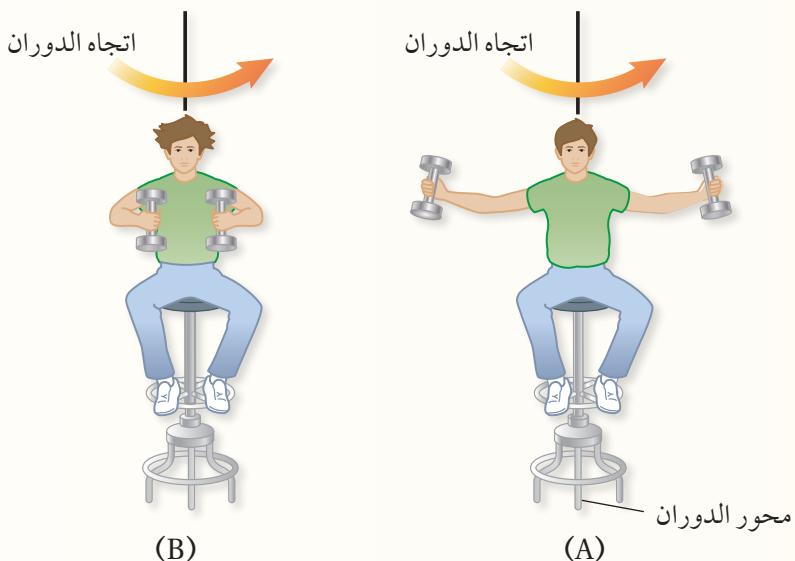
ب . **أقارن** بين الطاقة الحركية الدورانية للأسطوانتين، هل هما متساويان أم لا؟ أفسّر إجابتي.

ج. **استخدم الأرقام**: أحسب مقدار السرعة الزاويّة الثابتة للأسطوانة (أ) عندما تكون طاقتها الحركية الدورانية (32 J). علماً بأن كتلتها (2.0 kg)، ونصف قطرها (0.50 m).

3. **التفكير الناقد**: يجلس طالبٌ على كرسيٍّ قابلٍ للدوران حول محور رأسٍّي، ويُمسك ثقلاً بكلٍّ يد. بدايةً؛ يدور الطالب والكرسي بسرعة زاويّة (ω) ويمدها بمدودتان، كما هو موضّح في الشكل A، فيكون عزم القصور الذاتي للنظام (I) طلب المعلم من الطالب ضمّ ذراعيه، كما في الشكل B؛ فأصبحت سرعة الزاوية النهائية (5) أضعاف سرعته الابتدائيّة. أجب عن الأسئلة الآتية:

أ . ما سبب الزيادة في السرعة الزاويّة؟

ب . أجد نسبة الطاقة الحركية الدورانية النهائية إلى الطاقة الحركية الدورانية الابتدائية.



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

1. أسطوانتان متساويتان في الكتلة، ونصف قطر الأسطوانة الثانية ثلاثة أضعاف الأولى. تدور كُلُّ منهما حول محور يمرُّ في مركزها بالسرعة الزاوية نفسها. فإن النسبة بين مقداري الطاقة الحركية الدورانية لهما $\left(\frac{KE_1}{KE_2}\right)$ تكون:

د. $\frac{1}{9}$

ج. $\frac{1}{3}$

ب. 3

أ. 9

2. يقف ثلاثة أطفال متساوين في الكتلة عند حافة لعبة دوّارة على شكل قرص دائري منتظم، تدور اللعبة بسرعة زاوية ثابتة حول محور ثابت عمودي على سطح القرص ويمرُّ في مركزه. إذا اقترب أحد الأطفال من مركز القرص؛ فإن ما يحدث لـ كُلُّ من مقداري السرعة الزاوية (ω)، والزخم الزاوي (L) :

ب. ω يزداد، L يزداد.

د. ω يقل، L يبقى ثابت.

ج. ω يزداد، L يبقى ثابت.

3. توقف فتاة كتلتها (50 kg) على طرف لعبة قرص دوّار نصف قطره (4 m)؛ فيكون عزم القصور الذاتي للنظام المكوّن منهما ($2400 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$)، ويدور النظام بزخم زاوي مقداره ($4800 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$)، إذا تحركت الفتاة لتصبح على بعد (2 m) من محور اللعبة؛ فإن السرعة الزاوية للعبة بوحدة بوحدة (rad/s) تساوي:

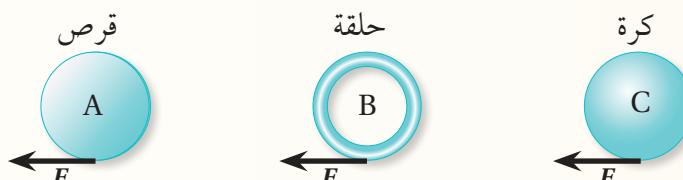
د. 4

ج. 2.67

ب. 2.4

أ. 2

* يبين الشكل كرةً مصممةً وحلقةً وقرصاً تتساوى في نصف القطر والكتلة. أثرت في الأجسام الثلاثة قوى مماسية متساوية فحركتها من السكون ، حول محور ثابت يمر في مركز كل منها عموديا عليه. معتمدا على البيانات المثبتة في الشكل أجب عن الفقرتين الآتيين:



4. العبارة الصحيحة التي تصف الزخم الزاوي للأجسام الثلاثة بعد مدة من الزمن:

أ. الكرة المصممة لها أكبر زخم زاوي.

ب. الحلقة لها أكبر زخم زاوي.

ج. القرص له أكبر زخم زاوي.

د. الأجسام الثلاثة متساوية في الزخم الزاوي.

5. الترتيب التنازلي للسرعة الزاوية للأجسام الثلاثة بعد مدة من الزمن:

أ. $\omega_A > \omega_B > \omega_C$

ب. $\omega_A > \omega_C > \omega_B$

ج. $\omega_C > \omega_A > \omega_B$

د. $\omega_B > \omega_A > \omega_C$



جسر عبدون

يتطلّب بناء المنشآت - من جسور وسدود ومباني إلى ناطحات السحاب - من المصمّمين والمهندسين المعماريين تحديد القوى المؤثرة في هيكلها وتراسيبيها؛ للمحافظة عليها ثابتةً ومتزنةً سكونيًّا وعدم انهيارها. ويُعنَى الاتزان السكوني بحساب القوى المؤثرة في هذه الهياكل والتراسيب، لتحديد إذا كانت قادرة على تحمل هذه القوى دون حدوث تشوهٍ أو تصدعٍ أو كسرٍ فيها.

تصمم الجسور بأشكال مختلفة، ويعرض كل منها لقوى مختلفةٍ تؤثّر في مكوّناته، تعمل على شدّها أو ضغطها. إذ تؤثّر فيها قوى ضغطٍ يجعلها تنكمش وتتقلّص، وقوى شدٍّ يجعلها تمتدّ ويزداد طولها؛ كما هو موضّح في الشكل؛ لذا يجبأخذ هذه القوى في الحسبان عند تصميم أي جسر؛ كي لا يتعرّض إلى التصدع والالتواء والانكماش، لعدم مقدرتها على تحملها، وإيجاد وسائل وتصاميم مناسبة تعمل على توزيع هذه القوى على مختلف أجزاء الجسر بالشكل الذي يمنع تمرّكزها في منطقةٍ واحدة.

لرسم أفضل التصاميم وتنفيذها باستخدام المواد المناسبة؛ يراعي المصمّمون والمهندسو المعماريون في مراحل تصميم الجسور المختلفة وإنشائها تحقيق شرطي الاتزان في مكوناتها جميّعاً. ولتكون الجسور أنظمةً متّزنةً؛ يجبأخذ قياساتٍ دقيقةً مضبوطةً لهذه القوى ومواقع دعامات الجسر والمسافات بينها ومقدار أكبر ثقل يمكن أن يتحمّله الجسر دون أن ينهار.



مراجعة الوحدة

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

1. وحدة قياس الزخم الزاوي حسب النظام الدولي للوحدات هي:

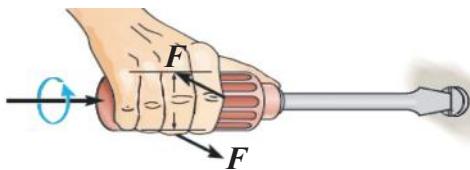
kg.m²/s.د N/s ج. kg.m/s ب. N.m/s أ.

2. وحدة قياس عزم القصور الذاتي حسب النظام الدولي للوحدات هي:

kg.m/s د. kg.m²/s ج. kg.m² ب. N.m/s أ.

3. قرص منتظم الشكل يدور حول محور (z) باتجاه حركة عقارب الساعة بتسارع زاوي ثابت، إذا كان مقدار سرعته الزاوية عند لحظة ما (3.5 rad/s)، وبعد مرور (5 s) أصبح مقدار سرعته (4.5 rad/s) وبالاتجاه نفسه، فإن تسارعه الزاوي مقداراً واتجاهًا:

0.2 rad/s², -z د. 0.2 rad/s², +z ج. 1.6 rad/s², -z ب. 1.6 rad/s², +z أ.



4. تستخدم سلمى - كما يُبيّن الشكل - مفك براغي لفك برجي ولم يتمكّن من ذلك. يجب على سلمى استخدام مفك آخر يكون مقبضه:

أ. أطول من مقبض المفك المستخدم.

ج. أكثر سمكاً من سمك المقبض المستخدم.



5. يستخدم خالد - كما يُبيّن الشكل - مفتاح شد لفك صامولة إطار سيارة ولم يتمكّن من ذلك. يجب على خالد استخدام مفتاح شد يكون مقبضه:

أ. أطول من مقبض مفتاح الشد المستخدم.

ج. أكثر سمكاً من سمك مفتاح الشد المستخدم.

ب. أقصر من مقبض مفتاح الشد المستخدم.
د. أقل سمكاً من سمك مفتاح الشد المستخدم.



6. كسر مضربي بيسبول منتظم الكثافة في موقع مركز كتلته إلى جزأين؛ كما هو موضّح في الشكل. إنَّ الجزء ذا الكتلة الأصغر هو:

أ. الجزء الموجود على اليمين.

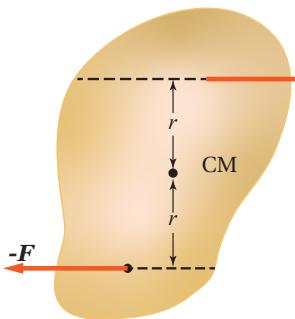
ب. الجزء الموجود على اليسار.

ج. كلا الجزأين له الكتلة نفسها.

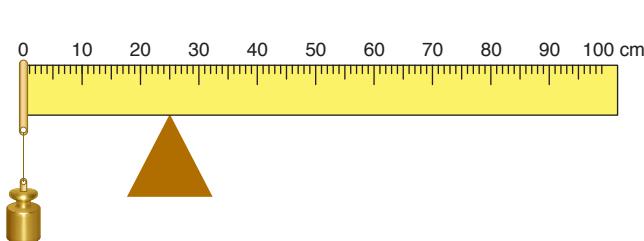
د. لا يمكن تحديده.

مراجعة الوحدة

7. الشكل المجاور يبيّن قوّتين متساويتين مقداراً ومتوازيتين اتجاهها تؤثّران على بُعد متساوٍ من مركز كتلة جسم موجود على سطح أملس. أيُّ الجمل الآتية تصفُ بشكلٍ صحيح حالة الجسم الحركيّة عند اللحظة المُبيّنة؟



- أ. الجسم في حالة اتّزانٍ سكونيٍّ؛ حيث القوّة المحصلّة المؤثّرة فيه تساوي صفرًا.
- ب. الجسم ليس في حالة اتّزانٍ سكونيٍّ، ويبدأ الدوران بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة.
- ج. الجسم في حالة اتّزانٍ سكونيٍّ، حيث العزم المحصلّ المؤثّر فيه يساوي صفرًا.
- د. الجسم ليس في حالة اتّزانٍ سكونيٍّ، ويبدأ الدوران باتّجاه حركة عقارب الساعة.

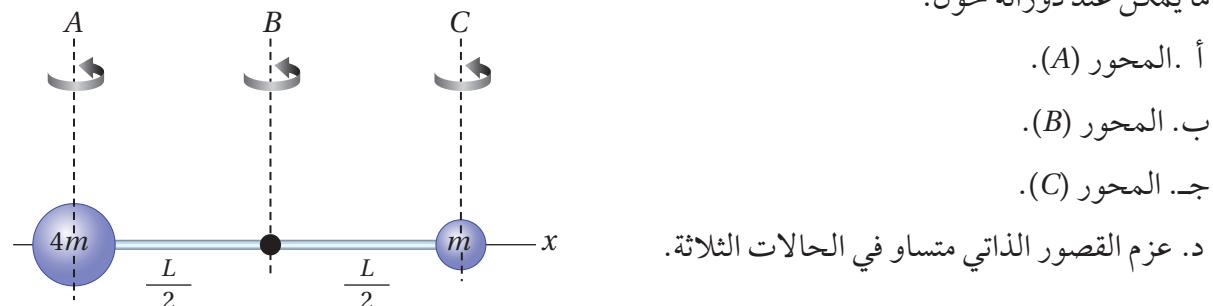


8. مسطرةٌ متريةٌ منتظمَةٌ ترتكزُ على نقطَةٍ عند التدرِيج (25 cm). عُلِقَ ثُقلٌ كتلته (m) عند التدرِيج (0 cm) للمسطرة، فاقتَرَنَتْ أفقياً، كما هو موضَّعُ في الشكل المجاور. إنَّ كتلة المسطرة تساوي:

- أ. m
- ب. $0.5 m$
- ج. $0.4 m$
- د. $0.2 m$

9. قضيبٌ فلزيٌّ خفيفٌ مهمل الكتلة، طوله (L)، ثُبِّتَ على طرفيه كُرتانٌ نقطيتان كتلتاهما ($m, 4m$)، كما في الشكل المجاور. (A, B, C) ثلاثة محاور يمكن للنظام أن يدور حولها. إِذَا يكون عزم القصور الذاتي للنظام أكبر

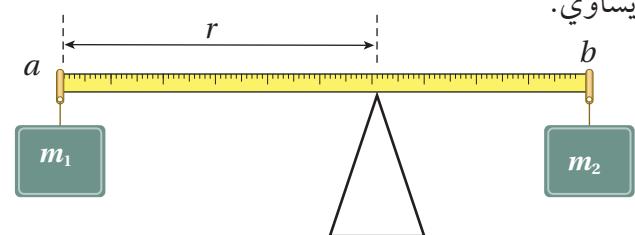
ما يمكن عند دورانه حول:



- أ. المحور (A).
- ب. المحور (B).
- ج. المحور (C).
- د. عزم القصور الذاتي متساوٍ في الحالات الثلاثة.

10. يبيّن الشكل مسطرةً متريةً منتظمَةً كتلتها مهملة، ومعلق بطرفيها (a) و (b) ثقلين كتلتיהםا (m_1) و (m_2). كي تزن

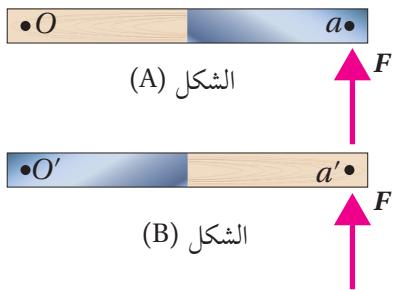
المسطرة؛ فإنَّ بُعدَ نقطَة الارتكاز (r) عن الطرف (a) يساوي:



$$\frac{m_1 + m_2}{m_2} \cdot \frac{m_2}{m_2 + m_1} = \frac{1}{m_1 - m_2}$$

مراجعة الوحدة

أقرأ الفقرة الآتية، ثم أجيب عن السؤالين (11 و 12).



* يوضح الشكل المجاور مسطرة مترية نصفها خشب ونصفها الآخر فولاذ.
في الشكل (A) المسطرة قابلة للدوران حول محور عمودي عليها عند نهايتها الخشبية (النقطة O)، وأثرت فيها بقوة (F) عند نهايتها الفولاذية (النقطة a). وفي الشكل (B) جعلت المسطرة قابلة للدوران حول محور عمودي عليها عند نهايتها الفولاذية (النقطة O')، وأثرت فيها بالقوة (F) نفسها عند نهايتها الخشبية (النقطة a').

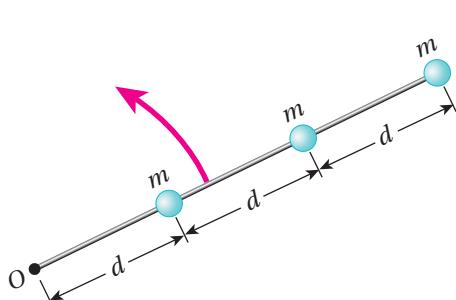
11. العلاقة بين الصحيحة للتان تصفان عزم القصور الذاتي، والتسارع الزاوي للمسطرتين حول محوري دورانهما:

$$I_A = I_B, \alpha_A = \alpha_B \quad \text{د. } I_A > I_B, \alpha_A < \alpha_B \quad \text{ج. } I_A < I_B, \alpha_A > \alpha_B \quad \text{ب. } I_A > I_B, \alpha_A > \alpha_B \quad \text{أ. }$$

12. باستخدام القانون الثاني لنيوتون في الحركة الدورانية، وإذا علمت أن المسطرتين بدأتا الدوران من السكون؛ فإن

الجملة الصحيحة التي تصف الزخم الزاوي للمسطرتين بعد مدة من الزمن:

- أ. المسطرتان متساويتان في الزخم الزاوي؛ لأن عزم القصور الذاتي لهما متساوٍ.
- ب. المسطرتان متساويتان في الزخم الزاوي؛ لأن العزم المحصل المؤثر فيهما متساوٍ.
- ج. المسطرتان مختلفتان في الزخم الزاوي؛ لأن عزم القصور الذاتي لهما غير متساوٍ.
- د. المسطرتان مختلفتان في الزخم الزاوي؛ لأن العزم المحصل المؤثر فيهما غير متساوٍ.



13. يبين الشكل المجاور نظاماً يتكون من ثلاث كرات صغيرة تتصل بقضيب فلزي خفيف كتلته مهملة. يدور النظام بسرعة زاوية (ω) حول محور يمر بالنقطة (O) عمودياً على الصفحة. الزخم الزاوي للكرة الوسطى:

$$\frac{4}{3} m \omega d^2 \quad \text{ب. } m \omega d^2 \quad \text{أ. } \frac{1}{3} m \omega d^2 \quad \text{د. } 4 m \omega d^2 \quad \text{ج. } \frac{1}{3} m \omega d^2$$

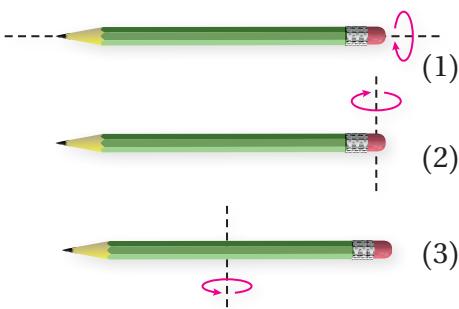
2. **أُفسِرُ** ما يأتي:

- أ. عند حساب العزم المحصل المؤثر في جسم؛ تهملقوى التي يمْرُّ خط عملها في محور الدوران.
- ب. يعتمد عزم القصور الذاتي لجسم على موقع محور دورانه.

3. **أُقْرَنُ** بين كتلة جسم وعزم القصور الذاتي له.

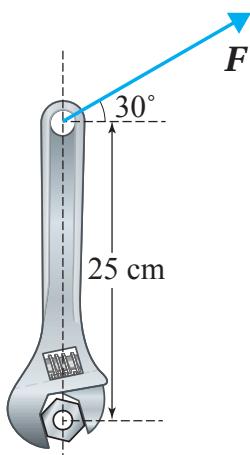
4. قطعة بوليسترية على شكل خارطة المملكة الأردنية الهاشمية. كيف أحْدَدْ مركز كُتُبِتها عملياً؟

مراجعة الوحدة



5. **أستنتج:** يُبيّن الشكل ثلاَث حالات لقلم يدور حول المحاور الموضحة في الشكل. أُرتِّب الحالات الثلاَث من حيث مقدار العزم اللازم لتدوير القلم من الأسهل إلى الأصعب.

6. **أفسر:** يقفز غطاس عن لوح غطسٍ متوجّهاً نحو سطح الماء في البركة. وبعد مغادرته لوح الغطس بدأ بالدوران، وضمّ قدميه وذراعيه نحو جسمه. لماذا ضمّ الغطاس قدميه وذراعيه نحو جسمه في أثناء أدائه لحركات الدوران؟

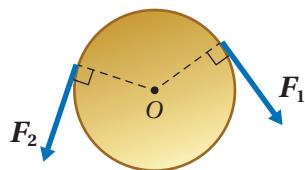


7. **استخدم الأرقام:** تستخدم فاتن مفتاح شدّ لشدّ صامولةٍ؛ كما هو موضح في الشكل المجاور. أستعينُ بالشكل والبيانات المثبتة فيه للإجابة عما يأتي، علمًا أنّ مقدار العزم اللازم لفك الصامولة يساوي (50.0 N.m).

أ. أحسب مقدار القوة اللازم التأثير بها في طرف مفتاح الشدّ في الاتّجاه الموضّع في الشكل.

ب. أحدد اتّجاه دوران مفتاح الشدّ.

8. **استخدم الأرقام:** قرص نصف قطره (2.0 cm)، وكتلته (20.0 g)، أثرت فيه القوى المماسية المبينة في الشكل، فبدأ بالدوران من السكون حول محور عمودي على مركزه (O)، بحيث أصبحت سرعته الزاوية (250 rad/s) بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة وذلك بعد مرور (1.25 s) من بدء الحركة. إذا كان مقدار القوة ($F_1 = 0.1 \text{ N}$) فما مقدار (F_2)؟

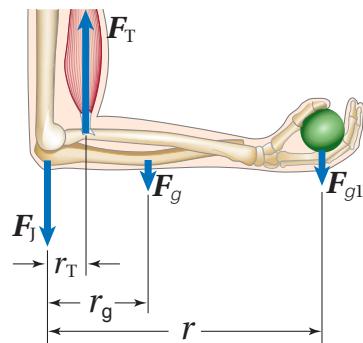


9. **استخدم الأرقام:** تقفُ هناء على طرف القرص الدوار للعبة الحصان الدوار. إذا علمتُ أنّ كتلة قرص اللعبة بمحطوياته ($2 \times 10^2 \text{ kg}$) ونصف قطره (4 m)، وسرعته الزاوية (2 rad/s)، وكتلة هناء (50 kg)، وبافتراض أنّ كتلة القرص موزّعة بشكّل منتظم، والنظام المكوّن من اللعبة وهناء معزول، أحسب مقدار ما يأتي:

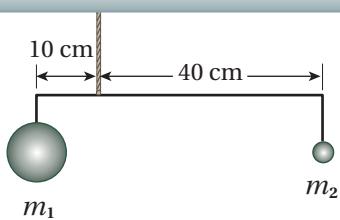
أ. الزخّم الزاويّ الابتدائي للنظام.

ب. السرعة الزاويّة للعبة عندما تنتقل هناء إلى موقع على بعد (2 m) من محور دوران اللعبة.

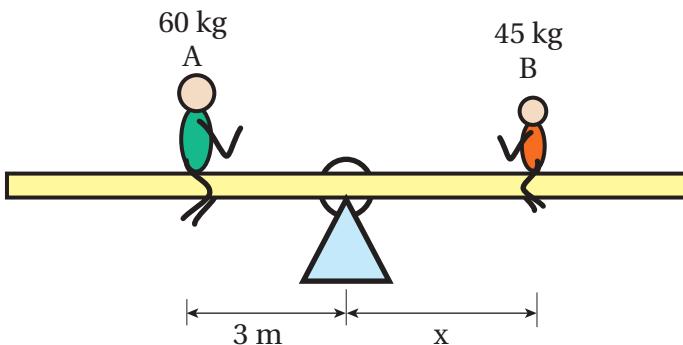
مراجعة الوحدة



10. **استخدم الأرقام:** ترفع جمانة بيدها ثقلاً وزنه (40.0 N)، في أثناء ممارستها للتمارين الرياضية في نادٍ رياضي. إذا علمت أنّ نقطة التقاء العضلة ثنائية الرأس بالساعد تبعد (r_T = 5.0 cm) عن المرفق، ووزن عظم الساعد والأنسجة فيه (30.0 N) ويؤثر على بُعد (r_g = 15.0 cm) عن المرفق، وبُعد نقطة تأثير وزن الثقل المحمول في اليد (r = 35.0 cm) عن المرفق، والساعد متّزن أفقياً والقوى جميعها رأسية في الوضع الموضح في الشكل، فأحسب ما يأتي:
- قوّة الشد في العضلة (F_T) المؤثرة في الساعد.
 - القوّة التي يؤثّر بها المرفق في الساعد (F_J).

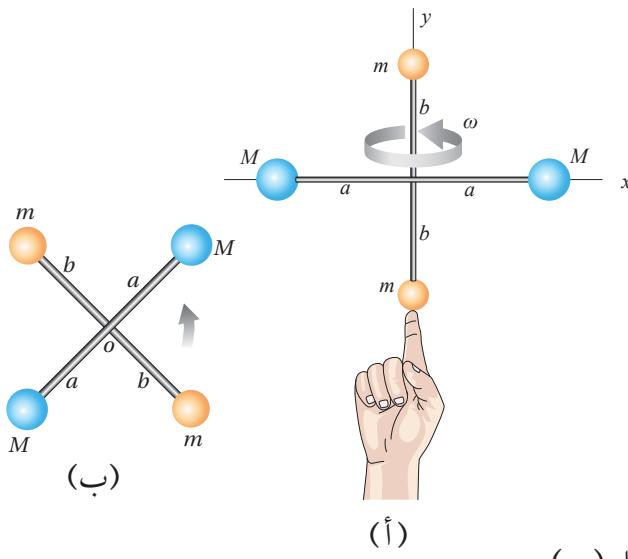


11. **استخدم الأرقام:** في الشكل المجاور كرتان معلقتان بقضيب أفقي مهمّل الكتلة، إذا كان مقدار كل من الكتلتين ($m_1 = 11 \text{ kg}$) و ($m_2 = 2 \text{ kg}$) . أين يجب تعليق كتلة ثالثة ($m_3 = 3 \text{ kg}$) بالنسبة إلى نقطة تعليق النظام كي يكون النظام متّزناً؟
12. يبيّن الشكل المجاور ولدين كتلتיהם ($m_A = 60 \text{ kg}$) و ($m_B = 45 \text{ kg}$)، يجلسان على لعبة (See-Saw) تتكون من لوح خشبي، فيتنزل اللوح عند نقطة الارتكاز الواقعة عند منتصفه.



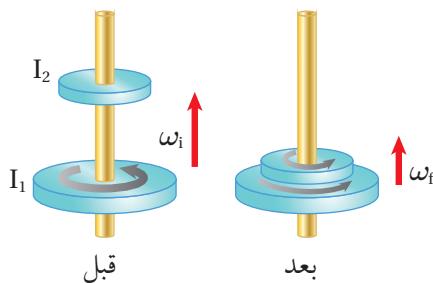
- أ. استخدم الأرقام:** أحسب بعد الولد (B) عن نقطة الارتكاز.
- ب. أصدر حكما:** هل سيفي اللوح متّزناً أم لا، للحالتين الآتيتين، ثمّ أوضح إجابتي.
- إذا تحرك كل ولد نحو نقطة الارتكاز مسافة (1 m).
 - إذا تحرك الولد (A) مسافة (1 m) مبتعداً عن نقطة الارتكاز، بينما تحرك الولد (B) مسافة ($\frac{4}{3} \text{ m}$) مبتعداً عن نقطة الارتكاز.

مراجعة الوحدة



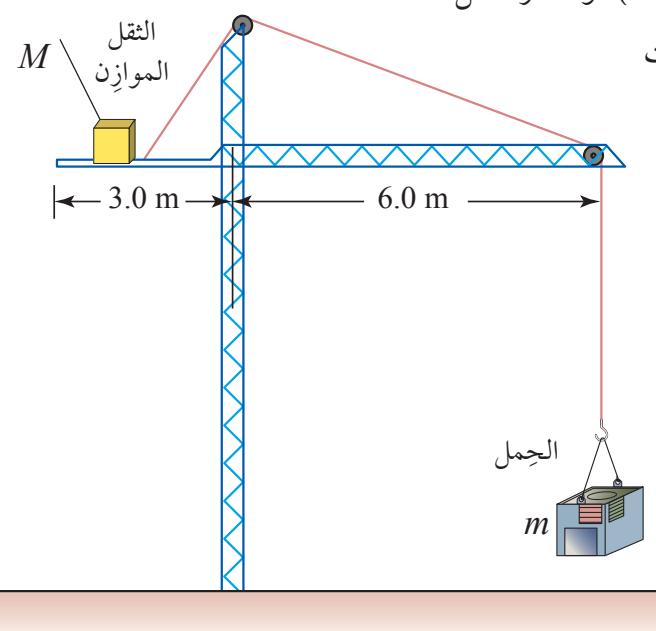
13. استخدم الأرقام: يدور نظامٌ يتكون من أربع كراتٍ صغيرة مثبتةٍ في نهايات قصبيين مُهمَلِي الكتلة كما هو موضح في الشكل المجاور. إذا علمت أن $(a = b = 20 \text{ cm})$ ، $(M = 100 \text{ g})$ ، $(m = 50 \text{ g})$ ، وأن اقطار الكرات مهملة مقارنة بطول القصبيين؛ بحيث يمكن عدّها جسيماتٍ نقطية؛ أحسب الطاقة الحرارية الدورانية للنظام عندما يدور بسرعة زاوية (2 rad/s) حول محور (a) كما في الشكل (أ).

ب. محور (z) عمودي على مستوى الصفحة كما في الشكل (ب).



14. استخدم الأرقام: يدور قرص عزم القصور الذاتي له (I_1) حول محور ثابت أملس بسرعة زاوية $(\omega_i = 20 \text{ rad/s})$ ، أُسقط نحوه قرص ساكن عزم القصور الذاتي له (I_2) فتحرك كجسم واحد، كما يبين الشكل المجاور. إذا علمت أن عزم القصور الذاتي (I_1) ثالث أضعاف (I_2) . أحسب السرعة الزاوية النهائية (ω_f) .

15. استخدم الأرقام: تُستخدم بعض أنواع الرافع لرفع الأحمال الثقيلة إلى أعلى الأبراج والبنيات العالية. ويجب أن يكون العزم المُحَصَّل المؤثر في هذه الرافعة صفرًا؛ كي لا تدور أو تسقط؛ لذا يوجد ثقل موازن M على الرافعة لتحقيق اتزانها، حيث يُحرّك عادةً هذا الثقل تلقائياً عبر أجهزة استشعار ومحركات لموازنة الحِمل بدقة. يبيّن الشكل المجاور رافعةً في موقع بناءً ترفع حملاً مقداره $(3.0 \times 10^3 \text{ kg})$ ، ومقدار الثقل الموازن $(1.0 \times 10^4 \text{ kg})$. أستعين بالشكل والبيانات المثبتة فيه للإجابة عمّا يأتي، وبإهمال كتلة الرافعة.



أ. أحدد موقع الثقل الموازن عندما يكون الحمل مرفوعاً عن الأرض وفي حالة اتزانٍ سكونيًّا.

ب. أحسب مقدار أكبر كتلة يمكن أن تحملها الرافعة عندما يكون موقع الثقل الموازن عند طرفاها.

الوحدة

الكهرباء السكونية

Static Electricity

3

أتأمل الصورة

يؤدي تراكم الشحنات الموجبة في أعلى غيمة رعدية والشحنات السالبة في أسفلها، إلى نشوء فرق في الجهد الكهربائي بين هاتين المنطقتين. هذا الفرق في الجهد يدفع الشحنات الموجبة للانتقال من منطقة الجهد المرتفع (الموجب) إلى منطقة الجهد المنخفض (السالب)؛ فيحدث تفريغ كهربائي يظهر على شكل شرارة ؛ تعرف بالبرق، تحمل قدرًا كبيراً من الطاقة.

تعرض طائرات الركاب بشكل متكرر للبرق في أثناء مرورها خلال الغيوم. ماذا يحدث للطائرة عندما يضربها البرق وهي محليقة في الجو؟ هل تشكل الصواعق خطراً على الطائرات وركابها؟

الفكرة العامة:

تبحث الكهرباء السكنوية في الآثار الناتجة عن تراكم شحنات ساكنة على الأجسام، وبمعرفة التأثيرات التي تحدثها هذه الشحنات في الوسط المحيط بها، يمكن التقليل من الآثار السلبية الناتجة عنها، بالإضافة إلى الاستفادة منها في الكثير من التطبيقات العملية.

الدرس الأول: المجال الكهربائي

Electric Field

الفكرة الرئيسية: عند شحن جسم موصل؛ فإن الشحنات تستقر على سطحه الخارجي، ولحساب المجال الكهربائي الناشئ عن موصل مشحون نستخدم قانون غاووس.

الدرس الثاني: الجهد الكهربائي

Electric Potential

الفكرة الرئيسية: عندما يتحرك جسيم مشحون في مجال كهربائي؛ فإن المجال يؤثّر فيه بقوة كهربائية يمكن أن تبذل شغلاً على الجسم. هذا الشغل يُوصف باستخدام مفهومين هما طاقة الوضع الكهربائية، وفرق الجهد الكهربائي.

الدرس الثالث: المُواسعة الكهربائية

Electrical Capacitance

الفكرة الرئيسية: تختلف المُواسعات الكهربائية في أشكالها ومقادير مُواساعتها وطرائق توصيلها معًا؛ وتكون أهميتها في قدرتها على تخزين الطاقة الكهربائية، وتُستعمل في الكثير من التطبيقات العملية.

تجربة استهلاكية

تخطيط المجال الكهربائي المنتظم

المواد والأدوات: مصدر كهربائي عالي القدرة (0-3 kV) أو مولد فان دي غراف، طبق زجاجي، قطبان كهربائيان من الألمنيوم، قطع بلاستيكية عازلة لتشبيت القطبين، زيت الخروع أو أي زيت نباتي قليل اللزوجة، بذور أعشاب صغيرة الحجم (مثل بذور البقدونس).



إرشادات السلامة: الحذر عند استعمال مولد فان دي غراف، وعدم لمس التوصيلات الكهربائية ومصدر الجهد.

تحذير: جهد كهربائي عالٍ جداً يسبب صعقة كهربائية.

خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أتنفيذ الخطوات الآتية:

- أضع كميةً من الزيت في الطبق الزجاجي حتى ارتفاع (0.5 cm) تقريرًا، ثم أنثر فوقها كميةً قليلةً من بذور الأعشاب، وأحرّك الزيت بقضيب زجاجي رفيع كي تنتشر بذور الأعشاب فوق الزيت.
- أثبتت القطبين الكهربائيين في العازل بحيث ينتمس طرفاهما في الزيت، ثم أوصلهما بمصدر الطاقة الكهربائية أو بمولد فان دي غراف (عند استعماله بدلاً عن مصدر الطاقة عالي الجهد).
- بمساعدة معلمي / معلمتى؛ أضبط مصدر الطاقة على جهد يقع بين (2,000 - 3,000 volts)، أو أشغل مولد فان دي غراف (عند استعماله بدلاً عن مصدر الطاقة عالي الجهد).
- الاحظ** اصطدام البذور في الحيز بين الصفيحتين، حيث يمثل النمط الذي أحصل عليه خطوط المجال الكهربائي في الحيز بين الصفيحتين.
- بمساعدة معلمي / معلمتى؛ أطفئ مصدر الطاقة، أو أوقف مولد فان دي غراف وأفرّغ شحنته، ثم أغير المسافة بين القطبين داخل الزيت، وأكرر خطوات التجربة.

التحليل والاستنتاج:

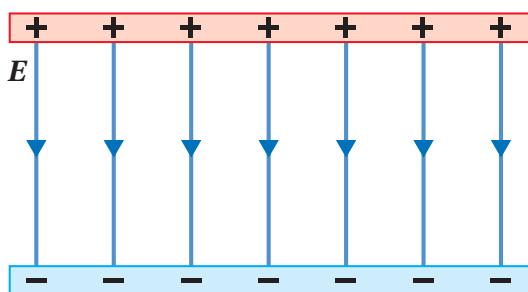
- أفسر** سبب استعمال زيت نباتي، وعدم استعمال الماء في الطبق الزجاجي.
- أصف خطوط المجال الكهربائي في الحيز بين الصفيحتين، وأوضح إجابتي بالرسم.
- أفسر** سبب تأثير بذور الأعشاب بقوى كهربائية؛ على الرغم من عدم شحنها قبل التجربة.

خطوط المجال الكهربائي Electric Field Lines

يُولَّد الجسم المشحون في الحيز المحيط به مجالاً كهربائياً؛ يظهر تأثيره على شكل قوة كهربائية تؤثِّر في الأجسام المشحونة الأخرى التي تقع ضمن المجال.

للكشف عن المجال الكهربائي؛ تُستخدم شحنة اختبار صغيرة موجبة، حيث يؤثِّر المجال فيها بقوة كهربائية. ويرسم المسارات التي تسلكها شحنة الاختبار المتحركة تحت تأثير قوة المجال، يمكن تمثيل المجال الكهربائي بخطوط تُسمى خطوط المجال الكهربائي.

تُسهم خطوط المجال الكهربائي في معرفة طبيعة المجال المحيط بالجسم المشحون؛ الشكل (1/أ) يبين خطوط المجال الكهربائي الناتجة عن شحنة نقطية موجبة، حيث تنطلق الخطوط من الشحنة باتجاهات مختلفة، وتتباعد عن بعضها بزيادة البُعد عن الشحنة، فيدلُّ ذلك على أن المجال الناشئ عن الشحنة النقطية هو مجال غير منتظم؛ متغير مقداراً واتجاهًا. أما الشكل (1/ب) فيوضح خطوط المجال الكهربائي في الحيز بين صفيحتين موصلتين مشحونتين بشحنتين متساويتين في المقدار؛ إحداهما موجبة والأخرى سالبة، وهي خطوط مستقيمة ومتوازية وتشير بالاتجاه نفسه، فتدلُّ على مجال كهربائي منتظم؛ ثابت في المقدار والاتجاه عند النقاط جميعها داخله.



(ب): خطوط المجال في الحيز بين صفيحتين متوازيتين مشحونتين.

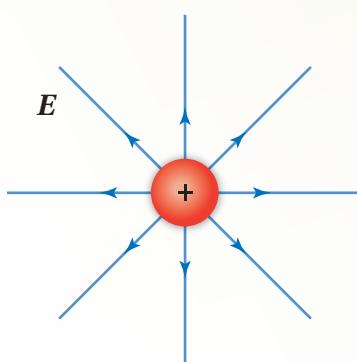
الفكرة الرئيسية:
عند شحن جسم موصل؛ فإن الشحنات تستقر على سطحه الخارجي، ولحساب المجال الكهربائي الناشئ عن موصل مشحون نستخدم قانون غاووس.

نتائج التعلم:

- أصف خطوط المجال لتوزيعات متصلة من الشحنات الكهربائية.
- أصف التدفق الكهربائي الذي يخترق سطحًا بمعادلة رياضية.
- أحسب مقدار المجال الكهربائي لتوزيعات متصلة من الشحنات.
- أصف حركة جسيم مشحون في مجال كهربائي منتظم.

المفاهيم والمصطلحات:

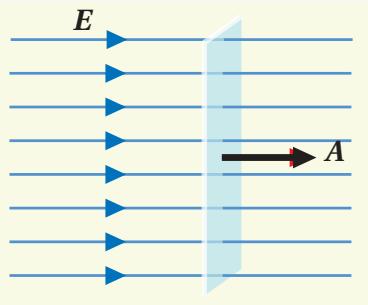
- | | |
|------------------------|------------------------|
| Electric Flux | التدفق الكهربائي |
| Gauss's Law | قانون غاووس |
| | الكثافة السطحية للشحنة |
| Surface Charge Density | Mجال كهربائي منتظم |
| Uniform Electric Field | |



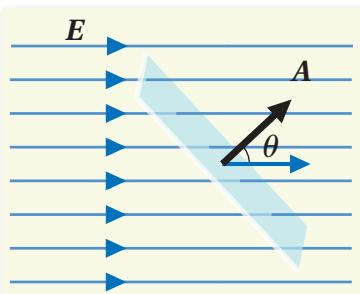
(أ): خطوط المجال لشحنة نقطية موجبة.

الشكل (1): خطوط المجال الكهربائي.

التدفق الكهربائي Electric Flux



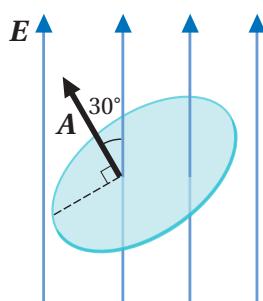
(أ) : التدفق الكهربائي عبر سطح مستواه عمودي على المجال.



(ب) : التدفق الكهربائي عبر سطح مستواه يميل عن المجال بزاوية.

الشكل (2): التدفق الكهربائي.

أتحقق: ما العوامل التي يعتمد عليها التدفق الكهربائي عبر سطح مستوي؟



الشكل (3): حساب التدفق الكهربائي.

$$A = \pi r^2 = \pi(0.1)^2 = 0.0314 \text{ m}^2$$

$$\Phi = EA \cos\theta = 2.0 \times 10^3 \times 0.0314 \times \cos 30^\circ = 54 \text{ N.m}^2/\text{C}$$

يبين الشكل (2/أ) خطوط مجال كهربائي منتظم مقداره (E)، تخترق سطحًا مستطيلاً مساحته (A)، ومستواه عمودي على المجال. وقد تعلمت مسبقاً، أن عدد خطوط المجال لكل وحدة مساحة يتناسب طردياً مع مقدار المجال، لذلك؛ فإن عدد الخطوط الكليّ التي تخترق السطح يتناسب طردياً مع ناتج الضرب (EA)، ويعتبر الناتج بالتدفق الكهربائي.

أما إذا دار السطح، كما في الشكل (2/ب)، ليصبح غير متوازي مع خطوط المجال، فإنّ عدد الخطوط التي تخترق السطح سوف يقلّ. ولحساب التدفق الكهربائي في هذه الحالة، نُعرّف متوجه المساحة (A)؛ وهو متوجه مقداره يساوي مساحة السطح، ويكون اتجاهه عمودياً على السطح، كما يبين الشكل. ثم نحدد الزاوية (θ) بين متوجهي المجال (E) والمساحة (A)، فيكون التدفق عبر السطح $(EA \cos\theta)$.

بصورة عامة، يعرف **التدفق الكهربائي** Electric flux بأنه ناتج الضرب النقطي لمتجه المجال الكهربائي (E) في متوجه المساحة (A)، ويعبر عنه بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$\Phi = EA = EA \cos\theta$$

اللحوظ أن التدفق الكهربائي كمية قياسية، ووحدة قياسه حسب النظام الدولي للوحدات ($\text{N.m}^2/\text{C}$).

المثال 1

أحسب التدفق الكهربائي عبر سطح دائرة نصف قطرها (0.10 m)، وضعت في مجال كهربائي منتظم مقداره ($2.0 \times 10^3 \text{ N/C}$) بحيث يصنع متوجه المساحة زاوية (30°) مع المجال، كما يبين الشكل (3).

$$\text{المعطيات: } r = 0.10 \text{ m}, \theta = 30^\circ, E = 2.0 \times 10^3 \text{ N/C}$$

المطلوب: $\Phi = ?$

الحل:

مساحة السطح، تحسب من العلاقة :

$$\text{ثم يحسب التدفق الكهربائي من العلاقة: } \Phi = EA \cos\theta = 2.0 \times 10^3 \times 0.0314 \times \cos 30^\circ = 54 \text{ N.m}^2/\text{C}$$

التدفق الكهربائي عبر سطح مغلق

Electric Flux Through a Closed Surface

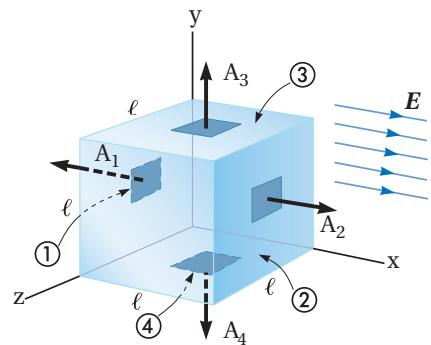
يبين الشكل (4) مكعباً موضوعاً في مجال كهربائي منتظم. يُعد المكعب مثلاً على سطح مغلق. ويمكن حساب التدفق عبر أحد أوجه المكعب باستخدام العلاقة ($\Phi = EA\cos\theta$)؛ وذلك برسم متوجه المساحة عمودياً على ذلك السطح نحو الخارج، ثم تحديد الزاوية (θ) بين متوجهي المجال والمساحة، وبين الشكل متوجهات المساحة المرسومة على أربعة من أوجه المكعب الستة. ويتبين من الشكل الأمور الآتية:

- تخترق خطوط المجال السطح (2) خارجة منه، والزاوية بين متوجهي المجال والمساحة ($\theta = 0^\circ$)، فيكون التدفق عبر السطح موجباً ($E_1 = EA\cos 0^\circ = EA$).
- تخترق خطوط المجال السطح (1) داخلة فيه، والزاوية بين متوجهي المجال والمساحة ($\theta = 180^\circ$)؛ فيكون التدفق عبر السطح سالباً ($E_2 = EA\cos 180^\circ = -EA$).
- لا تخترق خطوط المجال السطحين العلوي والسفلي (3، 4) حيث الزاوية ($\theta = 90^\circ$)، كذلك لا تخترق الخطوط الأسطح الجانبية الموازية للمجال؛ فيكون التدفق عبر هذه الأسطح يساوي صفرًا.
- التدفق الكلي (Φ_{net}) عبر المكعب هو مجموع التدفق عبر سطوح المكعب ويساوي صفرًا.

$$\Phi_{net} = EA - EA = 0$$

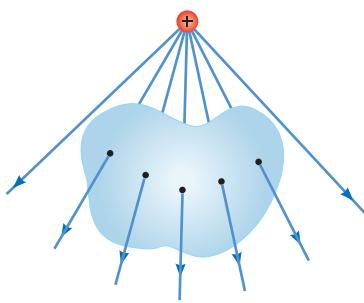
بوجه عام؛ فإن التدفق الكهربائي الكلي الناتج عن مجال كهربائي منتظم عبر سطح مغلق موضوع في المجال يساوي صفرًا.

عند رسم متوجه المساحة يجب مراعاة الفرق بين حساب التدفق عبر سطح مغلق وحساب التدفق عبر سطح مستوي، فالسطح ثلاثية الأبعاد؛ مثل الكرة أو المكعب هي أسطح مغلقة، يرسم متوجه المساحة دائماً عمودياً عليها نحو الخارج، فإذا كانت خطوط المجال خارجة من السطح يكون التدفق موجباً، وإذا كانت خطوط المجال داخلة في السطح يكون التدفق سالباً. أما عندما تخترق خطوط المجال سطحاً مستوياً؛ مثل المربع أو الدائرة، فلا توصف خطوط المجال بأنها داخلة أو خارجة من السطح، ويرسم متوجه المساحة عادةً مع اتجاه خطوط المجال.

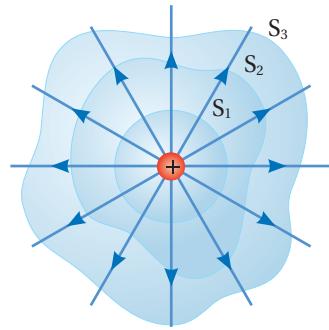


الشكل (4): مكعب موضوع في مجال كهربائي منتظم.

أتحقق: قد يكون التدفق الكهربائي عبر جزء من سطح مغلق موجباً أو سالباً. علام تدل إشارة التدفق؟



(ب): الشحنة المولدة للمجال تقع خارج السطح فيكون عدد الخطوط الداخلة إلى السطح مساوياً عدد الخطوط الخارجة منه.



(أ): التدفق عبر سطح مغلق يعتمد على الشحنة الكلية داخل السطح، ولا يعتمد على شكل السطح.

الشكل (5): التدفق الكهربائي عبر سطح مغلق.

قانون غاوس Gauss's law

يوضح قانون غاوس العلاقة بين التدفق الكهربائي الكلي عبر سطح مغلق، والشحنة الكهربائية المحتواة داخله، وينصُّ **قانون غاوس Gauss's law** أنَّ التدفق الكهربائي عبر سطح مغلق يساوي الشحنة الكلية داخل السطح مقسومةً على السماحية الكهربائية للهواء (الوسط المحاط بالشحنة). ويعطي بالعلاقة الآتية:

$$\Phi = \frac{q_{in}}{\epsilon_0}$$

حيث: (q_{in}) الشحنة الكلية المحتواة داخل السطح.
(ϵ_0) السماحية الكهربائية للهواء.

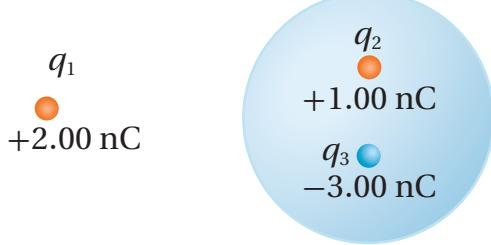
تخبرنا هذه العلاقة أنَّ التدفق الكهربائي الكلي عبر سطح مغلق، لا يعتمد على شكل السطح؛ فإذا افترضنا أنَّ ثلاثة سطح مختلفة (S_1, S_2, S_3) تحيط بشحنة نقطية (q)، كما يبيِّن الشكل (5/أ)؛ فإنَّ التدفق الكلّي يكون متساوياً عبر الأسطح الثلاثة؛ لأنَّ عدد الخطوط الكلّي التي تخترق كلاً من الأسطح الثلاثة يكون متساوياً.

أما التدفق الكهربائي عبر السطح المغلق المبيَّن في الشكل (5/ب)، فيساوي صفرًا؛ فالشحنة المُسبيَّة للمجال تقع خارج السطح، وعدد الخطوط الداخلة إلى السطح يساوي عدد الخطوط الخارجة منه.

أفكار: سطح غاوس كروي الشكل

- يحيط بشحنة نقطية (q)، موضوعة عند مركز السطح. أوضح ما يحدث للتندق الكهربائي في الحالات الآتية:
 - أ. إزاحة الشحنة عن المركز مع بقائها داخل السطح.
 - ب. مضاعفة الشحنة داخل السطح ثلاث مرات.
 - ج. مضاعفة نصف قطر السطح الكروي المحيط بالشحنة (q) مرتين.
 - د. استخدام مكعب يحيط بالشحنة (q) بدلاً من السطح الكروي.

المثال 2



الشكل (6): التدفق عبر سطح كروي

بداخله شحنات نقطية.

ثلاث شحنات نقطية موضوعة في الهواء، كما يبين الشكل (6)، معتمداً على البيانات المثبتة في الشكل؛ أحسب التدفق الكهربائي عبر السطح الكروي، علماً أن $(\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N.m}^2)$.

المعطيات: $q_1 = +2.00 \text{ nC}$, $q_2 = +1.00 \text{ nC}$, $q_3 = -3.00 \text{ nC}$

المطلوب: $\Phi = ?$

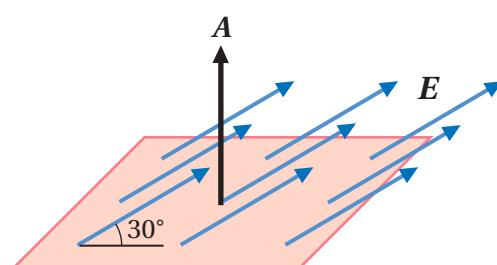
الحل:

التدفق الكهربائي يعتمد على الشحنة الكلية داخل السطح فقط:

$$\begin{aligned}\Phi &= \frac{q_{in}}{\epsilon_0} = \frac{q_2 + q_3}{\epsilon_0} \\ &= \frac{1.00 \times 10^{-9} - 3.00 \times 10^{-9}}{8.85 \times 10^{-12}} \\ &= -2.26 \times 10^2 \text{ N.m}^2/\text{C}\end{aligned}$$

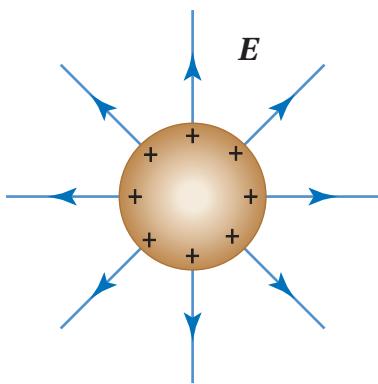
لاحظ أن إشارة التدفق الكلي عبر السطح سالبة؛ فيدل ذلك على أن عدد الخطوط الدخالة في السطح أكبر من عدد الخطوط الخارجة منه.

تمرين



استخدم الأرقام: مربع طول ضلعه (10 cm) تخترقه خطوط مجال كهربائي منتظم مقداره (240 N/C) ويصنع زاوية (30°) مع سطح المربع، كما يبين الشكل (7)، أحسب التدفق الكهربائي عبر المربع.

الشكل (7): التدفق عبر مربع تخترقه خطوط مجال كهربائي منتظم.



الشكل (8): توزيع الشحنات الكهربائية على السطح الخارجي للموصل الكروي بانتظام؛ فنولّد حوله مجالاً كهربائياً، وترسم خطوط المجال الكهربائي عموديةً على سطح الموصل.

أتحقق : لماذا تتواءم الشحنات على السطح الخارجي للموصل الكروي المشحون، ولا تستقر في الداخل؟

المجالات الكهربائية لتوزيعات متصلة من الشحنات

Electric Fields of a Continuous Charge Distributions

من التطبيقات المهمة لقانون غاوس، استخدامه في حساب المجالات الكهربائية الناشئة عن توزيعات متصلة من الشحنات الكهربائية، ومن الأمثلة على توزيع متصل من الشحنات؛ الموصل الكروي المشحون المبين في الشكل (8). عند شحن جسم موصل؛ فإن الشحنات تبتعد عن بعضها البعض بسبب تناقضها وتستقر على السطح الخارجي للموصل. ويمثل ناتج قسمة شحنة الموصل (Q) على مساحة سطحه (A)، ما يُعرف بالكثافة السطحية للشحنة، **Surface charge density**، ورمزها (σ)، وتُعرف بأنها كمية الشحنة لكل وحدة مساحة، ووحدة قياسها (C/m^2)، وتعطى بالعلاقة الآتية:

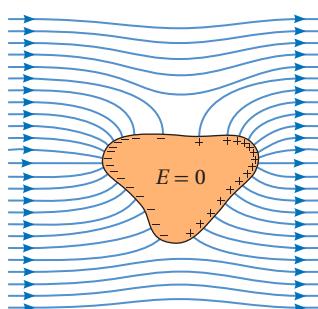
$$\sigma = \frac{Q}{A}$$

في هذا الدرس ستتعرف إلى المجالات الكهربائية لتوزيعات متصلة من الشحنات الكهربائية، وستقتصر دراستنا على حساب المجالات الكهربائية للتوزيعات الآتية: موصل كروي مشحون، قشرة رقيقة مشحونة، وصفيحتان متوازيتان مشحونتان بشحتين مختلفتين في النوع ومتتساوietين في المقدار.

(الربط بالเทคโนโลยيا)

قفص فارادي؛ عبارةً عن وعاء أو جسم موصل يمنع المجال الكهربائي من اختراقه. سُميَ قفص فارادي نسبة إلى العالم مايكيل فارادي الذي ابتكر هذا القفص لأول مرة في عام 1836م.

وتمثل آلية عمله في أن المجال الكهربائي الخارجي يتسبب في شحن القفص الفلزِي بالحث، كما هو مبين في الشكل، فينشأ داخله مجال كهربائي مساوي للمجال الخارجي ومعاكس له في الاتجاه؛ فيكون المجال المحصل داخل القفص صفرًا. من التطبيقات العملية على قفص فارادي؛ حماية الأجهزة الإلكترونية من المجالات الكهرومغناطيسية عن طريق تغليفها بمادة موصولة، كذلك؛ فإن هيكل السيارة أو الطائرة هو قفص فارادي يوفر الحماية لمن يدخلها في أثناء تعرضها إلى صاعقة برق.



المجال الكهربائي لكرة موصلة مشحونة

Electric Field of a Charged Conducting Sphere

يبين الشكل (9) كرةً موصلةً نصف قطرها (R)، توزع على سطحها الخارجي شحنة (Q) بشكل منتظم. ولحساب المجال الكهربائي عند نقطة خارج الكرة وعلى بعد ($r > R$) من مركزها؛ تتباع الخطوات الآتية:

- نرسم سطح غاوس، وهو سطح كرويٌّ وهمي مغلق يحيط بالكرة، نصف قطره (r)، بحيث يكون مركز السطح هو مركز الكرة الموصلة نفسه. ونلاحظ أن مقدار المجال (E) متساوٍ عند النقاط الواقعة على سطح غاوس جميعها.
- نرسم متوجه المساحة عند أي نقطة على السطح؛ فيكون متوجه المساحة في هذه الحالة موازيًا للمجال عند النقاط الواقعة على السطح جميعها ($\theta = 0^\circ$)، ويكون التدفق الكلّي عبر السطح:

$$\Phi = EA$$

حيث مساحة سطح غاوس ($A = 4\pi r^2$)

- بتطبيق قانون غاوس؛ فإن التدفق عبر السطح ($\Phi = \frac{q_{in}}{\epsilon_0}$)، وبذلك نُعبر عن التدفق بالصورة الآتية:

$$EA = \frac{q_{in}}{\epsilon_0}$$

$$E(4\pi r^2) = \frac{q_{in}}{\epsilon_0}$$

- نعرض شحنة الكرة على أنها الشحنة داخل سطح غاوس (Q)؛ فتوصل إلى أن المجال الكهربائي:

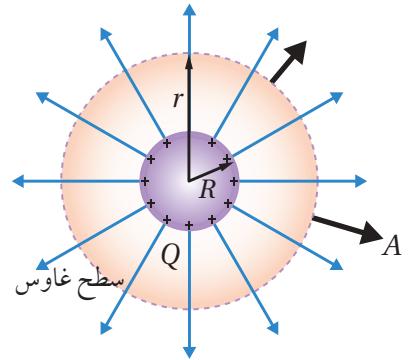
$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$$

يمكن التعبير عن الثوابت بالرموز ($K = 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$)، حيث ($k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$)، وبذلك يمكن التعبير عن المجال الكهربائي بالصورة الآتية:

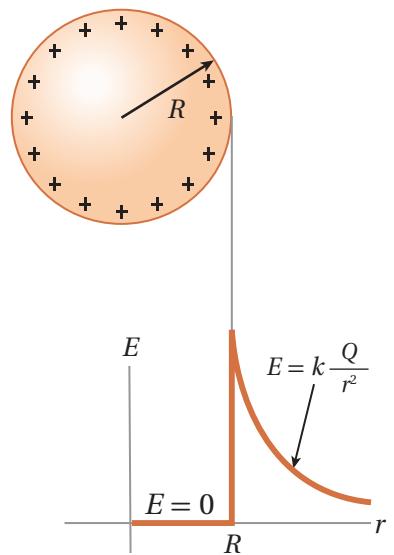
$$E = k \frac{Q}{r^2}$$

تُستخدم هذه العلاقة لحساب المجال الكهربائي عند نقطة تقع خارج الكرة الموصلة المشحونة، أو عند نقطة قريبة جدًا من سطح الكرة. وتوضح هذه العلاقة أن المجال خارج الكرة يُماثل مجال الشحنة النقطية (الذي درسته سابقاً). أما المجال داخل الكرة فيساوي صفرًا، ويبين الشكل (10) تمثيلًا بيانياً للعلاقة بين المجال الكهربائي والبعد عن مركز الكرة.

أتحقق: ما العوامل التي يعتمد عليها المجال الكهربائي عند نقطة تقع خارج موصل كروي مشحون؟



الشكل (9): بتطبيق قانون غاوس يمكن حساب المجال الكهربائي خارج الموصل الكروي المشحون.



الشكل (10): العلاقة بين المجال الكهربائي والبعد عن مركز موصل كروي مشحون.

أفكّر: أثبت باستخدام قانون غاوس أن «المجال الكهربائي داخل الموصل الكروي المشحون يساوي صفرًا».

كرة موصولة معزولة نصف قطرها (R) موضوعة في الهواء، مشحونة بشحنة كهربائية موجبة موزعة على سطحها بانتظام بكتافة سطحية (σ).

أ . أثبت أن المجال الكهربائي عند نقطة خارج الكرة وعلى بعد (r) من مركزها يعطى بالعلاقة الآتية :

$$E = \frac{\sigma R^2}{\epsilon_0 r^2}$$

ب . إذا كانت الكثافة السطحية للشحنة ($3.1 \times 10^{-7} \text{ C/m}^2$)، ونصف قطر الكرة (0.2 m)، فما مقدار المجال الكهربائي عند نقطة خارج سطح الكرة وقريبة جدًا منه؟

المعطيات: $R = 0.2 \text{ m}$, $\sigma = 3.1 \times 10^{-7} \text{ C/m}^2$, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$

المطلوب: إثبات العلاقة ، $E = ?$

الحل:

أ . المجال الكهربائي لموصل كروي مشحون يعطى بالعلاقة:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$$

وبتعويض الشحنة (Q) بدلالة الكثافة السطحية للشحنة:

$$Q = \sigma A = \sigma(4\pi R^2)$$

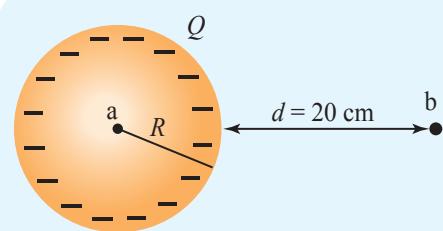
فإن المجال الكهربائي يمكن التعبير عنه بالصورة الآتية:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\sigma(4\pi R^2)}{r^2} = \frac{\sigma R^2}{\epsilon_0 r^2}$$

ب . لحساب المجال الكهربائي عند نقطة قريبة جدًا من السطح؛ فإن ($r \rightarrow R$):

$$\begin{aligned} E &= \frac{\sigma R^2}{\epsilon_0 r^2} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \\ &= \frac{3.1 \times 10^{-7}}{8.85 \times 10^{-12}} = 3.5 \times 10^4 \text{ N/C} \end{aligned}$$

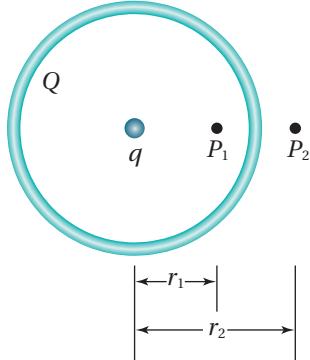
نمريله



الشكل (11): كرة نحاسية مشحونة بشحنة سالبة.

أستخدم الأرقام: يوضح الشكل (11) كرة نحاسية نصف قطرها (10 cm)، موضوعة في الهواء ومشحونة بشحنة سالبة ($-12 \mu\text{C}$). مستعيناً بالشكل؛ أجد المجال الكهربائي عند كل من النقطتين (a,b).

كرة بلاستيكية مُجوفة؛ نصف قطرها (10 cm)، مشحونة بشحنة سالبة ($-16e = Q$) موزعة على سطحها بانتظام. وُضع عند مركزها شحنة نقطية ($+5e = q$). ما مقدار المجال واتجاهه عند النقطتين (P_1) و (P_2) المُبيّنتين في الشكل (12/أ)؟ حيث ($r_2 = 12.0 \text{ cm}$) ، ($r_1 = 6.0 \text{ cm}$)



الشكل (12/أ): كرة مجوفة وشحنة نقطية.

المعطيات: $Q = -16e, q = +5e, r_1 = 6.0 \text{ cm}, r_2 = 12.0 \text{ cm}$

المطلوب: $E_1 = ?, E_2 = ?$

الحل:

لحساب المجال الكهربائي عند النقطة (P_1):

نرسم سطح غاووس، وهو سطح كروي نصف قطره (r_1)، بحيث تقع (P_1) على السطح كما يبين الشكل (12/ب).

ثم نرسم متوجه المجال عمودياً على السطح خارجاً منه؛ لأن الشحنة الكلية داخل السطح موجبة ($q_{in} = q$). فتكون الزاوية بين متوجهي المجال والمساحة تساوي صفرًا ($\theta = 0^\circ$).

طبق قانون غاووس:

$$EA\cos 0^\circ = \frac{q_{in}}{\epsilon_0}$$

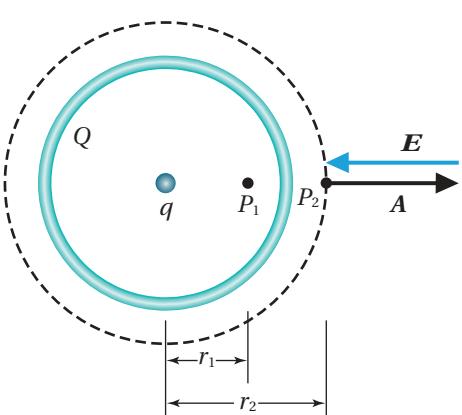
$$E(4\pi r_1^2) = \frac{q}{\epsilon_0}$$

$$\begin{aligned} E &= \frac{5e}{4\pi\epsilon_0 \times (6.0 \times 10^{-2})^2} \\ &= \frac{9 \times 10^9 \times 5 \times 1.6 \times 10^{-19}}{36 \times 10^{-4}} = 2.0 \times 10^{-6} \text{ N/C} \end{aligned}$$

لحساب المجال الكهربائي عند النقطة (P_2)؛ نتبع الخطوات ذاتها، فنرسم سطح غاووس كما يبين الشكل (12/ج)، ونلاحظ أن الشحنة الكلية داخل سطح غاووس سالبة ($q_{in} = Q + q = -11e$)؛ فنرسم متوجه المجال داخلاً في السطح، وتكون الزاوية بين متوجهي المجال والمساحة ($\theta = 180^\circ$). ويتطبق قانون غاووس:

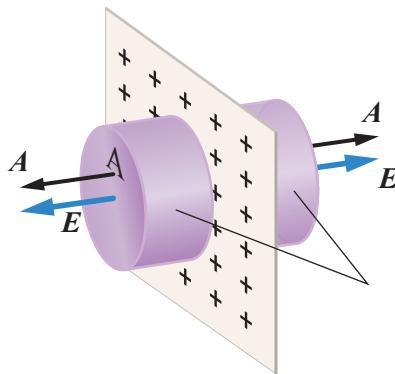
$$\begin{aligned} EA\cos(180^\circ) &= \frac{q_{net}}{\epsilon_0} \rightarrow E = \frac{-11e}{4\pi\epsilon_0 \times (12.0 \times 10^{-2})^2} \\ &= 1.1 \times 10^{-6} \text{ N/C} \end{aligned}$$

الشكل (12/ب): حساب المجال الكهربائي عند (P_1).



الشكل (12/ج): لحساب المجال عند (P_2) نرسم سطح غاووس بحيث تقع النقطة عليه.

المجال الكهربائي لشحنة موزعة على قشرة مستوية لا نهاية الأبعاد Electric Field of an Infinite Plane Sheet of Charge



الشكل (13): قشرة رقيقة مستوية لا نهاية الأبعاد، مشحونة بشحنة موجبة.

يبين الشكل (13) مقطعًا من قشرة رقيقة مستوية لا نهاية الأبعاد، القشرة مشحونة بشحنة موجبة توزع على سطحها بكثافة سطحية متقطمة (σ)، ويبيّن الشكل أن خطوط المجال الكهربائي عمودية على سطح القشرة، كما يبيّن الشكل أن اتجاه المجال على أحد جانبي القشرة عكس اتجاهه على الجانب الآخر. باستخدام قانون غاووس؛ يمكن حساب المجال الكهربائي الناتج عن القشرة، باتباع الخطوات الآتية:

- نختار جزءًا من القشرة مساحته (A)، ونرسم سطح غاووس الذي يحيط بهذا الجزء على شكل اسطوانة مساحة كل من قاعدتيها (A).
- نرسم متجه المساحة عموديًّا على قاعدتي الاسطوانة، فيكون المتجه (A) موازيًّا للمجال ($\theta = 0^\circ$) على جانبي القشرة، أما السطح الجانبي للإسطوانة فلا تخترقه خطوط المجال.

• نطبق قانون غاووس لحساب التدفق الكلي عبر سطح غاووس:

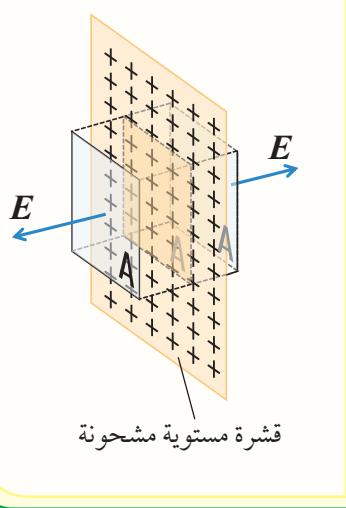
$$E(2A) = \frac{q_{in}}{\epsilon_0}$$

حيث يمثل ($2A$) مجموع مساحتى وجهي الإسطوانة.

- نعرض الشحنة داخل سطح غاووس ($q_{in} = \sigma A$)؛ فنتوصل إلى أن المجال الكهربائي:

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$

توضّح هذه العلاقة أن المجال الكهربائي للقشرة اللانهائيّة الأبعاد مجال منتظم لا يعتمد على بعد النقطة التي يُقاس عندها المجال عن القشرة. وتستخدم لحساب مقدار المجال الكهربائي سواء كانت شحنة القشرة موجبة أو سالبة. حيث تعوض الكثافة السطحية للشحنة بدون الإشارة.



أتحقق: أصف خطوط المجال الكهربائي الناشئ عن قشرة رقيقة مستوية لا نهاية الأبعاد مشحونة بشحنة موجبة. ✓

المجال الكهربائي المنتظم Uniform Electric Field

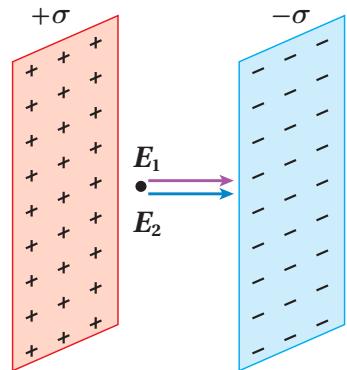
يمكن الحصول على مجال كهربائي منتظم بوضع صفيحتين موصلتين متوازيتين متوازيتين ومتقابلتين، وتفصل بينهما مسافة قصيرة مقارنة ببعادهما، كما يبين الشكل (14)، ثم شحنها بشحتين مختلفتين نوعاً، متساوين مقداراً.

يمكن حساب المجال الكهربائي في المنطقة الواقعة بين الصفيحتين، بافتراض أن كل صفيحة قشرة رقيقة؛ فيكون المجال الناشئ عن الصفيحة الموجبة (E_1)، والمجال الناشئ عن الصفيحة السالبة (E_2)، ويكون المجال المحصل (E) متساوياً لناتج جمع المجالين؛ لأنهما بالاتجاه نفسه.

$$\begin{aligned} E &= E_1 + E_2 \\ &= \frac{\sigma}{2\epsilon_0} + \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \\ E &= \frac{\sigma}{\epsilon_0} \end{aligned}$$

حيث (σ) مقدار الكثافة السطحية للشحنة على الصفيحة الواحدة.

أتحقق: كيف يمكن حساب المجال الكهربائي في الحيز بين صفيحتين متوازيتين مشحونتين بشحتين مختلفتين نوعاً متساوين مقداراً؟



الشكل (14): المجال الكهربائي عند نقطة بين صفيحتين متوازيتين مشحونتين يساوي المجال المحصل الناتج عن الصفيحتين.

المثال 5

كرة صغيرة مشحونة، كتلتها ($10.0 \mu\text{C}$) وشحتها (0.700 g)، تستقر ساقنة فرق قشرة رقيقة مستوية لنهائية الأبعاد مشحونة بشحنة موجبة توزع على سطحها بانتظام، أحسب الكثافة السطحية للشحنة الموزعة على سطح القشرة ($g = 10.0 \text{ m/s}^2$).

المعطيات: $m = 10.0 \text{ g}$, $q = -0.700 \mu\text{C}$, $g = 10.0 \text{ m/s}^2$

المطلوب: $\sigma = ?$

الحل:

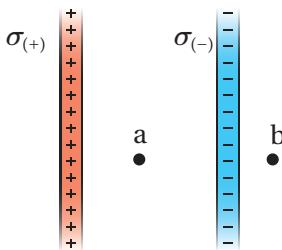
الكرة متزنة تحت تأثير قوتين متساوين مقداراً ومتعاكستين اتجاهًا، هما الوزن (للأسفل) والقوة الكهربائية (للأعلى):

$$mg = Eq$$

$$mg = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} q$$

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{2\epsilon_0 mg}{q} \\ &= \frac{2 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 10 \times 10^{-3} \times 10}{0.700 \times 10^{-6}} = 2.53 \times 10^{-6} \text{ C/m}^2 \end{aligned}$$

يبين الشكل (15/أ) صفيحتان موصلتان مشحونتان بشحتين كهربائيتين؛ إحداهما موجبة والأخرى سالبة، موزعة عليهما بانتظام، بكثافة سطحية $\sigma = 3.54 \times 10^{-7} \text{ C/m}^2$ ، إذا كانت أبعاد الصفيحتين كبيرةً بالنسبة للمسافة الفاصلة بينهما، أجد المجال الكهربائي عند كل من النقطتين (a) و (b).



الشكل (15/أ): صفيحتان متوازيتان مشحونتان.

$$\text{المعطيات: } \sigma = 3.54 \times 10^{-7} \text{ C/m}^2, \epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$$

المطلوب: $E_a = ?$, $E_b = ?$

الحل:

النقطة (a) تقع في الحيز بين الصفيحتين؛ فيكون المجال عندها:

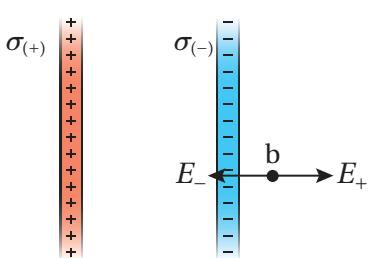
$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{3.54 \times 10^{-7}}{8.85 \times 10^{-12}} = 4 \times 10^4 \text{ N/C}$$

النقطة (b) تقع خارج الصفيحتين، ولحساب المجال عند النقطة؛ نفترض وجود شحنة اختبار موجبة ونحدد اتجاه المجال الناشئ عن كل صفيحة، كما في الشكل (15/ب). فيكون المجال المحصل:

$$E = E_+ + E_-$$

$$= \frac{\sigma}{2\epsilon_0} - \frac{\sigma}{2\epsilon_0} = 0$$

الشكل (15/ب): المجال الكهربائي عند النقطة (b).



حركة جسيم مشحون في مجال كهربائي منتظم

Motion of a charged Particle in a Uniform Electric Field

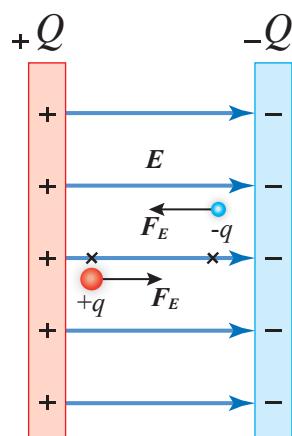
عندما يوضع جسيم مشحون في مجال كهربائي منتظم؛ فإن المجال يؤثر في الجسيم المشحون بقوة ثابتة في المقدار والاتجاه أيهما كان موقعه داخل المجال، ويبين الشكل (16) أن اتجاه القوة المؤثرة في جسيم موجب الشحنة يكون باتجاه المجال، ويكون بعكس اتجاه المجال للجسيم سالب الشحنة. وتعطى القوة الكهربائية (F_E) بالعلاقة الآتية:

$$F_E = qE$$

حيث: (q) مقدار شحنة الجسيم المشحون

(E) مقدار المجال الكهربائي المنتظم.

بافتراض أن وزن الجسم مهملاً مقارنةً بالقوة الكهربائية؛ فإن القوة الكهربائية (F_E) تمثل القوة المحسوبة ($\sum F$) المؤثرة في الجسيم المشحون،



الشكل (16): تحرّك الشحنة الموجبة والشحنة السالبة الموضوعتين في مجال كهربائي منتظم، باتجاهين متعاكسين.

وبتطبيق القانون الثاني لنيوتن ($\Sigma F = ma$)؛ فإن القوة الكهربائية سُتكسب

الجسيم المشحون، وكتلته (m)، تسارعاً ثابتاً يعطى بالعلاقة:

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

يكون اتجاه التسارع باتجاه القوة الكهربائية، وبما أن التسارع ثابت؛ فإن

حركة الجسيم يمكن وصفها باستخدام معادلات الحركة بتسارع ثابت وهي:

$$v_f = v_i + at$$

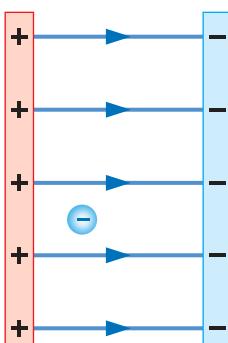
$$\Delta x = v_i t + \frac{1}{2} at^2$$

$$v_f^2 = v_i^2 + 2a\Delta x$$

ستقتصر دراستنا على تطبيق معادلات الحركة على الجسيمات المتحركة

في بعد واحد (موازية للمجال).

المثال 7



جسيم كتلته (200 mg) يحمل شحنة مقدارها ($-4.00 \times 10^{-6} \text{ C}$)، وُضع في حالة سكون داخل مجال كهربائي منتظم مقداره $5.40 \times 10^3 \text{ N/C}$ ، كما في الشكل (17). بإهمال قوّة الجاذبية الأرضية بالنسبة إلى القوة الكهربائية، أحسب التسارع الذي يكتسبه الجسيم.

الشكل (17): جسيم مشحون في مجال كهربائي منتظم.

المعطيات: $E = 5.40 \times 10^3 \text{ N/C}$, $q = -4.00 \times 10^{-6} \text{ C}$, $m = 200 \times 10^{-6} \text{ kg}$

المطلوب: $a = ?$

الحل:

$$F_E = Eq = 5.40 \times 10^3 \times 4.00 \times 10^{-6}$$

$$F_E = 2.16 \times 10^{-2} \text{ N}$$

$$a = \frac{F}{m} = \frac{2.16 \times 10^{-2}}{200 \times 10^{-6}} = 108 \text{ m/s}^2$$

بما أنّ شحنة الجسيم سالبة؛ فإنّ اتجاه القوة والتسارع يكون معاكساً لاتجاه المجال الكهربائي؛ أي إنّ اتجاه

التسارع باتجاه محور (x).

المثال 8

جُسيم كتلته (40 mg) يحمل شحنة سالبة (5.0×10^{-5} C)، دخل مجالاً كهربائياً متظماً بسرعة ابتدائية (600 m/s)، باتجاه محور ($+x$)، إذا كان مقدار المجال الكهربائي (3.2×10^3 N/C)، واتجاهه مع محور ($+x$)، وبإهمال تأثير قوّة الجاذبية الأرضية؛ فأحسبُ الزمن اللازم لتوقف الجُسيم عن الحركة.

المعطيات : $E = 3.2 \times 10^3$ N/C, $q = -5.0 \times 10^{-5}$ C, $m = 40 \times 10^{-6}$ kg, $v_i = 600$ m/s

المطلوب : $t = ?$

الحل :

$$F_E = Eq = 3.2 \times 10^3 \times 5.0 \times 10^{-5}$$

$$F_E = 1.6 \times 10^{-1}$$
 N

$$a = \frac{F}{m} = \frac{1.6 \times 10^{-1}}{40 \times 10^{-6}} = 40 \times 10^2 \text{ m/s}^2$$

بما أنَّ الجُسيم سالب الشحنة؛ فإنَّ اتجاه القوّة المؤثرة فيه يكون بعكس اتجاه المجال، وكذلك يكون اتجاه التسارع؛ أي باتجاه ($-x$)، وهنا أستعمل معادلات الحركة، كما يأتي:

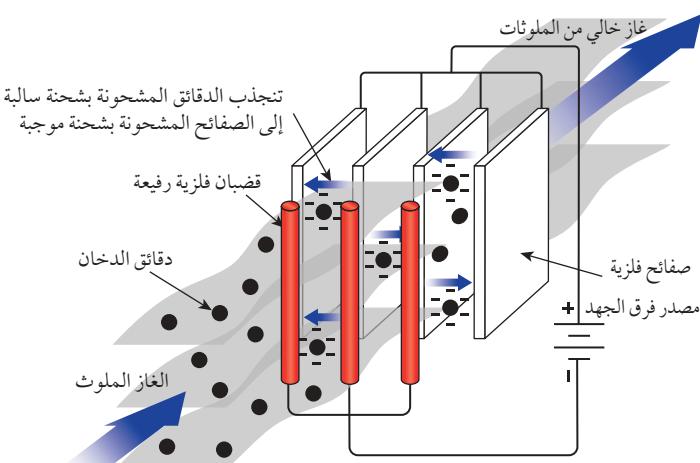
$$v_f = v_i + at$$

$$0 = 600 - (40 \times 10^2)t$$

$$t = 0.15 \text{ s}$$

الربط مع الصناعة

المرشح الكهرستاتيكي هو جهاز تنقية يُستخدم لإزالة الجسيمات الدقيقة مثل الدخان من الغاز المنبعث من مداخن المصانع.

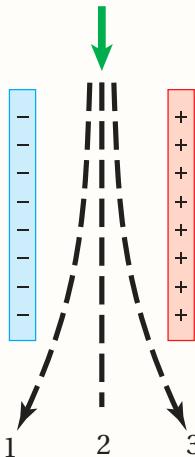


يحتوي الجهاز على قضبان فلزية رفيعة وصفائح فلزية تشحن باستخدام مصدر فرق جهد عالٍ؛ فينشأ حول القضبان مجال كهربائي يؤدي إلى إكساب دقائق الدخان شحنةً سالبةً في أنسنة مرورها عبر الجهاز، فتنجذب نحو الصفائح الفلزية المشحونة بشحنة موجبة.

مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسية:** أصف المجال الكهربائي لموصل كروي مشحون، والمجال الكهربائي بين صفيحتين متوازيتين مشحونتين بشحتين متساوين مقداراً و مختلفتين نوعاً.

2. **أستنتج:** يتحرك الإلكترون بسرعة ابتدائية باتجاه محور (y-)، ويدخل إلى منطقة مجال كهربائي متظم في الحيز بين صفيحتين متوازيتين، كما يبين الشكل المجاور. فيتأثر بقوة كهربائية تُكسيبه تسارعاً ثابتاً.



أ . ما اتجاه كل من القوة الكهربائية، والتسارع؟

ب . أحدد أي المسارات (1، 2، 3) يمثل مسار حركة الإلكترون داخل المجال، فأُسرّ إجابتي.

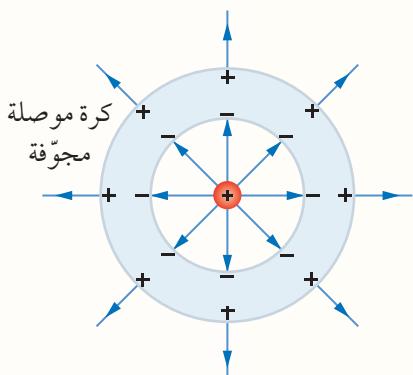
ج. عند دخول بوتزرون (شحنته +e وكتلته تساوي كتلة الإلكترون) يتحرك بالسرعة نفسها إلى منطقة المجال نفسه، أي المسارات (1، 2، 3) يمثل مسار حركته داخل المجال؟

3. **استخدم الأرقام:** قشرة رقيقة تتوزع الشحنة على سطحها بانتظام وبكثافة سطحية ($-3.00 \times 10^{-12} \text{ C/m}^2$). أحسب مقدار القوة الكهربائية المؤثرة في الإلكترون يوضع بالقرب من القشرة.

4. **استخدم الأرقام:** صفيحتان فلزيتان مشحونتان بشحتين كهربائيتين متساوين؛ إحداهما موجبة والأخرى سالبة، موزعة عليهما بانتظام بكثافة سطحية ($7.1 \times 10^{-7} \text{ C/m}^2$)، إذا كانت أبعاد الصفيحتين كبيرة مقارنة بالمسافة الفاصلة بينهما، فأجد:

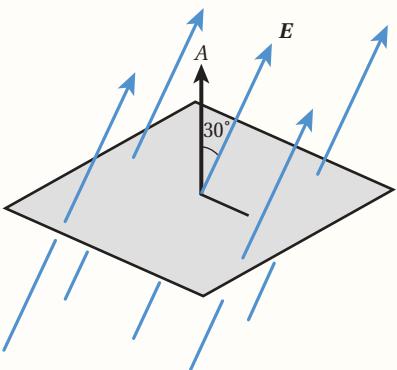
أ. المجال عند نقطة بين الصفيحتين.

ب. تسارع جسيم كتلته ($5.0 \times 10^{-4} \text{ kg}$) وشحنته ($2.0 \times 10^{-7} \text{ C}$) عند وضعه بين الصفيحتين، بإهمال وزن الجسيم.



5. **التفكير الناقد:** وضعت شحنة نقطية (+) في مركز كرة موصولة معوفة ومتعادلة كهربائياً؛ فشحت الكرة بالحث كما يبين الشكل المجاور.

مستخدماً قانون غاوس؛ أصف المجال الكهربائي عند نقطة تقع داخل مادة الكرة، وعند نقطة تقع خارج الكرة.



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

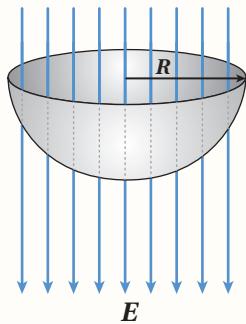
1. مربع طول ضلعه (l)، تخترق خطوط مجال كهربائي منتظم كما يبين الشكل المجاور، فيكون التدفق عبره (Φ). فإن مقدار المجال (E) يساوي:

ب. $\frac{\Phi}{l^2 \cos 30^\circ}$

أ. $\frac{\Phi}{l \cos 30^\circ}$

د. $\frac{\Phi}{l^2 \sin 30^\circ}$

ج. $\frac{l^2 \cos 30^\circ}{\Phi}$



2. سطح غاووس على شكل نصف كرة مجوفة نصف قطرها (R), كما هو مبين في الشكل، موضوعة في مجال كهربائي (E) باتجاه محور (y). التدفق الكهربائي عبر السطح الجانبي لنصف الكرة:

ب. $-\pi R^2 E$

أ. $\pi R^2 E$

د. $-2\pi R E$

ج. $2\pi R E$

3. صفيحتان متوازيتان مساحة كل منها (A ، شحنتا بشحتتين مختلفتين نوعاً، ومقدار الشحنة على كل صفيحة (Q))؛ فتولد في الحيز بينهما مجال كهربائي (E). عند مضاعفة كل من (A) و (Q)؛ فإن مقدار المجال الكهربائي يصبح:

د. $2E$

ج. E

ب. $\frac{E}{2}$

أ. $\frac{E}{4}$

4. كرة موصلة نصف قطرها (R)، وكمة موصلة ثانية نصف قطرها ($\frac{R}{2}$)، تحملان شحتين متساويتين، ولا تؤثران في بعضهما بعضاً. إذا كان المجال الكهربائي على بعد ($r > R$) من مركز الكرة الأولى (E_1)؛ فإن المجال الكهربائي على البعد نفسه من مركز الكرة الثانية يعطى بالعلاقة:

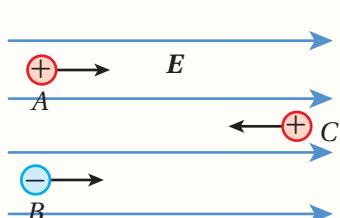
د. $E_2 = E_1$

ج. $E_2 = \frac{1}{4} E_1$

ب. $E_2 = \frac{1}{2} E_1$

أ. $E_2 = 2E_1$

5. ثلاث جسيمات مشحونة أدخلت إلى مجال كهربائي منتظم بالسرعة الابتدائية نفسها، والشكل يبين اتجاه حركة كل جسيم لحظة دخوله إلى المجال. الجسيمان (A, C) موجبا الشحنة، والجسيم (B) شحنته سالبة.



أي من الجسيمات ستزداد سرعته مباشرةً بعد دخوله إلى منطقة المجال؟

ب. A و C

أ. A فقط.

د. B و C

ج. C و A

الجهد الكهربائي وطاقة الوضع الكهربائية

Electric Potential and Electric Potential Energy

تعلمتُ مُسبقاً أنه عند نقل شحنة اختبار ($q_0 +$) بسرعة ثابتة من اللانهاية إلى نقطة في مجال كهربائي، كما يبين الشكل (18)؛ فإنه يلزم التأثير في الشحنة بقوة خارجية، تبذل عليها شغلاً (W)، وبافتراض أن اللانهاية هي النقطة المرجعية التي تكون طاقة الوضع الكهربائية عندها صفرًا؛ فإن هذا الشغل يخترن في نظام (الشحنة - المجال الكهربائي) على شكل طاقة وضع كهربائية (PE)، وسنشير إليها بأنها طاقة الوضع الكهربائية للشحنة الموضوعة عند نقطة في المجال الكهربائي.

ناتج قسمة طاقة الوضع (PE) على الشحنة (q_0) كمية فизيائية تسمى الجهد الكهربائي عند نقطة، ويعرف بأنه طاقة الوضع الكهربائية لوحدة الشحنات الموضوعة عند النقطة، ويعطى بالعلاقة الآتية:

$$V = \frac{W}{q_0} = \frac{PE}{q_0}$$

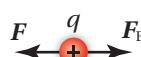
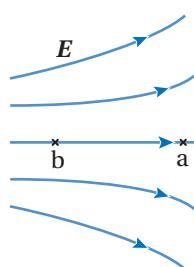
بدراسة تعريف الجهد الكهربائي؛ أستنتج ما يأتي:

- الجهد الكهربائي كمية قياسية، يقاس بوحدة (J/C) وتعرف بالفولت (V).
- الجهد الكهربائي عند نقطة هو خاصية للشحنة المولدة للمجال، ولا يعتمد على الشحنة الموضوعة عند النقطة.
- إذا أصبح الجهد الكهربائي عند نقطة معروفاً، ووضعت شحنة (q) عند تلك النقطة؛ فإن طاقة الوضع الكهربائية المخزنة في الشحنة الموضوعة عند تلك النقطة تُعطى بالعلاقة:

$$PE = qV$$

وعند انتقال الشحنة (q) من نقطة ابتدائية جدها (V_i) إلى نقطة نهاية جدها (V_f)؛ فإن التغيير في طاقة الوضع الكهربائية للشحنة يعطى بالعلاقة:

$$\Delta PE = q\Delta V = q(V_f - V_i)$$



الشكل (18): نقل شحنة اختبار من اللانهاية إلى نقطة في مجال كهربائي.

عندما يتحرك جسيم مشحون في مجال كهربائي؛ فإن المجال يؤثر فيه بقوة كهربائية يمكن أن تبذل شغلاً على الجسيم. هذا الشغل يوصف باستخدام مفهومين هما؛ طاقة الوضع الكهربائية، وفرق الجهد الكهربائي.

نتائج التعلم:

- أربط التغيير في طاقة الوضع الكهربائية بالشغل الذي يبذله المجال في تحريك الشحنة من نقطة إلى أخرى في المجال الكهربائي.
- أحسب فرق الجهد الكهربائي بين نقطتين في مجال كهربائي منتظم.
- أحسب الجهد الكهربائي داخل موصل كروي مشحون وخارجه.
- أعرف سطح تساوي الجهد.

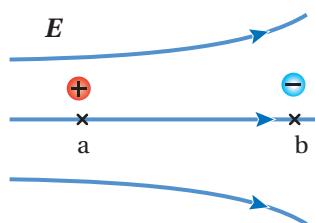
المفاهيم والمصطلحات:

سطوح تساوي الجهد

Equipotential Surfaces

تحقق: ما الفرق بين الجهد الكهربائي وطاقة الوضع الكهربائي؟

شحتنان نقطيتان (q_+) و (q_-)، وضعنا في حالة السكون عند النقطتين (a) و (b) في مجال كهربائي، كما يبين



الشكل (19): حركة شحتنين في مجال كهربائي باتجاه القوة الكهربائية.

الشكل (19)، أستعين بالشكل للإجابة عن الأسئلة الآتية:

أ. أي النقطتين (a) أم (b) الأعلى جهدًا؟ أفسر إجابتي.

ب. أحدد اتجاه القوة الكهربائية المؤثرة في كل من الشحتين.

ج. أصف التغيير في كل من: طاقة الحركة، وطاقة الوضع الكهربائية للشحتين في أثناء حركتهما داخل المجال بدءًا من السكون.

المعطيات: الشكل والبيانات المثبتة عليه.

المطلوب: ترتيب جهد النقاط، معرفة اتجاه القوة الكهربائية، وصف التغيير في طاقة الحركة وطاقة الوضع الكهربائية.

الحل:

أ. النقطة (a) أعلى جهداً من النقطة (b)؛ لأن اتجاه خط المجال يكون دائمًا باتجاه تناقص الجهد؛ أي من النقطة الأعلى جهدًا إلى النقطة الأقل جهدًا.

ب. الشحنة (q_+) تتأثر بقوة كهربائية باتجاه محور (x_+) والشحنة (q_-) تتأثر بقوة كهربائية باتجاه محور (x_-).

ج. طاقة الحركة تزداد، وطاقة الوضع تقلّ لكل من الشحتين.

إذا تحركت شحنة كهربائية (موجبة أو سالبة) من السكون تحت تأثير القوة الكهربائية فقط وباتجاهها؛ فإن ذلك يؤدي إلى زيادة طاقتها الحركية، مقابل نقصان مساوٍ في طاقة الوضع الكهربائية؛ لأن القوة الكهربائية قوة محافظة، فتكون الطاقة الميكانيكية للنظام محفوظة، ($\Delta KE + \Delta PE = 0$)؛ أي أن النقصان في أحد شكلي الطاقة يقابل زائدة مساوية في الشكل الآخر.

لذلك

أستنتج: في الشكل (19)؛ لنقل شحنة (q_+) من (a) إلى (b) بسرعة ثابتة يلزم التأثير فيها بقوة خارجية مساوية للكوة الكهربائية مقدارًا ومحاكسة لها اتجاهًا.

أ. هل تبذل القوة الخارجية شغلاً موجباً أم سالباً؟

ب. ما الشغل الكلي المبذول على الشحنة؟ أفسر إجابتي مستخدماً مبرهنة (الشغل - الطاقة الحركية)؛ $W_{\text{Total}} = \Delta KE$.

ج. أصف التغيير في طاقة الوضع الكهربائية للشحنة المنقولة.

الربط بالเทคโนโลยيا الطبية

تصدرُ من القلب نبضات كهربائية صغيرة، يمكن الكشف عنها باستخدام جهاز تخطيط القلب (ECG) electrocardiogram.



يقيس جهاز (ECG) إشارات الجهد الكهربائي التي يتوجه القلب مع كل نبضة، حيث تعمل هذه الإشارات على تنظيم عملية انقباض القلب لضخ الدم إلى الجسم. يقوم الجهاز بتسجيل هذه الإشارات وتحويلها إلى رسم بياني يُظهر النشاط الكهربائي للقلب، مما يساعد الأطباء في تقييم صحة القلب.

فرق الجهد في المجال الكهربائي المنتظم

Potential Difference in a Uniform Electric Field

عند وضع شحنة موجبة $+q$ عند نقطة مثل a في مجال كهربائي منتظم E كما في الشكل (20)، فإنّها تتأثر بقوة كهربائية حسب العلاقة: $F_E = qE$ ، والشغل الذي تبذله القوة الكهربائية لتحريك تلك الشحنة من النقطة a إلى النقطة b، يعطى بالعلاقة:

$$W_{a \rightarrow b} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{d}$$

حيث \mathbf{d} الإزاحة من النقطة a إلى النقطة b. وبتعويض مقدار القوة الكهربائية فإنّ علاقه الشغل تؤول إلى:

$$W_{a \rightarrow b} = q \mathbf{E} \cdot \mathbf{d} = qEd \cos \theta$$

وبما أنّ شغل القوة الكهربائية يرتبط بفرق الجهد بالعلاقة الآتية:

$$W_{a \rightarrow b} = -q \Delta V = -q(V_b - V_a)$$

وبحسب المقادير السابقة للشغل:

$$\Delta V = (V_b - V_a) = -Ed \cos \theta$$

تستخدم هذه العلاقة لحساب فرق الجهد ($V_b - V_a$) بين نقطتين في المجال الكهربائي المنتظم فقط.

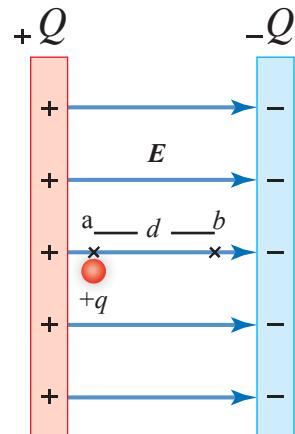
حيث E : مقدار المجال الكهربائي المنتظم.

d : مقدار الإزاحة من نقطة البداية a إلى نقطة النهاية b ($d_{a \rightarrow b}$).

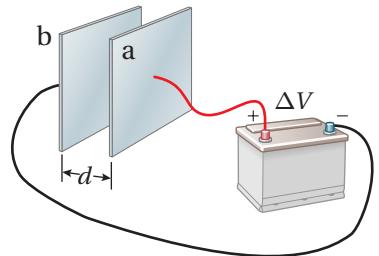
θ : الزاوية بين اتجاه المجال E وإتجاه الإزاحة d ($0^\circ < \theta < 180^\circ$).

يمكن الحصول على مجال كهربائي منتظم في الحيز بين صفيحتين متوازيتين مشحونتين بشحنتين متساويتين مقداراً و مختلفتين نوعاً، عندما تكون المسافة بين الصفيحتين صغيرة مقارنةً بأبعاد الصفيحتين. ويمكن شحن الصفيحتين بوصولهما بقطبي بطارية، كما يبين الشكل (21)، فإذا كان فرق الجهد بين قطبي البطارية (ΔV)؛ سينشأ بين الصفيحتين فرق جهد (ΔV) مساوٍ لفرق جهد البطارية. باستخدام العلاقة ($V_b - V_a = -Ed \cos \theta$)؛ يمكن التوصل إلى أن مقدار المجال الكهربائي بين الصفيحتين يعطى بالصورة الآتية:

$$E = \frac{|\Delta V|}{d}$$



الشكل (20): فرق الجهد بين نقطتين في مجال كهربائي منتظم.



الشكل (21): شحن صفيحتين متوازيتين بوصولهما بقطبي بطارية.

أفخر: وحدة قياس المجال الكهربائي في النظام العالمي للوحدات هي (N/C)، وبحسب العلاقة $E = \frac{\Delta V}{d}$ ؛ فإن وحدة المجال (V/m). أثبت أن: $1\text{N/C} = 1\text{V/m}$

حيث: $|\Delta V|$ القيمة المطلقة لفرق الجهد بين الصفيحتين.

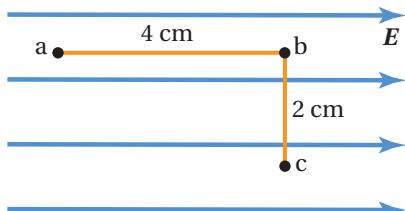
(d) البعد بين الصفيحتين.

توضح هذه العلاقة أنه يمكن التعبير عن وحدة المجال الكهربائي بالصورة (V/m).

وبذلك يمكن وصف المجال الكهربائي بأنه مقياس لتغير الجهد مع تغير الموقع.

المثال 10

مجال كهربائي منتظم مقداره ($2 \times 10^4 V/m$), تقع داخله ثلاثة نقاط (a,b,c)، كما في الشكل (22)، أحسب:



الشكل (22): ثلاثة نقاط داخل مجال كهربائي منتظم.

أ. فرق الجهد الكهربائي $(V_b - V_c)$, $(V_b - V_a)$.

ب. التغير في طاقة الوضع الكهربائية لشحنة ($q = 3 \times 10^{-9} C$) عند انتقالها من النقطة (a) إلى النقطة (b).

المعطيات: $d_{a \rightarrow b} = 4 \text{ cm}$, $d_{c \rightarrow b} = 2 \text{ cm}$, $q = 3 \times 10^{-9} \text{ C}$, $E = 2 \times 10^4 \text{ V/m}$

المطلوب: $V_b - V_a = ?$, $V_b - V_c = ?$, $\Delta PE = ?$

الحل:

أ. يُحسب فرق الجهد من العلاقة:

$$V_b - V_a = -E d_{a \rightarrow b} \cos\theta$$

$$= -2 \times 10^4 \times 4 \times 10^{-2} \times \cos 0^\circ = -8 \times 10^2 \text{ V}$$

$$V_b - V_c = -E d_{c \rightarrow b} \cos\theta$$

$$= -2 \times 10^4 \times 2 \times 10^{-2} \times \cos 90^\circ$$

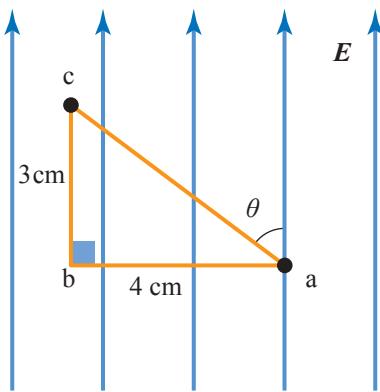
$$V_b - V_c = 0$$

أي أن النقطتين (V_c) و (V_b) متساويتان في الجهد. والنقاط التي تقع على امتداد الخط (b c) المتعامد مع خط المجال جميعها تكون متساويةً في الجهد. ويمكن القول أن النقاط الواقعة على سطح عمودي على المجال المنتظم جميعها تكون متساويةً في الجهد.

ب. التغير في طاقة الوضع يُحسب من العلاقة:

$$\Delta PE_{a \rightarrow b} = q \Delta V = q(V_b - V_a)$$

$$= 3 \times 10^{-9} \times (-8 \times 10^2) = -2.4 \times 10^{-6} \text{ J}$$



يمثل الشكل (23) مجالاً كهربائياً منتظمًا، تقع داخله ثلات نقاط (a, b, c)

إذا علمت أن فرق الجهد ($V_c - V_b = -600 \text{ V}$)، أحسب ما يأتي:

أ. مقدار المجال الكهربائي.

ب. فرق الجهد ($V_c - V_a$).

المعطيات: $d_{a \rightarrow b} = 4 \text{ cm}$, $d_{b \rightarrow c} = 3 \text{ cm}$, $V_c - V_b = -600 \text{ V}$

المطلوب: $E = ?$, $V_c - V_a = ?$

الحل:

أ. يُحسب المجال الكهربائي من العلاقة:

$$(V_c - V_b) = -E d_{b \rightarrow c} \cos 0^\circ$$

$$E = \frac{-600}{-3 \times 10^{-2}} = 2 \times 10^4 \text{ V/m}$$

ب. يُحسب فرق الجهد من العلاقة:

$$V_c - V_a = -E d_{a \rightarrow c} \cos \theta$$

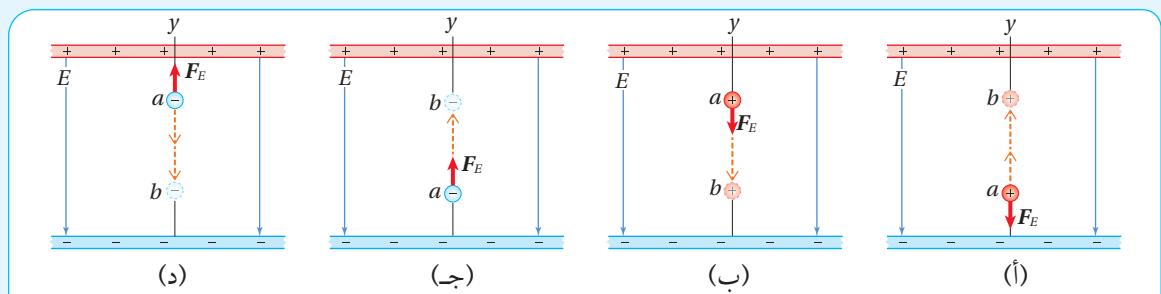
$$= -2 \times 10^4 \times d_{a \rightarrow c} \times \frac{3 \times 10^{-2}}{d_{a \rightarrow c}} = -600 \text{ V}$$

كما يمكن التوصل إلى النتيجة نفسها بلاحظة أن ($V_b = V_a$)؛ فيكون فرق الجهد:

$$V_c - V_a = V_c - V_b = -600 \text{ V}$$

للمزيد

أربع شحنات تتحرك في مجال كهربائي منتظم، كما هو مبين في الشكل (24). حيث يدل السهم البرتقالي على اتجاه الحركة، والسبعين الأحمر على اتجاه القوة الكهربائية (F_E) المؤثرة فيها أثناء حركتها بين نقطتين (a) و (b). مستعيناً بالبيانات المُبيّنة في الشكل؛ أجب عن الأسئلة الآتية:



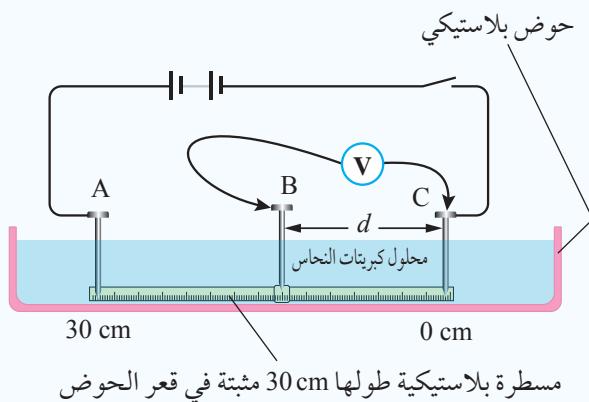
الشكل (24): أربع شحنات تتحرك في مجال كهربائي منتظم.

أ. أحدد: هل تبذل القوة الكهربائية شغلاً موجباً أم سالباً لكل حالة من الحالات المبينة في الشكل؟

ب. أستنتج: ماذا يحدث لطاقة الوضع الكهربائية المختزنة في الشحنة عند انتقالها بين النقطتين؟

ج. أستنتاج العلاقة بين التغيير في طاقة الوضع الكهربائية المختزنة في الشحنة، واتجاه حركتها في المجال.

العلاقة بين فرق الجهد الكهربائي والمجال الكهربائي



المواد والأدوات: مصدر طاقة (تيار مستمر DC)، فولتميتر، أسلاك توصيل، (3) لواقط فلزية، مسطرة بلاستيكية (30 cm)، حوض بلاستيكي، محلول كهرلي قليل التركيز (محلول كبريتات النحاس)، (3) مسامير.

إرشادات السلامة:

الحذر في التعامل مع محلول كبريتات النحاس.

خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أُنفَّذ الخطوات الآتية:

- أثبَّت كلاً من المسطرة البلاستيكية أسفل الحوض، ومسماً عند كل طرف من طرفي المسطرة في النقطتين (A و C)، ثم أسكب محلول كبريتات النحاس بحذر في الحوض بحيث تبقى قاعدة المسماين بارزة فوق محلول كهرلي كما في الشكل.
- أصل أجزاء الدارة الكهربائية؛ بحيث أثبَّت طرف السلك المتصل بالقطب الموجب للفولتميتر بقاعدة مسامار عند النقطة B قابل للحركة بين النقطتين (A و C).

3. أتوقع: كيف تتغير قراءة الفولتميتر كلما تحرك المسamar B نحو النقطة A بعد إغلاق الدارة؟

- ألاحظ: أغلق الدارة وأحرِّك رأس المسamar B أفقاً بخط مستقيم إلى نقطة تبعد (3 cm) عن النقطة C وأدون كلاً من قراءة الفولتميتر والإزاحة d في الجدول.

- أكرر الخطوة (4) مرات عدّة؛ بزيادة الإزاحة d مقدار (3 cm) في كل مرة ($d = 6, 9, \dots, 27$ cm)، وأدون نتائجي في الجدول.

التحليل والاستنتاج:

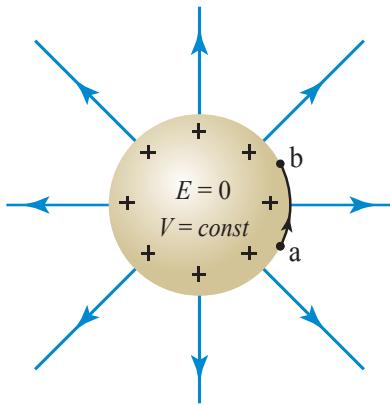
- أرسم بياني العلاقة بين فرق الجهد الكهربائي (قراءة الفولتميتر) على محور y والإزاحة d على محور x ؛ بحيث يكون فرق الجهد بوحدة volt (volt) والإزاحة بوحدة m (meter).

- استخدم الأرقام: أحسب ميل الخط بين النقطتين ($d = 9$ cm)؛ و ($d = 21$ cm)؛ إذ يمكن افتراض المجال بينهما منتظمًا، والعلاقة بين فرق الجهد والإزاحة خطية تقريرًا.

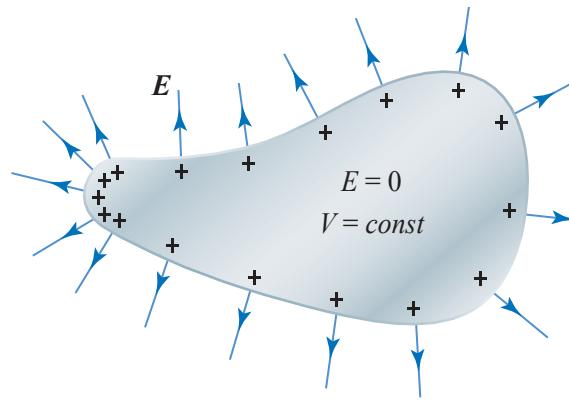
3. استنتاج: ما العلاقة بين ميل الخط ومقدار المجال الكهربائي؟

4. أتوقع مصادر الخطأ المحتملة في التجربة.

5. أنسِر: ما سبب استبعاد بداية الخط في الرسم البياني ونهايته؟



(ب): خطوط المجال الكهربائي لموصل كروي مشحون.



(أ): خطوط المجال الكهربائي لموصل مشحون غير منتظم الشكل.

الشكل (25): عند شحن موصل تستقر الشحنات على سطحه الخارجي.

الجهد الكهربائي لموصل مشحون

Electric Potential Due to a Charged Conductor

عند شحن موصل معزول؛ فإن الشحنات تتحرك مبتعدة عن بعضها تحت تأثير قوة التنازع الكهربائي، إلى أن تستقر على السطح الخارجي للموصل. ويختلف توزيع الشحنات على حسب شكل الموصل، فإذا كان الموصل غير منتظم الشكل، كما في الشكل (25/أ)؛ فإن الكثافة السطحية للشحنة تكون أكبر عند الرؤوس المدببة، وإذا كان الموصل منتظم الشكل مثل الموصل الكروي المبين في الشكل (25/ب)؛ فإن الشحنة تتوزع على سطحه بانتظام.

إن استقرار الشحنات على سطح الموصل يجعل المجال الكهربائي داخله يساوي صفرًا، وهذا يعني أن الشغل الذي يبذله المجال لنقل شحنة بين أي نقطتين داخل الموصل، أو من نقطة داخل الموصل إلى نقطة على سطحه يساوي صفرًا. وبما أن الشغل يعطى بالعلاقة ($-W = q\Delta V$)؛ فإن فرق الجهد بين النقطتين يساوي صفرًا، مما يعني أن الجهد عند النقاط جميعها داخل الموصل متساوٍ، ويساوي الجهد عند سطح الموصل. وهذا يتفق مع استقرار الشحنات، فلو كان هناك فرق في الجهد بين أي نقطتين؛ لأدى ذلك إلى حركة الشحنات من النقطة ذات الجهد المرتفع إلى النقطة ذات الجهد المنخفض.

كذلك، يبين الشكل (25)، أن خطوط المجال الكهربائي تكون دائمًا عموديةً على سطح الموصل؛ فيعني ذلك أن المجال الكهربائي لا يبذل شغلاً عند نقل شحنة من نقطة مثل (a) إلى نقطة (b) على سطح الموصل.

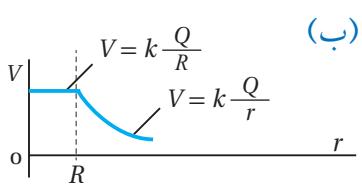
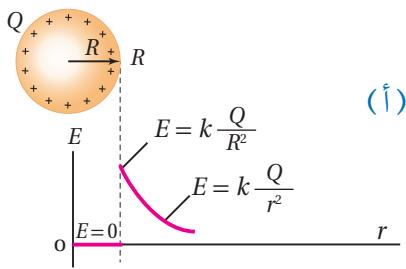
ستتعرف في هذا الدرس إلى كيفية حساب الجهد الكهربائي داخل موصلٍ كرويٍّ مشحونٍ وخارجه.

تحقق: أقدم دليلاً على أن الجهد الكهربائي يكون متساوياً عند جميع النقاط على سطح الموصل المشحون.

أفکر: في الشكل (25/أ)، أي المناطق تكون كثافة خطوط المجال عند她 أكبر؟ على ماذا يدل ذلك؟

الجهد الكهربائي لموصل كروي مشحون

Electric Potential of a Charged Conducting Sphere



الشكل (26): تغيرات المجال الكهربائي، والجهد الكهربائي لموصل كروي مشحون بشحنة موجبة. ما أوجه التشابه وأوجه الاختلاف بين الشكلين (أ) و (ب)؟

عند حساب الجهد الكهربائي الناشئ عن موصل كروي مشحون؛ فإننا نعد الشحنة وكأنها في مركز الكرة، فيكون الجهد الكهربائي عند أي نقطة خارج الكرة مماثلاً للجهد الناشئ عن شحنة نقطية (تعلمتُ مسبقاً حساب الجهد الناشئ عن شحنة نقطية).

وعليه؛ فإن الجهد الكهربائي عند أي نقطة خارج موصل كروي نصف قطره (R)، وشحنته (Q)، وعلى بعد ($r > R$) من مركزه يعطى بالعلاقة الآتية:

$$V = k \frac{Q}{r}$$

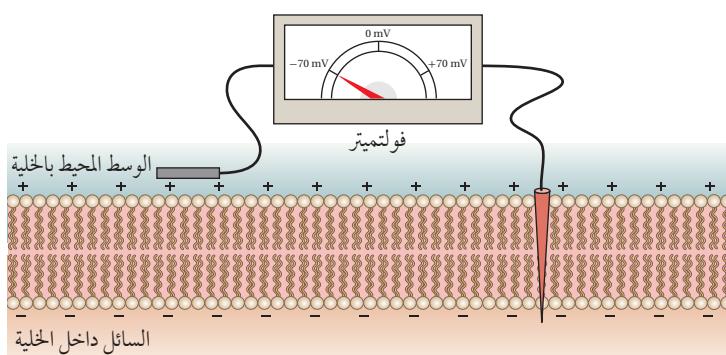
أما الجهد عند أي نقطة على سطح الموصل أو داخله حيث ($r \leq R$)؛ فمقداره ثابت ويعطى بالعلاقة:

$$V = k \frac{Q}{R}$$

يبين الشكل (26/أ) تمثيلاً بيانياً لتغيير المجال الكهربائي بتغيير بعد النقطة عن مركز الموصل الكروي المشحون، أما الشكل (26/ب) فيبين تمثيلاً بيانياً لتغيير الجهد الكهربائي بتغيير بعد النقطة عن مركز الموصل نفسه.

الربط بالعلوم الحياتية

تحتوي الخلية العصبية أيونات موجبة مثل الصوديوم والبوتاسيوم وجزيئات بروتين سالبة الشحنة. تسمح قنوات خاصة في الغشاء الخلوي لأيونات الصوديوم والبوتاسيوم بالحركة عبر الغشاء الخلوي من داخل الخلية إلى خارجها، لكن جزيئات البروتين الأكبر حجماً لا تتمكن من ذلك؛ فيتتج عن ذلك أن يصبح داخل الخلية مشحوناً بشحنة سالبة،

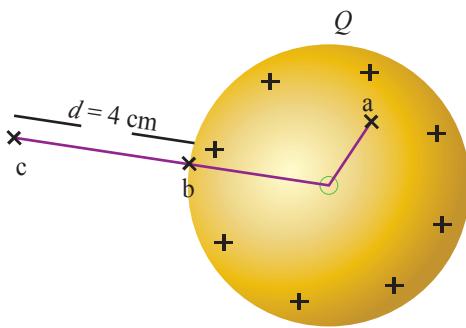


والسائل خارج الخلية مشحون بشحنة موجبة؛ فينشأ فرق في الجهد الكهربائي -بين داخل الخلية وخارجها- يولد مجالاً كهربائياً.

هذا المجال يؤثر في تدفق الأيونات من داخل الخلية إلى خارجها، وبالعكس في وقت الراحة وعند تعرض الخلية إلى مُثبّه عصبي.

المثال 12

موصلٌ كرويٌّ من النحاس نصف قطره (4 cm) مشحون وعزل، موضوع في الهواء كما في الشكل (27)، إذا علمت أن جهد النقطة a يساوي (2000 V)؛ فأحسب:



أ. جهد الموصل الكروي.

ب. شحنة الموصل.

ج. الشغل الذي تبذله القوة الكهربائية لنقل شحنة (-8 nC) من النقطة c إلى النقطة b.

المعطيات:

الشكل (27): الجهد الناشئ عن موصل كروي مشحون.

$$V_a = 2000 \text{ V}, d_c = 4 \text{ cm}, q = -8 \text{ nC}, R = 4 \text{ cm}$$

المطلوب:

$$V_{\text{sph}} = ?, Q = ?, W_{c \rightarrow b} = ?$$

الحل:

أ. جهد الموصل:

$$V_{\text{sph}} = V_b = V_a = 2000 \text{ V}$$

ب. شحنة الموصل:

$$V_b = k \frac{Q}{R}$$

$$2000 = 9 \times 10^9 \times \frac{Q}{4 \times 10^{-2}} \Rightarrow Q = 8.9 \times 10^{-9} \text{ C}$$

ج.

$$V_c = k \frac{Q}{r} = 9 \times 10^9 \times \frac{8.9 \times 10^{-9}}{8 \times 10^{-2}} = 1000 \text{ V}$$

$$W_{c \rightarrow b} = -q(V_b - V_c) = -(-8 \times 10^{-9}) \times (2000 - 1000) = 8 \times 10^{-6} \text{ J}$$

لتمرين

أستنتاج: كرةً موصلةً ومشحونةً نصف قطرها R وجدها V ، أجد بدلالة V جهد نقطة تبعد مسافة $4R$ عن مركزها.

المثال 13

يُمثل الرسم البياني في الشكل (28) العلاقة بين الجهد الكهربائي والبعد عن مركز موصل كروي مشحون. معتمداً

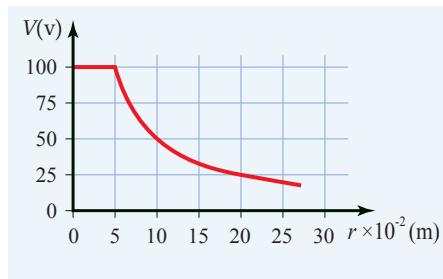
على الشكل أجد:

أ. نصف قطر الموصل.

ب. الجهد الكهربائي عند نقطة تبعد (20 cm) عن مركز الموصل.

ج. شحنة الموصل.

الحلّ:



الشكل (28): العلاقة بين جهد موصل كروي مشحون والبعد عن مركزه.

$$R = 0.05 \text{ m}$$

$$V_{0.2} = 25 \text{ V}$$

$$\text{ج. من الشكل، جهد الموصل } (V_{\text{sph}} = 100 \text{ V})$$

وبتطبيق المعادلة:

$$V_{\text{sph}} = k \frac{Q}{R}$$

$$100 = 9 \times 10^9 \frac{Q}{0.05} \Rightarrow Q = 5.5 \times 10^{-10} = 0.55 \text{ nC}$$

الربط بالحياة



ملفٌ تسلٌ جهاز اخترعه العالم الكرواتي نيكولا تسلٌ عام 1891 م، يولد الملف جهداً كهربائياً عالياً جداً يمكن أن يصل إلى مليون فولت، ويمكن عن طريقه نقل الطاقة الكهربائية لاسلكياً، حيث يعمل الملف على تخزين طاقة وضع كهربائية، تطلق في صورة شرارة تشبه البرق.

يمكن استخدام ملفٌ تسلٌ بوصفه ملفاً اشتعال في آلات الاحتراق الداخلي في السيارات، بالإضافة إلى استخدامه في العروض التعليمية وفي مجال الترفيه لإنشاء البرق الاصطناعي.

سطوح تساوي الجهد Equipotential Surfaces

تعلمت من دراستي للمجال الكهربائي المنتظم أن الجهد الكهربائي يكون متساوياً عند النقاط الواقعة جميعها على سطح عمودي على المجال، مثل هذا السطح يعرف بسطح تساوي جهد.

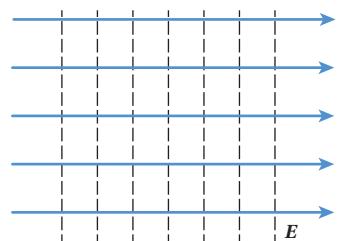
سطح تساوي الجهد **Equipotential Surface** هو السطح الذي يكون الجهد الكهربائي عند نقاطه جميعها متساوياً.

ويبين الشكل (29/أ) سطوح تساوي الجهد لمجال كهربائي منتظم، حيث تبدو السطوح متوازيةً والمسافات بينها متساوية. أما الشكل (29/ب)، فيبين سطوح تساوي الجهد لشحنة نقطية موجبة، وهي سطوح كروية متحدة المركز مع الشحنة، كذلك يبين الشكل (29/ج) أن سطوح تساوي الجهد لموصل كروي مشحون تكون كروية الشكل، وتتحدد معه بالمركز، ويعُد سطح الموصل المشحون سطح تساوي جهد.

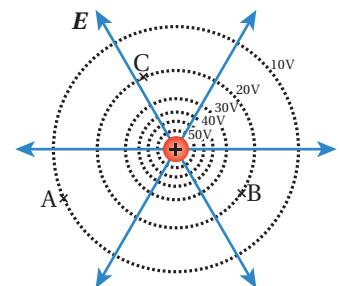
يُمثل كل سطح تساوي جهد مقداراً محدداً من الجهد الكهربائي كما هو مُبيّن في الشكل (29/ب). ويكون فرق الجهد بين أي نقطتين على سطح تساوي الجهد مساوياً للصفر. ولا يلزم بذلك شغل لنقل شحنة من نقطة إلى أخرى على سطح تساوي الجهد نفسه.

كما أن خطوط المجال الكهربائي خصائص معينة؛ فإن سطوح تساوي الجهد كذلك خصائص يمكن ملاحظتها من الشكل (29) وهي:

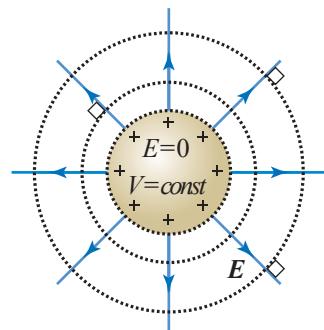
- سطوح تساوي الجهد التي يكون الفرق في الجهد بينها متساوياً؛ تقارب كلما اقتربنا من الشحنة؛ لأن المجال الكهربائي يزداد مقداره وتتقارب خطوطه في أثناء الاقتراب من الشحنة، كذلك تبعاً لبعد سطوح تساوي الجهد كلما ابتعدنا عن الشحنة. وعموماً، حيثما تقارب سطوح تساوي الجهد دلت على منطقة مجال كهربائي قوي.
- لا تتقاطع؛ لأنها لو تقاطعت عند نقطة لوجدنا أكثر من قيمة للجهد الكهربائي عند تلك النقطة وهذا غير ممكن.
- تتعامد سطوح تساوي الجهد مع خطوط المجال الكهربائي.



الشكل (29/أ): سطوح تساوي الجهد لمجال كهربائي منتظم.



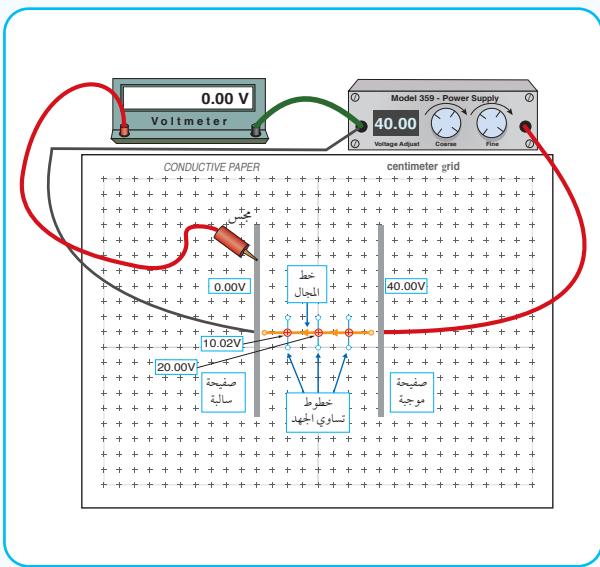
الشكل (29/ب): سطوح تساوي الجهد لشحنة نقطية موجبة.



الشكل (29/ج): الجهد الكهربائي لموصل كروي مشحون وسطوح تساوي الجهد حوله.

التجربة 2

رسم خطوط تساوي الجهد عملياً



المواد والأدوات: لوح رسم خرائط المجال الكهربائي، ورق رسم بياني، قلم رصاص، فولتميتر رقمي، مصدر طاقة (تيّار مستمر DC) رقمي، كُرتان فلزّيتان صغيرتان، صفائحتان فلزّيتان، أسلاك توصيل، مجسّ.

إرشادات السلامة: الحذر في التعامل مع التوصيات الكهربائية أو تطبيق جهد كبير.

خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أُنفذ الخطوات الآتية:

1. أصل الأدوات كما في الشكل وعدم غلق الدارة الكهربائية إلا بعد التأكّد منها من قبل المعلم / المعلمة.

2. **أقيس:** أثبت مصدر الجهد على جهد معين (40 V)، وأنتأكّد أنّ قراءة الفولتميتر تساوي صفرًا عند ملامسة المجسّ للصفيحة السالبة كما في الشكل، ثمّ أحرك المجسّ المتّصل بالقطب الموجب للفولتميتر متعدّداً عن الصفيحة السالبة حتى يقرأ الفولتميتر جهازاً محدّداً (10 V)، وأحدّد موقع تلك النقطة باستعمال ورقة الرسم البياني.

3. أحدّد موقع (4) نقاط أخرى مساوية لجهد النقطة السابقة، ثمّ أرسم الخط المارّ بالنقطتين الخمس والذى يمثل خطّاً من خطوط تساوي الجهد.

4. أكرّر الخطوتين (2 - 3) مرات عدّة باستعمال قراءات أخرى للفولتميتر (20 V, 30 V).

5. أكرّر الخطوط (2 - 4)؛ باستعمال كرة فلزّية بدلاً من إحدى الصفيحتين.

التحليل والاستنتاج:

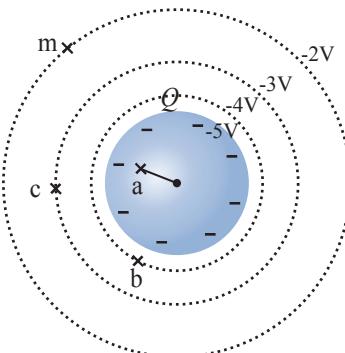
1. **أتحقق** قراءة الفولتميتر عند وضع المجسّ على الصفيحة السالبة، ثمّ أتأكد من ذلك عملياً.

2. أصف خطوط تساوي الجهد التي رسمتها.

3. أرسم خطوط المجال الكهربائي بناءً على خطوط تساوي الجهد.

4. **استخدم الأرقام:** أحسب مقدار المجال الكهربائي بين الصفيحتين؛ باستعمال فرق الجهد والمسافة بينهما.

بناءً على الشكل (30) الذي يمثل سطوح تساوي الجهد لموصل كروي مشحون بشحنة سالبة، أحسب:



الشكل (30): سطوح تساوي الجهد حول موصل كروي مشحون.

أ. فرق الجهد $(V_a - V_b)$ و $(V_c - V_b)$.

ب. الشغل الذي تبذله القوة الخارجية؛ لنقل الإلكترون بسرعة ثابتة من النقطة m إلى النقطة c .

ج. شحنة الموصل، علمًا أن نصف قطره 9 cm

المعطيات: البيانات على الشكل.

المطلوب: $(V_c - V_b) = ?$, $(V_a - V_b) = ?$, $W_{m \rightarrow c}$, $Q = ?$

الحل: أ.

$$V_a - V_b = -5 - (-4) = -1 \text{ V}$$

$$V_c - V_b = (-3) - (-4) = 1 \text{ V}$$

$$W_{m \rightarrow c} = q(V_c - V_m)$$

$$W_{m \rightarrow c} = -1.6 \times 10^{-19} \times (-3 - (-2))$$

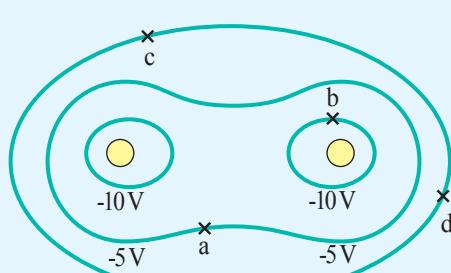
$$W_{m \rightarrow c} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$V = k \frac{Q}{R}$$

$$-5 = 9 \times 10^9 \times \frac{Q}{9 \times 10^{-2}}$$

$$Q = -5 \times 10^{-11} \text{ C} = -50 \text{ pC}$$

ج. جهد الموصل يساوي (5 V)، ولإيجاد شحنته أطبق العلاقة الآتية:



الشكل (31): سطوح تساوي الجهد لشحتين نقطتين.

تمرين

أستخدم الأرقام: يُبيّن الشكل (31) سطوح تساوي الجهد لشحتين نقطتين متساويتين في المقدار. أجب عن ما يأتي:

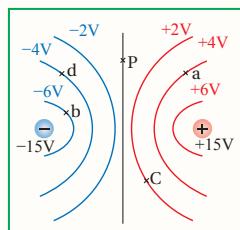
أ. أحسب فرق الجهد $(V_a - V_b)$.

ب. هل يلزم بذل شغل بروتون من النقطة c إلى النقطة d ? أفسر إجابتي.

مراجعة الدرس

1. الفكرة الرئيسية: أصف التغيرات في الجهد الكهربائي للحالتين الآتتين:

- عند الانتقال بين نقطتين داخل مجال كهربائي منتظم باتجاه خط المجال.
- عند الانتقال من مركز موصل كروي مشحون إلى خارج الموصل.



2. **أستنتج:** يُمثل الشكل سطوح تساوي الجهد لشحتين متساويتين في المقدار

ومختلفتين في النوع، أجب عما يأتي:
أ. أي النقاط جهدها يساوي صفرًا.

ب. ما فرق الجهد $(V_a - V_c)$, $(V_b - V_d)$?

ج. أحسب الشغل الذي تبذله القوة الخارجية لنقل شحنة (5 nC) من النقطة d إلى النقطة a.

3. **استخدم الأرقام:** كرة من التحاس مشحونة بشحنة موجبة، مُنّلت العلاقة بين الجهد

الكهربائي والبعد عن مركز الكرة كما في الشكل، أحسب:

أ. الجهد الكهربائي عند نقطة تبعد (4 cm) عن مركز الكرة.

ب. شحنة الكرة.

ج. الشغل الذي تبذله القوة الكهربائية لنقل شحنة $(6 \mu\text{C})$ من مركز الكرة إلى نقطة تبعد (8 cm) عن مركز الكرة.

4. **استخدم الأرقام:** جسيم مشحون بشحنة موجبة اكتسب طاقة وضع كهربائية مقدارها $1.6 \times 10^{-16} \text{ J}$ خلال

تحريكه مسافة (3 cm) في مجال كهربائي منتظم مقداره 10^4 V/m ، أحسب شحنة الجسيم.

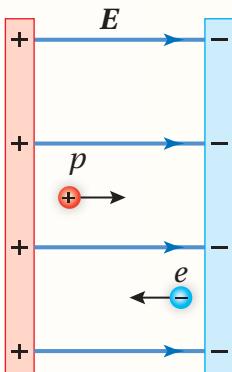
5. **استخدم الأرقام:** نقطتان c و d في مجال كهربائي منتظم مقداره

$3.0 \times 10^3 \text{ V/m}$ كما في الشكل، أحسب:

أ. فرق الجهد الكهربائي $(V_c - V_d)$.

ب. الشغل المبذول بواسطة قوة خارجية لنقل بروتون من النقطة d إلى النقطة c بسرعة ثابتة، علماً بأنّ شحنة البروتون $(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})$.

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



1. إلكترون وبروتون بدأ بالحركة من السكون بالقرب من صفيحتين فلزيتين، كما هو مبين في الشكل المجاور، عندما يصل كل منهما إلى الصفيحة المقابلة نجد أن:

- أ . البروتون والإلكترون متساويان في السرعة.
- ب. سرعة البروتون أكبر من سرعة الإلكترون.
- ج. البروتون والإلكترون متساويان في الطاقة الحركية.
- د . الطاقة الحركية للإلكترون أكبر من الطاقة الحركية للبروتون.

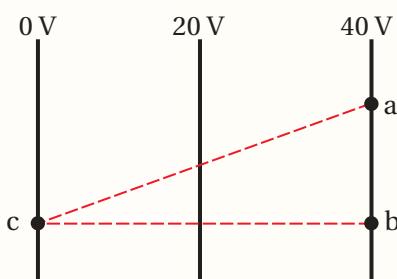
2. يتحرك جسيم كتلته (m)، وشحنته (q) من السكون في مجال كهربائي منتظم بين نقطتين فرق الجهد بينهما (ΔV)؛ فتكون سرعته النهائية (v). عندما يتحرك جسيم ثانٍ كتلته ($\frac{m}{2}$)، وشحنته ($2q$) من السكون بين نقطتين فرق الجهد بينهما ($2\Delta V$)، فإن السرعة النهائية لهذا الجسيم بدلاً (v'):

$$\text{أ . } \sqrt{2}v \quad \text{ب . } 2\sqrt{2}v \quad \text{ج . } 4v \quad \text{د . } 8v$$

3. صفيحتان متوازيتان (X,Y)، شُحنتا بشحتتين متساويتين مقداراً و مختلفتين في النوع فتولد في الحيز بينهما مجال كهربائي منتظم. تحرك إلكترون من السكون باتجاه القوة الكهربائية من الصفيحة (X) إلى الصفيحة (Y)؛ فكانت الزيادة في طاقته الحركية ($J = 10^{-19} \times 6.4$). نستنتج أن الجهد الكهربائي للصفيحة (X) :

- أ . أعلى من جهد الصفيحة (Y) بمقدار (4 V).
- ب. أقل من جهد الصفيحة (Y) بمقدار (4 V).
- ج. أعلى من جهد الصفيحة (Y) بمقدار (0.25 V).
- د . أقل من جهد الصفيحة (Y) بمقدار (0.25 V).

* يبين الشكل سطوح تساوي جهد كهربائي ناتج عن مجال كهربائي منتظم. بالاعتماد على البيانات المثبتة على الشكل؛ أجب عن الفقرتين الآتيتين:



4. يكون اتجاه المجال الكهربائي باتجاه محور:

$$\text{أ . } +x \quad \text{ب . } -x \quad \text{ج . } +y \quad \text{د . } -y$$

5. تزداد طاقة الوضع الكهربائية لشحنة سالبة عند انتقالها من:

- أ . النقطة (a) إلى النقطة (b).
- ب. النقطة (b) إلى النقطة (c).
- ج. النقطة (c) إلى النقطة (a).
- د . النقطة (b) إلى النقطة (a).

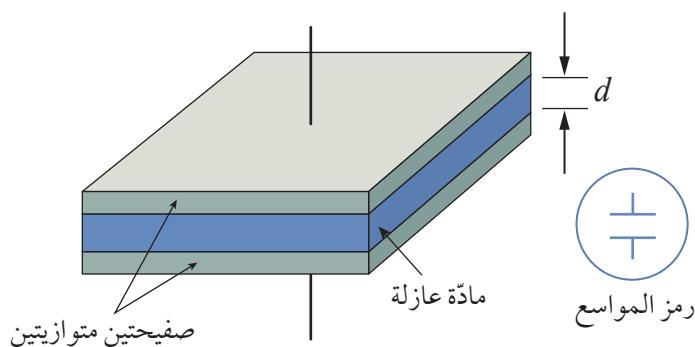
المواسع الكهربائي Electric Capacitor

ت تكون الأجهزة الكهربائية من دارات كهربائية و دارات إلكترونية متنوعة . و يلزم في كثير من الدارات وجود أداة تستخد لتخزين الطاقة ؛ تُسمى **المواسع الكهربائي Capacitor** . تختلف المواسع في أشكالها وأحجامها حسب استعمال كل منها . ومعظم الأجهزة الإلكترونية تحتوي على مواسع كما في لوحة الحاسوب المبينة في الشكل (32) .

معظم المواسع المستعملة في التطبيقات العملية، تتكون من صفيحتين موصلتين متوازيتين تفصلهما طبقة من مادة عازلة، و يُسمى **المواسع ذو الصفيحتين المتوازيتين Parallel Plate Capacitor**، و يُرمز له بخطي متوازيين كما في الشكل (33)، و شكل الصفيحتين يمكن أن يكون مربعاً أو مستطيلاً أو دائرياً، حسب الاستعمال. أمّا المادة العازلة فتتكون من مادة مناسبة مثل البوليستر أو الماييكا أو الهواء في بعض الحالات.



الشكل (32): لوحة حاسوب تحتوي على أنواع مختلفة من المواسع.



الفكرة الرئيسية:

تختلف المواسع الكهربائية في أشكالها و مقادير مواسعاتها و طرائق توصيلها معًا؛ و تكمن أهميتها في قدرتها على تخزين الطاقة الكهربائية، و تُستعمل في الكثير من التطبيقات العملية.

نتائج التعلم:

- أُعرّف المواسعة الكهربائية لموصل رياضيًّا وبالكلمات.
- أمثل بيانيا العلاقة بين تغيرات الجهد الكهربائي بين صفيحتي مواسع و شحنته.
- أُوْظِف الرسم البياني للعلاقة بين الجهد الكهربائي بين صفيحتي مواسع و شحنته في حساب الطاقة المخزنة في المواسع.
- أحسب المواسعة الكهربائية المكافئة لمجموعة مواسع متصلاة على التوالى أو على التوازي.
- أحسب كمية الشحنة على كلّ مواسع و فرق جهده.

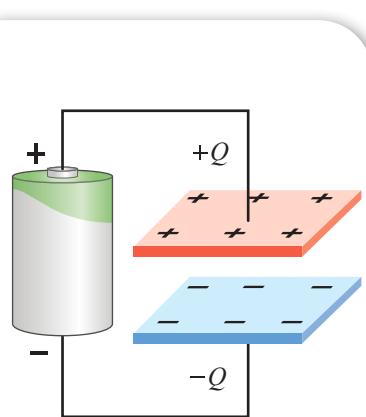
المفاهيم والمصطلحان:

Capacitor	المواسع
المواسع ذو الصفيحتين المتوازيتين	Parallel-Plate Capacitor
Farad	الفاراد
Capacitance	المواسعة
Equivalent Capacitance	المواسعة المكافئة

الشكل (33): مواسع ذو صفيحتين متوازيتين ورموزه.

شحن المواسع Charging a Capacitor

عند وصل مواسع ذي صفيحتين متوازيتين مع بطارية؛ فإنّ البطارия تنقل الإلكترونات عبر الدارة من إحدى صفيحتي المواسع إلى الصفيحة الأخرى، فتعمل على شحن الصفيحة الموصلة بالقطب السالب بشحنة سالبة، بينما تُشحن الصفيحة الموصلة مع القطب الموجب بشحنة موجبة كما في الشكل (34)، وبزيادة تراكم الشحنات على صفيحتي المواسع يزداد فرق الجهد بين الصفيحتين، وتستمر عملية الشحن حتى يُصبح فرق الجهد بين صفيحتي المواسع مساوياً لفرق جهد البطاريا. والشغل الذي تبذله البطاريا لنقل الشحنات يُخزن في المواسع على شكل طاقة وضع كهربائيّ.



الشكل (34): شحن المواسع.

أتحقق: إلى متى تستمر عملية شحن المواسع عند وصل صفيحتيه بطارية؟ ما شكل الطاقة المخزنة فيه؟

المواسعة الكهربائية Electrical Capacitance

في أثناء شحن المواسع يزداد فرق الجهد بين صفيحتي المواسع بزيادة الشحنات الكهربائية على صفيحتيه. يُستخدم الرمز (V) ليدل على فرق الجهد بين صفيحيتي المواسع (جهد المواسع)، ويستخدم الرمز (Q) ليدل على مقدار الشحنة على أيّ من صفيحيتي المواسع، وعند تمثيل العلاقة بين جهد المواسع وشحنته بيانياً؛ نجد أنّها علاقة خطية تمثل بخط مستقيم يمرّ بنقطة الأصل كما في الشكل (35) وميل الخط المستقيم يساوي مقداراً ثابتاً يُمثل المواسعة الكهربائية ويرمز لها بالرمز C :

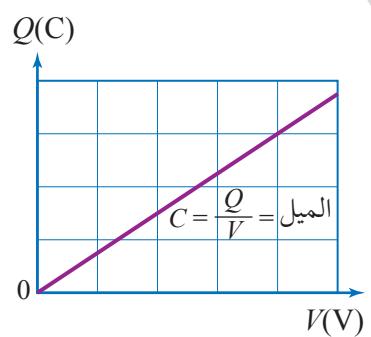
$$C = \frac{Q}{V} \quad \text{الميل}$$

حيث Q : شحنة المواسع عند أيّ لحظة.

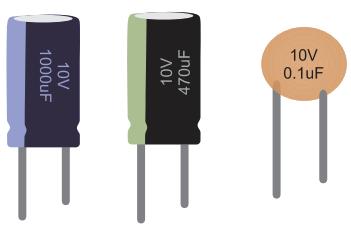
V : جهد المواسع عند تلك اللحظة.

لذا تُعرّف المواسعة الكهربائية Electrical Capacitance بأنّها الشحنة الكهربائية

المخزنة لوحدة فرق الجهد الكهربائيّ.



الشكل (35): التمثيل البياني للعلاقة بين شحنة المواسع وجهده.



الشكل (36): مواسعات مختلفة الجهد والمواسعة.

أُقارن بين المواسعة وأقصى جهد يُطبق بآمان لكُلّ من المواسعات الثلاثة.

تُقاس المواسعة بوحدة الفاراد $F = 1 \text{ C/V}$ ، ويُعرف الفاراد Farad

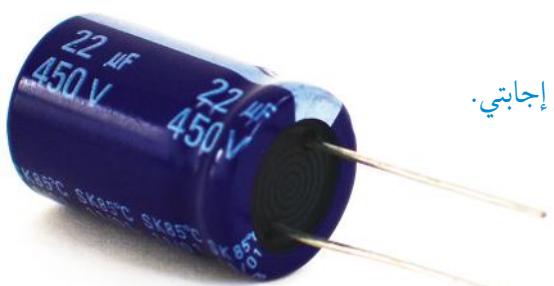
بأنه مواسعة يختزن شحنة كهربائية (1C) عند تطبيق فرق جهد (1V) بين صفيحتيه. والفاراد وحدة كبيرة نسبياً، ومعظم قيم المواسعات المستعملة في الدارات الإلكترونية صغيرة جداً؛ لذا تُستعمل البدائت (μ, n, p). أما المواسعات الفائقة التخزين فتصل مواسعاتها إلى مئات الآلاف من الفاراد. ويبين الشكل (36) مواسعاتٍ مختلفة المواسعة، وعادةً يُكتب على المواسع رقمين؛ الأول يُبين مواسعته، والثاني يُبين أكبر فرق جهدٍ ΔV يمكن تطبيقه بين صفيحتي المُواسع، فإذا تجاوز الجهد القيمة المحددة للمواسع؛ فإن ذلك يؤدّي إلى تلفه.

أتحقق: ما المقصود بالمواسعة الكهربائية؟ وكيف تتناسب شحنة المواسع

مع فرق الجهد بين طرفيه؟

المثال 15

بناءً على البيانات المثبتة على المواسع المُبيَّن في الشكل (37)، أُجيب عما يأتي:



الشكل (37): مواسع كهربائي.

أ. أُحدّد القيمة العظمى للشحنة التي يمكن تخزينها بأمان في المواسع.

ب. هل يمكن تطبيق جهد مقداره (600 V) بين طرفي المواسع؟ أوضح إجابتي.

المعطيات: من الشكل $C = 22 \mu\text{F}$, $V = 450 \text{ V}$

المطلوب: $Q = ?$

الحلّ:

أ. أُطْبِّق العلاقة:

$$C = \frac{Q}{V}$$

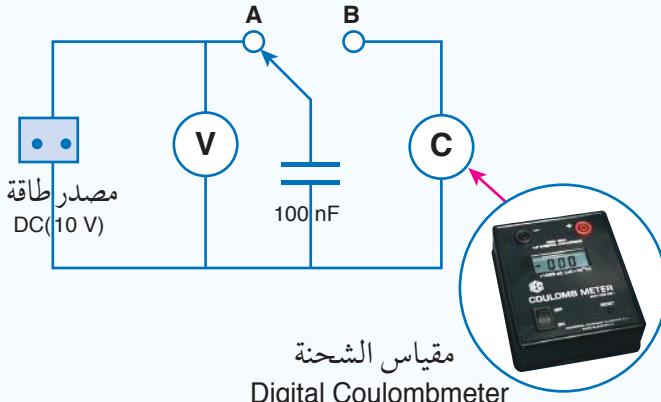
$$Q = CV = 22 \times 10^{-6} \times 450 = 9.9 \times 10^{-3} \text{ C}$$

ب . لا؛ لأنّ أقصى جهد يتحمله المواسع (450 V) حسب ما كُتب عليه. ومن ثمّ، إذا طُبِّقَ عليه جهد أعلى من ذلك يتلف.

التجربة 3

قياس مواسعة مواضع عملياً

المواد والأدوات:



مصدر طاقة (تيار مستمر DC)، فولتميتر، مواضع، مقياس الشحنة (Coulomb Meter) يقيس لغاية (2000 nC)، أسلاك توصيل.

إرشادات السلامة: الحذر من تطبيق جهد أعلى من الجهد المكتوب على المواسع، ومن لمس طرفي المواسع بعد شحنه.

خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أنفذ الخطوات الآتية:

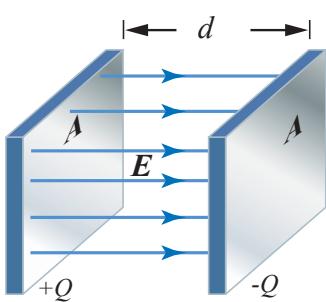
- أعاير كلاً من الفولتميتر وقياس الشحنة، ثم أصل أجزاء الدارة الكهربائية كما في الشكل؛ باستعمال جهد محدد (مثلاً 0.5 V) مع إبقاء الطرف الحر للمواسع غير متصل بأي طرف.
- أقيس:** أصل الطرف الحر للمواسع مع الطرف A حتى يُشحن المواسع، ثم أدون قراءة الفولتميتر في الجدول، التي تمثل فرق الجهد بين طرفي المواسع.
- أقيس:** أفضل الطرف الحر للمواسع مع الطرف B، ثم أصله مع الطرف A، ثم أدون قراءته في الجدول، وهي تمثل مقدار الشحنة المختزنة في المواسع.
- استعمل مصدر الطاقة لتغيير قراءة الفولتميتر لعدة قيم (1 V, 1.5 V, 2 V, 2.5 V, 3 V)، وأكرر الخطوتين الثانية والثالثة عند كل قراءة، وأدون نتائجي في الجدول.

التحليل والاستنتاج:

- أرسم بيانيًّا** العلاقة بين جهد المواسع (قراءة الفولتميتر) بوحدة (V) على محور x وشحنته (قياس الشحنة) بوحدة (C) على محور y ، ثم أرسم أفضل خط مستقيم يمرّ بمعظم النقاط.
- استخدم الأرقام:** أحسب ميل الخط المستقيم ($\frac{\Delta Q}{\Delta V}$). ما الكمية الفيزيائية التي يمثلها الميل؟
- أقارن** النتيجة التي حصلت عليها للمواسعة مع مقدار المواسع المكتوب على المواسع. ما سبب الاختلاف إن وجد؟

مواسعة مواسع ذي صفيحتين متوازيتين

Capacitance of Parallel-Plate Capacitor



الشكل (38): مواسع ذو صفيحتين متوازيتين.

يُبيّن الشكل (38) مواسعاً ذو صفيحتين متوازيتين، مساحة كلّ منها A وتفصلهما مسافة d والوسط الفاصل بينهما فراغ (أو هواء). عند شحن المواسع

ينشأ بين صفيحتيه مجال كهربائيٌّ منتظم مقداره:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

ولكنَّ الكثافة السطحية للشحنة σ تُعطى بالعلاقة: $\sigma = \frac{Q}{A}$ ومن ثم، فإنَّ:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{Q}{\epsilon_0 A}$$

وبما أنَّ جهد المواسع V يُعطى بالعلاقة: $V = Ed$ فإنه يمكن التعبير عن مواسعة المواسع على النحو الآتي:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{Ed} = \frac{Q}{\frac{Q}{\epsilon_0 A} d} \\ C = \frac{\epsilon_0 A}{d}$$

تُشير المعادلة السابقة إلى أنَّ مواسعة المواسع ذي الصفيحتين المتوازيتين تعتمد على: الأبعاد الهندسية للمواسع (مساحة صفيحتيه، والبعد بينهما)، وعلى السماحية الكهربائية للمادة العازلة بين صفيحتيه، وستقتصر دراستنا على المواسع الذي يكون الفراغ أو الهواء عازلاً بين صفيحتيه.

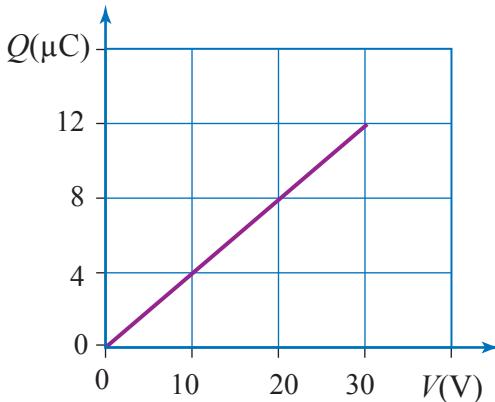
أفخر: هل تؤدي زيادة جهد المواسع أو شحنته الكهربائية إلى زيادة مواسعته؟ أفسِّر إجابتي.

تحقق: ما الطائق التي يمكن بوساطتها زيادة مواسعة المواسع ذي الصفيحتين المتوازيتين؟

الربط بالحياة



تُوجَد مواسعات متغيرة المواسعة تحتوي على عدد صفائح فلزية قابلة للدوران حول محور. ومن ثم، يمكن التحكّم بمواسعة المواسع عن طريق تغيير عدد الصفائح أو مساحتها أو المسافة بينها، ويرمز له في الدارات الكهربائية بخطَّين متوازيين عليهما سهم، انظر إلى الشكل.



الشكل (39): التمثيل البياني للعلاقة بين شحنة المواسع وجهده.

يُمثل الرسم البياني في الشكل (39) العلاقة بين شحنة مواسع ذي صفيحتين متوازيتين وجده، في أثناء عملية الشحن عند وصله مع بطارية

جهدها (40 V)، مستعيناً بالشكل أحسب:

- مواسعة المواسع.
- شحنة المواسع عندما يكون جهده (18 V).
- شحنة المواسع بعد اكتمال عملية الشحن.

المطلوب: $C = ?$, $Q = ?$

الحل:

أ. ميل الخط المستقيم يساوي مواسعة المواسع، أي إنّ:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{12 \times 10^{-6}}{30} = 4 \times 10^{-7} \text{ F} = 0.4 \mu\text{F}$$

ب. شحنة المواسع عندما يكون جهده (18 V):

$$Q = CV = 4 \times 10^{-7} \times 18 = 7.2 \times 10^{-6} \text{ C} = 7.2 \mu\text{C}$$

ج. تكتمل عملية شحن المواسع؛ عندما يُصبح جهده مساوياً لجهد البطارия (40 V)، عندئذ تختزن في المواسع قيمة عظمى للشحنة تساوى:

$$Q = CV = 4 \times 10^{-7} \times 40 = 1.6 \times 10^{-5} \text{ C} = 16 \mu\text{C}$$

الربط بالحاسوب

استعمال المواسعات في لوحة مفاتيح الحاسوب

يوضع مواسع ذو صفيحتين متوازيتين أسفل كل حرف في لوحة مفاتيح الحاسوب؛ بحيث تثبت إحدى صفيحتي كل مواسع بمفتاح والصفيحة الأخرى تكون ثابتة، وعند الضغط على المفتاح يقل البعد بين الصفيحتين فترتاد مواسعة المواسع؛ وهذا يجعل الدارات الإلكترونية الأخرى في الحاسوب تتعرف إلى المفتاح الذي جرى الضغط عليه.



مواسع ذو صفيحتين متوازيتين، البُعد بينهما (2 mm) ومساحة كل من صفيحيته ($10^{-4} \text{ m}^2 \times 8$)، يتصل ببطاريه جهدها (50 V) أحسب:

أ. موسوعة الموسوع.

بـ. جهد المواسع (V') عندما يخزن شحنة (Q') مقدارها (100 pC).

جـ. إذا تضاعفت المسافة بين الصفيحتين مع بقاء البطارئ موصولة بالمواسع، فأحسب كـلـ من شحنة الموسع (Q'') ومواسعته (C) .

المعطيات: $d = 2 \text{ mm}$, $A = 8 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, $Q' = 100 \text{ pC}$, $V = 50 \text{ V}$

المطلوب: $C = ?, V' = ?, Q'' = ?, C' = ?$

الحلٌ:

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} = \frac{8.85 \times 10^{-12} \times 8 \times 10^{-4}}{2 \times 10^{-3}} = 3.54 \times 10^{-12} \text{ F} = 3.54 \text{ pF}$$

ب. عندما تصبح شحنة المواسع (Q) تبقى مواتعة ثابتة (C) ولكن جهده يتغير (V'):

$$C = \frac{Q'}{V'}$$

$$3.54 \times 10^{-12} = \frac{100 \times 10^{-12}}{V'} \Rightarrow V' = 28.2 \text{ V}$$

جـ. عند مضاعفة المسافة بين صفيحتي المواسع ($d' = 4 \text{ mm}$) تغيير مواسعة المواسع (C') وتغيير شحنته (Q'') بينما

يُبقي جهد ثابتًا ويساوى جهد البطارия ($V = 50\text{ V}$).

$$C' = \frac{\varepsilon_0 A}{d'} = \frac{8.85 \times 10^{-12} \times 8 \times 10^{-4}}{2 \times 2 \times 10^{-3}} = 1.77 \times 10^{-12} \text{ F} = 1.77 \text{ pF}$$

$$Q'' = C'V = 1.77 \times 10^{-12} \times 50 = 8.85 \times 10^{-11} \text{ C} = 88.5 \text{ pC}$$

١٣

استخدم الأرقام: مواسع ذو صفيحتين متوازيتين متواسعته (0.04 nF) والمسافة بين صفيحتيه (0.25 cm)، شحن حتي أصبح جده (100 V ، أحسب

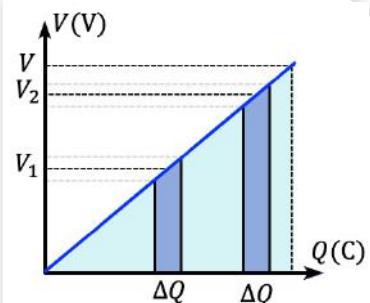
أ. مساحة كاً من صفيحتي المواسع.

شحنة المهاus.

الطاقة المخزنة في المواسع Energy Stored in a Capacitor

يعدُّ المواسع المشحون مخزنًا لطاقة الوضع الكهربائية، فعند وصل طرفٍ في بطارية مع صفيحتيِّ مواسع؛ فإنَّ البطارية تبذل شغلاً لنقل الشحنات إلى صفيحتيه، وهذا الشغل يساوي طاقة الوضع الكهربائية المخزنة فيه.

ذكرنا سابقاً أنه في أثناء شحن المواسع يزداد جهده بزيادة الشحنات عليه، والشكل (40) يوضح العلاقة بينهما. الاحظ أنه عند زيادة شحنة المواسع بمقدار ΔQ عند متوسَّط جهد مقداره V_1 فإنَّ ذلك يتطلَّب شغلاً يساوي مساحة المستطيل $V_1 \Delta Q$ ، وكلما ازدادت شحنة المواسع تزداد مساحة المستطيل $V_2 \Delta Q$ نتيجة $V_2 \Delta Q$ ؛ أي إنَّ V زادَتَ ΔQ ، وهذا يتطلَّب بذل شغل أكبر. والمساحة الكلية تحت المنحنى (المساحة المعلقة بين الخط المستقيم والمُحوَر الأفقي) التي تمثل مساحة المثلث تساوي الشغل الكلي W المبذول في شحن المواسع إلى شحنة Q وجهد



الشكل (40): الطاقة المخزنة في المواسع.

$$W = \frac{1}{2} QV$$

هذا الشغل المبذول في شحن المواسع يساوي طاقة الوضع الكهربائية المخزنة في المواسع:

$$PE = \frac{1}{2} QV$$

وبيما أنَّ $Q = CV$ فإنَّ

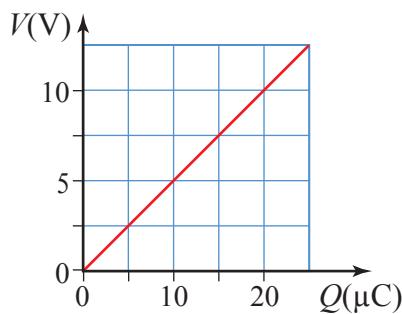
$$PE = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$$

وإذا فصلت البطارية عن المواسع - بعد شحنه - ووصل طرفاً المواسع بجهاز كهربائيٍّ ضمن دارة كهربائية، فإنَّ الطاقة الكهربائية المخزنة في المواسع تحول إلى شكل آخر من الطاقة، إذ تنتقل الإلكترونات من صفيحة المواسع السالبة إلى الصفيحة الموجبة على شكل تيار كهربائيٍّ في الدارة؛ يتلاشى بالتدرج خلال مدة زمنية قصيرة لتصبح شحنة المواسع النهائية صفرًا، وتُسمى هذه العملية تفريغ المواسع

.Discharging a Capacitor

أفَكِرْ: عند وصل طرفيِّ مواسع مشحون ومعزول بمصباح، ماذا يحدث لكل من الكميات الآتية للمواسع: مواسعته، جهده، شحنته، الطاقة الكهربائية المخزنة فيه؟

أتحقق: مَاذا تمثل المساحة الكلية تحت منحنى $(Q - V)$ ؟ ✓



يُمثل الرسم البياني في الشكل (36) العلاقة بين جهد الموسوع والشحنة الكهربائية المختزنة فيه، بناءً عليه أحسب:

أ. موسوعة الموسوع.

ب. الطاقة الكهربائية المختزنة في الموسوع عندما يصبح جهده (10 V).

المطلوب: $PE = ?$, $C = ?$

الحلّ:

أ. ميل الخط المستقيم يساوي $\frac{1}{C}$ ؛ أي إنّ:

$$\frac{V}{Q} = \frac{1}{C}$$

$$\frac{5}{10 \times 10^{-6}} = \frac{1}{C} \Rightarrow C = 2 \times 10^{-6} \text{ F}$$

$$PE = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \times 2 \times 10^{-6} \times (10)^2 = 1 \times 10^{-4} \text{ J}$$

ب.

الربط بالطب



جهاز الصدمة الكهربائية للقلب (AED) جهاز يستعمل لمساعدة الأشخاص الذين يعانون من توقف القلب المفاجئ، أنظر إلى الشكل. وهو جهاز طبي متظور خفيف الوزن ومحمول وسهل الاستعمال، يمكنه تحليل نبضات القلب، وإذا اكتشف نبضاً غير طبيعي للقلب؛ فإنه يعمل على مساعدة القلب وإعادة تنظيم ضرباته الطبيعية عن طريق صدمة كهربائية عبر الصدر إلى القلب؛ إذ يطلب برنامج الجهاز من المستعمل الضغط على زر لإصدار صدمة كهربائية. وفي بعض الأجهزة المتطرورة يجري ذلك تلقائياً من دون تدخل المستعمل.

ويجري توفير هذه الأجهزة في الأماكن العامة مثل القاعات الرياضية.

يتركب الجهاز من عدة أجزاء رئيسة منها موسوع كهربائي، وهو الجزء المسؤول عن تأمين الشحنات الكهربائية اللازمة لحدوث الصدمة؛ عن طريق تفريغ الشحنات بشكل لحظي، ويجري شحنه باستعمال بطارية مشحونة وجاهزة للاستعمال.



جهاز الصدمة الكهربائية للقلب (AED).

توصيل المواسعات Combining Capacitors

تصنع المواسعات بحيث تكون لها مواسعة محددة، وتعمل على فرق جهد محدد، وقد يتطلب أحياناً في دارة إلكترونية قيمة لمواسعة غير متوفرة، عندئذٍ يمكن الحصول عليها بوصل مجموعة من المواسعات معاً. توصل المواسعات معاً بعدة طرائق منها طريقتان شائعتان، هما التوصيل على التوالي والتوصيل على التوازي أو الجمع بينهما، ويطلق على المواسعة الكلية لمجموعة مواسعات تتصل معاً في دارة كهربائية **المواسعة المكافئة Equivalent Capacitance**.

التوصيل على التوازي Parallel Combination

يُبيّن الشكل (37) ثلاثة مواسعات (C_1, C_2, C_3) تتصل على التوازي مع بطارية، إذ تتصل صفيحتا كل مواسعة مع قطبي البطارية نفسها؛ أي إن الصفائح المتصلة مع القطب الموجب للبطارية تُشحن بشحنة موجبة، والصفائح المتصلة مع القطب السالب تُشحن بشحنة سالبة، بحيث يكون فرق الجهد بين صفيحتي كل مواسعة متساوياً ويساوي جهد البطارية V (قراءة الفولتميتر).

وبما أن $Q = CV$ فإن الشحنة المختزنة في كل مواسعة:

$$Q_1 = C_1 V, \quad Q_2 = C_2 V, \quad Q_3 = C_3 V$$

والشحنة الكلية المختزنة في المواسعات الثلاثة Q تساوي مجموع شحنات هذه المواسعات:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

وبما أن $Q = CV$ فإن:

$$CV = C_1 V + C_2 V + C_3 V$$

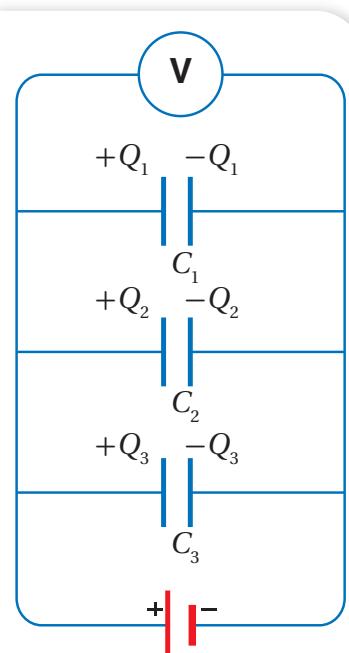
وبالقسمة على V نحصل على:

$$C = C_1 + C_2 + C_3$$

حيث C : المواسعة المكافئة للمواسعات الثلاثة المتصلة على التوازي.

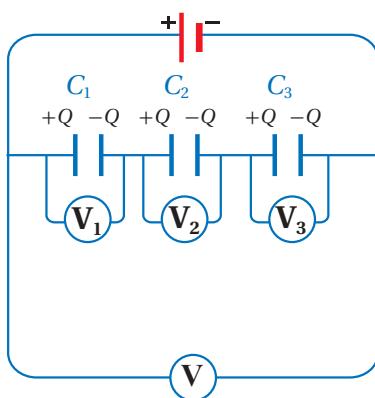
وبشكل عام، فإن المواسعة المكافئة C لمجموعة مواسعات تتصل معاً على التوازي تساوي المجموع الجبري لقيم هذه المواسعات، أي إن:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$$



الشكل (37): التوصيل على التوازي.

التوصل على التوالي Series Combination



يُبيّن الشكل (38) ثلاثة مواسعات (C_1, C_2, C_3) تتصل معاً على التوالي مع بطارية، تُشحن صفيحة المواسع الثالث الموصلة مع القطب السالب للبطارية بشحنة سالبة ($-Q$)، بينما تُشحن صفيحة المواسع الأول الموصلة مع القطب الموجب للبطارية بشحنة موجبة ($+Q$)، أمّا بقية الصفائح بينهما فتشحن بالبحث؛ بحيث تشحن الصفيحة اليسرى للمواسع C_3 بشحنة موجبة $+Q$ والصفيحة اليمنى للمواسع C_2 بشحنة سالبة $-Q$ – وهكذا لبقية الصفائح، بمعنى أنّ شحنة المواسع متساوية وتساوي الشحنة التي تحملها المواسعة المكافئة. أمّا المجموع الجبري لجهود المواسعات الثلاثة فيساوي جهد البطارية V :

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

وبما أنّ $C = \frac{Q}{V}$ فإنّ المعادلة تؤول إلى:

$$\frac{Q}{C} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3}$$

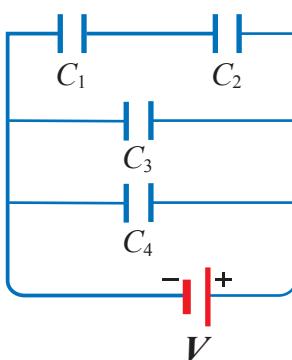
وبالقسمة على Q نحصل على:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

حيث C : المواسعة المكافئة للمواسعات الثلاثة المتصلة على التوالي.
وبشكل عام؛ فإنّ المواسعة المكافئة C لمجموعة مواسعات تتصل معاً على التوالي تعطى بالعلاقة:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots$$

ولإيجاد المواسعة المكافئة لعدة مواسعات تتصل معاً على التوالي أو على التوازي بطريقة عملية، يمكن إجراء التجربة الآتية:

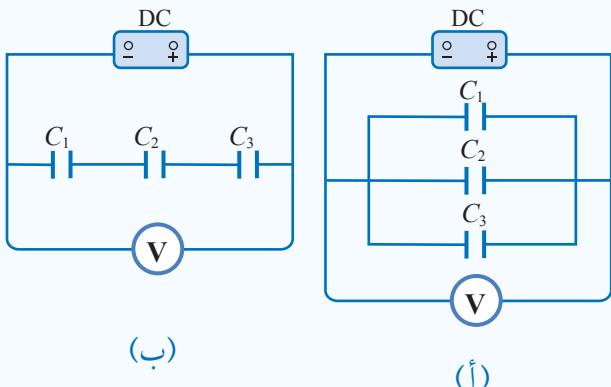


التجربة ٤

المواسعة المكافأة لعدة مواسعات تتصل على التوالي، أو التوازي

المواد والأدوات:

(3) مواسعات، مصدر طاقة (تيار مستمر DC)، فولتميتر، أسلاك توصيل، لواقت فلزية.



إرشادات السلامة: الحذر من رفع جهد المصدر إلى جهد عالٍ، ما يؤدي إلى تلف المواسعات إضافة إلى خطورته.

خطوات العمل:
بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أُنفذ الخطوات الآتية:

- أتأكد من أنّ المواسعات غير مشحونة ($V = 0$)؛ عن طريق توصيل سلك سميك بين طرفي المواسع.
- أصل المواسعات الثلاثة على التوازي كما في الدارة المبينة في الشكل (أ)، ثم أغلق الدارة.
- أقيس:** أرفع جهد مصدر الطاقة حتى تُصبح قراءة الفولتميتر أقل من الجهد المكتوب على المواسع (10 V مثلًا)، ثم أفصل الفولتميتر وأستعمله لقياس جهد كلّ مواسع من المواسعات الثلاثة، وأدون نتائجي في الجدول.
- أفصل الدارة وأفرّغ المواسعات من شحنتها، ثم أعيد توصيلها على التوالي كما في الشكل (ب)، وأغلق الدارة.
- أكرّر الخطوة (3)، وأدون نتائجي في الجدول.

التحليل والاستنتاج:

- أقارن** - عن طريق النتائج العملية - بين المواسعات في حالة التوصيل على التوازي والتوصيل على التوالي من حيث الشحنة والجهد. هل تتفق النتائج العملية مع ما تعلّمته نظريًا؟
- استخدم الأرقام:** أحسب المواسعة المكافأة المقيسة والمواسعة المكافأة المتوقعة، وأقارن بينهما.
- أتوقع** مصادر الخطأ المحتملة في التجربة. كيف يمكنني تجنبها؟

المثال 20

مواسعان، مواسعة الأول ($5 \mu\text{F}$) والثاني ($10 \mu\text{F}$) وصلتا على التوازي مع بطارية جهدتها (30 V)، أحسب:
أ. المواسعة المكافئة.

ب. شحنة كل من المواسعين الأول والثاني.

المعطيات: $V = 30 \text{ V}$, $C_1 = 5 \mu\text{F}$, $C_2 = 10 \mu\text{F}$

المطلوب: $Q_1 = ?$, $Q_2 = ?$, $C = ?$

الحل:

أ. المواسعة المكافئة:

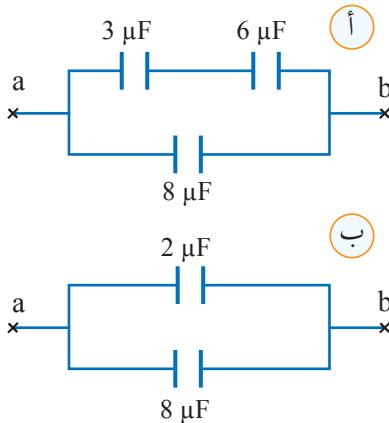
ب. جهد كل من المواسعين يساوي جهد البطارية وبالتالي:

$$Q_1 = C_1 V = 5 \times 10^{-6} \times 30 = 1.5 \times 10^{-4} \text{ C}$$

$$Q_2 = C_2 V = 10 \times 10^{-6} \times 30 = 3 \times 10^{-4} \text{ C}$$

.....

المثال 21



يُمثل الشكل (40/أ) جزءاً من دارة كهربائية يحتوي على (3) مواسعات،
أحسب المواسعة المكافئة للمواسعات الثلاثة.

المعطيات: $C_3 = 3 \mu\text{F}$, $C_6 = 6 \mu\text{F}$, $C_8 = 8 \mu\text{F}$

المطلوب: $C = ?$

الحل: المواسعان ($3 \mu\text{F}$, $6 \mu\text{F}$) على التوالى ومواسعتهما المكافئة:

$$\frac{1}{C_{3,6}} = \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_6}$$

$$\frac{1}{C_{3,6}} = \frac{1}{3} + \frac{1}{6} = \frac{6+3}{18} = \frac{1}{2} \Rightarrow C_{3,6} = 2 \mu\text{F}$$

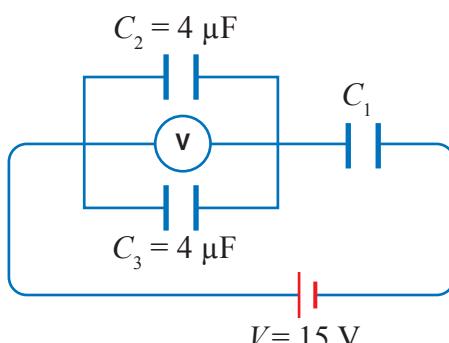
الشكل (40): المواسعة المكافئة.

لذا؛ يمكن استبدال مواسع مواسع موسعة $2 \mu\text{F}$ بالمواسعين ($3 \mu\text{F}$, $6 \mu\text{F}$) بحيث يوصل على التوازي مع المواسع

$C = C_{3,6} + C_8 = 2 + 8 = 10 \mu\text{F}$ كما في الشكل (42/ب)، ومواسعتهما المكافئة $C = 8 \mu\text{F}$

.....

يُبيّن الشكل (41) ثالث مواسعات تتصل مع بطارية جهدتها (15 V)، إذا كانت قراءة الفولتميتر (10 V)؛ فأحسب:



الشكل (41): المواسعة المكافئة.

أ. جهد المواسع C_1 .

ب. الطاقة الكهربائية المخزنة في المواسع C_2 .

ج. مواسعة المواسع C_1 .

المعطيات: $V = 15 \text{ V}$, $V_2 = V_3 = 10 \text{ V}$

المطلوب: $V_1 = ?$, $C_1 = ?$, $PE_2 = ?$

الحلّ:

أ. قراءة الفولتميتر تمثل جهد المواسعين المتصلين على التوازي:

$$V_2 = V_3 = V_{23} = 10 \text{ V}$$

$$V = V_1 + V_{23}$$

$$15 = V_1 + 10 \Rightarrow V_1 = 5 \text{ V}$$

ب. الطاقة المخزنة في المواسع الثاني:

$$C_{23} = C_2 + C_3 = 4 + 4 = 8 \mu\text{F}$$

ج. أحسب أولاً المواسعة (C_{23}) ثم أحسب الشحنة (Q_{23}):

$$Q_{23} = C_{23} V_{23}$$

$$Q_{23} = 8 \times 10^{-6} \times 10 = 8 \times 10^{-5} \text{ C}$$

$$Q_1 = Q_{23} = 8 \times 10^{-5} \text{ C}$$

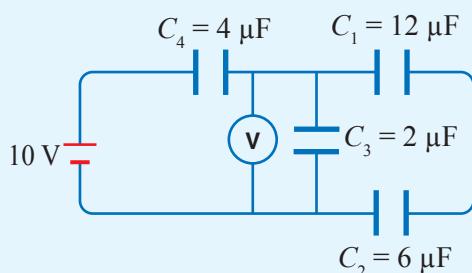
بما أن المواسع (C_1) يتصل مع المواسع (C_{23}) على التوالي، فإن:

$$C_1 = \frac{Q_1}{V_1} = \frac{8 \times 10^{-5}}{5} = 1.6 \times 10^{-5} \text{ F} = 16 \mu\text{F}$$

مواسعة المواسع: C_1

تمرين

استخدم الأرقام: تتصل (4) مواسعات مع بطارية جهدتها (10 V) كما في الشكل، أحسب:



أ. المواسعة المكافئة.

ب. شحنة المواسع الرابع.

ج. قراءة الفولتميتر.

د. الطاقة الكهربائية المخزنة في المواسع الثالث.

مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسية:** أوضح المقصود بكل من المفاهيم والمصطلحات الآتية: المواسع الكهربائية، المواسعة الكهربائية، المواسعة المكافئة.

2. **أستنتج:** مواسع ذو صفيحتين متوازيتين، كيف يمكن زيادة مواسعته إلى (4) أضعاف؟

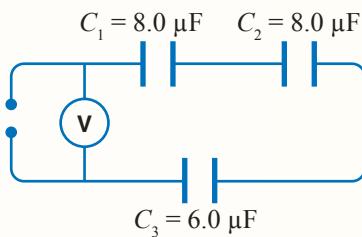
3. **أستنتاج:** ماذا نعني بقولنا مواسعة مواسع ($5 \mu\text{F}$)؟

4. **استخدم الأرقام:** أحسب الطاقة الكلية المختزنة في ثلاثة مواسع متساوية كل منها ($30 \mu\text{F}$) تتصل على التوازي مع بطارية جهدتها (12 V).

5. **أصدر حكما:** في أثناء عمل مهندس في صيانة الحواسيب، لزمته مواسع متساوية كل منها (5nF) وليس لديه سوى مواسعين متساويين كل منهما (10nF). ما طريقة التوصيل الأنسب للمواسعين للحصول على المواسعة المطلوبة؟ أوضح إجابتي.

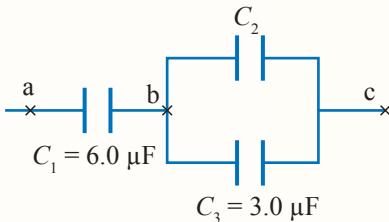
6. **استخدم الأرقام:** مواسع ذو صفيحتين متوازيتين مساحة كل من صفيحتيه ($2.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2$) والبعد بينهما (0.10 cm)، مشحون بشحنة مقدارها (6.0nC) ومفصول عن مصدر الطاقة (البطارية)، أحسب:
أ. مواسعة المواسع.
ب. جهد المواسع.

ج. إذا أصبحت المسافة بين صفيحتيه نصف قيمتها الابتدائية، ماذا يحدث لكل من: مواسعة المواسع وجده، والطاقة الكهربائية المختزنة فيه.



7. **استخدم الأرقام:** تتصل ثلاثة مواسع متساوية مع مصدر طاقة كما في الشكل المجاور. إذا علمت أن شحنة المواسع $C_3 = 3.0 \times 10^{-5} \text{ C}$ تساوي
فأحسب:
أ. مواسعة المكافئة.
ب. قراءة الفولتميتر.

8. **التفكير الناقد:** يمثل الشكل المجاور جزءاً من دارة كهربائية تحتوي على ثلاثة مواسع. إذا علمت أن فرق الجهد بين النقطتين a و c يساوي (20 V)، وبين النقطتين b و c يساوي (12 V)، فأحسب:



أ. شحنة المواسع C_1 .
ب. مواسعة المواسع C_2 .

ج. الطاقة الكلية المختزنة في المواسع الثلاثة.

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

1. مواسع ذو صفيحتين متوازيتين، متصل بطارية. عندما تزداد مساحة كل من صفيحتيه إلى مثليٍ ما كانت عليه ويقل البعد بينهما إلى النصف مع بقائه متصلًا بالبطارية، فإن الطاقة المختزنة فيه:

- أ . تقل إلى النصف.
ب. تقل إلى الربع.
ج. تزداد إلى المثلين.
د. تزداد أربعة أمثال.

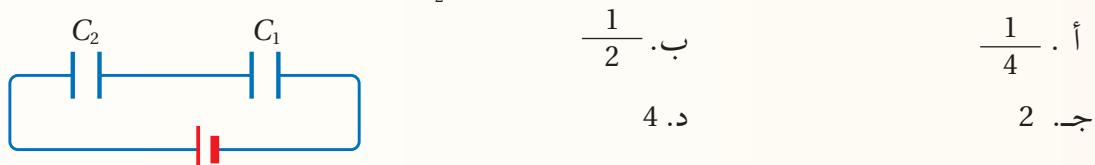
2. مواسعان مواسعتهما ($C_1 = 6 \mu\text{F}$, $C_2 = 4 \mu\text{F}$) يتصلان على التوازي مع بطارية، إذا كانت الطاقة المختزنة في المواسع الأول (Jm^3) فإن الطاقة المختزنة في المواسع الثاني بوحدة Jm^3 :

- أ . 2
ب. 4
ج. 6
د. 3

3. مواسع ذو صفيحتين متوازيين مواسعته C ، إذا ازدادت مساحة كلٌ من صفيحتيه إلى مثليٍ ما كانت عليه، وقلّت المسافة بينهما إلى النصف؛ فإن مواسعته تُصبح:

- أ . $\frac{C}{2}$
ب. $\frac{C}{4}$
ج. $4C$
د. C

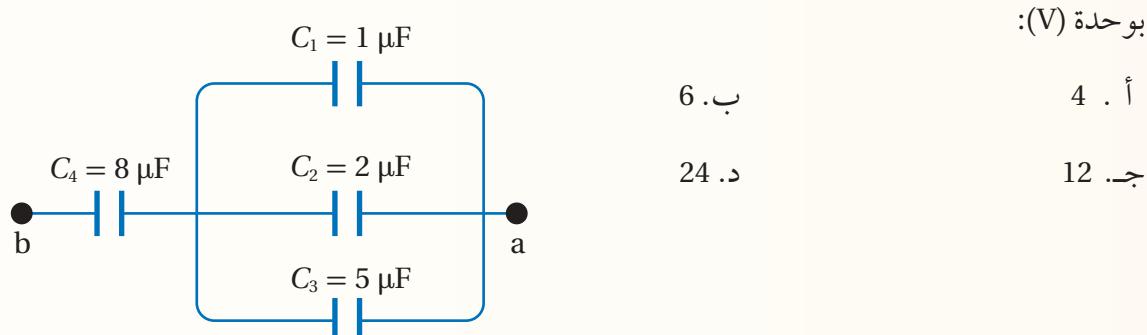
4. في الشكل المجاور إذا كانت مواسعة المواسع الثاني مثلي مواسعة المواسع الأول فإن نسبة الطاقة المختزنة في المواسع الأول إلى الطاقة المختزنة في المواسع الثاني $\frac{PE_1}{PE_2}$ تساوي:



- أ . $\frac{1}{4}$
ب. $\frac{1}{2}$

- ج. 2
د. 4

5. أربع مواسعات مشحونة تتصل معاً كما هو مبين في الشكل. معتمدًا على الشكل وبياناته وإذا علمت أن قيم المواسعة بالميكروفاراد، وأن المواسع (C_4) شحنته تساوي ($48 \mu\text{C}$)، فإن فرق الجهد بين النقطتين (a) و (b) بوحدة (V) :



- أ . 4
ب. 6

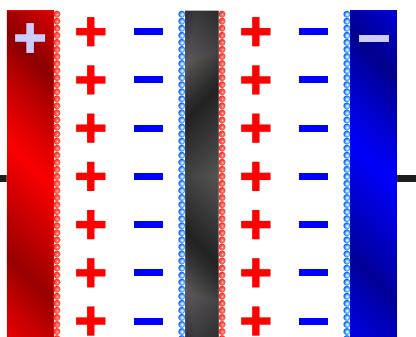
- ج. 12
د. 24

الإثراء والتوصّع

المواسعات الفائقة Supercapacitor

المواسعات الفائقة Supercapacitors أو Ultracapacitors كلّها تسميات لنمط واحد من المواسعات، وهي تكنولوجيا حديثة في مجال تخزين الطاقة. فما المواسعات الفائقة؟ وما مميّزاتها؟

بدأت عملية تطوير المواسعات منذ عشرات السنين لتخزين طاقة أكبر عن طريق المواسعات الفائقة، التي تُدعى أحياناً المواسعات ذات الطبقة المضاعفة (DLC) Double layer capacitors كونها



الأكثر انتشاراً، انظر إلى الشكل المجاور. وهي مواسعات ذات مواصفة عالية جدًا تصل إلى مئات الآلاف من الفاراد وبحجم مماثل للمواسعات العادية، ولكن جهدها قليل ويتراوح بين (2.5 - 2.75 V) مقارنة مع جهود المواسعات العادية كما في الشكل، ولكن يمكن توصيل عدّة مواسعات على التوالي للحصول على جهد أكبر.

عند المقارنة بين المواسعات الفائقة والبطاريات المستعملة حالياً مثل بطارية الليثيوم؛ فإن المواسعات الفائقة تتميّز عن البطاريات بما يأتي:

- زمن الشحن والتفرير قليل جداً.
- عدد دورات الشحن والتفرير التي يمكن إجراؤها قد تصل إلى مليون دورة، بينما لا تصل في البطارية إلى أكثر من (1000) دورة.

• آمنة ولا تحتوي على مواد سامة في تركيبها، وتتكلفتها الماديّة قليلة.

• قدرتها على تحمل تغيير درجات الحرارة (-50°C) - (80°C).

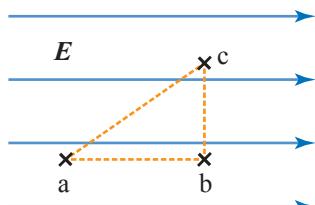


مواسع عادي

مواسع فائق الموسعة

مراجعة الوحدة

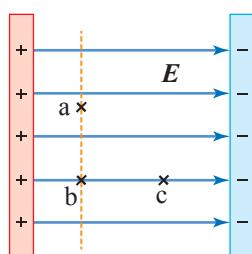
1. أضع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة لكل جملة مما يأتي:



1. تزداد طاقة الوضع الكهربائي لبروتون في مجال كهربائي منتظم، كما في الشكل، عند انتقاله:

- أ. من النقطة c إلى النقطة b.
- ب. من النقطة b إلى النقطة c.
- ج. من النقطة a إلى النقطة c.
- د. من النقطة c إلى النقطة a.

2. ثلاثة نقاط في مجال كهربائي منتظم كما في الشكل، أي المقارنات الآتية صحيحة بين جهد تلك النقاط:

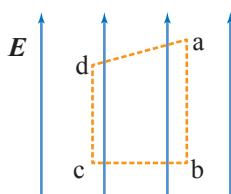


- | | |
|--|--|
| V _a > V _b = V _c | V _a = V _b = V _c |
| V _a = V _b < V _c | V _a = V _b > V _c |

3. الجهد الكهربائي عند نقطة تقع على سطح موصل كروي مشحون ومعزول نصف قطره R يساوي (400 V). ما

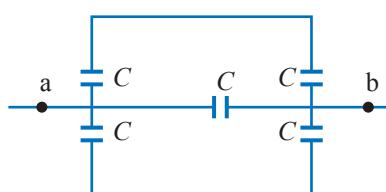
مقدار الجهد الكهربائي عند نقطة تبعد مسافة $\frac{R}{2}$ عن مركزه؟

- أ. 0 V.
- ب. 800 V.
- ج. 400 V.
- د. 200 V.



4. يُبيّن الشكل (4) نقاط على رؤوس شبه منحرف في مجال كهربائي منتظم، النقطتان اللتان يكون فرق الجهد بينهما يساوي صفرًا هما:

- أ. (a,b)
- ب. (b,c)
- ج. (c,d)
- د. (d,a)



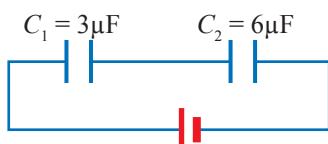
5. مقدار المواسعة المكافئة لمجموعة المواسيعات بين النقطتين (a,b)

في الشكل يساوي:

- أ. $\frac{C}{2}$
- ب. C.
- ج. 2 C.
- د. 5 C.

6. ما التغيير الذي يحدث للطاقة المخزنة في مواسع عند زيادة فرق الجهد بين صفيحتيه إلى المثلين مع بقاء مواسعته ثابتة؟

- أ. تزداد إلى المثلين.
- ب. تقل إلى النصف.
- ج. تزداد إلى أربعة أمثال.
- د. تقل إلى الرابع.

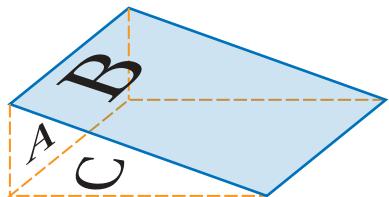


7. مواسع يتصالن مع بطارية كما في الشكل، عند المقارنة بين المواسيعين؛ أي العبارات الآتية صحيحة؟

- | | |
|-----------------------------------|------------------------------------|
| V ₂ = V ₁ . | V ₂ = 2V ₁ . |
| Q ₂ = Q ₁ . | Q ₂ = 2Q ₁ . |

مراجعة الوحدة

8. يبين الشكل سطحا معلقا على شكل منشور ثلاثي، وضع في مجال كهربائي منتظم، فكان التدفق عبر الأسطح الثلاثة كما يأتي: التدفق عبر السطح (A) صفر، التدفق عبر السطح (B) سالب، التدفق عبر السطح (C) موجب، التدفق الكلي صفر.



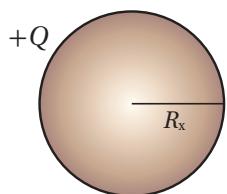
بناء على هذه النتيجة فإن اتجاه المجال يكون باتجاه محور:

أ. $+x$

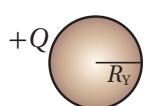
ب. $-x$

ج. $+y$

د. $-y$



9. كرتان موصلتان (X, Y) مشحونتان بمقدار الشحنة نفسه. الكثافة السطحية للشحنة على سطح الكرة (X) تساوي (σ) إذا علمت أن نصف قطر الكرة (X) مثلي نصف قطر الكرة (Y)، فإن مقدار المجال الكهربائي عند نقطة تقع بالقرب من سطح الكرة (Y) بدلالة (σ) يساوي:



أ. $\frac{4\sigma}{\epsilon_0}$

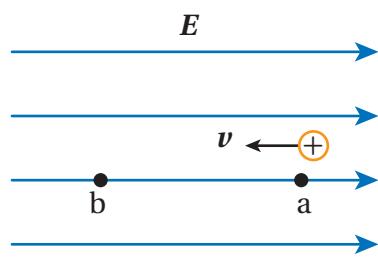
ب. $\frac{2\sigma}{\epsilon_0}$

ج. $\frac{\sigma}{2\epsilon_0}$

د. $\frac{\sigma}{4\epsilon_0}$

10. انطلق جسيم شحنته موجبة من النقطة (a) داخل مجال كهربائي منتظم بسرعة ابتدائية ($1 \times 10^5 \text{ m/s}$) بالاتجاه المبين في الشكل، وتوقف عند النقطة (b) بعد مرور ($2.5 \times 10^{-6} \text{ s}$). بإهمال قوة الجاذبية الأرضية، فإن تسارع

الجسيم مقداراً واتجاهًا يساوي:



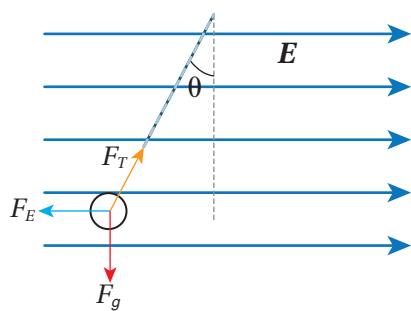
أ. $2.5 \times 10^{11} \text{ m/s}^2, +x$

ب. $2.5 \times 10^{11} \text{ m/s}^2, -x$

ج. $4 \times 10^{10} \text{ m/s}^2, +x$

د. $4 \times 10^{10} \text{ m/s}^2, -x$

11. كرة صغيرة مشحونة وزنها (F_g)، علقت رأسيا بخيط داخل مجال كهربائي منتظم مقداره (E)، فاتزنت كما هو



مبين في الشكل. مقدار شحنة الكرة، ونوعها يساوي:

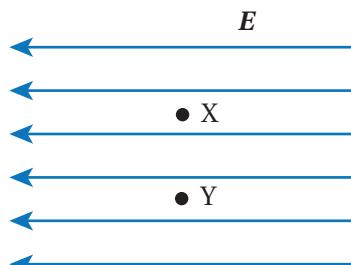
أ. $\frac{F_g \tan \theta}{E}$ ، موجبة

ب. $\frac{F_g \tan \theta}{E}$ ، سالبة

د. $\frac{E}{F_g \tan \theta}$ ، سالبة

ج. $\frac{E}{F_g \tan \theta}$ ، موجبة

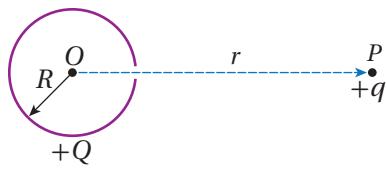
مراجعة الوحدة



12. جسيمان (X, Y) مشحونان بشحتين متساوين، أطلقا من السكون داخل مجال كهربائي منتظم، من النقطة نفسها، كما يبين الشكل. وبعد مرور مدة من الزمن وُجد أن سرعة الجسيم (X) أكبر من سرعة الجسيم (Y). المعلومة المؤكدة التي أستنتجها عن الجسيمين:

- القوة الكهربائية المؤثرة في الجسيم (X) أقل من المؤثرة في الجسيم (Y).
- طاقة الحركة للجسيم (X) أقل من الطاقة الحركية للجسيم (Y).
- كتلة الجسيم (X) أقل من كتلة الجسيم (Y).
- شغل القوة الكهربائية على الجسيم (X) أقل من الشغل على الجسيم (Y).

13. شحنة نقطية ($+q$) موضوعة عند نقطة (P) تبعد مسافة (r) عن مركز كرة مجوفة غير موصلة، نصف قطرها (R)، ومشحونة بشحنة ($+Q$) توزع على سطحها بانتظام، ويوجد على سطحها فتحة صغيرة كما هو مبين في الشكل. لنقل الشحنة ($+q$) من النقطة (P) إلى مركز الكرة (O) بسرعة ثابتة، بفعل قوة خارجية فإن شغل القوة الخارجية يساوي :



$$\text{ب. } \frac{k q Q}{R}$$

$$\text{أ. } \frac{k q Q}{r}$$

$$\text{د. } k q Q \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{r} \right)$$

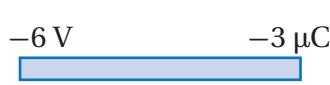
$$\text{ج. } \frac{k (Q-q)}{R}$$

14. بالاعتماد على البيانات المثبتة على المواسع الكهربائي المبين في الشكل فإن شحنة المواسع وجده على الترتيب:



$$\text{أ. } Q = 0, V = 0$$

$$\text{ب. } Q = 3 \mu\text{C}, V = 6 \text{ V}$$



$$\text{ج. } Q = 6 \mu\text{C}, V = 12 \text{ V}$$

$$\text{د. } Q = 3 \mu\text{C}, V = 12 \text{ V}$$

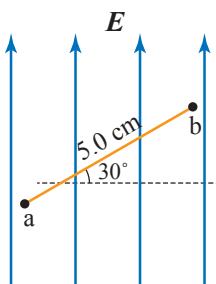
15. مواسعان البعد بين صفيحتي كل منها متساوي، ومساحة كل من صفيحتي الأول (A) والثاني (3A). وصلتا مع بطارية على التوازي، إذا كان المجال الكهربائي بين صفيحتي المواسع الأول (E) وشحنته (Q)، فإن مقدار المجال والشحنة للمواسع الثاني:

$$\text{ب. } E, 3Q$$

$$\text{أ. } E, Q$$

$$\text{د. } \frac{1}{3} E, 3Q$$

$$\text{ج. } \frac{1}{3} E, Q$$

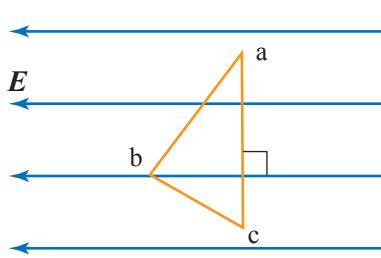


2. **استخدم الأرقام:** مجال كهربائي متظم مقداره $3.0 \times 10^4 \text{ N/C}$ كما في

الشكل، مستعيناً بالشكل أحسب:

أ. فرق الجهد $(V_a - V_b)$.

ب. التغيير في طاقة الوضع الكهربائية لشحنة مقدارها (-6.0 pC) عند انتقالها من النقطة a إلى النقطة b.



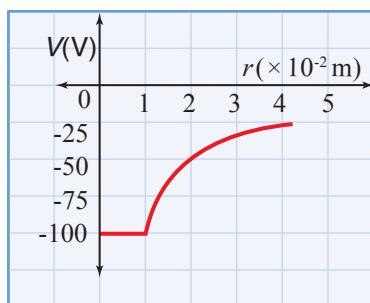
3. **الفكير الناقد:** (3) نقاط (a, b, c) في مجال كهربائي متظم كما في الشكل،

إذا بذلت القوة الكهربائية شغلاً مقداره (J 100) لنقل بروتون من النقطة a

إلى النقطة b، فأحسب:

أ. التغيير في طاقة الوضع الكهربائية عند انتقال البروتون من النقطة a إلى النقطة c.

ب. الشغل الذي تبذله القوة الكهربائية لنقل البروتون من النقطة c إلى النقطة b.



4. **أستنتج:** يُمثل الرسم البياني في الشكل، العلاقة بين الجهد الكهربائي

والبعد عن مركز موصل كروي مشحون بشحنة سالبة، مستعيناً بالشكل

أحسب:

أ. جهد الموصل الكروي.

ب. الشغل المبذول من قبل القوة الكهربائية لنقل شحنة $(+6.0 \text{ nC})$ من نقطة تبعد (4 cm) إلى نقطة أخرى تبعد (2 cm) عن مركز الموصل.



5. **استخدم الأرقام:** يستعمل مواسع مواسعته ($180 \mu\text{F}$) في وحدة إضاءة

(فلاش) الكاميرا كما في الشكل لتخزين الطاقة الكهربائية؛ لتفرغ من

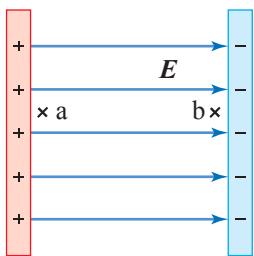
المواسع خلال جزء من الثانية على شكل طاقة ضوئية في أثناء التقاط

الصورة. إذا شحن المواسع حتى أصبح جهده (200 V) بوساطة بطارية؛

فأحسب:

أ. شحنة المواسع الكلية.

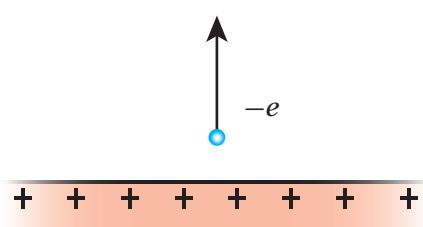
ب. الطاقة الكهربائية المخزنة في المواسع.



6. جسيم كتلته (m) وشحنته (q)، بدخوله من السكون داخل مجال كهربائي منتظم (E)، كما هو مبين في الشكل. الجسيم بدأ حركته من النقطة (a) بالقرب من الصفيحة الموجبة إلى الصفيحة السالبة. إذا علمت أن الإزاحة التي قطعها من (a) إلى (b) تساوي (d)، فأثبت أن سرعة الجسيم (v) لحظة وصوله إلى النقطة (b) تعطى بالعلاقة الآتية:

$$v = \sqrt{\frac{2qEd}{m}}$$

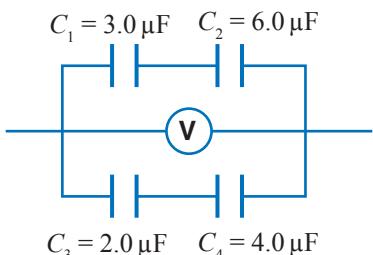
7. التفكير الناقد: يبين الشكل قشرة رقيقة لانهائية الأبعاد في وضع أفقى، مشحونة بشحنة موجبة تتوزع على سطحها بانتظام، وبكثافة سطحية (σ). أطلق الإلكترون من نقطة بالقرب من القشرة رأسياً إلى أعلى بسرعة ابتدائية ($2.0 \times 10^5 \text{ m/s}$ ، وكانت المدة الزمنية من لحظة إطلاقه إلى لحظة رجوعه إلى نقطة الإطلاق ($14.0 \times 10^{-12} \text{ s}$).).



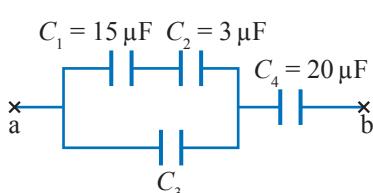
(بإهمال الوزن، واعتبار أن القوة الوحيدة المؤثرة في الإلكترون هي القوة الكهربائية) أحسب:

أ. تسارع الإلكترون

ب. الكثافة السطحية للشحنة (σ).



8. أستخدم الأرقام: يُمثل الشكل جزءاً من دارة كهربائية. إذا علمت أن قراءة الفولتميتر (V)؛ فأحسب:
- أ. المواسعة المكافئة.
 - ب. الطاقة الكلية المخزنـة في الموساعـات.



9. أستخدم الأرقام: تتصل أربع موساعـات معـاً في جزء من دارة كهربائية كما في الشكل. إذا علمت أن شحنة الموسـع C_4 تساوي $30 \mu\text{C}$ ؛ وفرق الجهد بين النقطـتين a و b يساوي 4.5 V، أحسب المـواسـعة (C_3).

الوحدة

التيّار الكهربائي

Electric Current

4

أتاهمل الصورة

انتشرت السيارات التي تعمل كليًّا أو جزئيًّا بالطاقة الكهربائية، ب مختلف الأشكال والفئات والأحجام. تستخدم السيارات الكهربائية الطاقة الكهربائية المخزنة في البطارية، حيث تحتوي السيارات الكهربائية على بطارية كبيرة السعة قابلة لإعادة الشحن. ما العوامل التي تحدد المدة الزمنية الازمة لإعادة شحن بطارية السيارة؟

الفكرة العامة:

أحدثت الطاقة الكهربائية ثورة في مجالات الحياة المختلفة، حتى أصبح من غير الممكن أن تخيل الحياة من غير الكهرباء. كي نتمكن من نقل الطاقة الكهربائية واستخدامها في حياتنا اليومية، يجب أن تتحرك الشحنات الكهربائية على شكل تيار كهربائي في دارات مغلقة.

الدرس الأول: المقاومة والقوة الدافعة الكهربائية

Resistance and Electromotive Force

الفكرة الرئيسية: تُصنّفُ المواد بحسب مقاومتها إلى موصلٍ وعزلٍ وشبه موصلٍ، والمقاويم الكهربائية أحد أهم عناصر الدارات الكهربائية، وتختلف في أنواعها وقيمتها باختلاف الغرض من استخدامها. ولسريان التيار الكهربائي في المقاومات؛ فلا بدّ من توافر قوّة دافعة كهربائية في الدارة.

الدرس الثاني: الدارة البسيطة والقدرة الكهربائية

Simple Circuit and Electric Power

الفكرة الرئيسية: تتضمّن تطبيقاتُ الكهرباء أجهزةً وداراتٍ كهربائيةً؛ تتفاوت من البسيطة، مثل دارة مصباح المكتب، إلى المعقدة مثل تلك التي تُستخدم في تشغيل بعض أجهزة الطائرة. ولكل جهازٍ كهربائيٍّ قدرةً كهربائيةً تناسب الهدف من استخدامه.

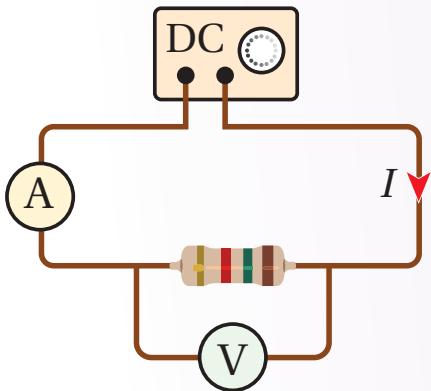
الدرس الثالث: توصيل المقاومات وقاعدتا كيرشوف

Combining Resistors and Kirchhoff's Rules

الفكرة الرئيسية: يُستخدم قانون أوم لتحليل الدارات الكهربائية البسيطة التي تتكون من عُروة واحدة، وإن احتوت تفرعاتٍ تشمل على مقاويم، نستخدم قواعد جمع المقاومات لدراستها، وفي حال احتوت التفرعات على بطارياتٍ ومقاومات، نستخدم قاعدتي كيرشوف إضافةً إلى ما سبق.

تجربة استهلاكية

استقصاء العلاقة بين الجهد والتيار بين طرفي مقاومة.



المواد والأدوات: مصدر طاقة مُنخفض الجهد (DC)، 3 مقاومات مختلفة، أميتر، فولتميتر، أسلاك توصيل.

إرشادات السلامة: الحذر من لمس الوصلات الكهربائية غير المعزلة والأجزاء الساخنة في الدارة.

خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أنفذ الخطوات الآتية:

1 أصل الدارة الكهربائية كما في الشكل، بحيث يتصل طرفا المقاومة مع طرفي مصدر فرق الجهد، ويقيس الأميتر (A) التيار المار في المقاومة، بينما يقيس الفولتميتر (V) فرق الجهد بين طرفيها.

2 **أضبط المتغيرات:** أضبط جهد المصدر عند قيمة مُنخفضة (1 V)، وأشغله ثم أسجل قراءتي الأميتر والفولتميتر، وأدوّنهما في جدول مُخصص في كتاب الأنشطة.

3 **أقيس:** أرفع جهد المصدر قليلاً، ثم أسجل قراءتي الأميتر والفولتميتر في الجدول، وأكرر ذلك ثلاث مرات، وفي كل مرّة أرفع قيمة الجهد، أحرص على عدم زiatتها عن قياس (6 V) من أجل عدم رفع درجة حرارة المقاومة.

4 **أكرر الخطوات الثلاث السابقة مرتين باستخدام مقاومة مختلفة في كل مرّة، وأدوّن القياسات.**

التحليل والاستنتاج:

1. أمثل قراءات الجدول بيانياً، بحيث يكون فرق الجهد على المحور الأفقي والتيار على المحور الرأسى.

2. **استنتج** مقدار المقاومة الكهربائية الذي يساوي مقلوب ميل منحنى العلاقة بين فرق الجهد والتيار للمقاومات الثلاث.

3. **أقارن** بين قيم المقاومات، وأصف كلاً منها، إن كانت ثابتة أو متغيرة، وهل تتأثر قيمة أيٍ منها بتغيير فرق الجهد بين طرفيها؟

4. **أتوّقع:** في حال استخدام مواد أخرى مختلفة؛ هل تسلك جميعها سلوك المقاومات من حيث النسبة بين فرق الجهد والتيار؟

التيار الكهربائي Electric Current

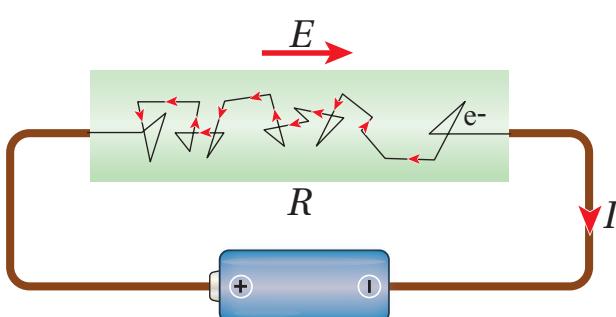
أذكّر أنّ الفلزات تحتوي على شحنات حرة (إلكترونات) تتحرّك في اتجاهات مختلفة، وعند تطبيق فرق جهد بين طرفٍ موصل فلزي ينشأ داخله مجال كهربائي يؤثّر بقوّة كهربائية في الإلكترونات الحرة فيدفعها للحركة في اتجاه واحد فيسري فيه تيار كهربائي. ويعتمد مقدار التيار (I) على كمية الشحنة التي تعبّر مقطعاً عرضياً في الموصل في وحدة الزمن.

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

حيث (ΔQ) كمية الشحنة، (Δt) زمن عبورها، كما تعلمت أنّ اتجاه «التيار الاصطلاحي» يكونُ بعكس اتجاه حركة هذه الإلكترونات. يقاس التيار الكهربائي بوحدة أمبير (A)، والأمير هو مقدار التيار الكهربائي الذي يسري في موصلٍ عندما تعبّر مقطعاً هذا الموصل شحنةً مقدارها (1 C) في ثانيةٍ واحدة. ويعرف التيار الكهربائي الذي يسري في موصل باتجاه واحد وقيمة ثابتة لا تتغيّر مع الزمن بـ«تيار مستمر» (DC). Direct current

المقاومة الكهربائية Electric Resistance

عند سريان تيار كهربائي في موصل؛ فإن الإلكترونات الحرة تصادم في ما بينها، كما تصادم مع ذرات الموصل؛ مما يعني أنها تواجه ممانعة لحركتها عند مرورها في الموصل، وتسلك مسارات متعرجة. ويبيّن الشكل (1) المسار المتعرج لأحد هذه الإلكترونات بسبب هذه التصادمات. تسمى خاصية ممانعة الموصل لمرور التيار الكهربائي فيه **المقاومة الكهربائية** (R), Electric resistance، وتُعرف مقاومة الكهربائية للموصل بأنّها نسبة فرق الجهد بين طرفيه إلى التيار الكهربائي المارّ فيه. تُقاس المقاومة الكهربائية بوحدة أوم (ohm)، ويُستخدم لتمثيلها الرمز (Ω). يمكن تعريف الأوم بـ«مقاومة موصل يسري فيه تيار كهربائي (1 A) عندما يكون فرق الجهد بين طرفيه (1 V)».



الفكرة الرئيسية:

تصنّفُ المواد بحسب مقاومتها إلى موصلةٍ وعزلةٍ وشبه موصلةٍ، والمقاومات الكهربائية أحد أهمّ عناصر الدارات الكهربائية، وتختلف في أنواعها وقيمها باختلاف الغرض من استخدامها. ولسرّان التيار الكهربائي في المقاومات لا بد من توافر قوّة دافعة كهربائية في الدارة.

نتائج التعلم:

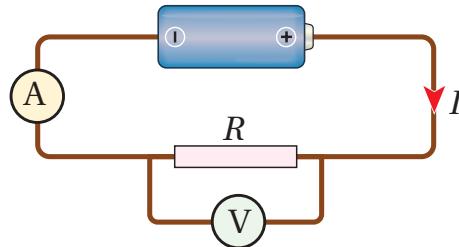
- أستنتج عملياً العوامل التي تعتمد عليها المقاومة الكهربائية لموصل.
- أميّز بين مفهومي المقاومة والمقاومة.
- أربط بين مقاومة موصل والعوامل التي تعتمد عليها بعلاقة رياضية.
- أحلل رسوماً بيانيّاً لأقارن بين المقاومة والأوميّة والمقاومة اللا أوّمية
- أعرّف القوّة الدافعة الكهربائية للبطارية، وفرق الجهد الكهربائي بمعادلات.

اللفاهم والمصطلحات:

Resistance	مقاومة
Resistivity	مقاوميّة
Electromotive Force	قوّة دافعة كهربائية
Ohm's law	قانون أوّم

الشكل (1): مسار حركة أحد الإلكترونات الحرّة في موصل.

الشكل (2): قياس كُلّ من؛ التيار الكهربائي الذي يسري في مقاومة كهربائية وفرق الجهد بين طرفيها.



قانون أوم Ohm's Law

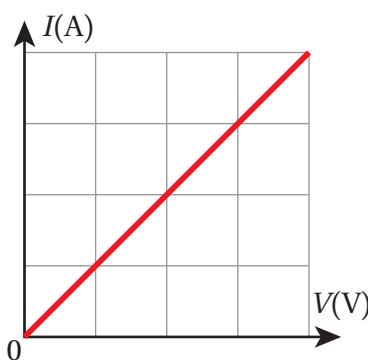
توصل العالم الألماني جورج أوم سنة (1827) إلى وجود علاقة تناُسٍ طرديٍّ بين التيار الكهربائي الذي يسري في موصل وفرق الجهد بين طرفيه عند ثبات درجة حرارته. وتُعرَف هذه العلاقة بـ**قانون أوم Ohm's law** الذي ينصُّ أنَّ «عند ثبات درجة حرارة الموصل، ينشأ فيه تيار كهربائي (I) يتناُس طرديًّا مع فرق الجهد بين طرفيه (ΔV)». وثبتت التناُسٌ بين فرق الجهد والتيار الكهربائي هو **مقاومة الموصل (R)**. كما في العلاقة الآتية:

$$\Delta V = IR$$

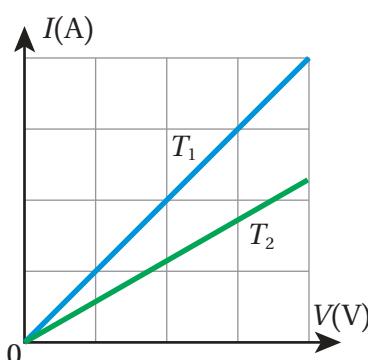
يُقاسُ فرق الجهد بوحدة الفولت (V)، وباستخدام هذه العلاقة يُعرَف الفولت أنه فرق الجهد بين طرفي موصلٍ مقاومته (1Ω) يسري فيه تيار كهربائي ($1 A$).

الموصلات الأوَمية Ohmic Conductors

في التجربة الاستهلاكية، نُفذ استقصاءً عمليًّا لدراسة العلاقة بين التيار الذي يسري في مقاومة كهربائية وفرق الجهد بين طرفيها. وجرى توصيل الدارة الكهربائية كما في الشكل (2)، واستُخدم جهاز أمبير (A) لقياس التيار الذي يسري في المقاومة، وجهاز فولتميتر (V) لقياس فرق الجهد بين طرفيها، وعندما مُثُلت العلاقة بين المتغيرين بيانياً، عند ثبات درجة الحرارة كانت خطًّا مستقيماً، كما في الشكل (3/أ). ومثل هذه الموصلات التي يكون منحنى ($I-V$) لها خطًّا مستقيماً عند ثبات درجة حرارتها، تُوصَف بأنها تحقق قانون أوم؛ لذلك تُسمَّى موصلاتٍ أوَميةً. وإيجاد ميل الخط المستقيم الذي يساوي مقلوب المقاومة؛ فإنَّه يمكن حساب مقدارها.



الشكل (3/أ): منحنى ($I-V$) لموصل أوَمي.

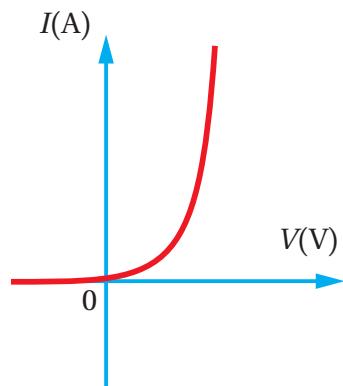


الشكل (3/ب): منحنى ($I-V$) لموصل أوَمي عند درجتي حرارة مختلفتين.

يبَين الشكل (3/ب) منحنى ($I-V$) لموصل أوَمي عند درجتي حرارة مختلفتين T_1 و T_2 . أُستنتج من الشكل أن مقاومة الموصِل الأوَمي تبقى ثابتة عند ثبوت درجة الحرارة. وفي حال تم تثبيت درجة حرارة الموصِل الأوَمي عند قيمة جديدة T_2 أكبر من T_1 ؛ فإن المقاومة تثبت عند قيمة جديدة أكبر.

المواد اللاأومية Nonohmic Materials

بعض المواد تكون العلاقة بين التيار الكهربائي الذي يسري فيها وفرق الجهد بين طرفيها غير خطية، حتى عند ثبات درجة حرارتها. وهذا يعني أن مقاومتها تتغير مع تغيير فرق الجهد بين طرفيها. مثل هذه المواد تسمى مواد لا أومية ومن الأمثلة عليها الوصلات الإلكترونية، الثنائي (diode)، والثنائي الباعث للضوء الإلكتروني، وهي مصنوعة من أشباه الموصلات، مثل الجermanium والسيликون. يمثل الشكل (4) العلاقة بين التيار وفرق الجهد لوصلة الثنائي.

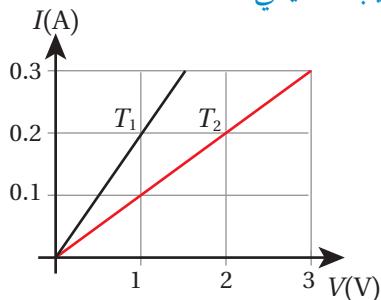


الشكل (4): منحنى $I-V$ لوصلة الثنائي.

تحقق: كيف أميّز بين الموصلات الأومية والمواد اللاأومية؟

المثال ١

يبين الشكل المجاور العلاقة $(I-V)$ لموصل فلزي عند درجتي حرارة مختلفتين (T_1, T_2) ، معتمداً على بيانات الشكل، أجيِّب عما يأتي:



- ما مقدار مقاومة الموصل عند كلٍ من الدرجتين؟
- أميّز أي درجتي الحرارة أعلى، مبرراً إجابتي.

المعطيات: الرسم البياني

المطلوب: $R_1 = ?$, $R_2 = ?$

الحل:

- المقاومة تساوي مقلوب ميل الخط المستقيم:

$$R_1 = \frac{1}{0.2} = 5 \Omega$$

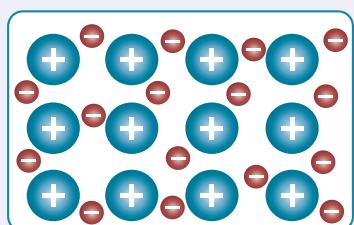
$$R_2 = \frac{2}{0.2} = 10 \Omega$$

ب. مقاومة الموصل الأومي تكون أكبر عند درجة الحرارة الأعلى. وبما أن (R_2) أكبر من (R_1) ، فتكون درجة الحرارة (T_2) أكبر من درجة الحرارة (T_1) .

تختلف الموصلات في مقاومتها السريان التيار الكهربائي فيها باختلاف خصائصها. وللوقوف على العوامل المؤثرة في مقاومة الكهربائية لموصل، واستقصائها بطريقة عملية؛ انفذ التجربة الآتية.

الربط مع الكيمياء

تحتوي الفلزات على عددٍ كبيرٍ من الإلكترونات الحرّة التي تتحرّك باستمرار بين نوى الفلز لتشكل رابطة فلزية، وتعتمد طاقاتها الحركية على درجة حرارة الفلز، وتعود خصيصة التوصيل الكهربائي إلى حركة هذه الإلكترونات، في حين تبقى الأيونات الموجبة في الفلز في أماكنها.

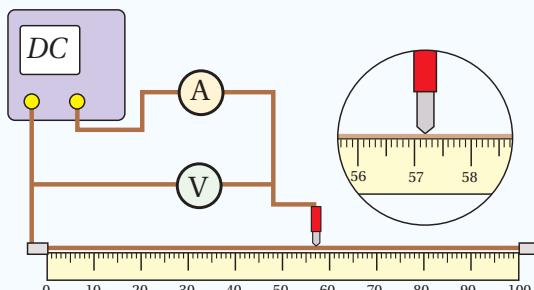


أيون الفلز +
إلكترون حرّ -

التجربة ١

استنتاج العوامل التي تعتمد عليها المقاومة الكهربائية لموصل

المواد والأدوات: ميكروميتر، مسطرة مترية خشبية، جهازِي أميتر وفولتميتر، أسلاكُ توصيل، مصدر طاقة منخفض الجهد وقابل للضبط، سلك نيكروم رفيع طوله (1 m)، ثلاثة أسلاك: نيكروم، وحديد، وتنغستن، طول كل منها (40 cm) وأقطارها متساوية.



إرشادات السلامة: الحذر من لمس الوصلات الكهربائية غير المعزلة والعناصر الساخنة.

خطوات العمل:

(الجزء ١)

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أنفذ الخطوات الآتية:

- أثبت سلك النيكروم من طرفيه على المسطرة المترية الخشبية، بشكل مستقيم ومشدود بدءاً من الصفر.
- أصل أحد قطبي مصدر الطاقة مع نقطة الصفر، والقطب الآخر مع الأميتر، وأضع في نهاية السلك المُتصل بالأميتر مسامار توصيل مدبب. وأصل الفولتميتر على التوازي مع سلك النيكروم، كما في الشكل.
- أشغل المصدر وأضبطه على (V1)؛ حتى لا ترتفع درجة حرارة سلك النيكروم وتأثير في القراءات.
- لامس المسamar المدبب (طرف الأميتر الحر) مع سلك النيكروم على مسافة (20 cm) من الصفر.
- أدون قراءات الأميتر والفولتميتر في الجدول المخصص للجزء الأول.
- أغير موقع المسamar المدبب إلى المسافات (40, 60, 80 cm)، ثم أدون قيمة فرق الجهد والتيار.

(الجزء ٢)

- أقيس قطرَ الأسلال جميعها باستخدام الميكروميتر وأدونها، ثم أثبت سلك النيكروم الثاني (40 cm) على المسطرة بدل الأولى.

- لامس المسamar المدبب إلى نهاية السلك، وأضبط فرق الجهد على (V1) وأدون قيمة فرق الجهد والتيار.

(الجزء ٣)

- ضبط المتغيرات:** استخدم سلك الحديد (المماثل بالقياسات) مكان سلك النيكروم، ثم أكرر الخطوة 2 من الجزء 2.
- أكرر الخطوة السابقة باستخدام سلك التنغستن (المماثل بالقياسات)، وأدون النتائج.

التحليل والاستنتاج:

- استنتاج** بالاعتماد على بيانات الجدول الأول؛ العلاقة بين طول الموصىل و مقاومته.

- استنتاج** بالاعتماد على بيانات الجدول الثاني؛ العلاقة بين مساحة مقطع الموصىل و مقاومته.

- اقارن** بين مقاومة الأسلال المُتماثلة في أطوالها ومساحة مقطعها والمختلفة في المواد المصنوعة منها.

- تفسّر**: أتوصل إلى العوامل التي تعتمد عليها مقاومة الموصىل، وأفسّرها.

- توقع**: إذا تسبّب التيار الكهربائي في أيٍ من المراحل في تسخين الموصىل؛ كيف سيؤثر ذلك في النتائج؟

العوامل المؤثرة في المقاومة Factors Affecting the Resistance

استنتجت من التجربة السابقة العوامل التي تعتمد عليها المقاومة الكهربائية للموصل وهي:

طول الموصىل: لاحظت في الجزء الأول من التجربة أن مقاومة الموصىل تزداد بزيادة طوله، ويمكن تفسير هذه العلاقة بتعريض الإلكترونات عند حركتها خلال الموصىل الطويل إلى مزيد من التصادمات؛ مما يعني حركتها بشكل أكبر، ويزيد مقاومة الموصىل.

مساحة المقطع العرضي للموصىل: لاحظت في الجزء الثاني من التجربة أن مقاومة الموصىل تقل بزيادة مساحة مقطعه العرضي، ويمكن تفسير ذلك بأن زيادة مساحة المقطع يزيد عدد الإلكترونات الحرة التي تعبّر مقطع الموصىل في الثانية الواحدة، فيزداد التيار وتقل المقاومة. ويمكن تشبيه مرور التيار الكهربائي في الموصىلات بتدفق الماء في الخرطوم، فكلما زادت مساحة مقطع الخرطوم زادت كمية الماء التي تتدفق خلاله في الثانية الواحدة كما في الشكل (5).

نوع مادة الموصىل: تختلف المواد عن بعضها في مقاومتها لسريان التيار الكهربائي فيها؛ إذ تعد بعض الفلزات؛ مثل النحاس، والفضة، والألمونيوم موصلات جيدةً للكهرباء، في حين تُوجَد فلزات أخرى مثل التنغستن ذات مقاومةً أكبر لسريان التيار الكهربائي فيها، في حين تكون للمواد العازلة قيم مقاومةً عاليةً جدًا.

درجة الحرارة: عند سريان التيار الكهربائي في موصل فلزي تصطدم الإلكترونات الحرة في أثناء انتقالها عبر الموصىل بذرات الفلز، فينتقل جزءٌ من طاقتها الحركية إلى الذرات؛ مما يؤدي إلى زيادة سعة اهتزاز هذه الذرات وارتفاع درجة حرارة الموصىل. وبزيادة سعة اهتزاز الذرات يزداد احتمال تصادمها مع الإلكترونات، فتزداد إعاقة الموصىل لحركة الإلكترونات داخله، وتتصبح مقاومته لسريان التيار أكبر.

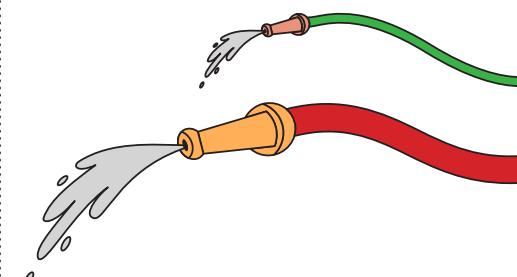
في مراحل التجربة السابقة جميعها؛ ضبط عامل درجة الحرارة. وبثبوت درجة الحرارة؛ فإن المقاومة الكهربائية للموصىل تتناسب طردًا مع طول الموصىل (L) وعكسياً مع مساحة مقطعه (A)، ويمكن كتابة علاقـة التـنـاسـب هـذـه عـلـى الصـورـة:

$$R \propto \frac{L}{A}$$

بإدخال ثابت التـنـاسـب في العـلـاقـة، نـحـصـل عـلـى معـادـلـة خـاصـة بـمـقاـومـة موـصـىـل مـنـظـمـ الشـكـل بـدـلـالـة أـبعـادـهـ، عـلـمـاً أـنـ ثـابـتـ التـنـاسـب يـخـتـلـفـ باـخـتـلـافـ نوعـ المـادـةـ، وـيـسـمـىـ الثـابـتـ مـقـاـومـيـةـ المـادـةـ؛ وـسـوـفـ نـرـمزـ لـهـ بـ(ρ):

$$R = \frac{\rho L}{A}$$

أفـكرـ: عند تشغيل مـدـفـأـةـ كـهـرـبـائـيةـ أـلـاحـظـ أـحـمـارـ سـلـكـ التـسـخـينـ وـأـشـعـرـ بـسـخـونـتـهـ، بـيـنـمـاـ لـاـ يـسـخـنـ سـلـكـ التـوـصـيلـ الـذـيـ يـصـلـ المـدـفـأـةـ بـمـقـبـسـ الجـدـارـ. ما تـفـسـيرـ ذـلـكـ؟



الشكل (5): تزداد كمية الماء المتتدفق عبر الأنابيب في الثانية الواحدة بزيادة مساحة مقطعيه.

المقاومـيـةـ صـفـةـ لـلـمـادـةـ، بـيـنـمـاـ المـقاـومـةـ صـفـةـ لـلـمـوـصـىـلـ تعـتمـدـ عـلـىـ أـبعـادـهـ الـهـيـنـدـسـيـةـ، وـقـدـ دـرـسـتـ مـنـ قـبـلـ مـتـغـيرـاتـ مـلـذـكـ؛ فـالـكـثـافـةـ صـفـةـ لـلـمـادـةـ بـيـنـمـاـ الـكـتـلـةـ صـفـةـ لـلـجـسـمـ.

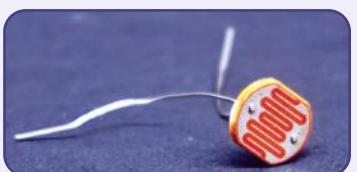
جدول (1): مقاومية بعض المواد عند

درجة حرارة (20°C).

المادة	ال مقاومية ($\Omega \cdot \text{m}$)
فضة	1.59×10^{-8}
نحاس	1.7×10^{-8}
ذهب	2.44×10^{-8}
الألمنيوم	2.82×10^{-8}
تنغستن	5.6×10^{-8}
حديد	10×10^{-8}
نيكروم	1.5×10^{-6}
كربيون	3.5×10^{-5}
سيليكون	640
زجاج	$10^{10} - 10^{14}$
مطاط	10^{13}

الربط مع الحياة

إضاءة مصابيح الشوارع
تستخدم للتحكم في
إضاءة مصابيح الشوارع
بشكل آلي مقاومة ضوئية (LDR) light dependent resistor، وهي مقاومة متغيرة، تتغير قيمتها بتغيير شدة الضوء الساقط عليها، ويجري ضبطها بحيث تعمل على وصل الدارة وإضاءة المصابيح عند غروب الشمس، وإطفائها عند شروقها.



الشكل (6): فتيل التنغستن في مصباح متوجه.

بإعادة ترتيب حدود العلاقة تُصبح على الصورة:

$$\rho = \frac{RA}{L}$$

وبذلك أُعرِّف مقاومية المادة Resistivity؛ بأنّها مقاومة عيّنة من المادة مساحة مقطّعها (1 m^2)، وطولها (1 m) عند درجة حرارة معينة. ووحدة قياس المقاومية هي ($\Omega \cdot \text{m}$).

الجدول (1) يبيّن مقاومية بعض المواد، وبمعاينة الجدول؛ أجذُ أن مقاومية المواد تتراوح من قيمٍ صغيرةً جدًا للمواد الموصولة، مثل الفضة والنحاس، إلى قيمٍ كبيرةٍ جدًا للمواد العازلة مثل الزجاج والمطاط، مروّرًا بمواد تسمى أشباه موصلات. كما توجد مواد فائقة التوصيل Superconductors؛ مقاومتها الكهربائية تساوي صفرًا عند درجات حرارة منخفضة تقارب الصفر المطلق. لذلك بعد توليد تيار كهربائي في هذه المواد؛ يستمر سريانه فيها مدة طويلة دون الحاجة إلى مصدر فرق جهد. من استخدامات هذه المواد توليد مجال مغناطيسي قوي في أجهزة مثل جهاز التصوير بالرنين المغناطيسي.

أتحقق: أوضح الفرق بين مفهومي المقاومة والمُقاومة.

المثال 2

فتيل مصباح متوجه مصنوع من سلك رفيع من التنغستن؛ نصف قطره ($10\text{ }\mu\text{m}$) على شكل ملف لولبي، كما في الشكل (6)، مقاومته ($560\text{ }\Omega$). عند شده جيدًا تبيّن أن طول السلك (3.14 m). أحسب مقاومية التنغستن عند درجة حرارة 20°C .

المعطيات: $R = 560\text{ }\Omega$, $r = 10\text{ }\mu\text{m}$, $L = 3.14\text{ m}$

المطلوب: $\rho = ?$

الحل:

$$A = \pi r^2 = 3.14 \times (1.0 \times 10^{-5})^2 = 3.14 \times 10^{-10} \text{ m}^2$$

$$\rho = \frac{RA}{L} = \frac{560 \times 3.14 \times 10^{-10}}{3.14}$$

$$\rho = 5.6 \times 10^{-8} \text{ }\Omega \cdot \text{m}$$

القوة الدافعة الكهربائية (emf)

تُعدّ البطارия مصدرًا للطاقة؛ فهي تنتجه عن طريق تفاعلات كيميائية تجري داخلها، و تعمل على توليد القوة الدافعة الكهربائية، وهذه تسميةً اصطلاحية قديمة، فالقوة الدافعة الكهربائية ليست قوة ميكانيكية، بل هي فرق جهد كهربائي تولده البطارия بين قطبيها يقاس بوحدة فولت (V). يبين الشكل (7) مقاومةً (R) يتصل طرفاها معقطي بطارية، حيث يكون القطب الموجب للبطارия أعلى جهدًا من قطبيها السالب. يؤدي فرق الجهد إلى سريان تيار كهربائي (I) في الدارة على شكل حركة شحنات موجبة افتراضية خارج البطارия من القطب الموجب الأعلى جهدًا إلى القطب السالب الأقل جهدًا، كما هو مبين في الشكل. كي تتبع الشحنات الموجبة الافتراضية حركتها؛ فإنّ البطارия تبذل عليها شغلاً لتحرיקها داخل البطارия من القطب السالب إلى القطب الموجب الأعلى جهدًا. وتعرف داخل البطارия من القطب السالب إلى القطب الموجب الأعلى جهدًا. وتعرف القوة الدافعة الكهربائية (ϵ) Electromotive force بأنها؛ الشغل الذي تبذله البطارия في نقل وحدة الشحنات الموجبة داخل البطارия من قطبيها السالب إلى قطبيها الموجب. ومقدارها يساوي أكبر فرق جهد يمكن أن تولده البطارия بين قطبيها. وتعطى بالعلاقة الآتية:

$$\epsilon = \frac{W}{\Delta Q}$$

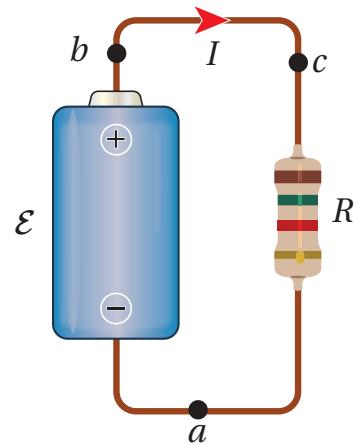
حيث (W) الشغل المبذول على الشحنة المنقوله (ΔQ).).

أتخيّل أنّ القوة الدافعة الكهربائية للبطارия تشبه مضخةً للشحنات؛ فالشغل الذي تبذله البطارия تكتسبه الشحنات الموجبة على شكل طاقة وضع كهربائية عند حركتها داخل البطارия من القطب السالب إلى القطب الموجب.

تفقد الشحنات الكهربائية جزءاً صغيراً من طاقتها في أثناء حركتها داخل البطارия؛ لأنّ للبطارия مقاومة داخلية (r) تعيق حركة الشحنات، أمّا الطاقة المتبقية فتفقدتها الشحنات عند عبورها مقاومة الخارج (أو R)، بافتراض أسلك التوصيل مثالٍ لا مقاومة لها.

أتحقق: ما أهمية القوة الدافعة الكهربائية للبطارия بالنسبة لحركة الشحنات عبر الدارة الكهربائية؟

أفخر: أوضح العلاقة بين حركة كلّ من الإلكترونات والشحنات الموجبة (الافتراضية) داخل البطارия واتجاه التيار الكهربائي فيها.



الشكل (7): مقاومةً موصلةً بقطبي بطارية.

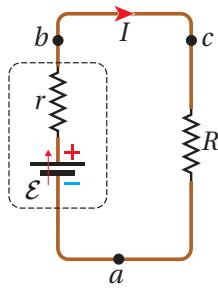
أفخر: ما تحوّلات الطاقة التي تحدث داخل البطارия في الحالتين الآتيتين:

- أ. توليد القوة الدافعة الكهربائية بين قطبي البطارия.
- ب. استهلاك جزءٍ من طاقة البطارия داخلها بسبب مقاومة الداخلية لها.

يُبيّن الشكل (8) تمثيلًا بالرموز لدارة كهربائية تتكون من مقاومة (R) موصولة مع بطارية قوتها الدافعة (ϵ) و مقاومتها الداخلية (r). عند قياس فرق الجهد بينقطي a والبطارية نجد أنه أقل من قوتها الدافعة الكهربائية، وهذا الاختلاف ناتج عن المقاومة الداخلية للبطارية؛ حيث تستهلك جزءًا من الطاقة الكهربائية وتحوله إلى طاقة حرارية. فعند عبور البطارية من النقطة (a) إلى النقطة (b) يزداد الجهد بمقدار القوة الدافعة الكهربائية للبطارية (ϵ)، لكنه يتقصّص نتيجة تأثير المقاومة الداخلية بمقدار (Ir)؛ لذا فإن فرق الجهد بين نقطي a والبطارية في الشكل (8) يساوي المجموع الجبري للتغيرات في الجهد بين النقطتين (a) و (b)، ويعطى بالعلاقة الآتية:

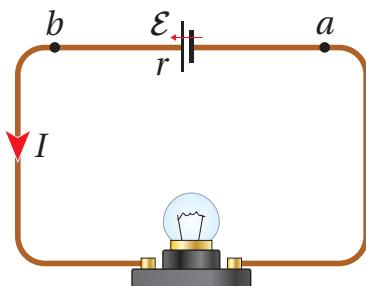
$$\Delta V_{\epsilon} = \epsilon - Ir$$

استنتج من هذه العلاقة أن أكبر فرق جهد ممكن بين طرفي البطارية يساوي القوة الدافعة الكهربائية في هاتين؛ عندما يكون التيار المار في البطارية يساوي صفرًا، أو عندما تكون قيمة المقاومة الداخلية للبطارية تساوي صفرًا، وفي هذه الحالة تُسمى بطارية مثالية.



الشكل (8): مقاومة موصولة بقطبي بطارية، مماثلة بالرموز.

المثال 3



الشكل (9): دارة كهربائية تحوي بطارية ومصباحاً كهربائياً.

بطارية قوتها الدافعة الكهربائية (12.0 V) و مقاومتها الداخلية (0.5Ω)، و يصل قطبها مع مصباح في دارة كهربائية، كما في الشكل (9)، فكان التيار المار فيها (2.4 A). أحسب فرق الجهد بين نقطي a والبطارية.

المعطيات:

$$\epsilon = 12.0 \text{ V}, r = 0.5 \Omega, I = 2.4 \text{ A}$$

المطلوب:

$$\Delta V_{\epsilon} = ?$$

الحل:

$$\Delta V_{\epsilon} = \epsilon - Ir = 12.0 - (2.4 \times 0.5)$$

$$\Delta V_{\epsilon} = 12.0 - 1.2 = 10.8 \text{ V}$$

لمرئه

في المثال (3)، بافتراض أنّ البطارية مثالية ($r = 0$). ما فرق الجهد بين قطبيها؟

مراجعة الدرس

1. الفكرة الرئيسية: أوضح المقصود بالمقاومة الكهربائية لموصلٍ فلزّي، وأذكر العوامل التي تعتمد عليها مُبِينًا كيف تتناسب المقاومة مع كل منها.

2. **أستنتج:** عند توصيل بطارية مع مقاومة وسريان تيار كهربائي في الدارة، أو عند شحن البطارية القابلة لإعادة الشحن نلاحظ ارتفاع درجة حرارة البطارية نفسها. أفسر سبب ذلك.

3. **استخدم الأرقام:** أحسب المقاومة الكهربائية في جهاز حاسوب يسري فيه تيار كهربائي (800 mA) عند فرق جهد (220 V).

4. **أستنتج:** موصل أومي يتصل طرفاً بمصدر فرق جهد ثابت (V)، ويسري فيه تيار كهربائي (I) عند درجة حرارة (20 °C)، ماذا يحدث لك من فرق الجهد والتيار والمقاومة إذا ارتفعت درجة حرارة الموصل إلى (50 °C)؟ أفسر إجابتي.

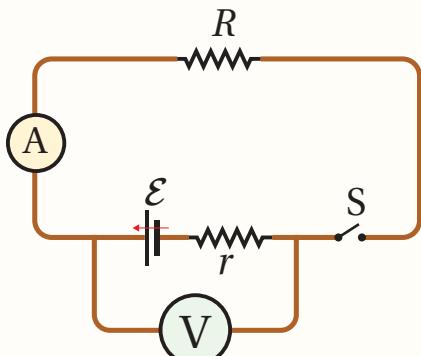
5. **أفسر** زيادة مقاومة الموصل بزيادة طوله.

6. **استخدم الأرقام:** سخانٌ كهربائيٌ صغيرٌ يعمل على جهد (220 V). إذا كان سلك التسخين فيه المصنوع من سبيكة النيكروم طوله (83 m)، ونصف قطره (0.3 mm). فما مقدار التيار الكهربائي المار في السخان؟

7. **استخدم الأرقام:** تكون دارة كهربائية من بطارية ومقاومة كما في الشكل المجاور.

عندما كان المفتاح (S) مفتوحًا كانت قراءة الفولتميتر (12 V)، وعند إغلاق المفتاح أصبحت قراءته (10 V)، إذا علمت أن المقاومة الداخلية للبطارية (0.5Ω)؛ أحسب :

- قراءة الأميتر والمفتاح مغلق.
- مقدار المقاومة (R).



8. أضع دائرةً حول رمز الإجابة الصحيحة لكل جملة مما يأتي:

1. عندما يسري تيار (10 mA) في موصل مدةً نصف ساعة؛ فإنّ مقدار الشحنة الكهربائية بوحدة كولوم (C) التي تعبّر مقطعاً عرضياً في هذا الموصل خلال هذه المدة تساوي:

د. 300.

ج. 18.

ب. 5.0.

أ. 0.3 .

2. الثنائي الباعث للضوء (LED)، يمتاز بأن العلاقة بين التيار الذي يسري فيه وفرق الجهد بين طرفيه:
أ . خطية، عند ثبات درجة الحرارة.

ب . خطية، حتى عند تغير درجة الحرارة.

ج. غير خطية عند ثبات درجة الحرارة، وكذلك عند تغيرها.

د . خطية عند ثبات درجة الحرارة، وغير خطية عند تغيرها.

3. في الشكل المجاور موصلان (1) و (2) من النحاس؛ طول الأول (L) ونصف قطر مقطعه (r)، وطول الثاني ($2L$) ونصف قطر مقطعه ($2r$). العلاقة بين مقاومتي الموصلين (R_1) و (R_2) تكون على إحدى الصور الآتية:

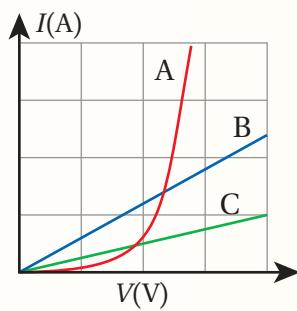
ب . $R_1 = 2R_2$

أ . $R_1 = R_2$

د . $R_2 = 4R_1$

ج. $R_2 = 2R_1$

4. يبين الشكل المجاور العلاقة البيانية بين فرق الجهد والتيار لثلاثة مواد (A, B, C) عند درجة حرارة ثابتة،



معتمداً على الشكل؛ أحدد العبارة الصحيحة في ما يأتي:

أ . المواد جميعها موصلات أوميّة، والموصل (A) أكبرها مقاومة.

ب . المواد جميعها موصلات أوميّة، والموصل (A) أقلها مقاومة.

ج. المادتان (B) و (C) موصلات أوميّة، والمادة (A) لا أوميّة.

د . المادة (A) موصل أوميّ، والمادتان (B) و (C) لا أوميّة.

5. بطارية قوتها الدافعة الكهربائية (ϵ) ومقاومتها الداخلية (r) ووصلت مع مقاومة متغيرة (R)، كما يبين الشكل المجاور. بزيادة مقدار المقاومة المتغيرة (R)؛ فإن ما يحدث لفرق الجهد بينقطي البطارية (V) والتيار

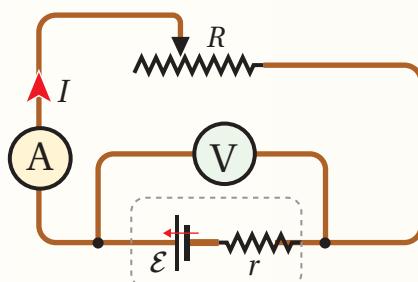
(I) في الدارة، هو:

أ . يزداد (V) ويزداد (I).

ب . يزداد (V) وينقص (I).

ج . ينقص (V) ويزداد (I).

د . ينقص (V) وينقص (I).



الدارة الكهربائية البسيطة Simple Electric Circuit

تتكون الدارة الكهربائية في أبسط أشكالها من مسار مغلق (عروة)، يحتوي على بطارية ومقاومة ومفتاح وأسلاك توصيل. عند إغلاق المفتاح يسري في الدارة تيار كهربائي، وعند فتحه يتوقف سريان التيار الكهربائي.

الممثل البياني لتغيرات الجهد الكهربائي

Graphical Representation of Electric Potential Changes

لمعرفة تغيرات الجهد عبر مكونات دارة بسيطة مثل المبنية في الشكل (10/أ) يمكنني اختيار الحركة باتجاه دوران عقارب الساعة بدءاً من النقطة (a) والعودة إليها، وتمثيل التغيرات في الجهد الكهربائي بيانياً كما في الشكل (10/ب). يُبيّن الشكل (10/ب) أنَّه عند عبور البطارية من النقطة (a) إلى النقطة (b) يزداد الجهد بمقدار القوة الدافعة الكهربائية للبطارية (ε)، لكنَّه ينقص نتيجة تأثير المقاومة الداخلية بمقدار (Ir). وعند الحركة من النقطة (b) إلى النقطة (c) يبقى الجهد ثابتاً لأنَّ السلك مُهمَّل المقاومة؛ أي أنَّ ($V_c = V_b$)، أمَّا عند عبور المقاومة الخارجية من النقطة (c) للعودة إلى نقطة البداية (a)؛ فينخفض الجهد بمقدار (IR)، أي أنَّ جهد النقطة (a) أقل من جهد النقطة (c). ومن الشكل أستنتج أنَّ هذه التغيرات في الجهد يمكن التعبير عنها رياضياً بالعلاقة:

$$\epsilon = IR + Ir$$

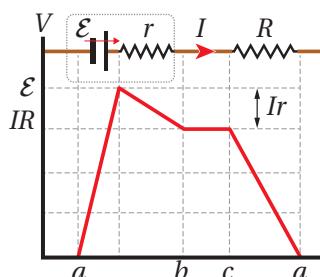
معادلة الدارة الكهربائية البسيطة Simple Circuit Equation

باستخدام العلاقة السابقة؛ يمكن التعبير عن التيار الكهربائي (I) المار في الدارة البسيطة المبنية في الشكل (10/أ) بالعلاقة:

$$I = \frac{\epsilon}{R + r}$$

تعبر هذه العلاقة عن معادلة الدارة البسيطة بأبسط أشكالها، ويمكن أن يحتوي المسار المغلق للدارة البسيطة على مقاومات وبطاريات عدَّة، في هذه الحالة فإنه يمكن التعبير عن معادلة الدارة البسيطة بالصورة الآتية:

$$I = \frac{\sum \epsilon}{\sum (R + r)}$$



الشكل (10/ب): التمثيل البياني لتغيرات الجهد في الدارة الكهربائية في الشكل (10/أ).

الفكرة الرئيسية:

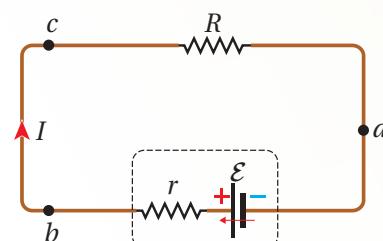
تضمن تطبيقاتُ الكهرباءِ أجهزةً ودوراتٍ كهربائيةً؛ تفاوتُ من البسيطة مثل دارة مصباح المكتب، إلى المعقدة مثل تلك التي تُستخدم في تشغيل بعض أجهزة الطائرة. ولكل جهازٍ كهربائيٍ قدرةً كهربائيةً تناسب الهدف من استخدامه.

نتائج التعلم:

- أحَلَّ داراتٍ كهربائيةً بسيطةً، وأحسب فرقَ الجهد والتيار المار في كل مُقاومةٍ
- أُمِّل رسوماتٍ بيانيةً لتغيراتِ الجهد في دارةٍ كهربائيةٍ بسيطةٍ وأحلَّها.
- أحسب الطاقة الكهربائيةَ التي تستهلكها الأجهزة في المنازل. وتکاليف استهلاکها.
- أحَدَّ طرائقَ لتقليلِ استهلاكِ الطاقة الكهربائية في المنازل والمصانع.

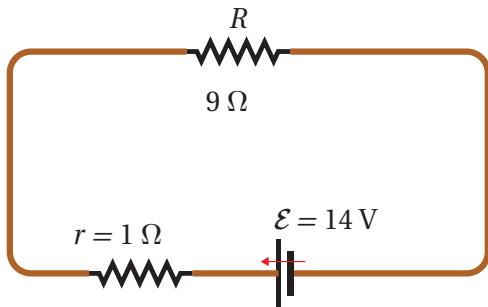
المفاهيم والمصطلحات:

القدرة الكهربائية watt



الشكل (10/أ): مقاومةً موصولةً بقطبي بطارية، ممثلةً بالرموز.

المثال 4



ت تكون دارة كهربائية بسيطة من بطارية ومقاومة خارجية مبينة في الشكل (11). إذا كانت المقاومة الداخلية للبطارية تساوي (1Ω)، أحسب التيار في الدارة وأحدّ اتجاهه.

المعطيات: $\mathcal{E} = 14 \text{ V}$, $R = 9 \Omega$, $r = 1 \Omega$

المطلوب: $I = ?$

الحل :

أطبق معادلة الدارة البسيطة:

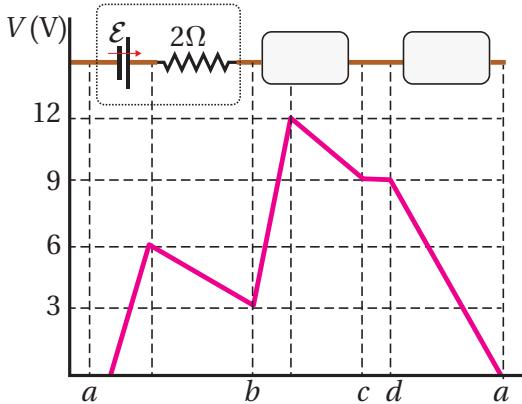
$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

$$I = \frac{14}{9 + 1} = \frac{14}{10} = 1.4 \text{ A}$$

وخارج البطارية يكون اتجاه التيار في الدارة من القطب الموجب للبطارية إلى القطب السالب؛ أي مع اتجاه حركة عقارب الساعة.

المثال 5

ممثلت تغيرات الجهد في دارة كهربائية بيانيًّا، كما في الشكل (12). بالاعتماد على بيانات الشكل أجد كلاً من:



الشكل (12): التمثيل البياني للتغيرات في الجهد لدارة كهربائية تحوي مكونات مجهولة.

$$I = \frac{\Delta V_r}{r} = \frac{3.0}{2.0} = 1.5 \text{ A}$$

ب) العنصر الموصل بين النقطتين (b) و (c) يرفع الجهد ثم يخفضه، فهو بطارية قوتها الدافعة الكهربائية ($\mathcal{E} = 9 \text{ V}$)، وانخفاض الجهد فيها ($Ir = 3.0 \text{ V}$)، أي أنّ ($r = 2.0 \Omega$).

ج) العنصر الموصل بين النقطتين (d) و (a) يخفض الجهد بمقدار (9 V)، فهو مقاومة ($IR = 9 \text{ V}$)، أي أنّ:

$$R = \frac{9.0}{1.5} = 6.0 \Omega$$

أ) المنحنى البياني بين النقطتين (a) و (b) يبيّن ارتفاع الجهد (6.0 V) ثم انخفاضه (3.0 V)، وهذا يفيد أنّ القوة الدافعة الكهربائية للبطارية ($\mathcal{E} = 6.0 \text{ V}$)، وانخفاض الجهد فيها يساوي ($Ir = 3.0 \text{ V}$).

الحل :

القدرة الكهربائية Electric Power

تعلمت أن البطارية تبذل شغلاً على الشحنات الكهربائية فتُكسبها طاقة، إلا أن هذه الشحنات تفقد جزءاً من طاقتها عند مرورها في المقاومة الداخلية للبطارية، وت فقد بقية طاقتها أثناء عبورها في المقاومة الخارجية (الأجهزة الكهربائية). وقد تحول الطاقة الكهربائية في الأجهزة الكهربائية المختلفة إلى أشكال أخرى من الطاقة؛ مثل الحرارة أو الضوئية. أتأمل الشكل (13).

إن تعريف القوة الدافعة الكهربائية للبطارية، بأنّها الشغل المبذول (W) على وحدة الشحنات الموجبة، يُمكّنني من التعبير عنها رياضياً بالعلاقة:

$$W = \varepsilon \Delta Q$$

حيث (ΔQ) الشحنة الافتراضية الموجبة المنقوله داخل البطارية من قطبيها السالب إلى قطبيها الموجب.

تُعرف القدرة بأنّها المعدل الزمني للشغال المبذول، وتقاس بوحدة واط (watt). وبذلك فإنّ القدرة الكهربائية **Electric power** للبطارية تُعرف بأنّها المعدل الزمني للشغال الذي تبذله، وتعطى بالعلاقة:

$$P_\varepsilon = \frac{W}{\Delta t} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \varepsilon = I\varepsilon$$

أي أنّ قدرة البطارية تُساوي ناتج ضرب قوتها الدافعة الكهربائية في التيار المار فيها. باستخدام العلاقة السابقة ($I\varepsilon = IR + Ir$) يمكنني التعبير عن قدرة البطارية كما يأتي:

$$P_\varepsilon = I\varepsilon = I^2 r + I^2 R$$

حيث إنّ $I^2 r$ هي القدرة المستهلكة في المقاومة الداخلية، بينما $I^2 R$ القدرة



الشكل (13): تحول الطاقة الكهربائية في المدفأة إلى طاقة حرارية وضوئية.

تحقق: كيف تتفق المعادلة

الآتية مع مبدأ حفظ الطاقة؟

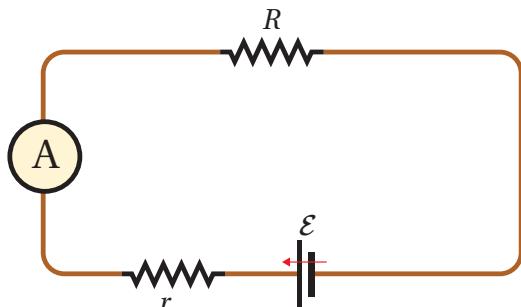
$$I\varepsilon = I^2r + I^2R$$

المستهلكة في المقاومة الخارجية. لاحظ أن المعادلة السابقة تُعبر عن مبدأ حفظ الطاقة، أي أن الطاقة التي تتوجه البطارия في ثانية واحدة تُساوي الطاقة المستهلكة في مقاومات الدارة في ثانية واحدة. وبافتراض أن جهد القطب السالب للبطارия يساوي صفرًا ($V_a = 0$)، وجهد القطب الموجب ($V_b = V$)؛ فإن: $\Delta V_e = V = IR$ وعندما؛ فإن القدرة المستهلكة في المقاومة الخارجية تعطى بالعلاقة:

$$P = I^2R = IV = \frac{V^2}{R}$$

يمكن تعريف وحدة **الواط** بأنها؛ قدرة جهاز كهربائي يستهلك طاقة كهربائية بمقدار (1 J) كل ثانية. أو هي قدرة جهاز يمر فيه تيار كهربائي (1 A) عندما يكون فرق الجهد بين طرفيه (1 V).

المثال 6



الشكل (14): دارة كهربائية بسيطة.

في الدارة البسيطة المبينة في الشكل (14) إذا كان مقدار القوة الدافعة الكهربائية للبطارия (12 V)، ومقاومة الداخليّة (1Ω)، ومقدار المقاومة الخارجية (3Ω) أحسب:

- أ. قراءة الأميتر.
- ب. قدرة البطارия.

ج. القدرة المستهلكة في كل من المقاومتين الداخلية والخارجية.

المعطيات: $\varepsilon = 12 \text{ V}$, $r = 1 \Omega$, $R = 3 \Omega$

المطلوب: $P_e = ?$, $P = ?$, $I = ?$

الحل:

أ. الأميتر يقرأ التيار المار في الدارة، وأحسبه باستخدام معادلة الدارة البسيطة:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r} = \frac{12}{3 + 1} = \frac{12}{4} = 3 \text{ A}$$

ب. أحسب قدرة البطارия من العلاقة:

$$P_e = I\varepsilon = 3 \times 12 = 36 \text{ W}$$

ج. القدرة المستهلكة في المقاومتين الداخلية والخارجية:

في المقاومة الداخلية:

في المقاومة الخارجية:

لاحظ أن القدرة المنتجة من البطارия تساوي مجموع القدرة المستهلكة في مقاومات الدارة الداخلية والخارجية.

استهلاك الطاقة الكهربائية Consumption of Electric Energy

تستهلك الأجهزة الكهربائية الطاقة الكهربائية بكمية تعتمد على قدرة الجهاز وزمن تشغيله، فمثلاً كهربائي مكتوب عليه (15 W)، يعني أنه يستهلك طاقةً كهربائيةً مقدارها (15 J) كل ثانية تشغيل، وإذا شغل مدة نصف ساعة فإنَّه يستهلك كمية من الطاقة الكهربائية (E) تساوي:

$$E = P\Delta t = 15 \frac{\text{J}}{\text{s}} \times 30 \text{ min} \times \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = 27000 \text{ J}$$

إضافةً إلى وحدة الجول؛ تُستخدم لقياس الطاقة الكهربائية -أيضاً- وحدة كيلو واط. ساعة (kWh)، وهذه كمية من الطاقة يمكنها تشغيل جهاز كهربائيٌ قدرُته (1 kW) مدةً ساعةٍ واحدة.

تحسب تكلفة (Cost) استهلاك الطاقة الكهربائية في المنازل والمصانع وغيرها باستخدام العلاقة الآتية:

$$\text{Cost} = \text{Power(kW)} \times \Delta t(\text{h}) \times \text{Price (JD/kWh)}$$

عند شراء بطارية هاتف، نبحث عن الأفضل، فالرقم الظاهر في الصورة (2800 mAh) يعني أن البطارية تخزن كميةً من الطاقة، تُمكّنها من إنشاء تيار (2800 mA) مدةً ساعةٍ كاملة.



وكذلك بالنسبة إلى بطارية السيارة، نجد أنَّ البطارية (70 Ah) أفضل من تلك التي تحمل الرقم (50 Ah).

المثال 7

تزود شركة توليد الكهرباء أحد المستهلكين بقدرة كهربائية (4.4 kW) مدةً أربع ساعات يومياً باستخدام أسلاك توصيل مقاومتها (Ω)، وفرق جهد كهربائي (220 V).

أ. ما التكلفة اليومية لهذه الكمية من الطاقة، إذا كان سعر الطاقة (0.12 JD/kWh)؟

ب. ما مقدار الطاقة الكهربائية المفقودة (المتحولة إلى حرارة) في الأسلاك يومياً؟ وما تكلفة هذه الطاقة المفقودة؟

ج. كم يصبح مقدار الطاقة المفقودة يومياً إذا استخدم لنقلها فرق جهد (2200 V)؟ وكم تصبح تكلفة الطاقة المفقودة؟

المعطيات: $P = 4.4 \text{ kW}$, $R = 6 \Omega$, $V = 220 \text{ V}$, $\text{Price} = 0.12 \text{ JD/kWh}$

المطلوب: $P = ?$, $\text{cost} = ?$

الحل:

$$\text{cost} = P \times \Delta t \times \text{price} = 4.4 \times 4 \times 0.12 = 2.11 \text{ JD}$$

أ. تكلفة الطاقة المنقوله:

ب. مقدار الطاقة المفقودة، نحسب أولاً التيار الكهربائي المنقول خلال الأسلاك، ثم نحسب القدرة الضائعة:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{4400}{220} = 20 \text{ A}$$

$$P = I^2 R = 400 \times 6 = 2400 \text{ W}$$

$$\text{cost} = P \times \Delta t \times \text{price} = 2.4 \times 4 \times 0.12 = 1.15 \text{ JD}$$

ج. مقدار الطاقة المفقودة عند رفع فرق الجهد إلى (2200 V)، نحسب أولاً؛ التيار الكهربائي المنقول خلال الأسلاك،

ثم نحسب القدرة الضائعة:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{4400}{2200} = 2 \text{ A}$$

$$P = I^2 R = 4 \times 6 = 24 \text{ W}$$

$$\text{cost} = P \times \Delta t \times \text{price} = 0.024 \times 4 \times 0.12 = 0.01 \text{ JD}$$

تطبيقٌ تكنولوجي: شحن السيارات الكهربائية



الشكل (15): شحن السيارة الكهربائية من جهاز شحن عام.

تُرِوَّد السيارة الكهربائية بالطاقة بواسطة شاحنٍ متزليٍّ، كما تتوافر أجهزة شحنٍ في الأماكن العامة، كما في الشكل (15)، وحيث أنَّ القدرة الكهربائية لبطارئ السيارة كبيرة، فهي تحتاج إلى كمية كبيرة من الطاقة الكهربائية، ولتحقيق ذلك؛ لا بُدّ من وصل السيارة مع الشاحن مدةً زمنيةً طويلة. لتقليل هذه المدة ينبغي زيادة قدرة الشاحن والتيار الكهربائي الذي يسري عبر الأسلاك إلى بطارية السيارة، مع مراعاة أن تكون قيمة التيار الكهربائي مناسبة بحيث لا تؤدي إلى زيادة كبيرة في درجة حرارة الأسلاك.

المثال 8

الربط مع التكنولوجيا

نظرًا لارتفاع تكلفة فاتورة الطاقة، أصبح من الضروري التوجه إلى مصادر الطاقة المتجددة، وعلى رأسها الطاقة الشمسية.

تُستخدم ألواح تحتوي على عدد كبير من الخلايا الشمسية التي تحول طاقة ضوء الشمس إلى طاقة كهربائية يجري استهلاكها في المنزل أو المصنع، وينقل الفائض منها إلى الشبكة الوطنية للكهرباء.



سيارة كهربائية تُخزن بطاريتها طاقةً كهربائية مقدارها (24 kWh)، ووصلت بشاحنٍ يزودها بتيار (16 A) عند فرق جهد (220 V). أجد:

أ. القدرة الكهربائية للشاحن.

ب. المدة الزمنية لشحن البطارية بشكلٍ كامل.

ج. تكلفة (cost) شحن السيارة بشكلٍ كامل؛ إذا كان سعر (price) وحدة (kWh) هو (0.12 JD).

المعطيات: $E = 24 \text{ kWh}$, $I = 16 \text{ A}$, $V = 220 \text{ V}$

المطلوب: $cost = ?$, $t = ?$, $P = ?$

الحلّ:

أ. القدرة الكهربائية للشاحن:

$$P_{\text{charger}} = IV = 16 \times 220 = 3520 \text{ W} = 3.52 \text{ kW}$$

ب. زمن الشحن بالساعات:

$$t = \frac{E}{P_{\text{charger}}} = \frac{24}{3.52} = 6.8 \text{ h}$$

ج. تكلفة الشحن كاملةً.

$$cost = E \times price = 24 \text{ kWh} \times 0.12 \text{ JD/kWh} = 2.88 \text{ JD}$$

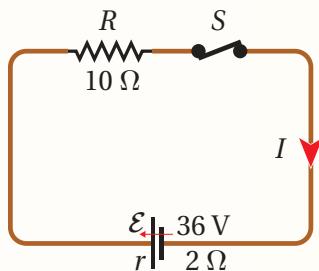
لتمرين

أستخدم الأرقام: تُستخدم بطارية قوتها الدافعة الكهربائية (20 V) ومقاومتها الداخلية (1.5Ω) لتشغيل مقاومة سخان كهربائي لتدفئة حوض أسماك صغير. إذا كان التيار في مقاومة السخان (2 A) فما مقدار القدرة الكهربائية التي تحول إلى حرارة تنتقل إلى الماء في الحوض؟

مراجعة الدرس

1. الفكرة الرئيسية: أوضح المقصود بالقدرة الكهربائية، ووحدة قياسها.

2. **استخدم الأرقام:** موصلان (A) و (B) متساويان في الطول ومساحة المقطع، وصل كلُّ منهما مع مصدر الجهد الكهربائي نفسه، إذا كانت مقاومية مادة الموصل (A) مثلثيَّة مقاومية مادة الموصل (B)؛ فما نسبة القدرة التي يستهلكها الموصل (A) إلى القدرة التي يستهلكها الموصل (B)؟



3. **استخدم الأرقام:** في الدارة الكهربائية المُبيَّنة في الشكل المجاور؛ أغلق المفتاح (S) مدة (5 min). أحسب ما يأتي:

أ. الطاقة الكهربائية التي انتجتها البطارия (الشغيل الذي بذلته).

ب. الطاقة الكهربائية التي استهلكتها كلُّ مقاومة.

ج. نوع تحولات الطاقة في البطارия وفي المقاومات.

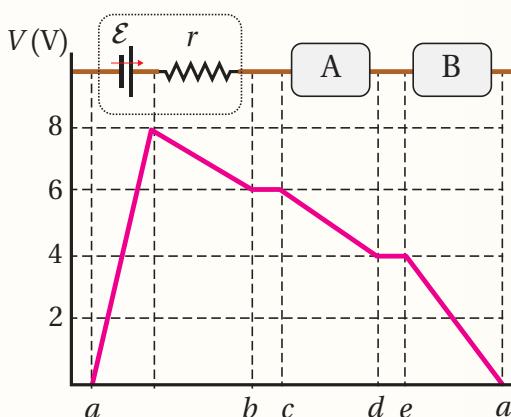
4. **استخدم الأرقام:** وصلت سيارة أطفال كهربائية مع شاحن كهربائيٍّ فرقُ جُهده (12 V)، وقدرته (120 W) حتى اكتملت عملية الشحن. إذا علمتُ أنَّ مقدار الطاقة الكهربائية التي انتقلت إلى البطارия (2.4 kWh)؛ أحسب:

أ. المدة الزمنية لاكتمال عملية الشحن.

ب. التيار المار بين الشاحن وبطارية السيارة.

ج. هل يمكن شحن السيارة باستخدام شاحنٍ فرقُ جُهده (12 V)، والتيار الذي يُنتجه (1 A)؟ أفسر إجابتي.

5. **استنتج:** تتكون دارة كهربائيةٌ من بطارية لها مقاومة داخليةٌ و مقاويم خارجيتين، يمرُ فيها تيار كهربائيٌّ (1.6 A) بالاتِّجاه من (a) إلى (b). مُثَلَّت تغيرات الجهد فيها بيانياً، كما في الشكل المجاور. أجُد ما يأتي:



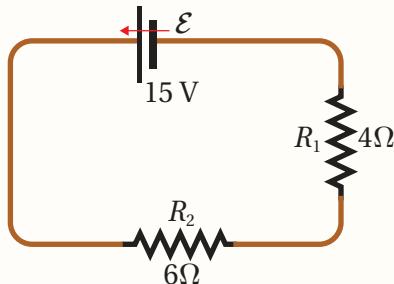
أ. القوة الدافعة الكهربائية للبطارия.

ب. المقاومة الداخلية للبطارия.

ج. المقاومة الخارجية (A).

د. المقاومة الخارجية (B).

6. أضع دائرةً حول رمز الإجابة الصحيحة لكل جملة مما يأتي:



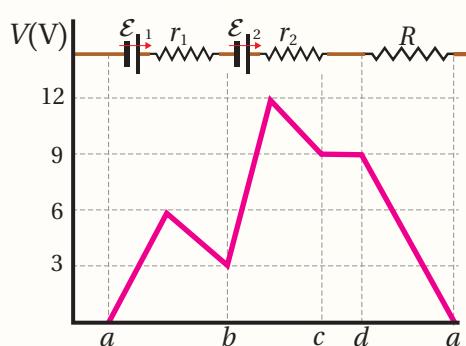
1. معتمداً على بيانات الدارة الكهربائية الموضحة في الشكل المجاور؛ فإن

فرق الجهد بين طرفين المقاومة (R_1) بوحدة فولت (V) يساوي:

أ. 1.50 ب. 3.75

ج. 6.0 د. 9.0

2. دارة كهربائية بسيطة تتكون من بطاريتين ومقاومة خارجية، التيار المار في الدارة (1.5 A). معتمداً على التمثيل البياني للتغيرات الجهد في الدارة، فإن القدرة الكلية المستهلكة في مقاومات الدارة الداخلية والخارجية بوحدة الواط (W):



أ. 22.5 ب. 15. ج. 13.5

3. يُعرّف المعدل الزمني للشغل الذي تبذله البطارية لنقل كمية من الشحنة بين قطبيها بأنه:

أ. فرق الجهد بين قطبي البطارية.

ب. القوة الدافعة الكهربائية للبطارية.

ج. القدرة الكهربائية للبطارية.

د. المقاومة الداخلية للبطارية.

4. وصل مصباح كهربائي مع مصدر فرق جهد (240 V)؛ فسرى فيه تيار كهربائي (5 A)، إذا كان سعر الطاقة الكهربائية (0.2 JD/kWh)؛ فإن تكلفة تشغيل المصباح مدة عشرين ساعة تساوي:

أ. (4.8 JD) ب. (2.4 JD)

ج. (0.48 JD) د. (0.24 JD)

5. هاتف نقال يعمل على بطارية تخزن طاقة كهربائية مقدارها (0.054 kWh)، وصل بشاحن يزود بتيار (2 A) وفرق جهد (3.6 V). إذا كانت البطارية مفرغة تماماً؛ فإنَّ الزمن اللازم لشحنها كاملاً هو:

أ. (7.5 s) ب. (450 s)

ج. (4.5 h) د. (7.5 h)

توصيل المقاومات Combining Resistors

تُستخدم المقاومات الكهربائية بقيمٍ مختلفة، وطرائق توصيل متعددة في دارات الأجهزة الكهربائية، للقيام بوظيفتها حسب الغرض من استخدامها. وتعتمد قيمة المقاومة الكلية لعددٍ من المقاومات الموصولة معاً على طريقة توصيلها.

المقاومات على التوالى Resistors in Series

يبين الشكل (16) جزءاً من دارةٍ كهربائية تتصل فيه ثلاثة مقاومات على التوالى؛ يمرُّ فيها التيار الكهربائي (I) نفسه، وبذلك يكون فرق الجهد بين طرفي كل مقاومة مساوياً لحاصل ضرب المقاومة في التيار.

$$V_1 = IR_1, V_2 = IR_2, V_3 = IR_3$$

فرق الجهد الكلى بين النقطتين (a,b) يساوى:

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3$$

$$V_T = IR_1 + IR_2 + IR_3 = I(R_1 + R_2 + R_3)$$

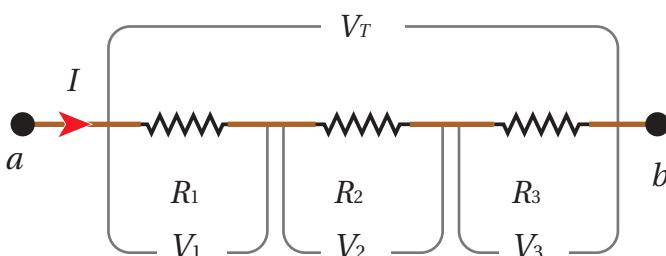
عند مقارنة هذه المقاومات مع مقاومةٍ وحيدةٍ مكافئة لها جمِيعاً (R_{eq}) بين طرفيها فرق الجهد نفسه (V_T)، ويمر فيها التيار نفسه (I)، وتحقق العلاقة:

$(V_T = IR_{eq})$; نجد أن:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3$$

يُستخدم التوصيل بهذه الطريقة للحصول على مقاومة مكافئة كبيرة من عددٍ من المقاومات الصغيرة؛ تكون المقاومة المكافئة أكبر من أيٍ منها، ومن خصائص هذا التوصيل تجزئة الجهد بين المقاومات، إلا أنه عند حدوث قطعٍ في مقاومة يتوقف التيار في المقاومات جميعها.

أتحقق: أذكر خصائص توصيل المقاومات على التوالى، وأذكر عيب هذه الطريقة في التوصيل.



الفكرة الرئيسية:

يُستخدم قانون أوم لتحليل الدارات الكهربائية البسيطة التي تتكون من عروة واحدة، وإن احتوت تفرعاتٍ تشتمل على مقاومات، نستخدم قواعد جمع المقاومات لدراستها، وفي حال احتوت التفرعات على بطاريات و مقاومات؛ نستخدم قاعديتي كيرشوف إضافةً إلى ما سبق.

نتائج التعلم:

- أستكشف عملياً خصائص توصيل المقاومات على التوالى وعلى التوازي، من حيث التيار المار في كل منها وفرق الجهد بين طرفيها.
- أحلى داراتٍ كهربائيةٍ مركبةً بتوظيف قاعديتي كيرشوف.
- أحسب فرق الجهد والتيار المار في كل مقاومة في دارة كهربائية مركبة.

المفاهيم والصطلاحات:

توصيل المقاومات

Combining Resistors

توالى Series

توازي Parallel

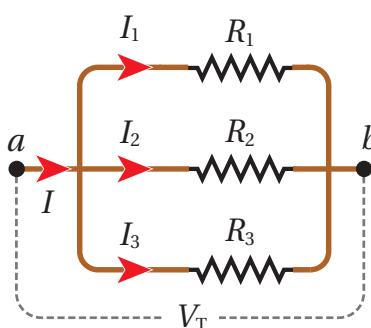
قاعديتا كيرشوف Kirchhoff's Rules

المقاومة المكافئة Equivalent Resistance

الشكل (16): توصيل المقاومات

على التوالى.

المقاومات على التوازي Resistors in Parallel



الشكل (17): توصيل المقاومات على التوازي.

يبين الشكل (17) جزءاً من دارة كهربائية تتصل فيه ثلاثة مقاومات على التوازي، بعد مرور التيار الكهربائي (I) بالنقطة (a)؛ فإن الشحنة توزع على المقاومات الثلاث؛ فيمر تيار جزئي في كل مقاومة لتلتقي مره أخرى وتشكل التيار الكلي (I) الذي يمر بالنقطة (b). ولتحقيق مبدأ حفظ الشحنة؛ يجب أن تتحقق العلاقة الآتية:

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

اما فرق الجهد بين النقطتين (a,b)؛ فإنه يساوي مقداراً واحداً مهما كان المسار الذي تتبعه الشحنات بينهما. أي أنّ:

$$V_T = V_1 = V_2 = V_3$$

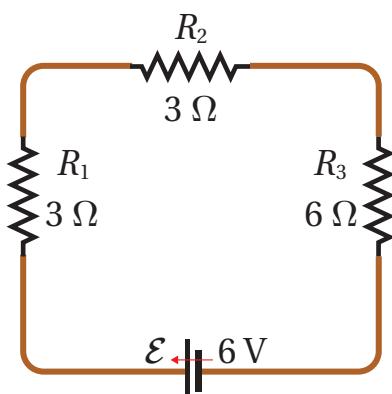
عند استخدام مقاومة واحدة بين النقطتين (a,b) يسري فيها التيار الكلي (I)، وفرق الجهد بين طرفيها (V_T)؛ فإنها تكافئ المقاومات الثلاث. والمقاومة المكافئة **Equivalent resistance** هي مقاومة واحدة تكافئ في عملها مجموعة من المقاومات الموصلةة معاً على التوالى أو على التوازي. بتعويض التيار بدلالة فرق الجهد؛ أحصل على العلاقة:

$$\frac{V_T}{R_{eq}} = \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} = \frac{V_T}{R_1} + \frac{V_T}{R_2} + \frac{V_T}{R_3}$$

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

تستخدم طريقة توصيل المقاومات على التوازي عند الحاجة إلى مقاومة صغيرة، لأن المقاومة المكافئة تكون أصغر من أي مقاومة في المجموعة، ومن خصائص هذه الطريقة حصولنا على فرق جهد كلي في فروع التوصيل جميعها وتجزئة التيار، وعند حدوث قطع في أي فرع؛ فإن الفروع الأخرى لن تتأثر، لذا؛ فإن توصيل الأجهزة المنزلية والمصابيح في المنزل وفي الطرقات يكون على التوازي.

المثال 9



الشكل (18): دارة كهربائية بسيطة تحتوي مقاومات موصلة على التوالى.

دارة كهربائية بسيطة يبيّنها الشكل (18)، المقاومة الداخلية للبطارية مهملة، أحسب كلاً من:

أ) المقاومة المكافئة للمقاومات الثلاث.

ب) التيار الذي يسري في الدارة.

المعطيات: $R_1 = 3\Omega$, $R_2 = 3\Omega$, $R_3 = 6\Omega$, $\varepsilon = 6V$

المطلوب: $I = ?$, $R_{eq} = ?$

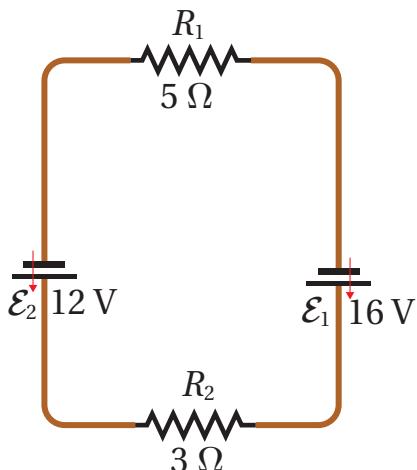
الحل:

أ) المقاومات موصولة على التوالي؛ لذا تستخدم العلاقة الآتية:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 = 3 + 3 + 6 = 12 \Omega$$

ب) التيار المار في الدارة:

$$I = \frac{\varepsilon}{R_{eq}} = \frac{6}{12} = 0.5 \text{ A}$$



الشكل (19): دارة كهربائية بسيطة
تحتوي بطاريتين و مقاومتين.

المثال 10

بالاعتماد على البيانات المُتبعة في الشكل (19)، وبإهمال المقاومة الداخلية

لكلتا البطاريتين، أجد كلاً من:

أ) قيمة تيار الدارة وأحدد اتجاهه.

ب) فرق الجهد بين طرفي كل مقاومة.

المعطيات:

$$R_1 = 5 \Omega, R_2 = 3 \Omega, \varepsilon_1 = 16 \text{ V}, \varepsilon_2 = 12 \text{ V}$$

المطلوب:

$$I = ?, V_1 = ?, V_2 = ?$$

الحل:

أ) الشكل يمثل دارة كهربائية بسيطة تتكون من عروة واحدة تحتوي على مقاومات وبطاريات عدّة. أحدها اتجاه التيار (I) باتجاه القوة الدافعة الكهربائية للبطارية ذات القوة الدافعة الأكبر؛ أي باتجاه القوة الدافعة (ε_1)، ولأن الدارة تحتوي مقاومات وبطاريات عدّة؛ فإن معادلة الدارة الكهربائية البسيطة تكتب بالصيغة الآتية:

$$I = \frac{\sum \varepsilon}{R_{eq}}$$

$$I = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{R_{eq}} = \frac{16 - 12}{5 + 3} = \frac{4}{8}$$

$$I = 0.5 \text{ A}$$

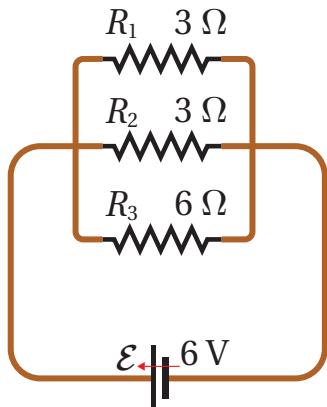
التيار مقداره (0.5 A) وباتجاه حركة عقارب الساعة.

ب) فرق الجهد بين طرفي كل مقاومة:

$$V_1 = IR_1 = \frac{1}{2} \times 5 = 2.5 \text{ V}$$

$$V_2 = IR_2 = \frac{1}{2} \times 3 = 1.5 \text{ V}$$

المثال 11



دارٌ كهربائيٌّ بسيطةٌ يبيّنُها الشكل (20)، المقاومة الداخليّة للبطاريه مهمّله، أحسب كلاً من:
 أ) المقاومة المكافأة للمقاومات الثلاث.
 ب) التيار الكلي المار في الدارة.

المعطيات: $R_1 = 3 \Omega, R_2 = 3 \Omega, R_3 = 6 \Omega, \epsilon = 6 \text{ V}$

المطلوب: $I = ?, R_{eq} = ?$

الشكل (20): دارٌ كهربائيٌّ بسيطةٌ تحتوي مقاوماتٍ موصولةٍ على التوازي.

أ) المقاومات موصولةٌ على التوازي؛ لذا نستخدم العلاقة الآتية:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{3} + \frac{1}{3} + \frac{1}{6} = \frac{2+2+1}{6}$$

$$R_{eq} = 1.2 \Omega$$

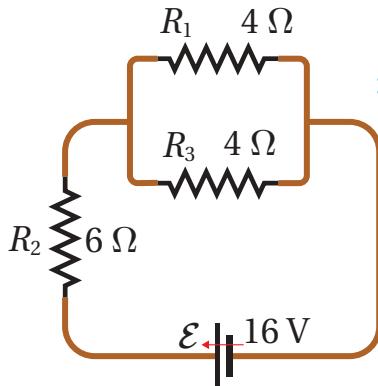
الاحظ أنَّ مقدار المقاومة المكافأة أقلُّ من أصغر المقاومات المتصلة.

ب) التيار الكلي في الدارة:

$$I = \frac{\epsilon}{R_{eq}} = \frac{6}{1.2} = 5 \text{ A}$$

عند المقارنة بين نتيجة الحل في المثالين (9 و 10)؛ ألحوظُ الاختلافَ في قيمة المقاومة المكافأة للمقاومات الثلاث باختلاف طريقة توصيلها. وكذلك الاختلافَ في قيمة التيار الكلي المار في كُلٍّ من الدارتين.

المثال 12



دارٌ كهربائيٌّ بسيطةٌ يبيّنُها الشكل (21/أ)، المقاومة الداخليّة للبطاريه مهمّله، أحسب كلاً من:
 أ) المقاومة المكافأة للمقاومات الثلاث.
 ب) التيار الكلي المار في الدارة.

المعطيات: $R_1 = 4 \Omega, R_2 = 6 \Omega, R_3 = 4 \Omega, \epsilon = 16 \text{ V}$

المطلوب: $I = ?, R_{eq} = ?$

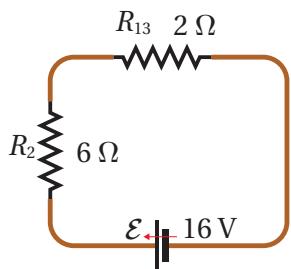
الحل:

الشكل (21/أ): دارٌ بسيطةٌ تحتوي مقاوماتٍ موصولةٍ على التوازي والتواالي.

أ) ألحوظ أن المقاومتين (R_1, R_3) موصولتان على التوازي.
 أجُدُّ المقاومة المكافأة لهما، حيثُ سأرمز لها بالرمز (R_{13}).

$$\frac{1}{R_{13}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{4} + \frac{1}{4} = \frac{2}{4}$$

$$R_{13} = \frac{4}{2} = 2 \Omega$$



يمكن إعادة رسم الدارة مرتّبة ثانيةً كما في الشكل (21/ب) الذي لاحظُ فيه أنَّ المقاومتين (R_2, R_{13}) موصولتان على التوالي.

$$R_{eq} = R_2 + R_{13} = 6 + 2 = 8 \Omega$$

ب) التيار الكلي المار في الدارة.

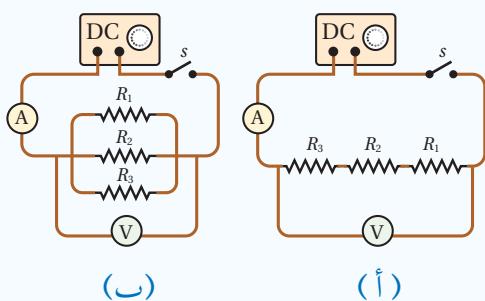
الشكل (21/ب) : دارة بسيطة تحتوي مقاومات موصولة على التوالي.

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_{eq}} = \frac{16}{8} = 2 A$$

التجربة 2

استقصاء قاعدي توصيل المقاومات / توالي، توازي

المواد والأدوات: مصدر طاقة منخفض الجهد (DC)، مفتاح كهربائي، مجموعة مقاومات (Ω ... 4,6,10,20,...)، جهاز أميتر وجهاز فولتميتر، أسلاك توصيل.



إرشادات السلامة: الحذر من لمس الوصلات الكهربائية غير المعزولة، عدم إغلاق المفتاح مدة طويلةً تسبب سخونة الأسلاك.

خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أتنفيذ الخطوات الآتية:

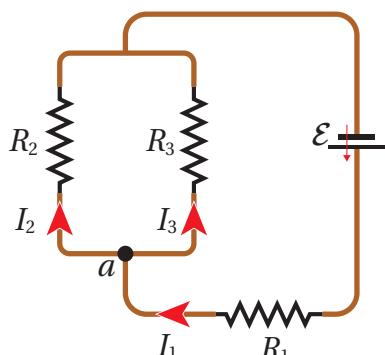
1. اختار ثلاثة مقاومات مختلفة، قيمها معلومة وأرمز لأصغرها بالرمز (R_1 ، ثم R_2 ، ثم R_3)، وأدّون قيمها في جدول خاص.
2. أصلّى المقاومات الثلاث على التوالي مع مصدر الطاقة، والمفتاح، وجهاز الأميتر، ثم أصلّى جهاز الفولتميتر مع المقاومات الثلاث، كما في الشكل (أ).
3. أغلق المفتاح مدة قصيرة، بحيث أتمكن من قراءة التيار والجهد في جهازي الأميتر والفولتميتر، وأدّون القراءات في الجدول.
4. أجدُ قيمة المقاومة المكافئة باستخدام قيم الجهد والتيار المقياسة في الخطوة (3)، ثم أطبق قانون أوم، بعد ذلك أحسب قيمة المقاومة المكافئة بتطبيق قاعدة التوصيل على التوالي، وأقارن النتيجين.
5. أعيّد توصيل المقاومات الثلاث على التوازي، وأصلّى جهازي الفولتميتر والأميتر كما في الشكل (ب)، ثم أكرر الخطوتين (3,4)، وأقارن النتائج الحسابية مع العملية.

التحليل والاستنتاج:

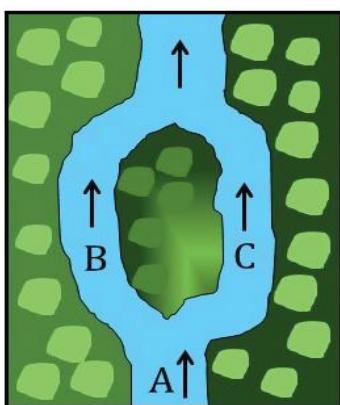
1. **أقارن** بين مقدار المقاومة المكافئة للمقاومات الثلاث التي توصلت إليها تجريبًا مع القيمة المحسوبة باستخدام العلاقة الرياضية، لكلٍّ من طريقتي التوصيل؛ التوالي والتوازي.
2. **أستنتج**: أتحقق عمليًّا من قاعدي جمع المقاومات على التوالي وعلى التوازي.
3. ما العلاقة بين الجهد الكلي (جهد المصدر) والجهد الفرعي لكل مقاومة في طريقتي التوصيل؟
4. ما العلاقة بين التيار الكلي والتيار الفرعي لكل مقاومة في طريقتي التوصيل؟

الدارة البسيطة والدارة المركبة:

تتكون الدارة الكهربائية البسيطة من عروة واحدة، وقد تحتوي على تفرعات للمقاومات فقط؛ أما إذا وُجِدَت في التفرعات بطاريات، فإن الدارة تصبح مركبة.



(أ): تفرع التيار الكهربائي.



(ب): تدفق الماء عند تفرع النهر.

الشكل (22): قاعدة كيرشوف الأولى، ومقارنتها بتفرع النهر.

Kirchhoff's Rules

درست العلاقة بين فرق الجهد والتيار في دارة كهربائية بسيطة، واستخدمت قواعد حساب المقاومة المكافئة لتحويل الدارة التي تحتوي على تفرعات إلى عروة واحدة. لكن توجد دارات كهربائية لا يمكن تبسيطها بتحويلها إلى عروة واحدة. لتحليل هذه الدارات؛ سوف أستخدم قاعدتين وضعهما العالم غوستاف كيرشوف، إضافةً إلى القواعد السابقة.

Kirchhoff's First Rule

تسمى أيضًا قاعدة الوصلة Junction rule، وهي تمثل إحدى صور مبدأ حفظ الشحنة؛ فكمية الشحنة الداخلة باتجاه نقطة في دارة كهربائية في مدة زمنية، تساوي كمية الشحنة المغادرة لها في المدة نفسها، ولا يمكن أن تراكم الشحنة عند تلك النقطة. عندما أطبق هذه القاعدة على نقطة التفرع (a)، في الدارة الكهربائية المُبيّنة في الشكل (22/أ)، أجد أن $I_1 = I_2 + I_3$ ؛ أي أن التيار الداخل باتجاه (a) يُساوي مجموع التيارين الخارجيين منها. وتنص قاعدة كيرشوف الأولى أن «المجموع الجريي للتيارات عند أي نقطة تفرع في دارة كهربائية يساوي صفرًا».

$$\Sigma I = 0 \rightarrow \Sigma I_{\text{in}} = \Sigma I_{\text{out}}$$

يمكن تشبيه تفرع التيار الكهربائي بماء النهر في المنطقة (A) الذي يتفرع إلى فرعين (B,C) حول الجزيرة، كما في الشكل (22 / ب). حيث تساوي كمية الماء المتدافع عبر النهر مجموع ما يتدافع من الماء على جانبي الجزيرة.

تحقق: أوضح العلاقة بين قاعدة كيرشوف الأولى ومبدأ حفظ الشحنة. ✓

المثال 13

بالرجوع إلى الشكل (22/أ)، إذا كان التيار الأول (6.0 A) والتيار الثاني (3.5 A). أجد مقدار التيار المار في المقاومة (R_3).

المعطيات:

$$I_1 = 6.0 \text{ A}, I_2 = 3.5 \text{ A}$$

المطلوب:

$$I_3 = ?$$

الحل:

بتطبيق قاعدة كيرشوف الأولى على نقطة التفرع (a):

$$I_1 = I_2 + I_3 \rightarrow I_3 = I_1 - I_2 = 6.0 - 3.5 = 2.5 \text{ A}$$

.....

قاعدة كيرشوف الثانية Kirchhoff's Second Rule

تُسمى هذه القاعدة بقاعدة العروة، وتنص قاعدة كيرشوف الثانية أنَّ «المجموع الجبري لتغيرات الجهد عبر مكونات مسارٍ مغلقٍ في دارةٍ كهربائيةٍ يساوي صفرًا».

$$V_a + \sum \Delta V = V_a$$

تحقق قاعدة كيرشوف الثانية قانون حفظ الطاقة، حيث تقل طاقة الوضع الكهربائية للشحنة الافتراضية الموجبة عند انتقالها من جهد مرتفع إلى جهد منخفض عبر المقاومات، بينما تزداد طاقة الوضع لهذه الشحنة عند عبورها البطارية من قطبها السالب إلى قطبها الموجب، وعند حركة الشحنة من نقطة محددة والعودة إليها، يكون التغير في طاقة الوضع الكهربائية للشحنة صفرًا.

عند العودة إلى نقطة البداية نفسها لتطبيق القاعدة الثانية لكيرشوف؛ علىَّ أنْ أُحدد تغيرات الجهد خلال العروة. أتخيلُ أنِّي أنتقل خلال العروة لتبعد التغييرات في جهود مكوناتها باتجاه حركةٍ مُحدَّدٍ مسبقاً، مع مراعاة نظام إشاراتٍ موجبةٍ وسالبة، كما يأتي:

أ). عند عبور المقاومة (R) من النقطة (a) إلى النقطة (b) باتجاه التيار، فهذا يعني الانتقال من جُهدٍ مرتفعٍ عند بداية المقاومة إلى جُهدٍ منخفضٍ عند نهايتها؛ لذلك يقلُّ الجهد ($\Delta V = -IR$)، كما في الشكل (23/أ).

ب). عند عبور المقاومة باتجاهٍ معاكسٍ للتيار؛ فهذا يعني الانتقال من جُهدٍ منخفضٍ إلى جُهدٍ مرتفعٍ؛ لذلك يزداد الجهد ($\Delta V = IR$)، كما في الشكل (23/ب).

ج). عند عبور بطاريةٍ من قطبها السالب إلى قطبها الموجب (مع اتجاه قوتها الدافعة الكهربائية)؛ فهذا يعني الانتقال من جُهدٍ منخفضٍ إلى جُهدٍ مرتفعٍ؛ لذا يزداد الجهد ($\Delta V = \mathcal{E}$)، كما في الشكل (23/ج).

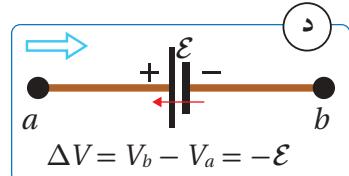
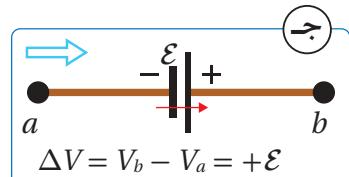
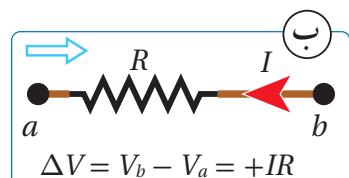
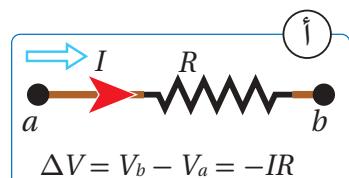
د). عند عبور بطاريةٍ من قطبها الموجب إلى قطبها السالب (عكس اتجاه قوتها الدافعة الكهربائية)؛ فهذا يعني الانتقال من جُهدٍ مرتفعٍ إلى جُهدٍ منخفضٍ؛ لذا يقلُّ الجهد ($\Delta V = -\mathcal{E}$)، كما في الشكل (23/د).

يجري التعامل مع البطاريات في القواعد السابقة بوصفها مثالياً، لكن عند تحديد تغيرات الجهد في العروة؛ فإنَّ المقاومة الداخلية لكل بطاريةٍ تُعامل معاملة المقاومات الخارجية.

أتحقق: كيف يمكن تفسير قاعدة كيرشوف الثانية عن طريق مبدأ حفظ الطاقة؟

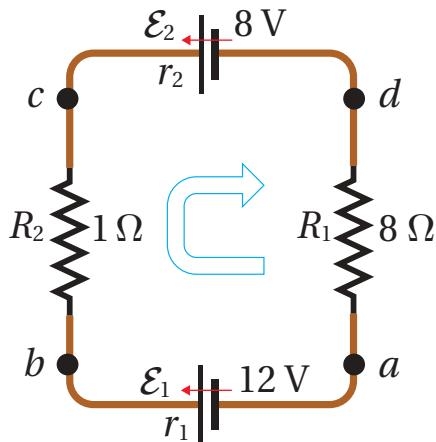
الربط مع الحياة

دارة القصر Short circuit تحدث عند توصيل القطب الموجب للبطارية مع قطبها السالب دون وجود مقاومة بينهما، فيحدث انتقالٌ لكميَّةٍ كبيرةٍ من الشحنات الكهربائية وتولَّد طاقةٌ كافيةٌ لتسخين الأسلامك. عند حدوث دارة قصر في تمديدات الكهرباء المنزليَّة، تصهر الأسلاك وتولَّد طاقةٌ كبيرةٌ قد تؤدي لاحتراق المنزل.



الشكل (23): تحديد زيادة الجهد أو نقصانه عند عبور مقاومةٍ أو بطاريةٍ من اليسار إلى اليمين.

المثال 14



دارٌ كهربائيٌّ بسيطٌ تتكون من بطاريتين و مقاومتين ، كما في الشكل (24)، إذا كانت كلتا المقاومتين الداخليةتين تساوي ($0.5\ \Omega$)، باستخدام القاعدة الثانية لـKirchhoff؛ أجد قيمة التيار وأحدّد اتجاهه .
المعطيات:

بيانات الشكل ، $r_1 = 0.5\ \Omega$ ، $r_2 = 0.5\ \Omega$

المطلوب:

$$I = ?$$

الشكل (24): تطبيق قاعدة Kirchhoff

الثانية على عروة واحدة مغلقة.

الحلّ:

أفترض اتجاه التيار في الدارة مع اتجاه عقارب الساعة (باتجاه القوة الدافعة الأكبر)، وافتراض كذلك اتجاه عبور مكونات الدارة مع الاتجاه نفسه، وأبدأ العبور من النقطة (a) عبر المسار: $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow a$:

$$V_a + \sum \Delta V = V_a$$

$$\sum \Delta V = V_a - V_a = 0$$

$$\epsilon_1 - Ir_1 - IR_2 - \epsilon_2 - Ir_2 - IR_1 = 0$$

$$\epsilon_1 - \epsilon_2 - I(r_1 + R_2 + r_2 + R_1) = 0$$

$$12 - 8 - I(0.5 + 1 + 0.5 + 8) = 0$$

$$I = \frac{4}{10} = 0.4\ A$$

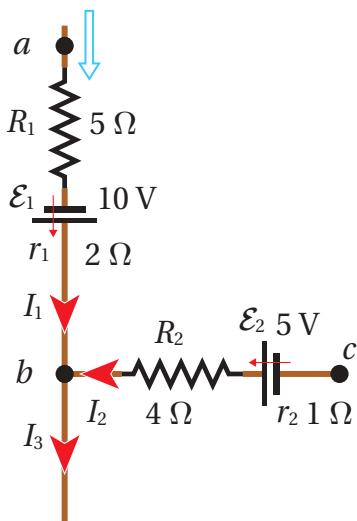
نلاحظ أن إشارة التيار موجبة، وهذا يعني أنه بالاتجاه المفروض؛ أي باتجاه عقارب الساعة.

للمزيد

أعيد حل المثال (14) بافتراض أن اتجاه التيار يعكس اتجاه عقارب الساعة، واتجاه العبور مع عقارب الساعة؛ أي حسب المسار: $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow a$

المثال 15

جزءٌ من دارةٍ كهربائيةٍ مركبة، كما في الشكل (25)، فيه ($I_1 = 3.0 \text{ A}$)، ($I_3 = 4.5 \text{ A}$)، ($V_c = 9.0 \text{ V}$)؛ إذا علمتُ أنَّ A أحسبْ جُهدَ النقطة (a).



الشكل (25): جزءٌ من دارةٍ كهربائيةٍ مركبة.

المعطيات: بيانات الشكل، $I_1 = 3.0 \text{ A}$, $V_c = 9.0 \text{ V}$, $I_3 = 4.5 \text{ A}$

المطلوب: $V_a = ?$

الحل:

أطبقَ القاعدة الأولى لکيرشوف لحساب التيار (I_2).

$$\Sigma I = 0 \rightarrow I_1 + I_2 = I_3$$

$$I_2 = I_3 - I_1 = 4.5 - 3.0 = 1.5 \text{ A}$$

أطبقَ القاعدة الثانية لکيرشوف عند العبور من (a) إلى (c)، كما يأتي:

$$V_a + \sum \Delta V = V_c$$

$$V_a - I_1 R_1 + \epsilon_1 - I_1 r_1 + I_2 R_2 - \epsilon_2 + I_2 r_2 = V_c$$

$$V_a - 3.0(5) + 10 - 3.0(2) + 1.5(4) - 5 + 1.5(1) = 9.0$$

$$V_a - 8.5 = 9.0$$

$$V_a = 17.5 \text{ V}$$

استنتج أنَّ جُهدَ النقطة (a) يزيد على جُهدَ النقطة (c) بمقدار (8.5 V).

المثال 16

تتكوّن دارةٍ كهربائيةٍ مركبةٍ من مجموعةٍ من البطاريات والمقاومات، كما في الشكل (26)، بالاعتماد على بيانات الشكل، أحسبْ:

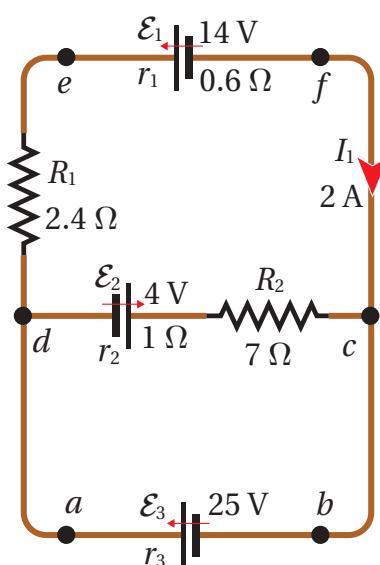
أ) قِيم باقي تيارات الدارة وأحدّد اتجاه كل تيار.

ب) مقدار المقاومة الداخلية (r_3).

المعطيات: بيانات الشكل.

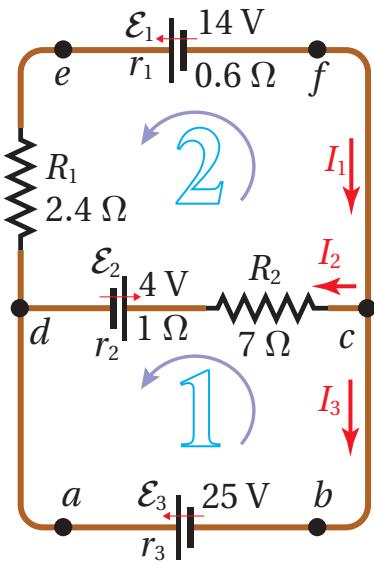
المطلوب: $I_3 = ?, I_2 = ?, r_3 = ?$

الحل:



الشكل (26): دارةٍ كهربائيةٍ مركبة.

أ) لتطبيق القاعدة الأولى لکيرشوف، أفترض أنَّ نقطة التفرع (c) يدخل إليها تيار (I_1)، ويخرج منها تيارات (I_2, I_3)، وأمثال ذلك بأسهم على الشكل (27)، ثم أكتب المعادلة الأولى:



الشكل (27): الاتجاه المفترض للتيارات، ولاتجاه العبور خلال مكونات العروتين 1 و 2.

$$I_1 = I_2 + I_3$$

$$2 = I_2 + I_3$$

توجد في الدارة ثلاث عُرَى، هي $(abcfeda)$ ، $(cfedc)$ ، $(abcd)$ لتطبيق القاعدة الثانية لكيرشوف، لأنها تتضمن التيار المعلوم (I_1).

سأعبر العروة بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة، بدءاً من النقطة (c) ، وأكتب المعادلة الثانية:

$$V_c + \sum \Delta V = V_c$$

$$+ \varepsilon_1 + I_1 r_1 + I_1 R_1 + \varepsilon_2 + I_2 r_2 + I_2 R_2 = 0$$

$$14 + (0.6)I_1 + (2.4)I_1 + 4 + (1)I_2 + (7)I_2 = 0$$

$$14 + (0.6 + 2.4) \times 2 + 4 + (8)I_2 = 0$$

$$I_2 = \frac{-24}{8} = -3 \text{ A}$$

من المعادلة الأولى أجُدّ I_3 :

$$I_3 = I_1 - I_2 = 2 - (-3) = 5 \text{ A}$$

إشارة التيار (I_3) موجبة، مما يعني أنه بالاتجاه المفترض، وإشارة التيار (I_2) سالبة؛ أي أنه بعكس الاتجاه المفترض. مع ذلك؛ سأكمل الحل باستخدام القيمة السالبة المفترضة.

ب) لحساب المقاومة الداخلية (r_3)؛ أطبق القاعدة الثانية لكيرشوف على العروة الأولى ($abcda$)، سأعبرها بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة بدءاً من النقطة (a) ، للحصول على:

$$V_a + \sum \Delta V = V_a$$

$$-\varepsilon_3 + I_3 r_3 - I_2 R_2 - \varepsilon_2 - I_2 r_2 = 0$$

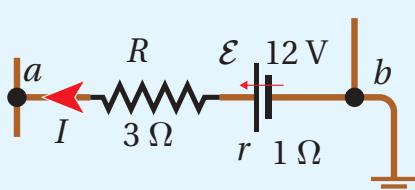
$$-25 + 5r_3 - (-3 \times 7) - 4 - (-3 \times 1) = 0$$

$$5(r_3) = +29 - 24 \rightarrow r_3 = 1 \Omega$$

للمزيد

أستخدم الأرقام: بالاعتماد على بيانات الشكل (28)، حيث ($I = 2 \text{ A}$)، وجهد النقطة (b) يساوي صفراء، بسبب اتصالها بالأرض. أجُدّ جُهدَ النقطة (a) .

ملاحظة: تُعدُّ الأرض موصلًا ضخماً يمكنه تفريغ شحنة الأجسام المُتّصلة بها؛ لذلك فإنَّ أيِّ جسمٍ يوصل بالأرض يصبح جُهده صفراء.



الشكل (28): فرق الجهد بين نقطتين.

مراجعة الدرس

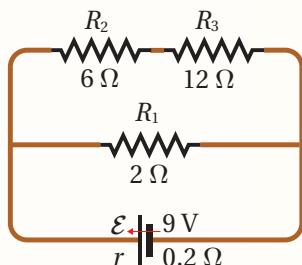
1. الفكرة الرئيسية:

أ . أذكر نص قاعدي كيرشوف، وما مبدأ الحفظ الذي تحققه كلّ منها؟

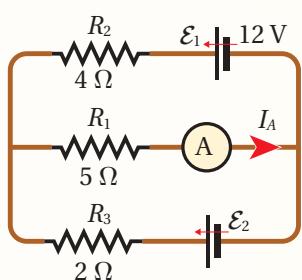
ب . أقارن بين طريقي توسيع المقاومات على التوازي وعلى التوالى من حيث؛ فرق الجهد والتيار والمقاومة المكافئة.

2. أبين طريقة توسيع المصباحين الأمامييin في السيارة مع البطاريه، إن كانت توازيًا أو توايلًا، مفسّرًا أهمية هذه الطريقة.

3. **أفسر** لماذا يُعد فرق الجهد بين طرفي المقاومة سالبًا عند عبورها باتجاه التيار المار فيها.

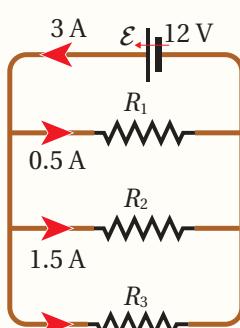


4. **استخدم الأرقام:** يُبيّن الشكل المجاور دارة كهربائية تحتوي بطارية و مقاومات، بالاعتماد على بيانات الشكل أحسب المقاومة المكافئة للدارة، ثم مقدار التيار فيها.



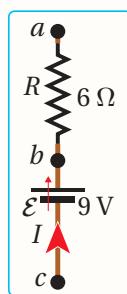
5. **استخدم الأرقام:** إذا كانت قراءة الأميتر في الدارة المجاورة (2 A)، وبإهمال المقاومات الداخلية للبطاريات، أجد كلاً من:

- أ . مقدار واتجاه التيارين: (I_1) يمر في (ϵ_1) ، و (I_2) يمر في (ϵ_2) .
- ب . مقدار القوة الدافعة الكهربائية (ϵ_2) .



6. **استخدم الأرقام:** بالاعتماد على بيانات الدارة المبينة في الشكل؛ أجد ما يأتي:

- أ . التيار المار في المقاومة (R_3) .
- ب . قيم المقاومات الثلاث.
- ج . المقاومة المكافئة.



7. يُبيّن الشكل المجاور جزءًا من دارة كهربائية، بالاعتماد على بيانات الشكل، حيث إنّ: $(V_b - V_a = 15 V)$ و $(V_c - V_a = 7 V)$ ؛ أجد مقدار المقاومة الداخلية للبطاريه.

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

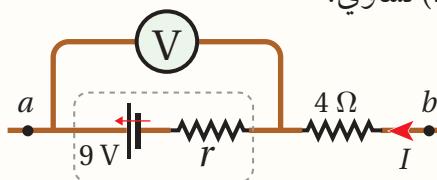
1. مجموعة من المقاومات عددها (n) ووصلت كل منها (R) ووصلت جميعها على التوالي مع مصدر فرق جهد، ثم أعيد توصيلها على التوازي مع المصدر نفسه؛ فإن نسبة مقدار التيار الكلي في حالة التوازي (I_p) إلى في حالة التوالي (I_s) تكون كما يأتي:

أ . $\frac{I_p}{I_s} = n^2$.

ب . $\frac{I_p}{I_s} = \frac{1}{n^2}$.

ج . $\frac{I_p}{I_s} = \frac{1}{n}$.

2. يبين الشكل المجاور جزءاً من دارة كهربائية، إذا كانت قراءة الفولتميتر (V) تساوي (7 V) وفرق الجهد ($V_b - V_a$)؛ فإن المقاومة الداخلية للبطارية بوحدة أوم (Ω) تساوي:

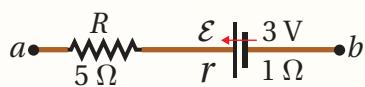


أ . (2.0) .

ب . (1.0) .

ج . (1.5) .

3. يبين الشكل جزءاً من دارة كهربائية، فيه ($V_b = 2 V$) و ($V_a = 17 V$). اعتماداً على بيانات الشكل يكون التيار في البطارية:

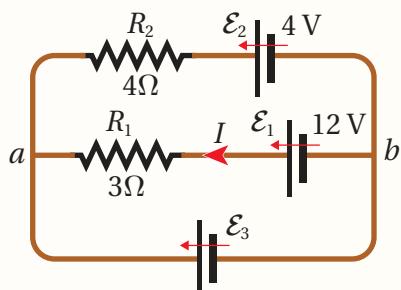


أ . من (b) إلى (a)، ويساوي (2 A)

ب . من (b) إلى (a)، ويساوي (3 A)

ج . من (a) إلى (b)، ويساوي (2 A)

د . من (a) إلى (b)، ويساوي (3 A)



* إذا كان التيار الذي يسري في المقاومة (R_1) في الدارة المبينة في الشكل المجاور ($I = 2 A$)، وبإهمال المقاومات الداخلية للبطاريات؛ أجب عن الفقرتين الآتيتين:

4. مقدار القوة الدافعة الكهربائية (ϵ_3) بوحدة فولت (V) يساوي:

أ . 6 .

ب . 8 .

ج . 12 .

د . 18 .

5. مقدار التيار المار في المقاومة (R_2) بوحدة أمبير (A) واتجاهه:

أ . 0.5 ، من (b) إلى (a).

ب . 0.5 ، من (a) إلى (b).

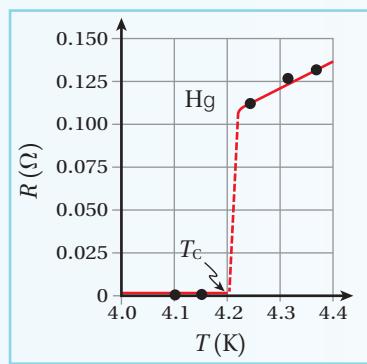
ج . 2.5 ، من (a) إلى (b).

د . 2.5 ، من (a) إلى (b).

المواد فائقة التوصيل Superconductors

أغلب الفلزات تزداد مقاومتها بارتفاع درجة الحرارة، وتقل بانخفاضها، لكن هناك بعض الفلزات والمركبات التي تقل مقاومتها بشكل كبير بانخفاض درجة حرارتها، وعند درجات حرارة أقل من الدرجة الحرجة (T_c) Critical temperature؛ تصبح مقاومة المادة صفرًا وتوصف المادة بأنها فائقة التوصيل. تُعرف درجة الحرارة الحرجة بأنها أعلى درجة حرارة تنتقل عندها المادة من حالتها الطبيعية إلى الحالة الفائقة التوصيل، وهي خصيصة مميزة للموصلات الفائقة.

عند درجات حرارة أقل من درجة الحرارة الحرجة يمكن للتيار الكهربائي الذي يولّد في هذه المواد أن يسري فيها لسنوات عدّة دون الحاجة إلى مصدر فرق جهد كهربائي؛ لأن مقاومتها للتيار تساوي صفرًا؛ حيث لا تضيع الطاقة الكهربائية على شكل طاقة حرارية.



لكن فوق الدرجة الحرجة تزداد مقاومة هذه المواد بارتفاع درجة الحرارة، كما في الموصلات الفلزية الأخرى، كما هو موضح في الشكل المجاور؛ إذ يصبح فلز الزئبق (Hg) فائق التوصيل تحت الدرجة الحرجة، وهي ($T_c = 4.2$ K)، أما فوق هذه الدرجة، فيبين منحني العلاقة بين مقاومة عينيّة من الزئبق ودرجة الحرارة المطلقة زيادة المقاومة بارتفاع درجة الحرارة. وتوجد مواد أخرى، مثل الألミニوم والقصدير والرصاص والإنديوم تتحول عند تبریدها إلى فائقة التوصيل، في حين أن موصلات جيّدة للكهرباء مثل النحاس والذهب لا تتحول إلى مواد فائقة التوصيل عند تبریدها.

حاز العالمان السويسريان جورج بدرون وألكسندر ميلر على جائزة نوبل في الفيزياء عام (1987)؛ لاكتشافهما مواد فائقة التوصيل عند درجة حرارة أعلى مما كان معروفاً، ثم توالت الأبحاث للحصول درجات حرارة أعلى من ذلك، فالمركب الذي يتكون من أكسيد الباريوم واللانثينيوم والنحاس يصبح فائق التوصيل دون الدرجة ($T_c = 92$ K)، وتوجد مركبات أخرى فائقة التوصيل عند الدرجة ($T_c = 134$ K). ويأمل الباحثون التوصل إلى مواد تكون فائقة التوصيل عند درجة حرارة الغرفة.

تستخدم المواد فائقة التوصيل في تطبيقات تكنولوجية عدّة، يرتكز أهمها على توليد مجالات مغناطيسية قوية جداً، تفوق تلك التي تولدها المغناطيس الكهربائية العادية بعشر مرات، مثل تلك المستخدمة في أجهزة الرنين المغناطيسي وفي مسارعات الجسيمات. كما يظهر في الشكل مغناطيس صغير يرتفع فوق قرص من مادة فائقة التوصيل مُبرّد إلى ما دون الدرجة الحرجة باستخدام النيتروجين السائل، عند وضع المغناطيس فوق القرص؛ يتولد في القرص تيار حيّ (ستتعرفه في الوحدة الدراسية القادمة)؛ فينشأ عنه مجال مغناطيسي معاكس لمجال المغناطيس ومساوي له في المقدار يعمل على رفع المغناطيس في الهواء.



اعتماداً على هذه الظاهرة؛ طوّرت قطارات عالية السرعة (600 km/h) تطفو على سكة تحتوي مغناطيس من مواد قوية فائقة التوصيل؛ للتغلب على قوى الاحتكاك التي تنشأ عادةً بين القطار وسكة الحديد.



كما أن هناك أمل لدى العلماء بصناعة خطوط نقل الكهرباء من مواد فائقة التوصيل (حال التوصيل إليها عند درجات الحرارة العادية) لنقل الكهرباء بصورة مثالية دون أي ضياع للطاقة.

مراجعة الوحدة

1. أضف دائرةً حول رمز الإجابة الصحيحة لـ كل جملة مما يأتي:

1. تتصف المقاومية بإحدى الصفات الآتية:

أ. تزداد بزيادة طول الموصى وبزيادة مساحة مقطعه.

ب. تقل بزيادة طول الموصى وبزيادة مساحة مقطعه.

ج. تزداد بزيادة طول الموصى وبنقصان مساحة مقطعه.

د. تعتمد على نوع المادة وليس على أبعاد الموصى الهندسية.

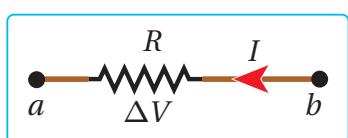
2. يسري تيار في مقاومة باتجاه اليسار، كما في الشكل، إذا كان (V_a) ثابتاً؛ فإنّه يمكن وصف الجهد (V_b) بأنه:

أ. أعلى من (V_a)، وبزيادته يزداد التيار (I).

ب. (V_b) أعلى من (V_a)، وبزيادته يقل (I).

ج. (V_b) أقل من (V_a)، وبزيادته يزداد التيار (I).

د. (V_b) أقل من (V_a)، وبزيادته يقل التيار (I).



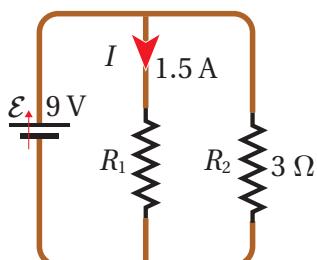
3. تكون المقاومة المكافئة للمقاومتين في الدارة المجاورة:

أ. $1\ \Omega$.

ب. $2\ \Omega$.

ج. $3\ \Omega$.

د. $6\ \Omega$.



4. عندما تكون قراءة الفولتميتر في الدارة المبينة في الشكل (9.0 V)

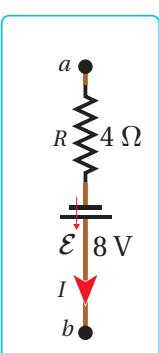
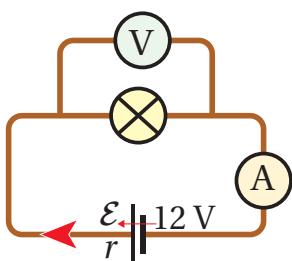
وقراءة الأميتر (1.5 A)؛ فإن المقاومة الداخلية للبطارية تساوي:

أ. $1.0\ \Omega$.

ب. $1.5\ \Omega$.

ج. $2.0\ \Omega$.

د. $2.5\ \Omega$.



5. إذا كان التيار الكهربائي في الشكل يساوي ($\Delta V = V_b - V_a = 1.2\text{ A}$)، فإن فرق الجهد (I) يساوي:

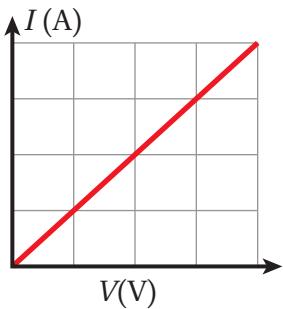
أ. 4.0 V.

ب. 3.2 V.

ج. 4.8 V.

د. 4.2 V.

مراجعة الوحدة



6. يمثل الشكل المجاور العلاقة بين فرق الجهد بين طرفي سلك نحاسي طوله (l)، ومساحة مقطعه (A)، وبين التيار الذي يسري فيه عند درجة حرارة ثابتة. يزداد ميل الخط المستقيم بزيادة إحدى الكميات الآتية:

- أ. طول السلك
- ب. درجة حرارة السلك
- ج. مساحة مقطع السلك
- د. فرق الجهد بين طرفي السلك

7. بطارية قوتها الدافعة الكهربائية (1.5 V)؛ الشغل الذي تبذله بوحدة جول (J) لنقل شحنة ($C = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$) من

القطب السالب إلى القطب الموجب داخل البطارية يساوي:

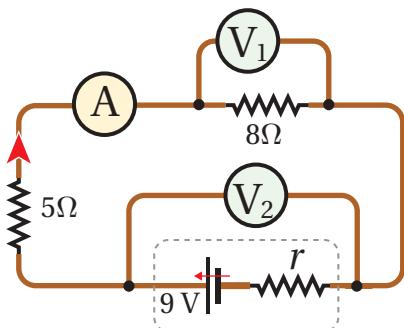
- | | | |
|----|-----------------------|-----------------------|
| أ. | 2.4×10^{-19} | 1.6×10^{-19} |
| ب. | 2.4×10^{19} | 1.6×10^{19} |
| ج. | 2.4×10^{19} | 1.6×10^{19} |

8. سلكان رفيعان متساويان في مساحة المقطع؛ الأول من النيكروم والثاني من التنجستن، إذا تساوت مقاومة السلكين عند درجة الحرارة (20°C)؛ فما نسبة طول سلك التنجستن (L_t) إلى طول سلك النيكروم (L_N)؟

- | | |
|----|------|
| أ. | 150 |
| ب. | 37.3 |
| ج. | 26.8 |
| د. | 5.6 |

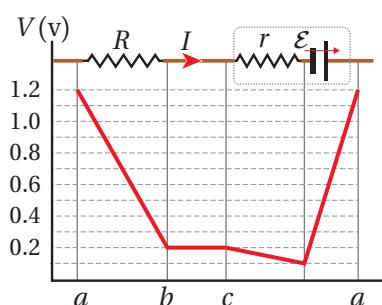
9. وصلت بطارية مع مصباح مقاومته (2Ω) فسري فيه تيار كهربائي (0.4 A)، وعند توصيل البطارية نفسها مع مصباح مقاومته (5Ω) سري فيه تيار (0.2 A)؛ فإن المقاومة الداخلية للبطارية بوحدة أوم (Ω) تساوي:

- | | |
|----|-------|
| أ. | (2.0) |
| ب. | (1.0) |
| ج. | (0.5) |
| د. | (0.2) |



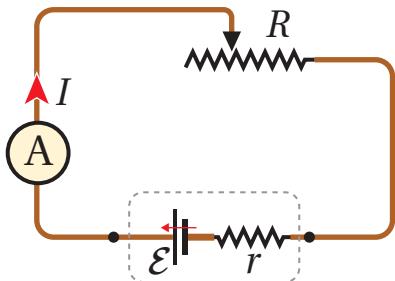
10. يبين الشكل المجاور دارةً كهربائيةً بسيطةً، معتمدًا على بيانات الشكل المجاور، وإذا كانت قراءة الأميتر (A) تساوي (0.6 A)؛ فإن قراءتي جهازي الفولتميتر (V_1) و(V_2) تكونان كما يأتي:

- | | | |
|----|-------------------------------|-------------------------------|
| أ. | $(V_2 = 4.8)$ ، $(V_1 = 7.8)$ | $(V_2 = 7.8)$ ، $(V_1 = 4.8)$ |
| ب. | $(V_2 = 4.2)$ ، $(V_1 = 1.2)$ | $(V_2 = 1.2)$ ، $(V_1 = 4.2)$ |



11. مُثّلت تغيرات الجهد في دارة كهربائية بيانياً، كما في الشكل المجاور. بالاعتماد على البيانات، وإذا كانت المقاومة الداخلية للبطارية (Ω)، فإن المقاومة (R) والتيار الذي يسري فيها (I) يساويان:

- | | | |
|----|---|------------------------------|
| أ. | $(500 \text{ mA}, 300 \text{ m}\Omega)$ | $(250 \text{ mA}, 3 \Omega)$ |
| ب. | $(500 \text{ mA}, 400 \text{ m}\Omega)$ | $(250 \text{ mA}, 4 \Omega)$ |
| ج. | $(500 \text{ mA}, 400 \text{ m}\Omega)$ | $(250 \text{ mA}, 4 \Omega)$ |



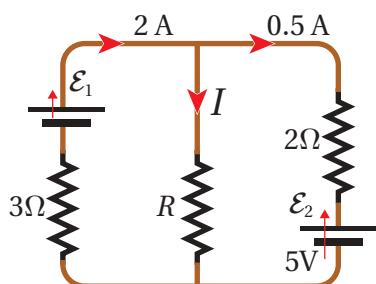
د. 16 W

ج. 9 W

ب. 4 W

أ. 3 W

12. بطارية قوتها الدافعة الكهربائية (ϵ) و مقاومتها الداخلية (r) و صلت مع مقاومة متغيرة (R), كما في الشكل المجاور. عندما كانت المقاومة المتغيرة ($R = r$) كانت القدرة المستهلكة فيها (12 W). كم تصبح القدرة المستهلكة في (R) عندما تصبح قيمتها ($R = 3r$)؟



* يبين الشكل المجاور دارة كهربائية مركبة. اعتماداً على بيانات الشكل، وبإهمال المقاومتين الداخليتين للبطاريتين؛ أجب عن الفقرتين الآتتين:

14. مقدار القوة الدافعة الكهربائية (ϵ_1) بوحدة فولت (V) يساوي:

د. 18

ج. 12

ب. 8

أ. 4

15. المقاومة (R) بوحدة أوم (Ω) تساوي:

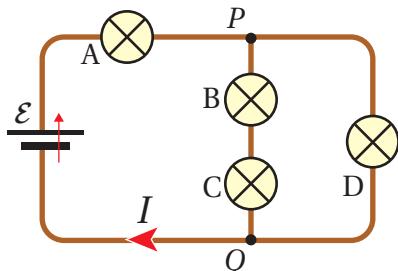
د. 4

ج. 3

ب. 2

أ. 1

2. **استخدم الأرقام:** مصّف شعير يعمل على جهد (220 V)، ويُسري فيه تيار كهربائي مقداره (4 A). إذا كان عنصر التسخين فيه مصنوعاً من سلك نيکروم نصف قطره (0.8 mm)؛ فما مقاومته هذا السلك؟ وما طوله؟



3. **استخدم الأرقام:** في الدارة المبينة في الشكل المجاور تتصل أربعة مصابيح متماثلة مع بطارية فرق الجهد بين قطبيها (12 V)، إذا علمت أن فرق الجهد بين طرفي المصباح (A) يساوي (4.8 V)، أحسب فرق الجهد بين طرفي كل مصباح من المصابيح الأخرى (B, C, D).

4. مصدر فرق جهد كهربائي قدرته (500 W) وفرق الجهد بين طرفيه (200 V)، ووصل معه جهاز كهربائي مقاومته (Ω) (76)، واستخدمت في التوصيل أسلاك من النحاس طولها (400 m). إذا كانت درجة حرارة الأسلاك ($20^\circ C$)؛ فما مقدار أقل مساحة مقطع لهذه الأسلاك، بحيث تصل إلى الجهاز قدرة كهربائية تساوي (95%) من قدرة المصدر؟

مراجعة الوحدة

5. **استخدم الأرقام:** فرن كهربائي يعمل على جهد (240 V)؛ مقاومة عنصر التسخين فيه (Ω) (30). إذا عمل مدة (48 min).

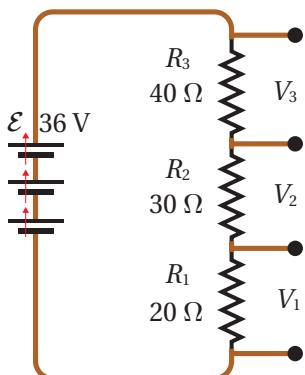
لطهي الطعام؛ أحسب ما يأتي:

أ. التيار الكهربائي الذي يسري في عنصر التسخين.

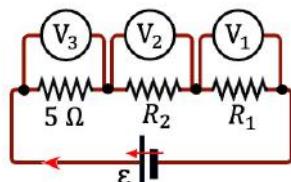
ب. القدرة الكهربائية للفرن.

ج. مقدار الطاقة الكهربائية المتحولة إلى حرارة خلال مدة الطهي.

د. كيف تغير النتائج السابقة جميعها في حال وصل الفرن مع مصدر جهد (120 V)؟



6. **استخدم الأرقام:** للحصول على فرق جهد مناسب من بطارية ذات فرق جهد كبير، تُستخدم دارة مجزء الجهد؛ إذ توصل مع البطارية مجموعة مقاومات كما في الشكل المجاور، ما مقدار فرق الجهد بين طرفي كل مقاومة من المقاومات الثلاث؟



7. **استخدم الأرقام:** يبين الشكل المجاور دارة كهربائية لتجزئة الجهد، تحتوي بطارية مثالية قوتها الدافعة الكهربائية (10 V). إذا علمت أن قراءة جهازي الفولتميتر ($V_1 = 2.4 V$) و ($V_2 = 3.6 V$)، أجب عن السؤالين الآتيين:

أ. ما مقدار كل من المقاومتين (R_1) و (R_2)؟

ب. إذا كانت البطارية غير مثالية ومقاومتها الداخلية (Ω) (1.78)، فكم تصبح قراءة أجهزة الفولتميتر الثلاثة؟

8. **استخدم الأرقام:** سيارة كهربائية موصولة مع شاحن قدرته (62.5 kW) بسلك يسري فيه تيار كهربائي (125 A). إذا استغرقت عملية الشحن (30 min). أحسب ما يأتي:

أ. كمية الشحنة التي انتقلت عبر السلك خلال هذه المدة.

ب. فرق الجهد بين طرفي الشاحن؟

ج. الشغل الكهربائي الذي بذله الشاحن على بطارية السيارة.

د. تكلفة الشحن، إذا كان سعر (1 kWh) هو (0.12 JD).

9. **أستنتج:** أرغب بتصميم مدفعٍ كهربائيٍ بسيطة قدرتها (1000 W) تعمل على جهد (240 V)، وعنصر التسخين فيها سلكٌ من مادة النيكروم. ما المواصفات الهندسية للسلك؟

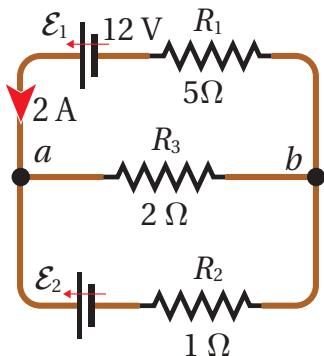
10. **اقرئ:** عند توصيل ثلاثة مصابيح متماثلة، مقاومة كل منها (R) مع بطارية قوتها الدافعة الكهربائية (12 V) و مقاومتها الداخلية مُهمَلة؛ ما نسبة القدرة الممتدة في البطارия في الحالتين؛ المصباح موصولة على التوالى / التوازي؟

11. **استخدم الأرقام:** سلكٌ من فلز التنجستون طوله (5.0 m) ومساحة مقطعٍ (0.7 mm²). ما مقدار التيار المار فيه عند توصيل طرفيه مع مصدر جهد (1.5 V)؟

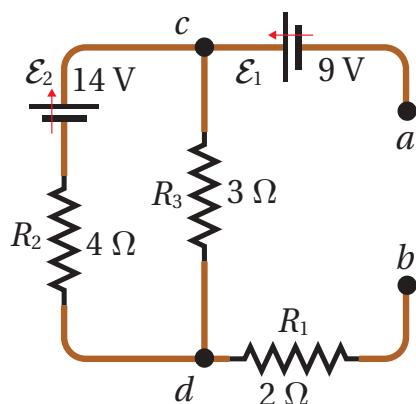
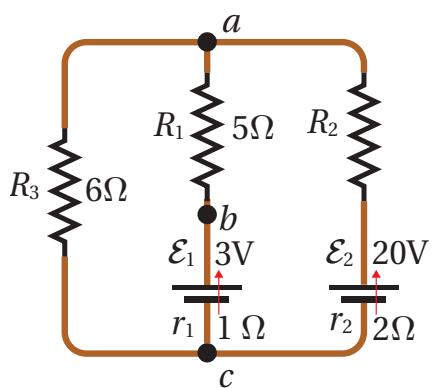
12. **استخدم الأرقام:** أحسب تكلفة تشغيل مدفأة قدرُها (W) 2800 (90) ساعة، إذا كان سعر وحدة الطاقة (JD/kWh) (0.15).

13. **اقارن:** مصباحان يتصلان بمصدري جهد متماثلين؛ قدرة المصباح الأول تساوي ثلاثة أمثال قدرة المصباح الثاني. أجد نسبة تيار الأول إلى تيار الثاني، ونسبة مقاومة الأول إلى مقاومة الثاني.

14. بطارية قوتها الدافعة الكهربائية (V) 9، ومقاومتها الداخلية (Ω) 0.3. ما مقدار المقاومة التي توصل مع البطارية حتى تكون القدرة المستهلكة في البطارية (W)؟



15. **استخدم الأرقام:** في الدارة الكهربائية المبينة في الشكل المجاور، أحسب ما يأتي:
أ. التيار المار في المقاومة (R_3).
ب. مقدار القوة الدافعة الكهربائية للبطارية (ϵ_2).



16. **استخدم الأرقام:** يبيّن الشكل دارة كهربائية مركبة، إذا علمت أن $(V_b - V_c) = 4 \text{ V}$:
أ. التيارات الفرعية في الدارة.
ب. المقاومة المجهولة (R_2).

17. **تفكيك ناقد:** بالاعتماد على بيانات الشكل المجاور، أحسب فرق الجهد $V_b - V_a$ ، عندما ينعدم التيار في (R_3)، ثم أحدد أي النقطتين أعلى جهداً.

مسرد المصطلحات

- إزاحة زاوية **Angular Displacement**: التغيير في الموقع الزاوي، وتساوي الزاوية التي يمسحها نصف قطر المسار الدائري الذي يدور مع الجسم.
- أمبير (A): مقدار التيار الكهربائي الذي يسري في موصى عندما تعبّر مقطعاً هذا الموصى شحنة مدارها (C) في ثانية واحدة.
- تدفق كهربائي **Electric Flux**: خطوط المجال الكهربائي التي تعبّر مساحة محددة، ويحسب بإيجاد ناتج الضرب النقطي لمتجه المجال في متجه المساحة
- تسارع زاوي متوسط **Average Angular Acceleration**: نسبة التغيير في مقدار السرعة الزاوية إلى الزمن اللازم لحدوث هذا التغيير.
- تصادم غير من **Inelastic Collision**: تصادم لا يكون فيه مجموع الطاقة الحركية لأجزاء النظام قبل التصادم مساوياً مجموع طاقتها الحركية بعد التصادم؛ أي أن الطاقة الحركية للنظام غير محفوظة.
- تصادم من **Elastic Collision**: تصادم يكون فيه مجموع الطاقة الحركية لأجزاء النظام قبل التصادم مساوياً مجموع طاقتها الحركية بعد التصادم؛ أي أن الطاقة الحركية للنظام محفوظة.
- دفع **Impulse**: كمية متجهة تساوي ناتج ضرب القوة المُحصلة المؤثرة في الجسم في زمن تأثيرها، ويعكس بوحدة (N.s) حسب النظام الدولي للوحدات، ويكون اتجاهه باتجاه تغير الزخم الخطي، أي باتجاه القوة المُحصلة.
- ذراع القوة **Lever Arm**: البعد العمودي بين خط عملي القوة ومحور الدوران.
- زخم خطي **Linear Momentum**: كمية متجهة تساوي ناتج ضرب كتلة الجسم (m) في سرعته المتجهة (v).
- زخم زاوي **Angular Momentum**: كمية متجهة تساوي ناتج ضرب عزم القصور الذاتي للجسم أو النظام في سرعته الزاوية. ويكون اتجاهه عمودياً على مستوى الدوران.
- سرعة زاوية متوسطة **Average Angular Velocity**: نسبة الإزاحة الزاوية ($\Delta\theta$) إلى الفترة الزمنية (Δt) التي حدثت خلالها هذه الإزاحة.

- سطح تساوي الجهد **Equipotential Surface**: السطح الذي يكون الجهد الكهربائي عند نقاطه جميعها متساوياً.
- عزم **Torque**: مقياس لقدرة القوة على إحداث دوران لجسم، وهو كمية متجهة، رمزه (τ)، ويساوي ناتج الضرب المتجهي لمتجه القوة (F) ومتجه موقع نقطة تأثير القوة (r) الذي يبدأ من نقطة على محور الدوران وينتهي عند نقطة تأثير القوة.
- عزم القصور الذاتي **Moment of Inertia**: مقياس لمامنة الجسم لتغيير حالته الحركية الدورانية.
- فاراد **Farad**: مواسعة مواسع يختزن شحنة كهربائية (C) عند تطبيق فرق جهد (V) بين صفيحتيه.
- قاعدة كيرشوف الأولى **Kirchhoff's First Rule**: "المجموع الجبري للتيارات عند أي نقطة تفرع في دارة كهربائية يساوي صفرًا".
- قاعدة كيرشوف الثانية **Kirchhoff's Second Rule**: المجموع الجيري لتغيرات الجهد عبر مكونات مسار مغلق في دارة كهربائية يساوي صفرًا.
- قانون أوم **Ohm's Law**: الموصل عند درجة الحرارة الثابتة ينشأ فيه تيار كهربائي (I) يتناسب طردياً مع فرق الجهد بين طرفيه (ΔV).
- قانون حفظ الزخم الخطى **Law of Conservation of Linear Momentum**: "عندما يتفاعل جسمان أو أكثر في نظام معزول، يبقى الزخم الخطى الكلى للنظام ثابتاً". يشمل هذا التفاعل تصادم جسمين أو انقسام جسم إلى أجزاء.
- قانون حفظ الزخم الزاوي **Law of Conservation of Angular Momentum**: "الزخم الزاوي لنظام معزول يبقى ثابتاً في المقدار والاتجاه"، إذ يكون العزم المحصل المؤثر في النظام المعزول صفرًا.
- قانون غاوس **Gauss's Law**: التدفق الكهربائي الكلى عبر سطح مغلق، يساوي مجموع الشحنات الكلية داخل السطح مقسوماً على سماحة الفراغ.
- قدرة كهربائية **Electrical Power**: المعدل الزمني للشغل المبذول، وتقاس بوحدة واط (watt).
- قوة دافعة كهربائية **Electromotive Force**: الشغل الذي تبذله البطارية في نقل وحدة الشحنات الموجبة داخل البطارية من قطبها السالب إلى قطبها الموجب.

- كثافة سطحية للشحنة: Surface Charge Density ناتج قسمة الشحنة الكلية للجسم على مساحة سطحه.
- مبرهنة (الزخم الخطّي- الدفع) :Impulse – Momentum Theorem "دفع قوة محصلة مؤثرة في جسم يساوي التغيير في زخمه الخطّي".
- مجال كهربائي منتظم Uniform Electric Field: مجال ثابت في مقداره واتجاهه عند نقاطه جميعها.
- مركز الكتلة Centre of Mass: النقطة التي يمكن افتراض كتلة الجسم كاملاً مركزة فيها.
- مقاومة كهربائية Electric Resistance: نسبة فرق الجهد بين طرفي أي جزء في الدارة الكهربائية إلى التيار المار فيه.
- مقاومة مكافئة Equivalent Resistance: المقاومة الكلية التي تكافئ في مقدارها مجموع مقاومات موصولة معًا على التوالى أو التوازي.
- مقاومية المادة Resistivity: مقاومة عينة من المادة مساحة مقطعها (1 m^2)، وطولها (1 m) عند درجة حرارة معينة.
- مواد لا أوميّة Non-ohmic Materials: مواد تتغير مقاومتها مع تغيير فرق الجهد بين طرفيها، حتى عند ثبات درجة الحرارة.
- مواسع Capacitor: جهاز يستعمل لتخزين الطاقة الكهربائية.
- مواسع ذو صفيحتين متوازيتين Parallel Plate Capacitor: مواسع يتكون من صفيحتين موصلتين متوازيتين متقابلتين ومتتساويتين في المساحة، تفصلهما مادة عازلة.
- مواسعة : Capacitance الشحنة الكهربائية المخزنّة لوحدة فرق الجهد الكهربائي.
- مواسعة مكافئة : Equivalent Capacitance المواسعة الكلية لمجموعة مواسع تتصل معًا في دارة كهربائية.
- موصل أوميّ Ohmic Conductors: موصل يخضع لقانون أوم، وتكون العلاقة البيانية (التيار- الجهد) خطًا مستقيماً عند ثبوت درجة حرارة الموصل.
- واط (W) : قدرة جهاز كهربائي يستهلك طاقة كهربائية بمقدار (J) كلّ ثانية.

