المملكة الأردنية الهاشمية
وزارة التربية والتعليم

المركز الوطني لتطوير المناهج
National Center
for Curriculum Development

الفيزياء

الصف الثاني عشر - كتاب الطالب

الفصل الدراسي الأول

12

المملكة الأردنية الهاشمية
وزارة التربية والتعليم

المركز الوطني لتطوير المناهج
National Center
for Curriculum Development

الفيزياء

الصف الثاني عشر - كتاب الطالب

الفصل الدراسي الأول

12

فريق التأليف

موسى عطا الله الطراونة (رئيسًا)

أ.د. محمود إسماعيل الجاغوب | خلدون سليمان المصاروه

د. إبراهيم ناجي غبار | موسى محمود جرادات

الناشر: المركز الوطني لتطوير المناهج

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

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

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

قـرّرت وزارة التربيـة والتعليـم تدريـس هـذا الكتـاب في مـدارس المملكـة الأردنية الهاشـمية جميعهـا، بناءً عـلى قرار المجلـس الأعلى للمركـز الوطنـي لتطويـر المناهج في جلسـته رقـم (2022/3)، تاريـخ 2022/5/12 م، وقرار مجلـس التربية والتعليم رقـم (2022/20) تاريـخ 2022/5/29 م بـدءًا من العـام الـدراسي 2022 / 2023 م.

- 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 - 482 - 8

المملكة الأردنية الهاشمية
رقم الإيداع لدى دائرة المكتبة الوطنية
(2023/5/2582)

375,001

الأردن. المركز الوطني لتطوير المناهج

الفيزياء:الصف الثاني عشر: كتاب الطالب (الفصل الدراسي الأول)/ المركز الوطني لتطوير المناهج.- عمان: المركز، 2023

(148) ص.

ر. إ. : 2023/5/2582.

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

يتحمَّل المُؤلِّف كامل المسؤولية القانونية عن محتوى مُصنَّفه، ولا يُعبِّر هذا المُصنَّف عن رأي دائرة المكتبة الوطنية.

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

الطبعة الأولى (التجريبية) 1443 هـ / 2022 م
أعيدت طباعته 1444 هـ / 2023 م

قائمة المحتويات

بسم الله الرحمن الرحيم

المقدّمة

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

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

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

ويتألّف الكتاب من أربع وحدات دراسية، هي: الزخَم الخطّي والتصادُمات، والحركة الدورانيّة، والتيّار الكهربائيّ، والمجال المغناطيسيّ. وقد أُلحق به كتاب للأنشطة والتجارب العملية، يحتوي على التجارب والأنشطة جميعها الواردة في كتاب الطالب؛ ليساعده على تنفيذها بسهولة بإشراف المعلّم ومشاركة زملائه فيها، بما في ذلك رصد القراءات وتحليلها، ثم مناقشتها وصولًا إلى استنتاجات مبنية على أسس علمية سليمة. ويتضمّن أيضًا أسئلة تفكير؛ بهدف تعزيز فهم الطالب لموضوعات المادة، وتنمية التفكير الناقد لديه.

ونحن إذ نُقدّم هذه الطبعة من الكتاب، فإنّا نأمل أن يُسهم في تحقيق الأهداف والغايات النهائية المنشودة لبناء شخصية المتعلّم، وتنمية اتجاهات حُبّ التعلّم ومهارات التعلّم المستمرّ، إضافة إلى تحسين الكتاب بإضافة الجديد إلى محتواه، وإثراء أنشطته المتنوّعة، والأخذ بملاحظات المعلّمين.

والله ولي التوفيق

المركز الوطني لتطوير المناهج

الوحدة 1

الزَّخَم الخطّي والتصادُمات
Linear Momentum and Collisions

أتأمّل الصورة

إطلاقُ مكّوكٍ فضائيّ

يظهرُ في الصورة إطلاق مكّوكٍ فضائيّ، حيث تندفع الغازات الناتجة من الاحتراق من الصاروخ إلى أسفل؛ بينما يندفع المكّوك الفضائي والصاروخ إلى أعلى بتسارع.

علامَ يعتمدُ عمل الصاروخ؟ وما الكمّيات الفيزيائيّةُ التي يلزم معرفتُها لوصف حركة الصاروخ والمكّوك الفضائي؟

الفكرة العامّة:

لمفهوم الزخَم الخطّي وحفظِه والتصادُمات وأنواعِها تأثيراتٌ وتطبيقات مختلفة في كثير من الظواهر اليومية، ويعتمد عليها مبدأُ عملِ كثيرٍ من الأجهزة والآلات المهمّة في حياتنا.

الدرس الأول: الزخَم الخطّي والدفع

Linear Momentum and Impulse

الفكرة الرئيسة: ترتبط مفاهيمُ الدفع والقوّة والتغيّر في الزخَم الخطّي بعلاقاتٍ رياضيّةٍ؛ وللقانون الثاني لنيوتن والدفع وحفظ الزخَم الخطّي، أهمّية كبيرة في حياتنا اليومية.

الدرس الثاني: التصادُمات Collisions

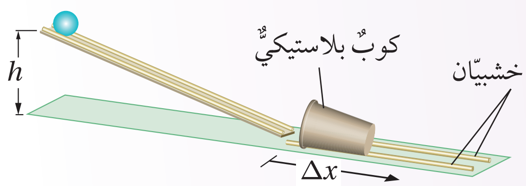
الفكرة الرئيسة: للتصادُمات نوعانِ رئيسانِ؛ تُساعد معرفتُهما في تصميم أجهزةٍ وأدواتٍ عدّةٍ يعتمد مبدأُ عملِها على هذه التصادُمات والحمايةِ منها.

تجربة استهلاليّة

الزخم الخطّي

الموادّ والأدواتُ: كرة زجاجية أو فلزّية، كرةُ تنس، سطح خشبيّ مستوٍ أملس فيه مَجرى، حامل فلزيّ، كوبٌ بلاستيكيٌّ، قضيبانِ خشبيّان طولُ كلٍّ منهُما (30 cm) تقريبًا، مَسطرةٌ مِتريّة، شريطٌ لاصق.

إرشادات السلامة: الحذرُ من سقوطِ الكرات على أرضية المختبر، أو تقاذف الطلبة الكرات بينهم.



خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أُنفِّذ الخطوات الآتية:

1. أضع السطح الخشبيّ على سطح الطاولة، ثم أرفعُ أحد طرفيه بالحامل الفلزّي ليصبح مستوًى مائلًا، ثم أُثبّت قطعة شريطٍ لاصقٍ عليه عند ارتفاع محدّدٍ. بعدها؛ أُثبّتُ القضيبين الخشبيّين بشكل متوازٍ على بُعدٍ محدّد من نهاية المستوى المائل لتشكّلَ مجرًى للكوب البلاستيكي، وأضع الكوب بينهما، بحيث تكون فوّهتُه مقابلةً للمستوى المائل، كما هو موضح في الشكل.
2. **أقيسُ:** أضعُ الكرةَ الزجاجية على المستوى المائل عند الشريط اللاصق، ثم أُفلِتُها، وأقيس المسافة التي تحرَّكها الكوبُ بعد اصطدام الكرة به، وأُدوّنها.
3. أكرّر الخطوةَ السابقة باستخدامِ كرة التنس.
4. **أجرّبُ:** أُكرّر الخطوة 2 باستخدام الكرة الزجاجية، على أن أُغيّر الارتفاع الرأسي (h) الذي أفلتُّ الكرة منه.

التحليل والاستنتاج:

1. **أُقارنُ** بين المسافة التي تحرّكها الكوبُ البلاستيكي في الخطوتين (2، 3). ماذا أستنتج؟ أُفسّر إجابتي.
2. **أُقارنُ** بين المسافة التي تحرّكها الكوب البلاستيكي في الخطوتين (2، 4). ماذا أستنتجُ؟ أُفسّر إجابتي.
3. **أستنتجُ:** استنادًا إلى ملاحظاتي في التجربة، ما العواملُ التي تحدّدُ المسافة التي يتحرّكها الكوب؟ أُفسّر إجابتي.

الدرس 1

الزخَم الخطّي والدفع
Linear Momentum and Impulse

◄ الفكرة الرئيسة:

ترتبط مفاهيمُ الدفع والقوّة والتغير في الزخم الخطّي بعلاقاتٍ رياضيّة، وللقانونِ الثاني لنيوتن والدفع وحفظ الزخَم الخطّي، أهمّية كبيرة في حياتنا اليومية.

◄ نتاجات التعلّم:

- أُعرِّف الزخَم الخطّي (كمّية التحرّك) لجسم.
- أُعبِّر عن القانون الثاني لنيوتن بدلالة معدّلِ التغيُّر في الزخَم الخطّي لجسم.
- أُعرِّف الدفعَ بدلالة القوّة والزمن.
- أحسبُ الدفعَ الذي تؤثّر به قوةٌ ثابتةٌ أو متغيّرة في جسم.
- أستنتج العلاقة بين الدفع الكليِّ المؤثّر في جسمٍ والتغيُّر في زَخَمِه الخطّي.
- أستقصي قانون حفظ الزخَم الخطّي عند تصادُم الأجسام بفعل قوىً داخلية.
- أصف قانون حفظ الزخَم الخطّي لأنظمة مختلفة.
- أُطبّق بحل مسائل على الزخَم الخطّي وحفظه.

◄ المفاهيم والمصطلحات:

الزخَم الخطّي Linear Momentum

الدفع Impulse

مبرهنة (الزخَم الخطّي - الدفع) Impulse – Momentum Theorem

قانون حفظ الزخَم الخطّي Law of Conservation of Linear Momentum

الزخَم الخطّي Linear Momentum

عندما تتحرّك شاحنةٌ وسيارة بمقدار السرعة نفسِه؛ فإن إيقافَ الشاحنة أصعبُ من إيقاف السيارة. وعند تحرُّك سيارتين متماثلتين متساويتين في الكتلة بسرعتين مختلفتين مقدارًا؛ فإن إيقاف السيارة الأقلّ سرعةً أسهلُ من إيقاف السيارة الأكبر سرعة. فما الكمية الفيزيائيةُ التي تعتمد على كلٍّ من كتلة الجسم وسرعته؟

يُعرّف **الزخَم الخطّي (كمّية التحرّك) Linear momentum** لجسم؛ بأنه ناتج ضرب كتلة الجسم (m) في سرعته الخَطيّة المتجهة ($\boldsymbol{v}$)، رمزه $\boldsymbol{p}$، ويُقاس بوحدة kg.m/s حسب النظام الدولي للوحدات. وأُعبّر عنه بالمعادلة الآتية:

$$\boldsymbol{p} = m\boldsymbol{v}$$

والزخَم الخطّي كمّية متجهة، له اتّجاه السرعة نفسه. وأُلاحظُ من هذه المعادلةِ أن الزخَم الخطّي لجسم يزدادُ بزيادة مقدار سرعته أو كتلته أو كليهما. فمثلًا؛ الزخَم الخطّي للشاحنة الموضّحة في الشكل (1) أكبرُ منهُ للسيارة عند حركتهما بمقدار السرعة نفسِهِ. ولاحظتُ في أثناء تنفيذي التجربة الاستهلالية أن تأثيرَ جسم متحرّك في جسم آخر عند تصادُمهما يعتمد على كتلته وسرعته المتجهة؛ أي يعتمد على زخمه الخطّي.

✓ أتحقّق: ما المقصودُ بالزخَم الخطّي؟

الزخَم الخطّي والقانون الثاني لنيوتن في الحركة
Linear Momentum and Newton's Second Law of Motion

يلزمُ التأثير بقوّةٍ في جسم لتغيير مقدار زخَمِهِ الخطّي أو اتّجاهه أو كليهما. ويُستخدم القانون الثاني لنيوتن في الحركة للربط بين الزخَمِ

الشكل (1): شاحنة وسيارة تتحركان بمقدار السرعة نفسه.

الخطّي للجسم والقوّة المُحصّلة المؤثّرة فيه، علمًا بأنّ نيوتن صاغ قانونهُ الثاني بدلالة الزخَم الخطّي كما يأتي:

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

حيثُ $\sum \boldsymbol{F}$ هي القوّة المُحصّلة المؤثّرة في الجسم. وعندَ ثباتِ الكتلة يمكن إعادة كتابة القانون الثاني لنيوتن بدلالة الزّخَم كما يأتي:

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

وعندما يحدث تغير في الزخَم الخطّي $(\Delta \boldsymbol{p})$ لجسم خلال فترة زمنية معينة (Δt)؛ يُمكنُ إعادة كتابة العلاقة السابقة في الصورة الآتية:

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

وينصُّ القانون الثاني لنيوتـن في الحركـة بحسب هذه الصيغـة على أنَّ: «المعدل الزمنيَّ لتغيُّر الزخَم الخطّي لجسم يساوي القوّة المُحصّلة المؤثّرة فيه». ويكون مُتّجه التغيُّر في الزخَم الخطّي باتّجاه القوّة المُحصّلة دائمًا.

وأستنتج من العلاقة السابقة أنّ مقدار القوّة المحصّلة اللازم التأثير بها في جسم لتغيير زخَمه الخطّي يزداد بزيادة مقدار هذا التغيُّر.

العلاقة بين الزخَم الخطّي والدفع
Relationship between Linear Momentum and Impulse

عندما يركل لاعبٌ كرةَ قدم ساكنةً؛ يحدث تلامسٌ بين قدمه والكرة لمدّة زمنية، وتتغير سرعتها المتجهة بسبب القوّة المؤثّرة فيها من قدم اللاعب، وتكتسب الكرة زخمًا خطيًّا باتجاه محدّد، نتيجة دفع قدم اللاعب لها.

يُعرّف **الدفعُ** **Impulse (I)** المؤثّر في جسمٍ بأنّهُ ناتجُ ضربِ القوّة المُحصّلة المؤثّرة في الجسم في زمن تأثيرِها، كما يأتي:

$$\mathbf{I} = \sum \boldsymbol{F} \Delta t$$

يُقاس الدفعُ بوحدة (N.s) حسب النظام الدولي للوحدات. ويُمكن استخدامُ القانون الثاني لنيوتن للتعبير عن الدفع بالعلاقة الآتية:

$$\mathbf{I} = \Delta \boldsymbol{p}$$

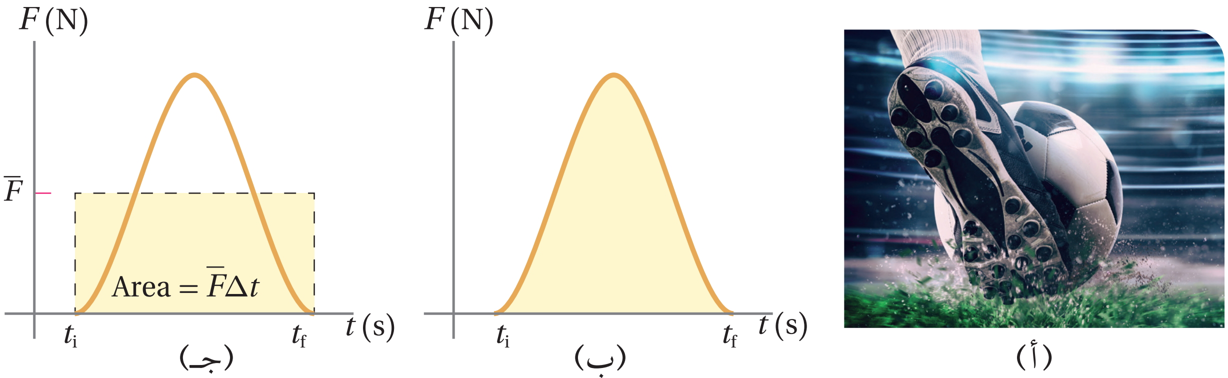
تسمّى هذه المعادلة **مبرهنةَ (الزخَم الخطّي – الدفع)** **Impulse – momentum theorem**، وتنصُّ على أنَّ: «دفعُ قوّة محصّلةٍ مُؤثّرةٍ في جسمٍ يساوي التغيُّر في زخَمه الخطّي». والدفعُ كمّية متّجهة، يكون باتّجاه تغيُّر الزخَم الخطّي، وهو اتّجاه القوّة المُحصّلة نفسُه. وبما أن الزخَم الخطّي والدفع والقوّة كميّاتٌ مُتّجهةٌ فإنّ الإشاراتِ الموجبةَ والسالبة ضروريةٌ لتحديد اتّجاهاتها، لذا؛ يلزمُ اختيارُ نظام إحداثيّاتٍ يُحدّد فيه الاتّجاه المُوجِب.

أفكّر: هل يُمكن أن يكون مقدار الزخم الخطّي لسيارة مساويًا مقدار الزخم الخطّي لشاحنة كبيرة كتلتها أربعة أضعاف كتلة السيارة؟ أناقش أفراد مجموعتي، للتوصل إلى إجابة عن السؤال.

أتحقّق: أُعرّف القوّة المحصّلة المؤثّرة في جسم باستخدام القانون الثاني لنيوتن.

الربط مع التكنولوجيا

تنتفخ الوسادة الهوائية في أثناء حدوث تصادم لسيارة، إذ تُحفّز القوّة الناتجة عن التصادم مجسًّا محدّدًا، يُطلق تفاعلًا كيميائيًّا ينتج عنه غاز يؤدي إلى انتفاخ الوسادة بسرعة. وتعمل الوسادة الهوائية على زيادة زمن تأثير القوّة الذي يتم خلاله إيقاف جسم الراكب عن الحركة، وبالتالي تقليل مقدار القوّة المؤثّرة فيه، ما يُقلّل من احتمال حدوث الإصابات، أو تقليل خطورتها. كما تعمل الوسادة الهوائية على توزيع القوّة على مساحة أكبر من جسم الراكب، فيقل ضغطها المؤثّر فيه.



الشكل (2): (أ) لاعب يركُل كرة، (ب) منحنى (القوّة – الزمن) يبيّنُ تغيُّر القوّة المؤثّرة في كرةٍ بدلالة الزمن، (ج) القوّة المُتغيرة والقوّة المتوسطة يحدثان التغيُّر نفسه في الزخَم الخطّي خلال الفترة الزمنية نفسها.

يبيّنُ الشكل (2/ أ) قدمَ لاعبٍ يركُل كرةَ قدم؛ فيتغيّرُ زخَمُها الخطّي بسبب قوّته المؤثّرة فيها. بينما يُوضّح الشكل (2/ ب) كيفيّة تغيُّر مقدارِ تلك القوّة مع الزمن أثناء مُلامَسةِ قدم اللاعب للكرة لفترةٍ زمنيّةٍ (Δt). يُحسَبُ مقدارُ الدفعِ المؤثّر في الكرةِ عن طريق إيجاد المساحة Area تحت منحنى (القوّة – الزمن) المُوضّح في الشكل (2/ ب)، أو باستخدام مقدارِ القوّة المُتوسّطةِ مضروبًا في زمن تأثيرها، كما في الشكل (2/ جـ)، عن طريق إيجاد المساحة المحصورة تحت منحنى (القوّة المتوسّطة – الزمن) خلال الفترة الزمنيّة نفسها. والقوّة المتوسّطةُ ($\overline{F}$) كما في الشكل (2/ جـ) هي القوّة المُحصّلة الثابتة التي إذا أثرت في الجسم لفترةٍ زمنيّةٍ (Δt) لأحدثت الدفع نفسَهُ الذي تحدثُهُ القوّةُ المُتغيّرة أثناء الفترةِ الزمنيّة نفسِها. وأستخدم مُبرهنة (الزخَم الخطّي – الدفع) في توضيح نقطتين مهمتين:

1. عند ثبات القوّة المُحصّلة المؤثّرة، يزدادُ التغيُّر في الزخَم الخطّي بزيادة زمن تأثير هذه القوّة. فمثلًا؛ عند دفع عربةِ تسوّقٍ بقوةٍ محصلة ثابتةٍ، يزدادُ التغيُّر في زخَمها الخطّي بزيادة زمن تأثير القوّة فيها. أنظر الشكل (3/ أ). وعند ركل لاعب كُرة قدمٍ يزدادُ التغيُّر في زخَمها الخطّي بزيادة زمن تلامُسِها مع قدمه.
2. عند ثبات مقدار التغيُّر في الزخَم الخطّي، يتناسبُ مقدار القوّة المُحصّلة المؤثّرة عكسيًّا مع زمن تأثيرها. فمثلًا؛ يثني المظليُّ رجليه لحظة ملامسة قدميه سطح الأرض، وهذا يجعلُ تغيّر زخَمه الخطّي يستغرقُ فترةً زمنيّةً أطول، فيقلُّ مقدارُ القوّة المُحصّلة المؤثّرة فيه. أنظر الشكل (3/ ب). كما أنني أثني رجليَّ تلقائيًّا عند مُلامَسة قدمي سطح الأرض بعد القفز.

أُصـمّم باستخـدام برنـامج السكراتـش (Scratch) عرضًـا يُوضّـح المُنحنـى البيـانيّ لتغيُّـر القـوة المؤثـرّة فـي كـرة بدلالـة الزمـن، ثـمّ أُشاركه مع معلمـي وزملائـي في الصـفّ.

أتحقّـق: مـا العلاقـةُ بيـن دفع قـوّة محصّلةٍ مُؤثّرةٍ في جسم والتغيُّـر في زخَمـه الخطّي؟

الشكل (3):
(أ) يزدادُ مقدار التغيُّر في الزخَم الخطّي للعربة بزيادة زمن تأثير القوّة فيها.
(ب) يَثني المظليُّ رجليه لحظة ملامسة قدميه سطحَ الأرض لزيادة زمن التغيُّر في زخَمه الخطّي.

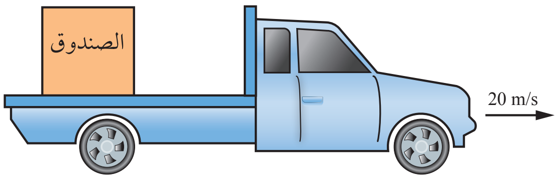
المثال 1

وُضعَ صندوقٌ كتلتُهُ (100 kg) في شاحنةٍ تتحرّك شرقًا بسرعة مقدارها (20 m/s)، كما هو مُوضّحٌ في الشكل (4). إذا ضغط السائقُ على دَوّاسةِ المكابح، فتوقّفت الشاحنةُ خلال (5.0 s) من لحظةِ الضغطِ على المكابح دون أن ينزلق الصندوق؛ فأحسبُ مقدارَ ما يأتي:

أ . الزخَم الخطّي الابتدائيّ للصُندوق.

ب. الدفع المؤثر في الصُّندوق.

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



الشكل (4): شاحنة تحمل صندوقًا تتحرّك شرقًا بسرعة ثابتة.

المُعطيات: $m = 100\ \text{kg},\ \boldsymbol{v}_\text{i} = 20\ \text{m/s},\ +x,\ v_\text{f} = 0,\ \Delta t = 5.0\ \text{s}.$

المطلوب: $\boldsymbol{p}_\text{i} = ?,\ \mathbf{I} = ?,\ \bar{f}_\text{s} = ?$

الحلّ:

$\longrightarrow +x$

أختارُ نظام إحداثياتٍ يكونُ فيه الاتّجاه الموجب باتّجاه حركةِ الشاحنة، وهو باتّجاه محور $+x$.

أ . تتحرّك الشاحنةُ باتّجاه محور $+x$؛ لذا تكون السرعةُ المُتّجهةُ الابتدائيّة للصُّندوق موجبةً، وأحسبُ زخَمه الخطّي الابتدائيَّ كما يأتي:

$$p_\text{i} = mv_\text{i} = 100 \times 20$$
$$= 2 \times 10^3\ \text{kg.m/s}$$
$$\boldsymbol{p}_\text{i} = 2 \times 10^3\ \text{kg.m/s}\ ,\ +x$$

الزخَم الخطّي الابتدائيّ موجبٌ؛ فيكون باتّجاه محور $+x$.

ب. أستخدم مُبرَهنة (الزخَم الخطّي – الدفع) لحسابِ الدفع. ألاحظُ أنّ الزخَم الخطّي النهائيَّ للصُّندوق يساوي صفرًا؛ لأنّ مقدارَ سرعته المُتّجهة النهائيّة يساوي صفرًا.

$$\text{I} = \Delta p = p_\text{f} - \text{p}_\text{i}$$
$$= mv_\text{f} - 2 \times 10^3 = 100 \times 0 - 2 \times 10^3$$
$$= -2 \times 10^3\ \text{kg.m/s}$$
$$\mathbf{I} = 2 \times 10^3\ \text{kg.m/s}, -x$$

الدفع سالبٌ، حيث يؤثّر في اتّجاه الغرب $(-x)$؛ لأنه يؤثر في الصُّندوق بعكس اتّجاه سرعته الابتدائية.

جـ. أستخدم القانون الثاني لنيوتن لحساب قوّة الاحتكاك المتوسطة المؤثّرة في الصندوق أثناء مدّة توقُّف الشاحنة.

$$\sum F = \bar{f}_\text{s} = \frac{\Delta p}{\Delta t}$$
$$\bar{f}_\text{s} = \frac{-2 \times 10^3}{5.0} = -4 \times 10^2\ \text{N}$$
$$\bar{\boldsymbol{f}}_\text{s} = 4 \times 10^2\ \text{N}\ ,\ -x$$

تؤثّر قوّة الاحتكاك في الاتّجاه المُعاكسِ لاتّجاه سُرعة الصُّندوق؛ لذا يكونُ اتّجاهها في اتّجاه $-x$ (غربًا).

المثال 2

يركُلُ لاعبٌ كرةَ قدمٍ ساكنةً كتلتُها (0.450 kg)؛ فتنطلِقُ بسرعة (30.0 m/s) في اتّجاه محور $+x$. أنظرُ الشكل (5). إذا علمتُ أنّ مقدار القوّة المتوسّطةَ المؤثّرة في الكرةِ خلالَ زمن تلامُسِها مع قدم اللاعب يُساوي (135 N)؛ فأحسبُ مقدارَ ما يأتي بإهمالِ وزنِ الكرة مُقارنةً بالقوّة المؤثّرة فيها.

أ . الزخَم الخطّي للكرة عند لحظةِ ابتعادِها عن قدم اللاعب.

ب. زمنُ تلامُسِ الكرة مع قدم اللاعب.

جـ. الدفعُ المؤثّر في الكرة نتيجة تلامُسها مع قدم اللاعب.

الشكل (5): لاعب يركل كرة قدم.

المعطيات: $m = 0.450\ \text{kg},\ v_i = 0\ \text{m/s},\ \boldsymbol{v}_f = 30.0\ \text{m/s},\ +x,\ \sum \boldsymbol{F} = 135\ \text{N},\ +x.$

المطلوب: $p_f = ?,\ \Delta t = ?,\ \text{I} = ?$

الحلّ:

أختارُ نظام إحداثيّاتٍ يكونُ فيه الاتّجاه الموجب باتّجاه محور $+x$.

أ . أحسبُ الزخَم الخطّي للكرة لحظة ابتعادِها عن قدم اللاعب، وهو يساوي زخَمها الخطّي النهائيَّ.

$$p_f = mv_f = 0.450 \times 30.0$$
$$= 13.5\ \text{kg.m/s}$$
$$\boldsymbol{p}_f = 13.5\ \text{kg.m/s},\ +x$$

الزخَمُ الخطّي النهائيّ موجبٌ؛ إذ تتحرّك الكرةُ في اتّجاه محور $+x$.

ب. أستخدمُ القانون الثاني لنيوتن لحساب زمنِ تلامُسِ الكرةِ مع قدمِ اللاعب كما يأتي:

$$\sum F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$$
$$\Delta t = \frac{\Delta p}{\sum F} = \frac{p_f - p_i}{135} = \frac{13.5 - 0}{135}$$
$$= 0.10\ \text{s}$$

جـ. أستخدمُ مُبرهنةَ (الزخَم الخطّي – الدفع) لحساب الدفع.

$$\text{I} = \Delta p = p_f - p_i$$
$$= 13.5 - 0 = 13.5\ \text{kg.m/s}$$
$$\mathbf{I} = 13.5\ \text{kg.m/s},\ +x$$

الدفعُ موجبٌ؛ إذ يؤثّر في اتّجاه محور $+x$؛ لأنه يؤثر في الكرة باتّجاه القوّة المُحصّلة المؤثّرة فيها من قدم اللاعب.

كما يُمكن حسابُ الدفع باستخدامِ تعريفِ الدفع كما يأتي:

$$\text{I} = \sum F\,\Delta t$$
$$= 135 \times 0.10 = 13.5\ \text{N.s}$$
$$\mathbf{I} = 13.5\ \text{N.s},\ +x$$

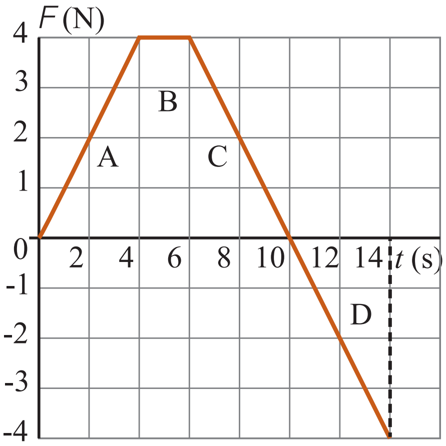
المثال 3

تؤثّر قوّةٌ محصّلةٌ باتّجاه محور x في صندوقٍ ساكنٍ كتلتهُ (4 kg) مدّةً زمنيةً مقدارُها (14 s). إذا علمتُ أنّ مقدار القوّة المُحصّلة يتغيّرُ بالنسبة للزمن كما هو مُوضّح في منحنى (القوّة – الزمن) في الشكل (6)؛ فأحسبُ مقدارَ ما يأتي:

أ . الدفع الكليّ المؤثّر في الصُّندوق نتيجةً لتأثير القوّة المُحصّلة، وأُحدّد اتّجاههُ.

ب. السرعة النهائيّةُ للصُّندوق في نهاية الفترة الزمنيّة لتأثير القوّة المُحصّلة، وأُحدّد اتّجاهها.

جـ. القوّة المتوسطة المؤثّرة في الصُّندوق خلال هذه الفترة الزمنيّة.



الشكل (6): منحنى (القوّة – الزمن).

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

المطلوب: $\mathbf{I} = ?,\ \boldsymbol{v}_f = ?,\ \overline{F} = ?$

$+x$

الحلّ:

أختارُ نظامَ إحداثيّاتٍ يكونُ فيه الاتّجاه الموجبُ باتّجاه محور $+x$.

أ. الدفعُ المؤثّر في الصُّندوق خلالَ فترة تأثير القوّة يُساوي المساحة المحصورة بين منحنى (القوّة – الزمن) ومحور الزمن، ويساوي مجموع المساحات A و B و C و D. وأحسبُ مقدارَهُ كما يأتي:

$$\mathrm{I} = \mathrm{A} + \mathrm{B} + \mathrm{C} + \mathrm{D}$$

$$= \frac{1}{2} \times (4-0) \times 4 + 4 \times (6-4) + \frac{1}{2} \times (10-6) \times 4 + \frac{1}{2} \times (14-10) \times (-4)$$

$$= 16\ \text{kg.m/s}$$

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

اتّجاه الدفع باتّجاه محور $+x$.

ب. أستخدم مبرهنة (الزخَم الخطّي – الدفع) لحساب مقدار السرعة النهائيّة للصُّندوق في نهاية الفترة الزمنية.

$$\mathrm{I} = \Delta p = p_f - p_i$$

$$16 = m v_f - 0$$

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

السرعةُ النهائيّةُ موجبةٌ، فيكونُ اتّجاهها باتّجاه محور $+x$.

جـ. أستخدمُ القانون الثاني لنيوتن لحساب القوّة المتوسّطة المؤثّرة في الصُّندوق، كما يأتي:

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

يكون اتّجاه القوّة المتوسطة باتّجاه المحور $+x$.

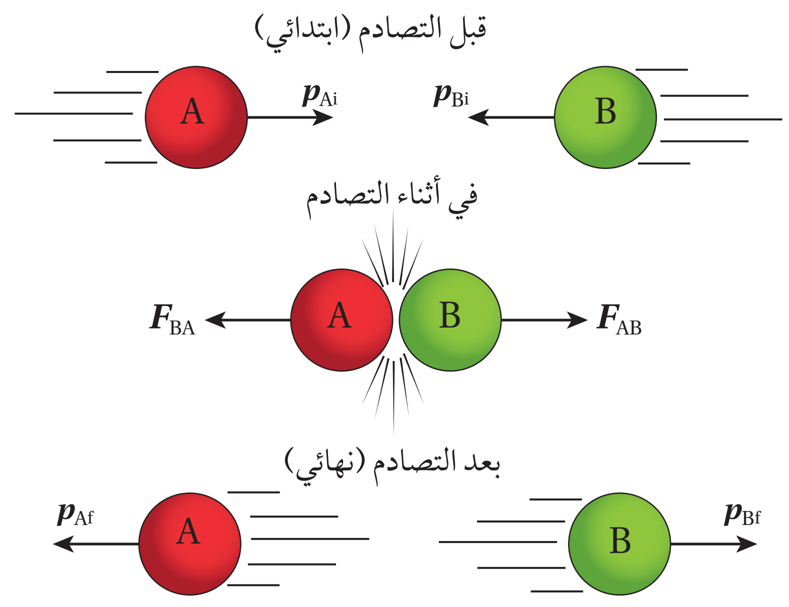
تمرين

أحسبُ: كرةُ تنسٍ كتلتُها (0.060 kg)؛ يقذِفُها لاعبٌ إلى أعلى، وعند وصولها إلى قمّة مسارِها الرأسيّ يضربُها أُفقيًّا بالمَضرب فتنطلقُ بسرعةٍ مقدارُها (55 m/s) في اتّجاهِ محور $+x$. أنظر الشكل (7). إذا علمتُ أنّ زمنَ تلامُس الكرة مع المَضرِب $(4.0 \times 10^{-3}\ \text{s})$؛ أحسبُ مقدار ما يأتي:

أ . الدفع الذي يؤثّر به المضربُ في الكرة.

ب. القوّة المتوسّطةُ التي أثّر بها المَضرِب في الكرة.

الشكل (7): لاعب يقذف كرة تنس.



الشكل (8): تصادم كرتين.

حفظُ الزّخَمِ الخطّي Conservation of Linear Momentum

يكونُ الزخَم الخطّي محفوظًا تحت شروطٍ معيّنة. وكي أتوصّلَ إلى قانون حفظ الزخَم الخطّي؛ أنظرُ الشكل (8)، الذي يُوضّح تصادُم كرتي بلياردو في بُعدٍ واحدٍ. أتذكّرُ أنّ النظامَ المعزولَ Isolated system هو النظامُ الذي تكونُ القوّةُ المُحصّلةُ الخارجيّةُ المؤثّرة فيه صفرًا، وتكونُ القوى المؤثّرةُ قوىً داخليّةً فقط. ويُمكنُ عدُّ النظامِ المُكوّن من كرتي البلياردو في الشكل (8) معزولًا؛ إذ أنّ القوى الخارجيةَ المؤثّرةَ فيه، مثلُ قوّة الاحتكاكِ مثلًا، تكونُ صغيرةً مُقارنةً بالقوّة التي تؤثّر بها كلٌّ من الكرتين في الأُخرى في أثناء التصادُم (قوى داخليّة في النظام)؛ لذا نهمل هذه القوى الخارجية.

أفكّر: متى يُمكنني إهمال القوى الخارجية المؤثرة في نظام كي أعدّه نظامًا معزولًا؟ أناقش أفراد مجموعتي، للتوصل إلى إجابة عن السؤال.

حفظ الزخَم الخطّي والقانون الثالث لنيوتن في الحركة

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

يوضّحُ الشكل (8) كرتي بلياردو قبل التصادُم مباشرةً، وفي أثناء التصادُم، وبعدَه مباشرةً. تؤثّر كلُّ كرةٍ بقوّةٍ في الكرة الأُخرى في أثناء تصادُمهما معًا، وأفترضُ أنّ مقدارَ كلٍّ من القوّتين ثابتٌ في أثناء الفترة الزمنية لتلامُس الكُرتين. تكونُ هاتان القُوّتانِ مُتساويتين في المقدار ومُتعاكستين في الاتّجاه؛ بحسب القانون الثالث لنيوتن في الحركة، إذ أنّهما تُمثّلان زوجي تأثيرٍ مُتبادلٍ (فعلٌ وردُّ فعلٍ)، وأُعبّرُ عنهما كما يأتي:

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

الفترةُ الزمنيّةُ التي أثّرت بها الكرة A في الكرة B بالقوّة $\boldsymbol{F}_{AB}$ في أثناء تلامُس الكُرَتين هي نفسُها الفترةُ الزمنيّة التي أثرت بها الكرة B في الكرة A بالقوّة $\boldsymbol{F}_{BA}$؛ لذا فإنّه بضرب طرفَي المُعادلة السابقة بالفترة الزمنية لتلامُس الكُرتين، أتوصل إلى العلاقة الآتية:

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

أي أنّ دفعَ الكرة A في الكرة B$(\mathbf{I}_{AB} = \Delta \boldsymbol{p}_B)$ يساوي في المقدار دفع الكرة B في الكرة A$(\mathbf{I}_{BA} = \Delta \boldsymbol{p}_A)$، ويعاكِسُهُ في الاتّجاه. وبما أن التغيُّر في الزخَم الخطّي يساوي الدفعَ بحسبِ مُبرهَنة (الزخَم الخطّي – الدفع)، فإنّهُ يمكنُ كتابة العلاقة السابقة كما يأتي:

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

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

أي أن:

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

وبإعادة ترتيب حدودِ المُعادلةِ السابقةِ نحصلُ على معادلةِ قانونِ حفظ الزخَم الخطّي:

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

حيث $\boldsymbol{v}_{Ai}$ و $\boldsymbol{v}_{Af}$ تمثّلانِ السرعتينِ المُتجهتَين للجسم الأوّل قبل التصادُم وبعدَهُ مباشرةً على الترتيب، و $\boldsymbol{v}_{Bi}$ و $\boldsymbol{v}_{Bf}$ تمثّلان السرعتين المُتّجهتينِ للجِسم الثاني قبلَ التصادُم وبعدَهُ مباشرةً على الترتيب. تشيرُ هذه المُعادلة إلى **قانون حفظ الزخَم الخطّي Law of conservation of linear momentum**، إذ ينصُّ على أنّهُ: «عندما يتفاعلُ جسمانِ أو أكثر في نظامٍ معزولٍ، يبقى الزخَم الخطّي الكليُّ للنظام ثابتًا». كما يُمكن التعبير عنه بأنّ: الزخَم الخطّي الكليَّ لنظامٍ معزولٍ قبل التصادُم مباشرةً يساوي الزخَم الخطّي الكليَّ للنظام بعد التصادُم مباشرةً. وسأعدُّ جميع الأنظمة التي أتعامل معها في هذه الوَحدة معزولةً.

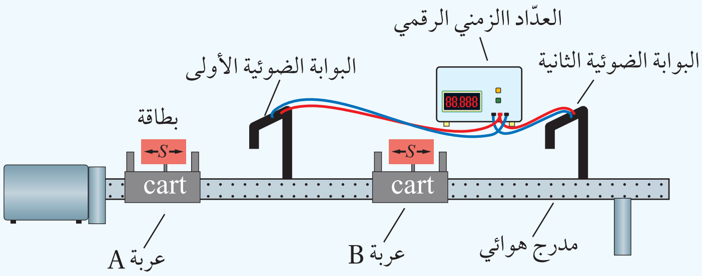
تعرّفت إثباتَ حفظِ الزخَم الخطّي رياضيًّا، ولاستقصاءِ حفظ الزخَم الخطّي عمليًّا؛ أُنفّذ التجربةَ الآتية:

أفكّر: ما العلاقة بين اتّجاه الدفع المؤثّر في جسم واتّجاه التغيّر في زخمه الخطي؟ أناقش أفراد مجموعتي، للتوصل إلى إجابة عن السؤال.

التجربة ١

حفظُ الزّخَمِ الخطّي

الموادّ والأدوات: مدرجٌ هوائيٌّ مع مُلحقَاته (العرباتُ والبطاقاتُ الخاصة بها، والبوابات الضوئية ومضخة الهواء)، ميزانٌ إلكترونيّ، أثقالٌ مختلفةٌ، شريطٌ لاصقٌ.



إرشادات السلامة:

ارتداءُ المعطَفِ واستعمالُ النظّاراتِ الواقية للعينين، والحذرُ من سقوطِ الأجسامِ والأدواتِ على القدمين.

خطواتُ العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أُنفّذ الخطوات الآتية:

1 . أُثبّتُ المدرج الهوائيّ أفقيًّا على سطح الطاولة، ثم أُثبّت البوابتين الضوئيتين كما هو موضح في الشكل.

2 . **أقيسُ** طول كُلٍّ من البطاقتين الخاصتين بالعربتين المُنزَلقتين (S)، ثم أُثبّتُ كُلًّا منهما على عربة، وأُدوّن طوليهما في الجدول (1)، ثمّ أُثبّتُ لاصقًا على كلّ عربة، وأكتب الرمز A على إحداهما، والرمز B على الأخرى.

3 . **أقيسُ** كتلةَ كُلٍّ من العربتين، ثمّ أُدونهما في المكان المُخصّص في الجدول (2).

4 . أضعُ العربة A عند بداية المدرج، ثمّ أضعُ العربة B في منتصف المدرج بين البوابتين الضوئيتين، كما هو مُوضّح في الشكل.

5 . **أُجرّب:** أُشغّل مضخّة الهواء، ثمّ أدفع العربة A في اتّجاه العربة B الساكنة، ثمّ أُدوّن في الجدول (1) الزمن (t_{Ai}) الذي تستغرقه العربة A في عبور البوابة الأولى قبل التصادُم، والزمن الذي تستغرقه كلٌّ من العربتين A و B (t_{Bf}،t_{Af}) في عبور البوابتين الأولى والثانية على الترتيب بعد التصادُم.

6 . أُكرّرُ الخطوة السابقة بوضع أثقالٍ على العربة A؛ بحيث تصبح كتلتُها ضعفي كتلة العربة B، وأُدوّن القياسات الجديدة للكتلة والزمن في الجدولين (1 و 2) للمحاولة 2 .

التحليل والاستنتاج:

1 . **أحسبُ** مقاديرَ السُّرعات الابتدائيّة والنهائيّة للعربتين لكلِّ محاولةٍ باستخدام العلاقة: $v = \dfrac{S}{\Delta t}$، وأُدوّن السرعات المُتّجهةَ للعربتين في الجدولين (1 و 2)، مع الانتباه إلى اتّجاه حركة كلّ من العربتين، مع افتراض أنّ اتّجاه الحركة إلى اليمين هو الاتّجاه الموجب.

2 . **أحسبُ** الزخَم الخطّي الابتدائيّ والزخَم الخطّي النهائيّ لكلّ عربةٍ في الجدول (2)، وأُدوّنها فيه.

3 . **أحسبُ** الزخَم الخطّي الكليَّ الابتدائيّ والزخَم الخطّي الكلي النهائي لنظام العربتين لكلّ محاولةٍ في الجدول (2)، وأُدوّنُها.

4 . **أُقارنُ:** ما العلاقة بين الزخَم الخطّي الكُلّي الابتدائي والزخَم الخطّي الكُلّي النهائي لنظامي العربتين في التصادُمات للمحاولتين 1 و 2؟ أُفسّر نتائجي.

5 . **أُصدر حُكمًا:** هل تطابقت نتائج تجربتي مع قانون حفظ الزخَم الخطّي في المحاولتين؟ ماذا أستنتج؟ أوضّح إجابتي.

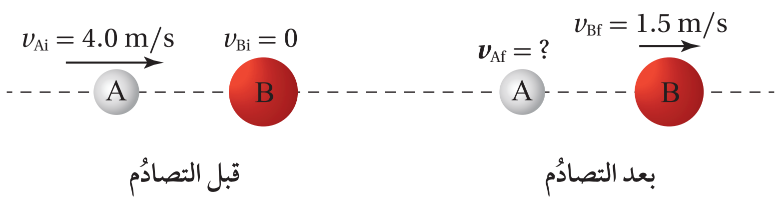
6 . **أتوقّعُ** مصادر الخطأ المُحتمَلة في التجربة.

ألاحظُ بعد تنفيذ التجربة أن الزخَم الخطّي الكُلّي لنظام العربتين قبل التصادُم يساوي الزخَم الخطّي الكُلّي لنظام العربتين بعد التصادُم. وهو ما يُثبتُ قانون حفظ الزخَم الخطّي في الأنظمة المعزولة، حيثُ الزخَم الخطّي لأيّ نظامٍ معزولٍ لا يتغيّر.

يُمكن أن يحتوي النظام على أعدادٍ مختلفة من الأجسام المُتفاعِلة (المُتصادِمة) معًا، وقد يحدثُ التصادُم بينها في بُعدٍ واحدٍ أو بُعدين أو ثلاثة أبعادٍ، وبعد تصادُم هذه الأجسام؛ فإنّها قد ترتدُّ عن بعضها بعضًا، أو تلتصقُ ببعضِها بعضًا، أو تنفصل عن بعضها بعضًا (الانفجارات مثلًا).

المثال 4

يُوضّح الشكل (9) تصادُمَ كُرَتين A و B، حيث تتحرّكُ الكرة A باتّجاه محور $+x$ بسرعةٍ مقدارُها (4.0 m/s) نحوَ الكرة B الساكنة. بعد التصادُم تحرّكت الكُرة B بسرعةٍ مقدارُها (1.5 m/s) باتّجاه محور $+x$. إذا علمتُ أنَّ ($m_A = 1.0$ kg) و ($m_B = 2.0$ kg)؛ فأحسبُ مقدار سرعة الكُرة A بعد التصادُم وأُحدّد اتّجاهها.



الشكل (9): تصادم كرتين.

المعطيات: $\boldsymbol{v}_{Ai} = 4.0$ m/s, $+x$, $v_{Bi} = 0$, $\boldsymbol{v}_{Bf} = 1.5$ m/s, $+x$, $m_A = 1.0$ kg, $m_B = 2.0$ kg.

المطلوب: $\boldsymbol{v}_{Af} = ?$

الحلّ:

أختارُ نظام إحداثياتٍ يكونُ فيه الاتّجاه الموجِبُ باتّجاه محور $+x$. ثم أُطبّقُ قانون حفظ الزخَم الخطّي على نظام الكُرَتين.

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

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

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

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

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

$$\boldsymbol{v}_{Af} = 1.0 \text{ m/s}, +x$$

بما أنّ السرعةَ المُتّجهةَ النهائيّة للكُرة A موجبةٌ؛ فهذا يعني أن اتّجاه سرعتها باتّجاه محور $+x$، أي بنفس اتّجاه سرعتها قبل التصادُم.

الشكل (10): أكثر من إطفائي يُمسك بخرطوم إطفاء الحريق.

عرفتُ أن الزخَم الخطّي يكون محفوظًا أيضًا عندما ينفصلُ جسمٌ إلى أجزاءٍ تبتعدُ عن بعضها بعضًا. فإذا كان الجسم ساكنًا؛ فإنَّ الأجسامَ الناتجة عن الانفصال تبدأُ حركتها من حالة السكون، وتكون اتّجاهاتِ حركتها بحيث يبقى الزخَمُ الخطّي الكُلّي بعد انفصالها مساويًا له قبل انفصالها في المقدار؛ أي صفرًا في هذه الحالة. وهذا يُفسّر سبب ارتداد البندقية للخلف عند إطلاق رصاصةٍ منها، كما يُفسّر لماذا يحتاج خرطوم إطفاء الحريق عادةً إلى أكثر من إطفائيٍّ للإمساك به عند اندفاع الماء منه، كما هو مُوضّح في الشكل (10).

✓ **أتحقّق:** أوضّح علام ينص قانون حفظ الزخَم الخطّي.

المثال 5

مدفعٌ ساكنٌ كتلتُه $(2.0 \times 10^3\ kg)$، فيه قذيفةٌ كتلتُها $(50.0\ kg)$. أُطلقت القذيفة أُفقيًا من المدفع بسرعة $(1.2 \times 10^2\ m/s)$ باتّجاه محور $+x$. أحسبُ مقدار ما يأتي:

أ . الدفعُ الذي تؤثّر به القذيفة في المدفع، وأُحدّد اتّجاهه.

ب. سرعة ارتداد المدفع.

المعطيات: أفترض رمز المدفع A ورمز القذيفة B.

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

المطلوب: $\mathbf{I}_{BA} = ?,\ \ v_{Af} = ?$

الحلّ:

أختارُ نظامَ إحداثياتٍ يكونُ فيه الاتّجاهُ الموجبُ باتّجاهِ محور $+x$.

أ. الدفعُ الذي تؤثّر به القذيفةُ في المدفع $(\mathbf{I}_{BA})$ يُساوي في المقدار الدفع الذي يؤثر به المدفع في القذيفة $(\mathbf{I}_{AB})$، ويُعاكسُه في الاتّجاه. أستخدم مبرهنة (الزخَم الخطّي – الدفع) لحساب الدفع الذي تؤثّر به القذيفةُ في المدفع.

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

$$I_{BA} = -(p_{Bf} - p_{Bi})$$

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

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

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

الدفع سالبٌ، حيث يؤثّر في المدفع باتّجاه محور $-x$.

ب. أُطبّق قانون حفظ الزخَم الخطّي على القذيفة والمدفعَ قبل إطلاقِ القذيفة وبعد إطلاقها مباشرةً، مع ملاحظة أن مجموع الزخَم الخطّي للقذيفةِ والمدفع يساوي صفرًا قبل إطلاق القذيفة.

$$\sum \boldsymbol{p}_{\mathrm{i}} = \sum \boldsymbol{p}_{\mathrm{f}}$$

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

$$m_{\mathrm{A}}v_{\mathrm{Ai}} + m_{\mathrm{B}}v_{\mathrm{Bi}} = m_{\mathrm{A}}v_{\mathrm{Af}} + m_{\mathrm{B}}v_{\mathrm{Bf}}$$

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

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

$$\boldsymbol{v}_{\mathrm{Af}} = 3.0\ \mathrm{m/s},\ -x$$

بما أن السرعة المُتّجهةَ النهائيّة للمدفع (A) سالبةٌ، فهذا يعني أن اتّجاه سرعته باتّجاه محور $-x$.

مراجعة الدرس

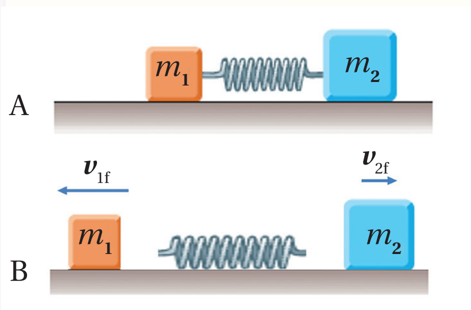
1. الفكرة الرئيسة: ما المقصودُ بالزخَم الخطّي لجسم؟ ما العلاقة بين الدفع المؤثّر في جسم والتغيُّر في زخَمه الخطّي؟

2. أُحلّلُ: بحسب علاقة تعريف الزخَم الخطّي $\boldsymbol{p} = m\boldsymbol{v}$ ؛ تكون وحدةُ قياسِهِ kg.m/s، وبحسب مبرهنة (الزخَم الخطّي – الدفع) تكون وحدةُ قياسِهِ (N.s). أُثبت أن هاتين الوحدتين مُتكافئتان.

3. أوضّحُ: متى يكون الزخَم الخطّي لنظام محفوظًا؟

4. أفسّرُ: ذهب محمّد إلى مدينة الألعاب، وعند قيادته سيارةً كهربائيّةً واصطدامها بالسيارات الأُخرى وجد أن تأثير هذه التصادُمات عليه قليلٌ. وعند تركيزِ انتباهه على هذه السيارات؛ لاحظ وجود حزامٍ من مادّة مطاطيّة يحيط بجسم السيارة. أُفسّر سببَ وجود هذا الحزام المطاطيّ.

5. أُحلّلُ وأستنتج: وضعت إسلام نابض خفيف مضغوط بين صندوقين كتلتيهما m_1 و m_2 موضوعين على سطح أفقي أملس، كما هو مبيّن في الشكل A. لحظة إفلات إسلام النابض، تحرّك الصندوقان باتجاهين متعاكسين كما في الشكل B. إذا علمت أنّ $m_2 = 2m_1$ ، فأجد نسبة مقدار سرعة الصندوق الأول النهائية إلى مقدار سرعة الصندوق الثاني النهائية لحظة ابتعاد كلّ منهما عن النابض.



6. أُحلّلُ وأستنتج: في أثناء مشاهدة هند عرضًا عسكريًّا لمجموعة من جنود القوّات المسلحة الأردنية – الجيش العربي لفت انتباهها إسناد الجنود كعوبَ بنادِقهم على أكتافهم بإحكام عند إطلاق الرصاص منها. لماذا يفعلون ذلك؟

7. أفسّرُ: تُغيّر المركبة الفضائية مقدار سرعتها واتّجاه حركتها باندفاع غازات منها. أُوضّح كيف يعمل اندفاع الغازات على تغيير مقدار السرعة واتّجاهها.

التصادُمات
Collisions

الفكرة الرئيسة:

للتّصادُمات نوعان رئيسان، وتساعد معرفتُهما في تصميم الأجهزة والأدوات المتعدّدة التي يعتمد مبدأ عملِها على هذه التصادُمات أو الحماية منها.

نتاجات التعلّم:

- أُصنّف التصادُمات إلى تصادُماتٍ مَرِنةٍ وتصادُماتٍ غيرِ مرنة وفقًا للتغيُّرات التي تطرأ على الطاقة الحركية للأجسام المُتصادمة.
- أُفسّر النقصَ في الطاقة الحركيّة في أثناء التصادُم في ضوء انتقال الطاقة وتحوُّلاتها ومبدأ حفظ الطاقة.
- أُصمّم تركيبًا يُقلّل من الأضرار الناتجة عن تصادُم جسمين.
- أُطبّق بحلّ مسائلَ على التصادُمات.

المفاهيم والمصطلحات:

تصادُم مرنٌ Elastic Collision

تصادُم غير مرنٍ Inelastic Collision

الزخَم الخطّي والطاقة الحركية في التصادُمات
Linear Momentum and Kinetic Energy in Collisions

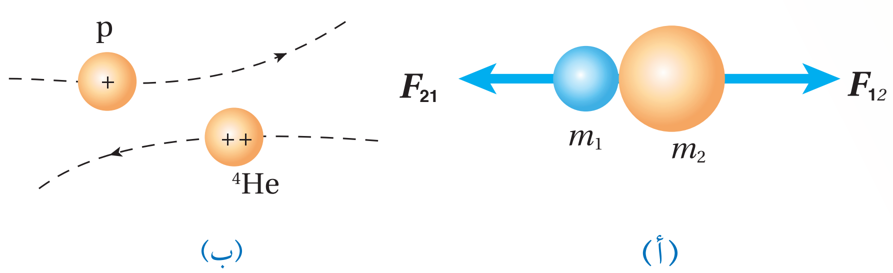
أستخدم مصطلح تصادُم لتمثيل حدثٍ يقترب فيه جسمان أحدهما من الآخر، ويؤثّر كلٌّ منهما في الآخر بقوةٍ. وقد يتضمّنُ التصادُم تلامسًا بين جسمين، كما هو مُوضّحٌ في الشكل (11/ أ)، أو عدم حدوثِ تلامُسٍ بينهما كما في تصادُم جسيمات مشحونة على المستوى دون الجاهريّ، مثل تصادُم بروتونٍ بجسيم ألفا (نواة ذرة الهيليوم)، كما هو موضّحٌ في الشكل (11/ ب). نظرًا إلى أنّ كلا الجُسَيمين مشحونان بشحنةٍ موجبة، فإنّهما يتنافران عندما يقتربان من بعضهما بعضًا، دون الحاجة إلى تلامسهما.

التصادُمات والطاقة الحركية Collisions and Kinetic Energy

تعرّفتُ في الدرس السابق أنّ الزخَم الخطّي محفوظٌ دائمًا عند تصادُم الأجسام أو انفصال بعضها عن بعض في الأنظمة المعزولة. أسألُ: هل تكون الطاقة الحركيّة الخطّية محفوظةً أيضًا في هذه التصادُمات؟

درستُ سابقًا الطاقةَ الحركيّة الخطّية Linear kinetic energy (KE) لجسمٍ، وهي الطاقة المُرتبطة بحركته عند انتقاله من مكانٍ إلى آخر (حركة انتقالية)، وتعتمد على كلٍّ من: كتلة الجسم (m) ومقدار سرعته (v)، ويُعبّر عنها بالمعادلة الآتية: $KE = \frac{1}{2} mv^2$.

قد تكونُ الطاقة الحركية للأجسام المتصادمة محفوظةً، وقد تكون غير محفوظة؛ اعتمادًا على نوع التصادُم. فإذا لم تكن الطاقة الحركية محفوظةً فهذا يعني أن جزءًا منها تحوّل إلى شكلٍ أو أشكالٍ أخرى من الطاقة، مثل الطاقة الحرارية والطاقة الصوتية. وتُصنّف التصادُمات بحسب حفظ الطاقة الحركية إلى نوعين رئيسين، هما: التصادُم المَرن، والتصادُم غيرُ المَرن.



الشكل (11):

(أ) تصادُم جسمين على المستوى الجاهريّ (يُمكن رؤيتها بالعين المجرّدة).

(ب) تصادم جسيمين مشحونين على المستوى دون الجاهريّ. (الشكل ليس ضمن مقياس رسم).

الشكل (12): تصادم كرات البلياردو.

التصادُم المَرن

في **التصادُم المَرن Elastic collision** يكونُ مجموع الطاقة الحركية لأجزاء النظام قبل التصادُم مساويًا مجموعَ طاقتها الحركية بعد التصادُم؛ أي أنّ الطاقة الحركية للنظام محفوظةٌ. ومن الأمثلة عليها التصادمات بين جسيمات الغاز المثالي، والتصادُمات بين كرات البلياردو، كما في الشكل (12)، حيث نهملُ فقد جزءٍ صغير من الطاقة على شكل طاقةٍ صوتيةٍ مثلًا.

عند تصادُم جسمين A و B تصادُمًا مرنًا، فإنني أُطبّق معادلتَيْ حفظِ الزخَم الخطّي وحفظ الطاقة الحركيّة عليهما كما يأتي:

$$\sum \boldsymbol{p}_{\mathrm{i}} = \sum \boldsymbol{p}_{\mathrm{f}}$$

$$m_{\mathrm{A}}\boldsymbol{v}_{\mathrm{Ai}} + m_{\mathrm{B}}\boldsymbol{v}_{\mathrm{Bi}} = m_{\mathrm{A}}\boldsymbol{v}_{\mathrm{Af}} + m_{\mathrm{B}}\boldsymbol{v}_{\mathrm{Bf}}$$

$$\sum KE_{\mathrm{i}} = \sum KE_{\mathrm{f}}$$

$$\frac{1}{2}m_{\mathrm{A}}v_{\mathrm{Ai}}^{2} + \frac{1}{2}m_{\mathrm{B}}v_{\mathrm{Bi}}^{2} = \frac{1}{2}m_{\mathrm{A}}v_{\mathrm{Af}}^{2} + \frac{1}{2}m_{\mathrm{B}}v_{\mathrm{Bf}}^{2}$$

التصادُم غيرُ المَرن

في **التصادُم غيرِ المرن Inelastic collision** لا يكونُ مجموع الطاقة الحركيّة لأجزاء النظام قبل التصادُم مساويًا مجموعَ طاقتها الحركية بعد التصادُم؛ أي أنّ الطاقة الحركيّة للنظام غيرَ محفوظة. ومن أمثلتها اصطدامُ كرةٍ مطاطيّةٍ بسطحٍ صُلبٍ (مَضربٌ مثلًا)، حيث تفقد جزءًا من طاقتها الحركية عندما تتشوّه الكرة في أثناء ملامستها للسطح. أنظر الشكل (13). لكن الزخَم الخطّي يكون محفوظًا في كل أنواع التصادُمات التي تكون فيها القوى الخارجية المؤثّرة في النظام (إن وجدت) صغيرةً جدًّا مقارنةً بقوى الفعل ورد الفعل المتبادلة بين الأجسام المتصادُمة.

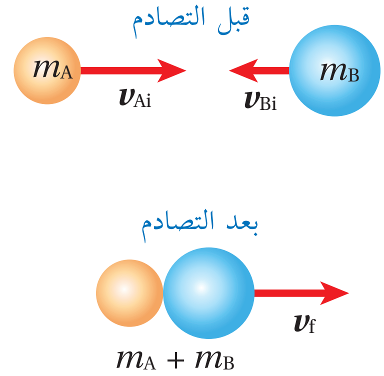
الشكل (13): يُعد تصادم كرة مطاطية بالمضرب تصادمًا غير مرن.

ويوصَفُ التصادُم غيرُ المَرن بأنه **تصادُمٌ عديم المرونة Perfectly inelastic collision** عندما تلتحم الأجسام المتصادمة معًا بعد التصادُم، لتصبح جسمًا واحدًا تساوي كتلتهُ مجموع كتل الأجسام المتصادمة. ومثالُ ذلك ما يحدث عند

اصطدام كُرَتي صلصالٍ معًا، أو اصطدام سيارتين وتحرُّكهما معًا بعد التصادُم. وأحسبُ مقدار السرعة النهائية لتصادُمٍ عديم المرونة بين جسمين، كما هو موضّحٌ في الشكل (14)، بتطبيق قانون حفظ الزخَم الخطّي على النظام المُكوّن منهما كما يأتي:

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

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



الشكل (14): تصادم عديم المرونة بين جسمين.

تطبيق: البندول القذفيّ

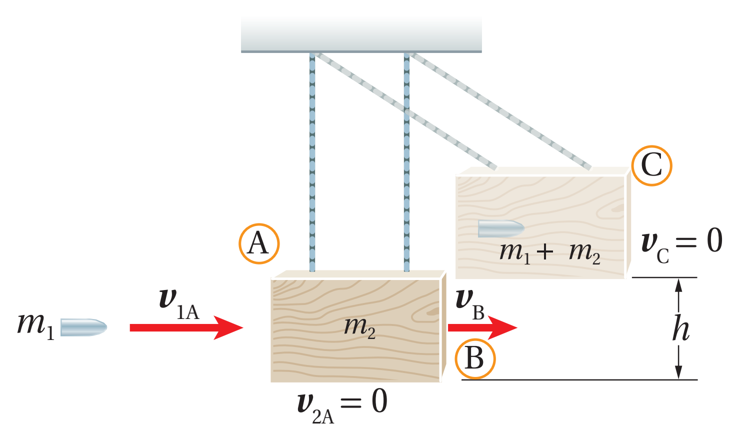
البندول القَذفِيّ Ballistic pendulum يُستخدم لقياس مقدارِ سُرعة مقذوفٍ، مثل الرصاصة. إذ تُطلق رصاصةٌ كتلتُها (m_1) باتّجاه كتلةٍ ساكنةٍ كبيرةٍ من الخشب كتلتُها (m_2)، مُعلّقةٍ رأسيًّا بخيطين خفيفين. فتخترق الرصاصة قطعة الخشب وتستقرُّ داخلَها، ويتحرّك النظام المُكوّن منهما كجسم واحد، ويرتفع مسافةً رأسيّةً (h). أنظرُ الشكل (15). ويمكن حسابُ مقدار سرعة الرصاصة قبل اصطدامها بقطعة الخشب إذا عرفتُ مقدار (h).

سوف أستخدم الرمز (A) ليُمثّل النظام قبل التصادُم مباشرةً، والرمز (B) ليُمثّل النظام بعد التصادُم مباشرةً، أما الرمز (C) فيمثّل النظام عند أقصى ارتفاع (h). وألاحظ من الشكل (15) أنّ اتّجاه حركة النظام المُكوّن من قطعة الخشب والرصاصة بعد التصادُم مباشرةً يكون باتّجاه حركة الرصاصة نفسه قبل التصادُم في مستوى الصفحة، ونحو اليمين. أطبّق قانون حفظ الزخَم الخطّي على النظام قبل التصادُم مباشرةً وبعد التصادُم مباشرةً كما يأتي:

$$\sum p_i = \sum p_f$$

$$m_1 v_{1A} + 0 = (m_1 + m_2) v_B$$

$$v_B = \frac{m_1 v_{1A}}{m_1 + m_2}$$



الشكل (15): تحرّك البندول القذفي جانبيًّا بعد اختراق الرصاصة له.

لا توجد قوىً غير محافظة تبذل شغلًا على النظام في أثناء حركته بعد التصادُم مباشرةً وصولًا إلى أقصى ارتفاع (h) عند الموقع (C)؛ لذا تكون الطاقة الميكانيكيّة محفوظةً، وأفترضُ أنّ طاقة الوضع الناشئة عن الجاذبية الأرضية لقطعة الخشب لحظة بدء حركتها عند الموقع (B) تساوي صفرًا ($PE_B = 0$)، بافتراض موقعها عند (B) مستوى إسناد. كما أنّ طاقتها الحركية عند أقصى ارتفاعٍ تُساوي صفرًا؛ أي أن ($KE_C = 0$).

$$ME_B = ME_C$$

$$KE_B + PE_B = KE_C + PE_C$$

$$\frac{1}{2}(m_1 + m_2)v_B^2 + 0 = 0 + (m_1 + m_2)gh$$

بتعويض (v_B) من معادلة حفظ الزخم؛ أجد علاقةً لحساب (v_{1A}).

$$\frac{1}{2}\left(\frac{m_1 v_{1A}}{m_1 + m_2}\right)^2 = gh$$

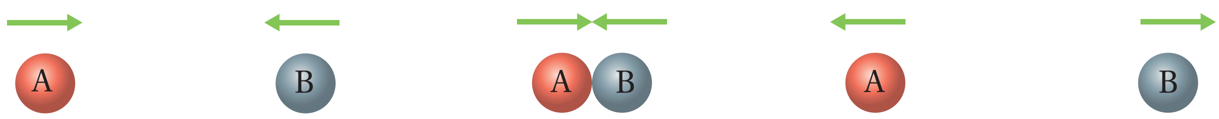
$$v_{1A} = \left(\frac{m_1 + m_2}{m_1}\right)\sqrt{2gh}$$

أتحقّق: أُقارنُ بين التصادُم المَرِن، والتصادُم غير المَرِن، والتصادُم عديم المرونة من حيث: حفظ الزخَم الخطّي، حفظ الطاقة الحركية، التحامُ الأجسام بعد التصادُم.

وقد اقتصرت دراستُنا على التصادم في بعد واحد One–Dimensional Collision حيث يتحرّكُ جسمان قبل التصادُم على امتداد الخط المستقيم نفسِه، ويتصادمان رأسًا برأس Head on collision، بحيث تبقى حركتاهما بعد التصادُم على المسار المستقيم نفسه، أنظر الشكل (16).

أفكّر: عنـد تصـادم جسمين فـي بُعد واحد تصادمًا عديم المرونة، ما الشرط الضروري لتُفقد الطاقة الحركيـة الابتدائيـة للنظام بعـد الاصطدام؟ أناقش أفراد مجموعتي، للتوصل إلى إجابة عن السؤال.

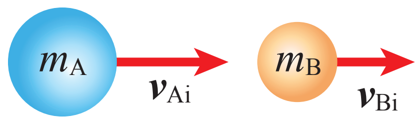
أتحقّق: متى يكون التصادُم في بُعدٍ واحد؟



الشكل (16): تصادم في بُعد واحد.

المثال 6

تتحرّك الكرة (A) باتّجاه محور $+x$ بسرعة (6.0 m/s)؛ فتصطدم رأسًا برأس بكرةٍ أُخرى (B) أمامَها تتحرّك باتّجاه محور $+x$ بسرعة (3.0 m/s). أنظرُ الشكل (17). بعد التصادُم تحرّكت الكرة (B) بسرعةٍ مقدارُها (5.0 m/s) بالاتّجاه نفسه قبل التصادُم. إذا علمتُ أن $(m_A = 5.0\ \text{kg},\ m_B = 3.0\ \text{kg})$، فأُجيبُ عمّا يأتي:



الشكل (17): تصادم كرتين في بُعد واحد.

أ . أحسبُ مقدار سرعة الكرة (A) بعد التصادُم، وأُحدّدُ اتّجاهها.

ب. أُحدّدُ نوع التصادُم.

المعطيات:

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

المطلوب:

$v_{Af} = ?$

الحلّ:

أختار نظام إحداثيّاتٍ يكون فيه الاتّجاه الموجب باتّجاه محور $+x$.

أ. أُطبق قانونَ حفظ الزخَم الخطّي على نظام الكرتين.

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

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

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

$$v_{Af} = 4.8\ \text{m/s}$$

بما أن سُرعةَ الكرة (A) بعد التصادُم موجبةٌ؛ فهذا يعني أنّ اتّجاه سرعتها باتّجاه محور $+x$.

ب. لتحديد نوع التصادُم يلزم حساب التغيُّر في الطاقة الحركية للنظام.

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

$$\Delta KE = \frac{1}{2} \times \left[5.0 \times (4.8)^2 + 3.0 \times (5.0)^2\right] - \frac{1}{2} \times \left[5.0 \times (6.0)^2 + 3.0 \times (3.0)^2\right]$$

$$\Delta KE = -8.4\ \text{J}$$

بما أنّ التغيُّر في الطاقة الحركية للنظام سالبٌ، فهذا يعني حدوثَ نقصٍ في الطاقة الحركيّة، والكرتان لم تلتحما بعد التصادُم؛ إذن: التصادُم غيرُ مرن.

المثال 7

كرتا بلياردو كتلة كلٍّ منهما (0.16 kg). تتحرّك الكرةُ (A) باتّجاه محور $+x$ بسرعة (2 m/s) نحو الكرة (B) الساكنة وتتصادمان رأسًا برأس تصادمًا مرنًا، أنظر الشكل (18). أحسبُ مقدار سرعة الكرة (B) بعد التصادُم، وأُحدد اتّجاهها.

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

المطلوب: $v_{Bf} = ?$

الشكل (18): تصادم مرن لكرتين في بُعد واحد.

الحلّ: أختارُ نظام إحداثيّاتٍ يكون فيه الاتّجاه الموجب باتّجاه محور $+x$.

أُطبّقُ قانون حفظ الزخَم الخطّي على نظام الكرتين.

$$\sum p_i = \sum p_f$$

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

لأنّ $m_A = m_B$ ؛ فإنها تُختَصر من المعادلة وتصبح كما يأتي:

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

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

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

أجد v_{Af} بدلالة v_{Bf} كما يأتي:

$$v_{Af} = 2 - v_{Bf} \quad \text{.............} \quad 1$$

بما أنه يوجد كمّيتان مجهولتان؛ أحتاج إلى معادلةٍ ثانيةٍ أحصل عليها بتطبيق حفظ الطاقة الحركيّة على نظام الكرتين قبل التصادُم وبعدَه؛ لأنّ التصادُم مرن.

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

ولأنّ $m_A = m_B$ فإنّها تُختَصر من المعادلة، وأُعوّض $v_{Bi} = 0$، وتصبح كما يأتي:

$$4 + 0 = v_{Af}^2 + v_{Bf}^2$$

$$v_{Af}^2 + v_{Bf}^2 = 4 \quad \text{.............} \quad 2$$

بتعويض المعادلة 1 في المعادلة 2 لإيجاد مقدار v_{Bf}؛ أحصلُ على ما يأتي:

$$(2 - v_{Bf})^2 + v_{Bf}^2 = 4$$

$$4 + v_{Bf}^2 - 4v_{Bf} + v_{Bf}^2 = 4$$

$$2v_{Bf}^2 - 4\, v_{Bf} = 0$$

$$v_{Bf}\,(v_{Bf} - 2) = 0$$

وبحلّ هذه المعادلة أتوصّل إلى حلّيْن لها، الأول: $v_{Bf} = 2\ \text{m/s}$، والثاني: $v_{Bf} = 0$. الحلُّ الأول يُوضّح أنّ سرعة الكرة (B) بعد التصادُم موجبةٌ، وهذا يعني أن اتّجاه سرعتها باتّجاه محور $+x$، أي باتّجاه سرعة الكرة (A) نفسِه قبل التصادُم.

بتعويض الحل الثاني $v_{Bf} = 0$ في المعادلة 1 أجد أن $v_{Af} = 2\ m/s$، أي أنّ الكرة A اخترقت الكرة B واستمرت في الحركة باتّجاه محور $+x$، وهذا غير ممكن، إذًا: $v_{Bf} = 2\ m/s$.

أي أنّ الكرةَ (A) سكنت بعد التصادُم، بينما اكتسبت الكرةُ (B) السرعةَ الابتدائية للكرة (A). وهذا يحدُث إذا كان التصادُم مرنًا، وكان للكرتين الكتلة نفسها.

المثال 8

أطلق سعدٌ سهمًا كتلته (0.03 kg) أُفقيًّا باتّجاه بندول قذفيٍّ كتلته (0.72 kg)؛ فاصطدم به والتحما معًا، بحيث كان أقصى ارتفاع وصل إليه البندول فوقَ المستوى الابتدائي له (20 cm). بافتراض تسارع السقوط الحر ($10\ m/s^2$)، أُجيب عمّا يأتي:

أ . أيُّ مراحل حركة النظام المُكوّن من البندول والسهم يكون فيها الزخَمُ الخطّي محفوظًا؟

ب. أي مراحل حركة النظام تكون فيها الطاقة الميكانيكيّة محفوظةً؟

جـ. أحسبُ مقدار السرعة الابتدائية للسهم.

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

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

المطلوب:

$v_{Bi} = ?$

الحلّ:

أ .يكون الزخَم الخطّي محفوظًا في التصادُم عديم المرونة بين السهم والبندول.

ب.تكون الطاقة الميكانيكيّة محفوظةً للسهم قبل التصادُم، كما تكونُ الطاقة الميكانيكيّة محفوظةً للبندول والسهم بدءًا من حركتهما معًا بعد التصادُم مباشرةً، وحتى وصولهما إلى أقصى ارتفاع، وذلك عند إهمال قوى الاحتكاك.

جـ.أحسبُ مقدار السرعة الابتدائية للسهم باستخدام النتيجة السابقة التي توصلت إليها في البندول القذفيِّ، كما يأتي:

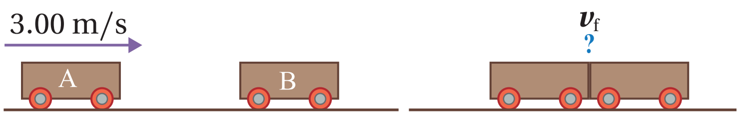
$$v_{Bi} = \left(\frac{m_A + m_B}{m_B}\right)\sqrt{2gh}$$

$$= \left(\frac{0.72 + 0.03}{0.03}\right)\sqrt{2 \times 10 \times 0.20}$$

$$= 50\ m/s$$

المثال 9

عربة قطارٍ (A) كتلتُها (1.80×10^3 kg) تتحرّك في مسارٍ أُفقيٍّ مستقيم لسكة حديدٍ بسرعةٍ مقدارُها (3.00 m/s) باتّجاه محور $+x$، فتصطدم بعربة أُخرى (B) كتلتُها (2.20×10^3 kg) تقف على المسار نفسه، وتلتحمان معًا وتتحرّكان على المسار المستقيم لسكة الحديد نفسه، كما هو موضّحٌ في الشكل (19). أُجيب عمّا يأتي:



الشكل (19): تصادم عربتي قطار.

أ . أحسبُ مقدار سرعة عربتي القطار بعد التصادُم، وأُحدّد اتّجاهها.

ب. ما نوع التصادُم؟ وهل الطاقة الحركية محفوظة في هذا النوع من التصادُمات؟ أُبرّر إجابتي.

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

المطلوب: $\boldsymbol{v}_f = ?$

الحل: أختار نظام إحداثيات يكون فيه الاتّجاه الموجب باتّجاه محور $+x$.

أ . أُطبّق قانون حفظ الزخَم الخطّي على العربتين قبل التصادُم مباشرةً وبعد التصادُم مباشرةً.

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

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

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

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

$$\boldsymbol{v}_f = 1.35 \text{ m/s}, +x$$

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

$$KE_i = \frac{1}{2} m_A v_{Ai}^2 + \frac{1}{2} m_B v_{Bi}^2 = \frac{1}{2} \times 1.80 \times 10^3 \times (3.00)^2 + \frac{1}{2} \times 2.20 \times 10^3 \times 0$$

$$= 8.10 \times 10^3 \text{ J}$$

$$KE_f = \frac{1}{2} (m_A + m_B) v_f^2 = \frac{1}{2} (1.80 \times 10^3 + 2.20 \times 10^3) \times (1.35)^2$$

$$= 3.65 \times 10^3 \text{ J}$$

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

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

التغيُّر في الطاقة الحركيّة سالبٌ، أي أن الطاقة الحركية غيرُ محفوظة، والعربتان التحمتا معًا بعد التصادُم؛ لذا فإن التصادُمَ عديم المرونة.

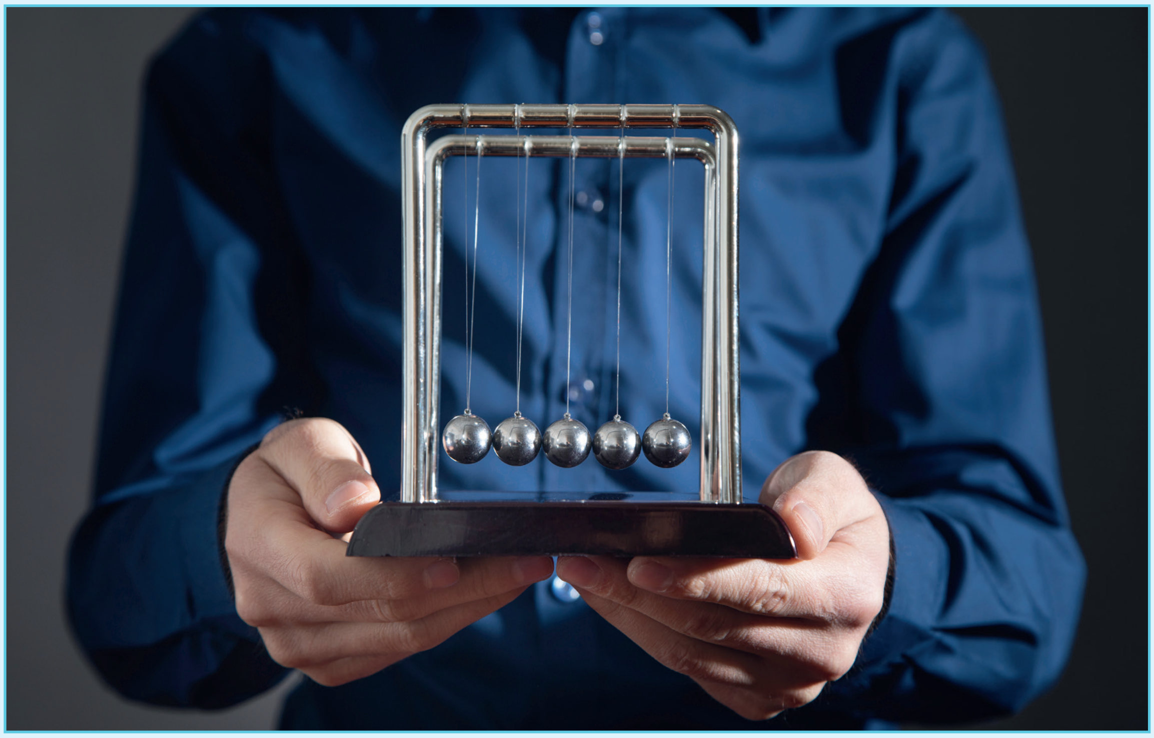
تمرين

1. **أحسبُ:** أطلق مُحقّقٌ رصاصةً كتلتُها (0.030 kg) أُفقيًّا باتّجاه بندول قذفي كتلته (0.97 kg)، فاصطدمت به والتحما معًا، فكان أقصى ارتفاع وصل إليه البندول فوق المستوى الابتدائي له (45 cm). أحسبُ مقدار السرعة الابتدائية للرصاصة.

2. **تفكير ناقد:** تظهر في الشكل أدناه لعبة شهيرة تسمى كرات نيوتن (Newton's cardle)؛ تتكون من كرات عدّة فلزّية متماثلة متراصّة معلّقة بخيوط خفيفة. عند سحب إحدى الكرات الفلزية الخارجية نحو الخارج ثم إفلاتها؛ فإنّها تصطدم تصادمًا مرنًا بالكرة التي كانت مجاورة لها، وبدلًا من حركة هذه الكرة؛ أُلاحظ أنّ الكرة الخارجية على الجانب الآخر من اللعبة تقفز في الهواء.

   أ . **أُفسّر** ما الذي حدث.

   ب. **أتوقع:** ماذا سيحدث إذا سحبتُ كرتين من الجانب الأيسر جانبيًّا ثم أفلتّهما معًا؟



مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** ما نوعا التصادُم بحسب حفظ الطاقة الحركية؟ وما الفرق بينهما؟

2. **أُفسّر:** عندما تتصادم سيارتان فإنهما عادةً لا تلتحمان معًا؛ فهل يعني ذلك أنّ تصادُمَهما مرنٌ؟ أوضح إجابتي.

3. **أُحلّل وأستنتج:** تصادَم جسمان تصادُمًا مرنًا. أُجيب عمّا يأتي:

أ . هل مقدارُ الزخَم الخطّي لكلّ جسمٍ قبل التصادُم يساوي مقدارَ زخَمه الخطّي بعد التصادُم؟ أُفسّر إجابتي.

ب. هل مقدارُ الطاقة الحركية لكلّ جسمٍ قبل التصادُم يساوي مقدار طاقته الحركية بعد التصادُم؟ أُفسّر إجابتي.

4. **أستخدم المتغيّرات:** كرةُ صلصالٍ كتلتها (2 kg) تتحرّك شرقًا بسرعةٍ ثابتةٍ، وتصطدم بكرة صلصالٍ أُخرى ساكنة، فتلتحمان معًا وتتحرّكان شرقًا بسرعة مقدارُها رُبعَ مقدار السرعة الابتدائية للكرة الأولى. أحسبُ مقدار كتلة الكرة الثانية.

5. **أُحلّل وأستنتج:** كرتا بلياردو (A و B) لهما الكتلة نفسها وتتحركان في الاتّجاه نفسه في خط مستقيم، كما هو موضّحٌ في الشكل. بالاستعانة بالبيانات المثبّتة في الشكل، أُبيّن إذا كان التصادم مرنًا أم غير مرن.

6. **أُصدر حُكمًا:** تتحرّك شاحنة غربًا بسرعةٍ ثابتة؛ فتصطدم تصادمًا عديم المرونة مع سيارةٍ صغيرةٍ تتحرّك شرقًا بمقدار سرعة الشاحنة نفسه. أُجيب عمّا يأتي:

أ . أيّهما يكون مقدار التغيُّر في زخمها الخطّي أكبر: الشاحنة أم السيارة؟

ب. أيّهما يكون مقدار التغيُّر في طاقتها الحركية أكبر: الشاحنة أم السيارة؟

تصميم السيارة والسلامة
Car Design and Safety

عند توقف سيارةٍ بشكل مفاجئ نتيجةً لحدوث تصادم، فإن قوىً كبيرةً تؤثّر في السيارة وركّابها، وتُبدّد طاقاتهم الحركية.


تصادم رأس برأس في اختبار تصادم.

يوجد في مقدّمة السيارة ونهايتها مناطق انهيار (ماصّات صدمات Crumple zones؛ تنبعج وتتشوّه بطريقةٍ يجري فيها امتصاص الطاقة الحركيّة للسيارة وركّابها تدريجيًّا، كما هو موضّحٌ في الصورة. حيث يتشوّه هيكل السيارة المرن المصنوع من صفائح ليّنة، ما يؤدي إلى تناقص سرعتها تدريجيًّا وامتصاص جزءٍ كبيرٍ من الطاقة الحركية للسيارة والركّاب، وهذا بدوره يزيد زمن التصادُم، ويقلّل مقدارَ القوّة المُحصّلة المؤثّرة في السيارة والركّاب، ما يقلّل احتمالية تعرّضهم لإصاباتٍ خطيرة.

أمّا أحزمةُ الأمان Seat belts؛ فتؤثّر في الركّاب بقوةٍ مقدارُها (10000 N) تقريبًا، بعكس اتّجاه حركة السيارة، خلال مسافة مقدارها (0.5 m)، وهي تقريبًا المسافة بين راكب المقعد الأمامي والزجاج الأمامي. ففي أثناء الاصطدام، يُثبّت حزام الأمان الراكب في المقعد ويزيد زمن تغيُّر سرعته، وبما أن مقدار التغيُّر في الزخَم الخطّي للراكب ثابت (إذ يتوقف الراكب في النهاية سواءً استخدم حزام الأمان أم لم يستخدمه)؛ فإنّ مقدار القوّة المُؤثّرة فيه يصبح أقلَّ نتيجةَ زيادة زمن التوقف. وفي حال عدم استخدام حزام الأمان سيرتطم الراكب بعجلة القيادة أو زجاج السيارة الأمامي، ويتوقف خلال مدّة زمنيةٍ قصيرةٍ مقارنةً بزمن التوقف عندما يستخدم حزام الأمان، ما يعني تأثير قوةٍ كبيرةٍ فيه لإيقافه.

تنتفخ الوسائد الهوائية Air bags الموجودة في بعض السيارات عند حدوث تصادم؛ وتحمي السائق والركّاب من الإصابات الخطرة، فهي مثلًا؛ تحمي السائق من الاصطدام بعجلة القيادة، وتزيد زمن تغيُّر سرعته، فيقلُّ مقدارُ القوّة المؤثّرة فيه، وتوزّع القوّة المؤثّرة فيه على مساحة أكبر من جسمه.

أما مساند الرأس Head restraints؛ فتضمن حركة رأس الراكب والسائق إلى الأمام مع الجسم، عند صدم السيارة من الخلف. وهذا يمنع كسر الجزء العلوي من العمود الفقري أو تلفَهُ. وتقلُّ احتمالية التعرض لإصابات خطرة عند وقوع حادثٍ بمقدارٍ كبيرٍ إذا استُعملت أحزمة الأمان وثُبّتت مساندُ الرأس.

تُساعد وسائل الأمان الثانوية هذه جميعُها على الحماية من الإصابات الخطرة عند وقوع الحوادث. أما عوامل السلامة الأساسية فهي التي تُسهم في منع وقوع الحوادث وتعتمد على: ثبات السيارة على الطريق، وكفاءة المكابح، وفاعلية أنظمة القيادة والتوجيه، ومقدرة السائق على التعامل مع المتغيّرات التي تحدث في أثناء القيادة، إضافةً إلى انتباه السائق؛ نظرًا لأن معظم الحوادث ناتجةٌ عن أخطاءٍ يرتكبها السائقون.

مراجعة الوحدة

1. أضعُ دائرةً حول رمز الإجابة الصحيحة لكلّ جملة ممّا يأتي:

1. وحدة قياس الزخَم الخطّي حسب النظام الدولي للوحدات، هي:
أ . N.m/s. ب. $kg.m^2/s$. جـ. N/s. د. kg.m/s.

2. كلّما زاد زمن تأثير قوّة ($\boldsymbol{F}$) في جسم كتلته (m):
أ . زاد الدفع المؤثّر فيه، وزاد التغيُّر في زخَمه الخطّي.
ب. زاد الدفع المؤثّر فيه، ونقصَ التغيُّر في زخَمه الخطّي.
جـ. نقصَ الدفع المؤثّر فيه، وزاد التغيُّر في زخَمه الخطّي.
د . نقصَ كلّ من: الدفع المؤثّر فيه، والتغيُّر في زخَمه الخطّي.

3. يعتمد الزخَمُ الخطّي لجسم على:
أ . كتلته فقط. ب. سرعته المُتّجهة فقط.
جـ. كتلته وسرعته المُتّجهة. د . وزنه وتسارع السقوط الحر.

4. يتحرّك جسم كتلته (10 kg) أُفقيًّا بسرعة ثابتة (5 m/s) شرقًا. إنّ مقدار الزخَم الخطّي لهذا الجسم واتّجاهه هو:
أ. 0.5 kg.m/s شرقًا. ب. 50 kg.m/s غربًا. جـ. 2 kg.m/s غربًا. د. 50 kg.m/s شرقًا.

5. تتحرّك سيارة شمالًا بسرعةٍ ثابتةٍ؛ بحيث كان زخمُها الخطّي يساوي (9×10^4 N.s). إذا تحركت السيارة جنوبًا بمقدار السرعة نفسه فإن زخَمها الخطّي يساوي:
أ. 9×10^4 N.s ب. -9×10^4 N.s جـ. 18×10^4 N.s د. 0 N.s

6. تركض لينا غربًا بسرعة مقدارها (3 m/s). إذا ضاعفت لينا مقدارَ سرعتها مرّتان فإنّ مقدار زخَمها الخطّي:
أ . يتضاعفُ مرّتان. ب. يتضاعف أربع مرّات. جـ. يقلُّ بمقدار النصف. د. يقلُّ بمقدار الربع.

7. صندوقان (A وB) يستقران على سطح أفقيٍّ أملسٍ. أثّرت في كل منهما القوّة المُحصّلة نفسُها باتّجاه محور $+x$ للفترة الزمنية (Δt) نفسِها. إذا علمتُ أن كتلة الصُّندوق (m_A) أكبر من كتلة الصُّندوق (m_B)؛ فأيُّ العلاقات الآتية صحيحة في نهاية الفترة الزمنية؟
أ . $p_A < p_B, KE_A < KE_B$ ب. $p_A = p_B, KE_A > KE_B$
جـ. $p_A = p_B, KE_A < KE_B$ د . $p_A > p_B, KE_A > KE_B$

8. رُميَتْ كرةٌ كتلتُها m أُفقيًّا بسرعة مقدارها v نحو جدار؛ فارتدّت الكرة أُفقيًّا بمقدار السرعة نفسه. إنّ مقدار التغيُّر في الزخَم الخطّي للكرة يساوي:
أ. mv ب. $-mv$ جـ. $2mv$ د. صفرًا

9. كرةٌ (A) تتحرّك بسرعة (2 m/s) غربًا؛ فتصطدم بكرةٍ أُخرى ساكنةٍ (B) مماثلةٍ لها تصادُمًا مرنًا في بُعدٍ واحد. إذا توقفت الكرة (A) بعد التصادُم، فإنّ مقدارَ سرعة الكرة (B) واتّجاهَها بعد التصادُم يساوي:
أ. 2 m/s شرقًا. ب. 2 m/s غربًا. جـ. 1 m/s شرقًا. د. 1 m/s غربًا.

10. يركض عمرُ شرقًا بسرعة (4.0 m/s)، ويقفز في عربةٍ كتلتُها (90.0 kg) تتحرّك شرقًا بسرعةٍ مقدارها (1.5 m/s). إذا علمتُ أن كتلة عمر (60.0 kg)؛ فما مقدارُ سرعة حركة عمرَ والعربة معًا؟ وما اتّجاهها؟

أ. 2.0 m/s شرقًا. ب. 5.5 m/s غربًا. جـ. 4.2 m/s غربًا. د. 2.5 m/s شرقًا.

11. تقفز شذى من قاربٍ ساكنٍ كتلته (300 kg) إلى الشاطئ بسرعةٍ أفقيّةٍ مقدارُها (3 m/s). إذا علمتُ أن كتلة شذى (50 kg) فما مقدار سرعة حركة القارب؟ وما اتّجاهها؟

أ. 3 m/s نحو الشاطئ. ب. 3 m/s بعيدًا عن الشاطئ.

جـ. 0.5 m/s بعيدًا عن الشاطئ. د. 18 m/s نحو الشاطئ.

أقرأُ الفقرة الآتية، ثم أُجيب عن الأسئلة (12–14) بافتراض الاتّجاه الموجب باتّجاه محور $x+$.

سيارةٌ رياضيةٌ كتلتُها $(1.0 \times 10^3\ kg)$ تتحرّك شرقًا $(+x)$ بسرعةٍ ثابتةٍ مقدارها (90.0 m/s)، فتصطدم بشاحنةٍ كتلتُها $(3.0 \times 10^3\ kg)$ تتحرّك في الاتّجاه نفسه. بعد التصادُم التحمتا معًا وتحرّكتا على المسار المستقيم نفسه قبل التصادُم بسرعةٍ مقدارُها (25 m/s).

12. ما الزخَم الخطّي الكُلّي للسيارة والشاحنة بعد التصادُم؟

أ. $-7.5 \times 10^4\ kg.m/s$ ب. $1.0 \times 10^5\ kg.m/s$

جـ. $7.5 \times 10^4\ kg.m/s$ د. $-1.0 \times 10^5\ kg.m/s$

13. ما الزخَم الخطّي الكُلّي للسيارة والشاحنة قبل التصادُم؟

أ. $-7.5 \times 10^4\ kg.m/s$ ب. $7.5 \times 10^4\ kg.m/s$

جـ. $1.0 \times 10^5\ kg.m/s$ د. $-1.0 \times 10^5\ kg.m/s$

14. ما السرعة المُتّجهة للشاحنة قبل التصادُم مباشرةً؟

أ. $-25\ m/s$ ب. $25\ m/s$

جـ. $-3.3\ m/s$ د. $3.3\ m/s$

15. المساحة المحصورة تحت منحنى (القوّة – الزمن) تساوي مقدار:

أ. القوّة المُحصّلة ب. الزخَم الخطّي

جـ. الدفع د. الطاقة الحركية

2. أُفسّرُ ما يأتي:

أ . تقف نرجسُ على زلاجةٍ ساكنةٍ موضوعةٍ على أرضيّة غرفةٍ ملساء وهي تحمل حقيبتها. وعندما قذفت حقيبتها إلى الأمام تحركت هي والزلاجة معًا إلى الخلف.

ب. تُغطّى أرضيّة ساحات الألعاب عادةً بالعشب أو الرمل، حيث يكمن خطر سقوط الأطفال.

3. أُحلّل: يقف صيّاد على سطح قاربٍ صيدٍ ساكنٍ على سطح الماء، ثم يتحرك من نهاية القارب نحو مقدمته. أُجيب عمّا يأتي:

أ . أُفسّر: هل يتحرك القارب أم لا؟ أُفسّر إجابتي.

ب. أُقارن بين مجموع الزخَم الخطّي للقارب والصيّاد قبل بدء حركة الصيّاد وبعد حركته.

4. أُحلّل: جسمان (A و B) لهما الطاقة الحركية نفسها، هل يكون لهما مقدار الزخَم الخطّي نفسه؟ أفسّر إجابتي.

5. أُصدرُ حُكمًا: في أثناء دراسة غيثٍ لهذا الدرس، قال: «إنَّ وسائل الحماية في السيارات قديمًا أفضل منها في السيارات الحالية؛ إذ إنّ هياكل السيارات الحديثة مرنةٌ تتشوّه بسهولة عند تعرّض السيارة لحادث، على عكس هياكل السيارات القديمة الصلبة». أناقشُ صحّةَ قولِ غيث.

6. أُحلّل وأستنتج: تتحرّك سيارةٌ كتلتها $(1.35 \times 10^3 \text{ kg})$ بسرعةٍ مقدارُها (15 m/s) شرقًا، فتصطدم بجدارٍ وتتوقف تمامًا خلال فترة زمنيّةٍ مقدارُها (0.115 s)، فأحسبُ مقدار ما يأتي:

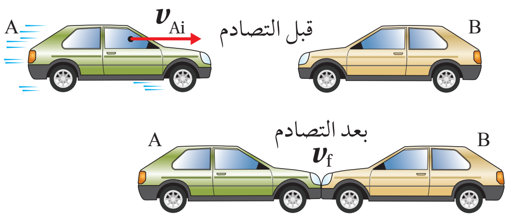
أ . التغيُّر في الزخَم الخطّي للسيارة.

ب. القوّة المتوسطة التي يؤثر بها الجدار في السيارة.

7. أحسبُ: السيارة (A) كتلتها $(1.1 \times 10^3 \text{ kg})$ تتحرّك بسرعة (6.4 m/s) باتّجاه محور $+x$، فتصطدم رأسًا برأس بسيارةٍ ساكنةٍ (B) كتلتها $(1.2 \times 10^3 \text{ kg})$؛ وتلتحم السيارتان معًا بعد التصادُم وتتحرّكان على المسار المستقيم نفسه قبل التصادُم، كما هو موضح في الشكل المجاور. أحسبُ مقدار ما يأتي:

أ . سرعة السيارتين بعد التصادُم، وأُحدّد اتّجاهها.

ب. الدفع الذي تؤثّر به السيارة (B) في السيارة (A).



تصادم سيارتين

8. أستخدم الأرقام: جسمٌ ساكنٌ موضوع على سطح أُفقيٍّ أملس يتكون من جزأين، A و B. كتلة الجزء A تساوي $(8.0 \times 10^2 \text{ kg})$، وكتلة الجزء B تساوي $(1.5 \times 10^3 \text{ kg})$. إذا انفصل الجزء B عن الجزء A وتحرك مبتعدًا بسرعة (10.0 m/s)، فأحسبُ مقدار ما يأتي:

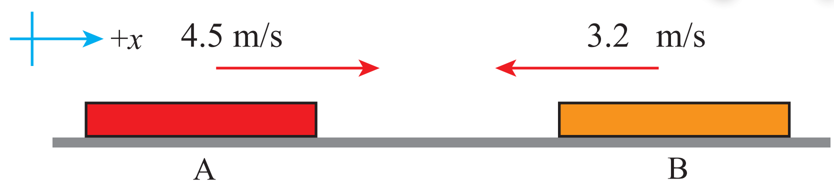
أ . سرعة اندفاع الجزء A ، وأُحدّد اتّجاهها.

ب. الدفع المؤثّر في الجزء A .

9. أحسبُ: أثّرت قوّة محصلة مقدارها $(1 \times 10^3 \text{ N})$ في جسم ساكن كتلته (10 kg) وحرّكته باتّجاهها مدّة زمنيةً مقدارها (0.01 s). أحسبُ مقدار ما يأتي:

أ . التغيُّر في الزخَم الخطّي للجسم.

ب. السرعة النهائية للجسم.



10. جسمان (A و B)، ينزلقان باتّجاهين متعاكسين على مسار أُفقي مستقيم أملس كما هو موضح في الشكل، فيصطدمان رأسًا برأس ويرتدان باتّجاهين متعاكسين على المسار المستقيم نفسه. إذا علمتُ أنّ كتلة الجسم A تساوي (0.28 kg)، وسرعة الجسمين بعد التصادُم مباشرةً: $(v_{Af} = -1.9 \text{ m/s})$ و $(v_{Bf} = 3.7 \text{ m/s})$، فأُجيب عمّا يأتي:

أ . أحسبُ مقدار كتلة الجسم (B).

ب. أستخدم القانون الثالث لنيوتن في الحركة لتوضيح سبب أن يكون الزخَم الخطّي محفوظًا في هذا التصادُم.

جـ. أوضح هل التصادُم مرنٌ أم غير مرن؟

11. أطلقت مريمُ سهمًا كتلته (0.20 kg) أُفقيًّا بسرعة مقدارها (15 m/s) باتّجاه الغرب نحو هدف ساكن كتلته (5.8 kg)، فاصطدم به واستقرّ فيه وتحرّكا كجسم واحد نحو الغرب. أحسبُ مقدار ما يأتي:

أ . سرعة النظام (السهم والهدف) بعد التصادُم.

ب. التغيُّر في الطاقة الحركية للنظام.

12. تنزلق كرة زجاجية كتلتها (0.015 kg) باتّجاه الغرب بسرعة مقدارها (0.225 m/s)، فتصطدم رأسًا برأس بكرة أخرى كتلتها (0.030 kg) تنزلق شرقًا بسرعة مقدارها (0.180 m/s). بعد التصادُم ارتدّت الكرة الأولى شرقًا بسرعة مقدارها (0.315 m/s). أُجيب عمّا يأتي:

أ . أحسبُ مقدار سرعة الكرة الثانية بعد التصادُم، وأُحدّد اتّجاهها.

ب. أُحدّد نوع التصادُم.

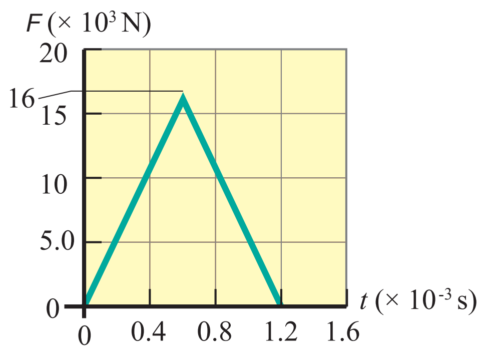
13. **أُفسّر البيانات:** يوضح الشكل المجاور منحنى (القوّة – الزمن) للقوة المُحصّلة المؤثّرة في كرة بيسبول كتلتها (145 g) في أثناء زمن تلامسها مع المضرب. أستعين بهذا المنحنى والبيانات المثبتة فيه للإجابة عمّا يأتي بإهمال وزن الكرة:

أ. ما الذي يُمثّله الرقم (16) على محور القوّة؟

ب. **أحسبُ** مقدار الدفع المؤثّر في الكرة نتيجة تلامسها مع المضرب.

جـ. **أحسبُ** مقدار السرعة النهائية للكرة في نهاية الفترة الزمنية لتأثير القوّة المُحصّلة فيها، باعتبارها ساكنة لحظة بدء تأثير القوّة المُحصّلة.

د. **أحسبُ** مقدار القوّة المتوسطة المؤثّرة في الكرة أثناء زمن تلامسها مع المضرب.



الوحدة

2

الحركةُ الدورانيّة

Rotational Motion

أتأمّل الصورة

مدينةُ الألعاب

تظهرُ في الصورة ألعابٌ تتحرّك حركةً دورانيّةً في مدينة الألعاب. وتتحرّكُ الأجزاءُ المختلفة للُّعبة الدوّارة بسرعاتٍ وتسارعاتٍ مختلفة، وتعمل الألعاب الدوّارة على مُسارعة راكبيها بطرائق عدّة، بحيث تتحقّق لهم الإثارة.

هل تنطبق قوانينُ نيوتن على الحركة الدورانيّة؟ وما الكمّياتُ الفيزيائيّة التي أحتاجُها لوصف حركة جسمٍ يتحرّك حركةً دورانيّة ؟

الفكرة العامّة:

تتحرّك الكثير من الأجسام التي نشاهدها حركةً دورانيّة، ومنها أقراص CD وإطارات السيارات وشفرات المراوح. وتوصَفُ الحركةُ الدورانيّة باستخدام مفاهيمَ خاصّةٍ؛ مثل العزم، والسرعة الزاويّة، والتسارُع الزاويّ، والزخَم الزاويّ.

الدرس الأول: العزم والاتّزان السكونيّ

Torque and Static Equilibrium

الفكرة الرئيسة: من أجل دراسة الاتّزان السكونيّ للأجسام تلزمُ معرفةُ بعض المفاهيم الفيزيائية مثل: العزم ومركز الكتلة، وكيفيّة حساب كلٍّ منهما.

الدرس الثاني: ديناميكا الحركة الدورانية

Dynamics of Rotational Motion

الفكرة الرئيسة: تلزمني معرفة كمّيات فيزيائيّة عدّة لوصف الحركة الدورانية لجسم، منها: الإزاحة الزاويّة، والسرعة الزاويّة، والتسارع الزاويّ، والعلاقات بينها.

الدرس الثالث: الزخَم الزاويّ

Angular Momentum

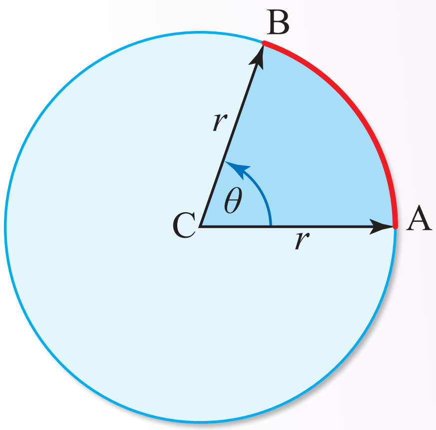
الفكرة الرئيسة: تلزمُ معرفة الزخَم الزاويّ وحفظُه لتفسير بعض المشاهدات في الحياة اليومية، وأستفيدُ منه في تطوير مهاراتي في مجالات مختلفة، منها الألعاب الرياضيّة.

تجربة استهلالية

الراديان

المواد والأدوات: ورقةٌ بيضاء، قلم رصاص، شريطٌ لاصق، خيطٌ خفيف، مقصّ، فُرجار، منقلة.

إرشادات السلامة: الحذرُ عند استخدام المقص والفرجار.



خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أُنفِّذ الخطوات الآتية:

1 أضعُ الورقة على سطح طاولةٍ أُفقيّ، ثم أُثبِّتُها على السطح بواسطة الشريط اللاصق.

2 **أقيسُ:** أُثبّت القلم بالفرجار، ثم أرسم دائرةً في منتصف الورقة بنصف قُطرٍ مناسب، (10 cm) مثلًا، وأُعيّن مركز الدائرة، وأكتبُ عنده الرمز C .

3 أقصُّ قطعةً من الخيط طولها يساوي نصف قطر الدائرة.

4 **ألاحظُ:** أُثبّتُ الخيط على قوس الدائرة بالشريط اللاصق كي يُشكّل قوسًا كما هو مُبيّنٌ في الشكل، ثم أُحدّد الزاوية المركزيّة المُقابلة له عن طريق رسم خطٍّ مستقيم من بداية الخيط إلى مركز الدائرة (الخط AC)، ثمّ رسم خطٍّ مستقيمٍ آخر من نهاية الخيط إلى مركز الدائرة (الخطّ BC)، كما هو موضح في الشكل.

5 **أقيسُ** باستخدام المنقلة مقدار الزاوية المركزيّة المقابلة للقوس الذي شكّله الخيط، وأُدوّنه.

التحليل والاستنتاج:

1 . **أحسبُ:** أقسمُ طول القوس الذي شكّله الخيط على نصف قطر الدائرة. ما الذي يمثّله الناتج؟ ماذا أستنتج؟

2 . **أُقارنُ** بين قياس الزاوية المركزيّة بوحدة راد ووحدة درجة. ماذا أستنتج؟ ما العلاقة بين القياسين؟

3 . **أتواصلُ:** أُقارن نتائجي بنتائج زملائي في المجموعات الأخرى. هل يوجد بينها أيّ اختلاف؟

4 . **أتوقّع** مصادر الخطأ المحتملة في التجربة.

الدرس 1

العزم والاتّزان السكونيّ
Torque and Static Equilibrium

◄الفكرة الرئيسة:

من أجل دراسة الاتزان السكونيّ للأجسام تلزمُ معرفة بعض المفاهيم الفيزيائية مثل: العزم ومركز الكتلة، وكيفيّة حساب كلٍّ منهما

◄نتاجات التعلّم:

- أُعرّف التّأثيرَ الدورانيّ للقوّة على جسم (العزم) بأنّه يُساوي ناتج الضرب المتجهيّ لمتجه القوّة (*F*) ومُتجّه موقع نقطة تأثير القوّة (*r*) بالنسبة لمحور الدوران.
- أُحدّد مركز الكتلة لجسمٍ مُنتظم الشكل أو غير مُنتظمٍ عمليًّا.
- أُحدّد مركز الكتلة لجسمٍ مُنتظم الشكل بمعادلةٍ حسابيّة.
- أُميّز بين الاتّزان السكونيّ والاتّزان الحركيّ.
- أُصمّم تجربةً تربط الاتّزان بموقع مركز كتلة جسم.

◄المفاهيم والمصطلحات:

العزم	Torque
ذراع القوّة	Lever Arm
مركز الكتلة	Centre of Mass

العزم Torque

ألاحظُ في حياتي اليوميّة أجسامًا تدورُ حول محورٍ ثابتٍ تحت تأثير قوّةٍ أو أكثر، مثل الأبواب، والبراغي، والمفكّات، وغيرها، وهذا النوع من الحركة يُسمّى الحركة الدورانية. فمثلًا؛ يدورُ الباب المُبيّن في الشكل (1) عند التأثير بقوّةٍ في المقبض المُثبّت عند طرفه، ومحورُ الدوران في هذه الحالة هو خطٌّ وهميٌّ رأسيٌّ يمرُّ عبر مُفصّلات الباب المُثبّتة عند الطرف المقابل للمقبض.

يُعدّ **العزم Torque** مقياسًا لمقدرة القوّة على إحداث دورانٍ لجسم، وهو كمّية مُتّجهةٌ، رمزه (τ)، ويُعرّف رياضيًا بأنه يُساوي ناتج الضرب المُتّجهيّ لمُتجه القوّة (*F*) ومُتّجه موقع نقطة تأثير القوّة (*r*) الذي يبدأ من نقطةٍ على محور الدوران وينتهي عند نقطة تأثير القوّة. ويُقاس العزم بوحدة N.m حسب النظام الدولي للوحدات، ويُعبّر عنه بالمعادلة الآتية:

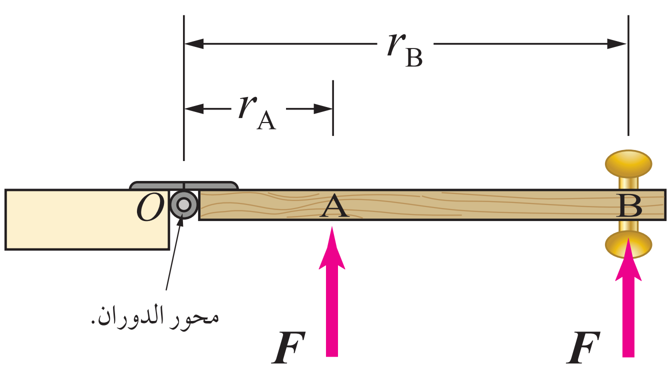
$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{r} \times \boldsymbol{F}$$

ويُحسب مقدار العزم كما يأتي:

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

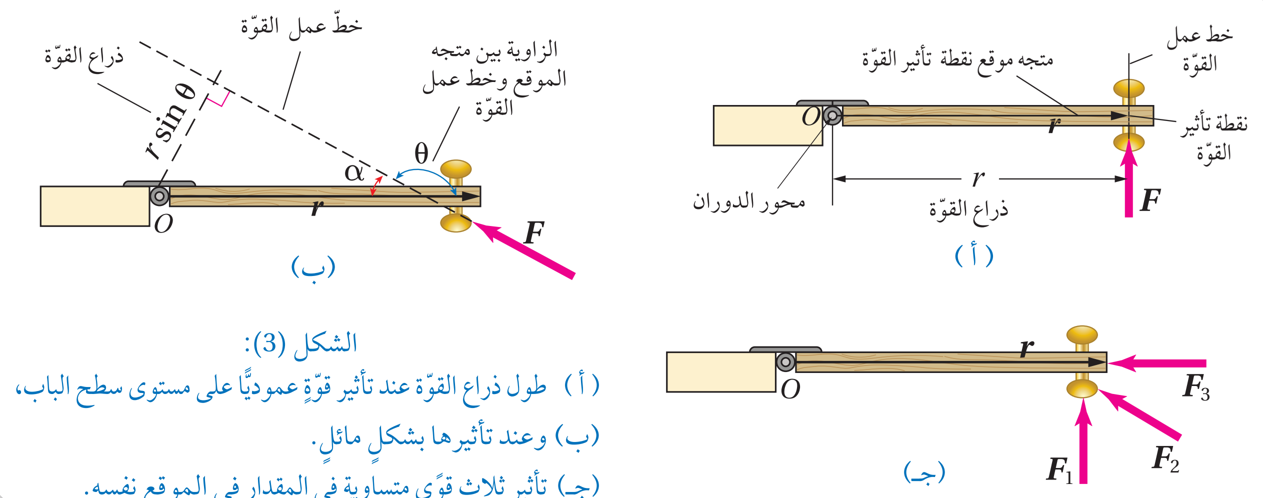
حيث (θ) الزاوية المحصورة بين المُتّجهين ***r*** و ***F***.

أنظر الشكل (2) الذي يوضّح منظرًا عُلويًّا لباب، حيث أحصلُ على أكبر مقدار للعزم عند التأثير بقوةٍ في مقبضه (النقطة B)، بدلًا من التأثير بها عند النقطة (A) بالقرب من محور الدوران، أي بجعل نقطة تأثير القوّة أبعد ما يمكن عن محور الدوران، ويزداد مقدار العزم عند التأثير بهذه القوّة بزاويةٍ قائمةٍ بالنسبة لمستوى سطح الباب كما هو موضّحٌ في الشكل (2)، فأنا لا أدفع مقبض الباب أو أسحبه جانبيًّا لفتح الباب؛ بل أدفعه (أو أسحبه) بقوّةٍ اتجاهُها عموديٌّ على مستوى سطح الباب.



الشكل (2): كلّما زاد بُعد نقطة تأثير القوّة عن محور الدوران يزداد العزم. ◄

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



الشكل (3):
(أ) طول ذراع القوّة عند تأثير قوّةٍ عموديًّا على مستوى سطح الباب،
(ب) وعند تأثيرها بشكلٍ مائلٍ.
(جـ) تأثير ثلاث قوًى متساويةٍ في المقدار في الموقع نفسه.

يُسمّى امتدادُ مُتّجه القوّة خطّ عمل القوّة، وأحصل عليه برسم خطٍّ ينطبق مع مُتّجه القوّة. أنظر الشكل (3). أما البُعد العموديُّ بين خطّ عمل القوّة ومحور الدوران فيُسمّى **ذراع القوّة Lever arm**.

يوضح الشكل (3/ أ) قوّة (F) تؤثّر في بابٍ عموديًّا على مستوى سطحه. ويبدأ المُتّجه (r) من النقطة (O) الواقعة على محور الدوران وينتهي عند نقطة تأثير القوّة. وفي هذه الحالة يكون طول ذراع القوّة أكبر ما يُمكن، ويكون مساويًا مقدار المُتّجه (r).

كيف أجدُ ذراع القوّة عندما لا يكونُ اتّجاه القوّة (F)؛ عموديًّا على سطح الباب، كما في الشكل (3/ ب)؟ أرسم خط عمل القوّة، ثم أرسم خطًّا يبدأ من النقطة (O) الواقعة على محور الدوران يصل إلى خطِّ عمل القوّة وعموديًّا عليه، يُمثّل طوله مقدار ذراع القوّة. وباستخدام حساب المُثلّثات أجد أنّ طول ذراع القوّة يساوي $r\sin\alpha = r\sin\theta$، حيث $\sin\alpha = \sin\theta$، لأنّ مجموع الزاويتين يساوي $180°$.

أما الشكل (3/ جـ) فيوضّح تأثير ثلاث قوًى متساويةٍ في المقدار في الموقع نفسه. يكون العزم الناتج عن القوّة (F_1) هو الأكبر؛ إذ إنّ مقدار ذراعها هو الأكبر، يليه العزم الناتج عن القوّة (F_2)، حيث يكون ذراعُها أصغر من ذراع القوّة (F_1)، وينعدم العزم عندما يمرُّ خطُّ عمل القوّة بمحور الدوران كما في حالة القوّة (F_3).

كما يزداد العزم بزيادة مقدار القوّة مع المحافظة على ثبات اتجاهها.

أستنتج ممّا سبق أنّ مقدار العزم يتناسب طرديًّا مع كلٍّ من مقدار القوّة (F) وطول ذراعها ($r\sin\theta$). وبما أنّ العزم كمّية مُتّجهة؛ فإنّنا نعدّهُ موجبًا عندما يسبّب دورانَ الجسم في عكس اتجاه حركة عقارب الساعة، وسالبًا عندما يسبب دوران الجسم في اتّجاه حركة عقارب الساعة.

أتحقّق: ما المقصود بالعزم؟ وعلام يعتمد؟

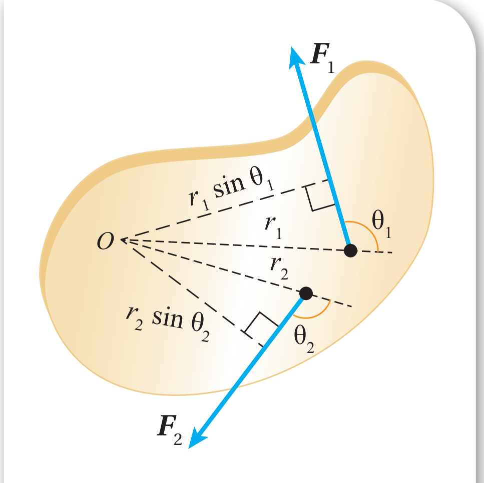
الربطُ معَ الرياضيات

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

إيجاد العزم المحصّل Finding Net Torque

كيف أحسب العزم المحصّل المؤثّر في جسم عندما تؤثّر أكثر من قوّةٍ فيه؟ يوضّح الشكل (4) جسمًا قابلًا للدوران حول محورٍ ثابتٍ عموديٍّ على مستوى الصفحة يمرُّ بالنقطة (O)، وتؤثر فيه قوّتان: $\boldsymbol{F}_1$ تعمل على تدويره بعكس اتّجاه حركة عقارب الساعة، و $\boldsymbol{F}_2$ تعمل على تدويره باتّجاه حركة عقارب الساعة. في هذه الحالة؛ أحسبُ عزم كل قوّةٍ حول محور الدوران على حدة، ثم أجدُ العزم المُحصّل ($\sum\tau$) المؤثّر في الجسم بجمعها مع مراعاة إشارة كلٍّ منها، كما يأتي:

$$\sum\tau = \tau_1 + \tau_2$$
$$= F_1 r_1 \sin\theta_1 - F_2 r_2 \sin\theta_2$$

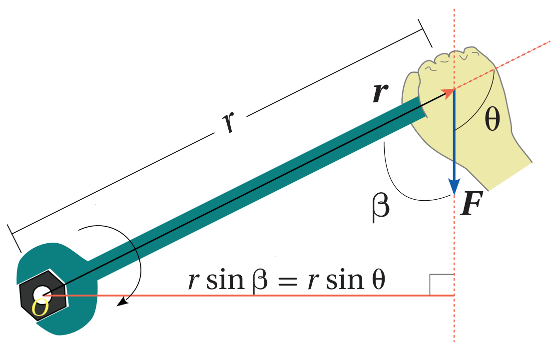


الشكل (4): جسم قابل للدوران حول محورٍ يمرُّ بالنقطة (O) عموديًّا على مستوى الصفحة، ويؤثر فيه قوتان $\boldsymbol{F}_1$ و $\boldsymbol{F}_2$.

✔ **أتحقّق:** كيف أحسبُ عزم قوًى عدّةٍ تؤثّر في جسمٍ قابلٍ للدوران حول محورٍ ثابت؟ وكيف أُحدّد اتجاهه؟

المثال 1

يستخدمُ زيد مفتاح شدٍّ طوله (25.0 cm) لشد صامولة في درّاجة، حيث أثّر بقوّة مقدارُها (1.60×10^2 N) في طرف مفتاح الشدِّ في الاتّجاه الموضح في الشكل (5). فإذا علمتُ أنّ مقدار الزاوية (β) يساوي ($75°$)؛ أحسبُ مقدارَ العزم المؤثّر في المفتاح وأُحدّد اتّجاهه.



الشكل (5): مفتاح شد صامولة.

المعطيات:

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

المطلوب:

$\tau = ?$

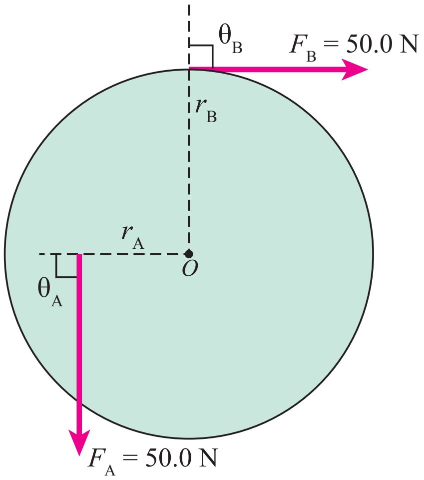
الحلّ:

أستخدم علاقة العزم لحساب عزم قوّة زيدٍ حول محور الدوران المارّ بالنقطة (O)، علمًا بأنّ: $\beta + \theta = 180°$، فتكون $\theta = 105°$، و $\sin 75° = \sin 105°$. أضعُ إشارة السالب لأنّ القوّة تعمل على تدوير مفتاح الشدِّ باتّجاه حركة عقارب الساعة.

$$\tau = -\, r F \sin\theta$$
$$= -\,0.250 \times 1.60 \times 10^2 \sin 105°$$
$$= -38.6\ \text{N.m}$$

المثال 2

بكرة مُصمَتة نصف قُطرها (r_B)، يمرّ في مركزها (O) محور دورانٍ عموديٍّ على مستوى الصفحة؛ كما هو موضّحٌ في الشكل (6). إذا علمتُ أنّ القوّة ($\boldsymbol{F}_A$) تؤثّر في البكرة على بُعد ($r_A = 30.0$ cm) من محور الدوران، وتؤثر القوّة ($\boldsymbol{F}_B$) عند حافّة البكرة حيث ($r_B = 50.0$ cm)، واعتمادًا على المعلومات المُثبتة في الشكل؛ أحسبُ مقدار العزم المُحصّل المؤثّر في البكرة، وأُحدّد اتّجاهه.



الشكل (6): بكرة مصمتة.

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

المطلوب: $\sum \tau = ?$

الحلّ:

تعملُ القوّة ($\boldsymbol{F}_A$) على تدوير البكرة بعكس اتّجاه حركة عقارب الساعة حول محور دورانها الذي يمر بالنقطة (O)؛ لذا يكون عزمها موجبًا، أمّا القوّة ($\boldsymbol{F}_B$) فتعمل على تدويرها باتجاه حركة عقارب الساعة حول محور الدوران نفسه؛ لذا يكون عزمها سالبًا. يصنع ($\boldsymbol{r}_A$) زاويةً مقدارُها (90°) مع خطّ عمل القوّة ($\boldsymbol{F}_A$)، ويصنع ($\boldsymbol{r}_B$) زاويةً مقدارُها (90°) مع خطّ عمل القوّة ($\boldsymbol{F}_B$).

أجد العزم المُحصّل حول محور دوران البكرة كما يأتي:

$$\begin{aligned}\sum \tau &= \tau_1 + \tau_2 \\ &= F_A\, r_A \sin\theta_A - F_B\, r_B \sin\theta_B \\ &= 50.0 \times 0.30 \sin 90^\circ - 50.0 \times 0.50 \sin 90^\circ \\ &= -10.0 \text{ N.m}\end{aligned}$$

بما أنّ العزم المحصّل سالبٌ فإنّه يعمل على تدوير البكرة باتّجاه حركة عقارب الساعة حول محور دورانها.

تمرين

يدفع عامل عربةً كما هو موضّحٌ في الشكل (7)، عن طريق التأثير في مقبضي ذراعيها بقوتين مجموعهما ($F = 180$ N) رأسيًّا إلى أعلى لرفعهما إلى أعلى بزاوية (25°) بالنسبة لمحور $+x$. إذا علمتُ أنّ بُعد كُلّ من مقبضي العربة عن محور الدوران (O) يساوي (1.50 m)؛ أحسبُ مقدار عزم القوّة ($\boldsymbol{F}$) المؤثّر في العربة حول محور الدوران، وأُحدّد اتجاهه.

الشكل (7): عامل يدفع عربة.

الازدواج

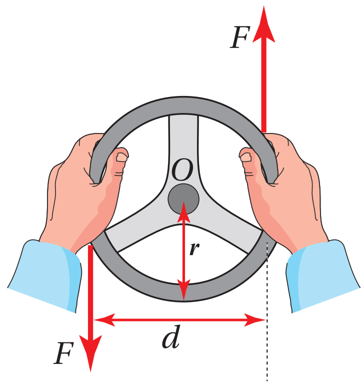
يوضّح الشكل (8) منظرًا لِمقوَد سيارةٍ نصف قُطره (r). تؤثّر اليد اليمنى في المقود بقوّةٍ مقدارُها (F) عموديًّا إلى أعلى، تؤدي إلى دورانه بعكس اتّجاه حركة عقارب الساعة حول محور دورانه الذي يمرُّ بالنقطة (O)، بينما تؤثّر اليد اليسرى في المِقوَد بنفس مقدار القوّة (F)؛ لكن عموديًّا إلى أسفل فتُديره بعكس اتّجاه حركة عقارب الساعة أيضًا. وأحسبُ العزم المُحصّل الناتج عن القوّتين حول محور الدوران نفسه كما يأتي:

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

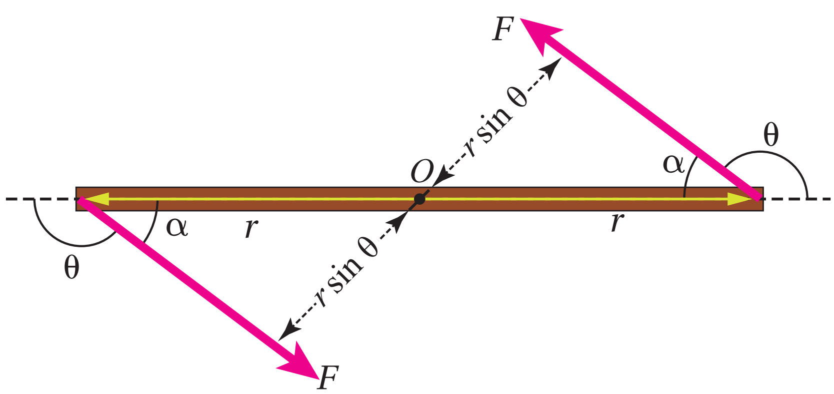
حيث (d) البُعد العموديُّ بين خطيّ عمل القوّتين. عندما تكون القوتان متساويتين مقدارًا ومتعاكستين اتجاهًا وخطّا عملهما غير متطابقين؛ فإنّهما تُشكّلان ازدوجًا Couple، يُسمّى العزم الناتج عنه عزم الازدواج (τ_{couple})، وهو يساوي ناتج ضرب مقدار إحدى القوّتين المتساويتين في البُعد العمودي بينهما. وعمومًا، أحسبُ عزم الازدواج عندما تصنعُ قوتا الازدواج زاويةً غير قائمةٍ مع المُتّجه ($\mathbf{r}$)، كما هو موضّحٌ في الشكل (9)، باستخدام العلاقة الآتية:

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

✔ **أتحقّق:** ما المقصود بعزم الازدواج؟ وعلامَ يعتمد؟



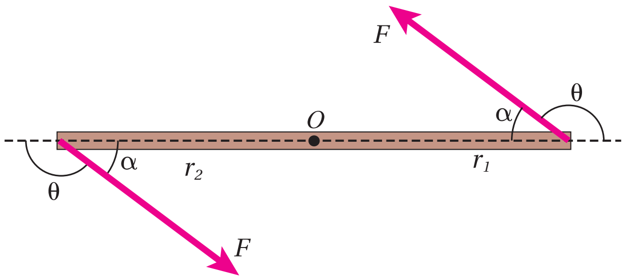
الشكل (8): الازدواج المؤثّر في مقود سيارة.



الشكل (9): تصنع قوتا الازدواج زاويةً غير قائمة مع قضيب فلزّي قابلٍ للدوران حول محورٍ ثابتٍ عموديٍّ على مستوى الصفحة يمرُّ في منتصف القضيب عند النقطة (O).

المثال 3

مسطرةٌ متريّةٌ فلزّيةٌ قابلةٌ للدوران حول محورٍ ثابتٍ يمرُّ في منتصفها عند النقطة (O) عموديٍّ على مستوى الصفحة، كما هو موضّحٌ في الشكل (10). أثّرت فيها قوّتان شكّلتا ازدواجًا، فإذا علمتُ أنّ مقدار كلٍّ من القوّتين (80.0 N)، ومقدار الزاوية (θ) يساوي (143°)؛ أحسبُ مقدار عزم الازدواج المؤثّر في المسطرة، وأُحدّد اتجاهه.



الشكل (10): ازدواج مؤثر في مسطرة مترية.

المعطيات:

$F_1 = F_2 = F = 80.0$ N, $r_1 = r_2 = r = 0.50$ m, $\theta_1 = \theta_2 = 143^\circ$.

المطلوب:

$\tau_{couple} = ?$

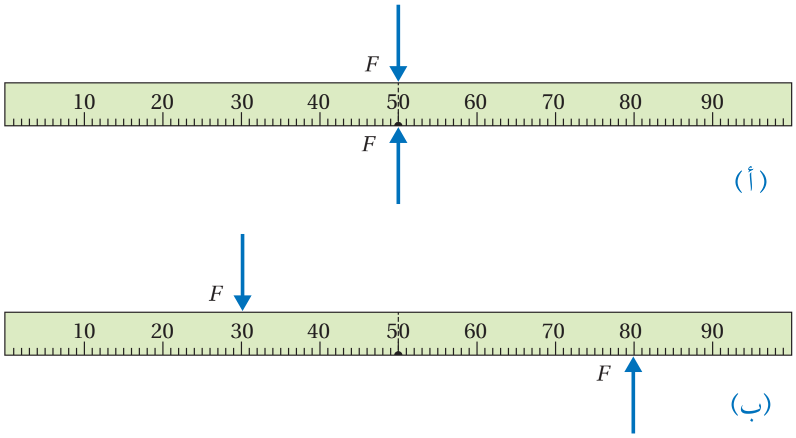
الحلّ:

تشكّل القوتان ازدواجًا يعمل على تدوير المسطرة بعكس اتّجاه حركة عقارب الساعة حول محورٍ ثابتٍ يمرُّ بالنقطة (O). والزاوية (θ)؛ بين مُتّجه القوّة ومُتّجه موقع نقطة تأثير القوّة تساوي (143°)، $\sin 143^\circ = \sin 37^\circ = 0.60$، وأحسبُ مقدار عزم الازدواج كما يأتي:

$$\tau_{couple} = 2Fr\sin\theta$$

$$= 2 \times 80.0 \times 0.50 \ \sin 143^\circ$$

$$= 48 \text{ N.m}$$



الشكل (11):
(أ) خطّا عمل القوّتين المؤثّرتين في المسطرة متطابقان،
(ب) خطّا عمل القوّتين المؤثّرتين غير متطابقين.

الاتزان Equilibrium

درستُ في صفوفٍ سابقةٍ أنّ الجسم الساكن يكون في حالة اتّزانٍ سكونيّ، والجسمُ المتحرّكُ بسرعةٍ ثابتة وبخطٍّ مستقيمٍ يكون في حالة اتّزانٍ حركي، وفي الحالتين تكون القوّة المُحصّلة المؤثّرة في هذه الأجسام تساوي صفرًا؛ ($\sum \boldsymbol{F} = 0$).

يوضّح الشكل (11/ أ) مسطرةً متريّةً موضوعةً على سطح طاولة؛ وتؤثّر فيها قوّتان متساويتان مقدارًا ومتعاكستان اتّجاهًا في الموقع نفسه، حيث تكون المسطرة في حالة اتزان سكوني، لأنّ القوّة المُحصّلة المؤثّرة فيها تساوي صفرًا. أمّا الشكل (11/ ب) فيوضّح المسطرة نفسَها عند تأثير القوّتين نفسيهما فيها في موقعين مختلفين. هنا لا تكون المسطرة في حالة اتزان بالرغم من أنّ القوّة المحصلة المؤثّرة فيها تساوي صفرًا. وفي هذه الحالة تتحرّك المسطرة حركةً دورانيّة؛ لأنّ خَطَّي عمل القوّتين المؤثّرتين فيها غير متطابقين، فيكون العزم المُحصّل المؤثّر فيها لا يساوي صفرًا. إذًا؛ لا بُدّ من توفر شرطٍ ثانٍ يُحقّق الاتّزان الدورانيّ للجسم، وهذا الشرط مرتبطٌ بالعزم. وكي يكون الجسمُ في حالة اتّزانٍ سكونيٍّ عند تأثير قوًى عدّةٍ فيه؛ يجبُ تحقّق الشرطين الآتيين معًا:

الشرط الأول: أن تكونَ القوّة المُحصّلة المؤثّرة فيه تساوي صفرًا ($\sum \boldsymbol{F} = 0$).

الشرط الثاني: أن يكونَ العزم المُحصّل المؤثّر فيه يساوي صفرًا ($\sum \boldsymbol{\tau} = 0$).

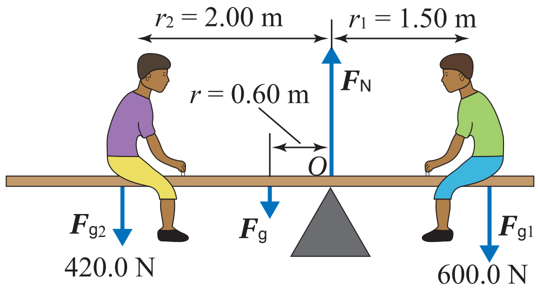
✓ **أتحقّق**: ما شرطا اتّزان جسم؟

المثال 4

يجلس فادي (F_{g1}) وصقر (F_{g2}) على جانبي لعبة اتّزان (see – saw) تتكوّن من لوحٍ خشبيٍّ منتظمٍ متماثلٍ وزنُه (F_g) يؤثّر في منتصفه، يرتكزُ على نقطةٍ تبعُد (0.60 m) يمين منتصف اللّوح الخشبيّ، كما هو موضّحٌ في الشكل (12). إذا كان النظام المكوّن من اللّعبة والطفلين في حالة اتّزان سكونيٍّ واللوحُ الخشبيّ في وضع أُفقيّ، وبالاستعانة بالبيانات المثبتة في الشكل؛ أحسب مقدار ما يأتي:

أ . وزن اللّوح الخشبي (F_g).

ب. القوّة (F_N) التي تؤثّر بها نقطة الارتكاز في اللّوح الخشبي.



الشكل (12): طفلان يجلسان على لعبة See – saw متزنة أُفقيًّا.

المعطيات: $F_{g1} = 600.0$ N, $F_{g2} = 420.0$ N, $r = 0.60$ m, $r_1 = 1.50$ m, $r_2 = 2.00$ m.

المطلوب: $F_g = ?,\ F_N = ?$

الحلّ:

أ. أُلاحظُ أنّ اللّوح الخشبيّ يتأثّرُ بأربع قوًى، هي: وزنا الطفلين (F_{g1}) و(F_{g2})، ووزن اللّوح (F_g) يؤثّر في منتصفه، والقوّة العمودية (F_N) التي تؤثّر بها نقطة الارتكاز في اللوح. وبما أن النظام مُتّزن، ومقدارَي القوّة العمودية، ووزن اللوح غيرُ معلومين؛ فإنّني أُطبّق الشرط الثاني للاتّزان حولَ محورٍ يمرُّ في إحدى نقطتي تأثير هاتين القوّتين؛ إذ أنّ عزم قوّةٍ حولَ محورٍ يمرُّ في نقطة تأثيرها يساوي صفرًا. أُطبّق الشرط الثاني للاتّزان حول محورٍ يمرُّ في نقطة ارتكاز اللوح الخشبيّ (النقطة O)، فيكون عزم القوّة العموديّة يساوي صفرًا.

$$\sum \tau = 0$$
$$F_{g2}\, r_2 + F_g\, r - F_{g1}\, r_1 = 0$$
$$F_{g1}\, r_1 = F_{g2}\, r_2 + F_g\, r$$
$$600.0 \times 1.50 = 420.0 \times 2.00 + F_g \times 0.60$$
$$F_g = \frac{900 - 840}{0.60} = 100 \text{ N}$$

ب. اللوح الخشبي في حالة اتّزان سكونيّ؛ لذا فإنّ القوّة المُحصّلة المؤثّرة فيه تساوي صفرًا حسب الشرط الأول من شرطي الاتّزان. وأُطبّق هذا الشرط في اتّجاه محور y؛ لأنّه لا توجد قوًى تؤثّر في اتّجاه محور x.

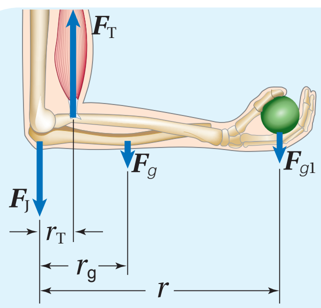
$$\sum F_y = 0$$
$$F_N - (F_g + F_{g1} + F_{g2}) = 0$$
$$F_N = F_g + F_{g1} + F_{g2}$$
$$= 100 + 600.0 + 420.0$$
$$= 1120 \text{ N}$$

تمرين

أُحلّلُ وأستنتجُ: ترفع جمانة بيدها ثقلاً وزنُه (40.0 N)، في أثناء ممارستها للتمارين الرياضية في نادٍ رياضيّ. إذا علمتُ أنّ نقطة التقاء العضلة ثنائيّة الرأس بالساعد تبعدُ ($r_T = 5.0$ cm) عن المرفق، ووزن عظم الساعد والأنسجة فيه (30.0 N) ويؤثر على بُعد ($r_g = 15.0$ cm) عن المرفق، وبُعد نقطة تأثير القوّة في اليد ($r = 35.0$ cm) عن المرفق، والساعد متزنٌ أفقيًّا في الوضع الموضّح في الشكل (13)، فأحسبُ مقدار ما يأتي:

أ . قوّة الشدّ في العضلة (F_T) المؤثّرة في الساعد بافتراضها رأسيًّا لأعلى.

ب. القوّة التي يؤثّر بها المرفق في الساعد (F_J).



الشكل (13): تسحب العضلة ثنائيّة الرأس عظمة الساعد بقوة (F_T) رأسيًّا لأعلى.

مركز الكتلة Centre of Mass

يُعرّف **مركز الكتلة** **Centre of mass (CM)** أنّه؛ النقطة التي يُمكن افتراض كتلة الجسم كاملةً مُركّزةً فيها. وقد يقعُ مركز الكتلة داخل الجسم أو خارجه، اعتمادًا على شكل الجسم. كيف أُحدّد موقع مركز الكتلة؟

ينطبق موقع مركز كتلة أي جسمٍ مُتماثلٍ مُنتَظم توزيع الكتلة (متجانس) على مركزه الهندسيّ. فمثلًا؛ يقع مركز كتلة قضيب فلزيّ منتظمٍ داخلَه، وفي منتصف المسافة بين نهايتيه. ويقع مركز كتلة مسطرة أو أسطوانة أو كرة أو مكعب في المركز الهندسي لكلٍّ منها. ألاحظ أنّ مركز كتلة كرةٍ مجوّفةٍ يقع في مركزها بالرغم من عدم وجود مادّة الكرة عند تلك النقطة، وبالمثل فإنّ مركز كتلة حلقةٍ دائريّةٍ يقع في مركزها بالرغم من عدم وجود مادّة الحلقة عند تلك النقطة، أنظر الشكل (14).

وعندما يتكوّن النظام من جسمين كما في الشكل (15) الذي يوضح رافع أثقال يحمل ثقلين متساويين في الكتلة متصلين معًا بقضيبٍ فلزيٍّ مُنتظم؛ فإنّ مركز الكتلة يقع عند منتصف المسافة بين الثقلين. أمّا النظام المكوّن من جسمين مختلفين في الكتلة؛ فإنّ مركز كتلة النظام يقع على الخطّ الواصل بينهما ويكون أقرب إلى الجسم الأكبر كتلة.

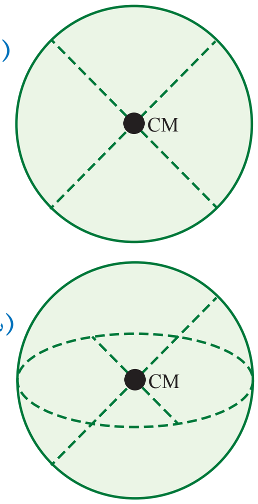
يوضح الشكل (16) نظامًا يتكون من جُسيمين كتلتيهما (m_A, m_B)، يتّصلان معًا بقضيبٍ خفيفٍ يمكنُني إهمال كتلته. ولحساب مركز الكتلة لهذا النظام أختار نظام محاورٍ يقعُ فيه الجُسيمان على محور x عند موقعين (x_A, x_B). لتحديد الإحداثي x لموقع مركز كتلة النظام (x_{CM})، أستخدمُ العلاقة الآتية:

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

أما الجسمُ غير منتظم الشكل، فيكون مركزُ كتلته أقرب إلى المنطقة ذات الكتلة الأكبر. وأُنفّذ التجربة الآتية لأتعرّف كيفيّة تحديد مركز الكتلة لكلٍّ من جسمٍ مُنتظم الشكل وجسمٍ غير منتظم الشكل.

(أ)

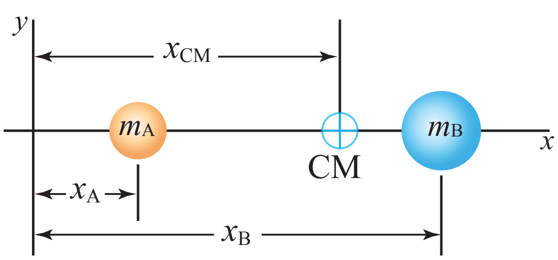
(ب)



الشكل (14): (أ) قرص مصمت أو مجوّف، (ب) كرة مصمتة أو مجوّفة.

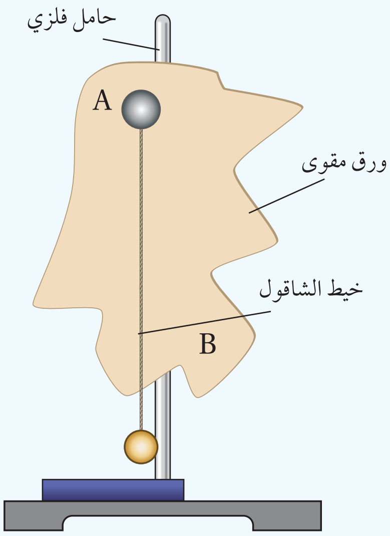
الشكل (15): يقع مركز كتلة الثقلين المتساويين في منتصف المسافة بينهما.

أُفكّر: يكون العزم المحصّل لجسيمات نظام حول مركز كتلته يساوي صفرًا. كيف يمكنني استخدام هذه الطريقة لتحديد الإحداثي (x_{CM}) لمركز كتلة النظام الموضح في الشكل (16)؟ أناقش أفراد مجموعتي، وأستخدم مصادر المعرفة المُتاحة للتوصل إلى إجابة عن السؤال.



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

التجربة ١ تحديد مركز الكتلة



الموادّ والأدوات: مسطرةٌ متريّة، خيطٌ خفيف غير قابلٍ للاستطالة، قطعة ورقٍ مقوّى، حامل فلزيّ، خطّاف، قلمُ رصاص، مقصّ، مثقَب، خيطُ الشاقول.

إرشادات السلامة:

ارتداءُ المعطف واستعمال النظّارات الواقية للعينين، والحذرُ من سقوط الأجسام والأدوات على القدمين.

خطواتُ العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أُنفّذ الخطوات الآتية:

الجزء الأول.

1. أضعُ الحامل الفلزّي على سطح طاولة أُفقيّ، ثم أُثبّت أحد طرفي الخيط بالحامل وطرفه الآخر بالخطّاف.
2. **أُلاحظ:** أُعلّق المسطرة المتريّة بالخطاف من مواقع مختلفة حتى أصل إلى نقطة التعليق التي تصبح عندها المسطرة مستقرّةً بوضعٍ أُفقيّ (مُتّزنة)، وأضع عندها إشارةً باستخدام قلم الرصاص. وأُلاحظ موقع هذه النقطة بالنسبة للمسطرة، مع الانتباه إلى سُمك المسطرة.
3. **أقيس** بُعدَ النقطة التي اتّزنت المسطرة عند تعليقها منها عن كلٍّ من نهايتيها. أُدون بُعدَ هذه النقطة.

الجزء الثاني.

4. أقصُّ قطعة الورق المقوّى لأحصل على شكلٍ غيرِ منتظم، وأثقبه عند حافّته ثقوبًا عدّةً صغيرةً متباعدة؛ ثقبان على الأقل عند النقطتين مثل: A و B.
5. **أُجرّب:** أُعلّق قطعة الورق المُقوّى (الشكل غير المنتظم) من أحد الثقبين في الحامل الرأسي، وأُعلّق خيط الشاقول بالحامل الرأسي أيضًا، وأنتظر حتى يستقرّ كلٌّ منهما ويتوقّفُ عن التأرجُح. ثم أرسمُ خطًّا رأسيًّا على قطعة الورق المُقوّى على امتداد خيط الشاقول؛ كما هو موضّحٌ في الشكل.
6. أُكرّر الخطوة السابقة بتعليق قطعة الورق المقوّى من الثقب الآخر.

التحليل والاستنتاج:

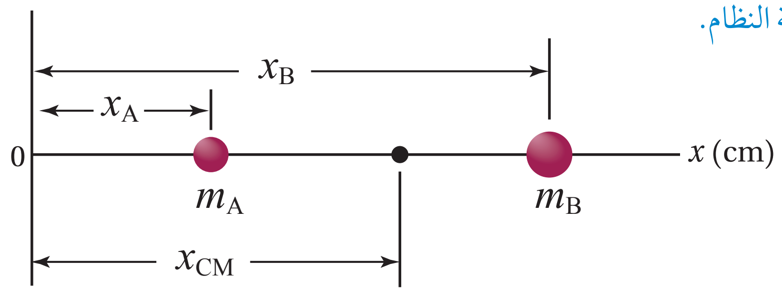
1. **أُحلّلُ وأستنتجُ:** عند أي المواقع اتّزنَت المسطرة المتريّة عند تعليقها؟ ماذا تسمّى هذه النقطة؟ ماذا أستنتج؟
2. **أُحلّلُ وأستنتجُ:** أُحدّد نقطة تقاطع الخطّين على قطعة الورق المُقوّى، ما الذي تمثّله هذه النقطة؟ ماذا أستنتج؟
3. **أقارنُ** بين موقع مركز الكتلة للمسطرة المتريّة وموقع مركز الكتلة للشكل غير المُنتظم من قطعة الورق المُقوّى. ماذا أستنتج؟ أُفسّر إجابتي.
4. **أتوقّعُ** ما يحدث لقطعة الورق المُقوّى غير المُنتظمة عند تعليقها من نقطة تقاطع الخطّين. أُفسر إجابتي.

لاحظتُ بعد تنفيذ التجربة أنّ مراكزَ كُتَلِ الأجسام المُنتظمة والمتماثلة، مثل المسطرة تقع في مراكزها الهندسية، أمّا الأجسام غير المنتظمة وغير المتماثلة؛ فتكون مراكز كُتَلها أقربَ للجزء الأكبر كتلةً منها. كما لاحظتُ أنّ جسمًا ما يكون مُتّزنًا عند تعليقه من مركز كتلته؛ حيث العزمُ المُحصّل المؤثّر فيه يساوي صفرًا.

أتحقّق: أين يقع مركز كتلة جسمٍ مُنتظمٍ متماثل؟ وأين يقع مركز كتلة جسمٍ غير منتظم الشكل؟

المثال 5

نظامٌ يتكوّن من كرتين $(m_A = 1.0\ kg)$ و $(m_B = 3.0\ kg)$؛ كما هو موضّحٌ في الشكل (17). إذا علمتُ أنّ $(x_A = 5.0\ cm)$ و $(x_B = 15.0\ cm)$؛ أُحدّد موقع مركز كتلة النظام.



الشكل (17): نظام مكوّن من كُرَتين تقَعانِ على محور x.

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

المطلوب: $x_{CM} = ?$

الحلّ:

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

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

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

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

ألاحظُ أن موقع مركز الكتلة أقرب للكتلة الأكبر.

تمرين

أُعيد حلّ المثال السابق إذا كانت $(m_A = m_B = 4.0\ kg)$.

مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة**: ما العزم؟ وما شرطا اتّزان جسم؟

2. **أُفسّر**: إذا أردتُ أن أفتح بابًا دوّارًا؛ أُحدّد موقع نقطة تأثير القوّة، بحيث أدفع الباب بأقلِّ مقدارٍ من القوّة. أُحدّد بأيّ اتّجاهٍ أؤثّر بهذه القوّة في الباب.

3. **أُوضّحُ** المقصود بمركز كتلة جسم.

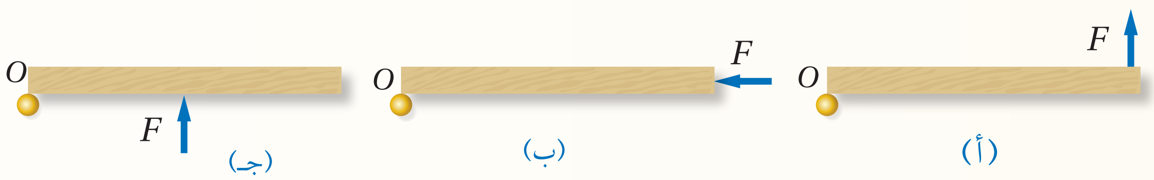
4. **أُفسّرُ**: أثّرت قوًى عدّة في جسم؛ بحيث تمرُّ خطوط عملها في مركز كتلته، وكانت القوّة المحصلة المؤثّرة فيه تساوي صفرًا. هل يكون الجسم مُتّزنًا أم لا؟ أُفسّر إجابتي.

5. **حلّ المشكلات**: يُعالج الاهتزاز في إطار عجل سيارة بوضع قطع رصاص على الجزء الفلزّي من الإطار (الجنط). كيف يعمل ذلك على التخلّص من اهتزاز الإطار؟

6. **أُقارنُ** بين الاتّزان السكونيّ والاتّزان الحركي من حيث: القوّة المُحصّلة المؤثّرة، السرعة الخطّيّة، التسارُع الخطّي.

7. **أُحلّل وأستنتج**: رأت ذكرى أخاها يحاول فكَّ إطار سيارته المثقوب باستخدام مفتاح شدٍّ لفكّ الصواميل التي تُثبّت الإطار، لكنه لم يستطع فكّها. أذكر طريقتين -على الأقل- يُمكن أن تقترحهما ذكرى على أخيها لمساعدته على فكّ الصواميل. أُفسّر إجابتي.

8. **أُقارنُ**: يوضّح الشكل أدناهُ منظرًا عُلويًّا لقوّةٍ مقدارُها (F) تؤثّر في الباب نفسه عند مواقع مختلفة. أُرتّب العزم الناتج عن هذه القوة حول محور الدوران (O) تصاعُديًّا.



9. **التفكير الناقد**: عندَ انطلاق سيارةٍ بشكل مفاجئ ترتفع مقدمتها إلى أعلى. أُفسّر ذلك.

الدرس 2

ديناميكا الحركة الدورانية
Dynamics of Rotational Man

الفكرة الرئيسة:

تلزمُني معرفة كمّيات فيزيائيّة عدّة لوصف الحركة الدورانية لجسم، منها: الإزاحة الزاويّة، السرعة الزاويّة، التسارُع الزاويّ، وعزم القصور الذاتي والعلاقات بينها.

نتاجات التعلّم:

- أوضّح المقصود بكل من: الإزاحة الزاويّة، والسرعة الزاويّة المتوسّطة، والتسارُع الزاويُّ المتوسط.
- أحسبُ مقدار كل من: السرعة الزاويّة، والتسارع الزاويّ.
- أستنتج أنّ عزم القصور الذاتي لجسم هو مقياسٌ لممانعة الجسم لإحداث تغيّرٍ في حركته الدورانية.
- أُعبّر عن عزم القصور الذاتي لجسم بمعادلة.
- أُعبّر عن القانون الثاني لنيوتن لجسم صُلبٍ يدور حول محورٍ ثابت.

المفاهيم والمصطلحات:

الإزاحة الزاويّة Angular Displacement

السرعة الزاويّة المتوسطة
Average Angular Velocity

التسارُع الزاويّ المتوسط
Average Angular Acceleration

عزم القصور الذاتيّ
Moment of Inertia

وصفُ الحركة الدورانيّة
Description of Rotational Motion

في صفوفٍ سابقة؛ تعلّمتُ وصف الحركة للأجسام التي تتحرّك حركةً انتقاليّةً باستخدام مفاهيم الإزاحة والسرعة والتسارع. وبالمثل يمكن وصف الحركة الدورانيّة باستخدام مفاهيم خاصّةٍ وهي: الإزاحة الزاويّة، والسرعة الزاويّة، والتسارُع الزاويّ.

الإزاحة الزاويّة Angular Displacement

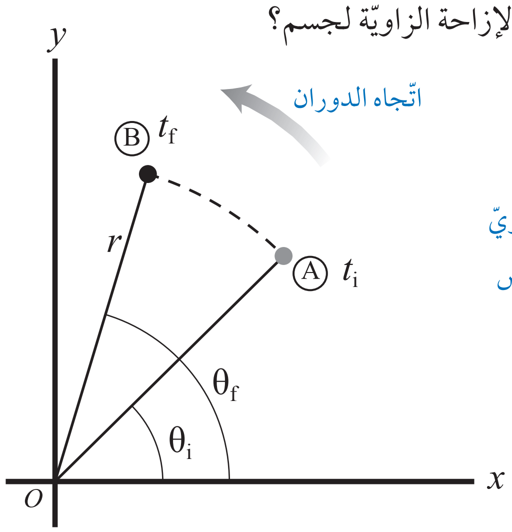
عندما يدورُ جسمٌ بزاويةٍ مُعيّنةٍ؛ فإنّ جميع جُسيماته تدور بالزاوية نفسِها، **والموقع الزاويّ** Angular position لأيّ جسيم عليه هو الزاوية (θ) التي يصنعُها الخطّ الواصلُ بين الجُسيم ونقطة الأصل مع الخطّ المرجعيّ (محور $+x$)، فالموقعُ الزاويُّ للجُسيم عند النقطة A في الشكل (18) هو (θ_i) عند اللحظة (t_i)، ويصبح الموقعُ الزاويُّ للجُسيم عند النقطة B (θ_f) عند اللحظة (t_f) نتيجة دوران الجسم بعكس اتّجاه حركة عقارب الساعة. أمّا **الإزاحةُ الزاويّة** ($\Delta\theta$) **Angular displacement**؛ فهي التغيُّر في الموقع الزاويّ، وتساوي الزاوية التي يمسحُها نصف قطر المسار الدائريّ الذي يدورُ مع الجسم.

وأحسبُ الإزاحة الزاويّة ($\Delta\theta$) للجسم الموضح في الشكل (18) كما يأتي:

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

وتُعدُّ الإزاحة الزاويّة موجبةً عند الدوران بعكس اتّجاه حركة عقارب الساعة، بينما تُعدُّ الإزاحة الزاويّة سالبةً عند الدوران باتّجاه حركة عقارب الساعة.

أتحقّق: ما المقصود بالإزاحة الزاويّة لجسم؟



الشكل (18): تغيُّر الموقع الزاويّ لجُسيم على جسمٍ يدورُ بعكس اتّجاه حركة عقارب الساعة.

السرعة الزاويّة Angular Velocity

تعلّمتُ سابقاً حسابَ السرعة الخطيّة المتوسّطة لجسمٍ يتحرّكُ حركةً انتقاليّة من موقعٍ الى آخر. بالمثل، عندما يتحرّك جسمٌ حركةً دورانيّةً يمكنُ تعريف **السرعة الزاويّة المتوسّطة** $(\overline{\omega})$ **Average angular velocity**؛ بأنّها نسبة الإزاحة الزاويّة $(\Delta\theta)$ لذلك الجسم إلى الفترة الزمنية (Δt) التي حدثت خلالها هذه الإزاحة، وتُعطى بالعلاقة الآتية:

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

ووحدةُ قياسِها هي (rad/s). أمّا السرعةُ الزاويّة لجسمٍ عندَ لحظةٍ زمنيّةٍ مُعيّنةٍ؛ فتُسمّى السرعةَ الزاويّةَ اللحظيّة (ω) Instantaneous angular velocity. وعندما تكون السرعة الزاويّة ثابتةً، فإنّ السرعةَ الزاويّةَ المتوسّطة تُساوي السرعة الزاويّة اللحظيّة. وفي هذه الوحدة أينما ورد مصطلح السرعة الزاويّة فإنه يعني السرعة الزاويّة اللحظيّة.

عند دوران جسمٍ بعكس اتّجاه حركة عقارب الساعة تكونُ إزاحته الزاويّة موجبةً؛ لذا فإنّ سرعته الزاويّة موجبةٌ أيضًا. أمّا عند دورانه باتّجاه حركة عقارب الساعة؛ فإنّ إزاحتهُ الزاويّة وسرعته الزاويّة سالبتان.

وأستخدم قاعدة قبضة اليد اليمنى لتحديد اتّجاه السرعة الزاويّة لجسم؛ وذلك عن طريق لفّ أصابع اليد اليمنى حول محور دورانه بحيث تُشير إلى اتّجاه دوران الجسم، فيُشير الإبهام إلى اتّجاه السرعة الزاويّة. أنظر الشكل (19).

فمثلًا؛ عند دوران جسم حول المحور z بعكس اتّجاه حركة عقارب الساعة يكون متّجه السرعة الزاويّة خارجًا من الصفحة على امتداد محور الدوران. أمّا عند دوران الجسم باتّجاه حركة عقارب الساعة حول المحور نفسه فيكونُ مُتّجه السرعة الزاويّة داخلًا إلى الصفحة على امتداد محور الدوران، حيث اتّجاه المحور z عموديّ على مستوى الصفحة.

التسارُع الزاويّ Angular Acceleration

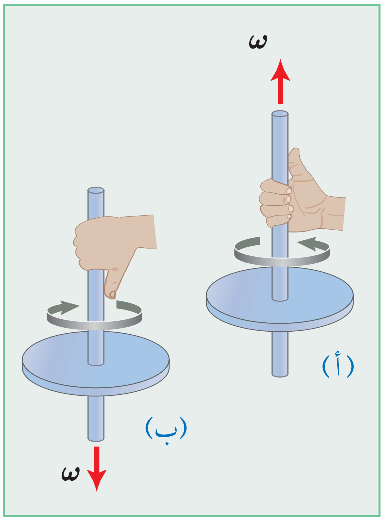
عند تغيّر مقدار السرعة الزاويّة لجسم من (ω_i) إلى (ω_f) خلال فترةٍ زمنيّةٍ (Δt) يكون له تسارُعٌ زاويٌّ، ويُعرّفُ **التسارُع الزاويّ المتوسط Average angular acceleration** بأنه؛ نسبةُ التغيّر في مقدار السرعة الزاويّة إلى الفترة الزمنية (Δt) اللازمة لحدوث هذا التغيّر، رمزه $(\overline{\alpha})$ ويُقاس بوحدة (rad/s^2):

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

أما التسارُع الزاويّ لجسمٍ عند لحظةٍ زمنيّةٍ مُعيّنةٍ؛ فيُسمّى التسارُع الزاويّ اللحظيّ (α) Instantaneous angular acceleration. وعند دوران جسمٍ بتسارُعٍ زاويٍّ ثابتٍ؛ فإنّ تسارُعه الزاويّ المتوسط يُساوي تسارُعه الزاويّ اللحظيّ؛

الربط مع الفلك

كوكبُ الأرض جسمٌ يتحرّك حركةً دورانيّة، ويكون لأجزائه جميعها الإزاحة الزاويّة نفسها، وبالتالي السرعة الزاويّة نفسها، في حين يقطع كلُّ جزءٍ منها مسافاتٍ مختلفةً في كلّ دورةٍ نتيجة اختلاف بُعد كلٍّ منها عن محور الدوران.



الشكل (19): استخدام قاعدة قبضة اليد اليمنى لتحديد اتّجاه السرعة الزاويّة لجسم يدور (أ) بعكس اتّجاه حركة عقارب الساعة، (ب) وجسم يدور باتّجاه حركة عقارب الساعة، عند النظر إليهما من أعلى.

✓ **أتحقّق:** ما المقصودُ بالسرعة الزاويّة المتوسّطة؟

أي أن $\overline{\alpha} = \alpha$. وسوف أستخدمُ مُصطلح التسارُع الزاويّ للإشارة إلى التسارع الزاويّ اللحظيّ؛ للاختصار.

وأستفيدُ من إشارة كل من السرعة الزاويّة والتسارُع الزاويّ في تحديد ما إذا كان الجسم يدور بتسارعٍ أم بتباطؤ؛ فعندما تكون إشارتا السرعة الزاويّة والتسارع الزاويّ متماثلتين؛ فإنّ الجسمَ يدور بتسارع، أما إذا كانت إشارتاهما مختلفتين؛ فإنّ الجسم يدور بتباطؤ.

عندما يدور جسمٌ حول محورٍ ثابت؛ فإنّ كل جُسَيم فيه يدورُ بالزاوية نفسِها خلالَ مدّة زمنيّةٍ مُعيّنة، وبذلك فإن لأجزاء الجسم جميعها السرعة الزاويّة نفسُها والتسارع الزاويّ نفسه. لذا فإنّ الموقع الزاويّ (θ)، والسرعة الزاويّة (ω)، والتسارع الزاويّ (α) تميّز الحركة الدورانية للجسم بأكمله إضافةً إلى الجُسيمات المفردة فيه.

✓ **أتحقّق:** ما المقصود بالتسارع الزاويّ المتوسط؟ وما وحدة قياسه؟

المثال 6

يتسارع الجزء الدوّار في جهاز فصل مكوّنات الدمّ من السكون إلى (3.00×10^3 rad/s) خلال (30.0 s) بتسارُعٍ زاويٍّ ثابت. أحسب مقدار ما يأتي:

أ . التسارُع الزاويّ المتوسط.

ب. السرعة الزاويّة 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:

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

الحلّ:

$\overline{\alpha} = \alpha$.

أ . أستخدم المعادلة الآتية لحساب التسارُع الزاويّ المتوسط:

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

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

ب. أستخدم معادلة التسارع الزاويّ لحساب السرعة الزاويّة:

$$\overline{\alpha} = \frac{\omega_f - \omega_i}{t}$$

$$\omega_f = \omega_i + \overline{\alpha} t = 0 + 1.00 \times 10^2 \times 20.0$$

$$= 2.00 \times 10^3\ \text{rad/s}$$

تمرين

أستخدم الأرقام: يدور إطارُ سيارةٍ بعكس اتّجاه حركة عقارب الساعة؛ بسرعةٍ زاويّة ثابتةٍ مقدارُها (2.0 rad/s) مدّةً زمنيّة مقدارُها (20.0 s)، ثمّ يتسارع بعد ذلك بتسارع زاويٍّ ثابت مقدارُه ($3.5\ \text{rad/s}^2$) مدّة زمنيّة مقدارُها (10.0 s).

أحسبُ مقدار ما يأتي:

أ . الإزاحة الزاويّة للإطار عند نهاية المدة الزمنيّة لحركته بسرعة زاويّة ثابتة.

ب. السرعة الزاويّة للإطار عند نهاية المدة الزمنيّة لحركته بتسارُعٍ زاويٍّ ثابت.

عزم القُصور الذاتيّ والقانون الثاني لنيوتن في الحركة الدورانية
Moment of Inertia and Newton's Second Law for Rotational Motion

عندما يتحرك جسمٌ حركةً دورانيّة فإنّ مقدار تسارُعه الزاويّ يتناسب طرديًّا مع مقدار العزم المُحصّل المؤثّر فيه؛ أي أن:

$$\alpha \propto \sum \tau$$

وهذا يُناظر القانونَ الثاني لنيوتن في الحركة الانتقالية: $a \propto \sum F$؛ حيث استخدمنا العزم المُحصّل مقابل القوّة المُحصّلة، والتسارُع الزاويّ مقابل التسارع الخطّي. وتعلّمتُ أن القانون الثاني لنيوتن يُكتب في الصورة الآتية: $\sum F = ma$؛ حيث تُمثّل كتلة الجسم (m) قصوره الذاتيّ؛ أي مُمانعة الجسم للتغيّر في حركته الانتقاليّة.

فما الـذي يقابل الكتلة في حالـة الحركـة الدورانيـة؟ عـزم القصور الذاتي (I) **Moment of inertia** في الحركة الدورانية يقابل الكتلة (m) في الحركة الانتقالية. ويعدُّ عزم القصور الذاتي مقياسًا لممانعة الجسم لتغيير حالته الحركية الدورانيّة، تمامًا كما الكتلـة (m) مقياس لمُمانعـة الجسم لتغيير حالتـه الحركيـة الانتقاليـة. وبذلك يمكنني كتابةُ العلاقـة الاتيـة للحركـة الدورانيـة، والتي تقابل القانون الثاني لنيوتن في الحركة الانتقالية:

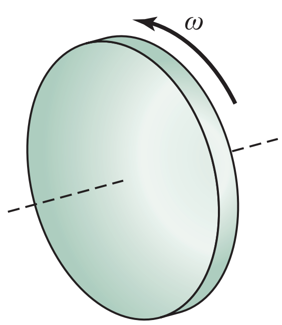
$$\sum \tau = \text{I}\alpha$$

حيث $\sum \tau$ مقدار العزم المحصل المؤثر في جسم أو نظام. وأحسب عزم القصور الذاتي (I) لجسيم نُقطي، كتلته (m)، يبعد مسافة عموديّة (r) عن محور الدوران، باستخدام العلاقة الآتية:

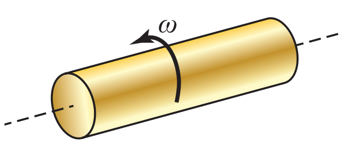
$$\text{I} = mr^2$$

ويُقاس بوحدة (kg.m^2) حسب النظام الدولي للوحدات. ويعتمد عزم القصور الذاتي لجسم على كيفية توزيع كتلته حول محور دورانه. فمثلًا؛ عزم القصور الذاتي للأسطوانة الموضّحة في الشكل (20/ أ) أكبر منه للأسطوانة الموضحة في الشكل (20/ ب) على الرغم من أنّ لهما الكتلة نفسها؛ وذلك لأنّ قُطر الأسطوانة (أ) أكبر من قُطر الأسطوانة (ب). فتحريك الأسطوانة ذات القُطر الأكبر حركة دورانيّة، أو إيقافها، أو تغيير حالتها الحركية الدورانية يكون أصعب منه للأسطوانة الأخرى.

وكلّما توزّعت كتلة الجسم بعيدًا عن محور دورانه؛ فإنّ عزم القصور الذاتي له يكون أكبر. فمثلًا، عزم القصور الذاتي لحلقةٍ رقيقةٍ نصفُ قطرها (r) وكتلتها (m) يساوي (mr^2). أمّا عزم القصور الذاتي لأسطوانة مُصمَتة كتلتُها (m) موزّعةٌ بانتظامٍ على حجم الأسطوانة، ونصف قطرها (r)؛ فيساوي $(\frac{1}{2}mr^2)$. ويوضّح الجدول (1) عزم القصور الذاتي لأجسامٍ مختلفة.



(أ)



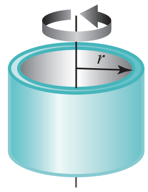
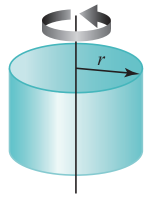
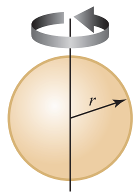
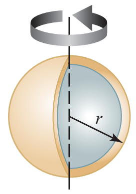
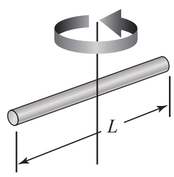
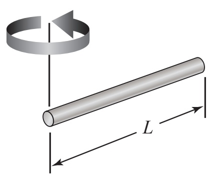
(ب)

الشكل (20): عزم القصور الذاتي للأسطوانة (أ) أكبر منه للأسطوانة (ب) على الرغم من أنّ الكتلة نفسها.

يعتمد عزم القصور الذاتي على موقع محور الدوران، كما هو موضّحٌ في الجدول (1). فعزم القصور الذاتي لقضيب كتلته (m)، وطوله (L)، يدور حول محور عموديّ على القضيب مارًّا بمنتصفه 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 أنّني أحتاجُ إلى عزم أقلّ لتدوير القضيب حول محورٍ عموديٍّ عليه، ويمرُّ في منتصفه مقارنةً مع الحالة عندما يكون محور الدوران عموديًّا عليه ويمرُّ في أحد طرفيه.

✓ **أتحقّق:** ما المقصود بعزم القصور الذاتي؟

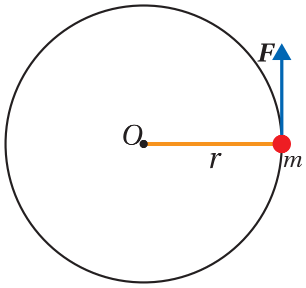
الجدول 1: عزم القصور الذاتي لأجسام مختلفة كتلةُ كلٍّ منها (m).*

الجسم	موضع محور الدوران	الشكل	عزم القصور الذاتي
حلقةٌ رقيقةٌ أو أسطوانةٌ مجوّفة.	يمرّ بالمركز عموديًّا على مستواها.		$I = mr^2$
أُسطوانةٌ مُصمَتة منتظمةٌ أو قرصٌ دائري.	يمرُّ بالمركز عموديًّا على مستواها.		$I = \frac{1}{2}\, mr^2$
كرةٌ مُصمَتة منتظمة.	يمرُّ بالمركز.		$I = \frac{2}{5}\, mr^2$
كرةٌ مجوّفة.	يمرُّ بالمركز.		$I = \frac{2}{3}\, mr^2$
قضيبٌ منتظم.	عموديٌّ على القضيب ويمرُّ بمنتصفه.		$I = \frac{1}{12}\, mL^2$
قضيبٌ منتظم.	عموديٌّ على القضيب ويمرُّ بطرفه.		$I = \frac{1}{3}\, mL^2$

* الجدول ليس للحفظ.

المثال 7

كرةٌ كتلتُها (3.0 kg) مثبّتةٌ في نهاية قضيب فلزيٍّ خفيفٍ طولُه (0.80 m)، وتتحرّك حركةً دورانيّةً في مستوًى أُفقيّ حول محورٍ ثابتٍ عموديٍّ على مستوى الصفحة يمرُّ في النهاية الأخرى للقضيب بتأثير قوّةٍ مماسيّةٍ (F) ثابتةٍ في المقدار، كما هو موضّحٌ في الشكل (21). إذا بدأت الكرة حركتَها من السكون بتسارُعٍ زاويٍّ ثابت؛ بحيث أصبح مقدار سرعتها الزاويّة (8π rad/s) خلال (5.0 s)؛ فأحسبُ مقدار ما يأتي بإهمال كتلة القضيب الفلزيّ:



الشكل (21): كرة في نهاية قضيب فلزي طوله r تتحرّك حركة دورانيّة حول محور ثابت.

أ . التسارُع الزاويّ للكرة.

ب. العزم المُحصّل المؤثّر في الكرة.

جـ. القوّة المماسيّة (F) المؤثّرة في الكرة.

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

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

الحلّ:

أ . الكرة تدور بعكس اتّجاه حركة عقارب الساعة؛ فتكون سرعتها الزاويّة موجبة، وأستخدم المعادلة الآتية لحساب مقدار التسارُع الزاويّ.

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

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

ب. بدايةً أحسبُ عزم القصور الذاتيّ للكرة حول محور دورانها كما يأتي:

$$I = m r^2 = 3.0 \times (0.80)^2 = 1.9 \text{ kg.m}^2$$

ثمّ أحسبُ مقدار العزم المُحصّل المؤثّر في الكرة.

$$\sum\tau = I\alpha = 1.9 \times 5.0 = 9.5 \text{ N.m}$$

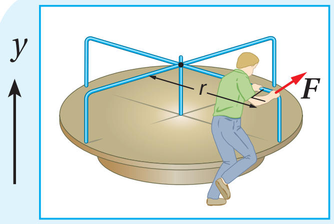
جـ. أستخدم علاقة العزم لحساب مقدار القوّة المماسيّة المؤثّرة.

$$\sum F = F = \frac{\sum\tau}{r}$$

$$= \frac{9.5}{0.80} = 11.9 \text{ N} \approx 12 \text{ N}$$

تمرين

لعبةُ القرص الدوّار الموضّحة في الشكل (22)؛ تتكوّن من قرصٍ مُصمتٍ قابلٍ للدّوران حول محورٍ ثابتٍ يمرُّ في مركزه باتّجاه محور y. أثّر شخصٌ بقوةٍ مماسيّة (F) ثابتةٍ في المقدار عند حافّة القرص مقدارُها (250 N). إذا علمتُ أنّ كتلة القرص الدوّار (50.0 kg) ونصف قطره (2.0 m)، وبإهمال قوى الاحتكاك وافتراض قرص اللعبة منتظمَ توزيع الكتلة، وبدأت اللعبة الدورانَ من السكون بتسارُعٍ زاويٍّ ثابتٍ بعكس اتّجاه حركة عقارب الساعة، فأحسبُ مقدار ما يأتي:



الشكل (22): لعبة القرص الدوّار.

أ . العزمُ المحصّل المؤثّر في اللعبة.

ب. التسارُع الزاويّ للّعبة.

جـ. السرعة الزاويّة للّعبة بعد (2.0 s) من بدء دورانها.

د. التسارع الزاويّ للّعبة عندما يجلس طفلٌ كتلتُه (20.0 kg) على بُعد (1.5 m) من محور الدوران، بافتراض الطفل جُسيم نُقطي.

مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** ما الكمّيات الفيزيائيّة اللازمة لوصف الحركة الدورانية لجسم؟ وما عزم القصور الذاتي؟

2. **أُفسّر:** تدور إطارات سيارة بسرعة زاويّة ثابته تساوي (5.0 rad/s). هل التسارع الزاويّ للإطارات موجبٌ أم سالبٌ أم صفر؟ أُفسّر إجابتي.

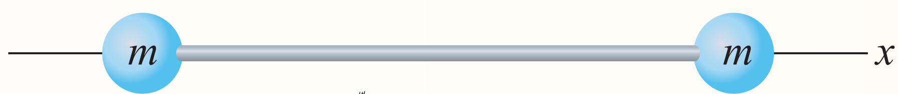
3. **أُفسّر:** السرعة الزاويّة لجسمٍ عند لحظةٍ زمنيةٍ مُعيّنةٍ تساوي (−3 rad/s)، وتسارعُه الزاويّ عند اللحظة نفسها ($2\ rad/s^2$). أُجيب عمّا يأتي:
   - أ . هل يدور الجسم باتّجاه حركة عقارب الساعة أم بعكسه؟ أُفسّر إجابتي.
   - ب. هل يتزايد مقدار سرعته الزاويّة أم يتناقص أم يبقى ثابت؟ أُفسّر إجابتي.

4. **أُحلّل وأستنتج:** يدور إطار درّاجة بسرعة زاويّة ثابتة حول محورٍ ثابت. كيف يتغيّر مقدار السرعة الزاويّة لأجزاء الإطار بالانتقال من داخله إلى حافّته الخارجية؟

5. علامَ يعتمدُ عزم القصور الذاتي لجسم؟

6. **أحسب:** مثقبٌ كهربائيٌّ يدورُ جزؤه الدوّار من السكون بتسارعٍ زاويٍّ ثابت، ويُصبح مقدار سرعته الزاويّة ($2.6 \times 10^3\ rad/s$) بعد (4.0 s) من بدء دورانه. أحسبُ مقدار التسارُع الزاويّ للجزء الدوّار من المثقب.

7. **أقارن:** قضيب فلزي خفيف ورفيع طوله (L) مُثبّت في طرفيه كرتين مُتماثلتين مهملتي الأبعاد، كتلة كلٍّ منهما (m)، كما هو موضّحٌ في الشكل. في الحالة الأولى؛ دُوِّر النظام المكوّن من القضيب الفلزّي والكرتين حول محورٍ ثابتٍ عمودي على مستوى الصفحة يمرُّ بمنتصف القضيب الفلزّي. وفي الحالة الثانية؛ دُوِّر النظام حول محورٍ ثابتٍ عموديٍّ على مستوى الصفحة يمرُّ بمركز إحدى الكرتين عند أحد طرفي القضيب الفلزّي. بإهمال كتلة القضيب الفلزّي مُقارنةً بكتلتي الكرتين، في أي الحالتين السابقتين يلزمني عزمٌ محصّلٌ أكبر لبدء تدوير النظام؟ أُفسّر إجابتي.



نظام الكرتين والقضيب الفلزّي.

الدرس 3

الزخَم الزاويّ
Angular Momentum

الفكرة الرئيسة:

تلزمُ معرفة الزخَم الزاويّ وحفظه لتفسير بعض المشاهدات في الحياة اليومية، وأستفيد منه في تطوير مهاراتي في مجالاتٍ مختلفة؛ منها الألعاب الرياضية.

نتاجات التعلّم:

- أحسبُ الطاقة الحركية الدورانية لجسم.
- أُعرّف الزخَم الزاويّ لجسم.
- أُثبت قانون حفظ الزخَم الزاويّ لنظام معزول.
- أُعبّر عن قانون حفظ الزخَم الزاويّ بمعادلة رياضية.

المفاهيم والمصطلحات:

الزخَم الزاويّ Angular Momentum

قانون حفظ الزخَم الزاويّ Law of Conservation of Angular Momentum

الطاقة الحركيّة الدورانيّة Rotational Kinetic Energy

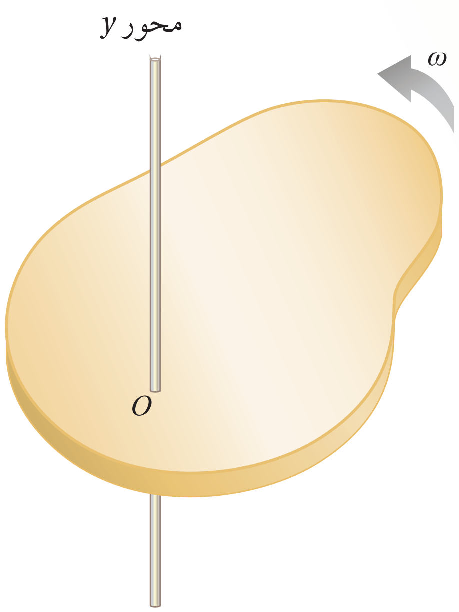
الطاقة الحركيّة الخطّيّة لجسمٍ ترتبط بحركته الانتقاليّة. أمّا الجسم الذي يدور حول محورٍ ثابتٍ فإنّه لا ينتقلُ من مكانٍ إلى آخر، ولكنّه يمتلك طاقةً حركيّةً دورانيّة.

يوضّح الشكل (23) جسمًا يتحرّك حركةً دورانيّةً حولَ محورٍ ثابتٍ (محور y) بسرعةٍ زاويّةٍ ثابتة (ω). تُحسبُ الطاقة الحركيّة الدورانيّة (KE_R) لهذا الجسم بالعلاقة الآتية:

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

حيث (I) عزمُ القصور الذاتي للجسم، و (ω) سرعته الزاويّة. ومثل أشكال الطاقة الأُخرى؛ تُقاس الطاقة الحركيّة الدورانيّة بوحدة (J).

أُلاحظُ التناظر بين الطاقة الحركية الخطّيّة ($\frac{1}{2} m v^2$) والطاقة الحركيّة الدورانيّة ($\frac{1}{2} I\omega^2$)، حيثُ تُقابل الكمّيّتان (ω ، I) في الحركة الدورانية الكمّيتين (v ، m) في الحركة الخطّيّة على الترتيب.



الشكل (23): جسمٌ يتحرّك حركةً دورانيّةً حول محور y ؛ بسرعةٍ زاويّةٍ ثابتة (ω).

أتحقّق: علامَ تعتمدُ الطاقة الحركية الدورانية لجسمٍ؟ وما وحدة قياسها؟

المثال 8

يتحرّكُ جزيءُ أُكسجينٍ (O_2) حركةً دورانيّةً حول محورٍ ثابتٍ باتجاه محور z، عموديٍّ على مُنتصف المسافة بين ذرتيّ الأكسجين المكوّنتين له، بسرعةٍ زاويّةٍ ثابتةٍ مقدارُها (4.6×10^{12} rad/s). إذا علمتُ أنّ عزم القصور الذاتيّ لجزيء الأكسجين حول محور دورانه z يساوي (1.95×10^{-46} kg.m^2) عند درجة حرارة الغرفة؛ فأحسبُ مقدار الطاقة الحركيّة الدورانيّة للجزيء.

المعطيات:

$$\omega = 4.6 \times 10^{12}\ \text{rad/s},\quad \text{I} = 1.95 \times 10^{-46}\ \text{kg.m}^2.$$

المطلوب:

$$KE_R = ?$$

الحلّ:

أحسبُ الطاقة الحركيّة الدورانيّة كما يأتي:

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

$$= \frac{1}{2} \times 1.95 \times 10^{-46} \times (4.6 \times 10^{12})^2$$

$$= 2.06 \times 10^{-21}\ \text{J}$$

أفكّر: في المثال 8؛ إذا تغيّر موقع محور الدوران مع بقاء مقدار السرعة الزاويّة ثابتًا، فهل يتغيرُ مقدار الطاقة الحركيّة الدورانيّة؟ أوضّح إجابتي. أناقشُ أفراد مجموعتي، للتوصل إلى إجابة عن السؤال.

تمرين

قرصٌ مصمتٌ منتظمٌ متماثلٌ كتلتهُ (2.0 kg)، ونصف قطره (0.50 m)، يتحرّك حركةً دورانيّةً بسرعةٍ زاويّةٍ ثابتةٍ مقدارُها (8.0 rad/s) حول محورٍ ثابتٍ عموديٍّ على مركزه. بالاستعانة بالجدول (1)؛ أحسب الطاقة الحركيّة الدورانيّة للقرص.

الزخَم الزاويّ وحفظهُ

Angular Momentum and it's Conservation

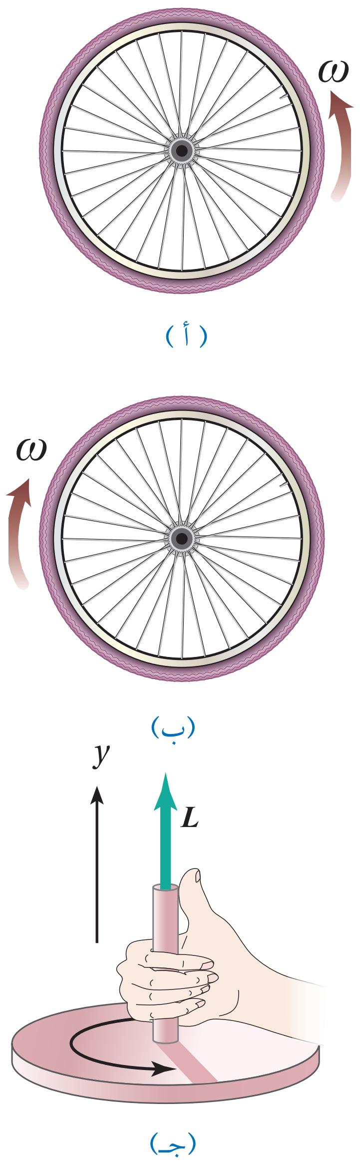
درستُ في الوحدة الأولى الزخَم الخطّي لأجسامٍ مُتحرّكةٍ حركة انتقالية. وفي أثناء دراستي لهذه الوحدة؛ وجدت أنّ القوّة يقابلها العزم والكتلة يقابلها عزم القصور الذاتي، في الحركة الدورانيّة. وبصورة مماثلة يوجد للزخم الخطّي ($\boldsymbol{p}$) نظيرٌ دورانيٌّ يُسمّى **الزخَم الزاويّ** (L) **Angular momentum**؛ يُعرف بأنّه يساوي ناتج ضربِ عزم القصور الذاتي للجسم أو النظام في سرعته الزاويّة. وهو كمّية مُتّجهةٌ، رمزه ($\boldsymbol{L}$)، ووحدةُ قياسه ($kg.m^2/s$) حسبَ النظام الدولي للوحدات.

يُعطى مقدار الزخَم الزاويّ لجسمٍ يتحرّك حركةً دورانيةً حول محورٍ ثابتٍ بالعلاقة:

$$L = I\omega$$

ويكون اتّجاهُ الزخَم الزاويّ باتّجاه السرعة الزاويّة المُتّجهة، حيث يكون خارجًا من الصفحة على امتداد محور الدوران (z) عند دوران الجسم بعكس اتّجاه حركة عقارب الساعة، وهنا يُعدّ الزخَم الزاويّ موجبًا، كما هو موضّحٌ في الشكل (24/ أ). أمّا عند دوران الجسم باتّجاه حركة عقارب الساعة فيكونُ مُتّجه الزخَم الزاويّ داخلًا إلى الصفحة على امتداد محور الدوران، ويعدُّ الزخَم الزاويّ سالبًا كما هو موضح في الشكل (24/ب).

يوضّح الشكل (24/جـ) استخدام قاعدة قبضة اليد اليمنى لتحديد اتجاه الزخَم الزاويّ لجسم يدور حول المحور y؛ وذلك عن طريق لفّ أصابع اليد اليمنى حول محور الدوران بحيث تُشير إلى اتّجاه دوران الجسم، فيُشير الإبهام إلى اتّجاه الزخَم الزاويّ ($\boldsymbol{L}$).



الشكل (24):
(أ) الزخَم الزاويّ موجبٌ.
(ب) الزخَم الزاويّ سالبٌ.
(جـ) استخدام قاعدة قبضة اليد اليمنى لتحديد اتّجاه الزخَم الزاويّ.

✓ **أتحقّق**: ما الزخَم الزاويّ؟ وعلامَ يعتمد؟ وما وحدة قياسه؟

الزخَم الزاويّ والعزم Angular Momentum and Torque

ينصُّ القانون الثاني لنيوتن في الحركة الخطّية على أنّ القوّة المُحصّلة المؤثّرة في جسمٍ تُساوي المعدّل الزمنيّ للتغيُّر في زخَمة الخطّي ($\sum \boldsymbol{F} = \frac{d\boldsymbol{p}}{dt}$). ويمكنُ كتابةُ علاقة مماثلة في الحركة الدورانيّة بدلالة الزخَم الزاويّ كما يأتي:

$$\sum \boldsymbol{\tau} = \frac{d\boldsymbol{L}}{dt}$$

أي أنّ العزمَ المُحصّل المؤثّر في جسمٍ يتحرّك حركةً دورانيّةً حول محورٍ ثابتٍ يُساوي المعدّل الزمنيّ للتغيّر في زخَمه الزاويّ حولَ المحور نفسه. ألاحظ أنّ العزمَ المُحصّل ($\sum \boldsymbol{\tau}$) يُسبّب تغيُّر الزخَم الزاويّ ($d\boldsymbol{L}$)، تمامًا كما تُسبّب القوّة المُحصّلة ($\sum \boldsymbol{F}$) تغيُّر الزخَم الخطّي ($d\boldsymbol{p}$).

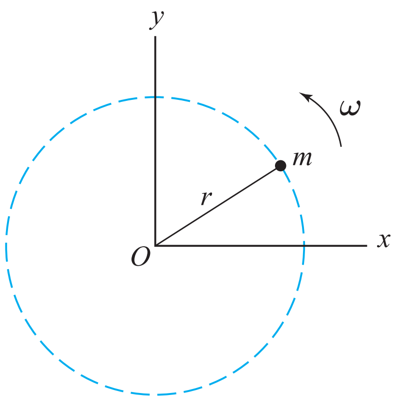
وعند حدوث تغيُّر في الزخَم الزاويّ ($\Delta \boldsymbol{L}$) خلال فترةٍ زمنيّةٍ (Δt)؛ فإنّه يُمكن كتابة العلاقة السابقة في الحركة الدورانيّة كما يأتي:

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

✓ **أتحقّق:** أوضّح العلاقة بين العزم المحصّل المؤثّر في جسم والمعدل الزمني لتغيّر زخمه الزاويّ. أُفسّر إجابتي.

المثال 9

يتحرّك جُسيمٌ كتلته (50.0 g) حول محورٍ ثابتٍ (محور z) عند النقطة (O)، في مسارٍ دائريٍّ نصفُ قطره (20.0 cm)، بسرعةٍ زاويّةٍ ثابتةٍ مقدارُها (5.0 rad/s) بعكس اتّجاه دوران عقارب الساعة، كما هو موضّحٌ في الشكل (25). أحسبُ مقدار الزخَم الزاويّ للجُسيم حول هذا المحور، وأُحدّد اتّجاهه.



الشكل (25): جسيم يتحرّك في مسارٍ دائريٍّ نصفُ قطره (r) حول محور z.

المُعطيات:

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

المطلوب:

$$\boldsymbol{L} = ?$$

الحلّ:

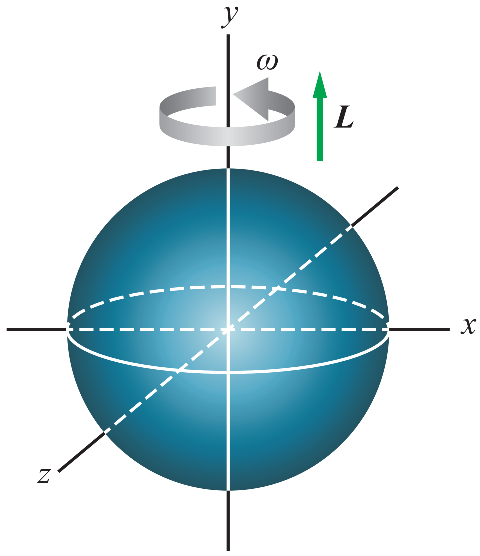
أحسب مقدارَ الزخَم الزاويّ للجُسيم بالعلاقة:

$$L = \text{I}\omega = mr^2\,\omega$$
$$= 50.0 \times 10^{-3} \times (20.0 \times 10^{-2})^2 \times 5.0$$
$$= 1.0 \times 10^{-2}\ \text{kg.m}^2/\text{s}$$

باستخدام قاعدة قبضة اليد اليمنى؛ فإنّ مُتّجه الزخَم الزاويّ يكون خارجًا من الصفحة على امتداد محور الدوران.

المثال 10

كرةٌ مُصمَتة منتظمةٌ متماثلةٌ كتلتُها (5.0 kg) ونصفُ قطرها (10.0 cm)، تتحرّك حركةً دورانيّةً حول محورٍ ثابتٍ (محور y) يمرُّ في مركزها، بسرعةٍ زاويّةٍ ثابتةٍ مقدارُها (20 rad/s) بعكس اتّجاه حركة عقارب الساعة عند النظر إليها من أعلى، كما هو موضّحٌ في الشكل (26). أحسبُ مقدار الزخَم الزاويّ للكرة حول هذا المحور، وأُحدّد اتّجاهه.



الشكل (26): كرةٌ مُصمتةٌ متماثلةٌ منتظمةٌ تدور حول محورٍ ثابتٍ يمرُّ في مركزها.

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

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

المطلوب: $L = ?$

الحلّ:

أستخدم العلاقة الآتية لحساب مقدار الزخَم الزاويّ لجسمٍ يدور حول محورٍ ثابت، وباستخدام الجدول (1)؛ أجد أنّ عزم القصور الذاتي لكرةٍ مُصمَتة منتظمةٍ متماثلةٍ يساوي ($\frac{2}{5}mr^2$).

$$L = \text{I}\omega = \frac{2}{5}mr^2\omega$$

$$= \frac{2}{5} \times 5.0 \times (10.0 \times 10^{-2})^2 \times 20$$

$$= 0.4\ \text{kg.m}^2/\text{s}$$

الزخَم الزاويّ للكرة موجبٌ، إذ يكون اتّجاه الزخَم الزاويّ باتّجاه محور y الموجب عند النظر إليها من أعلى؛ لأنّ الكرة تدور بعكس اتّجاه حركة عقارب الساعة كما يبدو للناظر.

تمرين

في المثال السابق، إذا تغيّر مقدار السرعة الزاويّة للكرة حول محور الدوران نفسه بتسارع زاويّ ثابت، بحيث أصبح (40 rad/s) خلال (5 s)، فأحسبُ مقدار العزم المحصّل المؤثّر في الكرة خلال هذه الفترة الزمنيّة.

حفظُ الزخَم الزاويّ Conservation of Angular Momentum

درستُ سابقًا قانون حفظ الزخَم الخطّي لنظامٍ معزول، حيثُ تساوي القوّة المُحصّلة المؤثّرة في النظام صفرًا. وأتوصّل إلى علاقةٍ مُماثلةٍ في الحركة الدورانيّة عندما يُساوي العزم المحصّل المؤثّر في جسمٍ أو نظامٍ صفرًا $(\sum \boldsymbol{\tau} = 0)$؛ وهنا يبقى الزخَم الزاويّ ثابتًا مع مرور الزمن، أي أنّ:

$$\frac{d\boldsymbol{L}}{dt} = 0$$

وهذا يعني؛ أنّ الزخَم الزاويّ $(\boldsymbol{L})$ محفوظ، وأستنتج من العلاقة السابقة أنّ:

$$\boldsymbol{L}_{\mathrm{f}} = \boldsymbol{L}_{\mathrm{i}}$$

تُعبّر هذه العلاقة عن **قانون حفظ الزخَم الزاويّ Law of conservation of angular momentum**، الذي ينصُّ على أنّ: «الزخَم الزاويّ لنظامٍ معزولٍ يبقى ثابتًا في المقدار والاتّجاه»، إذ يكونُ العزم المحصّل المؤثّر في النظام المعزول صفرًا. أي أنّ الزخَم الزاويّ الابتدائيّ لنظامٍ معزولٍ يُساوي زخَمه الزاويّ النهائيّ.

أما إذا أُعيد توزيع كتلة النظام المعزول الذي يتحرّك حركةً دورانيّة؛ فإنّ عزمَ القصور الذاتيّ والسرعة الزاويّة للنظام يتغيّران بحيث يبقى الزخَم الزاويّ ثابتًا. وبما أنّ $(L = \mathrm{I}\omega)$، فإنّه عند تغير (I) يجب أن تتغيّر (ω) للنظام بحيث يبقى الزخَم الزاويّ ثابتًا. وأُعبّر عن ذلك رياضيًّا كما يأتي:

$$\mathrm{I}_{\mathrm{f}}\,\omega_{\mathrm{f}} = \mathrm{I}_{\mathrm{i}}\,\omega_{\mathrm{i}} = constant$$

يبيّن الشكل (27) مُتزلّجًا على الجليد يدور حول محورٍ عموديٍّ على سطح الأرض ويمرُّ بمركز كتلته. يمكنُ التعامُل مع المُتزلّج على أنّه نظامٌ معزولٌ حيثُ قوّة وزنه والقوة العموديّة تؤثّران في الاتّجاه الرأسيّ وعزم كلٍّ منهما حول محور الدوران يساوي صفرًا. أضفُ إلى ذلك، أنّ مقدارَ قوّة الاحتكاك بين الزلاجات والجليد صغيرٌ ويمكنُ إهمال العزم الناتج عنه حول محور الدوران. وهذا يعني أنّ الزخَم الزاويّ للمُتزلّج محفوظٌ $(\mathrm{I}\,\omega = constant)$. وعندما يضمّ المتزلج قدميه وذراعيه نحو جسده يقلُّ عزمُ قصوره الذاتي؛ لذا يزداد مقدارُ سرعته الزاويّة بحيثُ يبقى زخَمه الزاويّ ثابتًا.

✓ **أتحقّق:** علامَ ينص قانون حفظ الزخَم الزاويّ؟

(أ) متزلج يدور بسرعة زاوية ω_{i}.

(ب) متزلج يدور بسرعة زاوية ω_{f}.

الشكل (27): يقل عزم القصور الذاتي للمتزلج عندما يضم يديه نحو جسمه ويضم قدميه معًا، فيزداد مقدار سرعته الزاويّة بحسب قانون حفظ الزخم الزاويّ.

المثال 11

ثلاثة أطفال كتلهم (20 kg، 28 kg، 32 kg) يقفون عند حافّة لعبة دوّارة على شكل قرصٍ دائري منتظم كتلته $M = 100$ kg، ونصف قطره $r = 2.0$ m، ويدور بسرعةٍ زاويّةٍ ثابتة مقدارها 2.0 rad/s، حول محور دوران ثابت عموديّ على سطح القرص ويمرُّ في مركزه باتّجاه محور y. تحرّك الطفل الذي كتلته 20 kg ووقف عند مركز القرص. أحسبُ مقدار السرعة الزاويّة الجديد للعبة الدوّارة.

المُعطيات:

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

المطلوب:

$$\omega_f = ?$$

الحلّ:

يمكن التعامل مع النظام على أنّه معزولٌ؛ لذا يكون الزخَم الزاويّ محفوظًا. أُطبّقُ قانون حفظ الزخَم الزاويّ:

$$L_i = L_f$$

$$I_i\,\omega_i = I_f\,\omega_f$$

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

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

عزم القصور الذاتيّ النهائيّ (I_f) للنظام يساوي مجموع عزوم القصور الذاتيّة لطفلين فقط والقرص؛ لأنّ عزم القصور الذاتيّ للطفل الذي كتلته 20 kg يساوي صفرًا؛ لأنّهُ يقف عند مركز القرص الذي يمرُّ فيه محور الدوران، وأحسبهُ 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 أنّ:

$$(520)\ (2) = 440\ \omega_f$$

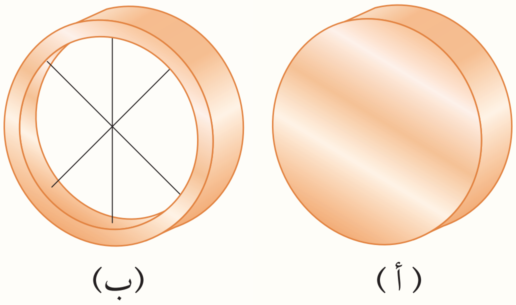
ومنها أجدُ أنّ مقدار السرعة الزاويّة النهائي يساوي:

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

مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** ما الزخَم الزاويّ؟ وعلامَ ينص قانون حفظ الزخَم الزاويّ؟ علامَ تعتمد الطاقة الحركيّة الدورانيّة لجسمٍ يدور حول محورٍ ثابت؟

2. **أُحلّل وأستنتج:** يبيّنُ الشكل المجاور أُسطوانتين إحداهما مُصمَتةٌ والأُخرى مجوّفة، متماثلتين في الكتلة والأبعاد والسرعة الزاويّة، وتدوران حول محورٍ ثابتٍ يمرُّ في المركز الهندسي لكلٍّ منهما. بالاستعانة بالشكل المجاور؛ أجيب عن السؤالين الآتيين:



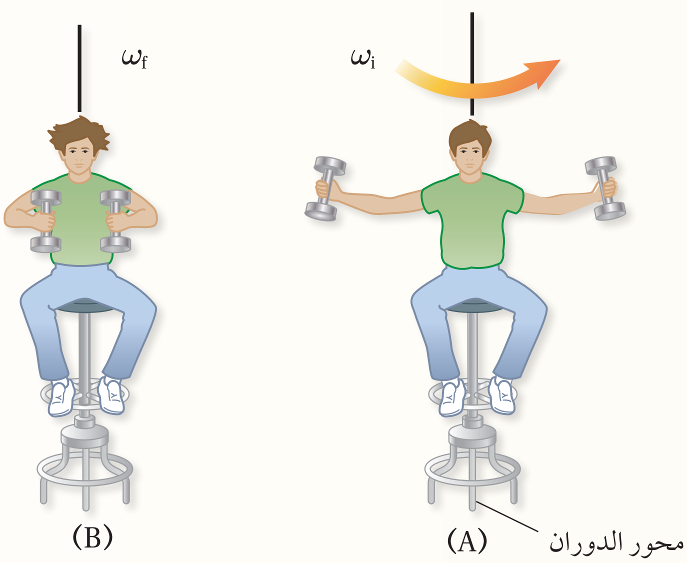
أ . **أقارنُ** بين مقداري الزخَم الزاويّ للأسطوانتين، هل هما متساويان أم لا؟ أُفسّر إجابتي.

ب. **أقارنُ** بين مقداري الطاقة الحركية الدورانية للأسطوانتين، هل هما متساويان أم لا؟ أُفسّر إجابتي

3. **التفكير الناقد:** يجلس طالبٌ على كرسيٍّ قابلٍ للدوران حول محورٍ رأسي، ويُمسك ثقلًا بكلِّ يدٍ. بدايةً؛ يدور الطالب والكرسيُّ بسرعةٍ زاويّة (ω_i) ويداه ممدودتان، كما هو موضّحٌ في الشكل A. إذا طلب المعلّم من الطالب ضمّ ذراعيه؛ كما في الشكل B؛ فماذا يحدث لكلٍّ من:

أ . عزمُ قصوره الذاتي؟

ب. سرعتهُ الزاويّة النهائيّة؟



اتّزان الجسور
Equilibrium of Bridges

جسر عبدون

يتطلّب بناءُ المنشآت التي أراها من جسور وسدودٍ ومبانٍ إلى ناطحات السحاب من المصمّمين والمهندسين المعماريين تحديدَ القوى المؤثرة في هياكلها وتراكيبها؛ للمحافظة عليها ثابتةً ومتزنةً سكونيًّا وعدم انهيارها. ويُعنَى الاتّزان السكونيّ بحساب القوى المؤثّرة في هذه الهياكل والتراكيب، لتحديد إذا كانت قادرة على تحمّل هذه القوى دونَ حدوث تشوّهٍ أو تصدّعٍ أو كسرٍ فيها. وهذا الإجراءُ الذي يتّبعه المصمّمون والمهندسون يُمكّنهم من حساب القوى المؤثّرة في مكوّنات هياكل وتراكيب المباني والجسور والآلات والمركبات وغيرها.

أُلاحظ في حياتي اليوميّة جسورًا مختلفةَ التصاميم، يتعّرض كلٌّ منها لقوًى مختلفةٍ تؤثّر في مكوّناته، تعمل على شدّها أو ضغطها. إذ يؤثّر فيها قوى ضغطٍ تجعلُها تنكمش وتتقلّص، وقوى شدٍّ تجعلُها تتمدّد ويزداد طولها؛ كما هو موضّحٌ في الشكل؛ لذا يجب أخذ هذه القوى في الحسبان عند تصميم أي جسر؛ كي لا يتعرّض إلى التصدُّع والالتواء والانكماش، لعدم مقدرته على تحمّلها، وإيجاد وسائل وتصاميم مناسبة تعمل على توزيع هذه القوى على مختلف أجزاء الجسر بالشكل الذي يمنع تمركُزَها في منطقةٍ واحدة.

لرسم أفضل التصاميم وتنفيذها باستخدام المواد المناسبة؛ يراعي المصمّمون والمهندسون المعماريون في مراحل تصميم الجسور المختلفة وإنشائها تحقيقَ شرطي الاتّزان في مكوناتها جميعًا. ولتكون الجسورُ أنظمةً متّزنةً؛ يجب أخذُ قياساتٍ دقيقةٍ مضبوطةٍ لهذه القوى ومواقع دعامات الجسر والمسافات بينها ومقدار أكبر ثقل يُمكن أن يتحمّله الجسر دون أن ينهار.

1. أضعُ دائرةً حول رمز الإجابة الصحيحة لكلّ جملة ممّا يأتي:

1. جسمان متماثلان A و B على سطح الأرض؛ الجسمُ A عند خط الاستواء، والجسم B عند قطبها الشمالي. أيّ ممّا يأتي يُعبِّر بشكلٍ صحيح عن العلاقة بين سرعتي الجسمين الزاويّة؟

أ. $\omega_A = \omega_B \neq 0$ ب. $\omega_A > \omega_B$ جـ. $\omega_A < \omega_B$ د. $\omega_A = \omega_B = 0$

2. وحدة قياس الزخَم الزاويّ حسب النظام الدولي للوحدات هي:

أ. N.m/s ب. kg.m/s جـ. N/s د. $kg.m^2/s$

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

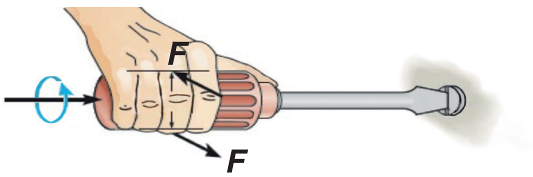
أ. N.m/s ب. $kg.m^2$ جـ. $kg.m^2/s$ د. kg.m/s

4. عند دوران أُسطوانةٍ مُصمَتةٍ متماثلةٍ حول محورٍ ثابتٍ مدّةً زمنيّةً معيّنةً فإنّ مقدار الإزاحة الزاويّة:

أ. يكون متساويًا لأجزائها جميعها. ب. لا يعتمد على زمن دوران الجسم؛ فهو يساوي (2π rad) دائمًا.

جـ. يكون أكبرَ للجُسيمات القريبة من محور الدوران. د. يكون أكبرَ للجُسيمات البعيدة من محور الدوران.

5. تستخدم سلمى كما يُبيّن الشكل مِفكّ براغي لفكّ برغيٍّ ولم تتمكّن من ذلك. يجب على سلمى استخدام مفكّ براغي يكون مقبضه:



أ. أطولَ من مقبض المفكّ المستخدم. ب. أقصرَ من مقبض المفكّ المستخدم.

جـ. أكثرَ سُمكًا من سُمك المقبض المستخدم. د. أقلَّ سُمكًا من سُمك المقبض المستخدم.

6. يستخدمُ خالدٌ كما يُبيّن الشكل مفتاح شدٍّ لفكِّ صامولة إطار سيارة ولم يتمكّن من ذلك. يجب على خالد استخدام مفتاح شدٍّ يكون مقبضه:

أ. أطولَ من مقبض مفتاح الشدّ المستخدم. ب. أقصرَ من مقبض مفتاح الشدّ المستخدم.

جـ. أكثرَ سُمكًا من سُمك مفتاح الشدّ المستخدم. د. أقلّ سُمكًا من سُمك مفتاح الشدّ المستخدم.

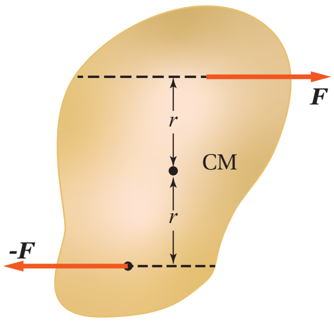
7. كُسر مَضرب بيسبولٍ منتظم الكثافة في موقع مركز كتلته إلى جزأين؛ كما هو موضّحٌ في الشكل. إنّ الجزء ذا الكتلة الأصغر هو:

أ. الجزء الموجود على اليمين.

ب. الجزء الموجود على اليسار.

جـ. كلا الجزأين له الكتلة نفسُها.

د. لا يمكن تحديده.



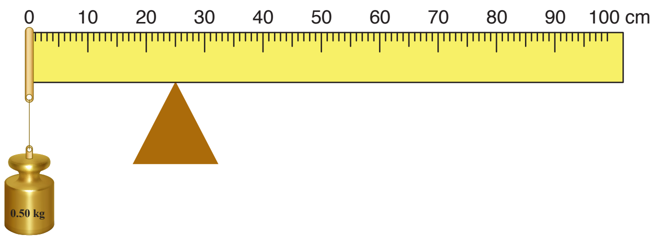
8. الشكل المجاور يبيّن قوّتين متساويتين مقدارًا ومتعاكستين اتجاهًا تؤثّران على بُعدٍ متساوٍ من مركز كتلة جسمٍ موجودٍ على سطحٍ أملس. أيُّ الجمل الآتية تصفُ بشكلٍ صحيحٍ حالة الجسم الحركيّة عند اللحظة المُبيّنة؟

أ. الجسم في حالة اتّزانٍ سكونيٍّ؛ حيث القوّة المحصّلة المؤثّرة فيه تساوي صفرًا.

ب. الجسم ليس في حالة اتّزانٍ سكونيٍّ، ويبدأ الدوران بعكس اتّجاه حركة عقارب الساعة.

جـ. الجسم في حالة اتّزانٍ سكونيٍّ، حيث العزم المحصّل المؤثّر فيه يساوي صفرًا.

د. الجسم ليس في حالة اتّزان سكونيٍّ، ويبدأ الدوران باتّجاه حركة عقارب الساعة.



9. مسطرةٌ متريّةٌ مُنتظمةٌ متماثلةٌ ترتكزُ على نقطةٍ عند التدريج (25 cm). عُلّق ثقلٌ كتلتُه (0.50 kg) عند التدريج (0 cm) للمسطرة، فاتّزنت أُفقيًّا، كما هو موضّحٌ في الشكل المجاور. إنّ مقدار كتلة المسطرة المتريّة يساوي:

أ. 0.25 kg ب. 0.50 kg جـ. 0.10 kg د. 0.20 kg

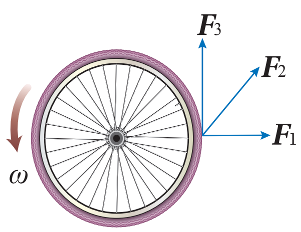
10. جُسيمان نقطيّان البُعد بينهما (r). إذا علمتُ أنّ $(m_1 = 4m_2)$؛ فإنّ موقع مركز الكتلة يكون:

أ. في منتصف المسافة بين الجُسيمين.

ب. بين الجُسيمين، وأقرب إلى (m_1).

جـ. بين الجُسيمين، وأقرب إلى (m_2).

د. خارج الخطّ الواصل بين الجُسيمين، وأقرب إلى (m_1).



11. تؤثّر ثلاث قوًى لها المقدار نفسُه في إطارٍ قابلٍ للدوران حول محورٍ ثابتٍ عموديٍّ على مستوى الصفحة مارًّا في مركزه. أيُّ هذه القوى يكون عزمها هو الأكبر؟

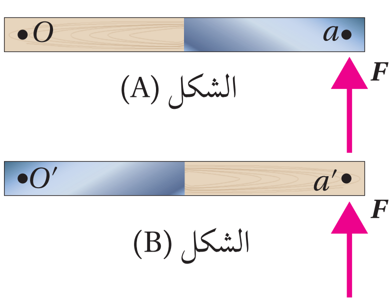
أ. F_1 ب. F_2

جـ. F_3 د. جميعُها لها مقدار العزم نفسه.

12. كرةٌ مُصمَتةٌ وكرةٌ مجوّفة، لهما الكتلة نفسُها ونصفُ القطر نفسه، تدوران بمقدار السرعة الزاويّة نفسه. أيُّ الكرتين مقدارُ زخَمها الزاويّ أكبر؟

أ. الكرة المُصمَتة. ب. الكرة المجوّفة. جـ. لهما مقدار الزخَم الزاويّ نفسه. د. لا يُمكن معرفة ذلك.

أقرأ الفقرة الآتية، ثم أُجيب عن السؤالين (13 و 14).



يوضّح الشكل المجاور مسطرة متريّةً نصفُها خشبٌ ونصفُها الآخر فولاذ. بدايةً؛ المسطرةُ قابلةٌ للدوران حول محورٍ عموديٍّ عليها عند نهايتها الخشبيّة (النقطة O)، أنظرُ الشكل (A)، وأثرتُ فيها بقوة (F) عند نهايتها الفولاذية (النقطة a). بعد ذلك؛ جعلتُ المسطرة قابلةً للدوران حول محورٍ عموديٍّ عليها عند نهايتها الفولاذيّة (النقطة O')، أنظر الشكل (B)، وأثرتُ فيها بالقوة (F) نفسها عند نهايتها الخشبية (النقطة a').

13. أيُّ العلاقات الآتية صحيحةٌ لعزميّ القصور الذاتي للمسطرتين حول محوري دورانهما؟

أ. $I_A > I_B$ ب. $I_A < I_B$ جـ. $I_A = I_B$ د. $I_A = I_B = 0$

14. أيُّ العلاقات الآتية صحيحةٌ حول مقداري التسارُع الزاويّ للمسطرتين حول محوري دورانهما؟

أ. $\alpha_A > \alpha_B$ ب. $\alpha_A < \alpha_B$ جـ. $\alpha_A = \alpha_B$ د. $\alpha_A = -\alpha_B$

15. عندما تؤثّر قوّةٌ في جسمٍ؛ فإن عزمها يكون صفرًا عندما:

أ. يتعامد مُتّجه القوّة مع مُتّجه موقع نقطة تأثيرها.

ب. يتزايد مقدار السرعة الزاويّة للجسم.

جـ. يمرُّ خطُّ عمل القوّة بمحور الدوران.

د. يتناقص مقدار السرعة الزاويّة للجسم.

16. يجلس طفلان على طرفي لعبةٍ (see – saw) مُتّزنةٍ أُفقيًّا. عند تحرُّك أحد الطفلين مُقتربًا من نقطة الارتكاز؛ فإنّ الطرفَ الذي يجلس عليه:

أ. يرتفع لأعلى. ب. ينخفض لأسفل.

جـ. يبقى في وضعه الأُفقي ولا يتغير. د. قد يرتفع أو ينخفض حسب وزن الطفل.

2. أُفسّرُ ما يأتي:

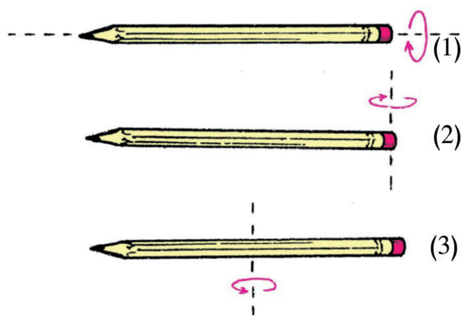
أ. عند حساب العزم المحصّل المؤثّر في جسمٍ؛ فإنّني أهملُ القوى التي يمرُّ خطُّ عملها في محور الدوران.

ب. يعتمد عزم القصور الذاتيّ لجسمٍ على موقع محور دورانه.

3. أُقارن بين كتلة جسمٍ وعزم القصور الذاتي له.

4. التفكير الناقد: ذهبت عرين وفرح إلى مدينة الألعاب في عيد الفطر، وركبتا لعبة الحصان الدوّار؛ حيث جلست عرين على حصانٍ قرب الحافّة الخارجية للصفيحة الدائرية المُتحرّكة للّعبة؛ بينما جلست فرح على حصانٍ في منتصف المسافة بين عرين ومحور الدوران الثابت. عند دوران اللعبة بسرعةٍ زاويّة ثابتة؛ أيُّ الفتاتين: عرين أم فرح مقدار سرعتها الزاويّة أكبر؟

5. أحلل وأستنتج: يُبيّن الشكل ثلاث حالات لقلم يدور حول المحاور الموضّحة في الشكل. أُرتّب الحالات الثلاث من حيث مقدار العزم اللازم لتدوير القلم من الأسهل إلى الأصعب.



6. قطعة بوليسترين على شكل خارطة المملكة الأردنيّة الهاشميّة. كيف أُحدّد مركز كُتلتِها عمليًّا؟

مراجعة الوحدة

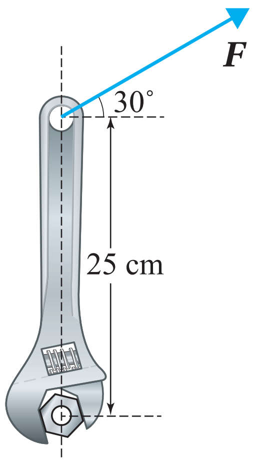
7. أُحلّل وأستنتج: يقفز غطّاس عن لوح غطسٍ مُتّجهًا نحو سطح الماء في البركة. ولاحظت أنّه بعد مغادرته لوح الغطس بدأ بالدوران، وضمَّ قدميه وذراعيه نحو جسمه. أُجيب عمّا يأتي:

أ . لماذا ضمّ الغطّاس قدميه وذراعيه نحو جسمه في أثناء أدائه لحركات الدوران؟

ب. ما الذي يحدث لزخَمه الزاويّ بعد ضمّ قدميه وذراعيه؟

جـ. ما الذي يحدث لمقدار سرعته الزاويّة بعد ضمّ قدميه وذراعيه؟

د . ما الذي يحدثُ لمقدار طاقته الحركيّة الدورانية بعد ضمّ قدميه وذراعيه؟



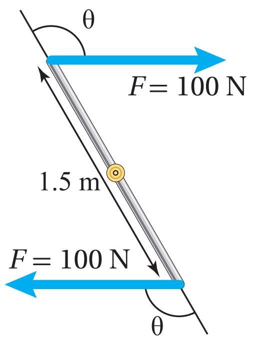
قوّةٌ تؤثّر في مفتاح شدّ.

8. أستخدم الأرقام: تدور عربةُ دولابٍ هوائيٍّ في مدينة الألعاب بعكس اتّجاه حركة عقارب الساعة ، فتمسح إزاحةً زاويّةً مقدارُها (1.5 rad) خلال (3.0 s). أحسبُ مقدار السرعة الزاويّة المتوسّطة للعربة.

9. أستخدم الأرقام: تستخدم فاتن مفتاح شدٍّ لشدِّ صامولةٍ؛ كما هو موضح في الشكل المجاور. أستعينُ بالشكل والبيانات المثبتة فيه للإجابة عمّا يأتي، علمًا بأنّ مقدار العزم اللازم لفكّ الصامولة يساوي (50.0 N.m).

أ. **أحسبُ** مقدار القوّة اللازم التأثير بها في طرف مفتاح الشدّ في الاتّجاه الموضّح في الشكل.

ب. أُحدّد اتّجاه دوران مفتاح الشدّ.



تؤثّر قوّتان متساويتان مقدارًا ومتعاكستان اتّجاهًا في قضيبٍ فلزيّ.

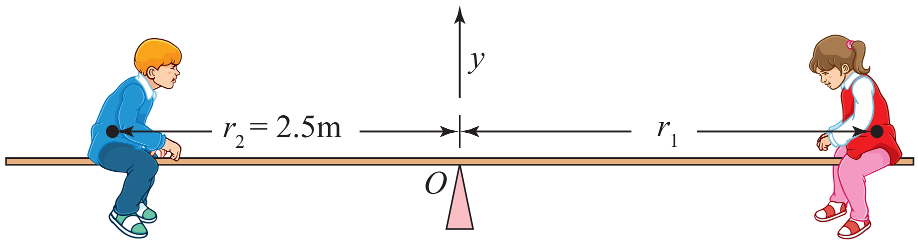
10. قوّتان متوازيتان متساويتان مقدارًا ومتعاكستان اتّجاهًا، مقدار كُلٍّ منهما (100 N)، تؤثّران عند طرفي قضيبٍ فلزيّ طوله (1.5 m) قابلٍ للدّوران حول محورٍ ثابتٍ عند منتصفه عموديٍّ على مستوى الصفحة، كما هو موضّحٌ في الشكل. إذا كان العزم الكليُّ المؤثر في القضيب (130 N.m) باتّجاه حركة عقارب الساعة؛ أحسبُ مقدار الزاوية (θ) التي يصنعُها خطُّ عملِ كلِّ قوّةٍ مع مُتّجه موقعِ نقطةِ تأثيرِها.

11. أستخدمُ الأرقام: تقفُ هناءُ على طرفِ القرص الدوّار للعبة الحصان الدوّار. إذا علمتُ أنّ كتلة قرص اللعبة بمحتوياته (2×10^2 kg) ونصف قطره (4 m)، وسرعته الزاويّة (2 rad/s)، وكتلة هناء (50 kg)، وبافتراض أنّ كتلة القرص موزّعةٌ بشكلٍ منتظم، والنظام المكوّن من اللعبة وهناء معزول، أحسب مقدار ما يأتي:

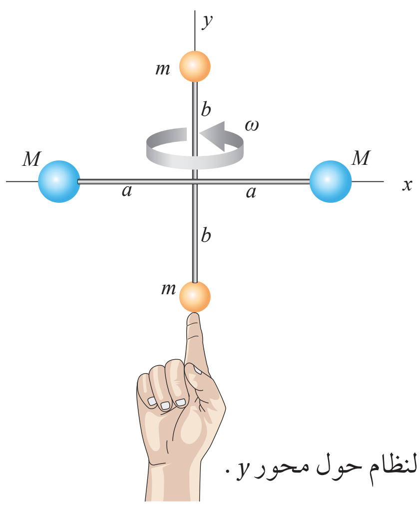
أ . الزخَم الزاويّ الابتدائي للنظام.

ب. السرعة الزاويّة للّعبة عندما تقف هناء على بُعد (2 m) من محور دوران اللعبة.

12. أحلّل وأستنتج: لعبة اتّزانٍ (see – saw) تتكوّن من لوحٍ خشبيٍّ مُنتظمٍ مُتماثلٍ وزنهُ (150 N)؛ يرتكزُ من منتصفه عند النقطة (O). تجلس نهى ($\boldsymbol{F}_{g1}$) على أحد طرفي اللوح الخشبي على بُعد (r_1) من نقطة الارتكاز؛ بينما يجلس شقيقها ماهر ($\boldsymbol{F}_{g2}$) على الجهة المقابلة على بُعد (2.5 m) من نقطة الارتكاز. إذا علمتُ أنّ وزن نهى (250 N)، ووزن ماهر (300 N)، والنظام في حالة اتّزان سكونيّ، واللوح الخشبيّ في وضعٍ أُفقيّ كما هو موضح في الشكل؛ أحسبُ مقدار ما يأتي:



طفلان يجلسان على لعبة see – saw مُتزنةٍ أُفقيًا.



يدور النظام حول محور y .

أ. القوّة ($\boldsymbol{F}_N$) التي تؤثّر بها نقطة الارتكاز في اللّوح الخشبيّ، وأُحدّد اتجاهها.

ب. بُعد نهى عن نقطة الارتكاز كي يكون النظام في حالة اتّزان سكونيّ.

13. أحلّل وأستنتج: يدور نظامٌ يتكوّن من أربع كراتٍ صغيرةٍ مثبّتةٍ في نهايات قضيبين مُهمَلي الكتلة كما هو موضّحٌ في الشكل المجاور بسرعةٍ زاويّةٍ مقدارُها (2 rad/s). إذا علمتُ أنّ ($a = b = 20$ cm)، و ($m = 50$ g)، و($M = 100$ g)، وأنصافَ أقطارِ الكرات مهملةً مقارنةً بطولي القضيبين؛ بحيث يُمكن عدُّها جُسيماتٍ نقطيّة؛ أحسب مقدار ما يأتي:

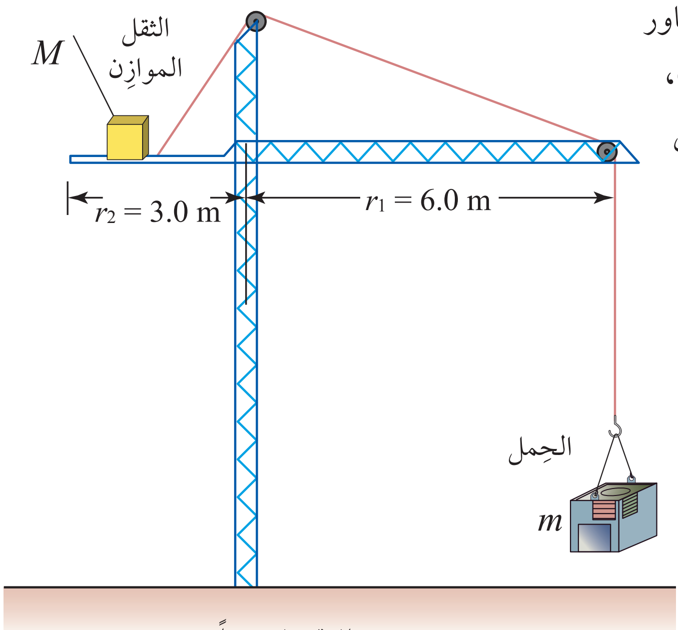
أ. عزم القصور الذاتي للنظام.

ب. الطاقة الحركية الدورانية للنظام.

14. تُستخدم بعضُ أنواع الروافع لرفع الأثقال الكبيرة (الأحمال) إلى أعالي الأبراج والبنايات العالية. ويجب أن يكون العزم المُحصّل المؤثّر في هذه الرافعة صفرًا؛ كي لا يوجد عزم مُحصّلٌ يعملُ على إمالتها وسقوطها؛ لذا يوجد ثقلٌ موازِنٌ M على الرافعة لتحقيق اتّزانها، حيث يُحرّك عادةً هذا الثقل تلقائيًا (بشكل أوتوماتيكي) عبر أجهزة استشعارٍ ومحرّكاتٍ لموازنة الحِمل بدقّة. يبيّن الشكل المجاور رافعةً في موقع بناءٍ ترفع حِملًا مقداره (3.0×10^3 kg)، ومقدار الثقل الموازِن (1.0×10^4 kg). أستعينُ بالشكل والبيانات المثبّتة فيه للإجابة عمّا يأتي وبإهمال كُتلة الرافعة؛ علمًا بأنّ الرافعة متّزنة أُفقيًا.

أ . أُحدّد موقع الثقل الموازِن عندما يكون الحِمل مرفوعًا عن الأرض وفي حالة اتّزانٍ سكونيّ.

ب. أُحدّد مقدارَ أكبر كتلة يُمكن أن تحملها الرافعة عندما يكون موقع الثقل الموازِن عند طرفها.



رافعة ترفع حِملًا.

الوحدة 3

التيّار الكهربائيّ

Electric Current

أتأمّل الصورة

انتشرت المركباتُ الكهربائيّة التي تعمل كُليًّا أو جُزئيًّا بالطاقة الكهربائيّة لتشمل السياراتِ الصغيرة، والحافلات، وشاحنات النقل. تنحصر المركبات الكهربائيّة ضمن ثلاثة أنواع تستخدم جميعها مُحرّكًا كهربائيًّا: النوع الأول؛ يعملُ بمحرّكٍ كهربائيّ وبطارية كبيرة السّعة قابلة لإعادة الشحن، والنوع الثاني؛ هجينٌ يعمل على مُحرّك وقودٍ ومُحرّكٍ كهربائيّ وبطاريّة قابلةٍ لإعادة الشحن، أمّا النوع الثالث؛ فيستمد طاقته الكهربائيّة من خلايا الهيدروجين. تساعدُ هذه الأنواع جميعُها على تقليل انبعاث الغازات الضارّة بالبيئة وبصحة الإنسان، مهما كان مصدر الكهرباء التي تستخدمُها هذه المركبات.

ما العوامل التي تحدّد المدّةَ الزمنيّة اللازمة لإعادة شحنِ بطارية السيارة الكهربائيّة؟

الفكرة العامّة:

ما نشهَدُه اليومَ من تطبيقاتٍ كهربائيّةٍ وإلكترونيّةٍ في الحياة لم نكن نتوقّعه قبل عقود؛ فالتقدم التكنولوجي في علوم الحاسوب، وصناعة البطاريات القابلة لإعادة الشحن، واستخدام مصادر الطاقة المتجدّدة وغيرها، فتح مجالات واسعة للاعتماد على الكهرباء.

الدرس الأول: المقاومة والقوّة الدافعة الكهربائيّة

Resistance and Electromotive Force

الفكرة الرئيسة: تُصنّفُ الموادّ بحسب مقاوميّتها إلى موصلةٍ وعازلةٍ وشبه موصلةٍ، والمقاومات الكهربائيّة أحد أهمّ عناصر الدارات الكهربائيّة، وتختلف في أنواعها وقيَمها باختلاف الغرض من استخدامها. ولسريان التيّار الكهربائي في المقاومات لا بد من توافُر قوّة دافعة كهربائيّة في الدارة.

الدرس الثاني: الدارة البسيطة والقدرة الكهربائية

Simple Electric Circuit and Electric Power

الفكرة الرئيسة: تتضمّن تطبيقاتُ الكهرباء أجهزةً وداراتٍ كهربائيّةً؛ تتفاوت من البسيطة، مثل دارة مصباح المكتب، إلى المعقّدة مثل تلك التي تُستخدم في تشغيل بعض أجهزة الطائرة. ولكلّ جهازٍ كهربائيٍّ قدرةٌ كهربائيّةٌ تناسب الهدف من استخدامه.

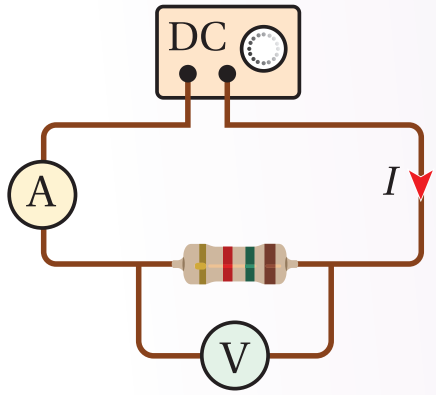
الدرس الثالث: توصيل المقاومات وقاعدتا كيرشوف

Combining Resistors and Kirchhoff's Rules

الفكرة الرئيسة: يُستخدم قانون أوم لتحليل الدارات الكهربائيّة البسيطة التي تتكون من عُروةٍ واحدة، وإن احتوت تفرُّعاتٍ تشتمل على مقاومات، نستخدم قواعد جمع المقاومات لدراستها، وفي حال احتوت التفرُّعات على بطارياتٍ ومقاومات، نستخدم قاعدتي كيرشوف إضافةً إلى ما سبق.

تجربة استهلالية

استقصاء العلاقة بين الجُهد والتيار بين طرفي مقاومة.



المواد والأدوات: مصدر طاقةٍ مُنخَفض الجُهد (DC)، 3 مقاومات مختلفة، أميتر، فولتميتر، أسلاك توصيل.

إرشادات السلامة: الحذر من لمس الوصلات الكهربائيّة غير المعزولة والأجزاء الساخنة في الدارة.

خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أُنفّذ الخطوات الآتية:

1 أصلُ الدارة الكهربائيّة كما في الشكل، بحيث يتّصلُ طرفا المقاومة مع طرفي مصدر فرق الجُهد، ويقيسُ الأميتر (A) التيّار المارَّ في المقاومة، بينما يقيس الفولتميتر (V) فرقَ الجُهد بين طرفيها.

2 **أضبطُ المتغيّرات:** أضبط جُهد المصدر عند قيمةٍ مُنخَفضة (1 V)، وأشغّلهُ ثم أسجّلُ قراءتي الأميتر والفولتميتر، وأدوّنهما في جدولٍ مُخصّصٍ في كتاب الأنشطة.

3 **أقيسُ:** أرفع جُهد المصدر قليلًا، ثم أُسجّل قراءتي الأميتر والفولتميتر في الجدول، وأكرّر ذلك ثلاث مرّاتٍ، وفي كل مرّةٍ أرفع الجُهد، أحرِصُ على عدم زيادة قيمة الجُهد عن قياس (6 V).

4 أكرّرُ الخطوات الثلاث السابقة مرّتين باستخدام مقاومة مختلفة في كل مرّة، وأدوّنُ القياسات.

التحليل والاستنتاج:

1. أمثّلُ قراءات الجدول بيانيًّا، بحيث يكون فرق الجُهد على المحور الأفقي والتيار على المحور الرأسي.
2. **أستنتجُ** مقدار المقاومة الكهربائيّة الذي يساوي مقلوب ميلِ مُنحنَى العلاقة بين فرق الجُهد والتيار للمقاومات الثلاث.
3. **أقارنُ** بين قِيَم المقاومات، وأصف كلًّا منها، إن كانت ثابتةً أو متغيّرةً، وهل تتأثر قيمة أيٍّ منها بتغيُّر فرق الجُهد بين طرفيها؟
4. **أتوقّعُ:** في حال استخدام موادَّ أخرى مختلفة؛ هل تسلك جميعُها سلوكَ المقاوماتِ من حيثُ النسبة بين فرق الجُهد والتيار؟

المقاومة والقوة الدافعة الكهربائيّة
Resistance and Electromotive Force

الدرس 1

الفكرة الرئيسة:

تُصنّفُ الموادّ بحسب مقاوميّتها إلى موصلةٍ وعازلةٍ وشبه موصلةٍ، والمقاومات الكهربائيّة أحد أهمّ عناصر الدارات الكهربائيّة، وتختلف في أنواعها وقِيَمها باختلاف الغرض من استخدامها. ولسريان التيّار الكهربائي في المقاومات لا بد من توافُر قوّة دافعة كهربائيّة في الدارة.

نتاجات التعلّم:

- أستنتج عمليًّا العوامل التي تعتمد عليها المقاومة الكهربائيّة لموصل.
- أميّز بين مفهومي المقاومة والمقاوميّة.
- أربط بين مقاومة موصل والعوامل التي تعتمد عليها بعلاقة رياضية.
- أحلل رسومًا بيانيةً لأقارن بين المقاومة الأوميّة والمقاومة اللا أومية
- أعرّف القوّة الدافعة الكهربائيّة للبطارية، وفرق الجُهد الكهربائيّ بمعادلات.
- أشتقُّ وحدة قياس كلٍّ من القوّة الدافعة الكهربائية للبطارية، وفرق الجُهد الكهربائيّ مستخدمًا الصيغ الرياضية لها.

المفاهيم والمصطلحات:

مقاومة	Resistance
مقاوميّة	Resistivity
قوّة دافعة كهربائيّة	Electromotive Force
مقاومة داخلية	Internal Resistance

التيّار الكهربائيّ Electric Current

أتذكّر أنّ الفلزّات تحتوي على شحنات حرّة (إلكترونات)، وعند تطبيق فرق جهد بين طرفَي الفلزّ ينشأ داخله مجال كهربائي يؤثّر بقوة كهربائية في الإلكترونات فيدفعها للحركة في اتّجاه واحد فيسري فيه تيّار كهربائي. ويعتمد مقدار التيّار (I) على كمّية الشحنة التي تعبُر مقطعًا عرضيًّا في الموصل في وَحدة الزمن.

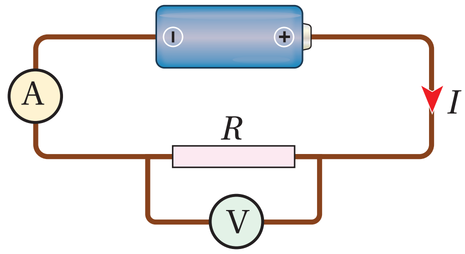
$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

حيث (ΔQ) كمّية الشحنة، (Δt) زمن عبورها، كما تعلمت أنّ اتّجاه «التيّار الاصطلاحي» يكونُ بعكس اتّجاه حركة هذه الإلكترونات. يقاس التيّار الكهربائيّ بوحدة **أمبير ampere (A)**، والأمبير هو مقدار التيّار الكهربائيّ الذي يسري في موصلٍ عندما تعبُر مَقطَع هذا الموصل شحنةٌ مقدارُها (1 C) في ثانيةٍ واحدة. ويعرّف التيّار الكهربائي الذي يسري في موصل باتّجاه واحد وقيمة ثابتة لا تتغيّر مع الزمن بأنّه؛ تيّار مستمر Direct current (DC).

المقاومةُ الكهربائيةُ Electric Resistance

عند تشغيل مدفأة كهربائية ألاحظ احمرار سلك التسخين وأشعرُ بسخونته نتيجةَ سريان التيّار الكهربائيّ فيه، بينما لا يسخن سلك التوصيل الذي يصل المدفأة بمَقبس الجدار. كيف أفسّر ذلك؟

سلكُ التسخين مصنوعٌ من مادّةٍ موصلةٍ تختلف في خصائصها عن فلزّ النحاس الذي تُصنع منه أسلاك التوصيل؛ حيثُ تنتقلُ الإلكترونات بسهولةٍ في الأسلاك النحاسية، بينما تواجه مُمَانعةً أكبر لحركتها عند مرورها في سلك التسخين، وتفقدُ مقدارًا من طاقتها الكهربائيّة التي تتحوّل إلى طاقةٍ حراريةٍ ترفعُ درجة حرارة السلك. تُسمّى خاصّية ممانعة الموصل لمرور التيّار الكهربائي فيه **المقاومة الكهربائيّة Electric resistance (R)**، وتُعرّف المقاومة الكهربائيّة للموصل بأنّها نسبةُ فرق الجُهد بين طرفيه إلى التيّار الكهربائيّ المارّ فيه. تقاسُ المقاومةُ الكهربائيّة بوحدة **أوم (ohm)**، ويُستخدَم لتمثيلها الرمز (Ω). يمكن تعريف الأوم بأنّه؛ مقاومة موصل يسري فيه تيّار كهربائي (1 A) عندما يكون فرق الجُهد بين طرفيه (1 V).



الشكل (1): قياس فرق الجُهد بين طرفي مقاومة كهربائيّة.

قانون أوم Ohm's Law

توصّل العالم الألماني جورج أوم سنة (1827) إلى وجود علاقة تناسُبٍ طرديٍّ بين التيّار الكهربائيّ الذي يسري في موصل وفرقِ الجُهد بين طرفيه عند ثبات درجة حرارته. وتُعرَف هذه العلاقة **بقانون أوم Ohm's law** الذي ينصُّ أنّ «الموصل عند درجة الحرارة الثابتة ينشأُ فيه تيّار كهربائيّ (I) يتناسب طرديًّا مع فرق الجُهد بين طرفيه (ΔV)». وثابت التناسُب بين فرق الجُهد والتيار الكهربائيّ هو مُقاومة الموصل (R). كما في العلاقة الآتية:

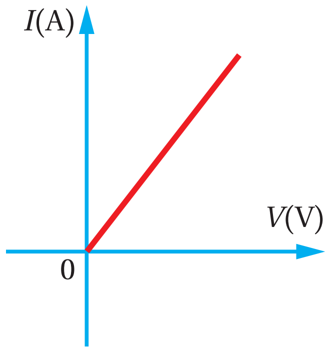
$$\Delta V = IR$$

يُقاسُ فرق الجُهد بوحدة **فولت volt (V)**، وباستخدام هذه العلاقة يُعرّف الفولت أنّه فرقُ الجُهد بين طرفي موصلٍ مقاومتُه ($1\ \Omega$) يسري فيه تيّار كهربائيٌّ (1 A).

الموصلات الأوميّة Ohmic Conductors

في التجربة الاستهلالية؛ نُفِّذ استقصاءٌ عمليٌّ لدراسة العلاقة بين التيّار الذي يسري في مقاومة كهربائيّة وفرق الجُهد بين طرفيها. وجرى توصيلُ الدارة الكهربائيّة كما في الشكل (1)، واستُخدمَ جهاز أميتر (A) لقياس التيّار الذي يسري في المقاومة، وجهاز فولتميتر (V) لقياس فرق الجُهد بين طرفيها، وعندما مُثّلت العلاقة بين المُتغيّرين، عند ثبات درجة الحرارة كانت خطًّا مُستقيمًا، كما في الشكل (2). ومثل هذه المُوصِلات التي يكون منحنى ($I-V$) لها خطًّا مستقيمًا عند ثبات درجة حرارتها، تُوصَف بأنها تحقّق قانون أوم؛ لذلك تُسمّى **موصلاتٍ أوميّةً Ohmic conductors**. وبإيجاد ميل الخط المستقيم الذي يساوي مقلوب المقاومة؛ فإنّه يمكن حساب مقدارها.

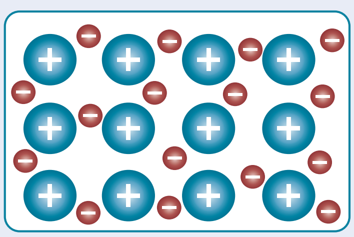
عندما ترتفع درجة حرارة الموصل الأوميّ، فإنّ مقاومتهُ تزداد، وتبقى العلاقة بين الجُهد والتيار خطيّةً بثبات درجة الحرارة عند قيمةٍ جديدة؛ أي أنّه يبقى موصلًا أوميًّا. فَتيلُ المصباح المُتوهّج هو سلكٌ فلزيٌّ رفيعٌ مصنوعٌ من التنغستن؛ عند ارتفاع درجة حرارته يقلّ ميلُ الخطِّ المستقيم، أي تزدادُ مقاومته.
كيف أُفسّر زيادة مقاومة الموصل الأومي بارتفاع درجة حرارته؟



الشكل (2): منحنى ($I-V$) لموصل أومي.

الربط مع الكيمياء

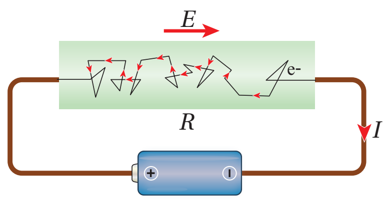
تحتوي الفلزّات على عددٍ كبيرٍ من الإلكترونات الحرّة التي تتحرّك باستمرار بين نوى الفلزّ لتُشكّل رابطةً فلزيةً، وتعتمد طاقاتها الحركية على درجة حرارة الفلزّ، وتعود خصيصة التوصيل الكهربائيّ إلى حركة هذه الإلكترونات، في حين تبقى الأيوناتُ الموجبة في الفلزّ في أماكنها.



أيون الفلز

إلكترون حرّ

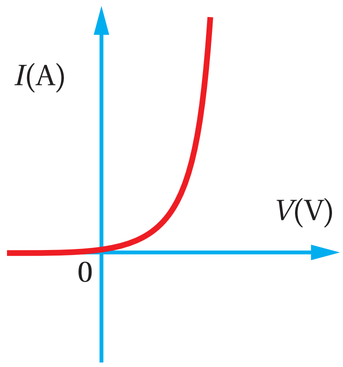
عند سريان التيّار الكهربائيّ في الموصل فإنَّ الإلكترونات الحُرّة تتصادُم في ما بينها، كما تتصادمُ مع ذرات الموصل فتتحرك الالكترونات الحرة كما في الشكل (3)؛ وينتقل جزءًا من طاقتها الحركية إلى الذرّات، فتزدادُ سَعة اهتزازها، وترتفعُ درجةُ حرارةِ الموصل. إنَّ الزيادةَ في سَعةِ اهتزاز الذرات تؤدي إلى زيادة احتمال تصادم الإلكترونات بها، فتزدادُ إعاقةُ الموصل لحركة الإلكترونات داخله، وتصبح مقاومة الموصل لسريان التيّار الكهربائيّ أكبر.



الشكل (3): حركة الإلكترونات الحرّة في الموصل الأومي.

المواد اللا أوميّة Nonohmic Materials

بعض المواد تكون العلاقة بين التيّار الكهربائيّ الذي يسري فيها وفرق الجُهد بين طرفيها غيرَ خطيّة، حتى عند ثبات درجة حرارتها. وهذا يعني أنّ مقاومَتها تتغيّر مع تغيُّر فرق الجُهد بين طرفيها. مثلُ هذه المواد تُسمّى **موادَّ لا أوميّةً Nonohmic materials**؛ ومن الأمثلة عليها الوصلات الإلكترونية، الثنائي (diode)، والثنائي الباعث للضوء (LED)، والترانزستور (transistor)، وتعدُّ من المُكوّنات الأساسية للدارات الإلكترونية، وهي مصنوعةٌ من أشباهِ المُوصِلات، مثل الجرمانيوم والسيليكون. يمثّلُ الشكل (4) العلاقةَ بين التيّار وفرق الجُهد لوصلة الثنائي.



الشكل (4): منحنى $(I-V)$ لوصلة الثنائي.

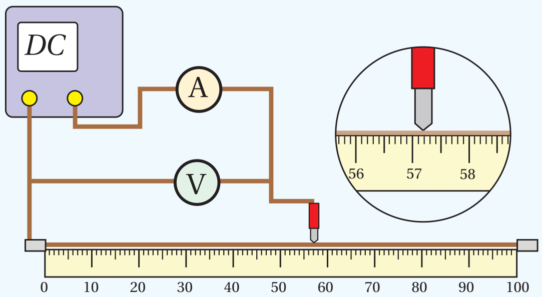
✓ **أتحقّق:** كيف أميّز بين الموصلات الأوميّة والمواد اللا أوميّة؟

العوامل المؤثرة في المقاومة Factors Affecting the Resistance

تختلف الموصلات في مقاومتها لمرور التيار الكهربائي فيها باختلاف خصائصها. وللوقوف على العوامل المؤثّرة في المقاومة الكهربائيّة لموصلٍ، واستقصائها بطريقة عملية؛ أنفذُ التجربة الآتية.

التجربة ١ استنتاجُ العوامل التي تعتمد عليها المقاومة الكهربائيّة لموصل

الموادُّ والأدوات: ميكروميتر، مِسطرة متريّةٌ خشبيةٌ، جهازَي أميتر وفولتميتر، أسلاكُ توصيل، مصدر طاقة منخفض الجُهد وقابل للضبط، سلك نيكروم رفيعٍ طولُه (1 m)، ثلاثةُ أسلاك: نيكروم، وحديد، وتنغستن، طول كلٍّ منها (40 cm) وأقطارُها متساوية.



إرشادات السلامة: الحذر من لمس الوصلات الكهربائيّة غير المعزولة والعناصر الساخنة.

خطوات العمل:

(الجزء 1)

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أنفّذ الخطوات الآتية:

1 . أُثبّتُ سلك النيكروم من طرفيه على المسطرة المتريّة الخشبيّة، بشكل مستقيمٍ ومشدودٍ بدءًا من الصفر.

2 . أصلُ أحدَ قطبي مصدر الطاقة مع نقطة الصفر، والقطبَ الآخر مع الأميتر، وأضعُ في نهاية السلك المُتّصل بالأميتر مسمار توصيل مدبّب. وأصلُ الفولتميتر على التوازي مع سلك النيكروم، كما في الشكل.

3 . أشغّلُ المصدر وأضبِطُه على (1 V)؛ حتى لا ترتفع درجةُ حرارة سلك النيكروم وتؤثّرَ في القراءات.

4 . ألامسُ المسمار المدبّب (طرف الأميتر الحرّ) مع سلك النيكروم على مسافة (20 cm) من الصفر.

5 . أدوّنُ قراءات الأميتر والفولتميتر في الجدول المُخصّص للجزء الأول.

6 . أغيّرُ موقع المسمار المدبّب إلى المسافات (40, 60, 80 cm)،ثم أدوّن قِيَمَ فرق الجُهد والتيار.

(الجزء 2)

1 . أقيسُ أقطارَ الأسلاك جميعها باستخدام الميكروميتر وأدوّنُها، ثم أثبّت سلك النيكروم الثاني (40 cm) على المسطرة بدل الأوّل.

2 . ألامسُ المسمار المدبّب إلى نهاية السلك، وأضبطُ فرقَ الجُهد على (1 V) وأدوّن قيمتي فرق الجُهد والتيار.

(الجزء 3)

1 . **ضبطُ المتغيّرات:** أستخدم سلك الحديد (المُماثل بالقياسات) مكان سلك النيكروم، ثم أكرّرُ الخطوة 2 من الجزء 2.

2 . أكرّرُ الخطوةَ السابقة باستخدام سلك التنغستن (المماثل بالقياسات)، وأدوّن النتائج.

التحليل والاستنتاج:

1 . **أستنتجُ** بالاعتماد على بيانات الجدول الأول؛ العلاقةَ بين طول الموصل ومقاومته.

2 . **أستنتجُ** بالاعتماد على بيانات الجدول الثاني؛ العلاقة بين مساحة مقطع الموصل ومقاومته.

3 . **أقارنُ** بين مقاومة الأسلاك المُتماثلة في أطوالها ومساحة مَقطعِها والمختلفة في المواد المصنوعة منها.

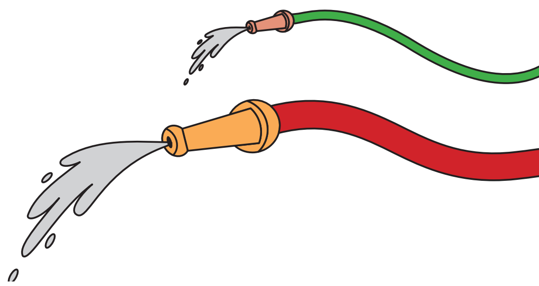
4 . **أفسّرُ:** أتوصّلُ إلى العوامل التي تعتمد عليها مقاومةُ الموصل، وأُفسّرها.

5 . **أتوقّعُ:** إذا تسبب التيّار الكهربائيّ في أيٍّ من المراحل في تسخين الموصل؛ كيف سيؤثر ذلك في النتائج؟

استنتجتُ من التجربة السابقة العوامل التي تعتمد عليها المقاومة الكهربائيّة للموصل وهي:

طول الموصل: لاحظتُ في الجزء الأول من التجربة أنّ مقاومةَ الموصل تزداد بزيادةِ طوله، ويمكنُ تفسير هذه العلاقة بتعرُّض الإلكترونات عند حركتها خلال الموصل الطويل إلى مزيدٍ من التصادُمات، ما يعيقُ حركتها بشكل أكبر، ويزيد مقاومة الموصل.

مساحة المقطعُ العرضيّ للموصل: لاحظتُ في الجزء الثاني من التجربة أنّ مقاومة الموصل تقلُّ بزيادة مساحة مَقطعِه العرضيّ، ويمكن تفسيرُ ذلك بأنّ زيادة مساحة المقطع تزيدُ من عدد الإلكترونات الحرّة الناقلة للتيار، فيزداد التيّار وتقلّ المقاومة. ويمكن تشبيه مرور التيّار الكهربائي في الموصلات بتدفّق الماء في الخُرطوم، فكلّما زادت مساحة مَقطع الخُرطوم زادت كمّية الماء التي تتدفق خلاله في الثانية الواحدة كما في الشكل (5).



الشكل (5): تزداد كمية الماء المتدفق عبر الأنبوب في الثانية الواحدة بزيادة مساحة مقطعه.

نوع مادة الموصل: تختلفُ الموادّ عن بعضها في مقاومتها لسريان التيّار الكهربائيّ فيها؛ إذ تعدُّ بعض الفلزات؛ مثل النحاس، والفِضّة، والألمنيوم موصلاتٍ جيّدةً للكهرباء، في حين تُوجَد فلزّاتٌ أُخرى مثل التنغستن ذات مقاومةٍ أكبر لسريان التيّار الكهربائيّ فيها، في حين تكون للمواد العازلة قيمُ مقاومةٍ عاليةٍ جدًا.

درجة الحرارة: تؤثر درجة حرارة الموصل في مقدار مقاومته، إلا أنّ عاملَ درجة الحرارة تم ضبطُه في مراحل التجربة السابقة جميعِها بالحفاظ على درجة حرارةٍ متدنّيةٍ وثابتة، أي أنّه جرى استبعادُ أثر درجة الحرارة في المقاومة.

المقاومة الكهربائيّة للموصل تتناسب طرديًا مع طول الموصل (L) وعكسيًا مع مساحة مَقطَعِه (A)، ويمكن كتابة علاقة التناسب هذه على الصورة:

$$R \,\alpha\, \frac{L}{A}$$

بإدخال ثابت التناسب في العلاقة، نحصل على معادلةٍ خاصّةٍ بمقاومة موصلٍ منتظم الشكل بدلالة أبعادِه، علمًا بأن ثابت التناسُب يختلف باختلاف نوع المادة، ويُسمّى الثابتُ مُقاوميّة المادة؛ وسوف نرمز له بـــ (ρ):

$$R = \frac{\rho L}{A}$$

بإعادة ترتيب حدود العلاقة تُصبح على الصورة:

$$\rho = \frac{RA}{L}$$

وبذلك أُعرّف **مُقاوميّة المادة Resistivity**؛ بأنّها مقاومةُ عيّنةٍ من المادة مساحة مقطعِها ($1\ m^2$)، وطولها ($1\ m$) عند درجة حرارة معينة. ووحدةَ قياس المقاومية هي ($\Omega.m$).

المقاوميّة صفةٌ للمادة، بينما المقاومة صفةٌ للموصل تعتمد على أبعاده الهندسية، وقد درست من قبل مُتغيّرات مثل ذلك؛ فالكثافة صفةٌ للمادّة بينما الكتلة صفةٌ للجسم.

المثال 1

مصباحٌ كهربائيٌّ يسري فيه تيّار كهربائيّ (500 mA)، عندما يتّصل مع فرق جُهدٍ كهربائيّ (3 V). ما مقاومة المصباح؟

المعطيات: $I = 0.5\ \text{A}, \Delta V = 3\ \text{V}$

المطلوب: $R = ?$

الحلّ:

$$R = \frac{\Delta V}{I} = \frac{3}{0.5} = 6\ \Omega$$

المثال 2

فتيلُ مصباحٍ مُتوهّج مصنوعٍ من سلكٍ رفيعٍ من التنغستن؛ نصف قطره (10 μm) على شكل ملفٍ لولبيٍ، كما في الشكل (6)، مقاومتهُ (560 Ω). عند شدِّهِ جيدًا تبيّن أنّ طولَ السلك (3.14 m). أحسبُ مقاوميّة التنغستن عند درجة حرارة 20 °C .

المعطيات: $R = 560\ \Omega,\ r = 10\ \mu\text{m},\ L = 3.14\ \text{m}$

المطلوب: $\rho = ?$

الحلّ:

$$A = \pi r^2 = 3.14(1.0 \times 10^{-5})^2 = 3.14 \times 10^{-10}\ \text{m}^2$$

$$\rho = \frac{RA}{L} = \frac{560 \times 3.14 \times 10^{-10}}{3.14}$$

$$\rho = 5.6 \times 10^{-8}\ \Omega.\text{m}$$

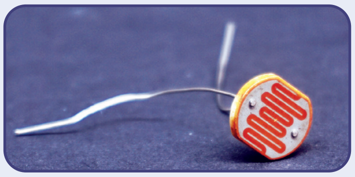
الجدول (1) يبيّنُ مقاوميّة بعض المواد، وبمعاينة الجدول؛ أجدُ أنّ مقاوميّة الموادّ تتراوح من قيم صغيرةٍ جدًّا للمواد المُوصلة، مثل الفضّة والنحاس، إلى قيم كبيرةٍ جدًا للموادّ العازلة مثل الزجاج والمطّاط، مرورًا بموادّ تُسمّى أشباه مُوصلات. كما توجد مواد **فائقة التوصيل** **Superconductors**؛ مقاومتها الكهربائية تساوي صفرًا عند درجات حرارة منخفضة تقارب الصفر المطلق. لذلك بعد توليد تيّار كهربائيّ في هذه الموادّ يستمر سريانه فيها مدّة طويلة دون الحاجة إلى مصدر فرق جُهد. من استخدامات هذه المواد توليد مجال مغناطيسي في أجهزة، مثل جهاز التصوير بالرنين المغناطيسي.

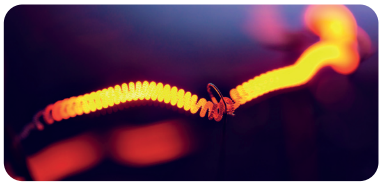
أتحقّق: أوضّح الفرق بين مفهومي المقاومة والمُقاوميّة.

الربط مع الحياة

إضاءة مصابيح الشوارع

تستخدم للتحكّم في إضاءة مصابيح الشوارع بشكل آليٍّ مقاومةٌ ضوئيةٌ light dependent resistor (LDR)، وهي مقاومةٌ متغيرةٌ، تتغيّر قيمتُها بتغيُّر شدة الضوء الساقط عليها، ويجري ضبطها بحيث تعمل على وصل الدارة وإضاءة المصابيح عند غروب الشمس، وإطفائها عند شروقها.





الشكل (6): فتيل التنغستن في مصباحٍ متوهّجٍ.

جدول (1): مقاوميّة بعض المواد عند درجة حرارة (20° C).

المادة	المقاومية (Ω.m)
فضة	1.59×10^{-8}
نحاس	1.7×10^{-8}
ذهب	2.44×10^{-8}
ألمنيوم	2.82×10^{-8}
تنغستن	5.6×10^{-8}
حديد	10×10^{-8}
نيكروم	1.5×10^{-6}
كربون	3.5×10^{-5}
سيليكون	640
زجاج	$10^{10} - 10^{14}$
مطاط	10^{13}

القوّة الدافعة الكهربائيّة Electromotive Force (emf)

تُعدّ البطّارية مصدرًا للطاقة؛ فهي تنتجها عن طريقِ تفاعُلات كيميائيّة تجري داخلها، وتعمل على توليد فرق جُهدٍ كهربائيٍّ بين طرفيها أُطلِق عليه اسمُ **القوّة الدافعة الكهربائيّة Electromotive force**، وهذه تسميةٌ اصطلاحيّةٌ قديمة، فالقوّة الدافعة الكهربائيّة ليست قوّة ميكانيكيّة، بل هي فرق جُهد كهربائيٍّ تولّدُهُ البطّارية بين قُطبيها يقاس بوحدة فولت (V). يبين الشكل (7) مقاومةً (R)؛ يتصل طرفاها مع قطبي بطارية، حيث يكونُ القطب الموجب للبطاريّة أعلى جُهدًا من قطبها السالب. يؤدي فرق الجُهد إلى سريان تيّار كهربائيّ (I) في الدارة على شكل حركة شحنات موجبة افتراضيّة خارج البطّارية من القطب الموجب الأعلى جُهدًا إلى القطب السالب الأقل جُهدًا، كما هو مبين في الشكل. كي تتابع الشحنات الموجبة الافتراضية حركتها؛ فإنّ البطّارية تبذل عليها شغلًا لتحريكها داخل البطّارية من القطب السالب إلى القطب الموجب الأعلى جُهدًا. وتعرّف القوّة الدافعة الكهربائيّة (ε) بأنها؛ الشغل الذي تبذله البطّارية في نقل وحدة الشحنات الموجبة داخل البطّارية من قطبها السالب إلى قطبها الموجب. ومقدارُها يساوي أكبر فرق جُهدٍ يُمكن أن تولّدهُ البطّارية بين قطبيها. وتعطى بالعلاقة الآتية:

$$\varepsilon = \frac{W}{\Delta Q}$$

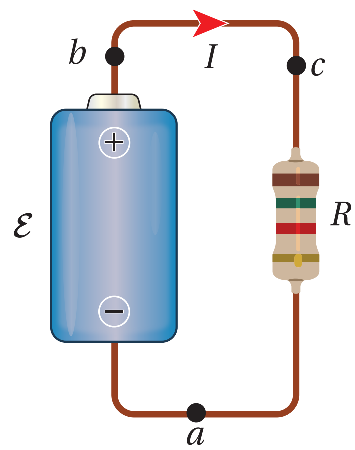
حيث (W) الشغل المبذول على الشحنة المنقولة (ΔQ).

أتخيّل أنّ القوّة الدافعة الكهربائيّة للبطارية تشبه مضخةً للشحنات؛ فالشغل الذي تبذله البطّارية تكتسبه الشحنات الموجبة على شكل طاقة وضع كهربائية عند حركتها داخل البطّارية من القطب السالب الى القطب الموجب.

تفقد الشحنات هذه الطاقة في أثناء مرورها عبر مقاومات الدارة؛ إذ تخسر الشحنات جزءًا صغيرًا من طاقتها في أثناء حركتها داخل البطّارية؛ لأنّ للبطارية **مقاومة داخلية Internal resistance (r)** تُعيق حركة الشحنات، أمّا معظم الطاقة فتفقدها الشحنات عند عبورها المقاومة الخارجية (R)، بافتراض أسلاك التوصيل مثالية لا مقاومة لها.

✓ **أتحقّق:** ما أهمّية القوّة الدافعة الكهربائيّة للبطارية بالنسبة لحركة الشحنات عبر الدارة الكهربائيّة؟

أُفكّر: أوضّحُ العلاقة بين حركة كلّ من الإلكترونات والشحنات المُوجبة (الافتراضيّة) داخل البطّارية واتّجاه التيّار الكهربائي فيها.



الشكل (7): مقاومةٌ موصولةٌ بقطبي بطارية.

أُفكّر: ما تحوّلات الطاقة التي تحدث داخل البطّارية في الحالتين:

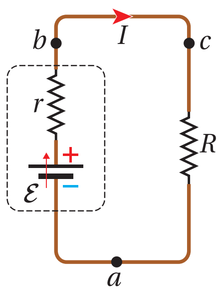
أ) توليد القوّة الدافعة الكهربائيّة وبذل شُغلٍ لتحريك الشحنات خلال الدارة.

ب) استهلاكُ جزءٍ من طاقة البطّارية داخلها بسبب المقاومة الداخلية لها.

يُبيّن الشكل (8) تمثيلًا بالرموز لدارة كهربائية تتكوّن من مقاومة (R) موصولة مع بطّارية قوّتها الدافعة (ε) ومقاومتها الداخلية (r). عند قياس فرق الجهد بين قطبي البطّارية نجد أنّه أقل من قوّتها الدافعة الكهربائية، وهذا الاختلاف ناتج عن المقاومة الداخلية للبطّارية؛ حيث تستهلك جزءًا من الطاقة الكهربائية وتحوّله إلى طاقة حرارية. فعند عبور البطّارية من النقطة (a) إلى النقطة (b) يزدادُ الجُهد بمقدار القوّة الدافعة الكهربائيّة للبطارية (ε)، لكنّه ينقُصُ نتيجة تأثير المقاومة الداخلية بمقدار (Ir)؛ لذا فإنّ فرق الجهد بين قطبي البطّارية في الشكل (8) يساوي المجموع الجبري للتغيّرات في الجهد بين النقطتين (a) و (b)، ويُعطى بالعلاقة الآتية:

$$\Delta V_\varepsilon = \varepsilon - Ir$$

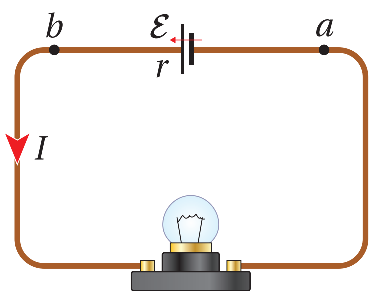
أستنتجُ من هذه العلاقة أن فرق الجُهد بين طرفي البطّارية يساوي القوّة الدافعة الكهربائيّة في حالتين؛ عندما يكون التيّار المارّ في البطّارية يساوي صفرًا، أو عندما تكون قيمة المقاومة الداخلية للبطّارية تساوي صفرًا، وفي هذه الحالة تُسمّى بطّارية مثالية.



الشكل (8): مقاومةٌ موصولةٌ بقطبي بطارية، ممثلةٌ بالرموز.

المثال 3

بطاريّةٌ قُوّتها الدافعة الكهربائيّة (12.0 V) ومقاومتها الداخلية (0.5 Ω)، وُصِل قطباها مع مصباح في دارة كهربائيّة، كما في الشكل (9)، فكان التيّار المارُّ فيها (2.4 A). أحسبُ فرق الجُهد بين قطبي البطّارية.



الشكل (9): دارةٌ كهربائيةٌ تحوي بطاريةً ومصباحًا كهربائيًّا.

المعطيات:

$$\varepsilon = 12.0\ \text{V},\ \ r = 0.5\ \Omega,\ \ I = 2.4\ \text{A}$$

المطلوب:

$$\Delta V_\varepsilon = ?$$

الحل:

$$\Delta V_\varepsilon = \varepsilon - Ir = 12.0 - (2.4 \times 0.5)$$

$$\Delta V_\varepsilon = 12.0 - 1.2 = 10.8\ \text{V}$$

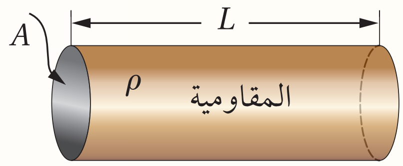
تمرين

في المثال (3)، بافتراض أنّ البطّارية مثالية ($r = 0$). أحسب فرق الجهد بين قطبيها.

مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** أوضّحُ المقصود بالمقاومة الكهربائيّة لمُوصلٍ فلزّي، وأذكرُ العوامل التي تعتمد عليها مُبينًا كيف تتناسبُ المقاومة مع كلٍّ منها.

2. يبيّنُ الشكلُ المجاور موصلًا فلزيًّا طولُه (L) ومساحة مَقطعِه (A). أوضّح متى تتساوى مقاومة هذا الموصل مع مقاوميّة المادة المصنوع منها.



3. **أحسبُ** المقاومة الكهربائيّة في جهاز حاسوب يسري فيه تيّار كهربائيٌّ (800 mA) عند فرق جُهدٍ (220 V).

4. موصل أومي فرق الجُهد بين طرفيه (V)، ويسري فيه تيّار كهربائي (I) عند درجة حرارة (20 °C)، أُبيّن ما يحدث لكلٍّ من فرق الجُهد والتيار والمقاومة إذا ارتفعت درجة حرارة الموصل إلى (50 °C)، أُفسّرُ إجابتي.

5. **أفسّر** لماذا يتغيّرُ فرق الجُهد بين قطبي البطّارية عندما يتغيّر مقدارُ التيّار الكهربائيّ المارِّ فيها؟

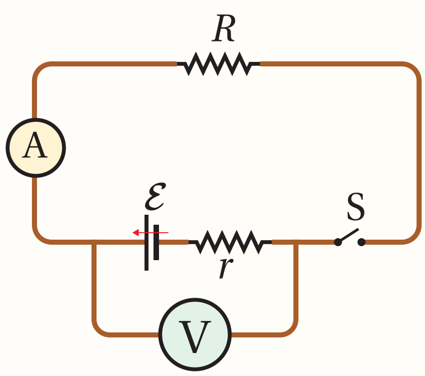
6. **أحسب:** سخّانٌ كهربائيٌّ صغيرٌ يعمل على جُهد (220 V). إذا كان سلك التسخين فيه المصنوعُ من سبيكة النيكروم طولهُ (83 m)، ونصفُ قُطرِهِ (0.3 mm). فما مقدارُ التيّار الكهربائيّ المارّ في السخان؟

7. **أستخدم الأرقام:** تتكون دارة كهربائية من بطارية ومقاومة كما في الشكل المجاور.

عندما كان المفتاح (S) مفتوحا كانت قراءة الفولتميتر (12 V)، وعند إغلاق المفتاح أصبحت قراءته (10 V)، إذا علمت أن المقاومة الداخلية للبطارية (0.5 Ω). أحسب :

أ . قراءة الأميتر والمفتاح مغلق.

ب. مقدار المقاومة (R).



الفكرة الرئيسة:
تتضمّن تطبيقاتُ الكهرباء أجهزةً ودارات كهربائيةً؛ تتفاوت من البسيطة مثل دارة مصباح المكتب، إلى المعقّدة مثل تلك التي تُستخدم في تشغيل بعض أجهزة الطائرة. ولكلّ جهازٍ كهربائيٍّ قدرةٌ كهربائيّةٌ تناسب الهدف من استخدامه.

نتاجات التعلّم:
- أعرّفُ القدرةَ والطاقةَ الكهربائيّةَ بمعادلات.
- أحلّل داراتٍ كهربائيّةً بسيطةً، وأحسبُ فرقَ الجُهد والتيار المارّ في كلّ مُقاومةٍ
- أحسبُ الطاقة الكهربائيّة التي تستهلكها الأجهزة في المنازل. وتكاليف استهلاكها.
- أحدّدُ طرائق لتقليل استهلاك الطاقة الكهربائيّة في المنازل والمصانع.
- أشتقّ وحدة قياس القدرة الكهربائيّة، والطاقة الكهربائيّة، مستخدمًا الصيغ الرياضية لها.

المفاهيم والمصطلحات:
القدرة الكهربائيّة	Electric Power
الطاقة الكهربائيّة	Electric Energy

الدارة الكهربائية البسيطة Simple Electric Circuit

تتكوّن الدارة الكهربائية في أبسط اشكالها من مسار مغلق (عروة)، يحتوي على بطّارية ومقاومة ومفتاح وأسلاك توصيل. عند إغلاق المفتاح يسري في الدارة تيّار كهربائي، وعند فتحه يتوقّف سريان التيّار الكهربائي. تُستخدم مجموعة من الرموز - تعرّفت بعضها - لتمثيل مكوّنات الدارة الكهربائية، وقد تُستخدم ضمن مكوّناتها أجهزة قياس؛ مثل الأميتر والفولتميتر.

التمثيل البياني لتغيرات الجهد الكهربائي Graphical Representation of Electric Potential Changes

لمعرفة تغيّرات الجهد عبر مُكوّنات دارة بسيطة مثل المُبيّنة في الشكل (10/ أ) سوف أتحرّك باتّجاه دوران عقارب الساعة بدءًا من النقطة (a) التي تُمثّل قطب البطّارية السالب، حتى أُكمل العروة كاملةً بالعودة إلى نقطة البداية (a). يُمكنُني تمثيلُ التغيُّرات في الجهد الكهربائيّ التي سأواجهها بيانيًّا كما في الشكل (10/ ب)

يُبيّن الشكل (10/ ب) أنّه عند عبور البطّارية من النقطة (a) إلى النقطة (b) يزدادُ الجُهد بمقدار القوّة الدافعة الكهربائيّة للبطّارية (ε)، لكنّه ينقُصُ نتيجة تأثير المقاومة الداخلية بمقدار (Ir). وعند الحركة من النقطة (b) إلى النقطة (c) يبقى الجهد ثابتًا لأنّ السلك مُهمَل المُقاومة؛ أي أنّ ($V_c = V_b$)، أمّا عند عبور المقاومة الخارجية بالحركة من النقطة (c) للعودة الى نقطة البداية (a)؛ فينخفض الجهد بمقدار (IR)، أي أنّ جهد النقطة (a) أقل من جهد النقطة (c). ومن الشكل (10/ ب) أستنتجُ أنّ هذه التغيرات في الجهد يمكن التعبير عنها رياضيًّا بالعلاقة:

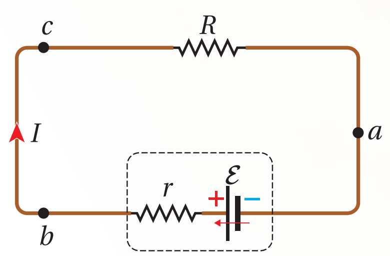
$$\varepsilon = IR + Ir$$

معادلة الدارة الكهربائية البسيطة Simple Circuit Equation

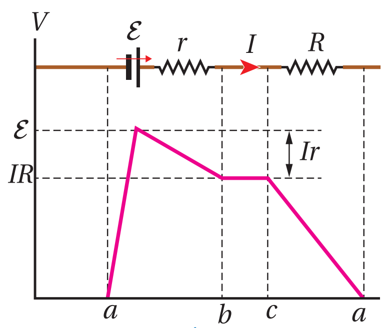
باستخدام العلاقة السابقة يمكن التعبير عن التيار الكهربائي (I) المارّ في الدارة البسيطة المبيّنة في الشكل (10/ أ) بالعلاقة:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}$$

تُعبّر هذه العلاقة عن معادلة الدارة البسيطة بأبسط أشكالها، ويمكن أن يحتوي المسار المغلق للدارة البسيطة على مقاومات وبطاريات عدّة.



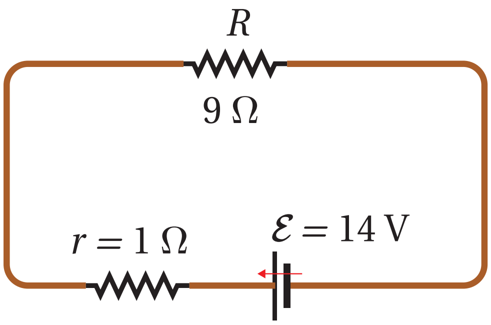
الشكل (10/ أ): مقاومةٌ موصولةٌ بقطبي بطارية، ممثلةٌ بالرموز.



الشكل (10/ ب): التمثيل البياني لتغيُّرات الجُهد في الدارة الكهربائية في الشكل (10/ أ).

المثال 4

تتكوّن دارة كهربائية بسيطة من بطّارية ومقاومة خارجية مبيّنة في الشكل (11). إذا كانت المقاومة الداخلية للبطارية تساوي (1Ω)، أحسبُ التيّار في الدارة وأُحدّد اتّجاهه.



الشكل (11): دارةٌ كهربائيّةٌ بسيطة تحوي بطارية ومقاومة.

المعطيات: $\varepsilon = 14\ \text{V},\ R = 9\ \Omega,\ r = 1\ \Omega$

المطلوب: $I = ?$

الحلّ:

أُطبّق معادلة الدارة البسيطة:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}$$

$$I = \frac{14}{9+1} = \frac{14}{10} = 1.4\ \text{A}$$

وخارج البطارية يكون اتّجاه التيّار في الدارة من القطب الموجب للبطّارية إلى القطب السالب؛ أي مع اتّجاه حركة عقارب الساعة.

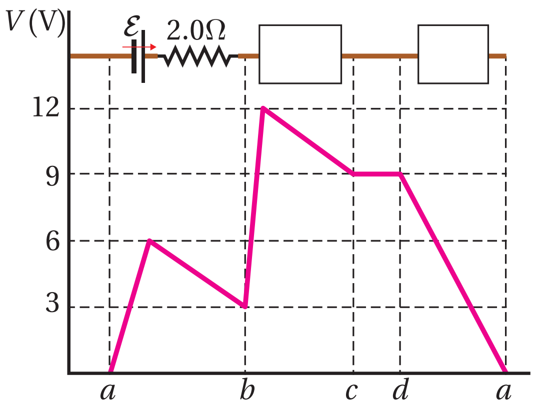
المثال 5

مُثّلت تغيّرات الجهد في دارة كهربائية بيانيًّا، كما في الشكل (12). بالاعتماد على بيانات الشكل أجد كلّ من:

أ) التيّار الكهربائي في الدارة.

ب) العنصر الموصول بين النقطتين (b) و (c)، وقياساته.

جـ) العنصر الموصول بين النقطتين (d) و (a)، وقياساته.



الشكل (12): التمثيل البياني للتغيرات في الجهد لدارة كهربائيّة تحوي مكونات مجهولة.

المعطيات: بيانات الشكل.

المطلوب: $I = ?$، العنصر (bc)، العنصر (da).

الحلّ:

أ) المنحنى البياني بين النقطتين (a) و (b) يُبيّن ارتفاع الجهد $(6.0\ \text{V})$ ثم انخفاضه $(3.0\ \text{V})$، وهذا يفيد بأنّ القوّة الدافعة الكهربائية للبطارية $(\varepsilon = 6.0\ \text{V})$، وانخفاض الجهد فيها يساوي $(Ir = 3.0\ \text{V})$.

$$I = \frac{\Delta V_r}{r} = \frac{3.0}{2.0} = 1.5\ \text{A}$$

ب) العنصر الموصول بين النقطتين (b) و (c) يرفع الجهد ثم يخفضه، فهو بطّارية قوتها الدافعة الكهربائية $(\varepsilon = 9\ \text{V})$، وانخفاض الجهد فيها $(Ir = 3.0\ \text{V})$، أي أنّ $(r = 2.0\ \Omega)$.

جـ) العنصر الموصول بين النقطتين (d) و (a) يخفض الجهد بمقدار $(9\ \text{V})$، فهو مقاومة $(IR = 9\ \text{V})$، أي أنّ:

$$R = \frac{9.0}{1.5} = 6.0\ \Omega$$

القدرة الكهربائيّة Electric Power

الإلكترونات هي الشحنات التي تتحرّك فعليًّا في الدارة الكهربائيّة، وتكون حركتُها بعكس اتجاه التيّار الاصطلاحي (I) الذي يُعبّر عن حركة شحناتٍ افتراضيّةٍ موجبةٍ. عند حركة الإلكترونات خلال الدارة الكهربائيّة المُبيّنة في الشكل (13) من النقطة (b) إلى النقطة (a) عبر البطّارية، فإنّ البطّارية تُكسبها طاقة، حيث تبذلُ عليها شغلًا مصدرهُ الطاقة الكيميائيّة داخلها، إلّا أنّ هذه الإلكترونات تفقدُ طاقة نتيجةَ تصادُمها مع بعضها بعضًا ومع ذرات المادة المصنوعة منها مقاومات الدارة وتتحوّل الطاقة الكهربائيّة إلى طاقةٍ حركيّةٍ للذرّات تسبّبُ ارتفاع درجة حرارة المقاومة. وقد تتحول الطاقة الكهربائيّة في الأجهزة الكهربائية المختلفة إلى أشكال أخرى من الطاقة؛ مثل الحركيّة أو الضوئيّة. تُكمل الإلكترونات حركتها من النقطة (c) مُنجذبةً إلى القطب الموجب للبطارية (b)، وهي نقطة البداية؛ مُكملةً دورَتها في الدارة الكهربائيّة.

إن تعريف القوّة الدافعة الكهربائيّة للبطارية، بأنّها الشغلُ المبذول (W) على وحدة الشحنات الموجبة، يُمكّنني من التعبير عنها رياضيًّا بالعلاقة:

$$W = \varepsilon \Delta Q$$

حيث (ΔQ) الشحنة المنقولة داخل البطّارية من قطبها السالب الى قطبها الموجب.

تُعرّف القدرةُ أنّها المعدلُ الزمنيّ للشُّغل المبذول، وتقاس بوحدة واط (watt).

وبذلك فإنّ **القدرة الكهربائيّة Electric power** للبطارية تُعرّف بأنّها المُعدّل الزمنيّ للشُّغل الذي تبذلهُ، وتُعطى بالعلاقة:

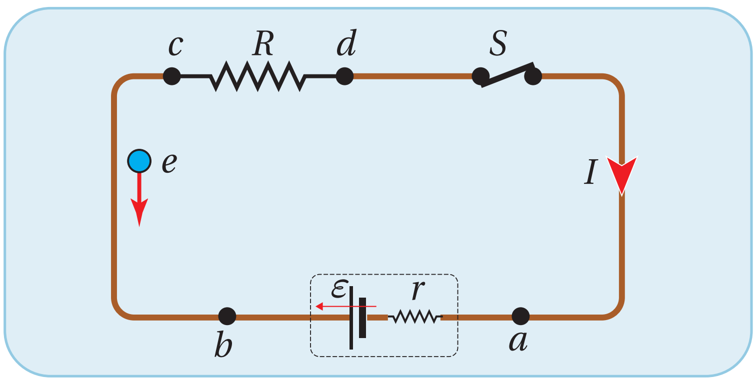
$$P_\varepsilon = \frac{W}{\Delta t} = \frac{\Delta Q}{\Delta t}\varepsilon = I\varepsilon$$

أي أنّ قُدرة البطّارية تُساوي ناتج ضرب قُوّتها الدافعة الكهربائيّة في التيّار المارّ فيها. باستخدام العلاقة السابقة ($\varepsilon = IR + Ir$) يمكنُني التعبير عن قدرة البطّارية كما يأتي:

$$P_\varepsilon = I\varepsilon = I^2 r + I^2 R$$

الربط مع الحياة

دارة القصر Short circuit تحدث عند توصيل القطب الموجب للبطارية مع قُطبها السالب دون وجود مقاومة بينهما، فيحدث انتقالٌ لكميّةٍ كبيرةٍ من الشحنات الكهربائيّة وتتولد طاقة كافيةٌ لتسخين الأسلاك. عند حدوث دارة قصر في تمديدات الكهرباء المنزلية، تنصهر الأسلاك وتتولّد طاقة كبيرةٌ قد تؤدي لاحتراق المنزل.



الشكل (13): حركة الإلكترونات في دارةٍ كهربائيّةٍ مُغلقةٍ بعكس اتّجاه التيّار الاصطلاحي I.

حيث إنّ I^2r هي القدرة المُستهلكة في المقاومة الداخلية، بينما I^2R القدرة المستهلكة في المقاومة الخارجية. ألاحظُ أنّ المعادلة السابقة تُعبّر عن مبدأ حفظ الطاقة، أي أنّ الطاقة التي تنتجُها البطّارية في ثانيةٍ واحدةٍ تُساوي الطاقة المُستهلَكة في مُقاومات الدائرة المُغلقة في ثانيةٍ واحدة. وبافتراض أنّ جُهدَ القُطب السالب للبطارية يساوي صفرًا $(V_a = 0)$، وجهدُ القطب الموجب $(V_b = V)$؛ فإنّ: $\Delta V_\varepsilon = V = IR$، وعندها فإنّ القُدرة المُستهلَكة في المقاومة الخارجية تُعطى بالعلاقة:

$$P = I^2R = IV = \frac{V^2}{R}$$

يمكن تعريفُ وحدة **الواط** بأنّها؛ قدرةُ جهازٍ كهربائيٍّ يستهلكُ طاقةً كهربائيةً بمقدار (1 J) كُلَّ ثانية. أو هي قدرة جهازٍ يمرُّ فيه تيّار كهربائيّ (1 A) عندما يكون فرق الجُهد بين طرفية (1 V).

✔ **أتحقّق**: في الدارة الكهربائيّة المُبيّنة في الشكل (13)؛ كيف تنتقل الشحنة الموجبة الافتراضية داخل البطّارية؟ ومن أين تحصل على الطاقة؟

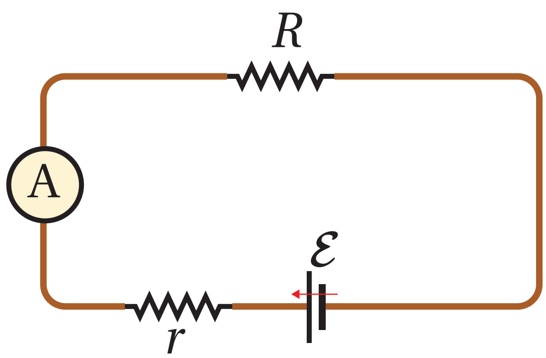
المثال 6

في الدارة المبيّنة في الشكل (14) إذا كان مقدار القوة الدافعة الكهربائية للبطّارية (12 V)، ومقاومتها الداخلية (1 Ω)، ومقدار المقاومة الخارجية (3 Ω) أحسب:

أ . قراءة الأميتر.

ب. قدرة البطّارية.

جـ. القدرة المستهلكة في كلّ من المقاومتين الداخلية والخارجية.



الشكل (14): دارة بسيطة.

المعطيات: $\varepsilon = 12\ \text{V},\ r = 1\ \Omega,\ R = 3\ \Omega$

المطلوب: $P_\varepsilon = ?,\ P = ?,\ I = ?$

الحلّ:

أ . الأميتر يقرأ التيّار 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 البطّارية من العلاقة:

$$P_\varepsilon = I\varepsilon = 3 \times 12 = 36\ \text{W}$$

جـ. القدرة المستهلكة في المقاومتين الداخلية والخارجية:

في المقاومة الداخلية: $P = I^2r = 9 \times 1 = 9\ \text{W}$

في المقاومة الخارجية: $P = I^2R = 9 \times 3 = 27\ \text{W}$

ألاحظُ أنّ القدرة المنتجة من البطّارية تساوي مجموع القدرة المستهلكة في مقاومات الدارة الداخلية والخارجية.

استهلاك الطاقة الكهربائيّة Consumption of Electric Energy

تستهلكُ الأجهزة الكهربائيّة الطاقة الكهربائيّة بكمّية تعتمد على قدرة الجهاز وزمن تشغيله؛ فمصباحٌ كهربائيٌّ مكتوبٌ علية (15 W)؛ يعني أنّه يستهلك طاقةً كهربائيّةً مقدارُها (15 J) كلَّ ثانية تشغيل، وإذا شُغّل مدّة نصف ساعةٍ فإنّه يستهلك كمّية من الطاقة الكهربائيّة (E) تساوي:

$$E = P\Delta t = 15\,\frac{\text{J}}{\text{s}} \times 30\text{ min}\,\frac{60\text{ s}}{1\text{ min}} = 27000\text{ J}$$

إضافةً إلى وحدة الجول؛ تُستخدم لقياس الطاقة الكهربائيّة -أيضًا- وحدةُ كيلو واط. ساعة (kWh)، وهذه كمّية من الطاقة يمكنُها تشغيل جهازٍ كهربائيٍّ قدرتُه (1 kW) مدّةَ ساعةٍ واحدة.

تُحسب تكلفة (Cost) استهلاك الطاقة الكهربائيّة في المنازل والمصانع وغيرها باستخدام العلاقة الآتية:

$$\text{Cost} = \text{Power(kW)} \times \Delta t(h) \times \text{Price (JD/kWh)}$$

المثال 7

أحسب تكلفة تشغيل مُكيّفٍ قدرتُه (4000 W) مدّة (8 h)؛ إذا كان سعر وحدة الطاقة الكهربائية (0.12 JD/kWh).

المعطيات: $P = 4000\text{ W},\ \Delta t = 8\text{ h},\ price = 0.12\text{ JD/kWh}$

المطلوب: التكلفة $cost = ?$

الحلّ:

$$cost = P \times \Delta t \times price = 4 \times 8 \times 0.12 = 3.84\text{ JD}$$

تطبيقٌ تكنولوجي: شحن السيارات الكهربائيّة

تُزوّد السيارة الكهربائيّة بالطاقة بواسطة شاحنٍ منزليّ، كما تتوافر أجهزة شحنٍ في الأماكن العامة، كما في الشكل (15)، وحيث إنّ القدرة الكهربائيّة لبطاريّة السيارة كبيرة، فهي تحتاج إلى كمّية كبيرة من الطاقة الكهربائيّة، ولتحقيق ذلك؛ لا بُدّ من وصل السيارة مع الشاحن مدّةً زمنيّةً طويلة. لتقليل هذه المُدّة ينبغي زيادة قدرة الشاحن والتيار الكهربائيّ الذي يسري عبر الأسلاك إلى بطارية السيارة. لكن هناك حدود أمان لا يمكن تخطيها، فعند الشحن في المنزل لا يُنصح بزيادة التيّار عن (13 A)؛ لمنع ارتفاع درجة حرارة الأسلاك، وهذا يتطلّبُ مدّة شحن قد تصل إلى (8) ساعات.

الربط مع التكنولوجيا

عند شراء بطارية هاتف، نبحث عن الأفضل، فالرقم الظاهر في الصورة (2800 mAh) يعني أن البطّارية تُخزّن كميةً من الطاقة، تُمكّنها من إنشاء تيّار (2800 mA) مدّة ساعةٍ كاملة، أو تيّار (280 mA) مدّة عشر ساعات.

وكذلك بالنسبة إلى بطّارية السيارة، نجد أنّ البطّارية (70 Ah) أفضل من تلك التي تحمل الرقم (50 Ah).

الشكل (15): شحن السيارة الكهربائيّة من جهاز شحن عام.

المثال 8

يتّصلُ مصباح الضوء الأماميّ في السيارة مع مصدر جُهدٍ (12 V)؛ فيسري فيه تيّار كهربائيٌّ مقدارهُ (10 A). ما القدرة الكهربائيّة المستهلكة في هذا المصباح؟ وما مقاومته الكهربائيّة؟

المعطيات: $I = 10\text{ A}\,,\ V = 12\text{ V}$

المطلوب: $R = ?,\ P = ?$

الحلّ:

$$P = IV = 10 \times 12 = 120\text{ W}$$

$$R = \frac{V}{I} = \frac{12}{10} = 1.2\ \Omega$$

المثال 9

سيارةٌ كهربائيّةٌ تُخزّن بطاريّتها طاقةً كهربائيّة مقدارها (24 kWh)، وُصلت بشاحنٍ يزودها بتيار (16 A) عند فرق جُهد (220 V). أجد:

أ . القدرةَ الكهربائيّة للشاحن.

ب. المُدّة الزمنية لشحن البطّارية بشكلٍ كامل.

جـ. تكلفةَ (*cost*) شحن السيارة بشكل 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 الكهربائيّة للشاحن:

$$P_{charger} = IV = 16 \times 220 = 3520\text{ W} = 3.52\text{ kW}$$

ب. زمن الشحن بالساعات:

$$t = \frac{E}{P_{charger}} = \frac{24}{3.52} = 6.8\text{ h}$$

جـ. تكلفة الشحن بشكل كامل.

$$cost = E \times price = 24\text{ kWh} \times 0.12\text{ JD/kWh}$$

$$cost = 2.88\text{ JD}$$

الربط مع التكنولوجيا

نظرًا لارتفاع تكلفة فاتورة الطاقة، أصبح من الضروري التوجه إلى مصادر الطاقة المتجدّدة، وعلى رأسها الطاقة الشمسية. تستخدم ألواحٌ تحتوي على عدد كبير من الخلايا الشمسية التي تحول طاقة ضوء الشمس إلى طاقة كهربائيّة يجري استهلاكها في المنزل أو المصنع، ويُنقل الفائض منها إلى الشبكة الوطنية للكهرباء، بدلًا من استخدام البطاريات مرتفعة الثمن لتخزينه.

تمرين

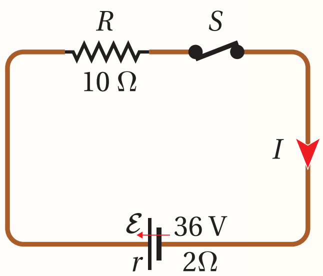
أحسب القدرة التي يستهلكها موقدٌ كهربائيٌّ مقاومة سلك التسخين فيه (20 Ω)، ويعمل على فرق جُهد (240 V).

مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** أوضّح المقصودَ بالقُدرة الكهربائيّة، ووحدةَ قياسِها.

2. **أستخدم المتغيرات:** موصلان (A) و (B) متساويان في الطول ومساحة المقطع، وُصِل كلٌّ منهما مع مصدر الجُهد الكهربائيّ نفسه، إذا كانت مقاوميّة مادة الموصل (A) مثلَيْ مقاوميّة مادة الموصل (B)؛ فما نسبة القدرة التي يستهلكها أحدهما إلى قدرة الآخر؟

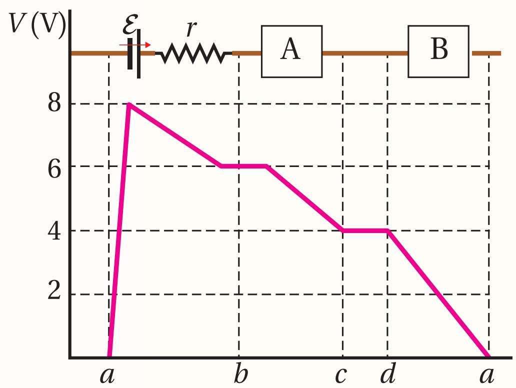
3. **أستخدم المُتغيّرات:** في الدارة الكهربائيّة المُبيّنة في الشكل المجاور؛ أُغلقَ المفتاح (S) مدّة (5 min). أحسب ما يأتي:



أ . الطاقة الكهربائيّة التي تنتجُها البطّارية (الشغل الذي تبذله).
ب. الطاقة الكهربائيّة التي تستهلكها كلُّ مقاومة.
جـ. نوع تحوّلات الطاقة في البطّارية وفي المقاومات.

4. **أستخدم المتغيرات:** وُصلت سيارة أطفال كهربائيّة مع شاحن كهربائيّ فرقُ جُهده (12 V)، وقدرته (120 W) حتى اكتملت عملية الشحن. إذا علمتُ أنّ مقدار الطاقة الكهربائيّة التي انتقلت إلى البطّارية (2.4 kWh)؛ أحسبُ:
أ . المدّةَ الزمنيّة لاكتمال عملية الشحن.
ب. التيّار المارَّ بين الشاحن وبطارية السيارة.
جـ. هل يمكن شحن السيارة باستخدام شاحنٍ فرقُ جُهدِهِ (12 V)، والتيار الذي يُنتِجه (1 A)؟ أفسر إجابتي.

5. **أحلّل:** تتكوّن دارةٌ كهربائيّةٌ من بطاريّةٍ لها مقاومةٌ داخليةٌ ومقاومتين خارجيتين، يمرُّ فيها تيّار كهربائيٌّ (1.6 A) بالاتّجاه من (a) إلى (a). مُثّلَت تغيُّرات الجُهد فيها بيانيًّا، كما في الشكل المجاور. أجدُ ما يأتي:
أ . القوّة الدافعة الكهربائيّة للبطارية.
ب. المقاومة الداخلية للبطارية.
جـ. المقاومة الخارجية (A).
د. المقاومة الخارجية (B).



توصيلُ المقاومات وقاعدتا كيرشوف
Combining Resistors and Kirchhoff's Rules

◄ **الفكرة الرئيسة:**

يُستخدم قانون أوم لتحليل الدارات الكهربائيّة البسيطة التي تتكون من عُروةٍ واحدة، وإن احتوت تفرُّعاتٍ تشتمل على مقاومات، نستخدم قواعد جمع المقاومات لدراستها، وفي حال احتوت التفرُّعات على بطّاريات ومقاومات، نستخدم قاعدتي كيرشوف إضافةً إلى ما سبق.

◄ **نتاجات التعلّم:**

- أنفّذ استقصاءً عمليًا لأتعرّف خصائص توصيل المقاومات على التوالي وعلى التوازي، من حيث التيّار المارّ في كل منها وفرق الجُهد بين طرفيها.
- أحلّل داراتٍ كهربائيةً مركّبةً بتوظيف قاعدتي كيرشوف.

◄ **المفاهيم والمصطلحات:**

توصيل المقاومات Combining Resistors

توالي Series

توازي Parallel

قاعدتا كيرشوف Kirchhoff's Rules

المقاومة المكافئة Equivalent Resistance

توصيل المقاومات Combining Resistors

تُستخدمُ المقاوماتُ الكهربائيّةُ بقيمٍ مُختلفة، وطرائق توصيلٍ مختلفةٍ في دارات الأجهزة الكهربائيّة، للقيام بوظيفتها حسب الغرض من استخدامها. وتعتمد قيمة المقاومة الكُلّية لعددٍ من المقاومات الموصولة معًا على طريقة توصيلها.

المقاومات على التوالي Resistors in Series

يبيّنُ الشكل (16) جزءًا من دارةٍ كهربائيّةٍ تتّصل فيه ثلاثُ مقاوماتٍ على التوالي؛ يمرُّ فيها التيّار الكهربائيّ (I) نفسُه، وبذلك يكون فرق الجُهد بين طرفي كلِّ مقاومةٍ مساويًا لحاصل ضرب المقاومة في التيّار.

$$V_1 = IR_1,\ \ V_2 = IR_2,\ V_3 = IR_3$$

فرق الجُهد الكُلّي بين النقطتين (a,b) يساوي:

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3$$

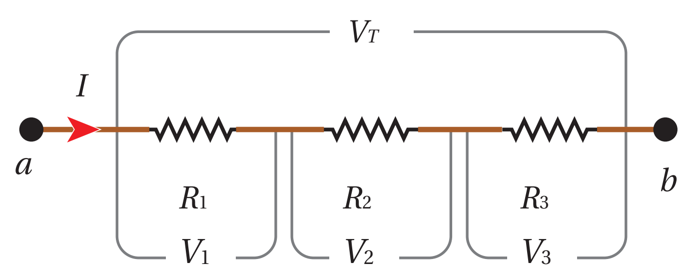
$$V_T = IR_1 + IR_2 + IR_3 = I(R_1 + R_2 + R_3)$$

عند مقارنة هذه المقاومات مع مقاومةٍ وحيدةٍ مكافئةٍ (R_{eq}) بينَ طرفيها فرق الجُهد نفسه (V_T)، ويمر فيها التيّار نفسه (I)، وتحقق العلاقة: ($V_T = IR_{eq}$)، نجدُ أنّ:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3$$

يُستخدم التوصيلُ بهذه الطريقة للحصول على مقاومةٍ كبيرةٍ من عددٍ من المقاومات الصغيرة؛ فتكون المقاومة المكافئة أكبر من أيٍّ منها، ومن خصائص هذا التوصيل تجزئةُ الجُهد بين المقاومات، إلّا أنّه عند حدوثِ قَطعٍ في مقاومةٍ يتوقّفُ التيّار في المقاومات جميعها.

✔ **أتحقّق:** أذكر خصائص توصيل المقاومات على التوالي، وأذكرُ عيبَ هذه الطريقة في التوصيل.



◄ الشكل (16): توصيل المقاومات على التوالي.

المقاومات على التوازي Resistors in Parallel

يبيّن الشكلُ (17) جزءًا من دارةٍ كهربائيةٍ تتّصل فيه ثلاثُ مقاوماتٍ على التوازي، بعد مرور التيّار الكهربائيّ (I) بالنقطة (a)، فإنّ الشحنة تتوزّع على المقاومات الثلاث؛ فيمرُّ تيّار جزئيٌّ في كلّ مقاومةٍ لتلتقي مرّةً أخرى وتُشكّل التيّار الكلي (I) الذي يمر بالنقطة (b). لتحقيق مبدأ حفظ الشحنة يجب أن تتحقّق العلاقة الآتية:

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

أمّا فرقُ الجُهد بين النقطتين (a,b)؛ فإنّه يساوي مقدارًا واحدًا مهما كان المسار الذي تتّبعهُ الشحنات بينهما. أي أنّ:

$$V_T = V_1 = V_2 = V_3$$

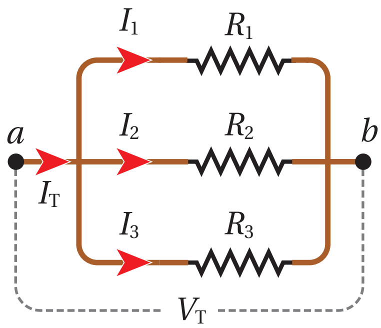
بتعويض التيّار بدلالة فرق الجُهد أحصل على العلاقة:

$$\frac{V_T}{R_{eq}} = \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} = \frac{V_T}{R_1} + \frac{V_T}{R_2} + \frac{V_T}{R_3}$$

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

عند استخدام مقاومة واحدة بين النقطتين (a,b) يسري فيها التيّار الكلي (I)، وفرق الجُهد بين طرفيها (V_T)، فإنها تكافئ المقاومات الثلاث.

تستخدم طريقةُ توصيل المقاوماتِ على التوازي عند الحاجة إلى مقاومة صغيرة، لأنّ المقاومة المكافئة تكون أصغرَ من أيِّ مقاومةٍ في المجموعة، ومن خصائص هذه الطريقة حصولنا على فرقِ جُهدٍ كُليٍّ في فروع التوصيل جميعها وتجزئة التيّار، وعند حدوث قطعٍ في أي فرع؛ فإنّ الفروع الأخرى لن تتأثر، لذا؛ فإنّ توصيل الأجهزة المنزلية والمصابيح في المنزل وفي الطرقات يكون على التوازي.



الشكل (17): توصيل مقاومات على التوازي.

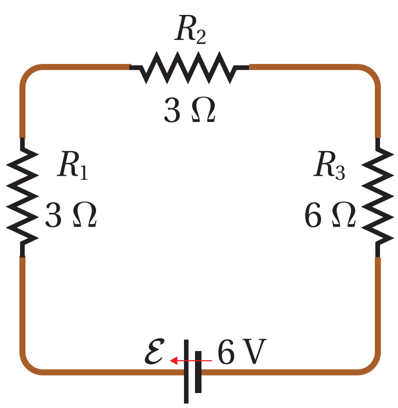
أفكّر: عندما يكون لديّ مصباحين كهربائيّين متماثلين موصولين على التوازي مع بطارية. إذا فصلتُ أحد المصباحين عن البطّارية، فأوضّح ما يحدث لإضاءة المصباح الثاني، وأبيّن السبب.

المثال 10

دارةٌ كهربائيّةٌ بسيطةٌ يبيّنُها الشكل (18)، المقاومة الداخلية للبطارية مهملة، أحسب كل من:

أ) المقاومة المكافئة للمقاومات الثلاث.

ب) التيّار الذي يسري في الدارة.



الشكل (18): دارة بسيطة تحتوي مقاومات موصولة على التوالي.

المعطيات: $R_1 = 3\ \Omega,\ R_2 = 3\ \Omega,\ R_3 = 6\ \Omega,\ \varepsilon = 6\ V$

المطلوب: $I = ?,\ R_{eq} = ?$

الحلّ:

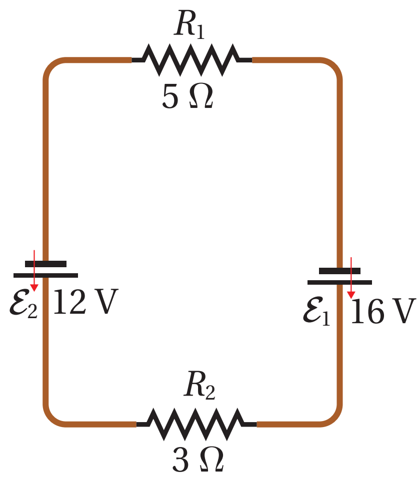
أ) المقاوماتُ موصولةٌ على التوالي؛ لذا أستخدم العلاقة الآتية:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 = 3 + 3 + 6 = 12\ \Omega$$

ب) التيّار المار في الدارة:

$$I = \frac{\varepsilon}{R_{eq}} = \frac{6}{12} = 0.5\ \text{A}$$

المثال 11



الشكل (19): دارةٌ كهربائيّةٌ بسيطةٌ تحوي بطاريتين ومقاومتين.

بالاعتماد على البيانات المُثبّتة في الشكل (19)، وبإهمال المقاومة الداخلية لكلتا البطاريتين؛ أجد كُلًّا من:

أ) قيمة تيّار الدارة وأُحدّد اتّجاهه.

ب) فرق الجُهد بين طرفي كل مقاومة.

المعطيات:

$R_1 = 5\ \Omega\ ,\ R_2 = 3\ \Omega\ ,\ \varepsilon_1 = 16\ \text{V}\ ,\ \varepsilon_2 = 12\ \text{V}$

المطلوب:

$I = ?\ ,\ V_1 = ?\ ,\ V_2 = ?$

الحلّ:

أ) الشكل يمثل دارة كهربائية بسيطة تتكون من عروة واحدة تحتوي على مقاومات وبطاريات عدة. أحدد اتجاه التيار (I) باتجاه القوة الدافعة الكهربائية للبطارية التي قوتها الدافعة أكبر؛ أي باتجاه القوة الدافعة (ε_1)، ولأن الدارة تحتوي مقاومات وبطاريات عدة، فإن معادلة الدارة الكهربائية البسيطة تكتب بالصيغة الآتية:

$$I = \frac{\Sigma\, \varepsilon}{R_{eq}}$$

$$I = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{R_{eq}} = \frac{16 - 12}{5 + 3} = \frac{4}{8}$$

$$I = 0.5\ \text{A}$$

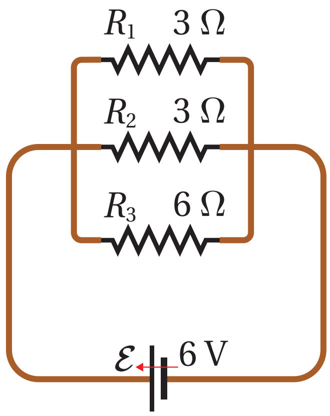
التيار مقداره (0.5 A) وباتجاه حركة عقارب الساعة.

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 12



الشكل (20): دارةٌ بسيطةٌ تحتوي مقاوماتٍ موصولةً على التوازي.

دارةٌ كهربائيّةٌ بسيطةٌ يبيّنُها الشكل (20)، المقاومة الداخلية للبطارية مُهملةٌ، أحسب كلاً من:

أ) المقاومة المكافئة للمقاومات الثلاث.

ب) التيّار الكلي المارّ في الدارة.

المعطيات: $R_1 = 3\ \Omega,\ R_2 = 3\ \Omega,\ R_3 = 6\ \Omega,\ \varepsilon = 6\ \text{V}$

المطلوب: $I = ?,\ R_{eq} = ?$

الحلّ:

أ) المقاوماتُ موصولةٌ على التوازي؛ لذا أستخدم العلاقة الآتية:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{3} + \frac{1}{3} + \frac{1}{6} = \frac{2+2+1}{6}$$

$$R_{eq} = 1.2\ \Omega$$

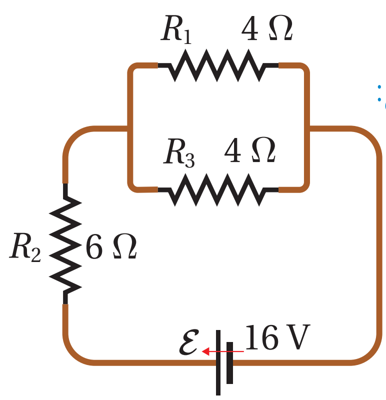
ألاحظ أنّ مقدارَ المقاومة المُكافئة أقلُّ من أصغر المقاومات المُتّصلة.

ب) التيّار الكلّي في الدارة:

$$I = \frac{\varepsilon}{R_{eq}} = \frac{6}{1.2} = 5\ \text{A}$$

عند المقارنة بين نتيجة الحلّ في المثالين (12 و 10)؛ ألاحظُ الاختلافَ في قيمة المقاومة المكافئة للمقاومات الثلاث باختلاف طريقة توصيلها. وكذلك الاختلافَ في قيمة التيّار الكلي المارّ في كلٍّ من الدارتين.

المثال 13



الشكل (21/أ): دارةٌ بسيطةٌ تحتوي مقاوماتٍ موصولةً على التوازي والتوالي.

دارةٌ كهربائيّةٌ بسيطةٌ يبيّنُها الشكل (21/أ)، المقاومةُ الداخلية للبطارية مُهمَلة، أحسب كلًّا من:

أ) المقاومة المكافئة للمقاومات الثلاث.

ب) التيّار الكلي المارُّ في الدارة.

المُعطيات: $R_1 = 4\ \Omega,\ R_2 = 6\ \Omega,\ R_3 = 4\ \Omega,\ \varepsilon = 16\ \text{V}$

المطلوب: $I = ?,\ R_{eq} = ?$

الحل:

أ) ألاحظ أن المقاومتين (R_1, R_3) موصولتان على التوازي.

أجدُ المقاومة المكافئة لهما، والتي سأرمز لها بالرمز (R_{13}).

$$\frac{1}{R_{13}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{4} + \frac{1}{4} = \frac{2}{4}$$

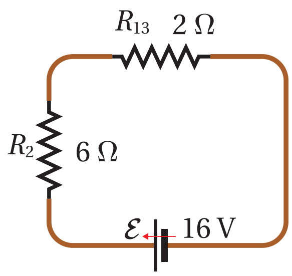
$$R_{13} = \frac{4}{2} = 2\ \Omega$$

يمكن إعادة رسم الدارة مرّةً ثانيةً كما في الشكل (21/ ب) الذي ألاحظُ فيه أنَّ المقاومتين (R_2, R_{13}) موصولتان على التوالي.

$$R_{eq} = R_2 + R_{13} = 6 + 2 = 8\ \Omega$$

ب) التيّار الكلي المار في الدارة.

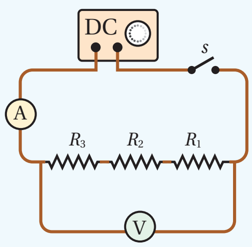
$$I = \frac{\varepsilon}{R_{eq}} = \frac{16}{8} = 2\ \text{A}$$



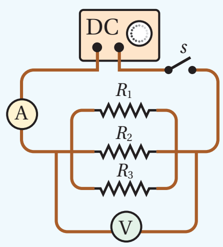
الشكل (21/ب): دارةٌ بسيطةٌ تحتوي مقاوماتٍ موصولةً على التوالي.

التجربة 2 استقصاءُ قاعدتي توصيل المقاومات / توالي، توازي

الموادُّ والأدوات: مصدرُ طاقة منخفض الجُهد (DC)، مفتاحٌ كهربائيّ، مجموعة مقاومات (4,6,10,20,... Ω)، جهاز أميتر وجهاز فولتميتر، أسلاك توصيل.



(أ)



(ب)

إرشادات السلامة: الحذرُ من لمس الوصلات الكهربائيّة غير المعزولة، عدم إغلاق المفتاح مُدّة طويلة تسبب سخونة الأسلاك.

خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أنفّذُ الخطوات الآتية:

1. أختارُ ثلاث مُقاوماتٍ مختلفةٍ، قيمُها معلومةٌ وأرمز لأصغرها بالرمز (R_1)، ثمّ تتبعها (R_2)، ثم (R_3)، وأدوّن قيمها في جدول خاص.
2. أصلُ المقاوماتِ الثلاث على التوالي مع مصدر الطاقة، والمفتاح، وجهاز الأميتر، ثمّ أصلُ جهاز الفولتميتر مع المقاومات الثلاث، كما في الشكل (أ).
3. أغلقُ المفتاح مدّةً قصيرة، بحيث أتمكّنُ من قراءة التيّار والجُهد في جهازي الأميتر والفولتميتر، وأدوّن القراءات في الجدول.
4. أجدُ قيمةَ المقاومة المكافئة باستخدام قِيَم الجُهد والتيار المُقاسة في الخطوة (3)، ثمّ أُطبّق قانون أوم، بعد ذلك أحسبُ قيمة المقاومة المكافئة بتطبيق قاعدة التوصيل على التوالي، وأقارنُ النتيجتين.
5. أعيدُ توصيل المقاومات الثلاث على التوازي، وأصل جهازي الفولتميتر والأميتر كما في الشكل (ب)، ثم أكرّر الخطوتين (3, 4)، وأقارنُ النتائج الحسابية مع العملية.

التحليل والاستنتاج:

1. **أقارنُ** بين مقدار المقاومة المكافئة للمقاومات الثلاث التي توصّلتُ إليها تجريبيًّا مع القيمة المحسوبة باستخدام العلاقة الرياضية، لكلٍّ من طريقتي التوصيل؛ التوالي والتوازي.
2. **أستنتجُ:** أتحقّقُ عمليًّا من قاعدتي جمع المقاومات على التوالي وعلى التوازي.
3. ما العلاقة بين الجُهد الكلي (جُهد المصدر) والجُهد الفرعي لكلِّ مقاومةٍ في طريقتي التوصيل؟
4. ما العلاقة بين التيّار الكلي والتيار الفرعي لكلِّ مقاومةٍ في طريقتي التوصيل؟

قاعدتا كيرشوف Kirchhoff's Rules

درستُ العلاقةَ بين فرق الجُهد والتيار في دارةٍ كهربائيّةٍ بسيطة، واستخدمتُ قواعد حساب المقاومة المكافئة لتحويل الدارة التي تحتوي على تفرُّعات إلى عُروةٍ واحدة. لكن توجدُ داراتٌ كهربائيّةٌ لا يمكنُ تبسيطُها بتحويلها إلى عُروةٍ واحدة. لتحليل هذه الدارات؛ سوف أستخدم قاعدتين وضعهما العالم غوستاف كيرشوف، إضافةً إلى القواعد السابقة.

قاعدة كيرشوف الأولى Kirchhoff's First Rule

تُسمّى أيضًا قاعدة الوصلة Junction rule وهي تمثّل إحدى صور مبدأ حفظ الشحنة؛ فكمّية الشحنة الداخلة باتّجاه نقطةٍ في دارةٍ كهربائيّة، تُساوي كمّية الشحنة المغادرة لها، ولا يمكن أن تراكم الشحنة عند تلك النقطة. عندما أُطبّق هذه القاعدة على نقطة التفرُّع (a)، في الدارة الكهربائيّة المُبيّنة في الشكل (22/ أ)، أجدُ أنّ ($I_1 = I_2 + I_3$)؛ أي أنّ التيّار الداخل باتّجاه (a) يُساوي مجموع التيارين الخارجين منها. وتنصُّ **قاعدة كيرشوف الأولى** أنّ «المجموع الجبري للتيارات عند أي نقطة تفرع في دارة كهربائيّة يساوي صفرًا».

$$\Sigma I = 0 \;\rightarrow\; \Sigma I_{in} = \Sigma I_{out}$$

يمكنُ تشبيهُ تفرُّع التيّار الكهربائيّ بماء النهر في المنطقة (A) الذي يتفرّع إلى فرعين (B,C) حول الجزيرة، كما في الشكل (22 / ب). حيث تُساوي كمّية الماء المتدفّق عبر النهر مجموعَ ما يتدفّقُ من الماء على جانبي الجزيرة.

✓ **أتحقّق:** أوضح العلاقة بين قاعدة كيرشوف الأولى ومبدأ حفظ الشحنة.

المثال 14

بالرجوع إلى الشكل (22/ أ)، إذا كان التيّار الأول (6.0 A) والتيار الثاني (3.5 A). أجدُ مقدار التيّار المارّ في المقاومة (R_3).

المعطيات:

$$I_1 = 6.0\ \text{A},\ I_2 = 3.5\ \text{A}$$

المطلوب:

$$I_3 = ?$$

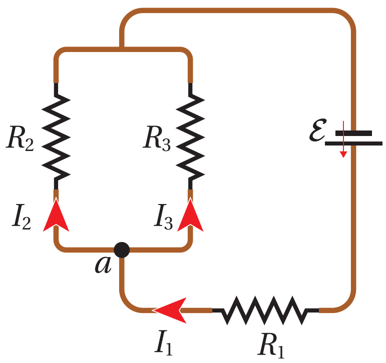
الحلّ:

بتطبيق قاعدة كيرشوف الأولى على نقطة التفرع (a):

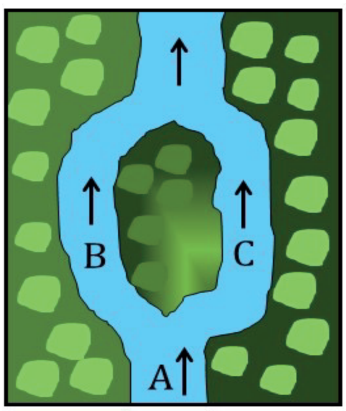
$$I_1 = I_2 + I_3 \;\rightarrow\; I_3 = I_1 - I_2 = 6.0 - 3.5 = 2.5\ \text{A}$$

الدارة البسيطة والدارة المركّبة:

تتكوّن الدارة الكهربائيّة البسيطة من عروةٍ واحدة، وقد تحتوي على تفرُّعات للمقاومات فقط؛ أما إذا وُجدت في التفرُّعات بطارياتٌ، فإنّ الدارة تصبحُ مركّبة.



(أ): تفرّع التيّار الكهربائيّ.



(ب): تدفق الماء عند تفرع النهر.

الشكل (22): قاعدة كيرشوف الأولى، ومقارنتُها بتفرُّع النهر.

قاعدة كيرشوف الثانية Kirchhoff's Second Rule

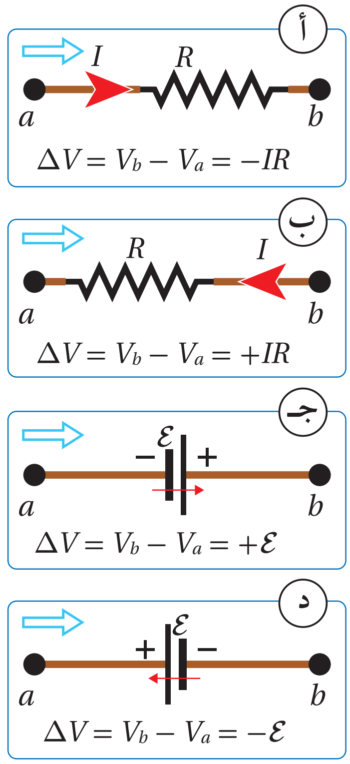
تُسمّى هذه القاعدة بقاعدة العُروة، وهي تحقّقُ قانون حفظ الطاقة. وتنصُّ **قاعدة كيرشوف الثانية** أنّ: «المجموع الجبري لتغيرات الجُهد عبر مكونات مسارٍ مُغلقٍ في دارةٍ كهربائيّةٍ يُساوي صفرًا». تقلُّ طاقة الوضع الكهربائيّة للشحنة الافتراضية الموجبة عند انتقالها من جُهد مُرتفعٍ إلى جُهدٍ منخفضٍ خلال المقاومات، بينما تزداد طاقة الوضع الكهربائيّة للشحنة الموجبة عند عبورها البطّارية من قطبها السالب الى قطبها الموجب، أي باتّجاه القوّة الدافعة الكهربائيّة.

القوّة الكهربائيّة قوّة محافظة؛ لذا فإنّ طاقة نظام (الشحنة–الدارة) تكون محفوظةً عند حركة الشحنة من نقطة محدّدة والعودة إليها، أي أنّ التغيّر في طاقة الوضع الكهربائية يساوي صفرًا، ويُعطى بالعلاقة:

$$\Delta PE = \Sigma q\,\Delta V = q\,\Sigma\,\Delta V$$

حيث $\Sigma\,\Delta V$ المجموع الجبريّ للتغيُّرات في الجُهد ويساوي صفرًا: $\Sigma\,\Delta V = 0$.

لتطبيق القاعدة الثانية لكيرشوف؛ عليَّ أن أُحدّد تغيُّرات الجُهد خلال العروة. أتخيَّلُ أنّني أنتقل خلال العروة لتتبع التغيُّرات في جهود مكوناتها باتّجاه حركةٍ مُحدّدٍ مسبقًا، مع مراعاتي نظامَ إشاراتٍ موجبةٍ وسالبة، كما يأتي:



الشكل (23): تحديد زيادة الجُهد أو نقصانه عند عبور مقاومةٍ أو بطاريّةٍ من اليسار إلى اليمين.

أ). عند عبور المقاومة (R) من النقطة (a) إلى النقطة (b) باتّجاه التيّار، فهذا يعني الانتقال من جُهدٍ مرتفعٍ عند بداية المقاومة إلى جُهدٍ منخفض عند نهايتها؛ لذلك يقلّ الجُهد ($\Delta V = -IR$)، كما في الشكل (23/ أ).

ب). عند عبور المقاومة باتّجاهٍ مُعاكسٍ للتيار؛ فهذا يعني الانتقال من جُهدٍ منخفضٍ إلى جُهدٍ مرتفع؛ لذلك يزداد الجُهد ($\Delta V = IR$). كما في الشكل (23/ ب).

جـ). عند عبور بطاريّة من قُطبها السالب إلى قُطبها الموجب (مع اتّجاه قوّتها الدافعة الكهربائيّة)؛ فهذا يعني الانتقال من جُهدٍ منخفض إلى جُهدٍ مرتفع؛ لذا يزداد الجُهد ($\Delta V = \varepsilon$). كما في الشكل (23/ جـ).

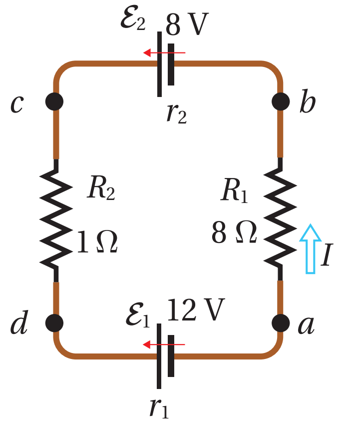
د). عند عبور بطاريّة من قُطبها الموجب إلى قُطبها السالب (عكس اتجاه قوتها الدافعة الكهربائيّة)؛ فهذا يعني الانتقال من جُهدٍ مُرتفعٍ إلى جُهد منخفض؛ لذا يقلُّ الجُهد ($\Delta V = -\varepsilon$).كما في الشكل (23/ د).

تم التعامل مع البطاريات في القواعد السابقة بوصفها مثالية، لكن عند تحديد تغيُّرات الجُهد في العروة، فإنَّ المقاومة الداخلية لكلِّ بطاريّةٍ تُعامَل معاملة المقاومات الخارجية.

✔ **أتحقّق:** كيف يمكنُ تفسيرُ قاعدة كيرشوف الثانية عن طريق مبدأ حفظ الطاقة؟

المثال 15

دارةٌ كهربائيّةٌ بسيطةٌ تتكوّن من بطاريتين ومقاومتين، كما في الشكل (24)، إذا كانت كلتا المقاومتين الداخليتين تساوي ($0.5\ \Omega$)، باستخدام القاعدة الثانية لكيرشوف؛ أجدُ قيمة التيّار وأحدّد اتّجاهه.



الشكل (24): تطبيق قاعدة كيرشوف الثانية على عروةٍ واحدةٍ مقفلة.

المعطيات:

بيانات الشكل ، $r_1 = 0.5\ \Omega,\ \ r_2 = 0.5\ \Omega$

المطلوب:

$I = ?$

الحلّ:

أفترض اتّجاه التيّار في الدارة (العروة) بعكس اتّجاه عقارب الساعة، وأفترضُ كذلك اتّجاه عبور مكوّنات الدارة، بعكس اتّجاه عقارب الساعة، وأبدأ العبور من النقطة (a) عبر المسار: $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow a$

$$V_a + \Sigma\,\Delta V = V_a$$

$$\Sigma\,\Delta V = V_a - V_a = 0$$

$$-IR_1 + \varepsilon_2 - Ir_2 - IR_2 - \varepsilon_1 - Ir_1 = 0$$

$$\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - I(R_1 + r_2 + R_2 + r_1) = 0$$

$$8 - 12 - I(8 + 0.5 + 1 + 0.5) = 0$$

$$-4 - I(10) = 0 \ \rightarrow\ I = \frac{-4}{10} = -0.4\ \text{A}$$

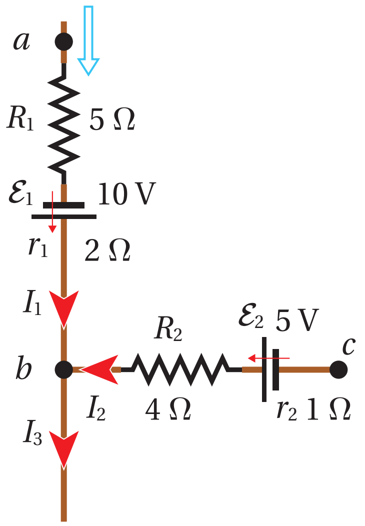
أستنتجُ من الإشارة السالبة أن اتّجاه التيّار بعكس الاتجاه المفترض؛ أي أنّ التيّار يسري في الدارة مع اتّجاه عقارب الساعة.

تمرين

أعيدُ حلّ المثال (15) بافتراض اتّجاه التيّار مع اتّجاهِ حركة عقارب الساعة، واختيار اتّجاه العبور بعكس اتّجاه حركة عقارب الساعة. ثم أستنتج أثر ذلك في نتيجة الحلّ.

المثال 16

جزءٌ من دارةٍ كهربائيّةٍ مُركّبة، كما في الشكل (25)، فيه $(I_1 = 3.0\ \mathrm{A})$، $(I_3 = 4.5\ \mathrm{A})$. إذا علمتُ أنّ $(V_c = 9.0\ \mathrm{V})$، أحسبُ جُهد النقطة (a).



الشكل (25): جزء من دارة كهربائيّة مركّبة.

المعطيات: بيانات الشكل، $I_3 = 4.5\ \mathrm{A},\ V_c = 9.0\ \mathrm{V},\ I_1 = 3.0\ \mathrm{A}$

المطلوب: $V_a = ?$

الحلّ:

أُطبّق القاعدة الأولى لكيرشوف لحساب التيّار (I_2).

$$\Sigma I = 0 \rightarrow I_1 + I_2 = I_3$$

$$I_2 = I_3 - I_1 = 4.5 - 3.0 = 1.5\ \mathrm{A}$$

أطبّق القاعدة الثانية لكيرشوف عند العبور من (a) إلى (c)، كما يأتي:

$$V_a + \Sigma\, \Delta V = V_c$$

$$V_a - I_1R_1 + \varepsilon_1 - I_1r_1 + I_2R_2 - \varepsilon_2 + I_2r_2 = V_c$$

$$V_a - 3.0(5) + 10 - 3.0(2) + 1.5(4) - 5 + 1.5(1) = 9.0$$

$$V_a - 8.5 = 9.0$$

$$V_a = 17.5\ \mathrm{V}$$

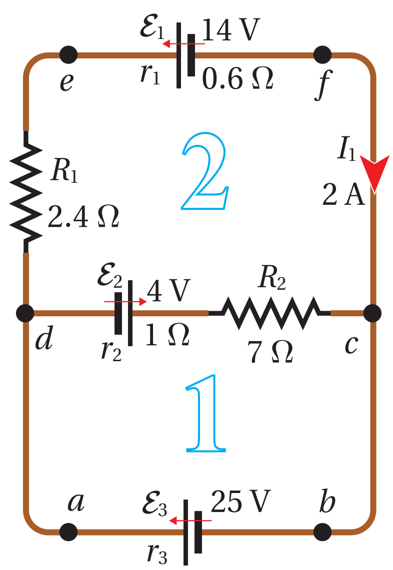
أستنتج أنّ جُهد النقطة (a) يزيد على جُهد النقطة (c) بمقدار $(8.5\ \mathrm{V})$.

المثال 17

تتكوّن دارة كهربائيّة من عروتين، كما في الشكل (26)، بالاعتماد على بيانات الشكل، أحسبُ:

أ) قِيَم باقي تيارات الدارة وأحدّد اتجاه كل تيّار.

ب) مقدار المقاومة الداخلية (r_3).



الشكل (26): دارة كهربائيّة مركّبة تتكوّن من عروتين مغلقتين.

المعطيات: بيانات الشكل.

المطلوب: $I_3 = ?,\ I_2 = ?,\ r_3 = ?$

الحلّ:

أ) لتطبيق القاعدة الأولى لكيرشوف، أفترض أنّ نقطة التفرع (c) يدخل إليها تيّار (I_1)، ويخرج منها تياران (I_2, I_3)، وأمثّل ذلك بأسهم على الشكل (27)، ثم أكتب المعادلة الأولى:

$$I_1 = I_2 + I_3$$

$$2 = I_2 + I_3$$

توجد في الدارة ثلاث عُرى، هي $(abcda)$، $(cfedc)$، $(abcfeda)$، سأختار منها العروة الثانية $(cfedc)$ لتطبيق القاعدة الثانية لكيرشوف، لأنها تتضمن التيّار المعلوم (I_1).

سأعبُر العروة بعكس اتّجاه حركة عقارب الساعة، بدءًا من النقطة (c)، وأكتب المعادلة الثانية:

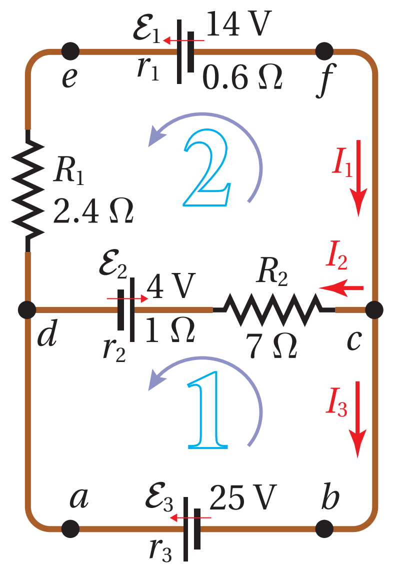
$$V_c + \Sigma\, \Delta V = V_c$$

$$+\varepsilon_1 + I_1 r_1 + I_1 R_1 + \varepsilon_2 + I_2 r_2 + I_2 R_2 = 0$$

$$14 + (0.6)I_1 + (2.4)I_1 + 4 + (1)I_2 + (7)I_2 = 0$$

$$14 + (0.6 + 2.4) \times 2 + 4 + (8)I_2 = 0$$

$$I_2 = \frac{-24}{8} = -3\ \text{A}$$



الشكل (27): الاتجاه المفترض للتيارات، ولاتجاه العبور خلال مكوّنات العروتين 1 و 2.

من المعادلة الأولى أجدُ أنّ:

$$I_3 = I_1 - I_2 = 2 - (-3) = 5\ \text{A}$$

إشارة التيّار (I_3) موجبةٌ، ما يعني أنّه بالاتّجاه المُفترض، وإشـارة التيّار (I_2) سالبـة؛ أي أنّه بعكس الاتّجاه المفترض.

ب) لحساب المقاومة الداخلية (r_3) أطبق القاعدة الثانية لكيرشوف على العروة الأولى $(abcda)$، سأعبُرها بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة بدءًا من النقطة (a)، للحصول على:

$$V_a + \Sigma\, \Delta V = V_a$$

$$-\varepsilon_3 + I_3 r_3 - I_2 R_2 - \varepsilon_2 - I_2 r_2 = 0$$

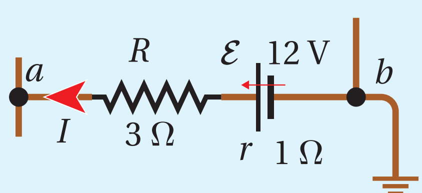
$$-25 + 5r_3 - (-3 \times 7) - 4 - (-3 \times 1) = 0$$

$$5\,(r_3) = +29 - 24 \rightarrow r_3 = 1\ \Omega$$

تمرين

بالاعتماد على بيانات الشكل (28)، حيث $(I = 2\ \text{A})$ وجُهد النقطة (b) يساوي صفرًا، بسبب اتّصالها بالأرض. أجدُ جُهدَ النقطة (a).

ملاحظة: تُعدُّ الأرض موصلًا ضخمًا يمكنه تفريغُ شحنة الأجسام المُتّصلة به؛ لذلك فإنّ أيّ جسمٍ يُوصَل بالأرض يصبح جُهده صفرًا.



الشكل (28): فرق الجُهد بين نقطتين.

مراجعة الدرس

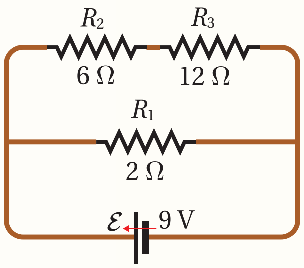
1. **الفكرة الرئيسة:**

أ . أذكرُ نصّ قاعدتي كيرشوف، وما مبدأ الحفظ الذي تحقّقُه كلٌّ منهما؟

ب. **أقارنُ** بين طريقتي توصيل المقاومات على التوالي وعلى التوازي من حيث؛ فرق الجُهد والتيار والمقاومة المكافئة.

2. أُبيّن طريقةَ توصيل المصباحين الأماميّين في السيارة مع البطّارية، إن كانت تواليًا أو توازيًا، مُفسّرًا أهميّة هذه الطريقة.

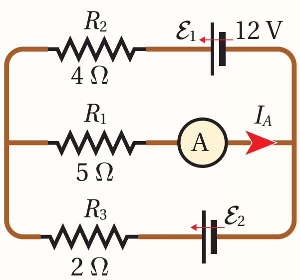
3. **أستخدمُ المتغيرات:** يُبيّن الشكل المجاور دارةً كهربائيّة تحتوي بطاريّةً ومقاومات، بالاعتماد على بيانات الشكل وبإهمال المقاومة الداخلية؛ أحسبُ المقاومة المكافئة للدّارة، ثمّ مقدار التيّار فيها.



4. إذا كانت قراءة الأميتر في الدارة المجاورة (2 A)، وبإهمال المقاومات الداخلية للبطاريات، أجدُ كُلًّا من:

أ . مقدار واتجاه التيارين: (I_1) يمرُّ في (ε_1)، و (I_2) يمر في (ε_2).

ب. مقدار القوّة الدافعة الكهربائيّة (ε_2).



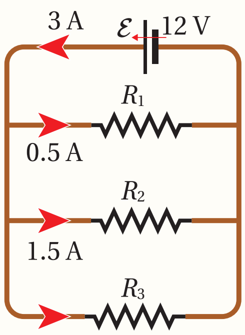
5. **أفسّرُ** لماذا يُعدّ فرق الجُهد بين طرفي المقاومة سالبًا عند عبورها باتّجاه التيّار المارِّ فيها.

6. **أستخدمُ المتغيرات:** بالاعتماد على بيانات الدارة المبينة في الشكل؛ أجد ما يأتي:

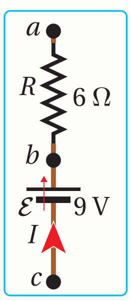
أ . التيّار المارّ في المقاومة (R_3).

ب. قيم المقاومات الثلاث.

جـ. المقاومة المكافئة.



7. يبيّن الشكل المجاور جزءًا من دارةٍ كهربائيّة، بالاعتماد على بيانات الشكل، حيث إنّ: ($V_c - V_a = 7$ V) و ($V_b - V_a = 15$ V)؛ أجد مقدار المقاومة الداخلية للبطارية.



توصيل المقاومات

لاحظ سعيدٌ ارتفاعَ قيمة فاتورة الكهرباء في أحد شهور فصل الشتاء، فأجرى عمليّاتٍ حسابيّةً لأجهزة منزله، واستنتج أنّ هذا الارتفاع يعود إلى استخدام مدفأة كهربائيّة مُددًا طويلةً، فاطّلع على لوحة بيانات المدفأة فوجد أنّ قُدرتها (3.6 kW)؛ وهي تتكوّن من ثلاث مُقاوماتٍ موصولةٍ معًا، وتعمل عن طريق مفتاحٍ واحدٍ باستخدام فرق جُهد (220 V).

قرّر إجراء تعديل على المدفأة؛ فأعاد توصيل المقاومات الثلاث بطريقةٍ مختلفة، مع بقائها تعمل عن طريق مفتاحٍ واحد، فانخفضت قيمة الفاتورة مع أنّ ساعات التشغيل بقيت كما هي. لكنّه واجه مشكلةً بأنّ الطاقة الحرارية التي تولّدها المدفأةُ أصبحت أقلّ بكثيرٍ من أدائها السابق.

قرّر التأكد حسابيًّا من التعديل الذي أجراه على المدفأة والنتائج التي حصل عليها؛ فحصل على ما يأتي:

وضع المدفأة الابتدائي:

تتكوّن المدفأة من ثلاث مُقاوماتٍ متماثلةٍ (R) موصولةٍ معًا على التوازي، تسري فيها تيّاراتٌ مُتماثلة (I)؛ بحيث تستهلك كلٌّ منها ثلث القدرة الكُليّة للمدفأة ($P = 0.33 \times 3.6 = 1.2\ \text{kW} = 1200\ \text{W}$)، مقدار التيّار الذي يسري في كلّ مقاومةٍ ومقدار المقاومة يمكن حسابهما بمعرفة القدرة وفرق الجُهد:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{1200}{220} = 5.5\ \text{A}, \qquad R = \frac{V}{I} = \frac{220}{5.5} = 40\ \Omega$$

وضع المدفأة بعد التعديل

بعد إعادة توصيل المقاومات الثلاث على التوالي في المدفأة تُصبح المقاومة المكافئة لها:

$$R = 40 + 40 + 40 = 120\ \Omega$$

وبذلك يصبح التيّار المارُّ في المقاومات الثلاث جميعها (I)، كما يأتي:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{220}{120} = 1.83\ \text{A}$$

وتصبح القدرة الكُليّة للمدفأة:

$$P = IV = 1.83 \times 220 = 402.6 \approx 400\ \text{W}$$

أستنتج أن قدرة المدفأة الكُليّة قد انخفضت إلى التُسع؛ أي إنها لن تنتج سوى تُسع الطاقة التي كانت تنتجها مسبقًا، ولهذا السبب فإنّ كُلفة تشغيلها تنخفض أيضًا.

مراجعة الوحدة

1. أضعُ دائرةً حول رمز الإجابة الصحيحة لكلّ جملة ممّا يأتي:

1. المقاومية خصيصة فيزيائية للمادة، ومقاوميّة موصل تتّصف بإحدى الصفات الآتية:

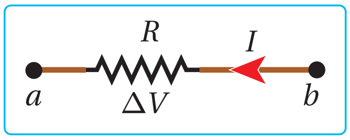
أ . تزدادُ بزيادة طول الموصل وبزيادة مساحة مَقطعِه.

ب. تقلُّ بزيادة طول الموصل وبزيادة مساحة مَقطعِه.

جـ. تزدادُ بزيادة طول الموصل وبنقصان مساحة مقطعه.

د . تعتمدُ على نوع المادة وليس على أبعاد الموصل الهندسية.

2. يسري تيّار في مقاومة باتّجاه اليسار، كما في الشكل، إذا كان (V_a) ثابتًا؛ فإنّه يمكنُ وصف الجُهد (V_b) بأنه:



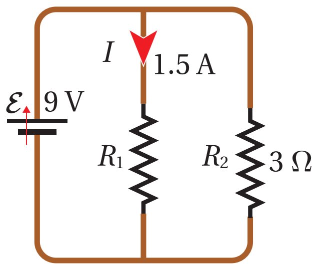
أ . (V_b) أعلى من (V_a)، وبزيادته يزداد التيّار (I).

ب. (V_b) أعلى من (V_a)، وبزيادته يقلُّ (I).

جـ. (V_b) أقل من (V_a)، وبزيادته يزداد التيّار (I).

د . (V_b) أقل من (V_a)، وبزيادته يقلُّ التيّار (I).

3. تكون المقاومة المكافئة للمقاومتين في الدارة المجاورة:



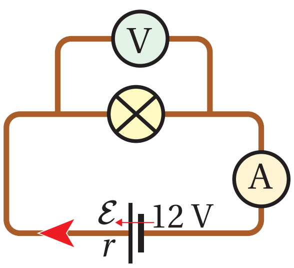
أ. 1 Ω

ب. 2 Ω

جـ. 3 Ω

د . 6 Ω

4. عندما تكون قراءة الفولتميتر في الدارة المبينة في الشكل (9.0 V) وقراءة الأميتر (1.5 A)؛ فإنّ المقاومة الداخلية للبطارية تساوي:



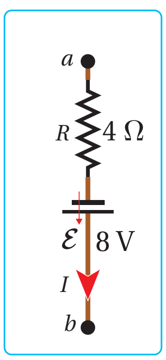
أ. 1.0 Ω

ب. 1.5 Ω

جـ. 2.0 Ω

د . 2.5 Ω

5. إذا كان التيّار الكهربائيّ في الشكل يساوي (1.2 A)، فإنّ فرق الجُهد $(\Delta V = V_b - V_a)$ يساوي:



أ. 3.2 V

ب. 4.0 V

جـ. 4.2 V

د . 4.8 V

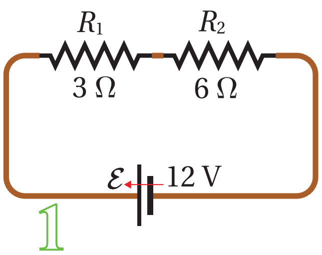
.2 مصفّف شعرٍ يعملُ على جُهد (220 V)، ويسري فيه تيّار كهربائيّ مقداره (4 A). إذا كان عنصر التسخين فيه مصنوعًا من سلك نيكروم نصف قطره (0.8 mm)، فما مقاومة هذا السلك وما طوله؟

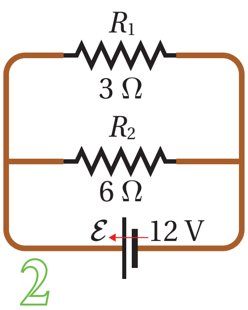
.3 يتّصل مصباحٌ كهربائيٌّ مع مصدر جُهد (12 V)؛ فيسري فيه تيّار كهربائيٌّ مقدارُه (1.8 A). أحسب القدرة المستهلكة في هذا المصباح.

.4 أحسبُ التيّار الكهربائيّ في كل من الأجهزة الآتية:

أ . منشارٌ كهربائيٌّ قدرته (1.5 kW) يعمل على جُهد (220 V).

ب. سخانٌ كهربائيٌّ مقاومته (48 Ω) يعمل على جُهد (240 V).





.5 يبيّن الشكل المجاور مقاومتين موصولتين على التوالي (الدارة الأولى)، ثم موصولتين على التوازي (الدارة الثانية). أجد المقاومة المكافئة وتيار البطّارية في كل دارة.

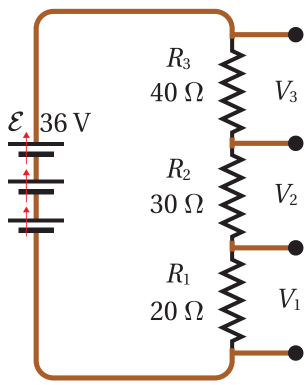
.6 فرنٌ كهربائيٌّ يعمل على جُهد (240 V)؛ مقاومة عنصر التسخين فيه (30 Ω). إذا عمل مدّة (48 min) لطهي الطعام، أحسب ما يأتي:

أ . التيّار الكهربائيّ الذي يسري في عنصر التسخين.

ب. القدرة الكهربائيّة للفرن.

جـ. مقدار الطاقة الكهربائيّة المتحوّلة إلى حرارةٍ خلال مدّة الطهي.

د . كيف تتغيّر النتائج السابقة جميعها في حال وُصل الفرن مع مصدر جُهد (120 V)؟



.7 أحلّل: للحصول على فرق جُهد مناسب من بطاريّةٍ ذات فرق جُهدٍ كبيرٍ، تُوصَلُ معها مجموعة مقاوماتٍ كما في الشكل المجاور، ما مقدار فرق الجُهد بين طرفي كل مقاومة من المقاومات الثلاث؟

.8 أحسب: سيارةٌ كهربائيّةٌ موصولةٌ مع شاحنٍ قدرته (62.5 kW) بسلك طوله (6 m) ومساحةُ مقطعه ($25\ mm^2$) يسري فيه تيّار كهربائيٌّ (125 A). إذا استغرقت عملية الشحن (30 min). أحسب ما يأتي:

أ . كمّية الشحنة التي انتقلت عبر السلك خلال هذه المدّة.

ب. فرق الجُهد بين طرفي الشاحن؟

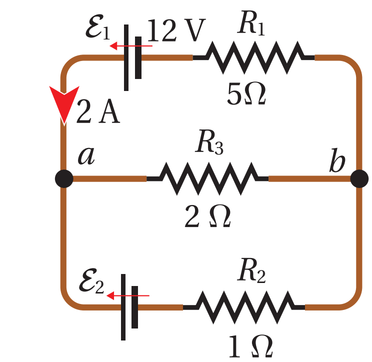
جـ. الشغل الكهربائيّ الذي بذله الشاحن على بطارية السيارة.

د . تكلفة الشحن، إذا كان سعر (1 kWh) هو (0.12 JD).

9. أحلل وأستنتج: أرغب بتصميم مدفأةٍ كهربائيةٍ بسيطة قدرتُها (1000 W) تعمل على جُهد (240 V)، وعنصر التسخين فيها سلكٌ من مادة النيكروم. ما المواصفات الهندسية للسلك؟

10. أحلّل: عند توصيل ثلاثة مصابيح متماثلةٍ، مقاومة كلٍّ منها (R) مع بطاريّةٍ قوّتُها الدافعةُ الكهربائيّة (12 V) مقاومتها الداخلية مُهملةٌ، ما نسبة القدرة المنتجة في البطّارية في الحالتين؛ المصابيح موصولة على التوالي/ التوازي؟

11. أستخدم المتغيرات: سلكٌ من فلزّ التنغستون طولُه (1.5 m) ومساحة مَقطَعِه ($4\ mm^2$). ما مقدار التيّار المارّ فيه عند توصيل طرفيه مع مصدر جُهد (1.5 V)؟

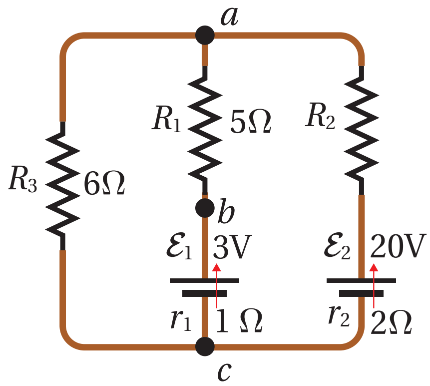


12. في الدارة الكهربائيّة المبينة في الشكل المجاور؛ أحسب ما يأتي:

أ . التيّار المار في المقاومة (R_3).

ب. مقدار القوّة الدافعة الكهربائيّة للبطارية (ε_2).

13. بطاريةٌ قوّتها الدافعة الكهربائيّة (9 V)، ومقاومتُها الداخلية (2.5 Ω). ما مقدار المقاومة التي توصل مع البطّارية حتى تكون القدرة المستهلكة في البطّارية (2.7 W)؟

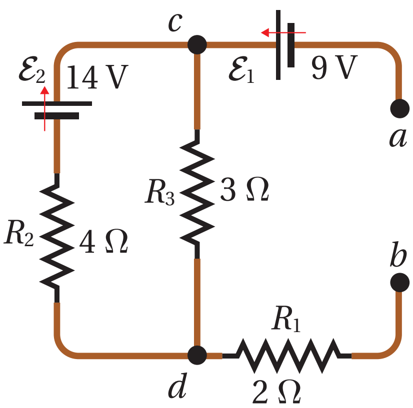


14. يبيّنُ الشكل دارةً كهربائيّةً مُركّبة، إذا وُصّل فولتميتر بين النقطتين (b,c) فكانت قراءته ($V_b - V_c = 4\ V$)، أحسبُ كلًا من:

أ . التيّارات الفرعية في الدارة.

ب. المقاومة المجهولة (R_2).

15. مصباحان يتصلان مع مصدري جُهد متماثلين، قدرة المصباح الأول تساوي ثلاثة أمثال قدرة المصباح الثاني. أجد نسبة تيّار الأول إلى تيّار الثاني، ونسبة مقاومة الأول إلى مقاومة الثاني.



16. تفكير ناقد: بالاعتماد على بيانات الشكل المجاور، أحسبُ فرق الجُهد بين النقطتين (a) و (b)، عندما ينعدم التيّار في (R_3)، ثمّ أُحدّد أيَّ النقطتين أعلى جُهدًا.

17. أحسبُ تكلفة تشغيل مدفأةٍ قدرتُها (2800 W) مُدّة (90) ساعة، إذا كان سعر وحدة الطاقة (0.15 JD/kWh).

الوحدة 4

المجالُ المغناطيسيّ
Magnetic Field

أتأمّل الصورة

يوجد حول العالم 70 منشأة سينكروترون تقريبًا، وقد أُنشئ مركز السينكروترون (SESAME) في الأردن ليُستخدم في البحث العلميّ والتدريب، وبدأ تشغيلهُ سنة 2017 بطاقةٍ قُصوى تساوي 2.5 GeV. الجزء الرئيس في مُسارع السينكروترون هو نفقٌ على شكل مسارٍ مُغلقٍ قد يزيدُ طولهُ على نصف كيلومتر، تُظهِرُ الصورة بعض المُعدّات والأجهزة في مسارع السينكروترون. تستخدم مجالاتٍ مغناطيسيّة للتحكُّم في مسارِ الجُسيمات المشحونة داخل النفق، وينتجُ عن تسريع الجُسيمات انبعاثُ ضوءٍ شديد السطوع وأشعّةٍ كهرمغناطيسيّة غير مرئيّة، هي: أشعّةٌ تحت حمراءَ وأشعّة فوق بنفسجيّةٍ وأشعّةٌ سينيّة؛ تُستخدَم جميعُها في دراسة التركيب الذرّيّ للمادّة على مستوى قياسات (nm)، ما يفيدُ في تطبيقاتٍ واسعةٍ في مجالات الطبِّ والصناعة والزراعة والبيئة.

كيف يجري تسريع الجُسيمات وإكسابُها طاقةً حركيّةً كبيرة؟ وكيف يجري التحكُّم في مسارها؟

الفكرة العامّة:

للمجال المغناطيسيّ تطبيقاتٌ حياتيّةٌ وعلميّةٌ مهمّة. ينشأ المجال المغناطيسيّ مهما كانت مصادره نتيجةً لحركة الشحنات الكهربائيّة؛ على شكل تيّار كهربائيّ أو حركة إلكترون حول النواة.

الدرس الأول: القوّة المغناطيسيّة

Magnetic Force

الفكرة الرئيسة: يولّد المغناطيسُ حوله مجالًا مغناطيسيًا يؤثّر بقوّةٍ في الموادّ المغناطيسيّة وفي الشحنات الكهربائيّة المتحرّكة فيه. من أهم تطبيقات هذه القوّة؛ المحرّكُ الكهربائيّ الذي يستخدم في السيارات الكهربائيّة التي أصبحت تغزو الأسواق بفعل كفاءتها العالية في تحويل الطاقة وحفاظها على البيئة.

الدرس الثاني: المجال المغناطيسيّ الناشئُ عن تيّارٍ كهربائيّ

Magnetic Field of an Electric Current

الفكرة الرئيسة: تحقّقت فائدةٌ كبيرةٌ من استخدام المغناطيس الكهربائيّ في التطبيقات التكنولوجيّة الحديثة، فالمجالُ المغناطيسيّ الناتج عنه يفوق مجالات المغانط الطبيعيّة بآلاف المرات، واستخداماتُ المجال المغناطيسيّ أحدثت تقدُّمًا كبيرًا في مجالات إنتاج الطاقة والطبّ والنقل وغيرها.

تجربة استهلاليّة

استقصاءُ تأثير المجال المغناطيسيِّ في شحنةٍ كهربائيّةٍ مُتحرّكةٍ فيه.

الموادّ والأدوات: أنبوبُ أشعّة مهبطية، مصدرُ طاقةٍ عالي الجُهد (DC)، أسلاكُ توصيل، مغناطيسٌ قويّ، قاعدةٌ عازلة.

إرشادات السلامة: الحذرُ عند التعامل مع مصدر الطاقة عالي الجُهد.

خطواتُ العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أنفذُ الخطوات الآتية:

1 أُثبّتُ أنبوبَ الأشعّة المهبطية على القاعدة العازلة وأصلُ قطبيه مع قطبي مصدر الطاقة.

2 **ألاحظُ:** أختارُ جُهد (500 V) تقريبًا، وأشغّلُ مصدر الطاقة، ثم أرفع الجُهد حتى يبدأ الوميضُ بالظهور في الأنبوب.

3 **ألاحظُ** شكلَ مسار الأشعّة المهبطيّة في الأنبوب وأدوّنُ ملاحظاتي.

4 **أجرّبُ:** أقرّبُ المغناطيس بالتدريج من مسار الأشعّة المهبطيّة في الأنبوب؛ مع الحذر من الاقتراب من قطبي الأنبوب، ثمّ ألاحظُ ما يحدثُ لمسار الأشعّة، وأدوّنُ ملاحظاتي.

5 أعكسُ قطبي المغناطيس وأُكرّر الخطوة (4)، وألاحظُ ما يحدث لمسار الأشعة، وأدوّنُ ملاحظاتي.

التحليلُ والاستنتاج:

1. أصف مسار الأشعة المهبطية في المرحلة الأولى من التجربة، وأوضح سبب ظهوره.
2. **أفسّرُ** أهمّية أن يكون ضغط الهواء منخفضًا داخل أنبوب الأشعة المهبطية.
3. **أحلّلُ البيانات وأفسّرُها:** أبين ما حدث لمسار الأشعة المهبطية عند تقريب المغناطيس منها، وأفسّرُ سبب ذلك، ثمّ أقارنُ النتيجة بما يحدث عند تغيير قطب المغناطيس.
4. **أستنتجُ:** اتّجاه القوّة المغناطيسيّة المؤثّرة في الشحنات المتحرّكة داخل مجال مغناطيسيّ، واتّجاه المجال المغناطيسيّ، بالاعتماد على الملاحظات.

القوّة المغناطيسية
Magnetic Force

الفكرة الرئيسة:
يولّد المغناطيسُ حوله مجالاً مغناطيسيّاً يؤثّر بقوّةٍ في الموادّ المغناطيسيّة وفي الشحنات الكهربائيّة المتحرّكة فيه. من أهم تطبيقات هذه القوّة؛ المحرّكُ الكهربائيّ الذي يستخدم في السيارات الكهربائيّة التي أصبحت تغزو الأسواق بفعل كفاءتها العالية في تحويل الطاقة وحفاظها على البيئة.

نتاجات التعلّم:
- أستنتجُ من التجربة أنّ المجال المغناطيسيّ يؤثّر في الشحنة المتحرّكة فيه بقوّةٍ، وأصف هذه القوّة.
- أشرح طريقة عمل مطياف الكتلة والسينكروترون بالاعتماد على خصائص القوّة المغناطيسيّة المؤثّرة في شحنةٍ كهربائيّة.
- أستنتجُ من التجربة أنّ موصلاً يحمل تيّارًا كهربائيًّا موجودًا في منطقة مجالٍ مغناطيسيٍّ يتأثّر بقوّةٍ مغناطيسيّة. وأصف هذه القوّة.
- أصمّم غلفانوميتر بالاعتماد على خصائص القوّة المغناطيسيّة التي يؤثّر بها المجال المغناطيسيّ في موصل يحمل تيارًا كهربائيًّا.
- أصمّم مُحرّكًا كهربائيًّا، وأحدّد العوامل التي تزيد من سرعة دورانه.

المفاهيم والمصطلحات:

مجالٌ مغناطيسيّ	Magnetic Field
تسلا	tesla
مطياف الكتلة	Mass Spectrometer
سينكروترون	Synchrotron

المجال المغناطيسيّ Magnetic Field

تعرّف الإنسان على المغناطيسيّة في الطبيعة؛ فمعدنُ المغنتيت Magnetite مادة مُمغنطةٌ طبيعيّة، عندما عُلّقت قطعةٌ منها تعليقًا حُرًّا في الهواء أخذت تدور حتى استقرّت باتّجاه شمال–جنوب.

المغناطيس الدائم Permanent Magnet

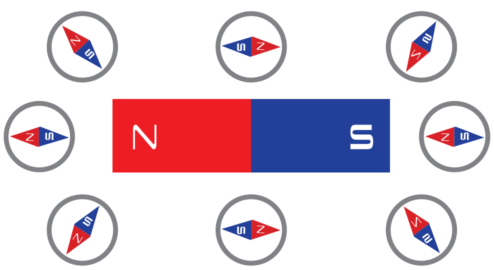
تُصنَع المغانط الدائمة من موادّ قابلةٍ للتّمغنُط مثل؛ الحديد، والنيكل، والكوبالت، والنيوديميوم، حيثُ تُسمّى موادَّ مغناطيسيّة. لكلّ مغناطيسٍ قطبان؛ قطبٌ شماليٌّ (N) North Pole، وقطبٌ جنوبيّ (S) South Pole. عند تعليق مغناطيسٍ مُستقيم بحيثُ يكون حُرَّ الدوران؛ فإنّ قطبهُ الشماليّ يشيرُ نحو الشمال، بينما يشيرُ قطبه الجنوبيُّ نحو الجنوب. تجدُر الإشارة إلى أنّ القُطب المغناطيسيّ الشماليّ للأرض يقعُ بالقرب من قُطبها الجغرافيّ الجنوبيّ، والعكس صحيح. توجدُ أقطابُ المغانط دائمًا على شكل أزواج؛ شماليٍّ وجنوبيّ، ولا يوجد قطبٌ مغناطيسيٌّ مفرد، على خلاف الشحنات الكهربائيّة، حيث يمكن أن توجد شحنةٌ مفردة؛ موجبةٌ أو سالبة.

يؤثّر المغناطيسُ بقوّةٍ عن بُعدٍ في أيّ قطعةٍ من مادّةٍ مغناطيسيّةٍ قريبةٍ منه؛ وبذلك فإنّ القوّة المغناطيسيّة قوّة تأثير عن بعد (مثل قوّة الجذب الكتليّ، والقوّة الكهربائيّة).

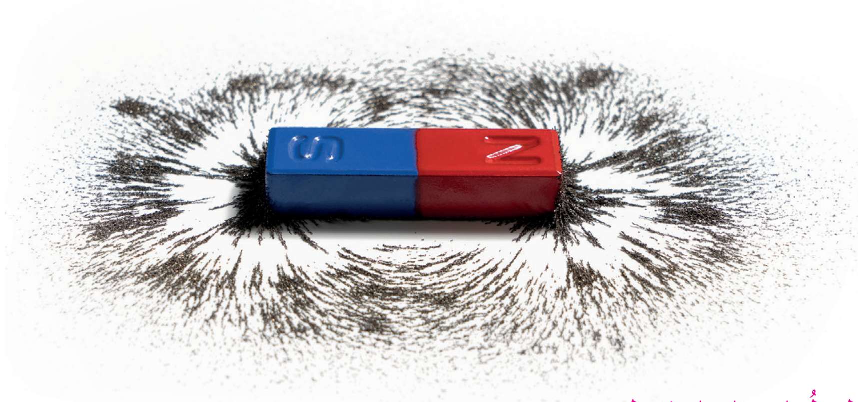
✓ **أتحقّق:** هل القوّة المغناطيسيّة قوّة تلامس أم قوّة تأثير عن بعد؟ أبرّر إجابتي.

مفهومُ المجال المغناطيسيّ Magnetic Field Concept

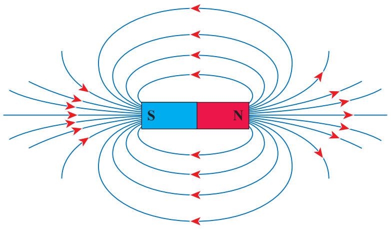
المجالُ المغناطيسيّ خصيصةٌ للحيّز المحيط بالمغناطيس، ويظهر في هذا الحيّز تأثيرُ المجال المغناطيسيّ على شكل قوًى مغناطيسيّة تؤثّر في المغانط الأخرى والموادّ المغناطيسيّة. والمجال المغناطيسيّ كميّة مُتّجهة، يمكنُ تحديد اتّجاهه عند نقطةٍ مُعيّنةٍ بوضع بوصلةٍ صغيرةٍ عند تلك النقطة؛ فتشيرُ إبرتُها إلى اتّجاه المجال كما في الشكل (1/ أ).



الشكل (1): المجال المغناطيسيّ
(أ): بوصلة لتحديد اتّجاه المجال المغناطيسيّ عند نقطة فيه.



الشكل (1): المجال المغناطيسيّ
(ب): برادة حديد لترسيم خطوط المجال المغناطيسيّ.



الشكل (2): خطوط المجال المغناطيسيّ لمغناطيس مستقيم.

خطوطُ المجال المغناطيسيّ Magnetic Field Lines

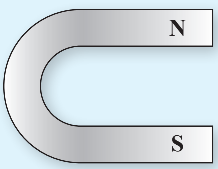
تستخدَمُ برادةُ الحديد لرسم خطوط المجال المغناطيسيّ كما يبيّن الشكلُ (1/ب)؛ حيث يُمثَّل المجال المغناطيسيّ بخطوطٍ تعبّر عن مقداره واتّجاهه، كما سبق تمثيل المجال الكهربائيّ. يبيّن الشكلُ (2) رسمًا لخطوط المجال المغناطيسيّ حول مغناطيسٍ مستقيم. وعند تقريب مغناطيسين من بعضهما بعضًا، بحيث يتقابل منهما قطبان متشابهان، أو مختلفان؛ فإنّ الأقطاب المتشابهة تتنافر والمختلفة تتجاذب، وينشأ مجالٌ مغناطيسيٌّ مُحصّلٌ عند كل نقطة في منطقة المجال؛ كما يبيّن الشكلُ (3). يمكن استخلاصُ الخصائص الآتية لخطوط المجال المغناطيسيّ:

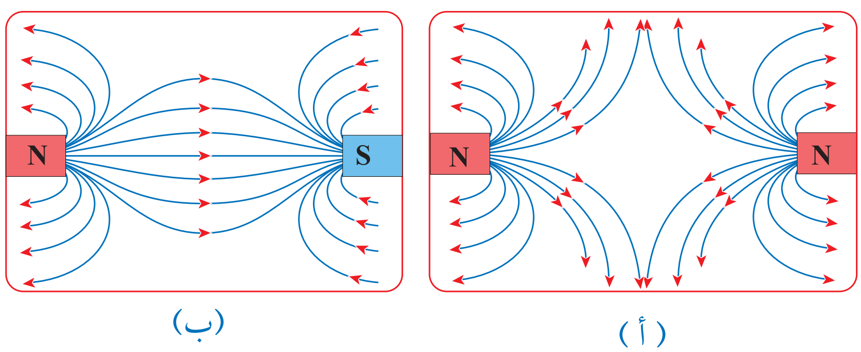
- خطوطٌ وهميّةٌ مُقفَلَةٌ تخرجُ من القطب الشماليّ وتدخل القطب الجنوبيّ، وتكملُ مسارها داخل المغناطيس من القطب الجنوبي إلى الشماليّ.
- اتّجاه المجال المغناطيسيّ عند أيّ نقطةٍ على خطّ المجال يكون على امتداد المَماس للخطّ عند تلك النقطة.
- لا تتقاطع؛ لأنّ للمجال المغناطيسيّ اتّجاهٌ واحدٌ عند كلِّ نقطة، يُحدّد باتّجاه المَماس لخطّ المجال.
- يُعبّر عن مقدار المجال المغناطيسيّ بعدد الخطوط التي تعبر وحدة المساحة عموديًّا عليها.

✓ **أتحقّق**: أذكرُ خصائص خطوط المجال المغناطيسيّ.

تمرين

أرسمُ خطوطَ المجال المغناطيسيّ لمغناطيسٍ على شكل حرف (U)، المُبيّن في الشكل.





الشكل (3): خطوط المجال المغناطيسيّ لقطبين مغناطيسيّين متجاورين.
(أ): متشابهين.
(ب): مختلفين.

القوّة المؤثرة في شحنةٍ مُتحرّكةٍ في مجالٍ مغناطيسيّ

Force on a Charge Moving in a Magnetic Field

لاحظتُ في التجربة الاستهلاليّة تأثيرَ المجال المغناطيسيّ في مسار الأشعة المهبطيّة داخل أنبوبٍ مُفرَغٍ من الهواء (ضغطٌ منخفض يسمح بحركة الإلكترونات دون إعاقة)، وكيف أدّى ذلك إلى انحناء مسار الأشعة. وقد بيّنت التجاربُ العمليّة الخصائص الآتية للقوّة المغناطيسيّة التي تؤثّر في جُسيم مشحونٍ يتحرّكُ في مجالٍ مغناطيسيّ:

- يتناسبُ مقدار القوّة المغناطيسيّة طرديًّا مع كل من؛ شحنة الجُسيم (q)، ومقدار سرعته (v) ومقدار المجال المغناطيسيّ (B).
- يعتمد اتّجاه القوّة المغناطيسيّة على اتّجاه سرعة الجُسيم واتّجاه المجال المغناطيسيّ، وعلى نوع شحنة الجُسيم.

يمكن تمثيل النتائج التجريبيّة السابقة باستخدام الضرب المتجهي حسب العلاقة الرياضية الآتية:

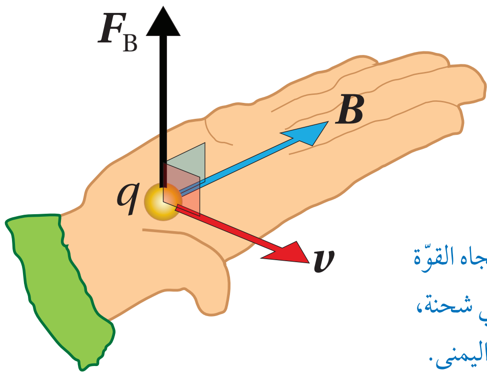
$$\boldsymbol{F}_B = q\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}$$

حيثُ يشير الرمز ($\boldsymbol{F}_B$) إلى مُتّجه القوّة المغناطيسيّة الذي يكون دائمًا عموديًا على كل من؛ متجه المجال المغناطيسي ($\boldsymbol{B}$) ومتجه السرعة ($\boldsymbol{v}$). ويُعطى مقدار القوّة المغناطيسيّة المؤثّرة في الشحنة المتحرّكة بالعلاقة الآتية:

$$F_B = qvB \sin \theta$$

حيث θ الزاوية المحصورة بين متّجهَي السرعة والمجال المغناطيسي. أستنتجُ من العلاقة السابقة؛ أنّ القوّة المغناطيسيّة تكون قيمة عظمى عند ($\theta = 90°$) وتنعدم عند ($\theta = 0°$)، أو ($\theta=180°$)، أيّ أنّ المجال المغناطيسيّ لا يؤثّر بقوّةٍ في جُسيم مشحون إذا كان ساكنًا أو مُتحرّكًا بسرعةٍ موازيةٍ للمجال المغناطيسيّ. ألاحظُ -هنا- اختلافًا بين تأثير المجالين الكهربائيّ والمغناطيسيّ؛ فالقوّة المغناطيسيّة تكون عموديّةً على اتّجاه كُلٍّ من المجال المغناطيسيّ ومُتّجه سرعة الجُسيم المشحون؛ في حين تكون القوّة الكهربائيّة دائمًا موازيةً لاتّجاه المجال الكهربائيّ، كما أنّ القوّة الكهربائيّة تؤثّر في كل من الشحنات الساكنة والمُتحرّكة.

يمكنُ تعريفُ **المجال المغناطيسيّ Magnetic Field** عند نقطةٍ بأنّه: القوّة المغناطيسيّة المؤثّرة في وحدة الشحنات الموجبة، عندما تتحرّك الشحنة بسرعة (1 m/s) باتّجاهٍ عموديٍّ على اتّجاه المجال المغناطيسيّ لحظة مرورها في تلك النقطة، ويُقاس بوحدة **تسلا (T) tesla**؛ وفقَ النظام الدولي للوحدات.



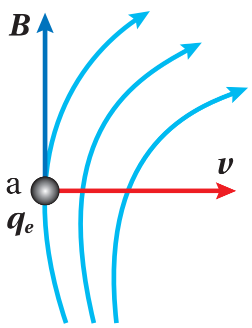
الشكل (4): تحديد اتّجاه القوّة المغناطيسيّة المؤثّرة في شحنة، باستخدام قاعدة اليد اليمنى.

تُستخدم **قاعدة اليد اليمنى** لتحديد اتّجاه القوّة المغناطيسيّة المؤثّرة في شحنةٍ كهربائيّةٍ موجبةٍ عندما تتحرّك داخل مجال مغناطيسيّ، حيث تُبسَط اليدُ اليُمنى؛ بحيث يشير الإبهام إلى اتّجاه السرعة كما في الشكل (4)، وتشير باقي الأصابع إلى اتّجاه المجال المغناطيسيّ، عندها يُحدّد اتّجاه القوّة بسهمٍ يخرُج من باطن الكفّ ويكون عموديًّا عليه. في حين ينعكس اتّجاه القوّة عندما تكون الشحنة سالبة.

أفكّر: جُسيم مشحون بشحنةٍ موجبة، يتحرّك في مستوًى أفقيٍّ باتّجاه الشرق $(+x)$، داخل المجال المغناطيسيّ الأرضيّ الذي يتّجه من الجنوب إلى الشمال $(+y)$. أستخدمُ قاعدة اليد اليمنى لتحديد اتّجاه القوّة المغناطيسيّة التي يؤثّر بها المجال المغناطيسيّ الأرضيّ في الجُسيم، باتّجاه $(+z)$، أم باتّجاه $(-z)$؟

المثال 1

يتحرّك إلكترون بسرعة $(5 \times 10^6 \text{ m/s})$ باتّجاه محور $(+x)$؛ أحسب مقدار القوّة المغناطيسيّة التي تؤثّر فيه لحظة مروره بالنقطة (a) وأحدّد اتّجاهها، علمًا بأنّ المجال المغناطيسيّ عندها $(2 \times 10^{-4}\text{ T})$ باتّجاه محور $(+y)$. كما في الشكل (5).



الشكل (5): إلكترون في مجالٍ مغناطيسيٍّ غير منتظم.

المعطيات:

الشكل، $v = 5 \times 10^6 \text{ m/s},\ B = 2 \times 10^{-4}\text{ T},\ \theta = 90°,\ q_e = -1.6 \times 10^{-19}\text{ C}$

المطلوب: $F_B = ?$

الحلّ:

حسب الشكل (5)؛ ألاحظ أنّ خطوط المجال المغناطيسيّ ليست مستقيمة، لكن عند النقطة (a) يكون اتّجاه المجال على امتداد المماس وللأعلى وباتّجاه $(+y)$.

$$F_B = qvB\sin\theta$$

$$F_B = 1.6 \times 10^{-19} \times 5 \times 10^6 \times 2 \times 10^{-4} \times 1$$

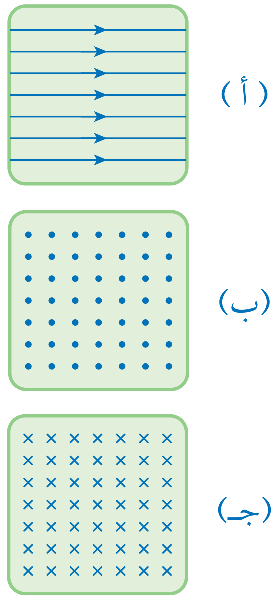
$$F_B = 1.6 \times 10^{-16}\text{ N}$$

بتطبيق قاعدة اليد اليمنى؛ أجد أنّ اتّجاه القوّة التي تؤثّر في الإلكترون تكون داخلة في الصفحة، باتّجاه $(-z)$ بعيدًا عن الناظر (لأنّ الشحنة سالبة). تكون القوّة بهذا المقدار والاتّجاه عند النقطة (a) فقط؛ لأنّ المجال متغيّر في مقداره واتّجاهه عند النقاط الأخرى. ألاحظ أنّ إشارة الشحنة تستخدم لتحديد اتجاه القوة، وليس في حساب مقدار القوة.

حركةُ جُسيم مشحونٍ في مجالٍ مغناطيسيٍّ منتظم

Motion of a Charged Particle in a Uniform Magnetic Field

في التطبيقات العلمية والتكنولوجية المختلفة؛ تُستخدم عادةً مجالاتٌ مغناطيسيّةٌ منتظمةٌ تُقذَف خلالها الجُسيمات المشحونة بسرعاتٍ عالية، باتّجاهٍ يتعامَدُ مع اتّجاه المجال المغناطيسيّ. يكونُ المجالُ المغناطيسيّ المُنتَظم Uniform magnetic field ثابتًا في المقدار والاتّجاه عند النقاط جميعها في منطقة المجال، ويمثّلُ بخطوطٍ مُستقيمةٍ مُتوازية؛ تكون المسافات بينها متساويةٌ، كما يبيّن الشكلُ (6/ أ)، ويمثّلُ بمجموعة نقاطٍ (رأسُ سهمٍ يتّجهُ نحو الناظر) مُرتّبةٍ بانتظام؛ عندما يكون عموديًّا على الصفحة وكأنّه خارجٌ منها نحو الناظر، كما في الشكل (6/ ب)، ويمثّلُ بمجموعةِ إشارات ضربٍ (ذيلُ سهمٍ يتّجهُ بعيدًا عن الناظر) مُرتّبةٍ بانتظام؛ عندما يكون عموديًّا على الصفحة وكأنّه داخلٌ فيها مبتعدٌ عن الناظر، كما يبيّن الشكلُ (6/ جـ).

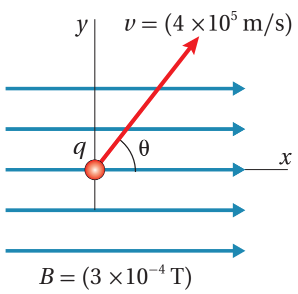


الشكل (6): تمثيل المجال المغناطيسيّ المنتظم. (أ) نحو اليمين، (ب) نحو الناظر، (جـ) بعيدًا عن الناظر.

أتحقّق: جُسيمٌ مشحونٌ يتحرّك في مجالٍ مغناطيسيٍّ منتظم ($\boldsymbol{B}$) باتّجاهٍ يُوازي خطوطَ المجال. هل يتأثّر الجُسيم بقوّةٍ مغناطيسيّة؟

المثال 2

يتحرّك جُسيمٌ شحنته $(5 \times 10^{-6}\ C)$ في المستوى (x,y) داخل مجالٍ مغناطيسيٍّ منتظم، بسرعة (v) باتّجاهٍ يصنعُ زاوية $(\theta = 53°)$ مع محور $(+x)$، كما في الشكل (7). بالاعتماد على بيانات الشكل؛ أحسب مقدارَ القوّة المغناطيسيّة التي تؤثّر في الجُسيم، وأُحدّد اتّجاهها.



الشكل (7): حركةُ جُسيم مشحون في مجالٍ مغناطيسيّ منتظم.

المُعطيات:

$v = 4 \times 10^5\ m/s,\ B = 3 \times 10^{-4}\ T,\ \theta = 53°,$

$q = 5 \times 10^{-6}\ C$

المطلوب: $F_B = ?$

الحلّ:

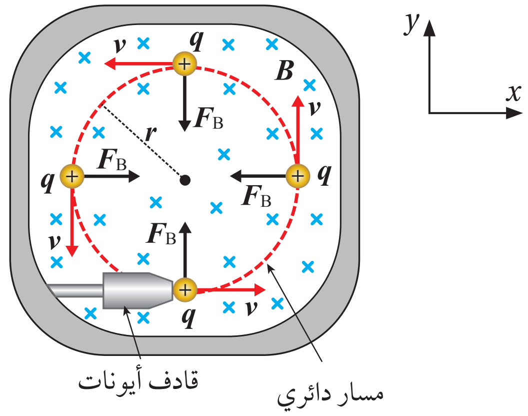
$F_B = qvB \sin\theta$

$F_B = 5 \times 10^{-6} \times 4 \times 10^5 \times 3 \times 10^{-4} \times \sin 53°$

$F_B = 5 \times 10^{-6} \times 4 \times 10^5 \times 3 \times 10^{-4} \times 0.8$

$F_B = 4.8 \times 10^{-4}\ N$

بتطبيق قاعدةِ اليد اليُمنى؛ بوضع الإبهام باتّجاه السرعة ($\boldsymbol{v}$)، وباقي الأصابع باتّجاه المجال $(+x)$. أجدُ أنّ اتّجاه القوّة التي تؤثّر في الشحنة تكون داخلةً في الصفحة، باتّجاه $(-z)$ بعيدًا عن الناظر (لأنّ الشحنة موجبة).



الشكل (8): الحركة الدائرية لحزمة جُسيمات موجبة الشحنة في مجالٍ مغناطيسيٍّ مُنتظم.

الحركة الدائريّةُ لجُسيمٍ مشحونٍ في مجالٍ مغناطيسيٍّ مُنتظم

يظهرُ في الشكل (8) حزمةُ جُسيماتٍ موجبة الشحنة تتحرّك داخل أُنبوبٍ مفرغٍ من الهواء بسرعةٍ ابتدائيةٍ (v) باتّجاه محور ($+x$)؛ فتدخل مجالاً مغناطيسيّا مُنتظمًا يتّجه داخل الصفحة ($-z$)، بشكلٍ عموديٍّ عليه. يتأثّر كل جُسيمٍ في هذه الحزمة لحظة دخوله المجال المغناطيسيّ بقوّةٍ مغناطيسيّةٍ يكون اتّجاهُها عموديًّا على كلٍّ من اتّجاه المجال المغناطيسيّ واتّجاه السرعة، أيّ باتّجاه ($+y$)، فتعملُ القوّةُ على انحراف حزمة الجُسيمات باتّجاهها؛ فيتغير اتّجاه سرعة الجُسيمات، ويتغير نتيجة لذلك اتّجاه القوّة، وتبقى القوّة باتّجاهٍ عموديٍّ على كلّ من اتّجاه السرعة واتّجاه المجال، ويُعطى مقدارها بالعلاقة

$$F_B = qvB \sin \theta = qvB$$

وتتحرّك الجُسيمات بسرعةٍ ثابتةٍ مقدارًا في مسارٍ دائريٍّ يقعُ في مستوًى مُتعامِد مع اتّجاه المجال المغناطيسيّ. تعملُ القوّةُ المغناطيسيّةُ في هذه الحالة عمل القوّة المركزية، ويمكن التعبيرُ عن مقدارها باستخدام القانون الثاني لنيوتن بالعلاقة:

$$F_B = \frac{mv^2}{r}$$

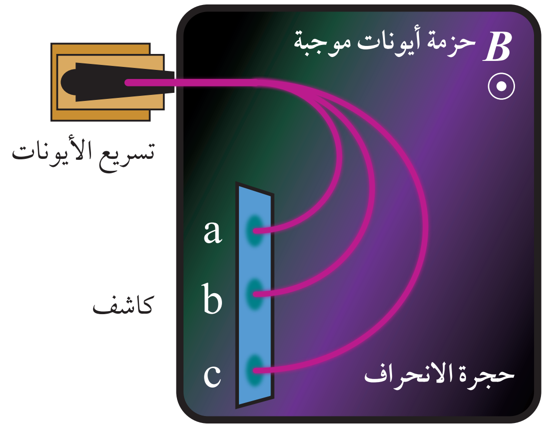
حيث m كتلة الجُسيم و r نصف قطر المسار الدائري. أستنتجُ من العلاقتين السابقتين أنّ:

$$qvB = \frac{mv^2}{r} \rightarrow qB = \frac{mv}{r} \rightarrow \frac{q}{m} = \frac{v}{Br}$$

يُسمّى المقدارُ $\frac{q}{m}$ **الشحنةَ النوعيّة للجُسيم**، وهي ناتجُ قسمة شحنة الجُسيم على كتلته. وتُعدّ صفةً فيزيائيّة للمادّة؛ يستخدمها العلماءُ للتعرُّف على الجُسيمات المجهولة. حيث صُمّمت أجهزةٌ عدّةٌ تستخدم القوّة المغناطيسيّة في توجيه الجُسيمات المشحونة؛ منها مطيافُ الكتلة ومسارع السينكروترون.

أتحقّق: لماذا تختلف الشحنة النوعية للإلكترون عنها للبروتون؟

أفكّر: أفسّرُ لماذا لا تبذلُ القوّة المغناطيسيّة شغلًا على جُسيم مشحونٍ يتحرك داخل مجال مغناطيسيٍّ مُنتظم. وهي تختلف بذلك عن القوّة الكهربائيّة التي تبذل شغلاً على جسمٍ مشحونٍ يتحرك داخل مجالٍ كهربائيّ.



الشكل (9): تحليل عيّنةٍ مجهولةٍ باستخدام جهاز مِطياف الكتلة.

كيف سيكون مسار أيونٍ سالبٍ عند دخوله هذا المجال بسرعةٍ باتّجاه اليمين؟

تطبيقات تكنولوجية:

1. **مطيافُ الكتلة Mass Spectrometer:** جهازٌ يستخدم لقياس كتل الجُسيمات الذريّة لتحديد مكوّنات عيّنةٍ مجهولة، حيث تُحوّل العيّنة إلى الحالة الغازية، ثم تؤيّن جُسيماتها؛ بحيث يفقدُ كلٌّ منها عددًا متساويًا من الإلكترونات؛ فتصبحُ جميعُها متساويةَ الشحنة رغم اختلاف كُتَلها. ثمّ تدخل هذه الأيونات بالسرعة نفسها مجالًا مغناطيسيًّا مُنتَظمًا عموديًّا على اتّجاه السرعة، فيتحرك كلُّ أيونٍ في مسارٍ دائريٍّ نتيجةً للقوّة المغناطيسيّة المركزية المؤثّرة فيه وتُعطى بالعلاقة:

$$F_B = \frac{mv^2}{r} \Rightarrow r = \frac{mv^2}{F_B} = \frac{mv}{qB}$$

وبسبب اختلاف كُتَل الأيونات يختلف نصفُ قطر المسار الدائري (r) لكلٍّ منها؛ كما في الشكل (9). وحيثُ إنّ مقاديرَ كلٍّ من السرعة والمجال والشحنة ثابتةٌ، فإنّ نصفَ قطر المسار يتناسب طرديًّا مع الكتلة (m). وبمعرفة قيمة (r)؛ يجري حسابُ الشحنة النوعية لكلّ أيون، ثم تعرّف هُويّة مكوّنات العيّنة. علمًا بأنّ الأيونات سالبة الشحنة تنحرفُ باتّجاهٍ مُعاكسٍ لاتّجاه انحراف الأيونات الموجبة.

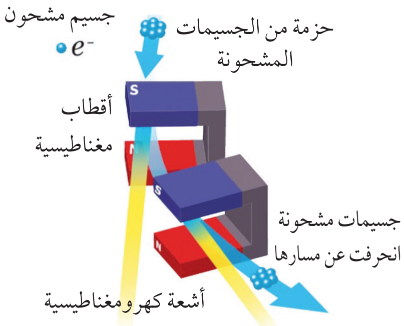
2. **مسارع السينكروترون Synchrotron:** يُستخدم لإنتاج أشعّة (موجات كهرومغناطيسية)، وتعتمد فكرة عمله على أنّ الجسيمات المشحونة ذات السرعات العالية تبعث إشعاعات كهرومغناطيسية عندما تنحرف عن مسارها بتأثير مجال مغناطيسي. يُستخدم في السينكروترون مجال كهربائي لتسريع الجسيمات المشحونة مثل الإلكترونات والبروتونات، وإكسابها سرعات عالية جدًّا تقترب من سرعة الضوء، ثمّ تدخل الجسيمات المسرعة إلى مسار حلقي محاط بأقطاب مغناطيسية.

الربط مع الكيمياء

الموجاتُ الكهرمغناطيسيّة الصادرة عن السينكروترون، يمكن التحكُّم فيها لإعطاء حُزَم تتراوح أطوالها المَوجيّة من تحت الحمراء إلى الأشعة السينيّة، وتكون ذات شدّة عالية جدًّا. ويستخدم الطول الموجي المناسب في الأبحاث العلمية في مجالات الفيزياء والكيمياء؛ مثل اكتشاف الخصائص الذريّة والجُزيئيّة وطول الروابط بين الذرات داخل الجزيء الواحد على مستوى (nm).

الشكل (10/ ب): صورة المبنى الخارجي للسينكروترون البرازيليّ سيريوس (Sirius)، الذي يعادل في مساحته ملعب كرة قدم.

الأقطاب المغناطيسية تحرف الجسيمات المشحونة عن مسارها كما يُبيّن الشكل(10/ أ)؛ ما يؤدّي إلى انبعاث إشعاعات كهرومغناطيسية. وعن طريق التحكّم في المجالات الكهربائية والمغناطيسية المستخدمة في السينكروترون، يمكن إنتاج حزم من الأشعّة ذات أطوال موجية مختلفة تُستخدم في الأبحاث العلمية في مجالات مثل الفيزياء والكيمياء. ويبين الشكل (10/ ب) صورة لمبنى سنكرترون.



الشكل (10/ أ): انتاج أشعة كهرمغناطيسية في مسارع السنكروترون.

أتحقّق: ما استخدامات كُلٍّ من جهازي مِطياف الكتلة والسينكروترون؟ وما وظيفةُ المجال المغناطيسيّ في كلٍّ منهما؟

المثال 3

قُذف بروتونٍ بسرعةٍ ابتدائيةٍ (4.7×10^6 m/s) داخل مجالٍ مغناطيسيٍّ منتظم (0.35 T)؛ بحيث تتعامدُ سرعة البروتون مع المجال، فسلك مسارًا دائريًّا. إذا علمتُ أنّ شحنة البروتون (1.6×10^{-19} C) وكتلته تساوي (1.67×10^{-27} kg)، أحسبُ نصف قطر المسار الدائريّ للبروتون.

المُعطيات: $v = 4.7 \times 10^6$ m/s, $B = 0.35$ T, $\theta = 90°$

$m_p = 1.67 \times 10^{-27}$ kg, $q_p = 1.6 \times 10^{-19}$ C

المطلوب: $r = ?$

الحلّ:

$$\frac{q_p}{m_p} = \frac{v}{Br} \Rightarrow r = \frac{m_p v}{qB}$$

$$r = \frac{1.67 \times 10^{-27} \times 4.7 \times 10^6}{1.6 \times 10^{-19} \times 0.35} = 1.4 \times 10^{-1} \text{m}$$

المثال 4

استُخدمَ مطياف الكتلة لفصل خام اليورانيوم إلى ذرات اليورانيوم (235) واليورانيوم (238)؛ تمّ تأيينُ الذرّات فأصبحت شحنةُ كلِّ أيونٍ منها (1.6×10^{-19} C)، ثمّ قُذفَت جميعُها داخل مجالٍ مغناطيسيٍّ مُنتظم (1.2 T) بسرعة (4.0×10^4 m/s)، عموديّةٍ عليه ($\theta = 90°$). إذا كان نصف قطر مسار أحدهما (8.177 cm)، ونصف قطر مسار الثاني (8.281 cm)؛ أحسبُ كُلًّا من:

أ) الشحنة النوعية لأيون كُلِّ ذرّة.

ب) كتلة كُلِّ أيون.

المعطيات:

$v = 4.0 \times 10^4$ m/s , $B = 1.2$ T, $\theta = 90°$ $r_1 = 8.177$ cm, $r_2 = 8.281$ cm, $q = 1.6 \times 10^{-19}$ C

المطلوب:

$q/m_1 = ?$, $q/m_2 = ?$, $m_2 = ?$, $m_1 = ?$

الحلّ:

أ) الشحنة النوعيّة لكلا الأيونين:

$$\frac{q}{m_1} = \frac{v}{Br_1} = \frac{4 \times 10^4}{1.2 \times 8.177 \times 10^{-2}} = 407647 \text{ C/kg}$$

$$\frac{q}{m_2} = \frac{v}{Br_2} = \frac{4 \times 10^4}{1.2 \times 8.281 \times 10^{-2}} = 402528 \text{ C/kg}$$

ب) لحساب كتلة كل أيون؛ نستخدم العلاقة:

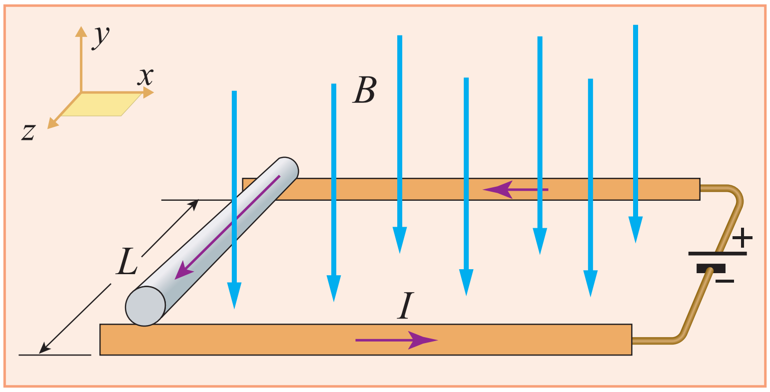
$$\frac{q}{m_1} = 407647 \text{ C/kg}$$

$$\frac{1.6 \times 10^{-19}}{m_1} = 407647 \Rightarrow m_1 = 3.925 \times 10^{-25} \text{ kg}$$

$$\frac{q}{m_2} = 402528 \text{ C/kg}$$

$$\frac{1.6 \times 10^{-19}}{m_2} = 402528 \Rightarrow m_2 = 3.975 \times 10^{-25} \text{ kg}$$

ألاحظُ أنّ الأيون الذي يسلك مسارًا نصفُ قطره أكبر يمتلك الكتلة الأكبر، وهو أيون ذرة اليورانيوم (238)، في حين يسلك أيون ذرة اليورانيوم (235) المسار الآخر الذي نصف قطره أصغر.

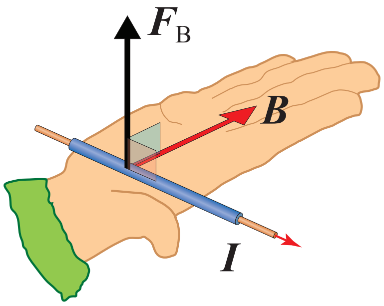


الشكل (11): موصلٌ يسري فيه تيّار كهربائيٌّ في مجالٍ مغناطيسيّ يتأثّر بقوّةٍ مغناطيسيّة.

القوّة المؤثّرة في موصلٍ يحمل تيّارًا في مجالٍ مغناطيسيّ

Force on a Current–Carrying Conductor in a Magnetic Field

أعلم أنّ المجالَ المغناطيسيّ يؤثّر في الموادّ المغناطيسيّة (مثل الحديد) بقوّةٍ مغناطيسيّة. لكنّه يؤثّر أيضًا في الموصلات الفلزّية غير المغناطيسيّة (مثل النحاس) عندما يسري فيها تيّار كهربائيّ؛ فالتيّارُ الكهربائيّ يتكوّن من شحناتٍ مُتحرّكة، وكل شحنة ستتأثر بقوّةٍ مغناطيسيّة. والقوّة المغناطيسيّة المؤثّرة في الموصل تساوي مُحصّلة القوى المغناطيسيّة المؤثرة في الشحنات التي تنقل التيّار الكهربائي. يبيّن الشكلُ (11) سلكًا نُحاسيًّا قابلًا للحركة بسهولةٍ فوق قضيبين متوازيين ثابتين داخل مجالٍ مغناطيسيٍّ باتّجاهٍ رأسيٍّ نحو الأسفل $(-y)$، يسري في السلك تيّار كهربائيّ باتّجاه $(+z)$.



الشكل (12): تحديد اتّجاه القوّة المغناطيسيّة المؤثّرة في موصل يسري فيه تيّار كهربائيّ باستخدام قاعدة اليد اليمنى.

لتحديد اتّجاه القوّة المغناطيسيّة المؤثّرة في الموصل؛ أستخدم قاعدة اليد اليُمنى، حيث يشير الإبهام إلى اتّجاه حركة الشحنات الموجبة داخل الموصل، وتشير أصابع اليد الأربعة إلى اتّجاه المجال المغناطيسيّ، عندها يُحدّد اتّجاه القوّة المؤثّرة في الموصل بسهمٍ يخرج من باطن الكف بشكل عموديّ عليه، كما في الشكل (12). بتطبيق القاعدة على السلك النحاسيّ في الشكل (11)؛ أجدُ أنّ القوّة المغناطيسيّة المؤثّرة في السلك تكون في اتّجاه المحور $(+x)$.

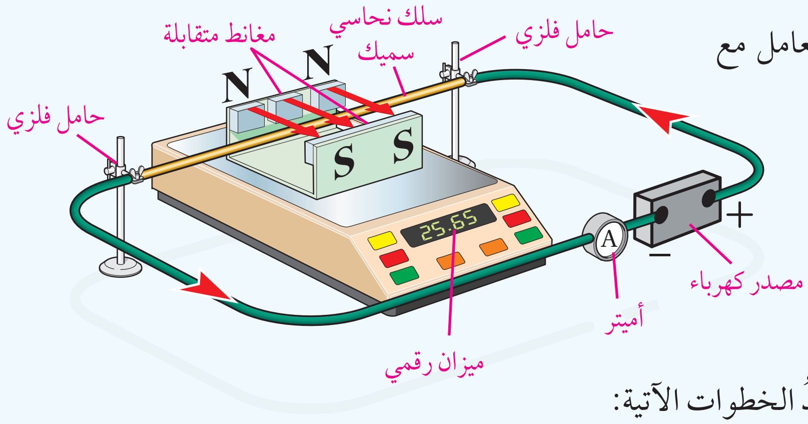
✓ **أتحقّق:** متى يمكن لشريطٍ من الألمنيوم أن يتأثّر بقوّةٍ مغناطيسيّة عند وضعه في مجال مغناطيسيّ؟

للتحقُّق عمليًّا من تأثير المجال المغناطيسيّ في موصل يسري فيه تيّار كهربائيّ وتحديد اتّجاه القوّة المغناطيسية عمليًا؛ أُنفّذُ التجربة الآتية:

التجربة 1 استقصاء القوّة المغناطيسيّة المُؤثّرة في موصلٍ يحمل تيّارًا كهربائيًّا

الموادّ والأدوات: مغانطُ لوحيّةٌ صغيرةٌ عدد (4)، حمّالة فلزيّة للمغانط، سلكٌ نحاسيٌّ سميكٌ قطرُه (3 mm) وطولُه (35 cm) تقريبًا، حاملان فلزيّان، أميتر، مصدر طاقةٍ مُنخَفض الجُهد، أسلاك توصيل، ميزان رقميّ.

إرشادات السلامة: الحذر عند التعامل مع مصدر الطاقة الكهربائيّ.



خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أُنفّذُ الخطوات الآتية:

1. أثبّتُ مغناطيسين على الطرف الأيمن للحمالة الفولاذيّة من الداخل، ومغناطيسين على الطرف الأيسر من الداخل، بحيث تولّدُ المغانط الأربعة مجالًا مغناطيسيًّا مُنتظمًا (تقريبا) باتّجاهٍ أفقيّ؛ كما يبيّن الشكلُ.
2. أضبطُ الميزان الرقميّ بوضعٍ أفقيّ؛ ثمّ أضعُ الحمّالة الفولاذيّة فوقَه والمغانط، وأضبط قراءته على الصفر.
3. أثبّتُ السلكَ النحاسيَّ السميكَ على الحاملين الفلزّيين جيدًا؛ لمنع أيّ حركةٍ له، وأجعلهُ يمتدّ فوق الميزان داخل المجال المغناطيسيّ باتّجاهٍ عموديٍّ عليه دون أن يلامس الميزان.
4. **ألاحظُ:** أصلُ الدارة الكهربائيّة كما في الشكل؛ ثمّ أرفعُ جُهد المصدر وأراقبُ السلكَ النحاسيّ.
5. **أضبطُ المتغيّرات:** المجالُ المغناطيسيُّ، وطول السلك السميك الواقع داخل المجال المغناطيسيّ، والزاوية بين المجال والسلك، وأغيّر في التيّار الكهربائيّ عن طريق تغيير الجُهد.
6. **أقيسُ** التيّار الكهربائيّ عند قيمةٍ مُحدّدة؛ عندما يظهر تغيُّرٌ على قراءة الميزان الرقميّ.
7. **ألاحظ:** أُكرّر الخطوة (6) برفع الجُهد ثلاث مرّاتٍ أُخرى، وألاحظُ قراءة الأميتر والميزان في كُلّ مرة. ثمّ أدوّنُ القراءات في جدولٍ مناسب.

التحليلُ والاستنتاج:

1. **أستنتجُ** اتّجاه القوّة المغناطيسيّة التي أثّر بها المجالُ في السلك النحاسيّ، واتّجاه قوّة ردّ الفعل التي أثّر بها السلك في المغانط والقاعدة الفولاذيّة، معتمدًا على التغيُّر في قراءة الميزان.
2. **أقارن:** اتّجاه القوّة الذي استنتجتُه مع الاتّجاه الذي يمكن التوصُّل إليه بتطبيق قاعدة اليد اليُمنى.
3. **أحلّلُ البيانات وأفسّرُها:** أمثّلُ البيانات المدوّنة في الجدول بعلاقةٍ بيانيّةٍ بين التيّار والقوّة المغناطيسيّة.
4. **أستنتجُ** العلاقةَ بين التيّار والقوّة، ثم أجدُ ميل المُنحنى، وأحدّد القيمَ التي يمثّلُها في العلاقة الرياضية:

$$F_B = IBL$$

لاحظتُ في التجربة أنّ المجال المغناطيسيّ، والقوّة المغناطيسيّة الناتجة، ومُتّجه طول الموصل جميعُها مُتّجهاتٍ متعامدة؛ (علمًا بأنّ مُتّجه طول الموصل هو مُتّجه؛ مقدارهُ يساوي طول الموصل واتّجاهه باتّجاه سريان التيّار الكهربائيّ في الموصل)، واستنتجُت أن العلاقة بين التيّار والقوّة المغناطيسيّة طرديّةٌ، في حين جرى تثبيت متغيّرات أخرى هي المجال المغناطيسيّ، وطول الموصل، والزاوية بين الموصل والمجال المغناطيسيّ.

أثبتت تجارب عمليّةٌ أنّ القوّة المغناطيسيّة تتناسب طرديًّا مع كُلٍّ من: مقدار المجال المغناطيسيّ، وطول الموصل المغمور فيه، والتيار الكهربائيّ؛ إضافةً إلى جيب الزاوية بين مُتّجه طول الموصل والمجال المغناطيسيّ. وتمثّلُ هذه العوامل في العلاقة الرياضية الآتية:

$$F_B = IBL \sin\theta$$

وإذا نقصت الزاوية بين اتّجاه المجال المغناطيسيّ ومُتّجه طول الموصل (التيّار) عن (90°) أو زادت عنها؛ فإنّ مقدارَ القوّة المغناطيسيّة يقلُّ حتى يصبح صفرًا عندما تصبح الزاوية (θ) صفرًا أو (180°).

أتحقّق: أوضّح المقصودَ بمُتّجه طول الموصل، وأبيّنُ كيف أحدّد اتّجاهه.

المثال 5

أحسبُ مقدار مجالٍ مغناطيسيٍّ يؤثّر بقوّةٍ (75 mN) في سلكٍ طولهُ (5 cm)؛ يحملُ تيّارًا كهربائيًّا (3 A) ويصنع زاوية (90°) مع المجال المغناطيسيّ.

المُعطيات: $F_B = 75\ \text{mN},\ L = 5\ \text{cm},\ I = 3\ \text{A},\ \theta = 90^\circ$

المطلوب: $B = ?$

الحلّ:

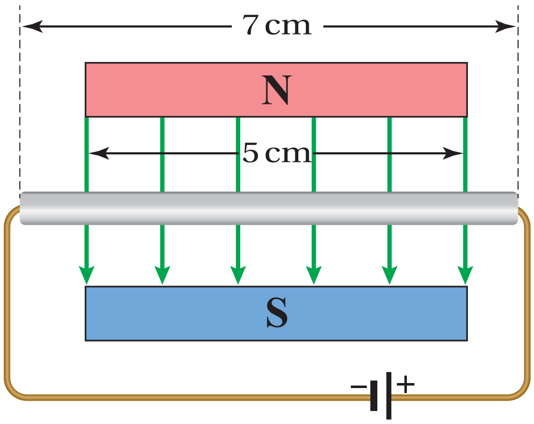
$$B = \frac{F_B}{IL\sin\theta} = \frac{75\times10^{-3}}{3\times5\times10^{-2}\times1} = 0.5\ \text{T}$$

المثال 6

يبيّنُ الشكلُ (13) سلك ألمنيوم طولهُ (7 cm) يحمل تيّارًا (5.2 A)؛ جزءٌ منه داخل مجال مغناطيسيّ (250 mT) وعموديٌّ عليه. معتمدًا على بيانات الشكل؛ أجد ما يأتي:

أ) اتّجاه القوّة المغناطيسيّة المؤثّرة في السلك.

ب) مقدار القوّة المغناطيسيّة المؤثّرة في السلك.



الشكل (13): سلك ألمنيوم يسري فيه تيّار كهربائيّ مغمور في مجال مغناطيسيّ منتظم.

المُعطيات:

$L = 5 \times 10^{-2}\ \text{m},\ B = 0.25\ \text{T},$

$I = 5.2\ \text{A},\ \theta = 90°$

المطلوب:

$F_B = ?$

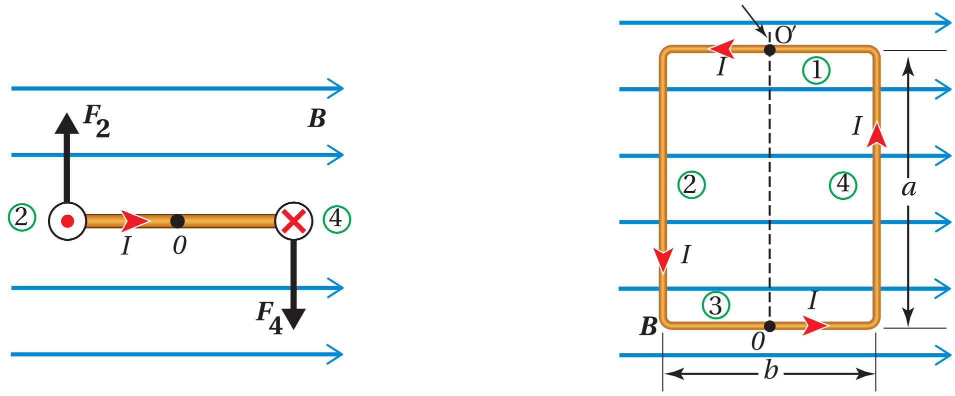
الحلّ:

أ) باستخدام قاعدة اليد اليمنى: مُتّجه طول الموصل نحو اليسار $(-x)$، واتّجاه المجال المغناطيسيّ نحو الأسفل $(-y)$؛ بذلك يكون اتّجاه القوّة المغناطيسيّة خارجًا من الصفحة وعموديًّا عليها نحو الناظر $(+z)$.

ب) أستخدمُ طولَ الجزء المغمور داخل المجال المغناطيسيّ فقط من السلك.

$F_B = IBL \sin \theta$

$F_B = 5.2 \times 0.25 \times 5 \times 10^{-2} \times 1 = 6.5 \times 10^{-2}\ \text{N}$



(أ): منظر علويٌّ للحلقة، يُبيّن أضلاعها الأربعة وخطوط المجال.

(ب): منظر جانبي للحلقة يُبيّن الضلع (3) والقوى المغناطيسيّة.

الشكل (14): حلقةٌ مستطيلةٌ تحمل تيّارًا كهربائيًّا؛ قابلةٌ للدوران في مجالٍ مغناطيسيٍّ مُنتظم.

العزم المؤثّر في حلقةٍ تحملُ تيّارًا في مجالٍ مغناطيسيٍّ مُنتظم

Torque on a Current Loop in a Uniform Magnetic Field

درستُ الحركةَ الدورانيّة بداية الكتاب، وعرفت أنّ العزم يُعطى بالعلاقة:

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{r} \times \boldsymbol{F}$$

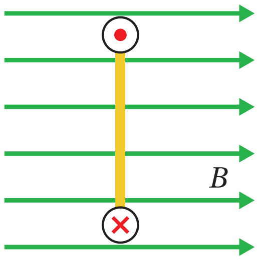
$$\tau = r\,F \sin\theta$$

يوضّح الشكل (14/أ) منظرًا علويًّا لحلقةٍ مُوصلةٍ مستطيلةٍ طولُها a وعرضُها b؛ تحمل تيارًا كهربائيًّا (I)، موضوعةٌ أفقيًّا في مجالٍ مغناطيسيٍّ مُنتظم، خطوطهُ توازي مستوى الحلقة. ألاحظُ أنّ الضلعين 1 و3 لا يتأثّران بقوًى مغناطيسيّةٍ؛ لأنّ مُتّجه طول الموصل يوازي خطوط المجال، بينما يتأثّر الضلعان 2 و4 بقوّتين مغناطيسيّتين ($\boldsymbol{F}_2, \boldsymbol{F}_4$)، لأنّ مُتّجه طول الموصل يتعامد مع خطوط المجال ($\theta = 90°$)، والشكل (14/ب) يُبيّن منظرًا جانبيًّا للحلقة يظهر فيه اتّجاهُ هاتين القوّتين، كما ألاحظُ أنّهما تؤثّران باتّجاهين مُتَعاكسين، وخطّا عملهُما غير مُنطبقين. وحيث إنّ مقداريهما متساويان حسب العلاقة:

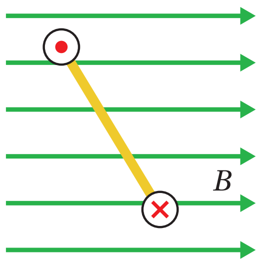
$$F_2 = F_4 = IaB$$

فهما تُشكّلان ازدواجًا يعمل على تدوير الحلقة مع اتّجاه دوران عقارب الساعة، حول محورٍ ثابتٍ (OO')؛ يقعُ في مستوى الحلقة.

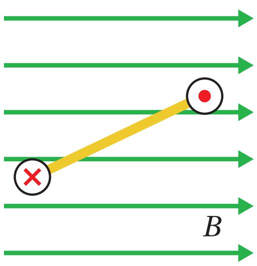
أتحقّق: يبيّن الشكلُ (15) مشاهد لمقطعٍ جانبيٍّ تظهرُ فيه الحافّةُ القريبةُ من الناظر لحلقةٍ تحملُ تيّارًا كهربائيًّا، موضوعةٍ في مجالٍ مغناطيسيٍّ أفقيّ. أُحدّدُ اتّجاه الدوران في كلّ حالة (إن وجد).



(أ)



(ب)

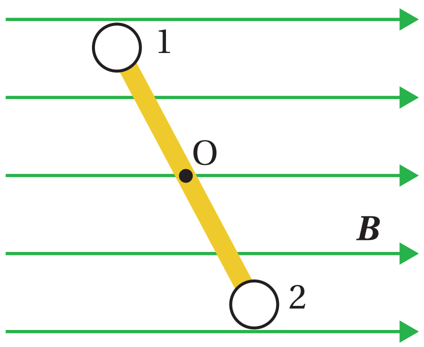


(جـ)

الشكل (15): ثلاثة مشاهد جانبيّة لحلقةٍ يسري فيها تيّار كهربائيّ، داخل مجال مغناطيسيٍّ مُنتظم.

المثال 7

حلقةٌ مستطيلةُ الشكل يسري فيها تيّار ملقاةٌ داخل مجالٍ مغناطيسيٍّ مُنتظم كما يبيّن الشّكل (16). إذا علمتُ أنّ الحلقة تدور بعكس حركة عقارب الساعة حول محور عمودي على مستوى الصفحة ويمر بالنقطة (O)، فأُحدّدُ اتّجاه التيّار في كلّ من الضلعين 1 و 2 .



الشكل (16): منظر جانبي لحلقة تحمل تيارًا كهربائيًّا في مجالٍ مغناطيسيٍّ مُنتظم.

المُعطيات: الشكل واتّجاه دوران الحلقة.

المطلوب: اتّجاه التيّار في كلّ من الضلعين 1 و2.

الحلّ:

بما أنّ الحلقة تدور بعكس اتّجاه حركة عقارب الساعة؛ فإنّ الضلع (1) في الحلقة يتأثّر بقوة مغناطيسية باتّجاه $(-y)$ بينما القوّة المغناطيسية المؤثّرة في الضلع (2) تكون باتّجاه $(+y)$. وباستخدام قاعدة اليد اليمنى يكون التيّار في الضلع (1) باتّجاه $(-z)$ والضلع (2) باتّجاه $(+z)$.

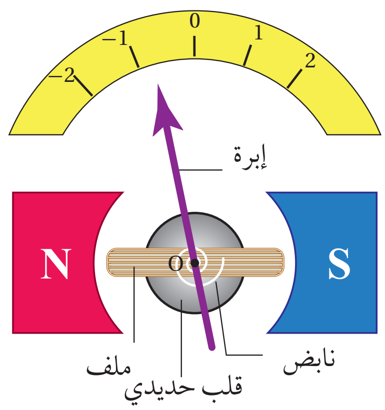
تطبيقاتٌ تكنولوجية:

1- الغلفانوميتر Galvanometer

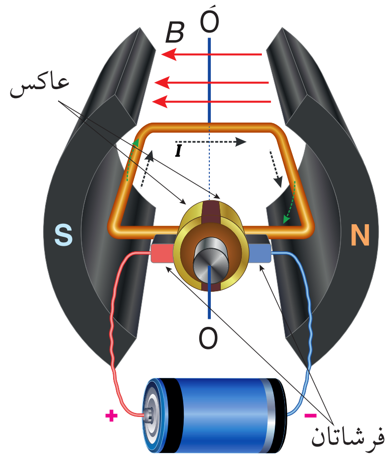
الغلفانوميتر أداةٌ تستخدم للكشف عن التيّار الكهربائيّ وقياسه، صنع قبل 200 سنةٍ تقريبًا، ثم تطوّرت صناعته. النوع المُستخدَم منه الآن يسمى الغلفانومتر ذو الملف المُتحرّك الذي يمكنه قياس تيّاراتٍ صغيرةٍ جدًّا (μA). يعتمد في عمله على العزم الذي يؤثّر به المجال المغناطيسيّ المنتظم في ملفٍّ قابلٍ للدوران عند مرور تيّار كهربائيٍّ فيه.

أجزاء الغلفانوميتر ووظائفها:

1. قطبا مغناطيس متقابلان بينهما مجال مغناطيسيّ؛ يؤثّر بقوّةٍ مغناطيسيّة في الملف عند سريان تيّار كهربائيّ فيه، كما في الشكلُ (17).
2. ملفٌّ مستطيلٌ من سلكٍ نُحاسيٍّ رفيع معزولٍ مغمورٍ في المجال المغناطيسيّ. عند مرور تيّار كهربائيٍّ في الملف يتأثّر بعزم ازدواجٍ فيدور حول محورٍ يمرُّ بالنقطة (O) وعموديٌّ على الصفحة، وتدور معه إبرةٌ تشيرُ إلى تدريج مُعيّنٍ يتناسب مع قيمة التيّار.



الشكل (17): الغلفانوميتر ذو الملف المتحرك.



الشكل (18): أجزاء المحرك الكهربائيّ الرئيسة.

3. قلبٌ حديديٌّ داخل الملف وظيفتهُ تركيزُ المجال المغناطيسيّ في الملفّ؛ لأن الحديد مادّة مغناطيسية تسمح بنفاذية عالية لخطوط المجال المغناطيسي (سأتعرّف ذلك في الدرس الثاني).

4. نابضٌ حلزونيٌّ مثبّتٌ في أحد طرفي المحور. وظيفته إرجاع الملفّ إلى وضع الصفر بعد توقُّف مرور التيّار الكهربائيّ فيه.

2- المحرّك الكهربائيّ Electric Motor

جهازٌ يحوّل الطاقة الكهربائيّة إلى طاقةٍ حركيّة، يُستخدَم في كثيرٍ من التطبيقات؛ مثل السيارة الكهربائيّة. يتكوّن المحرّكُ الكهربائيّ كما يبيّن الشكلُ (18) من الأجزاء الرئيسة الآتية:

1. قطبا مغناطيس متقابلان يولّدان مجالًا مغناطيسيًّا.

2. ملفٌّ من سلكٍ نُحاسيٍّ معزولٍ ومغمورٍ في مجالٍ مغناطيسيٍّ يؤدي إلى دورانه حول محور (OO') نتيجة تأثُّره بعزمٍ عند مرور تيّار كهربائيّ فيه نتيجةً للقوّة المغناطيسيّة المؤثّرة فيه.

3. العاكس؛ وهو نصفا أسطوانةٍ موصلة، يتّصل كُلُّ نصفٍ بأحد طرفي الملفّ، وظيفتهُ توصيل التيّار الكهربائيّ إلى الملف وعكس اتّجاهه كل نصف دورة.

4. فرشاتان من الكربون تُلامسان العاكس وتتّصلان بمصدر التيّار، فتنقُلانه إلى العاكس، وعند دوران الملفِّ يحدُث تبديلٌ في تلامُس إحدى الفرشاتين مع أحدِ نصفي العاكس كُلَّ نصفِ دورةٍ، فينعكسُ اتّجاه التيّار الكهربائيّ في الملفّ وتنعكس القُوى المغناطيسيّة المؤثّرة فيه فيواصل دورانه باتجاه واحد.

تعتمد سرعة دوران المُحرّك الكهربائيّ على العزم الذي تُولّدهُ القوّة المغناطيسيّة على الملف.

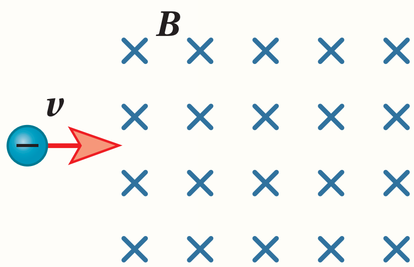
الربط مع الفضاء

تحتاج الأقمار الصناعية لضبط توجيهها من حين إلى آخر؛ لذا تُزوَّد بملفاتٍ يجري إيصالها بالتيار عند الحاجة؛ فيؤثّر المجال المغناطيسيّ الأرضيّ فيها بعزمٍ يعمل على تدوير القمر الصناعي لضبط اتّجاهه. علمًا بأنّ مصدر التيّار هو الخلايا الشمسية.

مراجعة الدرس

1. **الفكرةُ الرئيسة:** أعرّفُ المجالَ المغناطيسيّ عند نقطة، وأذكر وحدة قياسه في النظام الدوليّ للوحدات. ثم أُعدّدُ خصائص خطوط المجال المغناطيسيّ.

2. **أستنتجُ وأفسّرُ:** يتحرّك إلكترونٌ باتّجاه محور $(+x)$، فيدخل مجالًا مغناطيسيًّا مُنتظمًا اتّجاهه مع محور $(-z)$؛ كما في الشكل. أستنتجُ اتّجاه القوّة المغناطيسيّة التي يؤثّر بها المجال في الإلكترون لحظة دخوله منطقة المجال، ثم أبيّن إن كانت هذه القوّة ستحافظ على اتّجاهها بعد أن يُغيّر الإلكترون موقعه، أم لا، وأفسّرُ إجابتي.



3. **أحلّلُ:** بالاعتماد على العلاقة الرياضية التي أستخدمها في حساب مقدار القوّة المغناطيسيّة التي يؤثّر بها مجالٌ مغناطيسيٌّ في شحنةٍ مُتحرّكةٍ فيه؛ أستنتجُ العوامل التي يعتمد عليها مقدارُ القوّة وأبيّنُ نوع العلاقة.

4. **أتوقّعُ:** ثلاث جُسيمات مشحونة: إلكترون، وبروتون، وأيون صوديوم (Na^+)؛ دخلت منطقةَ مجالٍ مغناطيسيٍّ مُنتظمٍ في جهاز مطياف الكتلة بالسرعة نفسها. كيف أُميّز كل جُسيم منها عن طريق اتّجاه الانحراف ونصف قُطر المسار؟ أوضّحُ إجابتي بالرسم.

5. أجيب عن السؤالين الآتيين، وأفسّرُ إجابتي:

أ . هل يمكنُ لمجالٍ مغناطيسيٍّ أن يجعل إلكترونًا يبدأ حركته من السكون؟

ب. هل ينحرف النيوترون عندما يتحرّكُ داخل مجالٍ مغناطيسيٍّ باتّجاه عموديٍّ عليه؟

6. **أحسبُ:** يتحرَّك بروتونٌ بسرعة $(4 \times 10^6\ m/s)$ في مجالٍ مغناطيسيٍّ مُنتظمٍ مقدارهُ $(1.7\ T)$؛ فيتأثّرُ بقوّةٍ مغناطيسيّةٍ $(8.2 \times 10^{-13}\ N)$. أجدُ قياس الزاوية بين مُتّجهي سرعة البروتون وخطوط المجال المغناطيسيّ.

الفكرة الرئيسة:

تحقّقت فائدةٌ كبيرةٌ من استخدام المغناطيس الكهربائيّ في التطبيقات التكنولوجيّة الحديثة، فالمجالُ المغناطيسيّ الناتج عنه يفوق مجالات المغانط الطبيعيّة بآلاف المرات، واستخداماتُ المجال المغناطيسيّ أحدثت تقدُّمًا كبيرًا في مجالات إنتاج الطاقة والطبّ والنقل وغيرها.

نتاجات التعلّم:

- أحلّلُ بياناتٍ تجريبيّةً وأدرس وصفيًا وكميًا المجال المغناطيسيّ الناشئ عن سريان تيّار كهربائيّ مستمرٍّ في كل من: موصلٍ مستقيمٍ طويل، ملفٍّ دائري، ملفٍّ لولبي.
- أطوّر رسومًا تخطيطيّة وتعبيراتٍ لفظيّةً؛ لأصف شكل خطوط المجال المغناطيسيّ الناتج عن مرور تيّار في كل من: موصل مستقيمٍ طويل، ملفٍّ دائري، ملفٍّ لولبي.
- أكتب -بالاعتماد على قانون بيو وسافار- معادلاتٍ رياضيّةً وأحسبُ المجال المغناطيسيّ الناتج عن موصلٍ مُستقيمٍ عند نقطةٍ، وعند مركز ملفٍّ دائريّ، وعند مركز ملفٍّ لولبيّ.
- أنفذُ استقصاءً عمليًا لتعرُّف خصائص القوّة المغناطيسيّة التي يؤثّر بها موصلٌ مستقيم يحمل تيّارًا في موصلٍ آخر موازٍ له.

المفاهيم والمصطلحات:

النفاذية المغناطيسية Magnetic Permeability
ملفٌّ لولبيّ Solenoid
مناطقُ مغناطيسيّة Magnetic Domains

المغناطيسُ الكهربائيّ Electric Magnet

لاحظتُ في الدرس السابق أنّ المجال المغناطيسيّ ينشأُ حول مغناطيسٍ دائم، لكنّ الاستخدام العمليّ والتطبيقات التكنولوجيّة في الغالب تعتمد على المغناطيس الكهربائيّ؛ إذ يمكنُ توليد مجالٍ مغناطيسيٍّ بتمرير تيّار كهربائيٍّ في مُوصل.

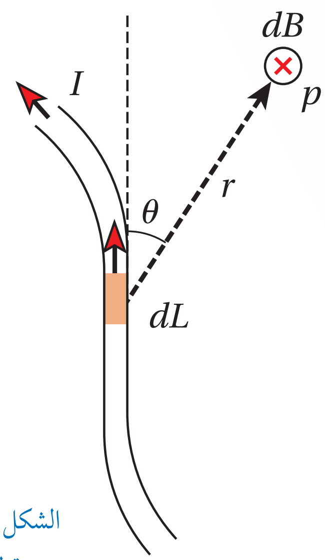
المجال المغناطيسيّ الناشئ عن موصلٍ يحملُ تيّارًا كهربائيًّا
Magnetic Field of a Current Carrying Conductor

أعلمُ أنّ الشحنةَ الكهربائيّة تُولّد حولَها مجالاً كهربائيًّا؛ سواءً أكانت ساكنةً أم متحركة. إضافةً إلى ذلك؛ فإنّ شحنةً كهربائيّةً مُتحرّكةً تُولّد حولَها مجالًا مغناطيسيًّا. هذا ما لاحظه العالم الدنماركي أورستد، عندما وضع بوصلة بالقرب من سلكٍ يمرُّ فيه تيّار كهربائيٌّ؛ فانحرفت إبرة البوصلة.

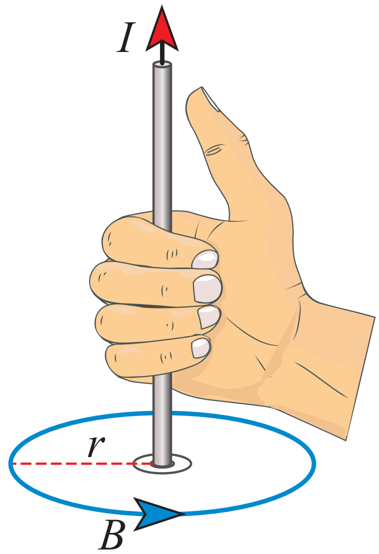
جان بيو J.Biot وفيليكس سافار F.Savart؛ عالمان فرنسيّان تابعا أبحاثهما في الموضوع نفسه، إلى أن توصّلا تجريبيًا إلى علاقةٍ رياضية لحساب المجال المغناطيسيّ الذي يولّده موصلٌ يحملُ تيّارًا كهربائيًّا، عُرفت العلاقة بقانون بيو-سافار، وهو:

$$dB = \frac{\mu_o}{4\pi}\,\frac{IdL\sin\theta}{r^2}$$

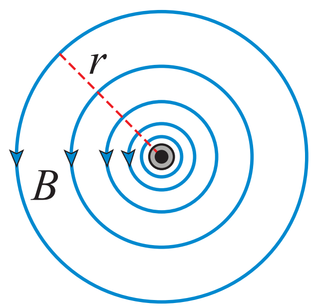
حيث (dB)؛ مقدار المجال المغناطيسيّ عند النقطة (P) الناشئ عن قطعة صغيرة (dL) من موصلٍ يسري فيه تيّار كهربائيّ (I). والمسافة؛ (r) هي مقدار المُتّجه الذي يمتدُّ من (dL) إلى النقطة (P) ويصنع زاوية (θ) مع مُتّجه الطول للقطعة (dL)، كما في الشكل (19).



الشكل (19): المجال المغناطيسيّ الجزئيّ الناتج عن قطعةٍ صغيرةٍ من موصلٍ يحمل تيّارًا كهربائيًّا.



(أ) : تحديد اتّجاه المجال المغناطيسيّ حول موصلٍ مستقيمٍ لا نهائيّ الطول باستخدام قاعدة اليد اليُمنى.



(ب): مقطع عرضيّ في الموصل.

الشكل (20): المجالُ المغناطيسيّ حول موصلٍ مستقيمٍ لا نهائيّ الطول يحمل تيّارًا كهربائيًّا.

يرمز (μ_o) إلى ثابت النفاذيـة المغناطيسيّـة للفراغ (أو الهـواء)، وقيمتـه ($4\pi \times 10^{-7}$ T.m/A)، ويعبّر مقدار **النفاذيّة المغناطيسيّة Magnetic permeability** عن قابلية الوسط لتدفُّق خطوط المجال المغناطيسيّ خلالـه. حيث تكونُ أقـلَّ نفاذيّـةً للفراغ وأكبرُهـا للحديد والموادّ المغناطيسيّة الأُخرى.

لحساب مقدار المجال المغناطيسيِّ عند نقطةٍ بالقرب من موصلٍ مُستقيمٍ لا نهائيِّ الطول يسري فيه تيّار كهربائيّ (I)، وعلى مسافة عموديّة (r) منه؛ نستخدم حساب التكامُل في الرياضيّات، فنجمع المجالات المغناطيسيّة الجزئيّة (dB) الناتجة عن جميع مقاطع الموصل، ونحصل على العلاقة الرياضية الآتية:

$$B = \frac{\mu_o I}{2\pi r}$$

تُعطي هذه العلاقة مقدار المجال المغناطيسيّ عند النقاط جميعها الواقعة على محيط دائرةٍ نصفُ قطرِها (r)، ويمرُّ الموصل في مركزها ويكون عموديًّا على مستواها، كما في الشكل (20/ أ). وألاحظ أنّ مقدار المجال المغناطيسيّ ثابتٌ عند كلّ نقطةٍ على محيط الدائرة. كما أستنتجُ من العلاقة السابقة أنّ مقدار المجال المغناطيسيّ عند نقطة مُعيّنة يتناسب طرديًّا مع التيّار وعكسيًّا مع بعد النقطة عن الموصل. الشكل (20/ ب) يبيّن خطوط المجال المغناطيسيّ الناتجة عن سلكٍ لا نهائيّ الطول، حيث تشكّل حلقاتٍ مغلقةً متّحدةَ المركز مع الموصل، تتباعد عن بعضها بعضًا كُلّما زادت المسافة r؛ وهذا يعني تناقصًا في قيمة المجال المغناطيسيّ.

لتحديد اتّجاه المجال المغناطيسيّ عند أيّ نقطة بالقرب من الموصل؛ أستخدم قاعدة اليد اليمنى، بحيث أمسكُ الموصل بيدي اليمنى واضعًا الإبهام باتّجاه التيّار، فيشير اتّجاه دوران باقي أصابعي إلى اتّجاه المجال المغناطيسيّ حول الموصل؛ كما في الشكل (20/ أ). تجدرُ الإشارة إلى أنّ المجال المغناطيسيّ عند أيّ نقطةٍ تقعُ على امتداد موصلٍ مُستقيمٍ ورفيعٍ يحمل تيّارًا كهربائيًّا يساوي صفرًا؛ حيث تكون الزاوية (θ) بين مُتّجه موقع النقطة ومُتّجه طول الموصل (الواردة في قانون بيو–وسافار)، تساوي صفرًا أو (°180)، ويكون ($\sin \theta = 0$).

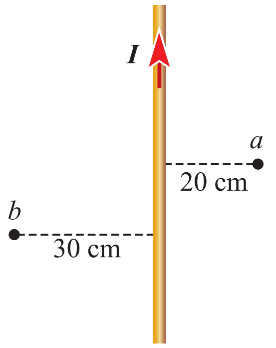
✔ **أتحقّق:** أصفُ شكلَ خطوط المجال المغناطيسيّ حول موصلٍ مستقيمٍ لا نهائيّ الطول يحمل تيّارًا كهربائيًّا، وأبيّن كيف أُحدّد اتّجاهه عند نقطة.

المثال 8

سلكٌ مستقيمٌ لا نهائيُّ الطول يحمل تيّارًا كهربائيًّا مقدارهُ $(3\,A)$، بالاعتماد على الشكل (21)؛ أجدُ:

أ) مقدار المجال المغناطيسيّ عند النقطة (a)، وأحدّد اتّجاهه.

ب) مقدار المجال المغناطيسيّ عند النقطة (b)،وأحدّد اتّجاهه.



الشكل (21): جزء من سلك مستقيم لا نهائي الطول يحمل تيارًا كهربائيًّا.

المعطيات: $I = 3\text{ A},\ r_a = 0.2\text{ m},\ r_b = 0.3\text{ m}$

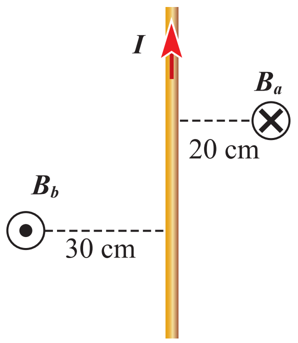
المطلوب: $\boldsymbol{B_a} = ?,\ \boldsymbol{B_b} = ?$

الحلّ:

أ) مقدار المجال عند النقطة (a).

$$B_a = \frac{\mu_o I}{2\pi r_a} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 3}{2\pi \times 0.2} = 3 \times 10^{-6}\text{ T}$$

وبتطبيق قاعدة اليد اليُمنى؛ أجد أنّ اتّجاه المجال المغناطيسيّ عند النقطة (a) يكون داخلاً في الصفحة وعموديًّا عليها. كما في الشكل (22).



الشكل (22): اتّجاه المجال المغناطيسيّ على جانبي سلك مستقيم لا نهائي الطول يحمل تيارًا كهربائيًّا.

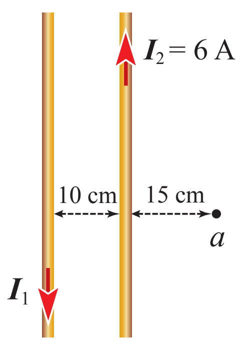
ب) مقدار المجال عند النقطة (b)

$$B_b = \frac{\mu_o I}{2\pi r_b} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 3}{2\pi \times 0.3} = 2 \times 10^{-6}\text{T}$$

وبتطبيق قاعدة اليد اليمنى نجد أنّ اتّجاه المجال المغناطيسيّ عند النقطة (b) يكون خارجًا من الصفحة وعموديا عليها، كما يبيّن الشكلُ (22).

المثال 9

سلكان مستقيمان لا نهائيًا الطولِ ومتوازيان، يحملان تيّارين كهربائيّين متعاكسين كما في الشكل (23). أجدُ مقدار التيّار (I_1) الذي يجعل المجال المغناطيسيّ المُحصّل عند النقطة (a) يساوي صفرًا.



الشكل (23): نقطةٌ في مجال سلكين متوازيين لا نهائيَّي الطولِ يحملان تيّارين كهربائيّين متعاكسين.

المعطيات: $B = 0,\ I_2 = 6\text{ A},\ r_2 = 0.15\text{ m},\ r_1 = 0.25\text{ m}$

المطلوب: $I_1 = ?$

الحلّ:

$$B_2 = \frac{\mu_o I_2}{2\pi r_2} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 6}{2\pi \times 0.15} = 8 \times 10^{-6}\text{ T}$$

اتّجاه المجال (B_2) عند النقطة (a) داخلٌ في الصفحة وعموديٌّ عليها، واتّجاه (B_1) خارجٌ من الصفحة وعموديٌّ عليها؛ فهما متعاكسان ومُحصّلتهما تساوي صفرًا، أيّ أنّهما متساويان مقدارًا:

$$B_1 = \frac{\mu_o I_1}{2\pi r_1} = B_2 = 8 \times 10^{-6}\ \text{T}$$

$$I_1 = \frac{2\pi \times 0.25 \times 8 \times 10^{-6}}{4\pi \times 10^{-7}} = 10\ \text{A}$$

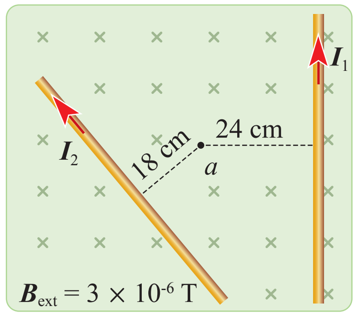
ملاحظة: يمكن حساب التيّار (I_1) بطريقة مُختصرةٍ؛ وذلك بمساواة مقداري المجالين لنحصل على:

$$\frac{I_1}{r_1} = \frac{I_2}{r_2} \Rightarrow I_1 = \frac{r_1 I_2}{r_2}$$

$$I_1 = \frac{0.25 \times 6}{0.15} = 10\ \text{A}$$

تمرين

بالاعتماد على الشكل (24)، إذا كان ($I_1 = I_2 = 6$ A)؛ أجد مقدار المجال المغناطيسيّ المُحصّل عند النقطة (a)، وأحدّدُ اتّجاهه.



الشكل (24): نقطةٌ تقع في منطقة المجال المغناطيسيّ لموصلين مستقيمين لا نهائيّي الطول.

المجال المغناطيسيّ الناشئ عن ملف دائري

Magnetic Field of a Circular Coil

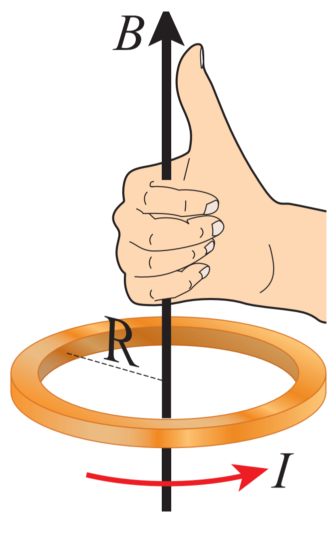
بإجراء التكامل على قانون بيو–سافار لحساب المجال المغناطيسيّ في مركز حلقةٍ دائريّةٍ نصفُ قُطرِها (R)، مصنوعةٌ من موصلٍ يحملُ تيّارًا كهربائيًّا، فإنّ:

$$B = \frac{\mu_o I}{2R}$$

وعند تشكيل الموصل على صورة ملفٍّ دائريٍّ نصفُ قطره (R) يتكوّن من عددٍ (N) لفّة؛ فإنّ مقدار المجال في مركزه يُعطى بالعلاقة:

$$B = \frac{\mu_o IN}{2R}$$

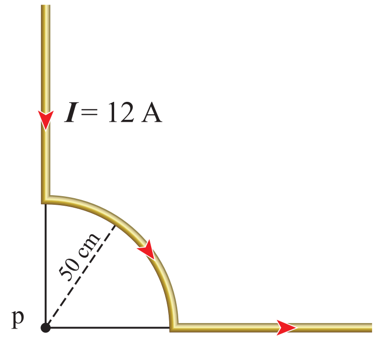
لتحديد اتّجاه المجال المغناطيسيّ في مركز ملفٍّ دائريٍّ؛ أستخدمُ قاعدة اليد اليُمنى، فعندما تشيرُ أصابع اليد الأربعة إلى اتّجاه التيّار في الملفّ، كما في الشكل (25)؛ فإنّ الإبهام يشير إلى اتّجاه المجال المغناطيسيّ عند مركز الملفّ.



الشكل (25): استخدام قاعدة اليد اليمنى لتحديد اتّجاه المجال المغناطيسيّ في مركز ملفٍّ دائريّ.

المثال 10

يتكوّن سلكٌ من جزءٍ يشكّل ربع دائرةٍ نصفُ قطرها $R = 0.5\ \text{m}$، وجزأين مستقيمين لا نهائيّيْ الطول، كما في الشكل (26). أحسبُ مقدار المجال المغناطيسيّ عند النقطة (P) وأحدّدُ اتّجاهه.



الشكل (26): المجال المغناطيسيّ لسلكٍ يتكوّن من ثلاثة أجزاءٍ يشكّل أحدُها ربع حلقةٍ دائريّةٍ تقعُ النقطةُ P في مركزها.

المُعطيات: $I = 12\ \text{A},\ R = 0.5\ \text{m},\ N = 0.25$

المطلوب: $B = ?$

الحلّ:

بالنسبة للجزء الذي يشكل ربع دائرة؛ يمكنني افتراض أنّ عدد اللّفات: $N = 0.25$

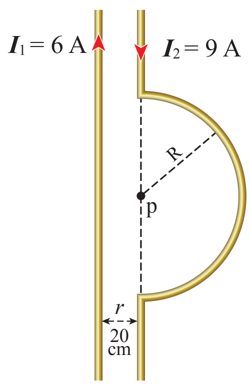
$$B = \frac{\mu_o IN}{2R} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 12 \times 0.25}{2 \times 0.5}$$

$$B = 3.8 \times 10^{-6}\ \text{T}$$

بالنسبة للجزأين المستقيمين؛ فإنّ النقطة (P) تقع على امتدادهما، لذلك يكون المجال المغناطيسيّ الناتج عنهما يساوي صفرًا. ألاحظُ أنّ قياس الزاوية (θ) يساوي صفرًا بالنسبة للجزء العُلويّ، ويساوي (°180) بالنسبة للجزء الأيمن. بتطبيق قاعدة اليد اليمنى يكون اتجاه المجال نحو (z−).

المثال 11

سلكان مستقيمان لا نهائيا الطول؛ يحتوي أحدهما على نصف حلقةٍ مركزُها (P)، ونصف قطرها $(0.2\ \pi\ \text{m})$، كما في الشكل (27). أجدُ المجال المغناطيسيّ المُحصّل عند النقطة (P) وأحدّدُ اتّجاهه.



الشكل (27): المجال المغناطيسيّ لسلكين متجاورين.

المُعطيات: $N = 0.5,\ r = 0.2\ \text{m},\ I_1 = 6\ \text{A},\ I_2 = 9\ \text{A},\ R = 0.2\pi\ \text{m}$

المطلوب: $B = ?$

الحلّ:

المجال الناتج عن السلك المستقيم لا نهائيّ الطول:

$$B_1 = \frac{\mu_o I_1}{2\pi r} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 6}{2\pi \times 0.2} = 6 \times 10^{-6}\ \text{T}$$

المجال الناتج عن الملفّ الدائريّ:

$$B_2 = \frac{\mu_o I_2 N}{2R} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 9 \times 0.5}{2 \times 0.2\pi} = 4.5 \times 10^{-6}\ \text{T}$$

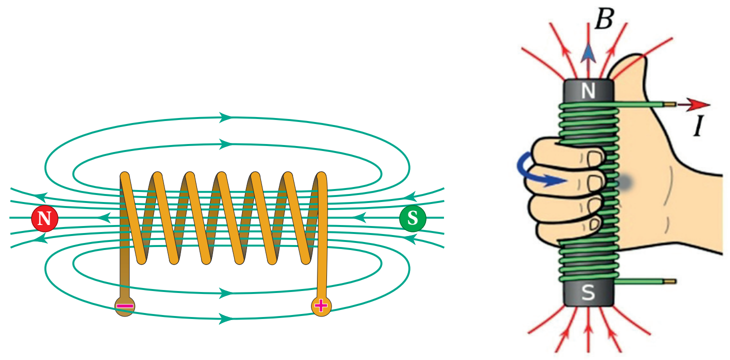
باستخدام قاعدة اليد اليمنى، أجدُ أنّ اتّجاه المجالين نحو داخل الصفحة وعموديٌّ عليها، ومقدارهُ:

$$B = B_1 + B_2 = 10.5 \times 10^{-6}\ \text{T}$$

الشكل (28):

(أ) : استخدام قاعدة اليد اليمنى لتحديد اتّجاه المجال المغناطيسيّ داخل ملفٍّ لولبيّ على امتداد محوره.

(ب):المجال المغناطيسيّ المنتظم داخل الملف اللولبي وبعيدًا عن جانبيه.



(أ) (ب)

المجالُ الناشئُ عن ملفٍّ لولبيّ يحملُ تيّارًا كهربائيًّا

Magnetic Field of a Solenoid Carrying a Current

الملفُّ اللولبيّ Solenoid سلكٌ موصلٌ ملفوفٌ في حلقاتٍ دائريّةٍ مُتراصّةٍ معزولةٍ عن بعضها بعضًا، ويأخذُ الملفُّ شكلاً أسطوانيًّا، كما في الشكل (28/ أ). عندما يسري فيه تيّار كهربائيٌّ فإنّه يولّد مجالًا مغناطيسيًّا يمكن حسابُ مقدارهِ على امتداد المحور داخل الملفّ وبعيدًا عن طرفيه باستخدام العلاقة الآتية:

$$B = \frac{\mu_o IN}{l}$$

وبقسمة عدد اللّفات الكُليّ (N) على طول الملف (l) نحصل على عدد اللّفات في وحدة الطول (n):

$$\frac{N}{l} = n$$

وعندها يمكن كتابة العلاقة السابقة على الصورة الآتية:

$$B = \mu_o In$$

باستخدام قاعدة اليد اليمنى؛ يمكنُني تحديد اتّجاه المجال المغناطيسيّ داخل الملفّ اللولبيّ؛ فعندما تُشير الأصابع الأربعة إلى اتّجاه التيّار في حَلَقات الملفّ، يشير الإبهام إلى اتّجاه المجال المغناطيسيّ داخله، كما في الشكل (28/ أ). ويحدد اتّجاه خطوط المجال المغناطيسيّ القطبُ الشماليّ للملفّ؛ فيكون شماليًّا في جهة خروج خطوط المجال وجنوبيًّا في جهة دخولها. وعندما تكون حَلَقات الملفّ اللولبيّ مُتراصّةً وطولُه أكبر بكثيرٍ من قطره؛ فإنّ المجال المغناطيسيّ داخله وبعيدًا عن طرفيه يكون منتظمًا، كما في الشكل (28/ ب).

✓ أتحقّق: ما صفات الملفّ اللولبيّ التي تجعلُ المجال المغناطيسيّ داخله مُنتظمًا؟

المثال 12

ملفٌّ لولبيٌّ طولهُ (0.5 m) يحتوي على (500) لفّة؛ أحسب مقدار المجال المغناطيسيّ داخله إذا كان يحمل تيارًا كهربائيًّا (11 A).

المُعطيات: $l = 0.5\ \text{m}, I = 11\ \text{A}, N = 500$

المطلوب: $B = ?$

الحلّ:

$$B = \frac{\mu_o IN}{l} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 11 \times 500}{0.5}$$

$$B = 1.38 \times 10^{-2}\ \text{T}$$

المثال 13

ملفٌّ لولبيٌّ يتكوّن من عدد لفّاتٍ بمعدّل (1400) في كُلّ مترٍ من طوله. إذا نشأ داخلهُ مجالٌ مغناطيسيٌّ مقدارهُ $(1.4 \times 10^{-2}\ \text{T})$؛ فما مقدار التيّار الكهربائيّ المارّ فيه؟

المُعطيات: $B = 1.4 \times 10^{-2}\ \text{T},\ n = 1400\ \text{m}^{-1}$

المطلوب: $I = ?$

الحلّ:

$$B = \mu_o In$$

$$I = \frac{B}{\mu_o n} = \frac{1.4 \times 10^{-2}}{4\pi \times 10^{-7} \times 1400} = 7.96\ \text{A}$$

تمرين

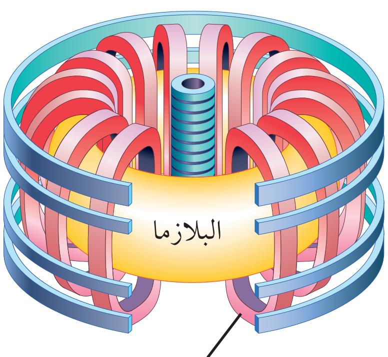
أحسبُ عدد اللّفات في ملفٍّ لولبيّ طولهُ $(3\pi\ \text{cm})$ يولّد بداخله مجالًا مغناطيسيًّا مقدارهُ $(2 \times 10^{-3}\ \text{T})$ عند مرور تيّار (1.5 A) فيه.

أفكّر: بالاعتماد على العلاقة الرياضية الخاصة بالمجال المغناطيسيّ داخل ملف لولبي يسري فيه تيّار كهربائيّ؛ أبيّنُ أثر كُلٍّ ممّا يأتي في مقدار المجال المغناطيسيّ داخله:

- مضاعفة عدد اللّفات فقط.
- مضاعفة طول الملفّ فقط.
- مضاعفة عدد اللّفات وطول الملفّ معًا.

الربط مع التكنولوجيا

يُستخدَم المجال المغناطيسيُّ في احتواء وَقود الاندماج النوويِّ بعد تحويله إلى مادّةٍ مُتأيّنةٍ ذات درجة حرارة عالية جدًّا تُسمّى بلازما، كما يبيّنُ الرسم التوضيحيّ؛ حيث لا يُمكن لأيّ جسمٍ ماديٍّ احتواء هذا الوَقود بسبب الضغط العالي ودرجة الحرارة المرتفعة جدًّا (تقاربُ مليون درجة سلسيوس)؛ اللازمان لبدء تفاعُل الاندماج النوويّ.

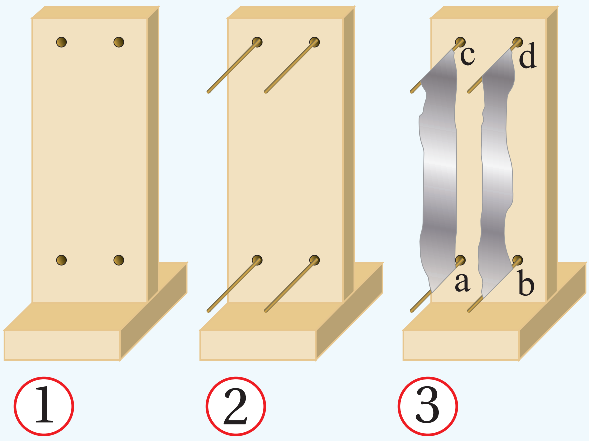


التجربة 2 استقصاء القوّة المغناطيسيّة التي يؤثّر بها موصلٌ مستقيمٌ يحملُ تيّارًا في موصلٍ آخر موازٍ له ويحملُ تيّارًا كهربائيًّا

الموادّ والأدوات: مصدرُ طاقةٍ كهربائيّةٍ (DC) منخفض القدرة، أسلاكُ توصيل، مقاومةٌ متغيّرة، ورقُ ألمنيوم، أسلاك نحاسية سميكة، قطعتا خشبٍ أبعادُهما ($8 \times 7 \times 2\ cm^3$)، ($18 \times 7 \times 2\ cm^3$)، جهازُ أميتر، مثقب.

إرشادات السلامة: الحذر عند التعامل مع مصدر الطاقة الكهربائيّة والتوصيلات.

خطوات العمل:



بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أُنفّذ الخطوات الآتية:

1. أثبّتُ قطعتي الخشب معًا؛ كما في الشكل (1)، وأثقبُ القطعة الكبيرة أربعة ثقوبٍ رفيعة.
2. أثبّت أربعةَ أسلاكٍ نُحاسيّةٍ سميكةٍ في الثقوب الأربعة كما في الشكل (2)، ثمّ أقصُّ شريطين من ورق الألمنيوم بطول (18 cm) وعرض (4 cm)، وأثبّت طرفيهما على الأسلاك النُّحاسية بثَنيِها حول الأسلاك.
3. أصلُ النقطتين a, b معًا مع القطب الموجب للمصدر عن طريق المقاومة المُتغيّرة، وأصلُ النقطتين d, c معًا مع القطب السالب للمصدر.
4. **ألاحظ:** أشغّلُ مصدر الطاقة على تيّار منخفضٍ مدّةً زمنيةً قصيرة، وأراقبُ ما يحدث لشريطي الألمنيوم.
5. **أضبطُ المتغيّرات:** أكرّر الخطوة (4) مرّتين إضافيتين؛ بخفض قيمة المقاومة المُتغيّرة، لزيادة التيّار في كُلّ مرة ومراقبة ما يحدث للشريطين، ثمّ أدون ملاحظاتي.
6. أعيدُ توصيل شريطي الألمنيوم، فأصلُ النقطة a مع القطب الموجب للمصدر عن طريق المقاومة المُتغيّرة، وأصلُ النقطة b مع القطب السالب للمصدر، وأصلُ النقطتين c و d معًا، ثم أُكرّر الخطوتين (4,5).

التحليلُ والاستنتاج:

1. أحدّدُ اتّجاهَ التيّار في كُلّ شريط ألمنيوم بناءً على طريقة التوصيل.
2. **أستنتجُ** اتّجاه القوّة المغناطيسيّة التي أثّر بها كلٌّ من الشريطين في الشريط الآخر.
3. **أُقارنُ** اتّجاه القوّة الذي استنتجُته من التجربة مع الاتّجاه الذي أتوصّلُ إليه بتطبيق قاعدة اليد اليمنى.
4. **أستنتجُ** علاقةً بين اتّجاه التيّار في كل من الشريطين ونوع القوّة المتبادلة بينهما؛ تجاذبٌ أم تنافر. ثم أبيّنُ مقدار التيّار ومقدار القوّة بين الشريطين.

القوّةُ المغناطيسيّةُ بين موصلين متوازيين

Magnetic Force Between Two Parallel Conductors

درستُ سابقًا أنّ الموصل الذي يحمل تيّارًا كهربائيًّا يولّد حوله مجالًا مغناطيسيًّا، ودرستُ أنّ المجال المغناطيسيّ يؤثّر بقوّةٍ في موصلٍ موضوعٍ فيه ويحمل تيّارًا كهربائيًّا. أستنتجُ من ذلك أنّ قوّةً مغناطيسيّةً تنشأُ بين موصلين متجاورين لا نهائيّيْ الطول يحملان تيّارين كهربائيّين.

ينشأُ مجالٌ مغناطيسيٌّ (B_1) حول الموصل الأيمن الذي يسري فيه تيّار (I_1)، في الشكل (29/ أ)، يُعطى مقدارهُ على مسافة (r) بالعلاقة:

$$B_1 = \frac{\mu_o I_1}{2\pi r}$$

وحيث إنّ الموصل الأيسر يقع في هذا المجال ويتعامد معه، ويمرُّ فيه تيّار كهربائيّ (I_2)؛ فإنّ جزءًا منه طوله (L) يتأثّر بقوّةٍ مغناطيسيّةٍ مقدارُها:

$$F_{12} = B_1 I_2 L$$

بتعويض قيمة (B_1)؛ أحصل على القوّة لكلِّ وحدة أطوال:

$$F_{12} = \frac{\mu_o I_1 I_2 L}{2\pi r} \rightarrow \frac{F_{12}}{L} = \frac{\mu_o I_1 I_2}{2\pi r}$$

بتطبيق قاعدة اليد اليمنى على الموصل الأيسر؛ حيث اتّجاه (B_1) عندهُ يكون نحو $(+z)$؛ أجدُ أنّ اتّجاه القوّة المغناطيسيّة المؤثّرة فيه يكون نحو اليمين $(+x)$.

في الشكل (29/ ب)؛ ينشأُ مجالٌ مغناطيسيٌّ (B_2) حول الموصل الأيسر الذي يسري فيه تيّار (I_2)، يُعطى مقداره على بُعد (r) بالعلاقة:

$$B_2 = \frac{\mu_o I_2}{2\pi r}$$

ونتيجةً لوجود الموصل الأيمن الذي يحمل تيّارًا كهربائيًّا (I_1) في هذا المجال وتعامده معه؛ فإنّ جزءًا منه طوله (L) يتأثّر بقوّةٍ مغناطيسيّةٍ تُعطى بالعلاقة الآتية:

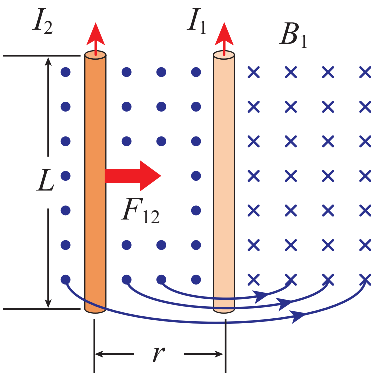
$$F_{21} = B_2 I_1 L$$

بتعويض قيمة (B_2)؛ أحصل على القوّة لكلِّ وحدة طول:

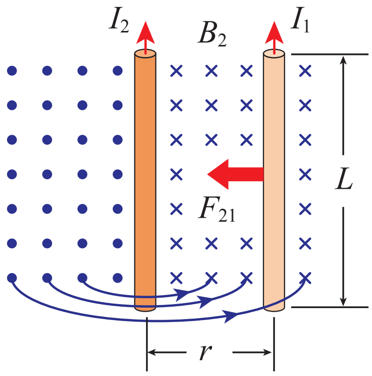
$$F_{21} = \frac{\mu_o I_1 I_2 L}{2\pi r} \rightarrow \frac{F_{21}}{L} = \frac{\mu_o I_1 I_2}{2\pi r}$$

بتطبيق قاعدة اليد اليمنى على الموصل الأيمن؛ حيث يكون (B_2) عنده باتّجاه $(-z)$؛ أجدُ أنّ اتّجاه القوّة المؤثّرة فيه يكون نحو اليسار $(-x)$.

أيّ أنّ القوّتين المُتبادلتين بين موصلين يحملان تيّارين كهربائيين بالاتّجاه نفسه تكون قوّة تجاذُب. أستنتجُ ممّا سبق أنّ القوّتين بين الموصلين متساويتان مقدارًا ومتعاكستان اتّجاهًا. وحسب القانون الثالث لنيوتن فإنّهما تشكلان زوجي فعلٍ وردّ فعلٍ. كما يبيّن الشكلُ (30) الذي يُمثّل مقطعًا عرضيًا في كلا السلكين. ويتناسب مقدار القوّتين طرديًا مع كل من التيارين والطول المشترك للسلكين، وعكسيًا مع البعد بينهما (r).

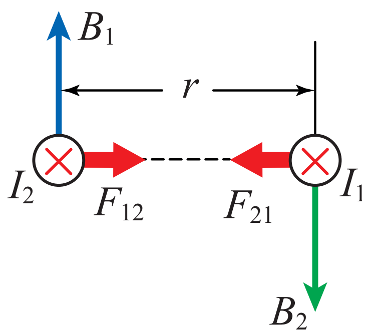


(أ) : المجال المغناطيسيّ (B_1) الناشئ عن (I_1) في الموصل الأيمن لانهائيّ الطول.



(ب): المجال المغناطيسيّ (B_2) الناشئ عن (I_2) في الموصل الأيسر لانهائيّ الطول.

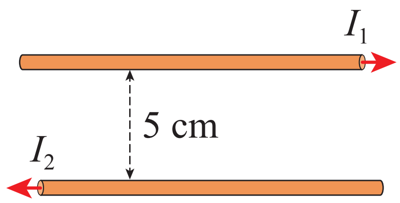
الشكل (29): موصلان مستقيمان متوازيان لانهائيا الطول، يحمل كُلٌّ منهما تيارًا كهربائيًّا.



الشكل (30): مقطعٌ عرضيٌّ في السلكين يبيّن اتّجاه قوّة التجاذُب المغناطيسيّة بينهما.

المثال 15

سلكان مستقيمان لا نهائيا الطول ومتوازيان تفصلهما مسافة (5 cm) يحمل السلك العلوي تيارًا كهربائيًّا (8.0 A)والسفلي (2.0 A)، كما في الشكل (31). أحسب مقدار القوّة المغناطيسيّة المتبادلة بين وحدة الأطوال من السلكين، وأحدد نوعها.



الشكل (31): سلكان مستقيمان لا نهائيا الطول ومتوازيان، يحمل كُلٌّ منهما تيّارًا كهربائيًّا.

المعطيات: $l = 1\text{m},\ \ I_1 = 8.0\text{ A},\ \ I_2 = 2.0\text{ A},\ r = 0.05\text{ m}$

المطلوب: $F = ?$

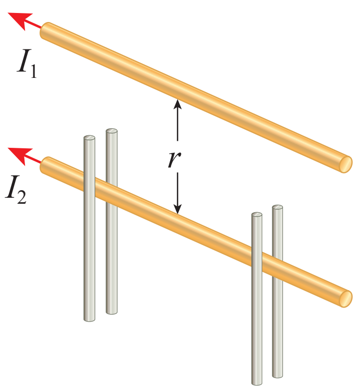
الحلّ:

$$F = \frac{\mu_o I_1 I_2 L}{2\pi r} \rightarrow \frac{F}{L} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 8 \times 2}{2\pi \times 0.05}$$
$$= 6.4 \times 10^{-5}\text{ N/m}$$

بتطبيق قاعدة اليد اليمنى؛ أجد أنّ القوّة بين السلكين هي تنافُر.

المثال 16

موصِلان متوازيان لا نهائيا الطول يحمل كُلٌّ منهما تيّارًا كهربائيًّا (200 A)؛ الموصل العُلويُّ مُثبّت، والسُّفليّ قابلٌ للحركة رأسيًّا، كما في الشكل (32). إذا علمتُ أنّ وزن وحدة الأطوال من الموصل السفلي (0.2 N/m)؛ أجد المسافة (r) التي تجعله مُتّزنًا.



الشكل (32): موصلان مستقيمان لا نهائيا الطول ومتوازيان.

المُعطيات: $I_1 = 200\text{ A},\ I_2 = 200\text{ A},\ \ F_g = 0.2\text{ N/m}$

المطلوب: $r = ?$

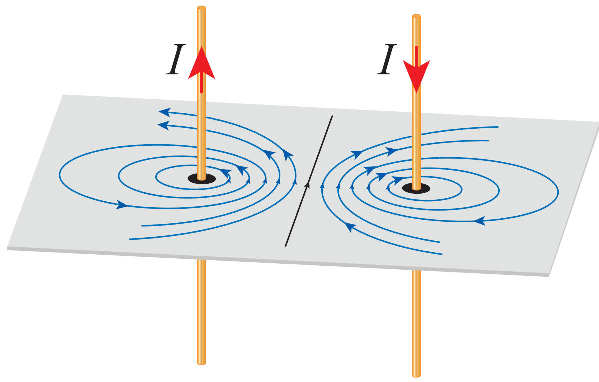
الحلّ:

عندما يتّزن الموصل السفليُّ، فإنّ مقدار وزن وحدة الأطوال منه يساوي مقدار القوّة المغناطيسيّة المؤثّرة لكُلّ وحدة طول.

$$F = F_g = 0.2\text{ N/m}$$

$$F = \frac{\mu_o I_1 I_2 L}{2\pi r} \Rightarrow r = \frac{\mu_o I_1 I_2 L}{2\pi F}$$

$$r = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 200 \times 200 \times 1}{2\pi \times 0.2} = 4 \times 10^{-2}\text{ m}$$



الشكل (33): خطوط المجال المغناطيسيّ بين موصلين متوازيين يحملان تيّارين كهربائيين مُتَساويي المقدار باتّجاهين مُتَعاكسين.

إذا وضعتُ موصلين متوازيين يحمل كلٌّ منهما تيارًا كهربائيًّا (I) باتّجاهين مُتعاكسين، ورسمت خطوط المجال المغناطيسيّ، كما في الشكل (33). تكون خطوط المجال في المنطقة بين الموصلين متقاربة، بينما تكون متباعدةً في المناطق الخارجية؛ أستنتجُ من الشكل أنّ اتّجاه القوّة المغناطيسيّة يؤثّر في كُلٍّ من الموصلين لنقله من منطقة المجال المغناطيسيّ القويّ إلى منطقة المجال المغناطيسيّ الضعيف؛ أيّ أنّ الموصلين يتباعدان، وهذا يتّفقُ مع قاعدة اليد اليمنى.

أفكّر: أرسم شكلًا مُشابهًا للشكل (33)، عندما يكون التيّاران في الموصلين بالاتّجاه نفسه، وأُبيّن فيه مناطق المجال القويّ والضعيف، وأحدّد اتّجاه القوة المغناطيسيّة المؤثرة في كُلّ موصل.

منشأُ المجال المغناطيسيّ:

لاحظتُ في ما سبق أنّ المجالات المغناطيسيّة جميعها ناتجةٌ عن حركة الشحنات الكهربائيّة، لكن؛ كيف يحدث ذلك في حالة المغناطيس الدائم؟ في المغناطيس الدائم توجد شحنات متحرّكة أيضًا، وهي الإلكترونات التي تدور حول نواة الذرة. ويمكن تصوُّر حركة الإلكترون حول نواة الذرة بأنّها تشكّل حلقةً صغيرةً جدًّا يسري فيها تيّار كهربائيٌّ وينتج عنها مجالٌ مغناطيسيّ. في بعض الموادّ تكونُ المجالات المغناطيسيّة في اتّجاهاتٍ مختلفةٍ وبشكلٍ عشوائيّ؛ بحيث تكون مُحصّلة المجال المغناطيسيّ صفرًا. أمّا في الموادّ المغناطيسيّة الدائمة؛ فإنّ المجالات المغناطيسيّة الناشئة عن الإلكترونات المُتحرّكة تؤدي إلى حقولٍ (مناطق) مغناطيسيّة Magnetic domains ينتُجُ عنها مجالٌ مغناطيسيٌّ مُحصّلٌ لا يساوي صفرًا؛ ولذلك ينشأ مجالٌ مغناطيسيٌّ للمغناطيس الدائم.

مراجعة الدرس

1. **الفكرةُ الرئيسة**: أذكرُ العوامل التي يعتمد عليها مقدار المجال المغناطيسيّ الناتج عن مقطعٍ صغيرٍ من موصلٍ يحملُ تيّارًا كهربائيًّا، عند نقطةٍ بالقرب من هذا الموصل.

2. **أستنتجُ**: يتحرّك إلكترونٌ في الفضاء في خطٍّ مستقيم؛ ما المجالات الناشئةُ عنهُ؟

3. موصلان مستقيمان متوازيان لانهائيّا الطول؛ المسافة بينهما (30 cm)، يحمل أحدهما تيّارًا كهربائيًّا يساوي ثلاثة أمثال التيّار الذي يحمله الموصل الثاني. أُحدّد نقطةً على الخطّ العموديّ الواصل بينهما؛ ينعدم عندها المجال المغناطيسيّ عندما يكون التياران بالاتّجاه نفسه.

4. **أقارنُ**: أبيّنُ العوامل التي يعتمد عليها المجال المغناطيسيّ في مركز ملفٍّ دائريٍّ والعوامل التي يعتمد عليها المجال المغناطيسيُّ داخل ملفٍّ لولبيّ.

5. **أحسبُ**: ملفٌّ دائريٌّ من سلكٍ نحاسيٍّ عددُ لفّاته (100)، نصفُ قطرٍ كُلٍّ منها (8.0 cm)، ويحمل تيّارًا كهربائيًّا (0.4 A). أحسبُ مقدارَ المجال المغناطيسيّ في مركز الملفِّ.

6. **أحسبُ**: موصلٌ مستقيمٌ لا نهائيُّ الطول موضوعٌ على سطحٍ أُفقيٍّ يحملُ تيّارًا كهربائيًّا (50 A) يتّجهُ من الشمال إلى الجنوب؛ أحسبُ مقدارَ المجال المغناطيسيّ عند نقطةٍ على السطح تبعدُ (2.5 m) إلى الشرق من الموصل، وأُحدّد اتّجاهه.

التصويرُ باستخدام تقنية الرنين المغناطيسيّ (MRI)

يُعدُّ الأردن من أكثر الدول اهتمامًا بالصحة؛ لما لديه من كوادر بشريّة مؤهّلة، تمتلك القدرات والخبرات المتميّزة، ومرافق صحيّة شاملة حديثة، ومعدّات طبية؛ إذ تسعى المستشفيات في الأردنّ دائمًا إلى الحصول على أحدث التكنولوجيا الطبيّة، ومنها أجهزة التصوير بالرنين المغناطيسيّ.

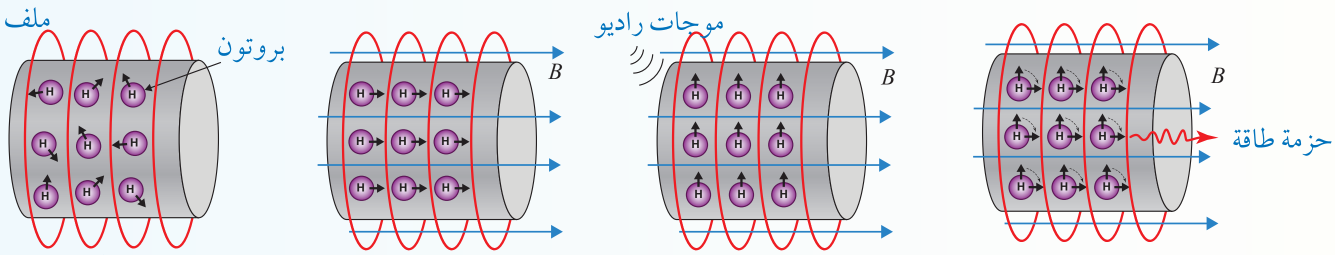
التصوير بالرنين المغناطيسيّ Magnetic resonance imaging (MRI) تقنيةٌ غير جراحيّةٍ تنتجُ صورًا تشريحيّةً واضحةً ثلاثيّةَ الأبعاد لجسم الإنسان، تساعدُ في الكشف عن الأمراض وتشخيصها. يتكوّن جهاز الرنين المغناطيسيّ من ثلاثة أجزاءٍ رئيسةٍ هي؛ ملفّاتٌ مغناطيسيّة، ومصدر موجات راديو، وجهاز حاسوب.

تحتوي خلايا جسم الإنسان على نسبةٍ كبيرةٍ من الماء الذي يتكوّن من الأكسجين والهيدروجين، ولكلِّ ذرّة هيدروجين عزمٌ تناقطبيٌّ مغناطيسيّ. وفي غياب مجالٍ مغناطيسيٍّ خارجيٍّ تكون اتّجاهاتُ العزوم المغناطيسيّة في الجسم موزّعةً في الاتّجاهات كافّةً بشكلٍ عشوائي، كما في الشكل (أ).

خطواتُ عمل الجهاز:

- تولّد الملفاتُ مجالًا مغناطيسيًّا خارجيًّا يخترق الجسم، مؤدّيًا إلى اصطفاف العزوم المغناطيسيّة لذرّات الهيدروجين في اتّجاهِ المجال المغناطيسيّ نفسه، وتصبح في وضع اتّزان، الشكل (ب).
- يُطلق مصدرُ موجات الراديو نبضةً من الموجات تخترق الجسم؛ فتؤدّي إلى انحراف العزوم المغناطيسيّة لذرات الهيدروجين بزاوية (90°) عن اتّجاه المجال المغناطيسيّ الخارجي، الشكل (جـ).
- عند توقُّف نبضة موجات الراديو تبدأ العزوم بالعودة للاصطفاف باتّجاه المجال المغناطيسيّ الخارجيّ، وينتُج عن ذلك انبعاثُ حزمةٍ من الموجات الكهرمغناطيسيّة تلتقطها مستشعرات التصوير وتحوّلها عن طريق برمجيّاتٍ محوسبةٍ إلى صورٍ تشريحيّة، الشكل (د).

تختلف العزوم المغناطيسيّة في زمن عودتها إلى حالة الاتزان (الاصطفاف باتّجاه المجال المغناطيسيّ الخارجي)، وفي مقدار طاقة الموجات الكهرمغناطيسيّة التي تبعثها؛ وذلك حسب تركيب النسيج والطبيعة الكيميائية للجزيئات فيه، وبذلك يتمكن الأطباء من التفريق بين الأنسجة المختلفة (السليمة والمصابة بمرض مُعيّن مثلا) بناءً على هذه الخصائص المغناطيسيّة.



(أ) العينة قبل تأثير المجال ⇐ (ب) عمل المجال المغناطيسيّ ⇐ (جـ) نبضة موجات الراديو ⇐ (د) التقاط الموجة

1. أضعُ دائرةً حول رمز الإجابة الصحيحة لكلّ جملة ممّا يأتي:

1. من العوامل التي يعتمد عليها مقدار القوّة المغناطيسيّة التي تؤثّر في جُسيمٍ مشحونٍ مُتحرّك؛ مقدارُ الشحنة وسرعةُ الجُسيم، حيث تزداد القوّة:

أ . بزيادة السرعة ونقص الشحنة. ب. بزيادة السرعة وزيادة الشحنة.

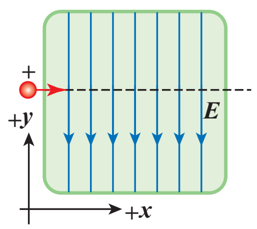
جـ. بنقص السرعة وزيادة الشحنة. د . بنقص السرعة ونقص الشحنة.

2. عند تمثيل المجال المغناطيسيّ المنتظم بخطوط مجال؛ فإنّها تتّصفُ بواحدة ممّا يأتي:

أ . خطوطٌ متوازيةٌ والمسافات بينها متساوية. ب. خطوطٌ متوازيةٌ والمسافات بينها غير متساوية.

جـ. خطوطٌ مُنحَنيةٌ تشكّل حلقاتٍ مُقفَلة. د . خطوطٌ مُنحَنيةٌ تشكّل حلقاتٍ غير مقفلة.

3. يتحرّك أيونٌ موجبٌ باتّجاه محور $(+x)$، داخل غرفة مُفرغة فيها مجالٌ كهربائيٌّ باتّجاه $(-y)$،كما في الشكل. في أيّ اتّجاه يجب توليد مجالٍ مغناطيسيٍّ بحيث يمكن أن يؤثّر في الجُسيم بقوّةٍ تجعلهُ لا ينحرف عن مساره؟



أ . باتّجاه محور $(+y)$، للأعلى.

ب. باتّجاه محور $(-y)$، للأسفل.

جـ. باتّجاه محور $(+z)$، نحو الناظر.

د . باتّجاه محور $(-z)$، بعيدًا عن الناظر.

4. يُستخدم المجال المغناطيسيّ لحساب الشحنة النوعية للجُسيمات، ماذا يُقصد بالشحنة النوعية؟

أ . نسبة كتلة الجُسيم إلى مربع شحنته. ب. نسبة شحنة الجُسيم إلى مربع كتلته.

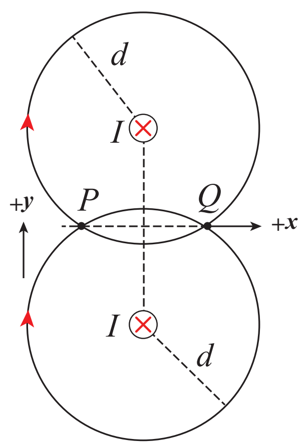
جـ. نسبة كتلة الجُسيم إلى شحنته. د . نسبة شحنة الجُسيم إلى كتلته.

5. عندما يتحرّك جُسيمٌ مشحونٌ حركةً دائريّةً في مجال مغناطيسيّ منتظم؛ متى يزداد نصف قطر المسار الدائري للجُسيم؟

أ . بزيادة المجال وزيادة الشحنة. ب. بزيادة الكتلة ونقص المجال.

جـ. بنقص الكتلة ونقص السرعة. د . بنقص الكتلة وزيادة المجال.

6. سلكان مستقيمان متوازيان لانهائيّا الطول؛ يحملان تيّارين متساويين وباتّجاه $(-z)$ داخل الصفحة؛ النقطتان (P,Q) تبعدان عن السلكَين مسافاتٍ متساوية، كما في الشكل. كيف يكون اتّجاه المجال المغناطيسيّ المُحصّل عند النقطتين (P,Q)؟



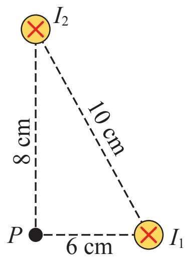
أ . عند (P) باتّجاه $(+x)$، وعند (Q) باتّجاه $(+y)$.

ب. عند (P) باتّجاه $(-x)$، وعند (Q) باتّجاه $(-y)$.

جـ. عند (P) باتّجاه $(+x)$، وعند (Q) باتّجاه $(-x)$.

د . عند (P) باتّجاه $(+y)$، وعند (Q) باتّجاه $(-y)$.

.2 **أفسّرُ:** مجالٌ مغناطيسيٌّ منتظمٌ باتّجاه $(+x)$، دخل جُسيمان مشحونان منطقة المجال بسرعة (v) باتّجاهٍ داخل الصفحة $(-z)$؛ فانحرف أحدهما باتّجاه محور $(+y)$، والثاني باتّجاه محور $(-y)$. أفسّرُ انحرافهما.



.3 **أحسبُ:** موصلان مستقيمان متوازيان؛ يحملُ كلٌّ منهما تيّارًا كهربائيًّا باتّجاهٍ داخلَ الصفحة، كما في الشكل. إذا كان تيّار الأول $(12\ A)$، وتيار الثاني $(40\ A)$. أحسبُ كُلًّا من:

أ . القوّةَ التي يؤثّر بها الموصل الثاني في وحدة الأطوال من الموصل الأول مقدارًا واتّجاها.

ب. المجالَ المغناطيسيَّ المُحصّل عند النقطة (P) مقدارًا واتّجاها.

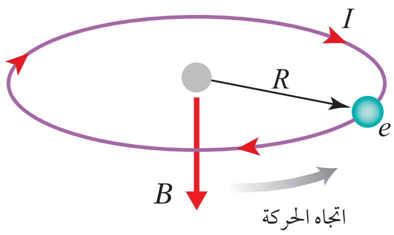
.4 **أحسبُ:** خطٌّ علويٌّ أفقيٌّ ناقلٌ للكهرباء يرتفع عن سطح الأرض $(10\ m)$، ويحمل تيّارًا كهربائيًّا $(90\ A)$ باتّجاه الشرق. أحسبُ مقدار المجال المغناطيسيّ الناشئ عن الخطّ الناقل وأحدد اتّجاهه في نقطتين تحت الخطّ الناقل:

أ . النقطة الأولى على بعد $(1.5\ m)$ منه. ب. النقطة الثانية على سطح الأرض.

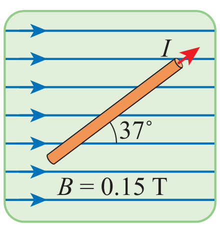
.5 **أحسب:** ملفٌّ لولبيٌّ طولهُ $(0.6\ m)$، يحتوي على (400) لفّةٍ متراصةٍ جيدًا. إذا مرّ فيه تيّار كهربائيّ $(8\ A)$، أجدُ مقدار المجال المغناطيسيّ داخل الملف عند نقطةٍ تقعُ على محوره.

.6 **تفكيرٌ ناقد:** أيونٌ موجبٌ شحنتهُ $(+e)$ يكمل 5 دوراتٍ في مجال مغناطيسيٍّ مُنتظمٍ $(5.0 \times 10^{-2}\ T)$ خلال مُدّةٍ زمنيّةٍ $(1.5\ ms)$. أحسبُ كتلة الأيون بوحدة (kg).

.7 **أقارنُ:** كيف أستخدم جُسيمًا مشحونًا لتمييز منطقةٍ مُحدّدة؛ إن كانت منطقةَ مجالٍ مغناطيسيٍّ أم مجالٍ كهربائيّ؟ أوضّح إجابتي بمثال.

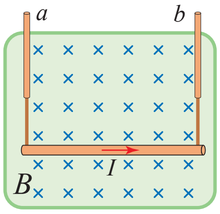


.8 **تفكير ناقد:** أفترضُ أنّ إلكترونَ ذرّة الهيدروجين يدور حول النواة (البروتون) في مسار دائريٍّ نصفُ قطره $(5.3 \times 10^{-11}\ m)$ تحت تأثير القوّة الكهربائيّة بينهما. تُشكّل حركةُ الإلكترون تيّارًا كهربائيًّا (اصطلاحيًّا) في حلقةٍ دائريّةٍ بعكس اتّجاه حركته، كما في الشكل. أحسبُ مقدار المجال المغناطيسيّ (B) الناتج عن هذه الحركة؛ علمًا بأنّ الزمن الدوري لحركة الإلكترون $(1.46 \times 10^{-16}\ s)$.



.9 موصلٌ مستقيمٌ يحملُ تيارًا كهربائيًّا $(8\ A)$ داخل مجالٍ مغناطيسيٍّ منتظمٍ كما في الشكل المجاور. أحسبُ مقدار القوّة المغناطيسيّة التي يؤثّر بها المجال المغناطيسيّ في وحدة الأطوال من الموصل، وأحدّدُ اتّجاهها.

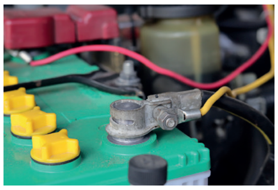
.10 ملفٌّ دائريٌّ نصفُ قطره $(6\ cm)$؛ يتكوّن من (20) لفّةً ويحمل تيّارًا كهربائيًّا $(12\ A)$. معلّقٌ رأسيًّا في مجالٍ مغناطيسيٍّ أُفقيٍّ مُنتَظم، مقدارهُ $(0.4\ T)$ تصنعُ خطوطه زاوية $(30°)$ مع العمودي على مستوى الملفّ. أجدُ مقدار عزم الازدواج الذي يؤثّر به المجال المغناطيسيّ المُنتَظم في الملف.



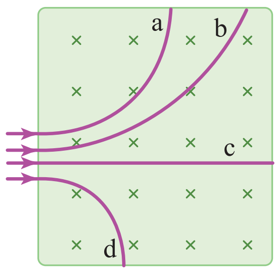
11. موصلٌ مستقيمُ الشكل طولهُ (0.45 m) وكتلتهُ (60 g)، في وضعٍ أُفقيٍّ مُعلّقٍ بواسطة سلكين رأسيين (a,b) ينقُلان له تيّارًا كهربائيًّا مقداره (5 A). حيث $(g = 9.8\ m/s^2)$.

أ . أحسبُ أقل مقدار للمجال المغناطيسيّ الذي يتعامد مع الموصل بحيث يجعل الشدّ في السلكين صفرًا.

ب . أحسبُ مجموع الشدّ الكُليّ في السلكين المذكورين عندما ينعكس اتّجاه التيّار الكهربائيّ في الموصل.



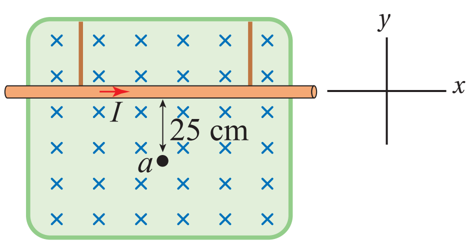
12. يصلُ سلكان نحاسيان في السيارة بين البطّارية وبادئ الحركة (السلف)، عند التشغيل يمرُّ في السلكين تيّار (300 A)«مدّةً قصيرة». ما مقدار القوّة المُتبادلة بين وحدة الأطوال من السلكين، بافتراض أنّهما متوازيان والمسافةُ الفاصلةُ بينهما (4 cm)؟ وهل تكون هذه القوّة تجاذبًا أم تنافرًا؟



13. دخلت أربعة جُسيماتٍ (a,b,c,d) منطقة مجالٍ مغناطيسيٍّ مُنتَظِمٍ بسرعاتٍ متساوية وباتّجاهٍ عموديٍّ على خطوطه كما في الشكل. أُحدّد أيًّا من هذه الجُسيمات يحملُ شحنةً موجبةً وأيّها يحمل شحنةً سالبة وأيّها لا يحمل شحنة، ثم أرتّب الجُسيمات a, b, d تصاعُديًّا حسب كتلتها. علمًا بأنّها متساوية في مقدار الشحنة.

14. ملفٌّ دائريٌّ من سلكٍ نُحاسيٍّ عددُ لفّاته (80)، نصفُ قطر كُلٍّ منها (10 cm)، ويحمل تيّارًا كهربائيًّا (5 A). أحسبُ مقدارَ المجال المغناطيسيّ في مركز الملفّ.

15. يتحرّكُ بروتونٌ في مسارٍ دائريٍّ نصفُ قطره (12 cm) داخل مجالٍ مغناطيسيٍّ مُنتَظِمٍ مقدارهُ (0.7 T)، يتعامدُ اتّجاهُ خطوطه مع مستوى المسار الدائري. أحسبُ السرعة الخطّية التي دخل فيها البروتون المجال.



$B = 2 \times 10^{-6}$ T

16. موصلٌ مستقيمٌ لانهائي الطول يحملُ تيّارًا كهربائيًّا (4 A)؛ معلّقٌ أفقيًا داخل مجالٍ مغناطيسيّ كما في الشكل. اعتمادًا على بيانات الشكل؛ أحسب ما يأتي:

أ . المجالُ المغناطيسيُّ المُحصّل عند النقطة (a).

ب . مقدارُ القوّةُ المغناطيسيّةُ المؤثّرةُ في 1 متر من الموصل المستقيم.

جـ . القوّةُ المغناطيسيّةُ المُحصّلةُ المؤثرةُ في جُسيمٍ شحنتهُ موجبةٌ مقدارُها $(2 \times 10^{-6}\ C)$ لحظةَ مروره بالنقطة (a) بسرعة $(6 \times 10^{4}\ m/s)$ باتّجاه محور $(-y)$.

مسرد المصطلحات

- **إزاحة زاويّة Angular Displacement:** هي التغيُّر في الموقع الزاويّ، وتساوي الزاوية التي يمسحُها نصف قطر المسار الدائريّ الذي يدورُ مع الجسم.

- **أمبير Ampere (A):** مقدار التيّار الكهربائيّ الذي يسري في موصلٍ عندما تعبُر مَقطَع هذا الموصل شحنةٌ مقدارُها (1 C) في ثانيةٍ واحدة.

- **تسارع زاويّ متوسّط Average Angular Acceleration:** هو نسبةُ التغيّر في مقدار السرعة الزاويّة إلى الزمن اللازم لحدوث هذا التغيّر.

- **تصادم غير مرنٍ Inelastic Collision:** تصادُمٌ لا يكونُ فيه مجموع الطاقة الحركيّة لأجزاء النظام قبل التصادُم مساويًا مجموعَ طاقتها الحركية بعد التصادُم؛ أي أنّ الطاقة الحركيّة للنظام غيرَ محفوظة.

- **تصادم مرن Elastic Collision:** تصادُمٌ يكونُ فيه مجموع الطاقة الحركية لأجزاء النظام قبل التصادُم مساويًا مجموعَ طاقتها الحركية بعد التصادُم؛ أي أنّ الطاقة الحركية للنظام محفوظةٌ.

- **الدفع Impulse:** هو ناتجُ ضربِ القوّة المُحصّلة المؤثّرة في الجسم في زمن تأثيرِها، ويُقاس بوحدة (N.s) حسب النظام الدولي للوحدات، وهو كمية متّجهة يكون باتّجاه تغير الزخَم الخطّي، أي باتّجاه القوّة المُحصّلة.

- **ذراع القوة Lever Arm:** هو البُعد العموديُّ بين خطّ عمل القوة ومحور الدوران.

- **زخَم خطّي Linear Momentum:** هو ناتج ضرب كتلة الجسم (m) في سرعته المتجهة ($\boldsymbol{v}$).

- **زخَم زاويّ Angular Momentum:** يساوي ناتج ضربِ عزم القصور الذاتي للجسم أو النظام في سرعته الزاويّة. وهو كميّةٌ مُتّجهةٌ.

- **سرعة زاويّة متوسّطة Average Angular Velocity:** هي نسبة الإزاحة الزاويّة ($\Delta\theta$) إلى الفترة الزمنية (Δt) التي حدثت خلالها هذه الإزاحة .

- **عزم Torque:** هو مقياس لمقدرة القوّة على إحداث دورانٍ لجسم، وهو كمّية مُتّجهة، رمزه ($\boldsymbol{\tau}$)، ويُعرّف رياضيًّا بأنه يُساوي ناتج الضرب المُتّجهيّ لمُتّجه القوة ($\boldsymbol{F}$) ومُتّجه موقع نقطة تأثير القوة ($\boldsymbol{r}$) الذي يبدأ من نقطةٍ على محور الدوران وينتهي عند نقطة تأثير القوة.

- **عزم القصور الذاتيّ Moment of Inertia:** مقياس لممانعة الجسيم لتغيير حالته الحركية الدورانيّة.

- **غلفانوميتر Galvanometer:** أداة تستخدم للكشف عن التيّار الكهربائي وقياسه.

- **فولت volt (V):** فرقُ الجُهد بين طرفي موصلٍ مقاومتُه (1 Ω) يسري فيه تيّار كهربائيٌّ (1 A).

- **قاعدة اليد اليمنى:** تُبسط اليد اليمنى، بحيث يشير الإبهام إلى اتجاه السرعة، وتشير باقي الأصابع إلى اتجاه المجال المغناطيسيّ، عندها يُحدّد اتجاه القوة بسهم يخرج من باطن الكف وعمودي عليه.

- **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 الجبري لتغيرات الجُهد عبر مكونات مسارٍ مُغلقٍ في دارةٍ كهربائيّةٍ يُساوي صفرًا.

- **قانون أوم Ohm's Law:** ينص "أنّ الموصل عند درجة الحرارة الثابتة ينشأُ فيه تيّار كهربائي (I) يتناسب طرديًّا مع فرق الجُهد بين طرفيه (ΔV).

- **قانون حفظ الزخَم الخطّي Law of Conservation of Linear Momentum:** ينصُّ على أنّهُ: "عندما يتفاعلُ جسمانِ أو أكثر في نظامٍ معزولٍ، يبقى الزخَم الخطّي الكليُّ للنظام ثابتًا". كما يُمكن التعبير عنه بأنّ: الزخَم الخطّي الكليَّ لنظامٍ معزولٍ قبل التصادُم مباشرةً يساوي الزخَم الخطّي الكليَّ للنظام بعد التصادُم مباشرةً.

- **قانون حفظ الزخَم الزاويّ Law of Conservation of Angular Momentum:** ينصُّ على أنَّ: "الزخَم الزاويّ لنظامٍ معزولٍ يبقى ثابتًا في المقدار والاتّجاه"، إذ يكونُ العزم المحصّل المؤثّر في النظام المعزول صفرًا.

- **قدرة كهربائية Electrical Power (P):** المعدلُ الزمنيّ للشُّغل المبذول، وتقاس بوحدة واط (watt).

- **قوة دافعة كهربائية Electromotive Force:** الشغل الذي تبذله البطّارية في نقل وحدة الشحنات الموجبة داخل البطّارية من قطبها السالب إلى قطبها الموجب.

- **مبرهنة (الزخَم الخطّي– الدفع) Impulse – Momentum Theorem:** تنصُّ على أنَّ: "دفعُ قوة محصّلةٍ مُؤثّرةٍ في جسمٍ يساوي التغيُّر في زخَمه الخطّي".
- **متّجه طول الموصل:** مُتّجه مقدارهُ يساوي طول الموصل واتّجاهه باتّجاه سريان التيّار الكهربائيّ في الموصل.
- **مجال مغناطيسي Magnetic Field:** عند نقطة: القوّة المغناطيسيّة المؤثّرة في وحدة الشحنات الموجبة لكلّ وحدة سرعة، عندما تتحرّك الشحنة بسرعة (1 m/s) باتّجاهٍ عموديٍّ على اتّجاه المجال المغناطيسيّ لحظة مرورها في تلك النقطة.
- **مجال مغناطيسي منتظم Uniform Magnetic Field:** مجال مغناطيسي ثابت المقدار والاتجاه عند نقاطه جميعها، يمكن تمثيله بخطوط متوازية والمسافات بينها متساوية.
- **محرّك كهربائي Electric Motor:** أداة لتحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة حركية، ويعمل على مبدأ عزم الدوران الناتج عن تأثير مجال مغناطيسي في ملف يسري فيه تيّار كهربائي.
- **مركز الكتلة Centre of Mass:** النقطة التي يُمكن افتراض كتلة الجسم كاملةً مُركّزةً فيها.
- **مسارع السينكروترون Synchrotron:** جهاز يستخدم لتسريع الجسيمات الذرية المشحونة مثل الإلكترون والبروتون، والأيونات إلى سرعات عالية.
- **مطياف الكتلة Mass Spectrometer:** جهازٌ يستخدم لقياس كتل الجُسيمات الذريّة لتحديد مكوّنات عيّنةٍ مجهولة.
- **مفهوم المجال المغناطيسي Magnetic Field Concept (B):** خاصية للحيّز المحيط بالمغناطيس، ويظهر في هذا الحيّز تأثير المجال على شكل قوى مغناطيسيّة تؤثّر في المغانط الأخرى والمواد المغناطيسيّة.
- **مقاومة كهربائية Electric Resistance (R):** نسبةُ فرق الجُهد بين طرفي أي جزء في الدارة الكهربائية إلى التيّار المارّ فيه.
- **مقاومة مكافئة Equivalent Resistance (R):** المقاومة الكلية التي تكافئ في مقدارها مجموعة مقاومات موصولة معًا على التوالي أو التوازي.

- **مقاومية المادة Resistivity (ρ):** مقاومةُ عيّنةٍ من المادة مساحة مقطَعِها ،وطولها (1 m) عند درجة حرارة معينة.

- **مواد لا أومية Non-ohmic Materials:** مواد تتغيّر مقاومَتها مع تغيُّر فرق الجُهد بين طرفيها، حتى عند ثبات درجة الحرارة.

- **موصل أوميّ Ohmic Conductors:** موصل يخضع لقانون أوم، وتكون العلاقة البيانية (التيّار- الجُهد) خطًّا مستقيمًا عند ثبوت درجة حرارة الموصل.

- **واط watt (W) :** قدرةُ جهازٍ كهربائيٍّ يستهلكُ طاقةً كهربائيةً بمقدار (1 J) كُلَّ ثانية.

جدول الاقترانات المثلّثية

tanθ	cosθ	sinθ	الزاوية
0.000	1.000	0.0000	صفر
0.018	1.000	0.018	1
0.035	0.999	0.035	2
0.052	0.999	0.052	3
0.070	0.998	0.070	4
0.088	0.996	0.087	5
0.105	0.995	0.105	6
0.123	0.993	0.122	7
0.141	0.990	0.139	8
0.158	0.989	0.156	9
0.176	0.985	0.174	10
0.194	0.982	0.191	11
0.213	0.978	0.208	12
0.231	0.974	0.225	13
0.249	0.970	0.242	14
0.268	0.966	0.259	15
0.287	0.961	0.276	16
0.306	0.956	0.292	17
0.325	0.951	0.309	18
0.344	0.946	0.326	19
0.364	0.940	0.342	20
0.384	0.934	0.358	21
0.404	0.927	0.375	22
0.425	0.921	0.391	23
0.445	0.914	0.407	24
0.466	0.906	0.423	25
0.488	0.899	0.438	26
0.510	0.891	0.454	27
0.531	0.883	0.470	28
0.554	0.875	0.485	29
0.577	0.866	0.500	30
0.604	0.857	0.515	31
0.625	0.848	0.530	32
0.650	0.839	0.545	33
0.675	0.829	0.559	34
0.700	0.819	0.574	35
0.727	0.809	0.588	36
0.754	0.799	0.602	37
0.781	0.788	0.616	38
0.810	0.777	0.629	39
0.839	0.766	0.643	40
0.869	0.755	0.656	41
0.900	0.734	0.669	42
0.932	0.731	0.682	43
0.966	0.719	0.695	44
1.000	0.707	0.707	45

tanθ	cosθ	sinθ	الزاوية
1.036	0.695	0.719	46
1.072	0.682	0.731	47
1.110	0.669	0.743	48
1.150	0.656	0.756	49
1.192	0.643	0.766	50
1.235	0.629	0.777	51
1.280	0.616	0.788	52
1.327	0.602	0.799	53
1.376	0.588	0.809	54
1.428	0.574	0.819	55
1.483	0.559	0.829	56
1.540	0.545	0.839	57
1.600	0.530	0.848	58
1.664	0.515	0.857	59
1.732	0.500	0.866	60
1.804	0.485	0.875	61
1.880	0.470	0.883	62
1.963	0.454	0.891	63
2.050	0.438	0.899	64
2.145	0.423	0.906	65
2.246	0.407	0.914	66
2.356	0.391	0.921	67
2.475	0.375	0.927	68
2.605	0.384	0.935	69
2.748	0.342	0.940	70
2.904	0.326	0.946	71
3.078	0.309	0.951	72
3.271	0.292	0.956	73
3.487	0.276	0.961	74
3.732	0.259	0.966	75
4.011	0.242	0.970	76
4.331	0.225	0.974	77
4.705	0.208	0.978	78
5.145	0.191	0.982	79
5.671	0.174	0.985	80
6.314	0.156	0.988	81
7.115	0.139	0.990	82
8.144	0.122	0.993	83
9.514	0.105	0.995	84
11.43	0.087	0.996	85
14.30	0.070	0.998	86
19.08	0.052	0.998	87
28.64	0.035	0.999	88
57.29	0.018	1.000	89
∞	0.000	1.000	90

قائمة المراجع (References)

1. Avijit Lahiri, **BASIC PHYSICS: PRINCIPLES AND CONCEPTS**, Avijit Lahiri, 2018 David Halliday, Robert Resnick , Jearl Walker, Fundamentals of Physics, Wiley; 11 edition 2018.

2. Douglas C. Giancoli, Physics: **Principles with Applications**, Jim Smith, 7th edition, 2014.

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

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

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

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

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

8. Raymond A. Serway, John W. Jewett, Jr, Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics, Physical Sciences: Mary Finch

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

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

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

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

13. Michael Smyth, Lynn Pharaoh, Richard Grimmer, Chris Bishop, Carol Davenport, **Cambridge International AS & A Level Physics**, Harper Collins Publishers Limited 2020.

14. Tom Andrews, Michael Kent, **Series Editor**: Dr Adam Boddison, **Cambridge International AS & A Level Mathematics, Mechanics**, Harper Collins Publishers Limited 2018.

Collins